

Biology and Management of
Invasive Alien Species in
Agriculture and Forestry

重要农林外来入侵物种 的生物学与控制

万方浩 郑小波 郭建英 主编



科学出版社

www.sciencep.com

主编简介(一)



万方浩 博士,男,1956年出生,研究员,博士生导师。现任中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所生物安全与生态农业首席研究员,所学术委员会副主任,农业部生物防治重点开放实验室主任,农业部外来入侵生物预防与控制研究中心常务副主任,国家“973”项目“农林危险生物入侵机理与控制基础研究”

首席科学家,农业部有突出贡献的中青年专家,入选农业部“神农计划”。任湖南农业大学、西南农业大学兼职教授,对外经济贸易大学技术新贸易措施研究中心兼职研究员,联合国环境发展署 STAP-GEF 项目专家组专家,国际生物防治组织(IOBC)亚太地区学会(APRS)副主席,国际生物防治组织“转基因生物在有害生物综合治理及生物防治系统中的作用与评价”全球工作组执委,国家农业转基因生物安全委员会委员,中国农业科学院学术委员会委员,中国植物保护学会、中国昆虫学会、中国生态学会、北京市昆虫学会常务理事。任“*Environmental Biosafety Research*”(法国)、《中国农业科学》、《昆虫学报》、《中国生物防治》、《昆虫知识》和《植物保护》编委。

从事生物入侵、转基因作物安全评价、昆虫生态学、生物防治以及综合治理方面的研究工作。目前主持国际国内重大科研项目有:国家“973”项目“农林危险生物入侵机理与控制基础研究”,国家科技基础条件平台面上项目“外来入侵物种的风险评估与生态经济影响评价”,十五攻关重大专项“农药污染控制技术”,农业部专项“外来入侵生物西花蓟马与少花蒺藜草的风险评估与控制技术”,农业部专项“外来入侵生物的生态风险评估、生物治理与生态恢复技术”,欧盟项目“转基因棉的环境生态风险评价”,瑞士发展与合作局项目“转基因植物生物安全评价技术指南”等。先后获省部级以上科研成果奖9项,在国内外专业期刊上发表学术论文130余篇,出版专著9部。




主 编 简 介 (二)

郑小波 博士,男,植物病理学科教授、博士生导师,校长、党委常委。1982年1月华南热带作物学院本科毕业,1990年6月南京农业大学植物病理学博士研究生毕业。1992年7月至1993年5月美国夏威夷大学植物病理学博士后。1993年6月至1998年7月先后任南京农业大学植保系副主任、主任,农业与生命科学学院副院长、教授、博士生导师。1998年7月起任南京农业大学副校长。2001年11月起担任南京农业大学校长。



主要研究方向为真菌病害控制基础、真菌遗传与分子生物学、入侵生物学、植物和病原真菌互作分子机制等。承担真菌分类学研究生学位课程教学工作。培养博士、硕士研究生30余名。“973”项目首席科学家。近年来承担“973”、“863”等各类科研课题20余项。在国内外专业期刊上发表学术论文100多篇,其中SCI论文11篇。主编和参编教材6部。先后获国家优秀教学成果一等奖1项,江苏省优秀教学成果特等奖1项,国家教委科技进步二、三等奖各1项,农业部科技进步二、三等奖各1项。先后获农业部有突出贡献中青年专家、全国优秀科技工作者、江苏省高校优秀学术带头人、江苏省青年科技标兵等荣誉称号,并入选教育部跨世纪优秀人才计划。

此外,还兼任中国菌物学会理事、中国植物病理学会理事、中国农学会常务理事、江苏省植物病理学会理事长等社会团体职务。



Digitized by the Internet Archive
in 2011 with funding from
Institute of Botany, CAS and Internet Archive

<http://www.archive.org/details/zhongyaononglinw00wanf>

主 编 简 介 (三)

郭建英 女, 硕士, 1973年11月出生。1995年7月南京大学生物系本科毕业。1997年7月南京大学生物科学与技术系动物学专业(昆虫学方向)硕士研究生毕业。1997年7月至今在中国农业科学院生物防治研究所、现中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所从事科研工作。现任该所生物安全研究室副主任, 副研究员。



主要研究方向为外来入侵生物和转基因作物的生物安全和风险评价、有益天敌利用和害虫综合治理。主持的项目有: 科技部“973”项目“农林危险生物入侵机理与控制基础研究”之子课题“农林危险生物紫茎泽兰生物种群的遗传分化与演变机制”, 国家环保总局项目“转基因植物及外来入侵物种对我国生物安全和生物多样性的影响调查及对策”, 国家十五攻关项目“农药污染控制技术”之子课题“提升麦棉复合生态系统自然调控生物灾害能力的技术与示范”, 美国农业部项目“黑角负泥虫天敌的调查研究”等。参加的项目有: 国家十五攻关项目“履行《生物多样性公约》的关键基础技术研究”之子课题“外来入侵农业病虫害调查和恶性杂草豚草防除技术示范研究”, 欧盟项目“转基因棉的环境生态风险评价”, 国家科技基础条件平台面上项目“外来入侵物种的风险评估与生态经济影响评价”等。获北京市科学技术二等奖和国家烟草专卖局科技进步三等奖各1项, 在国内外专业期刊上发表科技论文38篇, 参与专著3部, 主编1部。

中科院植物所图书馆



S0003916

78.181
109.1



中国科学院科学出版基金资助出版

重要农林外来入侵物种的 生物学与控制

万方浩 郑小波 郭建英 主编

**Biology and Management of Invasive Alien
Species in Agriculture and Forestry**

By

Fanghao Wan Xiaobo Zheng Jianying Guo

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了我国重要农林外来入侵物种的生物学特性与控制方法。全书分为总论、各论和农林外来入侵物种名录三大部分。总论部分介绍生物入侵的有关概念和国内外生物入侵的发生、预防与控制研究现状以及入侵机制的研究发展趋势。各论部分详细介绍我国目前 35 种最重要的农林外来入侵生物的分布与起源、生物学特性、识别特征与早期诊断、传入途径与入侵成因、危害现状与生态经济影响评估、风险分析与监测、预防控制措施。农林外来入侵物种名录附有 279 种农林外来入侵物种名录及其信息分析。

本书适用于相关领域的科研人员、大专院校师生、从事动植物检疫和农林研究的科研人员、行政官员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

重要农林外来入侵物种的生物学与控制/万方浩, 郑小波, 郭建英主编
—北京: 科学出版社, 2005
ISBN 7-03-014409-0

I. 重… II. ①万… ②郑… ③郭… III. 入侵种-生物控制-中国
IV. X17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 103093 号

责任编辑: 王 静 王日臣/责任校对: 钟 洋
责任印制: 钱玉芬/封面设计: 耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印刷

排版制作: 科学出版社编务公司

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2005 年 1 月第一次印刷 印张: 52 插页: 12

印数: 1~2 000 字数: 1 246 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(科印))

《重要农林外来入侵物种的生物学与控制》编委会

主 编 万方浩 郑小波 郭建英

编 委 (按姓氏笔画排序)

马 骏 刘树生 陈万权 骆有庆

谢丙炎 雷仲仁 戴小枫

《重要农林外来入侵物种的生物学与控制》
主要编写者名单

(按姓氏笔画排序)

丁 晖	万方浩	于 莉	马 骏	马瑞燕
孔祥波	王进军	王 音	王晓鸣	王鸿斌
王源超	冯 洁	古德祥	刘万学	刘凤权
刘太国	刘树生	吕 全	孙福在	成新跃
吴 岷	张友军	张古忍	张国良	张青文
张星耀	张 真	杨忠岐	陆永跃	陈万权
周易林	周 荣	罗 晨	郑小波	祝增荣
胡玉佳	胡白石	赵廷昌	骆有庆	徐海根
郭建英	商晗武	康振生	黄丽丽	黄焕华
彭德良	曾 玲	程家安	蒋明星	谢丙炎
谢 明	韩丽娟	雷仲仁	蔡青年	魏建荣

序

经济全球化、国际贸易自由化使得生物安全已成为各国国家安全的重要组成部分。一方面,农业物种资源的交换利用在得到巨大经济效益的同时,一些缺乏生态风险-效益评价、严格管理与监测的物种的引进,带来了难以挽回的巨大经济损失与生态损失;另一方面,全球自由贸易和旅游业的发展又为外来生物长距离迁移与入侵、传播与扩散到新的生境中创造了更加有利的条件。中国是一个生物灾害频繁的农业大国,外来入侵生物扩散蔓延,暴发成灾,新的疫情不断突发。生物入侵正成为威胁我国农林业生产、生物多样性与生态环境的重要因素之一。

我国对外来生物入侵的研究起步较晚,整体上明显落后于国际水平,基础研究薄弱。自“八五”以来,国家相关部门,如农业部及其所属科研单位就检疫性有害生物的风险分析与评估、检疫检验、生物学规律、除害处理和控制技术等开展了较为系统的研究。如在引进外来天敌昆虫控制外来杂草的传统生物防治系列研究中,对从国外引进取食豚草的豚草卷蛾,通过局部地区野外释放取得了良好的控制效果。目前我国有关外来入侵生物的预防与控制研究,已逐步受到各级政府部门和公众的高度重视,已成为生态学、生物多样性科学的一个研究热点。2002年,国家基础研究重点发展规划项目(973项目)“农林危险生物入侵机理与控制基础研究(2002CB111400)”已正式启动实施,与其他相关研究项目一道,对外来入侵生物在前所未有的深度和广度上展开了研究,取得了大量可喜的研究结果,初步形成了我国入侵物种的研究特色和理论技术体系。

外来入侵生物问题涉及面广,管理复杂,预防与控制难度大,其研究有别于传统的植物保护的理论和方法。《重要农林外来入侵物种的生物学与控制》一书,及时总结了国内外的相关研究成果,反映了国际上在这一领域的研究动态,它的出版无疑将进一步促进我国对外来生物入侵的预防与控制研究,对各级政府相关职能部门和广大从事外来入侵生物的管理和研究人员起到积极的指导作用。

本书所依据的文献资料全面翔实,从而全面反映了生物入侵的国内外历史沿阶、研究的方法与技术理论以及外来入侵生物预防与管理的国际合作体系,包括生物入侵的定义、入侵特点、国内外的入侵现状、入侵风险生态评估、入侵机制等。本书详细地总结了35种我国当前最重要的农林外来入侵生物的研究结果。另外,还包括了279种已入侵的和潜在的入侵物种的基本数据资料,这些可为该领域的研究与应用提供大量基础信息资源。

生物入侵的研究内容极其广泛和复杂,尽管如此,本书的内容基本可以体现入侵生物现有的发展理论和实践的整体概貌。某些方面难免缺乏深入介绍,但读者可以方便地利用所提供的文献信息资源。相信本书的问世,将会进一步促进我国生物安全,特别是生物入侵应用科学的发展。

郭予元

中国工程院院士
2004年4月于北京

前 言

生态环境日益恶化问题已经引起世界各国的广泛关注。随着研究的深入,越来越多的人开始认识到,外来入侵物种对生态、环境、经济等方面所造成的危害并不比诸如工业污染等因素所造成的危害小,而且随着全球经济一体化,这个问题也越来越严重。由于生物可不断地繁殖、更新和扩散,加上入侵生物门类繁多、生物学特性复杂,控制外来生物污染的难度在某种意义上甚至超过了控制化学和物理污染源。一个外来物种通过有意或无意的引入后,有可能因不能适应新的环境而被排斥在系统之外,也有可能因新的环境中没有相抗衡或制约它的生物,而成为真正的入侵者,可能从多个方面改变或破坏入侵地的生态环境。

我国地域辽阔,气候和地理条件高度多样化,具有丰富的本土生物资源,同时也为外来入侵物种的定殖生存提供了优良的天然条件。来自世界各地的大多数外来生物都可能在我国找到合适的栖息地。目前我国面临外来物种入侵的严峻形势。随着农业产业结构的重大调整,以提高经济效益、观光、环保等为主要目的大规模物种引进,使本土的生物多样性资源面临着前所未有的巨大压力,新入侵物种不断被发现,扩散蔓延之势严重。特别是在 WTO 框架内,植物检疫愈来愈成为各国保护本国农产品生产、促进本国农产品对外贸易、限制别国农产品进口的非关税技术性壁垒。

国际上关于生物入侵的研究早在 20 世纪中叶就开始了,以 Elton 在 1958 年完成的一部系统介绍生物入侵的经典专著 *The Ecology of Invasion by Animals and Plants* 作为起点,已有关于外来植物、杂草、鱼类、软体动物、甲壳动物、两栖爬行类、哺乳类和野生动植物疾病等的大量研究和出版物。虽然多年来我国海关和农林部门对检疫性病、虫、草较为重视,但生物入侵的概念传入中国只是近几年的事。目前我国生物入侵问题已受到各级政府和广大公众的广泛关注,其预防与控制已经成为越来越多科学研究工作者日益活跃的研究领域,有关生物入侵的研究结果也大量出现,研究内容逐步全面和深入。近 20 年来,对外来入侵生物的研究从宏观的预防与控制策略,深入到微观的分子生物学、分子生态学、生态遗传学、生物化学、生物数学和 3S(GIS、GPS、RS)技术等方法,使生物入侵机制的研究水平有了很大提高,促进了入侵生物学的发展。由此一些新的概念、假设与推论相继涌现,如最小种群理论、十数定则、入侵生物的前适应性理论、生态位与遗传多样性正比相关理论、生物群不协调理论、天敌逃逸理论、群落生物多样性理论、生态位机遇、入侵应力、繁殖体应力等。此外,发展了一些有实用价值的控制技术及特定生态系统的恢复与管理体制,初步形成了入侵生物学学科理论和方法的框架与体系。

外来入侵生物的预防与控制是一项需要全民参与的行为活动。对公众加强国家生物安全意识的宣传教育,是有效预防和控制生物入侵的基础工作。本书作为国家基础研究重点发展规划项目(973 项目)“农林危险生物入侵机理与控制基础研究(2002CB111400)”阶段性研究结果的总结,其编写目的是为了及时介绍和总结国内外有关生物入侵的研究成果,以期为我国生物入侵的预防与控制研究做出应有的贡献。参加本书编写工作的各

位同志均是目前国内从事生物入侵研究的一线科研人员，他们在项目的实施过程中，既掌握了大量国内外的文献信息，又取得了丰富的实践经验，在承担繁重研究工作的同时，挤出时间完成书稿的撰写工作，为本书的顺利出版做出了贡献，在此表示衷心的感谢！

书中引用了大量文献和图表，引用之处均指明了出处，在此对所引用文献的中外作者致以衷心的感谢。

由于作者学识和理解水平所限，书中定有许多不妥之处，加上出版时间仓促，错误和疏漏之处在所难免，恳切希望读者和同行批评指正，以期再版修订和完善。

万方浩

2004年4月于北京

目 录

序
前言

第一部分 总论

第一章 生物入侵..... 3

第二部分 各论

第二章 烟粉虱.....	69
第三章 稻水象甲.....	129
第四章 美洲斑潜蝇.....	177
第五章 南美斑潜蝇.....	206
第六章 马铃薯甲虫.....	219
第七章 西花蓟马.....	231
第八章 棉红铃虫.....	246
第九章 美国白蛾.....	259
第十章 红脂大小蠹.....	282
第十一章 松突圆蚧.....	305
第十二章 湿地松粉蚧.....	331
第十三章 蔗扁蛾.....	346
第十四章 苹果蠹蛾.....	363
第十五章 椰心叶甲.....	376
第十六章 锈色棕榈象.....	388
第十七章 褐纹甘蔗象.....	399
第十八章 大瓶螺.....	404
第十九章 小麦矮腥黑穗病.....	419
第二十章 大豆疫霉病.....	440
第二十一章 玉米霜霉病.....	457
第二十二章 苜蓿黄萎病.....	476
第二十三章 小麦印度腥黑穗病.....	487
第二十四章 梨火疫病.....	501
第二十五章 玉米细菌性枯萎病.....	534
第二十六章 番茄细菌性斑点病.....	545
第二十七章 李属坏死环斑病毒.....	562
第二十八章 松材线虫.....	573

第二十九章 马铃薯胞囊线虫	617
第三十章 香蕉穿孔线虫	640
第三十一章 紫茎泽兰	650
第三十二章 普通豚草和三裂叶豚草	662
第三十三章 水葫芦	693
第三十四章 喜旱莲子草	715
第三十五章 薇甘菊	740
第三十六章 大米草	754

第三部分 农林外来入侵物种名录

第三十七章 农林外来入侵物种名录及其信息分析	763
附录 1 中国主要农林外来入侵杂草名录	769
附录 2 中国主要农林外来入侵节肢动物名录	799
附录 3 中国主要农林外来入侵植物病原微生物名录	814

第一部分 总 论

第一章 生物入侵

第一节 生物入侵的定义及其研究意义	5	第五节 生物入侵的研究现状	26
第二节 外来生物入侵的现状	7	第六节 外来种的生态风险评估	37
第三节 外来生物入侵的影响	14	第七节 外来入侵生物的预防与控制	43
第四节 生物入侵的特点	23	第八节 生物入侵机制的研究发展趋势	51

摘要 生物入侵(biological invasion, 或 bioinvasion)是指生物由原生存地经自然的或人为的途径侵入到另一个新环境, 对入侵地的生物多样性、农林牧渔业生产以及人类健康造成经济损失或生态灾难的过程。我国是全球受外来生物入侵影响最大的国家之一。随着全球经济一体化进程的加快, 生物入侵的现象越来越普遍, 其所带来的影响也愈来愈严重, 已经成为危害生物多样性、生态环境和国民经济的一个十分重要和紧迫的问题。生物入侵与人类活动密切相关, 具有空间上的多样性和侵入过程的不稳定性。目前对外来入侵生物的研究除了宏观的预防与控制策略和可行的管理技术体系外, 越来越多地融入了生化与分子生物学、分子生态学、生态遗传学、生物数学和 3S(GIS、GPS、RS)等技术, 并由此产生了一些新的概念、理论假说与推论, 使生物入侵机制的研究水平有了很大提高, 促进了入侵生物学的发展。加强入侵生物的信息管理和预警预报, 建立生态风险评估和持续有效的预防控制体系, 是预防和控制外来生物入侵的基础工作。我国对外来入侵生物的研究刚刚起步, 有待于向不同层次(基因、个体、种群、群落、生态系统)和更高水平、多学科交叉(分子生物学、分子生态学、生态遗传学)的实验与理论研究的方方向发展。

关键词 外来入侵物种 生物入侵 生物多样性 风险评价 预防 控制

Chapter 1 Biological Invasion

Abstract: Biological invasion, or bioinvasion' is a phenomenon that an organism migrates from its native habitat to a new environmental location by ways of natural forces or human activities, and imposes enormous costs on agriculture, forestry, fisheries, and other human enterprises, as well as human health, or even causes ecological catastrophe. China is one of the countries being harmed by exotic invasive species extensively in the world. With the accelerating development of global trade, biological invasion has been occurring more frequently. It becomes one of the leading threats to biodiversity, natural ecosystem and

national economy. Biological invasion, highly associated with human activities, has the basic characteristics of diversification in the spatial distribution and unstabilization process invasion. Conventionally, biological invasion researches mainly focused on early detection, prevention, risk assessment and priorities for management. Recent researches are turning the focus to the basic studies, such as biochemistry, molecular ecology and ecological genetics in the invasion process, bio-mathematics and 3S (GIS, GPS, RS) technology utilization. And various new concepts and hypothetical theories have been deduced to understand the mechanisms of biological invasion more profoundly. In China, intensive researches and management on biological invasion are just under the way, and much more attention should be emphasized on researches at different ecological complexity (*i. e.* gene, autecologic, population, community, ecosystem), and experimental and theoretic researches with multiple interdisciplines.

Key words: invasive alien species, biological invasion, biodiversity, risk analysis, prevention, management

科学技术的进步极大地推动了人类的物质和精神文明建设。但随着经济全球化，通讯、交通、贸易和技术进步的快速发展，与食物和农业有关的生物和环境风险明显增大，生物多样性保护和生态安全已成为当今国际社会关注的焦点，生物入侵就是其中的热点问题之一。生物入侵是指生物由原生存地经自然的或人为的途径侵入到另一个新环境，对入侵地的生物多样性、农林牧渔业生产以及人类健康造成经济损失或生态灾难的过程(万方浩等，2002a)。

我国地域辽阔，气候和地理条件高度多样化，来自世界各地的大多数外来生物都可能在我国找到合适的栖息地。目前我国包括森林、农业区、水域、湿地、草地、城市居民区等在内的所有生态系统，几乎都可见到外来生物入侵的现象，其中以水生生态系统的情况最为严重(张从，2003)。在自然环境中，一个生态系统通常处于相对稳定的状态，系统内各成员之间保持着动态平衡的关系。若遭外来生物入侵，又逢条件适宜，则随着入侵生物种群的增殖扩大，将破坏景观的自然性和完整性，摧毁生态系统原有的稳定状态，危害动植物的多样性，影响遗传多样性，最终给人类生活带来影响，甚至巨大灾难。生物入侵是当前对森林、草原、农田和水系等生态系统最严重的威胁之一，已对我国的生态环境、生物多样性和社会、经济造成了很大危害(张爱良和李彦连，2003；刘红霞和温俊宝，2000a；张从，2003)。

众所周知，海洋、山脉、河流和沙漠等自然障碍所造成的隔离，使各地形成许多特有物种和特定生态系统。但是随着世界经济全球化和国际贸易自由化的发展，以及其他人类活动的加剧，外来物种得以有意或无意地引入和传播的机会大大增加，上述天然屏障的作用则大大缩小，几百万年生物学隔离的历史宣告结束(王献溥，1999；刘红霞和温俊宝，2000a)。外来生物入侵成为国际社会面临的共同问题，成为 21 世纪生物多样性保护、生态安全、农业可持续发展的主要障碍之一。同时外来入侵生物在国际贸易中时常引发纠纷，逐渐成为主要的贸易技术壁垒，影响国家利益。随着国际贸易的多元化和多样化，生物入侵问题必将引起各贸易国的高度重视。中国加入 WTO 之后，国际贸易更

加频繁和多样化,由此带来的入侵生物种类的增加及生物入侵速度的加快将是前所未有的。自 20 世纪 70 年代以来,原产国外的危险农林病虫害传入我国后的扩散蔓延有逐渐增加的趋势,外来危险生物的入侵已对我国生物多样性带来了严重危害,对农业生产和农村经济造成了巨大的经济损失,对人民群众身体健康带来了巨大威胁,全面影响建设小康社会的进程。因此积极开展生物入侵的综合性和系统性研究,尽快建立全面的检疫和监管系统与机制,目前在我国是非常必要和紧迫的。

第一节 生物入侵的定义及其研究意义

一、生物入侵的概念

对于一个特定的生态系统与栖境来说,任何非本地的生物都叫外来物种(alien species, 或 alien organism),指出现在其自然分布范围(过去或现在)和分布位置以外(即在原分布范围以外自然定殖的,或间接引进,或没有人类活动就不能定殖)的一种物种、亚种或低级分类群,包括这些物种能生存和繁殖的任何部分、配子或繁殖体(庚晋和周洁, 2002)。而外来入侵物种(invasive alien species)是指对生态系统、栖境、物种、人类健康带来威胁的外来物种,包括植物、动物和微生物。生物入侵发生于当一种生物(不管是何种类型的生物)到达其原产地以外的地区(Mark, 1996),并有两层含义:第一,物种必须是外来的、非本土的;第二,该外来物种能在当地的自然或人工生态系统中定居、自行繁殖和扩散,最终明显影响当地生态环境,损害当地生物多样性(张从, 2003)。

在自然界中,生物入侵是一种普遍存在的现象;而且生物入侵的种类几乎包括所有的生物类群。它们的入侵已影响到每一个生态系统和各地的生物区系,使成百上千的本地物种陷入灭绝地,特别是在岛屿和一些特有现象中心最为明显(王献溥, 1999)。在地质学时间尺度上,它深远地影响着地球的生物分布。近代的大部分生物入侵源于人类的活动,在农业、林业、畜牧业和水产养殖业中,物种引进在早期极大地推进了人类物质文明的前进。今天,科技的发展和交通的便利使得人为影响造成的生物入侵在数量上与范围上尤为空前。尽管大多数的外来生物无所作为,但有些外来生物可以对入侵的系统产生强烈的影响(向言词等, 2001)。生物入侵的负面影响在于:①生物入侵将降低地域性动植物区系的独特性;②地理隔离是维持全球生物多样性的前提,而生物入侵打破了地理隔离,成为威胁生物多样性的重要因素之一(郭传友等, 2003; 向言词等, 2001)。由于生物入侵对全球生物多样性的威胁日益增加,它们已成为生态学家关注的焦点之一。

二、生物入侵研究的科学意义

从 20 世纪 50 年代开始,科学家就开始对生物入侵问题进行系统研究。澳大利亚由于历史和地理的原因,生物入侵现象比较突出,对其研究较早而且深入。美国、英国、南非、新西兰等国也从各自的角度对有关的问题进行了较深入的研究。1997 年由多国科学家参加的美国生态学会年会在讨论到全球变化和生物多样性保护的生态过程时,都从不同角度提到生物入侵的影响。尽管“生物入侵”这一概念在 80 年代已由生态学界明确

提出,但有关生物入侵的研究只有在现阶段才引起如此广泛的重视(刘红霞和温俊宝,2001b)。外来有害生物侵入新区后,占据适宜生态位,种群迅速增殖、扩大,发展成当地新的优势种,这是一个生态学过程,其带来的直接后果是对人类社会经济的危害和生态安全的破坏(陆庆光,1999)。

随着全球经济一体化进程的加快,生物入侵的现象越来越普遍,其所带来的影响也愈发严重,因而已受到人们的关注。生物入侵常常令人防不胜防,是当今世界最棘手的三大环境难题之一(董志峰,2001)。例如,轮船压舱水排放造成的生物入侵破坏海洋和淡水生态系统,杂草使集水区域和淡水生态系统退化;旅游者和各地居民有意无意地把外来种引入未经破坏的自然区域;带病的作物、畜禽、林木使入侵者广泛传播,降低作物产量,损害栽培和饲养物种的发展,增加管理费用。环境污染和栖息地破坏为外来入侵种的传播提供了有利条件。全球气候变暖使许多携带病虫害的物种(例如蚊子)大大扩大了生态范围。自由贸易和旅游的发展使外来生物远距离迁移入新的已遭破坏的生境中,并使其成为适宜的栖息地,从而形成入侵种。海关检疫的实践还不足以防止威胁本地生物多样性的外来物种广泛传播。它的生态代价是造成本地物种和生态系统不可弥补的消失;经济代价是耕地杂草滋生,降低作物产量;水域入侵者损害渔业的收入,造成每年达到几十亿美元的损失,构成生物多样性保护与持续利用的威胁因素(王献溥,1999)。最近,美国世界观察研究所发表的调查报告指出,高山、大海和沙漠过去曾是阻止物种扩散的天然屏障,然而随着贸易、旅游和其他人类活动的加剧,越来越多的物种正在跨越屏障。由于物种在全球范围内的扩散规模日益扩大,世界各地本地种的生存安全受到了威胁,进而损害地球上的生物多样性(陆庆光,1999)。

如今,外来物种入侵已经成为危害生物多样性、生态环境和国民经济的一个十分重要和紧迫的问题,即使是人们有意识地引进外来物种,也大多只注意其短期经济效益,而对其负面影响,尤其是外来物种对生态系统结构和功能的长期影响重视和研究不够。随着全球经济一体化的发展,跨国界、跨地域的交通、旅游、贸易活动增加。预期与非预期的物种大转移所涉及的物种类别及总量急剧增加,这方面的生物安全问题势必愈加严重。目前对生物入侵的研究主要集中在入侵种的预防、控制和本地种的恢复方面(董志峰,2001)。其中,通过生物安全性评价和管理在第一时间、第一地点阻止外来生物的传入、定殖和传播是防止生物入侵最经济有效的途径。这些工作,除了需要科学家的研究、社会公众的协作外,更离不开国家政府部门有效的监控。

我国是一个农业大国,正处于传统农业向现代农业的转型过程当中,外来有害生物的入侵在农业转型及生产中的问题越来越突出,已对我国经济持续发展和生态安全构成了严重威胁,特别是加入WTO后,我国面临外来有害生物入侵的压力越来越大,2003年党和国家领导人多次做出重要批示,提出了明确要求。生物入侵与人类活动、气候因素等密切相关,十分复杂,有效预防外来有害生物的入侵是解决这一问题的主要途径。建立入侵生物的生物信息与数据库,发展风险评估技术,建立早期预警系统,研制快速的检测、侦测与监测技术,完善综合治理技术与生态修复技术体系,评估生物入侵对生物多样性(遗传资源)、生态安全及经济的影响,研究全球气候变化对生物入侵的影响等工作,均是国家发展现代农业、保护生物多样性的重大需求。

我国外来有害生物入侵的形势十分严峻，已入侵生物扩散蔓延，暴发成灾；新的疫情不断突发，一些危害性极大的外来物种相继传入我国。危险性农作物病虫害及潜在的动物烈性传染性人畜共患疾病对人类生存带来巨大威胁，各国对这些危险性的外来有害生物均采取严格封锁的措施；建立和完善防范外来生物入侵的快速反应机制与紧急处理程序成为防御体系的焦点。因此，加强农业外来入侵生物预防与控制的研究，是保障我国经济安全、生态安全、社会稳定和维护国家利益的重大需求，具有十分重要的科学意义与长远的战略意义。

第二节 外来生物入侵的现状

一、外来生物入侵的国际现状

生物入侵是一场没有硝烟的战争，外来生物的入侵可以危及一个国家的生态安全，危害一个国家的经济安全，威胁一个国家的生物安全，损害一个国家的人民利益，甚至动摇一个社会的稳定根基。这决不是危言耸听。以 19 世纪导致欧洲大饥荒的外来入侵生物为例，起源于墨西哥的马铃薯晚疫病 *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary 于 19 世纪 40 年代传到欧洲和南美洲，1845~1847 年该病在爱尔兰暴发并引起大饥荒，致使 800 万居民中约 100 万人死亡和超过 150 万人流落他乡，可见生物入侵可严重影响社会的稳定与发展(姚一建等，2002)；淋巴腺鼠疫(通常是由鼠疫杆菌 *Pasturella pestis* 引发的)由跳蚤携带，而跳蚤通过寄生于入侵物种——原产自印度的黑家鼠 *Rattus rattus*，从中亚传播到北非、欧洲和中国；随着欧洲殖民地的建立，麻疹(measles virus, MV)和天花(variola virus)从欧洲大陆席卷了西半球。当地居民对这些疾病的抵抗力很弱，这也促使了阿兹台克和印加帝国的衰落(McNeely, 2001)。1859 年，作为宠物从英国引入澳大利亚的野兔，由于没有天敌(鹰、狐狸等)的制约，以及自身较强的竞争力，在草原迅猛繁殖，1907 年就遍布整块大陆，扩散速度达 66 英里/年。野兔与牛羊争牧草，导致其他种类野生动物面临饥饿的危机，许多野生植物也存在绝种的可能，为此人们想尽各种办法，筑围墙、打猎、捕捉、放毒、安装电网等，但都收效甚微，至今仍无法消灭野兔。因此可以说，野兔导致了一个国家的生态灾难(胡淑恒等，2003)。在 21 世纪经济全球化、国际贸易自由化的新形势下，生物安全已成为各国国家安全的重要组成部分。

其一，随着全球国际贸易、旅游和交通的迅速发展，正在为外来种长距离的迁移与入侵、传播与扩散到新的生境中创造条件，外来生物入侵的危险性日益增加。现代农业(农业、林业、渔业、园艺及许多原料工业)大部分依赖于物种资源的引进与交换，这种有目的的生物多样性资源共享使得特定生态系统或特定区域得到巨大经济效益的同时，也增加了外来有害生物伴随入侵的危险性(万方浩等，2002a)，因而，防范外来生物入侵就成为全球 21 世纪农业可持续发展面临的共同问题。

其二，外来生物的入侵已对农林牧渔业安全生产、生物多样性、人畜健康带来严重的经济损失与威胁。外来生物入侵给世界很多国家造成不可逆的生态灾害的同时，也使他们蒙受了巨大的经济损失(McNeely, 2001)(表 1-1)。美国每年直接或间接用于主要入侵物种管理(控制和预防)的费用高达 1366 亿美元(Pimentel *et al.*, 2000)，印度和南非每年

因外来入侵物种造成的经济损失分别为 1300 多亿美元和 800 亿美元(李尚义和李宁, 2002; 张从, 2003), 这还不包括一些无法计算的隐性损失。

表 1-1 部分外来入侵物种在国外造成经济影响的花费例证
(李振宇和解焱, 2002, 引自 McNeely, 2001)

物种	经济变量	经济影响	地点
疾病生物体	用于人类、植物、动物健康的年成本	410 亿美元/年	美国
一例外来动植物物种	经济损失	1370 亿美元/年	美国
怪柳(<i>Tamarix</i> spp.)	55 年来生态系统价值损失	70 亿~160 亿美元	美国西部
矢车菊(<i>Centaurea</i> spp.)和乳浆大戟(<i>Euphorbia escula</i>)	经济损失	直接损失 40.5 万美元/年, 间接损失 8900 万美元/年	美国 3 个州
斑贻贝(<i>Dreissana polymorpha</i>)	1989~2000 年经济农作物的损失	7.5 亿~10 亿美元	美国和欧洲
12 种最具危险性的外来入侵物种	1983~1992 年用于除草剂的控制成本	3.44 亿美元/年	英国
6 种杂草物种	农业生态系统控制成本	1.05 亿美元/年	澳大利亚
松属(<i>Pinus</i>), 哈克木属(<i>Hakea</i>), 金合欢属(<i>Acacia</i>)和相思树类	自然生态恢复的花费	20 亿美元	南非
凤眼莲(<i>Eichornia crassipes</i>)	控制成本	2000 万~5000 万美元/年	非洲 7 国
穴兔(<i>Oryctolagus</i>)	农业损失	3.73 亿美元/年	澳大利亚
大蜂螨(<i>Varroa jacobsoni</i> Oudemans)	引入蜜蜂的经济成本	2.67 亿~6.02 亿美元	新西兰
大瓶螺(<i>Pomacea canaliculata</i>)	水稻生产损失	2800 万~4500 万美元/年	菲律宾

其三, 危险性农作物病虫害及潜在的动物烈性传染疾病、人畜共患疾病(疯牛病、口蹄疫、禽流感)一旦传入后果不堪设想, 各国对这些危险性的外来生物均采取严格的封锁措施; 同时, SARS、禽流感的暴发给予了国际社会新的警示。建立和完善防范外来生物入侵的快速反应机制与紧急处理程序成为建设外来入侵生物防御体系的焦点。

其四, 外来生物入侵的威胁已成为农产品国际贸易技术壁垒的主要障碍之一。

目前, 在 40 多个国际公约、协议和指导准则中, 均涉及到外来入侵种问题, 如国际生物多样性公约(CBD)、生物安全卡塔赫拉协议(BS-Protocol)、实施卫生与植物卫生措施协议(SPS)、国际检疫性有害生物风险评估(PRA)、外来入侵物种预防与控制的指导原则(GEF)、国际植物保护公约(IPPC)。特别是在国际《生物多样性公约》中, 呼吁所有缔约国阻止引入那些威胁生态系统、栖息地或物种的外来种, 控制或根除那些已经引入的外来种。与控制外来种密切相关的两个国际规则(SPS 协议——实施卫生与植物卫生措施协议和 TBT 协议——贸易技术壁垒协议)中均明确规定: 在有充分科学依据的情况下, 为保护生产安全和国家安全, 可以设置一些技术壁垒, 以阻止有害生物入侵危害。中国

加入 WTO 后, 国际贸易将日益频繁, 外来物种人为传入机会大大增加, 在不能强行设置贸易壁垒的同时, 只有加强外来种和生物入侵的基础科学研究, 才能为保护国家安全和公平国际贸易提供重要科学依据(苏荣辉等, 2002)。

其五, 防范恐怖分子利用高科技的手段——生物技术制造超强的生物武器、防止“恐怖分子生物入侵”是保卫国家安全的战略性任务。

作用于人体、动物和植物的病原微生物都可以被当作武器来破坏经济和社会的稳定, 来打击敌对国家。如农业生产遭受攻击, 控制病害传播和清除染病牲畜所需的费用及其带来的经济损失将是十分巨大的, 对社会稳定所造成的损害也将十分严重。例如疯牛病与典型猪瘟, 都可以很容易地传播到任何一个国家, 并摧毁该国的农业。据悉, 为了控制疯牛病的暴发, 英国屠杀了大约 320 万头牲畜。20 世纪 90 年代暴发的英国疯牛病所造成的经济损失已高达 90 亿~140 亿美元, 使农牧业遭受重创。1983~1984 年, 美国政府为消灭禽流感共花费了 6300 万美元, 美国消费者为此则多花费了 3.49 亿美元。美国的农业产值占美国国民生产总值的六分之一, 如果其农业遭到生物恐怖主义的威胁, 则对美国的经济和社会都将造成严重的冲击。目前, 美国国防部已将口蹄疫病毒列为恐怖组织可能用来打击美国农业的一种病原体。在美国 2001 年度的财政预算中, 约有 4000 万美元拨给农业部作为国家安全预算开支。英国政府也极为关注恐怖分子可能对食品供应发动生物武器袭击, 并认真对待这一威胁。这种威胁可能来自各个方面, 如动物疾病或通过某种方式污染食品供应等(姚一建等, 2002)。

在某种程度上, 生物恐怖主义活动不仅能影响一个国家的政治、经济、社会的稳定, 还会威胁到一个国家的生存, 甚至威胁到人类的安全。当今世界, 以基因工程为核心的生物技术正突飞猛进。生命科学的发展给人类带来巨大财富和便利的同时, 也更易被滥用于制造廉价高能的杀人武器。通过转基因可制造出的超级病原微生物, 具备常人无法想像的毁灭能力, 并具有研究和使用方便、隐蔽性极强、危害严重且难以消除等特点, 很难像对核武器那样实行有效控制, 因此容易扩散到世界各国, 对世界和平和人类生存构成严重威胁(姚一建等, 2002)。

其六, 虽然目前外来生物入侵已经受到各国政府及科学界的高度重视与广泛关注, 但从根本上由于缺乏对入侵生物的综合认识, 有关入侵生物学、入侵生态学等研究基础极为薄弱, 还不足以准确地进行早期预警、快速检测、有效监测和持续治理。

世界自然保护联盟(IUCN)2001 年制定的《外来入侵物种全球策略(Global Strategy on Invasive Alien Species, GSIAS)》, 提出了外来入侵物种管理全球 10 大策略: ①提高对外来入侵物种的管理能力; ②加强对外来入侵物种的研究能力; ③加强信息共享; ④加强外来物种的引种管理和跟踪调查; ⑤加强研究机构的协作与合作; ⑥潜在外来入侵生物风险评估的研究; ⑦提高防范外来入侵生物的公众意识; ⑧制定防范外来入侵物种的国家策略与行动计划; ⑨将外来入侵物种管理纳入全球变化行动计划; ⑩加强国际合作。

外来生物入侵全面涉及经济安全、生态安全、社会安全与国家利益, 其预防与控制研究也就成为了国内外研究的热点与焦点。20 世纪 50~80 年代, 国际上主要进行外来入侵生物的生物特性、生态学特性和控制技术等方面的研究, 进入 20 世纪 90 年代, 研究热点则扩大到外来入侵生物的入侵机制、灾变机制、早期预警系统、经济影响评价和

可持续控制体系等方面。应加强相关基础和应用方面的研究工作和国际交流，以期尽快全面提升国际上对外来入侵生物的管理、预防与控制的能力。

国际上外来入侵植物、动物、微生物等的入侵现状举例如下。

(一) 外来入侵植物

世界上的许多国家和地区都受到外来植物入侵的强烈影响，并引发了世界植物区系的大动荡(Elton, 1958)。在美国入侵植物的覆盖面积达 $4 \times 10^8 \text{hm}^2$ ，并以每年约 1200 万公顷的扩散速度递增，每天有多达 1863hm^2 的土地受到入侵植物的负面影响(Nancy, 2000)。在夏威夷大约有 4600 种外来植物，是该岛本地植物种的 3 倍；加拉帕戈斯群岛的异地植物种数和本地植物种数一样多(John, 1973)。在北美的许多湿地，异地的多年生草本植物占据了优势，如来自欧洲的紫珍珠覆盖了北美东部沼泽，日本忍冬 *Lonicera japonica* Thunb. 则在美国东南部低洼地形成了茂密的杂丛。美国农业部为了治理佛罗里达大沼泽地，本世纪初在那里播下了从澳大利亚引进的白千层树 *Melaleuca leucadendra* (L.) L. 种子，这种树吸水能力强，生长快，长势茂密，树根还可释放出排斥其他种类植物的有害物质，使当地植物无法与其共存。白千层树四处蔓延，已经占地 60 万公顷。农业专家说，如果不设法控制，佛罗里达著名景观大沼泽将不复存在。又如美国西部草原的欧亚旱雀麦草 *Bromus* sp.，比当地的冰草(ice plant, *Agropyron* spp.) 更能吸收水分，生长更迅速，已经占地 4000 万公顷。再如风眼莲，俗名水葫芦，原生长在南美的委内瑞拉，后来作为观赏植物引入其他国家。它的繁殖能力非常旺盛，竟成为一些国家的害草，不得不再耗费巨资去消灭它，故美国称其为“百万美元杂草”(田家怡和潘怀剑，2000)。

(二) 外来入侵动物

外来动物入侵的案例也不胜枚举。1957 年人们将尼罗河鲈鱼 *Lates niloticus* (L.) 放养到非洲的维多利亚湖，希望提高渔业产量，但凶猛的尼罗河鲈鱼吃掉了湖里近 200 种原有鱼类(田家怡和潘怀剑，2000)。位于加利福尼亚海岸边的圣卡达尼拉岛，由于放牧了引入的山羊和其他异地动物，导致岛上 48 种当地动物灭绝(Thorn, 1967)。引入到太平洋许多海岛上的棕树蛇 *Biogair regularis*，正威胁着岛上的特产鸟类种群，其中关岛上的 10 种特产鸟类已处于濒危境地(Savidge, 1987)。美国受外来物种入侵和危害最为严重的是水生系统，已发现外来鱼类 138 种，外来软体动物 88 种(陈兵和康乐，2003)。美国蒙大拿州弗拉特黑德河于六七十年代放养从外地引进的糠虾，以期补充该河鲑鱼的食物，结果糠虾成为河里浮游动物的杀手，鲑鱼苗则以浮游动物为主食，因此导致河里鲑鱼大量减少，同时以鲑鱼为食的鹰、鸥、水獭、狼和熊的生存也面临危机。北美最令人震惊的异地入侵动物之一条斑贻贝 *Driessana polymorpha*，于 1988 年通过欧洲油船压舱箱“偷渡”到大湖，此后两年内这种小型海洋软体动物在伊利湖的部分水域中大量繁殖，密度高达 7×10^5 只/ m^3 ，并逐渐抑制了本地贻贝的生长；在底特律、坎伯兰和田纳西河流中，也发现有条斑贻贝，并随之向南扩散。这种异地物种给渔场、水库和船舶造成巨大的经济损失的同时，对入侵地丰富的特有水生生物群落也造成了破坏(Stolzenburg, 1992)。

(三) 外来入侵微生物

外来有害微生物入侵具有极强的破坏性。由于其具有隐蔽性强、变异频率高、潜伏期短和危害严重持久等特点,一旦侵入,就极难根除,后患无穷,并造成许多不可逆的生态灾害。世界上许多国家都曾因外来微生物入侵而蒙受巨大损失(姚一建等,2002)。如起源于东亚的荷兰榆树病 *Ophiostoma* spp. 分别于 1910 年和 1970 年左右两次大流行,第一次历时 40 余年,造成大多数欧洲国家和北美 10%~40% 的榆树死亡;第二次流行产生新的病原菌,导致大多数欧洲榆树死亡,仅英国就死亡了 3000 万株,而在北美洲的死亡数则达几亿株。如今,此病害已传播到美国大部分州内,每年导致 40 万株榆树死亡,使榆树濒临绝种的边缘(Plam, 2001; 姚一建等, 2002)。由于栗疫病 *Fusarium vasinfectum* 扩散传染给缺乏抗性的美国板栗树,在短短的几十年内,美国境内几乎全部板栗树均因感染此病害而死亡(Primack, 1996; 姚一建等, 2002)。美国北部地区的濒危物种黑足雪貂 *Mustela nigripes* (Audubon and Bachman), 1985 年的调查统计表明该物种从 1984 年的 129 只下降了 50%,原因就是其在野外感染了境外传入的犬热病(Primack, 1996)。

二、我国外来生物入侵现状

目前我国外来生物入侵的情况十分严重,除青藏高原上少数人迹罕至的偏远保护区外,全国 34 个省、市、自治区均不同程度地存在外来入侵物种的影响或威胁;涉及的生态系统多,包括从森林、农业区、水域、湿地、草地到城市居民区等几乎所有的生态系统,其中以低海拔地区及热带岛屿生态系统的受损程度最为严重;涉及的物种类型多,从脊椎动物(哺乳类、鸟类、两栖爬行类、鱼类),无脊椎动物(昆虫、甲壳类、软体动物)及高、低等植物(入侵植物以草本植物为主),到细菌、病毒等均能找到例证(李振宇和解焱, 2002; 蔡蕾等, 2003)。我国外来生物入侵的形势十分严峻,表现如下。

(一) 已入侵生物的扩散蔓延、暴发成灾

中国是世界上物种多样性最丰富的国家之一,已知有陆生脊椎动物 2554 种,鱼类 3862 种,高等植物 30 000 种,包括昆虫在内的无脊椎动物、低等植物和真菌、细菌、放线菌种类更为繁多(李振宇和解焱, 2002; 陈灵芝, 1994; 中国生物多样性国情研究报告编写组, 1998)。据初步统计,目前入侵我国的外来物种(包括农林牧渔业)至少有 400 多种。在世界自然保护联盟(IUCN)公布的全球 100 种最具威胁的外来物种中,我国就有 50 种(表 1-2),是全球受外来生物入侵影响最大的国家之一。

强胜和曹学章(2000)调查发现,我国外来杂草有 108 种,隶属 23 科, 76 属,其中被认为是全国性或地区性的有 15 种。严重危害我国农林业的外来动物约有 40 种,害虫类包括美国白蛾 *Hyphantria cunea* (Drury)、松突圆蚧 *Hemiberlesia pitysofila* Takagi、湿地松粉蚧 *Oracella acuta* (Lobdell) Ferris、稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel、斑潜蝇 *Liriomyza* spp.、松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer)、蔗扁蛾 *Opogona secchari* B.、苹果绵蚜 *Eriosoma lanigerum* (Hausmann)、葡萄根瘤蚜 *Viteus uifoliae* Fitch、二斑叶螨 *Tetranychus urticae* Koch、马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* (Say)、橘小实

蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel、白蚁、红脂大小蠹 *Dendroctonus vales* Imago 等。其他外来动物包括原产于南美的福寿螺 *Ampullaria gigas* Spix、原产于东非的非洲大蜗牛 *Achatina fulica* Ferussac、原产于北美洲的麝鼠 *Ondatra libethica*、原产于原苏联的松鼠、褐家鼠和黄胸鼠、原产南美洲的獼猴。引进外来鱼类对湖泊的本地鱼种和生态系统也构成了巨大威胁(李振宇和解焱, 2002)。对我国农林业危害较大的外来微生物或病害也有数十种。

表 1-2 我国在全世界 100 种最重要入侵生物中所占种类和比例

类别	全世界	中国	比例
微生物	8	1	12.5
水生植物	4	3	75.0
陆生植物	32	19	59.4
水生无脊椎动物	8	2	25.0
陆生无脊椎动物	18	6	33.3
两栖类动物	3	1	33.3
鱼类	8	6	75.0
鸟类	3	3	100.0
爬行类	2	0	0
哺乳类	14	9	64.3
总数	100	50	50.0

综合分析我国主要外来入侵生物的环境生态经济影响,我国 10 种最有害的外来杂草是:紫茎泽兰 *Eupatorium adenophorum* Spreng.、豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L.、水葫芦、空心莲子草 *Alternanthera philoxcroides* (Mart.) Griseb.、大米草 *Spartina* spp.、薇甘菊 *Mikania micrantha* Kunth、飞机草 *Erechtites valerianaefolia* (Wolf) DC.、毒麦 *Lolium temulentum* L.、假高粱 *Sorghum halepense*(L.)Pers 和少花蒺藜草 *Cenchrus* spp.。10 种最有害的农林外来昆虫是:烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius)、稻水象甲、马铃薯甲虫、蔗扁蛾、棉红铃虫 *Pectinophora gossypiella* (Saunders)、苹果绵蚜、红脂大小蠹、美国白蛾、湿地松粉蚧和松突圆蚧。10 种最有害的及潜在的外来入侵植物病害是松材线虫病、香蕉穿孔线虫病 *Radopholus similis* (Cobb) Thorne、小麦矮腥黑穗病 *Filletia contraversa* Kunhn.、大豆疫霉 *Phytophthora megasperma* (Drechs.) f. sp. *glycinea*、玉米霜霉病 *Peronospora* spp.、棉花枯萎病和黄萎病 *Fusarium oxysporur* f. sp. *vasinfectum* (Atk.) Snyder et Hansen, *Verticillium alboatrum* Reinke et Berth、马铃薯癌肿病 *Synchytrium endobioticum* (S. chilberszky) Percivadl、水稻细菌性条斑病 *Xanthomonas oryzaicola* Fang et al.、甘薯黑斑病 *Ceratocystis fimbriata* 和梨火疫病 *Erwinia amylovora* (Burrill) Winslow et al.。

这些已入侵生物的外来生物对我国的农业、森林、湿地、草原、江河湖泊、岛屿、自然保护区等自然生态系统和城市生态系统、基础设施建设、人类疾病控制、人文环境和国际贸易等都产生了巨大影响。每年仅 11 种主要外来入侵害虫和杂草害对我国造成的经济损失就高达 574.3 亿元人民币(表 1-3)(万方浩等, 2002b), 每年各种外来入侵生物对

我国造成的总经济损失估计在 2000 亿元人民币以上。

表 1-3 主要入侵害虫及杂草的经济损失估计

入侵生物	发生面积 /×10 ⁴ hm ²	防治费用 /万元	直接损失费用 /万元	间接损失费用 /万元	总计 /万元	年份
松材线虫	7.24	3258	14 373.1	307 066.5	324 697.6	1998
湿地松粉蚧	35.24	15 858	NA	747 308.3	763 166.3	1999
松突圆蚧	80.9	36 450	898 000	343 153.5	1 277 603.5	1996
美国白蛾	9.9	4455	NA	NA	4 455.0	1998
松干蚧	11	4950	NA	466 537.5	471 487.5	1998
稻水象甲	33	38 340	59 400	NA	97 740.0	1999
斑潜蝇	100	45 000	1 350 000	NA	1 395 000.0	2000
豚草	NA	NA	NA	60 000	60 000.0	1993
紫茎泽兰/飞机草	2470	NA	1 333 800	NA	1 333 800.0	2000
水葫芦/空心莲子草	NA	NA	NA	4500	4 500.0	1999
大米草	NA	NA	NA	10 000	10 000.0	1999
总计	2747.28	148 311	3 655 573.1	1 938 565.8	5 742 449.9	

NA——无有关数据。

(二) 危险性外来有害生物接连入侵，新的疫情不断突发

我国在蒙受外来入侵生物造成重大经济损失的同时，一些危险性外来有害生物相继传入，新的疫情不断突发。如 1994 年初初次在海南省发现的美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* Blanchard，到目前为止已广泛分布于我国 29 个省、市、自治区，对我国的蔬菜生产构成了严重威胁(问锦曾等，1996)。我国 1997 年报道在北京发现蔗扁蛾，此后，该虫相继发现于广东、海南、福建、新疆、江苏、上海、山东、四川和河南、甘肃、吉林，浙江、江西、广西等地的花卉市场或对花卉生产造成危害(杨集昆和程桂芳，1997；商名清等，2002；商晗武等，2003)。1998 年陕西发现甜樱桃感染李属坏死环斑病毒(prunus necrotic ring-spot virus, PNRSV)(阮小凤等，1998)。自 1998 年以来香蕉枯萎病 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Snyder & Hansed 在广州开始零星发病危害香蕉，近年来有在广东珠江三角洲进一步蔓延扩展之势，倍受关注(卓国豪等，2003)。1998 年开始在海南省文昌县发现锈色棕榈象 *Rhynchophorus ferrugineus* (Oliver) 严重危害椰子，目前海口、琼山、琼海、万宁、三亚、儋州等地已有大量椰子树遭受危害，发生面积近 1 万公顷，已经死亡的椰子树近 2 万株。目前除海南省外，台湾、广东、广西和云南等部分地区也发现该虫(张润志等，2003)。2001 年，在我国海南省东方市江南苗圃内的华盛顿棕榈 *Washingtonia filifera* 上发现水椰八角铁甲 *Octodonta nipae* (Maulik)(孙江华等，2003)。2003 年又在北京发现危害蔬菜的西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande)(张友军等，2003)。

(三) 外来生物入侵的频率急剧升高, 危险性不断增加

随着我国加入 WTO 以及全球经济一体化进程的加快, 日趋频繁的国际贸易往来使外来生物入侵的几率和危险性激增, 仅上海出入境检验检疫局 2001 年就截获各类外来有害生物 2047 批次, 其中国家严令禁止入境的一类危险性病虫害 222 批次。我国海关多次截获小麦矮腥黑穗病(TCK)、大豆疫病、梨火疫病、地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Wiedemann)等。2002 年海关共截获各类有害生物 1310 种, 22 448 批次, 分别比上年增长 1.5 倍和 3.4 倍。外来有害生物的入侵频率在 20 世纪 90 年代以前为每 8~10 年发现 1 种, 到 90 年代以后, 每年都新发现入侵生物 1~2 种。

(四) 我国针对外来入侵生物的基础研究薄弱, 技术储备不足

目前我国已有很多外来物种侵入, 但有关外来入侵生物的入侵生物学、入侵生态学的研究基础极为薄弱。针对几种主要外来入侵生物, 如烟粉虱的遗传变异与寄主谱扩张机制、稻水象甲的生态地域扩张机制、松材线虫病的致病机理、紫茎泽兰的扩散蔓延机制等的研究都还没有取得明确的结论。在对外来入侵生物的预防与管理中, 缺乏早期预警系统, 难以建立快速反应机制; 缺乏快速检测与监测技术, 难以建立狙击系统; 基础研究薄弱, 难以提升可持续控制技术水平; 缺乏部门协调机制, 难以统一部署与行政监管。

针对这种形势, 国家亟需基础科学依据和控制技术, 以期达到对外来物种的可持续控制。通过对外来种基础科学与控制技术的研究, 充分应用分子生物学、生物化学、信息网络和生物生态学等技术, 建立起既能服务公众, 也能为国家决策提供依据的应用技术平台, 全面提升我国在生物灾害研究领域的国际学术地位(苏荣辉等, 2002)。今后我国针对外来入侵生物的研究与发展的趋势是: ①潜在外来入侵生物(危险农林业病虫害、动物烈性传染性疫病)风险评估的研究, 建立早期预警系统与狙击体系; ②发展快速分子生物检测、侦测与监测技术, 建立入侵生物灾害应急控制与公共危机处理技术及程序; ③农业动植物危险、烈性、潜在入侵疫病流行病学以及外在重大农作物入侵害虫的传播扩散途径与机制研究, 建立阻断与扑灭技术体系; ④拓宽与创新紧急扑灭、生物防治、生态调控与生态修复的技术与方法, 建立入侵生物可持续治理的综合防御与控制体系。

第三节 外来生物入侵的影响

外来有害生物的入侵, 其经济代价是农林牧渔业产量与质量的惨重损失与高额的防治费用; 其生态代价是生态系统的结构和功能的破坏、本地物种多样性不可弥补的消失以及种的灭绝, 构成对自然遗传资源、生物多样性保护与持续利用及人类生存环境的重要威胁; 生物入侵还会严重影响社会和人类健康, 造成重大的经济损失。因此外来生物入侵已经引起广泛关注, 科学家们已普遍意识到, 目前生物入侵已成为全球变化的因素之一, 并将同其他全球变化因素一起左右整个地球的未来(Vitousek, 1997; Mack, 2000; Pimentel, 2000; White, 1997; Enserink, 1999; Castello, 1995)。

一、外来生物入侵对生态系统的影响

外来入侵物种是生态系统最大的生物威胁。大部分外来种成功入侵后大暴发，难于控制，且对生态系统产生的破坏性不可逆转，形成优势种群，并危及本地物种的生存，引起本地物种的消失与灭绝。

(一) 生态系统的直接破坏

外来入侵生物对特定的生态系统的结构、功能及生态环境产生严重的干扰与危害(万方浩等, 2002a)。外来物种一旦成功入侵生态系统, 其影响是多方面的: 一是改变原有生态系统内的物种组成和数量; 二是改变系统内的营养结构; 三是改变干扰、胁迫的机制; 四是在资源获取和利用上不同于本地物种。只要具备其中一条, 许多外来入侵物种就能够直接或间接地改变生态系统的生态过程。

外来物种可以通过竞争或占据本地物种生态位来排挤本地种, 它们与当地物种竞争食物、直接扼杀当地物种、分泌释放化学物质以抑制其他物种生长, 减少当地物种的种类和数量, 甚至导致物种濒危或灭绝。由于直接减少了当地物种种类和数量, 形成单优群落, 间接地使依赖于这些物种生存的当地其他物种种类和数量也减少, 最后导致生态系统单一和退化, 改变或破坏了当地的自然景观。有的入侵种, 特别是藤本植物, 可以完全破坏发育良好、层次丰富的森林。禾草或灌木入侵种占据空间后, 其他的乔木无法生长。许多外来入侵物种使植被破坏, 变成层次单一的低矮植被类型。这些植物群落(包括物种组成和空间结构等)的改变相应地引起一些生态过程的变化, 这包括正常的火灾扰动体系、营养循环、水文状况和能量收支等, 最终对原有生态系统造成巨大的破坏和不可逆转的后果(李振宇和解焱, 2002)。入侵物种可以通过资源利用改变生态进程。例如, 大西洋加那利群岛(Canary Islands)上的固氮植物火树 *Myrica faya* 入侵夏威夷后占据了岛上大部分湿地和干树林, 通过固氮和增加土壤中可利用的氮而影响贫瘠的火山土里的生物演替进程, 土壤含氮量的增加, 促进了矿质营养的循环, 为新的入侵物种提供了沃土(Vitousek, 1990)。有些科学家则认为生物入侵对生态系统所造成的最大影响是对干扰速率的影响。例如来自欧洲的禾草已在北美和夏威夷的许多草原占据优势, 通过极大提高火灾的强度与频率而在许多地区排挤或降低了本地种的丰度。入侵物种也可以通过改变生境的物理特性而极大地改变生态系统功能。例如: 非本地草食动物(如山羊)不仅啃食山坡上的植被, 而且可导致大量的侵蚀与滑坡, 因而严重地影响溪流生态系统(向言词等, 2001)。

20 世纪 60~80 年代从英美等国引进的旨在保护滩涂的大米草具有极强的繁殖力, 近年来在沿海地区疯狂扩散, 其覆盖面积越来越大, 现已扩散到我国北起辽宁锦西县, 南到广东电白县 80 多个县市的沿海滩涂上, 已经到了难以控制的局面。肆意蔓延的大米草能够破坏近海生物栖息环境, 使沿海养殖的多种生物窒息死亡; 堵塞航道, 影响船只出港、渔民捕捞活动和航运; 影响海水的交换能力, 导致水质下降并引发赤潮; 严重影响沿海贝类水产养殖; 与沿海滩涂本地植物竞争生长空间, 致使大片红树林消亡(高志强, 1996; 赵清良和赵强, 1997; 白鸥和朱一农, 1999; 万方浩等, 2002b)。

被称为“植物杀手”的薇甘菊原产于南美洲，20世纪80年代传入我国东南沿海，现在广东沿海低山地区、沿海岛屿、香港特区广泛分布，严重危害天然林、人工速生林、果园、公园及风景区和绿地，并进一步威胁到整个华南地区。深圳内伶仃岛是薇甘菊危害比较严重的地区，该岛是国家级自然保护区，岛上生活着国家级保护动物猕猴20多群共600多只。目前该岛近500hm²的山林，已有40%~60%被薇甘菊所覆盖，发展下去将危及猕猴的生存(田家怡和潘怀剑，2000；周晓梅和黄炳球，2001)。

明朝末期引入的4种美洲产仙人掌 *Opuntia* 分别在华南沿海地区和西南干热河谷地段形成优势群落，那里原有的天然植被景观已很难见到(李振宇和解焱，2002)。

生物入侵还可以改变栖息地干扰体制。这方面最为显著的是外来草本类植物使受入侵地区野火的频率和强度增大，如在美国，来自欧洲的旱雀麦 *Bromus tectorum* 侵占了许多自然生态系统，在这种植物入侵以前，这些生态系统的野火周期是60~110年，受其入侵后，周期变成了3~5年，由于火灾频繁，其他植物难以生存，出现只有这种植物的单一种群群落(D'Antonio and Vitousek, 1992; Pimentel *et al.*, 2000; Wilgen and Richardson, 1985)。外来种可以改变土壤组分和含水量。许多外来杂草生长快，如紫茎泽兰是需肥量大、吸肥力强的外来植物，可消耗大量的氮、磷、钾等营养，造成土壤肥力下降，对群落中其他植物的生长造成很大影响(祝心如等，1997；赵国晶和马云萍，1989)。外来种的入侵还可以大量消耗土壤的水分，使土壤缺水。如旱雀麦的根可以达到本地种难以达到的深度，消耗掉大量的水分，使地下水位下降，土壤过度干燥；桉树 *Eucalyptus* sp. 的广泛种植给海南和雷州半岛带了不少问题。桉树靠大量吸取水分生存，对水土保持不利，造成土壤干燥和肥力低，同被其取代的森林相比，桉树林中的生物多样性低(马敬能等，1998；王震洪等，1998)。

值得注意的是，与人类对环境的破坏不同，外来入侵物种对生态系统的破坏及威胁是长期的、持久的。当人类停止对某一环境的污染后，该环境会逐渐恢复，而当外来物种入侵后，即使停止继续引入，已传入的个体并不会自动消失，而会继续大肆繁殖和扩散，这时控制或清除往往十分困难(李振宇和解焱，2002)。

(二) 生物多样性的丧失

造成物种多样性丧失的两大威胁分别是外来物种入侵和生境的破碎化(Baskin, 1998)。生境的破坏在造成本地物种丧失的同时，还会促进外来物种的入侵(Stylinski and Alien, 1999)。外来物种同本地物种的竞争，可以威胁到本地物种的生存，甚至造成其灭绝，使群落的物种多样性受到影响，使栖息地遭到破坏，本地动物丧失食物和栖息地而大量死亡，群落的生物多样性减少，群落的组成结构发生变化(Higgins *et al.*, 1996; Suarez *et al.*, 1998)。由于外来物种的排斥、竞争导致灭绝的本地特有物种是不可恢复的，因而对外来物种威胁生物多样性的问题应引起足够的重视(李振宇和解焱，2002)。

外来生物入侵可以通过压制或排挤本地物种的方式，改变食物链或食物网络的组成和结构。特别是外来杂草，在入侵地往往导致植物区系的多样性变得非常单一，并破坏可耕地(万方浩等，2002a, 2002b)。原产美洲的墨西哥至哥斯达黎加一带的紫茎泽兰，约于20世纪40年代由中缅边境传入云南省，现已在我国西南地区蔓延成灾，并仍以每年大约60km的速度，随西南风向东和向北传播蔓延(向业勋，1983)。其侵入草场、林地

和丢荒地,很快形成单种优势群落,导致原有植物群落的衰退和消失。由于紫茎泽兰对土壤肥力的吸收力强,能极大地耗尽土壤养分,对土壤可耕性的破坏极为严重(强胜,1998;赵国晶和马云萍,1989;万方浩等,2002b)。在上海郊区,北美一枝黄花 *Solidago altissima* L. 往往形成单一优势群落,致使其他植物难以生长(车晋滇和郭喜红,1999)。

原产南美洲的水葫芦近年来在我国 17 个省(自治区、直辖市)蔓延成灾,严重为害的有浙江、福建、台湾、云南、广东和海南 6 省。水葫芦在河道、湖泊、池塘中的覆盖率往往可达 100%,由于降低了水中的溶解氧,致使水生动物死亡,严重影响水生生物多样性(丁建清,1995)。在云南滇池,水葫芦覆盖的水面面积超过 1000hm² 以上,由于水质富营养化,使滇池生物多样性遭到严重破坏,20 世纪 60 年代曾有 16 种水生高等植物,但随着水葫芦的大肆“疯长”,使大多数本地水生植物如海菜花 *Ottelia acuminata* (Gagnep.) Dandy 等相继消亡,到 80~90 年代仅剩 3 种水生植物;鱼类则从 60 年代以前的 15 种降至 80 年代的 5 种(吴克强,1993;丁建清和王韧,1998)。

原产日本的松突圆蚧于 20 世纪 80 年代初入侵我国南部,到 1990 年底,已有 130 000hm² 马尾松林枯死,还侵害一些狭域分布的松属植物,如南亚松 *Pinus latteri*。

在遗传多样性方面,入侵物种对本地物种遗传多样性的影响可以是间接的,例如改变自然选择的模式或本地种群间的基因流通;也可以直接通过杂交(hybridization)和基因渗透(introgression)产生影响。当入侵施加强烈的选择压力时,预计本地物种的自然种群会改变其等位基因频率。外来种除了改变自然选择体系,还会以更微妙的方式改变进化进程,例如由于外来生物入侵,随着生境片段化,残存的次生植被常被入侵物种分割、包围和渗透,使本地生物种群进一步破碎化、斑块化,从而切断基因流动,造成一些植被的近亲繁殖和遗传漂变(向言词等,2001;李振宇和解焱,2002)。有些入侵物种可与同属近缘种,甚至不同属的种杂交,如加拿大一枝黄花可与假紫菀 *Aster ptarmicoides* 杂交。入侵物种与本地物种的基因交流可能导致后者的遗传侵蚀。在植被恢复中将外来物种与本地近缘种混植,如在华北和东北国产落叶松产区种植日本落叶松 *Larix kaempferi*,在海南国产海桑属 *Sonneratia* 产区栽培从孟加拉国引进的无瓣海桑 *S. apetala*,都存在相关问题,因为这些属已有一些种间杂交的报道。与外来北美野鸭 *Anas platyrhynchos* 的杂交威胁到濒危种新西兰灰鸭 *A. superciliosa* 和夏威夷鸭 *A. wyvilliana* 的生存(Rhymer and Simberloff,1996;丁建清,2002;李振宇和解焱,2002)。

(三) 本地物种的灭绝与消失

外来生物入侵可以从种群、群落和生态系统各个层次上影响到每一个生态系统和生物区系,使成百上千的本地物种陷入灭绝地,加速生物多样性的丧失和物种的灭绝,特别是在岛屿和“生态岛屿”最为明显(万方浩等,2002a)。20 世纪在美国灭绝的鱼类中有 68% 与生物入侵有关(苏荣辉等,2002)。我国云南水域中的 432 种土著鱼类中,近 5 年来一直未采集到标本的鱼类约有 130 种,约占总种数的 30%;另外约有 150 种鱼类在 20 世纪 60 年代是常见种,现在已是偶见种,约占总种数的 34.7%;余下的 152 种鱼类,其种群数量均比 60 年代明显减少,外来鱼类的引入是这些土著鱼类减少的最主要原因(苏荣辉等,2002)。如云南大理洱海原产鱼类 17 种,有意无意地引入 13 个外来种后,外

来种与土著种争食、争产卵场所以及吞食土著种的鱼卵等，破坏了原有生态系统的平衡，导致原有 17 种土著鱼类已有 5 种陷入濒危状态(王献溥，1999)；云南泸沽湖是著名的风景名胜，湖内生长数种裂腹鱼 *Schizothorax* (*Schizothorax*) spp.，在 20 世纪 90 年代后期人为地投放养殖银鱼以后，湖区水地区域生态结构发生重大变化，不仅原有的土著鱼种趋于灭绝，水质也出现严重污染(李尚义和李宁，2002)。阿根廷蚂蚁 *Linepithema humile* 通过高效率的干扰性竞争和掠夺性竞争取代了本地蚂蚁(Holway, 1999)。1967~1970 年，巴拿马的加通湖(the Gatun Lake)中引入了一种非洲丽鱼 *Butis koillmatodon*，导致湖中原有的 8 种常见鱼种中的 6 种灭绝，种群骤减到 1/7，并使由水生无脊椎动物、藻类和食鱼鸟类构成的食物链遭到严重破坏。被引入到许多太平洋岛屿上的棕树蛇 *Biogair regularis* 的大肆捕食，使关岛一处特有的 10 种鸟类减少到灭绝的地步(Savidge, 1987)。在海洋生态系统中，由于盲目引进外来种或远洋船只携带，导致本地海洋生态系统受到影响，许多原有物种因被排挤而消失。在我国福建海域发现了一种原产于南美洲的沙筛贝 *Mgtilopsis sallei*，它可占据海岸基岩及养殖设施的表面，不仅使当地的附着生物全部消失，还因争夺饵料使人工养殖的各种贝类产量下降(梁玉波和王斌，2001)。

二、外来生物入侵对经济的影响

外来生物入侵新区后，占据适宜的生态位，种群迅速增殖、扩大，发展成当地新的优势种，这是一个生态学过程。其带来的直接后果除了对入侵地造成不可逆的生态灾害，还有对人类社会经济的危害(McNeely, 2001；陆庆光，1999)。如前文所述，美国每年直接或间接用于主要入侵物种管理(控制和预防)的费用高达 1366 亿美元(Pimentel *et al.*, 2000)，印度和南非每年因外来入侵物种造成的经济损失分别为 1300 多亿美元和 800 亿美元(李尚义和李宁，2002；张从，2003)。我国每年仅由 11 种主要外来入侵害虫和杂草害造成的经济损失就高达 574.3 亿元人民币(万方浩等，2002b)，每年各种外来入侵生物对我国造成的总经济损失估计在 2000 亿元人民币以上。

在美国，大约有 50 000 种外来种，其中约 15% 为有害生物。美国的有害生物中，外来种动植物及微生物所占比例为：农业害虫占 39%，林业害虫占 27%，农作物病害占 31%，畜禽病虫害占 7%，牧场杂草占 41%，农田杂草占 73%(陆庆光，1999)。1906~1991 年的近 90 年间，由于国际贸易传入美国的有害生物如欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* (Hübner)、地中海实蝇等达 29 种，造成直接经济损失 920 亿美元。在美国每年因外来生物入侵造成的经济和环境损失一直呈上升趋势，其费用主要用于农林业和湿地系统的修复及其他方面，其中仅入侵昆虫每年就造成近 139 亿美元的作物损失(Ruesink *et al.*, 1995)。毁灭性最大的是舞毒蛾 *Lymantria dispar*，仅在 1980~1996 年每年造成的损失就超过 3000 万美元(Wallner, 1997)。在夏威夷，98% 的作物损失是由入侵种造成的(Pimentel, 2000)。在美国受威胁和濒危的 958 个本地种中，有约 400 种主要是由于外来物种的竞争或危害造成的，这种损失难以用货币来计算(李振宇和解焱，2002)。外来入侵种以惊人的速度席卷美国包括农耕地、牧场和草原、湿地和水路、荒地和公园、甚至公路两侧和铁路旁在内的几乎每一寸土地，尤其是在西部的一些州，一些入侵物种带来了严重的经济损失，主要表现在外来生物入侵降低了土地的经济价值，破坏了本土生物群落，增加了土壤的侵蚀和沉降，并干扰野外风景及户外娱乐。

1986年10月25日英国发现第一例疯牛病之后,已花费了62.5亿美元用于消除由此造成的混乱,且从1995年英国牛肉制品出口已下降了99%,英国靠出口牛肉一年可赚取的40亿英镑化为乌有,而且还要为销毁病牛付给农民8.5亿英镑的补偿,英国的养牛业受到沉重的打击,并且对经济的影响可能还要持续15年。欧盟各国为防止该病入境至少耗去30亿欧元。日本和韩国目前正与口蹄疫抗争,为了防止疫病传播,韩国不得不屠杀35万头牲畜,造成的经济损失达9000万美元(李尚义和李宁,2002)。

中国现有的生态环境已在种种因素影响下不容乐观,入侵物种也日益猖獗,加上本土物种的基数较大,以至于外来生物入侵给中国造成的经济损失非常巨大。①外来入侵动植物对农业、林业、畜牧业和渔业等可带来直接经济危害。每年因外来入侵生物造成的农产品产量下降、品质减低、生产成本增加,给我国的农村经济造成每年数千亿元的经济损失的事时有发生。②外来入侵生物可通过影响生态系统而对旅游业带来损失,外来物种大面积的入侵定居会改变整个景观的格局,尤其是在风景区里的入侵,使风景改变,影响旅游业的发展。外来生物入侵还可通过改变生态系统产生间接经济损失。③外来生物通过改变生态系统所带来的一系列水土、气候等不良影响而产生的间接经济损失是巨大的,但其计算相对困难。比如,大量的水葫芦植株死亡后与泥沙混合沉积水底,抬高河床,使很多河道、池塘、湖泊逐渐出现了沼泽化,有的因此而被废弃使用,由此对周围气候和自然景观产生不利变化,并加剧了旱灾、水灾的危害程度;而且水葫芦植株大量吸附重金属等有毒物质,死亡后沉入水底,构成对水质的二次污染,又加剧了污染程度,尽管这些损失难以准确计算,但却不容忽视。此外,由于我们在控制害虫草害中使用的杀菌剂、杀虫剂和除草剂对生态系统与环境和人类健康的影响难以估计,及缺乏对生态环境和经济之间复杂关系的深入了解,对生物入侵造成的经济损失的精确估计往往十分困难(李振宇和解焱,2002)。

此外,在国际贸易活动中,对外来生物入侵的防范和对其威胁的恐惧常常引起国与国之间的贸易摩擦,成为贸易制裁的重要借口或手段,常导致重大经济损失。近年来外来生物入侵严重阻碍了我国一些农产品进入国际市场,给我国的出口贸易带来了巨大的经济损失。日本就曾以水稻疫情为由,禁止我国北方稻草及稻草制品出口日本;美国也曾以我国发生橘小实蝇为借口,禁止我国鸭梨出口美国;一些国家怀疑我国有某些动物疫病(如口蹄疫)的发生,部分畜产品不能正常进入国际市场。中美两国政府严重关注的贸易焦点之一小麦矮腥黑穗病(TCK)进出口问题的争端等均涉及到外来有害生物的入侵。为保护国家利益,在打破发达国家利用危险生物入侵问题所设置的贸易壁垒或所采取的歧视政策的同时,我们也必须构筑自己的技术壁垒,以阻止有害生物的入侵。

(一) 外来入侵植物对我国经济的影响

中国科学院植物研究所、动物研究所开展的外来植物调查和编目(Xie *et al.*, 2001)表明,我国受外来植物物种入侵所造成的危害也是触目惊心的。如原产于中美洲入侵我国的紫茎泽兰可强烈排挤本地植物,致使食物网结构崩溃,严重威胁生物多样性。而且该草含有的毒素易引起马匹的气喘病或导致牲畜误食后死亡,仅1979年在云南省的52个县179个乡镇,发病马就达5015匹,死亡3486匹,甚至造成“无马县”;牛羊也因无可

食饲料种群数量锐减。据不完全估计,紫茎泽兰每年给我国畜牧业带来的经济损失达数千万元人民币(刘伦辉等,1985;万方浩等,2002b)。

原产北美洲的豚草于20世纪30~50年代传入我国,现已扩散于东北、华北、华东、华中地区的15个省市,形成了沈阳、南京、九江—南昌、武汉4大扩散辐射中心,并有向华南、西北扩散的趋势。豚草具有很强的生态可塑性,适于在不同环境中生长,易于形成单一优势群落,破坏本地植被结构,可导致难以预料的生态后果,如由于豚草吸水吸肥能力强,使土壤很快贫瘠,对农业生产造成严重损失;不能有效地为昆虫天敌提供活动、栖息和避难的场所,使农业害虫猖獗;其花粉还是人类过敏反应症(枯草热,又称花粉热)的主要致病原,对人体健康产生危害,并给旅游业带来损失。仅沈阳市因豚草对农作物、交通、健康所造成的经济损失每年就达834万元人民币(万方浩等,1993;田家怡和潘怀剑,2000)。

水葫芦覆盖水面,堵塞河道,影响航运,降低水中溶氧量,影响水生生物的生长,严重影响水生生物多样性(吴克强,1993)。浙江温州市和福建莆田市1999年用于人工打捞水葫芦的费用分别为1000万元和500万元,上海地区2002年用于打捞水葫芦的费用有1900万元,近年来云南省昆明市为治理滇池里的水葫芦已花费40多亿元。水葫芦带来的农业灌溉、粮食运输、水产养殖、旅游等方面的经济损失更大。如在云南昆明市,20世纪70~80年代建成的大观河篆塘处—滇池—西山水上旅游线路,自90年代初大观河和滇池中水葫芦的“疯长”成灾,致使这条旅游线路被迫取消,原来在大观河两侧的配套旅游设施只好报废或改做他用,这给昆明的旅游业造成了巨大的损失(丁建清和解焱,2001)。

肆意蔓延的大米草严重影响沿海贝类水产养殖,仅福建省,由于大米草在沿海滩涂的恶性繁殖,使许多乡镇无法养殖海产品,经济损失每年就高达1000万元以上(白鸥和朱一农,1999)。假高粱、毒麦等异地植物在我国部分地区大肆蔓延,我国植物检疫机构也多次在国外进口的农产品中检验到携带有上述有害植物(丁建清和王韧,1998)。南方地区的飞机草等外来入侵植物不断竞争、取代本地植物资源,已严重影响了周围牲畜正常饲养。其他入侵植物也对农林生产造成严重的经济损失,如水花生对水稻、小麦和玉米全生育期引起的产量损失分别达45%、36%和19%。

(二) 外来入侵动物对我国经济的影响

目前严重危害我国农林业的40余种外来动物对农林业生产造成巨大经济损失。如美洲斑潜蝇最早于1993年在海南发现,到目前为止,该虫已广泛分布于我国29个省、市、自治区,发生面积273万公顷以上。可寄生22个科的110种植物,尤其是黄瓜、甜瓜、西瓜、西葫芦、丝瓜、番茄、辣椒、茄子、豇豆、菜豆、豌豆和扁豆等蔬菜瓜果类受害严重,对我国的蔬菜生产构成了严重威胁。我国目前每年防治费用45亿元以上,造成的经济损失高达48亿元人民币(王福祥,1997)。

美国白蛾在我国于1979年首先在辽宁省丹东发现,后陆续在山东、陕西、河北、天津市等省市发生,涉及140多个县(区),发生面积105万公顷(梅丽娟等,2002),相继给这些省市的林业、园林和城市绿化造成了极其严重的危害,酿成了重大损失。尤其是近年来美国白蛾的发生已接近首都北京,一旦传入,将给首都的林业和园林绿化和2008

年的“绿色奥运”造成重大威胁。

稻水象甲 1988 年首次在我国河北省唐海县暴发成灾。其后,天津、山东、辽宁、吉林、浙江、福建等地陆续发生,发生面积达 33 万公顷。水稻受害后,一般产量损失 5%~10%,严重田块 40%~60%,少数田块基本无收(李先誉, 1997; 魏鸿钧, 1997)。

松突圆蚧 1969 年在日本发现,其后在香港、澳门也发现此虫,1982 年 5 月在广州珠海市马尾松林内发现,1983 在广东省的发生面积为 11.3 万公顷,1989 年为害面积达 60 万公顷,12 万公顷的松林枯死或濒临死亡,损失木材或生产量 666 万立方米;至 1996 年该虫为害面积达 80.9 万公顷,且正以每年 6~7 万公顷的速度向西北等方向蔓延,其每年造成松林枯死 1.3 万公顷以上,仅 1986 年的损失就达 2.9 亿人民币(朱建雄, 1993; 杨平均和梁铭球, 1996; 曹文文, 1999; 何国锋, 1995)。

被称为“松树癌症”的松材线虫病于 1982 年在南京中山陵风景区的黑松上首次发现,其后迅速扩散到江苏、广东、浙江、山东、安徽、台湾、香港等地,并猖獗成灾(马以柱等, 1997),仅安徽省就累计死亡松树 98 万株,直接经济损失 1.2 亿元。1982~1991 年,全国松材线虫的发生面积总计为 3.8 万公顷,松树感病死亡 140 万株,损失木材 5 万立方米。1996 年,全国发生面积 4.1 万公顷,仅浙江省就病死松树 173 万株。1997 年发生面积上升到 5.7 万公顷,1998 年增至 7.24 万公顷,1999 年约 7.4 万公顷(国家林业局, 1998; 中国农业年鉴, 1997, 1998, 1999, 2000)。1982~2000 年,全国累计死亡松树 150 万株。松材线虫扩展速度惊人,现在正威胁着著名的黄山和张家界的风景区。在安徽南部正以每年 15~30km 的速度向黄山风景区逼近。松材线虫一旦入侵,给这些风景区带来的经济损失是难以估量的。目前,国家计划委员会立项投资 6000 万元在黄山风景区修筑抵御松材线虫危害的“屏障”(田家怡和潘怀剑, 2000; 丁建清和解焱, 2001)。江苏省是松材线虫病的发生老区,1984 年南京地区用飞机喷洒农药防治,直接费用 46 万元以上;1998 年共清理枯死木和衰弱树 47.1 万株,烧毁病枝梢 7100t。1998 年,美国正式要求我国对所有出口美国的木包装材料实施严格检疫处理。仅此一项,将直接影响我国对美贸易出口量的 1/3~1/2,可能造成的损失达 170 亿美元。

(三) 外来入侵微生物对我国经济的影响

外来微生物在适宜的生态气候条件下,往往是暴发性的,种群成指数级增长,一旦暴发,难于控制。许多危险性病害,如水稻细菌性条斑病、棉花黄萎病、柑橘溃疡病 *Xanthomonas campestris* pv. *citri* (Hasse) Dye 等,都是在从国外引进或国内各地生产、调运的农作物种子、苗木及植物产品的过程中传播的。如原产于美国的棉枯萎病和棉黄萎病,20 世纪 30 年代随棉种进入我国,造成的后患一直延续至今,成为我国棉花种植史上最重要的病害。仅就 1982 年的统计,我国 16 个省 628 个县发生这两种病害的棉田面积达 148.2 万公顷,其中 2.07 万公顷棉花绝收(白鸥和朱一农, 1999)。

原产于美国的甘薯黑斑病,1937 年从日本传入我国辽宁省。到 1945 年该病已蔓延到辽宁、河北、山东、山西、河南、安徽、江苏、陕西等甘薯产区,造成极为严重的损失。据 1963 年调查,全国 20 个省市估计损失鲜薯在 500 万吨以上,该病菌刺激甘薯产生甘薯黑斑酮(ipomeamarone)和甘薯黑斑霉二酮(ipomeanine)等对人畜有毒的物质,导致病薯喂牛引起气喘病,甚至死亡。据河南安阳、信阳两区和安徽北部两个县统计,因喂

食病薯，有上万头耕牛中毒死亡，该病至今仍在各省市为害(白鸥和朱一农，1999)。

在动物致病微生物方面，如1997年我国台湾地区暴发的猪口蹄疫，导致70万人失业。鱒鱼传染性胰腺坏死病毒(infectious pancreatic necrosis virus, IPNC)于1940年在加拿大首次发现，现已传播到欧洲、亚洲和美洲。1984~1989年该病曾在我国西北地区某红鱒鱼场暴发流行，稚鱼死亡率高达95%(刘兴发等，1997)；该病毒具有广泛的寄主范围，除鱒鱼外，还能侵染七鳃鳗、圆口纲脊椎动物、硬骨鱼类和一些甲壳类动物，对我国野生水生动物生存和水产养殖业的发展构成严重威胁。2003年12月15日韩国农林部证实韩国出现传染性极强的H5N1病毒以来，日本、越南、柬埔寨、泰国、印度尼西亚、中国等国也相继出现禽流感疫情，引起了社会的恐慌。20世纪90年代以来，日本、泰国、中国等许多亚洲国家和地区因虾病流行，对虾养殖产量锐减，造成重大经济损失，其中危害最严重的是白斑综合征病毒(white spot syndrome virus, WSSV)引起的白斑综合征，在我国广大对虾养殖地区迅速扩散，10年来导致对虾养殖及相关产业经济损失达上百亿元(蔡生力和陈专静，2001)。近年来又发生了凡纳对虾涛拉综合征病毒(TSV)的入侵，使我国对虾养殖业雪上加霜，再次受到严重打击。对虾白斑病、对虾涛拉综合征、牙鲆淋巴囊肿病毒病(lymphocystis virus)等成为水产养殖业的严重威胁，短期内对部分产业几乎造成了毁灭性的打击。

三、外来生物入侵对人类安全的影响

外来入侵生物不仅对生态环境、农林业生产带来巨大的损失，某些生物的入侵，还直接威胁人类健康，或间接危及人类生命，影响社会安定。一些重大人畜疾(疫)病，如口蹄疫、禽流感、疯牛病等对人类健康和社会稳定带来严重威胁与恐慌。1997年我国台湾地区暴发的猪口蹄疫，导致70万人失业；香港暴发疑为人禽共患的禽流感引起了全社会的恐慌。侵入我国的豚草所产生的花粉是引起人类花粉过敏症的主要病原，导致近年来北方地区“枯草热”症逐年上升(万方浩等，1993；丁建清和解焱，2001)。马铃薯晚疫病随着马铃薯的繁殖而传播，1845年曾在爱尔兰大暴发，作为主粮的马铃薯全部枯死，由于缺粮，爱尔兰当年大约有150万人饿死(李尚义和李宁，2002)。疟疾是人类生存的天敌，它是由按蚊传播的。1930年按蚊从非洲西部传入巴西，当年就有10%的人口感染上此病。1942~1943年，该病从苏丹传入埃及尼罗河地区，致使该地区的死亡人数超过13万人(李尚义和李宁，2002)。还有一些外来动物，如福寿螺等，是人畜共患的寄生虫病的中间宿主。麝鼠可传播野兔热，极易威胁周围居民的健康。

但凡新型的传染病，一些是直接通过旅行者无意带进来的，还有一些则是间接地从人们有意或无意引进的动物体上传染的(McNeely, 2001)。1991年在美国的阿拉巴马州机动港口的压舱桶中发现了一株南美霍乱菌，霍乱菌也在机动海湾的牡蛎和鲑鱼样中发现，引发公众避免接触或食用牡蛎或各类海鲜食物(罗玮等，2001)；流行于非洲的西尼罗病毒，1999年首次出现于西半球的美国纽约州，其后短短三年，全美国年发病人数由最初的62人猛升至2万多人，病死人数则由最初的7人迅速增至2002年的240余人。目前感染或携带西尼罗病毒的家畜、鸟类及蚊虫媒介已遍布美国本土的绝大部分州。五带淡色库蚊 *Culex quinquefasciatus* Say 于1826年由墨西哥传入夏威夷。数年后，白纹伊蚊 *Aedes albopictus* Skuse、埃及伊蚊 *Aedes aegypti* L. 也由中国或日本传入夏威夷。近年

来发现该蚊已传至美国本土并沿密西西比河平原向北扩散，并侵入美国中西部地区许多州。这些能传播黄热病(yellow fever)、登格热等疾病的害虫一旦入侵成功，因分布范围广、生境复杂、寄主种类多等因素，彻底根除已不可能，它们将不断地干扰人类生活，危害人类的健康(杨平均和梁铭球，1996)。

大型工程，比如修建水坝、灌溉、土地开垦、道路建设和移民工程等，都可以导致疾病入侵，比如疟疾、骨痛热、血吸虫病和锥形虫病。人类开垦热带雨林地区，为更多的病毒入侵提供了新的机会，其中包括以前只在野生动物寄主之间循环的出血性发烧病的病毒。

第四节 生物入侵的特点

一、外来生物入侵与人类活动密切相关

外来入侵物种问题的关键是人为问题，常常是人类的一些对生态环境安全不负责任的活动，把外来生物直接或间接地带到其他地方(李振宇和解焱，2002)。人类在现代化的全球运输和旅行过程中，很容易把一个物种从一个地方运到另一个地方；人类的经济活动也可能引进一些外来物种，如亚洲虎斑蚊(Asian tiger mosquitoes)就是通过日本出口旧轮胎的集装箱在美国登陆的，此外北美五大湖地区约 1/3 外来种是压舱水带来的。此外，虽然一些物种有能力入侵到那些未被干扰且保护良好的生态系统中，但外来入侵物种更容易入侵到人类干扰过的地方，例如农田、人类集聚地和道路(Millers, 1993)。

从人类发生和发展的历史进程来看，人类迁徙的同时总伴随着物种的迁移。10 多万年前，人类从非洲扩展到欧洲和亚洲；4 万~6 万年前在澳大利亚出现；1.5 万~2 万年前进入美洲；大约 1000 年前最远到达了太平洋地区。人类这一物种就是自然侵入其他地区的很好例证，并且传播迅速。人类经过之处，也总要携带一些其他物种。例如，第一批来到美洲的亚洲人带来了狗，玻利尼亚人航海时携带着猪、芋头、白薯和其他至少 30 种物种(包括老鼠、蜥蜴等)。

贸易活动促进了物种的迁移。从出土的石器可以判断，贸易的产生可以追溯到史前的人类社会。至少在几千年以前，我国商人就航行至东南亚，在中国、印度和中东之间进行贸易往来。由于航海工具的日益完善，贸易也随之发展。到了哥伦布的航海旅行时代，贸易活动更加频繁。军队也是物种迁移的重要载体。军队传播新疾病的事实是众所周知的。麻疹就是由早期的征服者从欧洲带入美洲的，梅毒却是从美洲传到欧洲的。在殖民统治时期，物种的引入达到了一个新的高潮，小麦、谷物、黑麦、牛、猪、马、绵羊和山羊等物种被到处传播。蒸汽轮船为人类的海上活动带来了便利，也为物种的迁移提供了一条新的途径。在 1820~1930 年间，有 5000 多万欧洲人移民到遥远的海滨，随身携带了大量的动植物。后来，中国人、印度人、印度尼西亚人、非洲人和其他地区的移民也把本国的物种带到他们在欧洲、澳大利亚和美洲的新家园。

现在，人类对地球生态系统的影响力仍在持续增长。全球经济一体化使生物体通过贸易、运输、旅行和观光从世界的一个地方到了另一个地方，扩大了物种的传播范围。人类的活动降低了生物跨越空间障碍的难度。

在种质资源的引进中，引种品种资源进入一个国家或地区，可为作物育种和植物栽

培提供大量的种质资源，但也增加了外来危险性病虫害的传入机会，带病种质一旦成为育种材料，其本身就可能是潜在的发病中心。特别是在现代交通工具发达的情况下，不仅扩大了外来危险性病虫害的传入渠道，极大地缩短了危险性病虫远距离传播的时间，削弱了地理自然屏障的阻隔作用，病虫在传播中自然死亡的几率更小，从而极大地增长了危险性病虫迅速传入一个新地区的可能性，这种情况在世界性的品种资源交流和引进中时有发生。

外来物种引进往往对一个国家或地区发生某种病虫害产生直接影响。美国大约 40% 的农作物害虫是从国外引入的，欧洲也达到 20%，在夏威夷，95% 的害虫是近两百年引进的(刘红霞和温俊宝，2000a)。近年来，由于人口持续增长、传统农业多元化、农产品和非农产品贸易的增长、国际交往和旅游业发展等原因，危险性病虫入侵的几率大大增加。

二、外来生物入侵在空间上具有多样化

(一) 在传入途径上的多样化

外来物种在传入途径上是非常多样化的，基于外来生物入侵和人类活动关系的密切程度，可以把外来生物入侵归纳为 3 种途径，也就是随着贸易、运输、旅行和旅游等活动被无意识地引进；被有意识地引进用于农林牧渔生产、景观美化、生态环境改造与恢复、观赏等目的的物种，尔后“演变”为入侵种；或者，外来生物靠自身的扩散传播力或借助于自然力量进行自然入侵。

人类有意引入外来物种的主要目的是为发展经济和保护生态环境，但在引进外来物种为多种产业的发展起到重要促进作用的同时，也往往容易导致一些严重的生态学后果。在我国目前已知的外来有害植物中，超过 50% 的种类是人为引种的结果。有些栽培植物的引种时间和逸生地点比较没有规律，例如法国传教士曾将欧洲的荆豆 *Ulex europaeus* 引种到四川城口教堂附近，随后荆豆大量逸生(解焱等，2001)；水产养殖业是我国的重要产业之一，但它直接涉及从国外引进了外来入侵物种，如克氏原螯虾 *Procambarus clarkii*、红螯螯虾 *Cherax quadricarinatus*、虹鳟鱼 *Oncorhynchus mykiss* 等(Xie et al., 2001)，其中从额尔齐斯河引入的河鲈 *Perca fluviatilis* 已导致新疆博斯腾湖中的新疆大头鱼 *Aspiorhynchus laticeps* 的灭绝；作为牧草、饲料、药用植物和作为观赏植物等引进而造成入侵杂草的例子也很多，例如空心莲子草、三叶草(*Trifolium* sp.)、白香草木樨 *Melilotus albus* Desr.、银花苋 *Gomphrena celosioides* Mart、胜红蓟 *Ageratum conyzoides* L.、熊耳草 *Ageratum houstonianum* Mill 等；外来物种也可以通过水族馆和家庭水族箱的途径被引入，如从亚得里亚海引到法国水族馆的绿藻 *Caulerpa taxifolia*，就是通过释放孢子，在法国当地海洋生态系统中形成了优势种群，使本地海洋植物大量消亡(梁玉波和王斌，2001)；近年来食物或生产皮张也成为外来有害生物入侵的有效途径，如食物中的茼蒿 *Chrysanthemum coronarium* L.、芫荽 *Coriandrum sativum* Linn.、菊苣 *Cichorium inbous* L.、福寿螺、褐云玛瑙螺和皮张具有较高经济价值的麝鼠、海狸鼠，现今都成为了入侵物种，有些已经对社会产生了较大的危害；此外有一些动物通过作为宠物或人为放生，如小葵花凤头鹦鹉 *Cacatua sulphurea*、虹彩吸蜜鹦鹉 *Trichoglossus haematodus* 及巴西龟

Trachemys scripta 在当地野化后,数量大增,严重危害当地植被。最后需要强调的是在我国生物防治过程中,存在没有很好地进行天敌风险评估的情况下,就盲目引进天敌物种的现象,此时外来天敌成为有害入侵物种的可能性非常大。因此应加强对引进的有益物种可能成为另类入侵物种的收益与风险评估研究。

也有一些外来物种则是随着人类活动而无意传入的,其中一些通常随人及其产品通过飞机、轮船、火车等交通工具,作为偷渡或“搭便车”被引入到新的环境。新疆的褐家鼠和黄胸鼠也是通过铁路从内地传入的(丁建清和解焱,2001;解焱等,2001);我国沿岸海域有害赤潮生物有16种左右,其中绝大部分主要是通过压舱水等途径在全世界各地沿岸海域传播,这些物种严重加剧了沿海赤潮现象的发生(梁玉波和王斌,2001);食肉性的红螺 *Rapana thomasi* 1947年自日本海通过船舶迁移到黑海,十年后,几乎将黑海塔乌塔海滩的牡蛎完全消灭(黄宗国和蔡如星,1984)。近年来,随着国际贸易的不断增加,对外交流的不断扩大,国际旅游业的迅速升温,外来入侵生物借助这些途径越来越多地传入我国。除交通工具外,建设开发、军队转移、野化的家养动物以及动植物引种等也会无意引入外来物种。

此外,外来入侵种还可通过风力、水流自然传入,鸟类等动物还可传播杂草的种子,例如紫茎泽兰主要是通过公路交通等从中缅、中越边境扩散入我国,风和水也是自然扩散的原因之一。薇甘菊可能是通过气流从东南亚传入广东的;稻水象甲也可能是借助气流迁飞到中国大陆的(丁建清和解焱,2001)。

(二) 入侵生物自身以及对象的多样化

外来入侵物种指那些出现在其过去或现在的自然分布范围及扩散潜力以外,就是在其自然分布范围以外或在没有直接或间接引入或人类照顾之下而不能存在的物种、亚种或以下的分类单元,包括其所有可能存活、继而繁殖的部分、配子或繁殖体(李振宇和解焱,2002)。根据外来入侵物种定义,可见外来入侵生物自身是多种多样的,从脊椎动物(哺乳类、鸟类、两栖爬行类、鱼类)、无脊椎动物(昆虫、甲壳类、软体动物)和高、低等植物(入侵植物以草本植物为主),小到细菌、病毒均能找到例证。从外来生物入侵的对象来看,在生态系统方面,它几乎可以入侵地球上所有的生态系统,如海洋生态系统、森林生态系统、农业生态系统、草地生态系统、城市居民区生态系统等,其中以低海拔地区及热带岛屿生态系统的受损程度最为严重;另外在受影响的经济领域方面,它直接涉及到了农业、林业、渔业、牧业,同时对一些工业也有着直接或间接的影响。与此相关的是,从目前人类对外来生物入侵研究的角度出发,它涉及到了人类多学科、多技术的交叉、合作。

三、外来生物在入侵过程中具有不稳定性

外来生物入侵一般在传入扩散过程中都要经历传入期、定植(殖)期、停滞期和扩散期几个阶段,但是在涉及到某一类外来物种在不同入侵时期或不同物种在同一时期时,在时间上它具有强烈的不稳定性、复杂性,这尤其表现在外来入侵生物的暴发时间上。因为这是外来入侵生物自身遗传和外界作用于入侵生物并不断变化着的环境等因素所共同作用导致的一个动态结果。一些农林业病虫害外来种在适宜的生态气候条件下,往往

是暴发性的,种群呈指数级形式增长,一旦暴发,难以控制(万方浩等,2002a,2002b)。如美洲斑潜蝇入侵,一个明显特点是它传播扩散速度非常快,且不受季节、地域限制,这与蔬菜、花卉产业全球化有关。南美斑潜蝇 *Liriomyza huidobrensis* Blanchard 在 1926 年首次被报道后,1938 年在美国发生危害,1987 年又在荷兰温室莴苣上发现有其危害,此后数个欧洲国家,如丹麦、爱尔兰、意大利、比利时、英国等都有南美斑潜蝇发生的报道(Linden,1990)。20 世纪 90 年代初云南省鲜切花产业开始起步,1993 年在昆明花卉种植园就发现该虫(蒋小龙等,1997),1995 年经专家鉴定后得以确认,随后蔓延至全省甚至全国,并在一些地方短期内即大暴发。1988 年被人带携传入广东的湿地松粉蚧,至 1999 年扩散至 35.24 万公顷,其中受害面积达 23.16 万公顷。于 30 年代末随日本赤松 *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. 和黑松 *P. thunbergiana* Franco 苗木传入我国的日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* (Kuwana),1996~1998 年,每年在吉林、辽宁、山东、江苏、浙江等省的发生面积约在 11 万公顷左右。辽宁每年致死松树木材 3 万立方米,造成巨大的经济损失(万方浩等,2002b)。

第五节 生物入侵的研究现状

生物入侵的研究是极其复杂的,关于生物入侵的研究早在 20 世纪中叶就开始了,多年来大多应用生物学和生态学的常规方法,限于对生物入侵的观察描述与提出理论假设。如 Elton 在 1958 年完成的一部系统介绍生物入侵的经典专著 *The Ecology of Invasion by Animals and Plants* 中不仅列举出生物入侵的许多案例,还提出了一些解释生物入侵机制的重要理论与假设,如,新栖息地缺乏入侵种的天敌、丰富的群落生物多样性产生较强的入侵抵抗力等 (Elton,1958)。此后,各国科学家陆续开展了许多有关外来动物、植物、微生物、海洋生物等各个方面的研究。但真正引起科学家广泛关注与研究的则是在 20 世纪 80 年代后期。特别是近 20 年来,对外来入侵生物的研究从宏观的预防与控制策略 (McNeely *et al.*, 2001; Zalba *et al.*, 2000; Haltuch and Berkman, 2000),与有效可行的控制和管理技术体系 (Shine *et al.*, 2000),到微观的分子生物学与生态学 (Mack *et al.*, 2000; Cohen and Carlton, 1998)、生态遗传学 (Sakai *et al.*, 2001; Carroll and Dingle, 1996)、协同进化 (Levine, 2000; Christan, 2001; Thompson, 1998) 及控制技术与生态修复的机制 (Driesche and Driesche, 2000) 等,融入了较多的分子生物学、分子生态学、生态遗传学、生物化学、生物数学和 3S (GIS、GPS、RS) 技术等方法,使生物入侵机制的研究水平有了很大提高,促进了入侵生物学的发展,使得入侵生物学的研究有了很大的发展,目前生物入侵已成为生态学、生物多样性科学的一个研究热点 (徐承远等, 2001)。随着研究的深入,由此产生了一些新的概念、假设与推论,如最小种群理论、十数定则、入侵生物的前适应性理论、生态位与遗传多样性正比相关理论、生物群不协调理论、天敌逃逸理论、群落生物多样性理论、生态位机遇、入侵应力、繁殖体应力等;发展了一些有实用价值的控制技术及其特定生态系统的恢复与管理技术体系,初步形成了入侵生物学的学科理论与方法的框架。

1982 年,世界科学联合会下属的 SCOPE (环境问题科学委员会) 推出了有关“生物入侵生态学”的研究计划,对国际间外来植物和动物的扩散和影响进行了研究 (Williamson

and Fitter, 1996a, 1996b); 除了几次专题讨论会之外, 这一项目还出版了近 20 本有关的专著(Crawley and Edwards, 1987; Drake *et al.*, 1989; Castri *et al.*, 1990, Mooney and Hobbs, 2000)。在国际生物多样性公约(CBD)原则的指导下, GEF 针对各缔约国对外来入侵生物的预防与管理提出了 9 条指导性原则。1996 年由 SCOPE、IUCN 和 CAB International(国际农业与生物科学中心)共同组织的全球入侵生物项目(GISP, Global Invasive Species Programme)开始实施以来, 在发展外来入侵生物的最佳预防与管理策略与指南、组织实施国际合作项目的研究等方面取得了卓有成效的成果(Writtenberg and Cock, 2001)。同时, Blackwell 科学出版社创刊了以入侵为主题的国际刊物《多样性与分布》(*Diversity and Distributions*), 一本以《生物入侵》(*Biological Invasions*)命名的国际刊物亦于 1999 年在 Kluwer 科学出版公司发行(李博和陈家宽, 2002)。这些都反映出国际上对生物入侵的现象和研究越来越重视。

一、国外对外来种入侵机制的研究

(一) 外来种特性

外来物种抵达一个新的环境或引种到一个新的地区, 可能会逃逸到野外, 变成野化种群, 进而扩散甚至成为有害生物(Williamson and Fitter, 1996a, 1996b)。但并不是所有的外来种都可以造成生物入侵, 只有一小部分会入侵成功, 并带来生态灾害。通过分析, 造成生物灾害的外来入侵物种一般具有以下特点。

1. 外来入侵物种具有较强的适应性

外来物种的成功入侵与其本身的生活史特征、生态学特征等有很大的关系。一般认为, 成功入侵的外来种对各种环境因子的适应幅度较广, 对环境有较强的忍耐力, 使外来种在一些环境中获得对土著种的竞争优势, 或能占据土著种不能利用的生态位(Elton, 1958), 从而成功入侵。例如, *Miconia* 在夏威夷的雨林中成为优势植物, 其中一个特点就是耐阴性强; 有些地方金属元素的含量高, 会抑制本地植物的生长, 但是外来种能够平衡体内外的金属离子在这些地方生长(Thompson, 1991); 旱雀麦的根能达到本地种难以到达的深度, 可利用深处的水, 故其能在寒冷干燥的早春先于本地种萌发(Walker and Smith, 1997); 对近缘的菊科千里光属植物旅人蕉 *Senecio madascariensis* 和 *Senecio lautus* 的比较研究发现, 在各种生境下, 入侵种旅人蕉的存活率和发芽率都要高于 *S. lautus* (Radford and Cousens, 2000); 对外来种滩栖螺 *Batillaria attramentaria* 和本地的拟蟹守螺 *Ceithidea californica* 研究发现, 滩栖螺的死亡率是其入侵成功的主要原因(Byers and Goldwasser, 2001)。有些入侵种较本地种更能适应当地的自然环境。原产大西洋加那利群岛(Canary Islands)的一种称为火树的固氮植物, 入侵到夏威夷国家火山公园后, 改变了该公园的基本生态系统。因为该树种可以固氮, 在营养贫瘠的火山岩土壤中, 其氮的获得量比当地植物大 90 倍。很多本地种只能往土壤营养稍好的地区退却, 这更导致了火树的进一步入侵(Vitousek *et al.*, 1987; Vitousek and Walker, 1989)。火树还可以吸引外来种暗绿绣眼鸟 *Zosterops japonica*, 该鸟可以为其传播种子(Williams and Fitter, 1996a, 1996b)。暗绿绣眼鸟也被认为是几种当地鸟类的竞争者(Vitousek *et al.*, 1987; Mountainspring and

Scott, 1985)。

2. 入侵物种具有较强的繁殖能力和传播能力

通常成功入侵的外来种具有很强的繁殖能力，能迅速产生大量的后代，外来种的繁殖能力对其在新栖息地种群的建立有很大作用。例如，凤眼莲具有有性和无性两种繁殖方式，每个花序包含 300~500 粒种子，还可以通过匍匐枝进行营养繁殖，植株数量在 5 天内增加 1 倍(李振宇和解焱, 2002)。斑潜蝇的繁殖力很强，每雌虫可产卵 100~600 粒(Parrella, 1987); 且其生活周期短，世代重叠明显; 虫体小，为害习性隐蔽，在入侵和为害早期不易被察觉，一旦被察觉，已呈现出暴发成灾的态势(陈兵和康乐, 2002)。入侵种能利用多种方式进行传播，使其能够有更多的机会找到合适的栖息环境定居建群。例如，许多杂草如豚草、薇甘菊种子能借助于风力远距离传播; 水葫芦借助水运进行扩散。当今世界国际间贸易频繁，人类活动对外来种的传播起了相当大的作用，许多外来种跨越了原来在自然传播的情况下难以跨越的地理障碍，到达新的环境并造成了严重危害。如对北美五大湖区斑贻贝 *Dreissena polymorpha* 的个案研究表明，斑贻贝的传播主要是由于船只运输造成的，水鸟等野生动物对它的传播作用则微乎其微(Johnson and Carlton, 1996)。

3. 遗传结构与生物入侵

入侵种群一般是由原产地种群中引进的少数个体发展而来的，与原产地种群相比，遗传多样性会降低，通常认为这种情况对种群发展是有害的(Saccheri *et al.*, 1998)。但有研究表明，在一些情况下种群中较低的遗传多样性反而能增强外来种在新栖息地中的竞争与生活的能力(Tsutsui *et al.*, 2000)。如入侵性极强的阿根廷蚂蚁 *Linepithema humile* 在原产地形成小而分散的蚁群(multicolonality)，但在入侵地——北美形成较大的单一蚁群(unicolonality)，这是由于在原产地种内不同巢穴的个体间争斗激烈，巢穴间边界明确，但在北美的种群内争斗却很少，巢穴间没有明显的边界，数个家族生活于同一领域而形成大的单一蚁群。数个家族生活于同一领域使得它在对土著种的争斗中有数量优势。同时，较少的种内争斗减少了内耗，使得种群的生活与繁殖能力都大大提高(Holway and Suarez, 1999; Suarez *et al.*, 1999)。这两方面的优势使其排挤了北美的土著种。后研究发现阿根廷蚂蚁北美种群种内攻击性的减弱是由于种群遗传多样性降低所造成的。北美种群来自于少数的迁入者，不同巢穴的蚂蚁具有较近的祖先，遗传多样性较低，相似性很高，许多基因是共有的。因此由于亲缘选择，阿根廷蚂蚁北美种群不同巢穴之间的争斗较少，从而形成了有利于其入侵的行为特性(Tsutsui *et al.*, 2000)。有时外来种种群在新栖息地的选择压力下可产生新的有利于入侵的性状，并被选择和保留下来，加速了种群遗传结构的分化。外来种建立种群，随着时间的推移，可能发生遗传分化与演变，如入侵旧金山湾的大米草属植物互花米草 *Spartina alterniflora* 原本为异花传粉植物，自花传粉结实率很低，但在入侵初期时由于密度很低，种群中出现的少数自花传粉结实率高的植株被选择保留下来，这样就改变了种群的遗传结构(Daehler, 1997)。此外，对入侵群体遗传结构特征的研究，还可揭示外来入侵种的起源问题，例如美国对地中海实蝇的研究。对入侵种群遗传结构的研究是近年来新兴的领域，虽然已经有了一些很好的结果，

但是研究的面还有待扩展。如何将入侵种群的遗传结构上的特殊性与适应、竞争等直接导致入侵成功的因素结合起来,是未来研究工作的重点与难点。

(二) 外来种与土著种之间相互作用

1. 种间竞争

一般认为,外来种在新栖息地的环境条件下会与土著种竞争资源。一些外来种对食物与资源的获取能力强于土著种,从而可以在竞争中取得优势(Petren *et al.*, 1993; Petren and Case, 1996; Holway, 1999; Juliano, 1998)。例如,英国红松鼠 *Sciurus vulgaris* 体态娇小可爱,遍布英伦三岛。但是,随着一种个头较大的北美灰松鼠 *S. carolinensis* 的引进,红松鼠的生存受到极大威胁。外观不如红松鼠的灰松鼠,觅食力和繁殖力均比红松鼠强得多。通常一处森林来了一群灰松鼠,15年间就可导致红松鼠的绝迹。目前灰松鼠不断侵袭红松鼠的领地,导致红松鼠的生存空间愈来愈小(Williamson and Brown, 1996a, 1996b)。新西兰 *Northofagus* 森林中的一种介壳虫(*Uotracoelostoma assimile*)所产的蜜汁被当地的食蜜昆虫和鸟类取食,但德国黄胡蜂 *Vespula germanica* 入侵该地区后,蜜汁被入侵种大量取食掉(Clout, 1999),导致当地的濒危物种——土生的橄榄色鸚鵡 *Nestorm eridionalis* 几乎绝迹(Beggs and Wilson, 1991)。有时这种竞争优势是在特定的环境条件下表现出来的。例如,在太平洋岛屿上入侵性很强的一种蜥蜴——蝎虎 *Hemidactylus frenatus* 捕食较为敏捷,擅长长程攻击(longstrikes, 发动攻击时蜥蜴距猎物20cm以上),在城市有灯光处聚集着大量昆虫,而当地城市建筑物的简单结构又在昆虫聚集区形成开阔的空间,蝎虎捕食时的优势可以得到充分发挥,从而在对土著种鳞趾虎 *Lepidodactylus lugubris* 的竞争处于较为有利的位置。在城市化地区蝎虎逐渐取代了土著种鳞趾虎。但在昆虫分布较分散,环境较复杂的郊区与森林,蝎虎的捕食快速敏捷的特点发挥不出,仍难以取代与之食性几乎相同的土著种鳞趾虎(Petren and Case, 1998)。有些外来种竞争优势的产生更为复杂。研究发现在火蚁 *Solenopsis invicta* 的原产地巴西有较多的拟寄生天敌,火蚁为逃避攻击不得不隐蔽不出,因而大大减少了取食量,降低了自身对其他蚂蚁的竞争能力。而在美国,火蚁的天敌大为减少,火蚁的取食行为增强。由于火蚁本身的取食能力远超过北美的土著种,它在新栖息地的食物竞争中就处于有利地位,排挤了其他蚂蚁。研究中还发现,阿根廷蚂蚁与火蚁在新栖息地都能集聚成较大的单一巢穴,而土著蚂蚁的居群则较小,这样前者在竞争中就取得了数量上的优势,可以在战斗中击败或赶走土著种(Holway, 1999; Holway and Suarez, 1999)。在植物中,有关外来种与土著种竞争的研究也在开展,并获得了一些结果(Juliano, 1998; Meekins and McCarthy, 1999),但机制还没有像动物中揭示得这么深入与具体。造成竞争优势的原因在不同个案中是不同的,将来的研究应十分注重具体情况具体分析。

2. 种间抑制

外来种与土著种之间往往存在着相互抑制作用,这类影响在动物与植物中都存在,有时候是导致入侵成功的重要因素。Callaway 和 Aschehoug(2000)最近对北美入侵性杂草矢车菊 *Centaurea diffusa* 的研究发现,矢车菊在原产地亚欧大陆不造成大的影响,进入北

美后却泛滥成灾，原因在于其植物根系的分泌物，可以通过化感作用排挤许多土著种导致入侵成功。在动物中也有类似的发现。伊蚊属 *Aedes* 中，一个种的幼虫可以抑制另一个种虫卵的孵化，亚洲的白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 侵入北美后，其幼虫在很低的密度时即可抑制土著种埃及伊蚊 *A. aegypti* 的虫卵孵化；而白纹伊蚊的卵即使在高密度的土著种幼虫中也不受到明显的抑制(Edgerly *et al.*, 1993)。不同的外来种之间也有类似的相互作用。早期的研究就发现两种欧洲麦茎蜂(*Cephus pygmaeus* 和 *Cephus tabidus*)入侵北美后，在两者共存时，前者的卵孵化早于后者，幼虫会杀死后者未孵化的卵，于是先来的入侵种 *C. tabidus* 逐步被后来的 *C. pygmaeus* 取代(Elton, 1958)。种间抑制的作用是多样的，其作用方式、机制和结果还有待深入研究。

3. 协同入侵

此外，外来种在入侵过程中常存在着协同作用，即通过几种外来种的相互配合而入侵。例如一个外来种携带着病原体或寄生虫侵入新栖息地，结果疾病在对病原体或寄生虫更为敏感的相似土著种中流行。入侵种因失去竞争对手而得到扩展，这样该外来种与它的病原体或寄生虫都发生了成功的入侵 (Kraus and Page, 1995)。新的研究通过定量的实验室工作还发现，外来种与它的捕食者一同进入新栖息地后，类似的入侵模式也会起作用 (Wells and Kurahashi, 1997; Wells and Henderson, 1993)。

4. 杂交与生物入侵

杂交也被认为是生物入侵成功的原因之一。外来种与土著种杂交产生的后代可能兼具双亲的有利性状，还可能产生双亲不具备的新特征，它们可以入侵并生活于双亲不能生存的环境中。从遗传的角度来说，杂交种往往具有较大的遗传多样性，有利于其种群的生存。通过杂交，后代还可以摆脱双亲基因组中积累的有害基因的影响。杂交后代往往通过染色体加倍形成多倍体，能固定杂种优势(Ellstrand and Schierenbeck, 2000)，并对受干扰的生境有更强的适应性。同时，杂交可能产生一些有特殊适应能力的个体，从而形成一个全新的种群(Ellstrand and Schierenbeck, 2000)。例如由外来肉质杂草 *Carpobrotus edulis* 与土著的 *C. chilensis* 杂交产生的后代是美国加利福尼亚州海岸广布的杂草，无论在沙丘还是草地上，杂种后代的生长力都强于土著亲本 *C. chilensis*，而且杂种后代对食草动物的抵抗力也更强(Vila and D'antonio, 1998)。分布于北美东海岸的互花米草 *Spartina alterniflora* 曾通过压舱水带入英国的南部港市南安普敦，其与当地的 *S. maritima* 杂交后形成了不育杂种，不育杂种通过染色体加倍后形成了可育的多倍体新种大米草 *S. anglica*。大米草入侵能力非常强，并能占领亲本不能利用的沙滩(Thompson, 1991)，很快占领了英国大面积的海岸线，与此同时土著种 *S. maritima* 和入侵种 *S. alterniflora* 的分布区缩小。

5. 缺乏天敌的控制

长期以来，人们普遍认为外来种在新栖息地成功入侵是由于在新栖息地外来种缺乏天敌的控制。许多外来种以种子、孢子、卵或别的繁殖体形式到达新的地点后，其原产地竞争者、捕食者、草食者和寄生者等并没有随之到达(Elton, 1958)，这为外来种在新

的栖息地的生存和繁衍带来了极大的益处，导致外来种的种群数量大幅增加，最终暴发出灾。例如，150 多年以前，殖民者把家兔带到闭锁宁静的澳洲，它们从笼子里脱逃后，在气候适宜，没有天敌的澳大利亚，仅过几十年时间，其后代就达到了 40 多亿只，占据了澳大利亚南部 2/3 的土地，给当地的牧业带来了巨大损失(韦公远, 2001)。也有的人侵者取代了当地的土著种，却并不被当地的“天敌”所捕食。例如，阿根廷蚁入侵加利福尼亚州南部海岸后，导致包括收获蚁(*Myrmica* sp.)在内的许多土著蚂蚁的大量减少以至灭绝(Suarez *et al.*, 1998)。但对海岸上角蜥 *Phrynosoma coronatum* 的猎物选择分析表明，阿根廷蚁并不能取代收获蚁等土著种，成为角蜥的合适食物(Suarez *et al.*, 2000)。针对螯虾入侵种居鲸螯虾 *Orconectes rusticus*、当地种 *O. virilis* 和以前的人侵种 *O. propinquus* 的捕食实验表明，在有捕食者大嘴鲈 *Micropterus salmoides* 存在时，*O. virilis* 的增长量下降幅度很大，*O. rusticus* 的增长量有轻微下降，*O. propinquus* 的增长量几乎不受影响。同时，3 种螯虾的死亡率均有增加，其中 *O. virilis* 最大，*O. rusticus* 最小(Hill and Lodge, 1999)。这说明，大嘴鲈的捕食对象是当地种而不是外来种。近年来的研究还表明，生物入侵是一个很复杂的过程，天敌因素在入侵中的作用远比过去料想的要复杂。对一些外来种来说成功入侵是由于缺乏天敌的控制，但有些并不是。如澳大利亚曾引入空心莲子草叶甲 *Agasicles hygrophila* 来防治外来种空心莲子草，在水中取得了较好的效果，但无法控制空心莲子草的旱生种群 (Julien and Chan, 1992)。在新栖息地的一些土著种可能转向取食外来种，形成其新的天敌，使土著群落对一些外来种的抵抗力得到增强(Reush, 1998)。总之，天敌因素在入侵中的作用还有待于进一步的深入研究。

(三) 入侵地环境的变化

1. 干扰的影响

一般认为，栖息地受到干扰会促进生物入侵(Deferrari and Naiman, 1994)。近年来研究表明，干扰越强烈，入侵越易发生 (Duggin and Gentle, 1998)。干扰可分为自然干扰与人为干扰，都能在群落中形成空的生态位，降低了这些区域的土著生物群落对入侵的抵抗力，使外来种易于进入定居。其中最为明显的就是人类将自然生态系统改变为人类控制的生态系统，如修建道路、城市化、垦荒、放牧等(Kitayma and Muellerdombos, 1995)，使得先前较致密的生境破碎化，破坏了土著群落，在很大程度上改变了小环境，促进了外来种的传播和入侵。食草类野生动物的取食、山火等自然干扰对入侵造成的影响也不容忽视 (Holmgren *et al.*, 2000)。近年来的研究表明干扰与入侵的关系是复杂的。首先，干扰的作用是多方面的，过强的干扰会降低群落生物多样性而促进入侵，适当的干扰则产生相反的效果；其次，在某些缺乏干扰的情况下，土著群落的一些种会暴发，从而使群落的生物多样性降低，减弱对入侵的抵抗力(Costello *et al.*, 2000)；干扰对入侵不是必需的，许多入侵过程就是在没有自然或人为干扰的情况下发生的 (Dwyer *et al.*, 2000; Jesson *et al.*, 2000; Brothers and Spingarn, 1992)。

2. 生物入侵对群落结构的影响

Elton 在 1958 年提出了一个经典的假设，认为群落的生物多样性对抵抗外来种的人

侵起着关键性的作用,物种组成丰富的群落较物种组成简单的群落对生物入侵的抵抗能力要强(Elton, 1958)。一些数学模型(Robinson and Balentine, 1979; Post and Pimm, 1983; Drake, 1990; Case, 1990)与野外调查(Elton, 1958)的结果支持 Elton 的假说,但也有一些研究结果与这一假说不符(Wiser *et al.*, 1998)。20 世纪 90 年代后期的研究中特别重视通过设计实验来研究这一假说。一些实验证明了群落生物多样性与群落对入侵的抵抗性之间呈正相关(Planty-Tabacchi *et al.*, 1996; Mc-Grady-Steed *et al.*, 1997; Knops *et al.*, 1999; Symstad, 2000)。最近更为深入的研究还揭示了群落生物多样性如何影响入侵。例如, Stachowica 等(1999)发现物种多样性较高的海洋底栖固着的生物群落中,不同物种的生活史周期相互交叠程度大,土著种能长时间保持对空间的高效利用,剩余的可利用空间很少,因此外来底栖生物难以入侵。通过严格控制条件的植物栽培实验近期证明,在排除其他因子对群落抵抗性的影响后,多样性与抵抗性仍呈正相关(Naeem *et al.*, 2000)。Levine(2000)则详细研究了加利福尼亚北部一块明显不符合 Elton 假说的河岸,发现该地区外来植物种子不均匀分布的效应抵消了物种多样性的作用。这说明在群落水平上,一些与当地生物多样性建成相关的因子如干扰、种子密度分布等,在增加生物多样性的同时也会有助于入侵,有时对入侵的促进作用甚至还可能超过提高生物多样性而带来的抵抗力。总体而言,现在的研究已不再局限于简单地验证 Elton 假说,而是根据群落的具体情况来说明群落物种多样性如何影响群落对入侵的抵抗力。

外来种入侵成功,可以改变群落的物种组成。若外来种数量多,对整个群落结构及生态系统功能有重大影响。这种现象在海岛较常见。海岛生态系统脆弱,比大陆更易受外来种入侵的影响。如夏威夷岛,有 86 种植物外来种成为优势种,对该岛原生群落和生态系统产生了严重的威胁。外来种如果影响初级生产力、干扰体制,就可能改变群落的动态。能入侵的外来种通常有强的竞争力,且能快速扩展,如果成为优势种,就会影响其他物种,甚至可能减少群落中的物种多样性(Beerling *et al.*, 1993; Mitra and Sheldon, 1993; Burdon and Chilvers, 1994; Lattin *et al.*, 1995; Preece, 1995; Maron and Connors, 1996; Peter *et al.*, 1996; Gjerde and Tersdal, 1997; Holmes and Cowling, 1997)。植物外来种在海岛上对其他植物的影响尤其严重,如 *Miconia calvescens* 传入法国的 Tahiti 岛和美国的夏威夷岛成为优势种,对几十种本地植物造成威胁,被称为“绿色癌症”,而且现在它已传播到法国 Polynesia 的其他 3 个岛;在 Gapapagos 岛上,植物外来种对 29%的珍稀地方植物和 11%的本地植物造成威胁(Adersen, 1989)。如果植物外来种改变关键资源的丰富度,就会改变演替的路线,例如固氮植物通过固氮,可能改变演替方向。此外,许多入侵种可以破坏当地的生态系统,使当地群落的关键种不能适应新的环境。招致更频繁或更强烈的火灾就是方法之一。世界大多数入侵的草本植物都属于此类。入侵的草本植物通常产生大量的易燃死物质,增加野火,如果外来种耐火,那么野火过后,外来种会迅速繁殖,从而改变演替方向(Walker and Smith, 1997)。资源有限时,如外来种能忍耐这种限制而入侵生存,可能影响群落的演替方向。不同的入侵种其生态学特征可能不同,相应地其入侵机理也有差异。随着以后对更多的入侵物种、不同生态系统的入侵过程的研究增多,可以更充分地认识入侵种的生态学特征在其入侵过程中所起的作用。

3. 生物入侵可以影响地貌变化的进程

在美国加利福尼亚的海岸边, 固沙草 *Ammophila arenaria* 改变了沙丘的形成方式 (Buell and Pichart, 1995; D'Antonio, 1992)。植物外来种的入侵可以影响生态系统的景观结构。北美的维吉尼亚须芒草 *Andropogon virginicus* 引进到夏威夷岛时, 促使山地雨林形成沼泽地 (D'Antonio, 1992)。外来植物的入侵可影响微气候。草类、树木的落叶可影响地表温度、湿度, 从而影响种子的发芽、幼苗的生长和营养物质的转变 (Myster, 1993; D'Antonio, 1992)。植物外来种形成的林冠层的稀与密, 会影响到达地面光线的强弱以及光质, 进而影响地表植物的生长发育。除了上述影响外, 植物外来种还可抑制或促进微生物的活动。总之, 植物外来种对生态系统的影响是多方面的。

4. 全球变化与生物入侵

外来种与全球性变化因子间具有复杂的相互作用, 全球变化会使气候带范围发生改变, 这必然会改变物种与资源的分布区域。研究表明, 大气中 CO₂ 浓度的增加会延缓草原群落演替的过程, 这样就为外来种进入群落提供了更多机会 (Vasseur and Potvin, 1998); 氮化合物的增加使外来种能侵入一些原本土壤较贫瘠的地区, 而生长缓慢的土著种则在竞争中处于不利地位 (Milchunas and Lauenroth, 1995; Burke and Grime, 1996; Wedin and Tilman, 1996; Hobbs and Hueneke, 1992; Maron and Connors, 1996)。气候变暖使原产热带的外来种分布范围增大, 喜暖的 C₄ 植物可能取代 C₃ 植物 (Patterson, 1995; Smith *et al.*, 2000); 干旱与半干旱地区降水量的增加使得外来种能够侵入这些地区 (Hobbs and Hueneke, 1992); 变化的气候条件下, 许多种类面临迁移或外来问题, 土壤变暖也将使许多休眠植物改变习性; 增加紫外辐射将使一些植物的生长和生产力减少, 进而会对其竞争和生态过程有间接的影响; 较致密的生境破碎化后, 一些入侵种可通过边缘进一步向群落内部入侵。增加或降低典型干扰的频率和强度及引入新干扰, 能促进外来种的定居和扩散。除上述较一般的结论外, 还有一些研究进行得更为深入。例如 Alward 等 (1999) 发现科罗拉多北部的低草草原在 1964~1992 年的 28 年中, 随春季最低温度的增高, 主要土著种格兰马草 *Bouteloua gracili* 的净初级生产量呈线性减少, 而外来非禾本科草本植物密度则呈指数增加。因此, 在全球变暖过程中, 最低温度的升高对生物分布的影响可能更为重要。还有研究表明, 在生物生长的重要时期, 降水与温度的短期和较小的变化也能对入侵产生长远的效应 (Milchunas and Lauenroth, 1995)。全球变化促进了生物入侵, 反过来生物入侵在全球范围内影响了生物群落的结构与功能, 继而反馈性地影响全球环境, 因而全球变化对生物入侵的促进会对地球环境产生长远的影响。现在也设计了一些模型来预测一些入侵种在未来气候条件下可能的分布范围 (Beerling *et al.*, 1995)。但由于全球变化过程十分缓慢, 要具体阐明它如何对生物入侵产生影响, 还需要长期的积累工作。

二、国内对生物入侵的风险预测模式与风险管理研究进展

早期预警系统理论与方法的研究成为预测生物入侵的基础研究命题。如澳大利亚研制出 CLIMEX 系统, 该系统用生态气候指标定量地表示某地环境对于生物种群的适宜程

度,可根据有害生物输出国和输入国生态气候指标的相似度,预测入侵生物潜在的适生范围(Sutherest and Maywald, 1985; 马骏等, 2003)。PESKY 系统引进种群生态学概念,可评估某种有害生物潜在分布、种群数量和发生风险(李明福译, 1994)。美国马里兰大学研制的 MARYBLYT 系统可预测 4 种梨火疫病症状、出现时间和侵染的危险性(赵友福和张从仲, 1996)。阿根廷开发出植物生长模型,定量评估外来入侵植物风险(杨亚妮, 2002)。美国利用地理信息系统(GIS)进行了斑贻贝的时空扩张预测,考虑了水深、地层和阳光辐射等因素。我国也利用 GIS,对美洲斑潜蝇、马铃薯甲虫、苹果蠹蛾 *Laspeyresia pomonella* (L.)、地中海实蝇、小麦印度腥黑穗病菌 *Tilletia indica* Mitra、梨火疫病等在我国适生区做过预测(李志红等, 1999; 梁忆冰等, 1999; 林伟和陈克, 1996; 白章红等, 1997)。

三、国内对生物入侵研究进展

中国幅员辽阔,生物多样性丰富。目前在我国丰富的生物种类中,有多少是属于外来物种,没有确切的报道。改革开放以来,随着国际贸易的日益增加,很难确定又有多少外来物种传入我国。自 20 世纪 80 年代以来,由于外来入侵种危害的日益猖獗,我国加紧了对外来入侵种的研究与防治,并取得了一定的成果。

我国对外来入侵生物的研究主要体现在以下几个方面:①对外来种的检疫、除害处理研究较多,但对病原微生物的快速检测技术、外来生物狙击的系统技术研究较少;②在文献资料的基础上,对外来入侵生物的综合风险分析研究较多,但对实际的个案试验风险评估模式和体系的研究较少;③对外来入侵种(如美洲斑潜蝇、烟粉虱、红脂大小蠹)的危害性研究较多,对潜在的危险外来种入侵的预警、扩散与传播机制研究较少;④对主要外来病虫害(如松材线虫病、松突圆蚧、湿地松粉蚧、美国白蛾、稻水象甲、甘薯黑斑病)的分布、危害、生物生态学特性、控制技术的研究较多,对入侵生物学、入侵生态学及暴发的机制研究较少;⑤对外来入侵种的种群时间动态研究较多;但从微观水平(分子生物学)和宏观水平(群落及系统)的研究较少;⑥对外来入侵的环境有害杂草(如豚草、空心莲子草、水葫芦、薇甘菊、紫茎泽兰)的生物防治与综合治理技术研究较多,对入侵种的遗传变异、对群落结构的影响与生态调控和修复的研究较少(万方浩等, 2002a, 2002b)。总之,我国对外来入侵生物的研究处于刚刚起步、积累经验和资料、单一方向的水平阶段,有待于向不同层次(基因、个体、种群、群落、生态系统)和更高水平、多学科交叉(分子生物学、分子生态学、生态遗传学)的实验与理论研究的方向发展。

(一) 危险入侵杂草的研究进展

我国从 20 世纪 90 年代开始对外来入侵植物种类进行了调查。根据研究,截至到现在,经过调查研究中国已被记载的较常发生的外来杂草共有 76 属 108 种(强胜和曹学章, 2000)。目前在我国危害非常严重的外来杂草有:紫茎泽兰、飞机草、水葫芦、薇甘菊、豚草等。这些恶性杂草不仅使我国每年都遭受巨大的经济损失,而且对我国的生态环境、生物多样性造成了显著的影响。目前我国对入侵的豚草、水葫芦、空心莲子草、紫茎泽兰、薇甘菊、大米草等的分布、危害进行了较为系统的研究。基本明确了豚草利用空余生态位栖境及与其他植物竞争的能力。在我国空心莲子草以旱生型为主,旱地肉质贮藏

根受刺激时可产生大量的不定芽(廖衍伦和叶能干, 1984; 林冠伦等, 1990), 是我国难以消除的恶性杂草(王韧和王远, 1988; 林冠伦, 1990)。

外来入侵植物到达新的环境之后, 在适宜的环境条件下, 很可能会大量繁殖扩散, 给当地的生态系统造成极大的影响。例如, 许多外来植物通过竞争、占据本地物种生态位, 使本地种失去生存空间; 还可以通过分泌次生物质对其他的植物或是其他的生物产生他感作用, 排斥其他植物的生长, 形成单一的优势群落, 或是对其他生物产生作用。例如, 薇甘菊可以大片覆盖香蕉、荔枝、龙眼、野生橘等植物, 致使这些植物难以进行正常的光合作用而死亡(黄忠良等, 2000); 蟛蜞菊 *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc. 浸提液可以抑制花生和水稻等作物生长, 降低种子发芽率, 抑制胚根、胚芽生长, 甚至导致胚根、胚芽和种胚腐烂等现象, 在生产上这会导致出现缺苗、烂苗和死苗等现象, 严重影响作物产量(聂呈荣, 2002)。我国对外来入侵植物的化感作用研究较多。例如, 飞机草乙醇提取物对豇豆、青瓜、萝卜等 8 种蔬菜具有不同程度的化感作用, 总体上呈现出低促高抑的现象, 且随着提取物浓度增大抑制作用增强; 该提取物对小菜蛾 *Plutella xylostella* (Linnaeus)、美洲斑潜蝇、荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* (Bradly) 等害虫具有良好的成虫产卵忌避作用。研究飞机草的化感作用, 通过分离和鉴定化感物质, 人工模拟合成化感作用较强物质或对一些化感物质进行结构修饰, 将有可能开发出新型除草剂, 在植物源农药中可能具有广阔的发展前景(洗继东等, 2001; 何衍彪等, 2002)。薇甘菊挥发油对植物、真菌和细菌均具有生物活性, 对植物和水稻稻瘟病菌的抑制活性尤其显著, 随着挥发油浓度的增加, 受试植物幼苗的生长随之明显减弱; 5 种植物(白花夹竹桃、海桐、鬼针草、杨梅和大叶桉树)地上部分的水浸提液对豚草的化感作用研究表明, 这些水浸提液对豚草的发芽率、胚根、胚轴及幼苗生长均有不同程度的抑制作用(陈贤兴, 2002)。这些化感作用研究为进一步揭示入侵杂草形成和扩张的生态机制开辟了新方向, 同时为应用化感作用防治杂草提供了技术积累。

自 20 世纪 80 年代以来, 应用生态位机遇理论、生物相克及生态平衡的原理, 开展了引进外来天敌昆虫控制外来杂草的传统生物防治系列研究。泽兰实蝇 *Procecidochres utilis* Stone 是紫茎泽兰的专一性寄生天敌(陈旭东和何大愚, 1990), 其幼虫蛀入紫茎泽兰幼嫩茎枝端部, 蛀食并刺激被害部位形成膨大虫瘿, 阻碍紫茎泽兰的生长繁殖(陈升碧和关德盛, 1994); 同时寄生会影响植株正常的有性繁殖, 降低开花、结种量及种子发芽能力, 因此利用泽兰实蝇能够减弱紫茎泽兰的大面积传播和危害(刘文耀等, 1991)。我国于 1983 年开始在云南省 5000 多平方公里范围内移引、释放泽兰实蝇, 经逐步定殖、扩散, 收到了较好的控制效果。此外, 我国从加拿大、原苏联和澳大利亚引进的取食豚草的天敌昆虫豚草叶甲与豚草卷蛾, 从阿根廷引进的水葫芦象甲, 从美国引进的空心莲子草叶甲等, 在寄主专一性测定、风险评估及生物生态学特性研究的基础上, 通过野外释放取得了良好的控制效果(丁建清, 2002)。在此基础上, 进一步发展了豚草的竞争替代控制技术、水葫芦的综合治理技术体系。

(二) 危险入侵昆虫及其他动物的研究进展

到目前为止, 我国尚没有外来入侵动物种类的系统报道。根据资料总结, 目前严重危害到我国农林业的外来害虫有烟粉虱、美洲斑潜蝇、南美斑潜蝇、稻水象甲、美国白

蛾、松材线虫、松突圆蚧、红脂大小蠹等昆虫以及福寿螺、非洲大蜗牛、牛蛙等动物(李振宇和解焱, 2002)。

随着分子生物学技术的发展, 利用分子生物学技术手段可以正确鉴定分析外来入侵种。如利用 RAPD 技术建立了危害我国的主要斑潜蝇种类美洲斑潜蝇、南美斑潜蝇、番茄斑潜蝇等的快速、准确鉴别方法(陈萍, 2002); 罗晨等(2002)利用 mtDNA COI 基因部分序列作分子标记, 分析了我国不同地区的烟粉虱种群的生物型, 发现近年在我国广大地区造成严重危害的烟粉虱为 B 型烟粉虱。

一般认为, 昆虫能适应不同的地理环境和气候条件并建立种群, 都有其生活史(life history) 对策、生理生化调节和选择进化的机制(Hodkinson *et al.*, 1999; Jenkins and Hoffmann, 1999)。为了有效地防治斑潜蝇、烟粉虱等外来入侵害虫, 国内对其传入途径、生活史、生态学特征、适应性机理、扩散机制等方面开展了研究。确定了南美斑潜蝇的世代历期短, 寄主广泛, 蛹耐寒性的获得和迅速积累是其种群扩散过程中进化适应的主要方式(Chen and Kang, 2002)。在种群水平上南美斑潜蝇南、北种群蛹的过冷却点出现明显分化。南美斑潜蝇向北扩散的过程中, 经历了较长时间的驯化和适应, 过冷却能力和耐寒性的不断提高, 这对其进一步向北推进有着重要的意义(Chen and Kang, 2002)。我国低纬度地带的气候正适宜美洲斑潜蝇的发育, 加上其生活周期短、繁殖量大、世代重叠、没有滞育态等特点, 导致了其在低纬度地带常年大面积发生。这些研究结果很好地解释了田间调查结果及这两种外来斑潜蝇在我国分布差异。而且, 斑潜蝇动态的系统监测表明, 田间种群动态及虫源变迁与不同的农业耕作区域的生态类型及作物的布局密切相关(王履浙等, 1999)。人为的因素在外来入侵害虫的扩散上有着促进作用, 例如, 一品红等花木的调运造成了 B 型烟粉虱在我国的迅速传播(罗晨等, 2002)。

外来入侵种到达新环境入侵成功以后, 其生态适应性、遗传结构、行为等可能会发生改变。例如, 红脂大小蠹原产于北美洲, 20 世纪 80 年代中期传入我国。其在原产地通常攻击衰弱的长势不好的松树或伐桩, 但一般不造成严重危害。但是在我国红脂大小蠹成为一种攻击性的害虫, 可侵害外表健康的树木。研究发现, 传入区没有强有力的竞争种, 较为干旱的气候条件、大量的适宜寄主的存在使其成功地建立了种群; 加之粗放不合理的经营、乱砍滥伐、割脂等促使其暴发成灾, 红脂大小蠹聚集型扩散蔓延。聚集原因可能是由于寄主油松决定的(苗振旺, 2002)。成虫入侵初期造成大量松脂从健康木中流出, 致使挥发性萜类化合物含量明显提高, 为后继者继续入侵指示了线索, 扬飞的成虫定向飞往这些寄主并侵入, 最后导致红脂大小蠹集中群居危害, 使寄主树一般在 2 年内死亡(张历燕等, 2002)。

外来入侵动物可与土著种竞争食物或是直接杀死土著种, 影响土著种的生存。例如, 洱海原有 19 种土著鱼类种(杨君兴, 1996), 但在引进了四大家鱼等外来鱼类的引进, 现在四须鲃、洱海四须鲃、云南裂腹鱼、大理裂腹鱼、大眼鲤等土著鱼类已经基本绝迹(路瑞锁和宋豫秦, 2003)。

(三) 危险入侵植物病害的研究进展

根据调查, 目前对农业危害较大的外来微生物或病害有十余种, 即: 水稻细菌性条斑病、玉米霜霉病、马铃薯癌肿病、大豆疫病、棉花黄萎病、柑橘黄龙病 Citrus

Huanglongbing、柑橘溃疡病 *Xanthomonas citri* (Hasse) Dowson、木薯细菌性枯萎病 *Xanthomonas campestris* pv. *manihotis* (Berth & Bander) Dye、烟草环斑病毒病(tobacco ring spot virus, TRSV, *Nepovirus* sp.)、番茄溃疡病 *Clavibacter michiganensis* (Smith) Davis *et al.*、鳞球茎线虫 *Ditylenchus dipsaci* (Khn) Filipjev 等(丁建清和付卫东, 1996)。

小麦矮腥黑穗病(wheat dwarf bunt)是麦类黑穗病中危害最大、最难防治的一种病害(Purdy *et al.*, 1963; Johnson, 1992)。2000~2001年,我国开展了小麦矮腥黑穗病菌(TCK)定量风险分析的研究工作,这项研究利用地理信息系统(GIS),根据18年的气象数据,建立了TCK地理植物病理学模型,以更科学的方法和严密的数据分析了TCK在我国的发生可能性,绘制出TCK发生的风险区划图,其中高中风险区约占冬麦区总面积19.3%,说明TCK对中国小麦生产存在着重大威胁,为我国采取相应的检疫措施提供了科学依据(陈洪俊等, 2002)。

由 *Erwinia amylovora* (Burrill)引起的梨火疫病是世界著名的病害。该病在北美一直是梨、苹果、樱桃等果树的毁灭性细菌病害,也是最古老、研究最深入的植物病害之一。我国并非梨火疫病的天然免疫区。赵友福等利用地理信息系统和MARYBLYT计算机模型分析了梨火疫病在我国梨、苹果种植区的可能分布区和非分布区以及梨火疫病在我国各栽培区划发生的可能性。结果表明,梨火疫病在我国各苹果栽培区划发生的可能严重性随不同品种、不同年份、不同栽培区,其发生从轻至严重均存在(赵友福和林伟, 1995; 赵友福和张从仲, 1996)。朱建裕等(2003)建立了实时荧光PCR检测方法和诱捕PCR-ELISA检测方法,简化了检测方法,同时避免了假阳性现象的出现。

从1981年起,国家出入境检疫局动植物检疫实验所(原农业部植物检疫实验所,2004年已更名为中国检验检疫科学院动植物检疫研究所)开展了危险性病虫害杂草的检疫重要性评价和适生性分析,制定了评价指标和分析办法,以分值大小排列出各类有害生物,1999年开始对14属(种)进境植物繁殖材料可能携带的近3000余种有害生物进行了风险评估,完成15份风险分析报告,确定检疫性有害生物80种,限定的非检疫性有害生物124种,并将这些进境繁殖材料分为高、中、低风险3个等级。2001年又对大麦、梨属、番薯属、苹果属、辣椒属、苜蓿属等共38个属(种)进境植物繁殖材料进行风险分析(陈洪俊等, 2002)。

松材线虫是许多国家的检疫性有害生物,其形态与拟松材线虫 *Bursaphelenchus mucronatus* Mamiya and Enda 非常相似。不少学者力图采用生物化学和分子生物学方法,寻找具有种特异性的分子标记来解决松材线虫复合种的分类与鉴定问题,创建松材线虫的快速检测方法。贺水山等(2002)依据松材线虫 rDNA 基因部分序列,设计了一对特异性引物,运用PCR方法,实现了对单条松材线虫的快速检测,而且通过对来自不同国家和地区松材线虫和拟松材线虫进行了检测研究,该方法的特异性和稳定性都非常好。研究表明在松材线虫病发生区,其病害的扩展、流行与马尾松毛虫危害有着密切的关系,松毛虫危害是促使松材线虫病流行的重要因子(来燕学等, 2002)。

第六节 外来种的生态风险评估

外来种的生态风险评估是指对某一种或几种外来种的各种特性及其对生态系统的成

分、结构、功能和对经济等的影响作出科学的评价,并预测该物种在全球变化等影响下入侵的趋势(向言词等,2002)。由于外来种的入侵成功与其生物学特征、生态学特征有明显的关系,而且一旦外来种入侵成功,产生的影响也是巨大的。因此,外来有害生物风险评估的范围涉及生物、环境和社会三个方面。从层面上讲,包括外来种的起源、传播特性、繁殖特性、遗传特性、适应性特征以及外来种的影响等方面(Ruesink,1995;李振宇和解焱,2002),以确定是否为潜在的检疫性有害生物。

一、评估体系

(一) 起源地与分布范围

了解外来种的起源以及在原产地的分布范围,有助于了解物种的生境广度以及在新环境中的分布。物种对环境的适应性强,它在新的环境里生存和扩展的几率很大,那么它对遭受入侵的生态系统的影响可能很大。在引入这样的物种时,应该先进行详尽的实验研究,对其危害性作出评估(向言词等,2002)。如美洲斑潜蝇与南美斑潜蝇一般认为起源于南美洲国家,它们都是典型的多食性害虫,可供它们取食的植物包括了多个科的花卉、蔬菜、杂草。美洲斑潜蝇与南美斑潜蝇目前在世界各地均有分布,其危害给许多国家的花卉和蔬菜业造成了巨大损失(Spencer,1973; Spencer,1992)。1993年底在我国海南省发现美洲斑潜蝇后(康乐,1996),迅速扩展,随后逐渐扩散。目前我国大部分省市自治区均有发生,包括内蒙古(刘淑杰等,2000)和新疆(李勤忠,1999)等内陆地区。

(二) 外来种的繁殖和扩散特性

外来种的繁殖特性对它能否成功入侵影响很大。在评估时应当对外来种能否在自然界建立自我繁殖种群、传播的途径和范围、传播的速度等特征有所了解。入侵性强的外来种往往具有很强的繁殖能力,能够产生大量的种子或后代,或繁殖世代比较短。例如,苹果绵蚜可以进行有性生殖和孤雌生殖两种繁殖方式,在我国一年最多可发生21代(向言词等,2002);虻蜚菊和薇甘菊等均可以地下根茎进行无性繁殖,这种特性有利于它们在早春时比其他植物先生长发芽,增强它们的竞争力。外来种的传播特性往往与它的繁殖特性有关,例如,许多分布广泛的外来种可产生大量的细小的种子,这些种子很轻,或者种子有翅等等,能借助于风力远距离传播。这些均有利于外来种的种群减少和灭绝风险(Philbrick *et al.*,1998; Raejmanek and Richardson,1996)。紫茎泽兰可以进行有性和无性繁殖,每株可年产瘦果1万粒左右,种子可以随风传播。有些外来种的种子还可以借助动物或是人类进行远距离传播(Hallegraeff,1998; Howe and Smallwood,1982; Sahai,1994; Wilgen and Siergried,1986)。Carlton 和 Geller(1993)发现远洋轮船的压舱水把367种浮游生物从日本带到美国的俄勒冈州。

(三) 外来物种的适应性特征

多数外来种有其不同于本地种的特性,能占据本地种所不能利用的生境或是在一些环境中获得对土著种的竞争优势,从而入侵成功。如火树有共生固氮的能力,因而它能

在夏威夷群岛缺氮的火山地里生长。某些物种在其生活周期中可以以某种方式度过不利的条件,从而有利于物种的生存发展以及传播。如常春藤叶婆婆纳 *Veronica hederaefolia* L.种子在成熟后有一段明显的休眠期(郭水良和李扬汉,1996),这种休眠有利常春藤叶婆婆纳在受到人为干扰的环境中入侵成功和形成优势种。美洲斑潜蝇和南美斑潜蝇都是温带种(temperature species),它们能否成功入侵和繁殖很大程度上受当地气候条件的制约。其中温度是一个主要的限制因子。我国低纬度地带的气候正适宜美洲斑潜蝇的发育,加上其生活周期短、繁殖量大、世代重叠、没有滞育态等特点,因而低纬度地带种群常年大面积发生(陈兵和康乐,2002)。

(四) 外来物种的遗传特性

对于外来种的遗传特性需要了解当地野外是否有与该物种具有亲缘关系的物种;外来种能否与当地的农业品种或野生物种进行杂交等问题。例如入侵种互花米草与土著种 *Spartinas maritima* 杂交后形成了不育杂种,不育杂种通过染色体加倍后形成了可育的多倍体新种大米草。大米草的入侵能力非常强,并能占领亲本不能利用的滩涂(Thompson,1991),并能排挤双亲。

(五) 外来物种的危害特征

对外来物种的危害进行评估是风险评估的一个重要组成部分,对外来种危害特征的评估主要涉及以下几个方面:①外来种对野生动植物、家养动物或人类的影响;②许多外来种可产生有化感作用的物质来抑制群落中其他植物的生长;③外来种能否高密度占领生境;④当地物种中是否有在生态位上与外来种相似的物种;⑤对环境的影响;⑥对经济的影响(向言词等,2002)。其中对外来种的经济影响评估包括以下几部分:①外来种对农田、园艺、草坪、森林、畜牧、渔业、水产等造成影响,造成控制成本增加,产量下降或是品质降低而带来经济损失;②外来种对城市建设设施造成的损失,例如外来白蚁是破坏建筑的重要因素;③外来种对生态系统产生影响而使旅游业和娱乐业受损的情况;④为了控制外来种而花费的人力和物力。

(六) 协同入侵

外来种在入侵过程中常存在着协同作用,即通过几种外来种的相互配合而入侵。例如为了控制甘蔗地里的毛虫(Armypworm)和黏虫(Cutworm),引进了家八哥 *Acridotheres tristis*,而这种鸟后来成了一种外来杂草马缨丹 *Lantana camara* 种子的主要传播者(Pimentel et al.,2000),这会给当地的物种带来灾祸。

(七) 检疫的难易与可靠性

这是针对那些随货物夹带或旅客无意携带来,或轮船的压舱水带入的外来种。如果外来种易于被检疫,那么这些无意携带外来种入港口的几率就会大大减少(向言词等,2001)。

(八) 被防治特点

对外来种进行防治时,需针对选择的对象来选取不同的防治措施,另外,还要考虑

到环境条件的影响。目前,防治和消除外来种的方法有人工机械防除、化学防治、生物防治、替代控制和综合治理等方法。对外来种风险评估过程中应当对外来种的原栖息地的生境和其他的生态情况作详细地调查和研究,了解它与其他物种的关系,看有无取食它的生物或病原体,或者同它有强烈竞争的物种。在此基础上,对要引入该物种的地方的生境等情况作深入调查研究,看是否有相同或相似的捕食者或竞争者。如有相同的捕食者时,当引进的物种一旦造成危害时,就可应用这种生物来防治它。这有利于避免生物控制法所带来的二次效应。如果以前曾有地方进行过引种,则需要查阅其他地方引种同一物种的资料,了解其生态影响,然后把要引进地的生境同它作对比研究后再确定引种与否。采用生物防治时,其中很重要的一点是要考虑引进的生防作用物(昆虫、真菌、细菌和病毒等)的食物专一性,这是生防作用物的关键标准之一。引进的生防作用物专一性不强,或引进后发生新的变化,如其食谱变宽,就可造成新的入侵危害,如为了控制外来种麝香飞廉 *Carduus nutans* 和 *C. arvensis* 等,引进了象鼻虫 *Rhinocyllus conicus*, 后来这种虫的分布范围扩大,取食对象增多,连一些本地种蓟类植物,如 *Cirsium centaureae*、*C. canescens* 和波叶蓟 *C. undulatum* 也成了其取食对象,而且这种情况有加重的趋势(Louda *et al.*, 1997)。此外,生物的取食具有可塑性,当环境条件变化时,其取食对象可能发生改变;为了提高预测性和减少损失,需对释放的生物控制剂进一步监测控制。

(九) 外来种入侵影响的综合性测定

如果在测量外来种入侵影响时,只把外来种入侵造成的损失和消除控制外来种的费用作为唯一指标,就不能全面反映外来种入侵造成的影响。在地理学尺度上,有3个因素决定一个外来种的总体影响:外来种分布的总面积、密度和每个单体的平均效应。用公式表示外来种入侵的综合影响则是 $I = R \times A \times E$ 。式中, I 为外来种的影响; R 为外来种分布范围的大小(单位: m^2), A 为密度, E 为每个单体的平均效应(Parker, 1999)。

二、外来生物的风险评价方法

(一) 风险识别

对于外来物种来讲,其风险主要是指对生态、环境、人类、农业生产的影响及负作用,不同类群的外来生物具有不同的直接或间接的生物、生态及环境的影响和后果。

以外来昆虫为例。昆虫的寄主选择受到多种限制或促进生长发育因子的影响。在选择过程中,由物种进化所决定的种系发生限制、生物气候限制、栖境选择、产卵地点选择、寄主的可接受程度及幼虫发育的适合性起到决定性的作用。该筛选过程的每一环节类似一个过滤装置,限制了寄主范围及其变更寄主的可能性。完成这种有序选择过程便是这种昆虫利用该寄主的最终适合度,也即利用寄主的“风险”。常规的确定其接受性(成虫产卵嗜好性)及适合性(后代的生长发育、存活及繁殖力)的方法,不足以预测其在田间利用寄主的范围和程度。实验室内的取食试验或产卵试验虽可确定可能的寄主范围,但忽略了昆虫的寄主选择特性与生物及地理限制因子。因此,外来生物的安全性不仅仅是“取食”与“不取食”、“产卵”与“不产卵”的简单测定。能够为可靠的风险决策提

供大量信息的是对其进行至少以下 3 个方面的分析与实验(万方浩等, 1997):

(1) 昆虫—寄主植物种系发生限制因子分析。大量实验结果与文献资料分析可为寄主专一性的测定提供寄主谱的筛选范围, 同时也为风险分析作参考。协同进化及相互适应的结果往往限制某一类群的昆虫取食、寄生另一类群的寄主。

(2) 生物气候相关性限制因子分析。昆虫的寄主选择过程除受自身生物学及寄主适合性的限制外, 生物地理因子限制了其分布的地理区域。一种生物的地理分布可分为有报道或有记载的“绝对分布”区域及在绝对分布区内有重要经济影响的“经济分布”区; 同样, 其寄主也存在于特定的地理分布区域和范围。大部分昆虫都有一定的气候分布区, 实验测定的某一寄主如不在其分布区内, 则无风险可言。因而, 外来生物与其寄主分布区的生物气候相关性是考虑其风险的关键因素之一。

(3) 寄主接受程度与发育适合性限制因子分析。寄主可接受程度很大部分取决于成虫对栖境与产卵地点的选择与需求习性。栖境的气候(如山地阴坡与阳坡、低洼潮湿地与高处干旱地、寄主成群分布地与散居地等)、寄主本身的物理特征(如个体大小、外部形状)、与寄主的化学信息联系(如产卵刺激素等)、以及栖息地内生防作用物本身的天敌(如重寄生), 限定了外来生物风险的程度与范围。某一外来生物在其原产地的栖境较窄, 所需的生物气候有一定的限制性, 在入侵地的研究则应着重于限制因子机制的分析与解释。这不仅为风险分析提供了可靠的资料, 同时也为选择释放地提供了信息。在强迫情况下, 成虫找不到恰当寄主时, 往往发生产卵选择错误, 因为某些非寄主也可能含有类似的寄主产卵刺激信息或物质, 干扰或混淆其产卵的信息联系。因而, 单独的室内产卵实验不足以作为风险评价的可靠指标。发育适合性取决于成虫和幼虫对寄主营养条件的需求及与寄主的同步性。一方面, 食性测定中不能被利用的寄主为决定其风险提供了证据; 另一方面, 某些可能被取食的寄主由于营养、物理或同步发生的差异, 不能完全提供发育所需的条件。在这种特定情况下, “取食”不等于“完成发育”。既不能视为存在绝对的风险, 也不能视为可忽略的风险, 必须有其他的实验加以辅佐与验证(Wan and Harris, 1997)。

满足上述条件, 其三者的重叠区域即风险(图 1-1)。

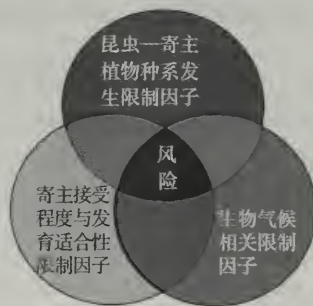


图 1-1 外来生物风险评价模式图解

(二) 风险程度定量分析

分析过程与原则: 外来生物的风险评价是一个较为复杂的分析与综合过程, 构建一个体系须符合以下的原则: ①可成功建立种群/扩散的特征; ②在保证精确性的基础上,

尽可能利用最少的可测量性试验来确定其概率的大小；③所选因子间具备相互作用；④定量分析具有科学性及逻辑性；⑤评价模式易于判别风险的水平；⑥可预测其经济损失；⑦对已入侵的种，提出效益与风险费用的比较分析及控制方法。

在为害性识别及风险识别的基础上，风险分析主要是对寄主接受程度与发育适合性限制因子进行定量化研究。寄主接受程度与发育适合性是一综合性概念，包含许多选择环节，类似于一个过滤装置系统(图 1-2)。

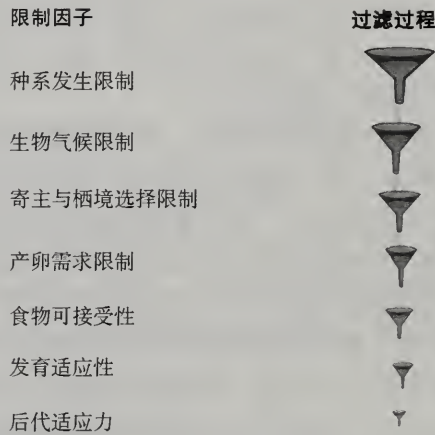


图 1-2 外来生物(植食性昆虫)的风险“过滤”模式

根据不同的对象可选择不同的环节(及环节的数目)来定量接受寄主的概率，各环节接受寄主的概率乘积便是最终的风险指数。因此，风险指数可定义为：

$$\text{风险指数}_{(i)} = \text{风险因子}_{(1, i)} \times \text{风险因子}_{(2, i)} \times \cdots \times \text{风险因子}_{(n, i)} \quad (1)$$

如果生物气候相似性存在较大差异，根据其相似程度给出其相似系数(0~1)，则：

$$\text{风险指数}_{(i)} = (\text{风险因子}_{(1, i)} \times \text{风险因子}_{(2, i)} \times \cdots \times \text{风险因子}_{(n, i)}) \times \text{相似系数}_{(i)} \quad (2)$$

风险程度是一种相对的概念，宜采用相对数量指标值。根据统计学中随机事件概率的显著性标准，可将因子风险值(XRR)划分为3级：即当 $XRR \geq 0.01$ 时，为选择性风险；当 $0 < XRR < 0.01$ 时，为随机(偶然)风险；当 $XRR = 0$ 时，为零风险。

根据风险接受或拒绝水平，将其分为寄主或非寄主两类来确定其风险的范围。并可结合生物统计学中的因子分析，判别出决定性的因子及其作用大小；结合主分量分析排序出具有同类风险的因子类群。这些分析与研究过程为风险控制提供了详细的信息与可靠的数据，决策者根据其研究便可作出接受与拒绝的判断(Wan and Harris, 1997)。

(三) 风险- 收益比较分析及风险控制

有目的地引进的外来生物，在对其存在的风险损失与可能带来的收益相比较的基础上，提出对不同环境生态系统影响及风险控制对策的分析，依据风险的接受水平和风险

出现的程度,作出相应的风险管理措施。风险控制是一个行政管理过程。根据有关法规、条例及研究者提出的风险评价报告,由职能部门组织专家组审查风险报告的可靠性,分析比较应用该外来生物可能带来的后果与经济收益,审核有风险的外来生物在应用过程中的有效应急控制措施以及确立风险监控与通讯的方法,对释放或应用某一外来生物的申请给予公正的评价,最终提交职能部门做出批准释放或应用与否的决策(万方浩,1991)。

第七节 外来入侵生物的预防与控制

一、入侵的预防

(一) 外来生物入侵早期预警与风险预测体系

根据信息资料对可能入侵的生物进行风险评估与预警,加强防范措施与制定应急控制技术。对于生物引种,在引入前应进行科学的评估、预测和测验,谨慎引种,不仅要考虑到当前,还应预测将来;不仅要看经济利益,还要看生态危害;不仅要考虑地区性问题,更要考虑全国性问题。引入后应加强观测,释放后应不断跟踪,如发现问题应及时采取有效对策,避免大面积造成危害。对已入侵生物的危害、分布、蔓延与流行进行风险评估与预警,加强监测。在更深层次的外来入侵种生物气候限制、物种种系发生、地域分布限制、生态适应性等多方面相互关联的系统研究基础上,以便有能力识别、记载及监测入侵种的动态及更新资料,发布风险区域。

(二) 应进一步加强边境海关检疫和阻截作用,阻止新的入侵种入境

采取有效的口岸控制措施,加强对入境的各种交通工具如列车、汽车、轮船和旅游者携带的行李以及各种货物的检查工作,防止无意带入外来生物,构筑防止外来有害物种入侵的第一道防线,是减少外来入侵物种无意引进风险的最重要的环节,这远比入侵发生后采取的任何措施更经济、更有效。针对潜在入侵生物,特别是动植物病害,发展快速检测以及去除以各种形式(贸易产品、包装材料)携带入侵的有效技术。

(三) 加强宣传,提高公众防范意识

外来入侵种问题和人类活动有着密不可分的关系。人类日常生活起居、工作等都会涉及到运输,而许多生物入侵正是沿着运输途径传播,所以这种人类日常生活习惯也是入侵物种问题的一部分。因此,防止生物入侵,需要全社会共同努力,应充分调动公众的积极性,提高全社会防范意识,使全社会参与到防止生物入侵的行动中。整理已有材料并编撰成册,如把入侵物种的概念、危害、国内外重要经验教训编辑成深入浅出的教育普及材料,以各种可能的方式(包括书本、刊物、宣传册、万维网、广播、电视等)进行传播,使公众认识到生物入侵的危害性,了解人类与生物入侵的关系,提高思想认识,防止有害生物入侵。

(四) 加强技术培训, 提高监控技术

当前, 中国已加入 WTO。在有关检验检疫、生物引种、交通运输、国际贸易、旅游等重点行业的职工中, 进行有针对性的宣传、教育和培训, 使他们尽快了解和掌握国际植物检疫动态及 WTO 有关检疫规则, 提高检疫、监测和控制技术水平, 为社会提供更优质的服务; 对外来种容易侵入的地区如岛屿、湖泊、自然保护区等的工作人员加强防范入侵种意识, 提高他们对早期生物入侵的警惕性。

(五) 加强科学研究

加强对生物入侵的研究, 明确入侵种类、分布和入侵机制, 评价入侵种带来的生态危害, 研究控制对策和具体技术, 是我国目前解决生物入侵的关键。没有科学的研究结果作为指导, 就不可能从根本上解决这个问题。在研究外来种的同时, 应充分研究、了解本地生物种类, 在诸如退耕还林还草工作中, 尽可能利用本地种, 发挥本地种的作用, 减少引进使用外来种。

(六) 建立外来入侵生物数据库与信息系统, 加强信息流通和国际合作

国内目前在生物入侵方面的信息很多, 但不能有效地沟通。成立国家生物入侵信息中心, 建立信息库, 包括种类、起源与分布、生物生态学特性、风险分析与管理、有效的控制技术等。发展识别入侵种群的起源地与入侵途径的方法。有效利用国际互联网和局域网, 加强信息流通和国际合作, 对预防和控制生物入侵具有重要作用。因为入侵物种的问题总是涉及到原产国问题。原产国相应物种的防治方法、生态特点、天敌生物等信息对入侵国的防治有着重要作用。从松突圆蚧的原产国日本引进松突圆蚧花角蚜小蜂 *Coccobius azumai*, 防治松突圆蚧获得成功, 即是从原产国寻找天敌防治入侵物种的例证。一个国家生物入侵及治理的经验和教训, 对其他国家在引入或防治同样物种时, 有极大的参考价值。例如台湾从美国加利福尼亚和夏威夷引进澳洲瓢虫 *Rodolia cardinalis* 防治吹绵蚧壳虫 *Icerya purchasi* 获得成功, 就是学习了美国从澳大利亚引进澳洲瓢虫控制吹绵蚧壳虫成功的经验。有些物种不仅入侵到一个国家或地区, 而且入侵到多个国家。如凤眼莲不仅危害中国, 也危害北美、亚洲、大洋洲和非洲的许多国家, 互相学习经验更显得必要。入侵种在一个国家出现的信息可为周边国家提供早期预报。

(七) 有效的持续控制技术体系

针对已入侵生物, 发展出针对特定目标的有效的、可接受的消灭或控制外来有害生物的技术与方法, 重点在于发展消灭或控制外来入侵生物的综合治理技术体系, 制定最佳的优选方案与组合技术, 强化对外来入侵物种的生物防治基础、技术与方法的研究, 并对引进的有益物种可能成为另类入侵种的收益与风险评估研究。

(八) 建立生态经济影响评估体系和经济制约机制

经济方面的争论对解决外来入侵物种问题起了不少作用。从经济角度出发的讨论要比从感情和生态保护角度出发的讨论更具有说服力。谈到引入外来入侵物种所耗费的成

本问题，人类的认识是有局限的。因为入侵现象经常不被注意，而且没有任何明确的责任界定。外来入侵种最初的影响也常常是不显著的。在外来入侵种引发大范围破坏前，很难有人去考虑监控、早期控制等问题。但是只有考虑这些，才能正确分析成本-效益比率。有些人无意中把物种引入新栖息地，但他们并不愿花钱采取措施来阻止此类偶然事件的发生。他们可能没有意识到事情的危险性，但是大多数情况下只是因为这种危险不会威胁到这些人自身的利益。因此这些花费常常不公平地由无辜的人来承担，而不是那些允许(或导致)此类事故发生的人。特别是控制生物入侵直接关系到国际和国内贸易，确定外来入侵物种的成本与利益更成为一个至关重要的大问题。因此，我们在考虑贸易成本的同时，也应把引入外来物种的潜在成本考虑进去。责任界限如果不明确，就无法改变人们的行为方式，结果常常是由普通民众和后代来支付这些代价。因此有必要针对已入侵生物，发展外来生物(包括有意识地引进的物种)生态与经济影响评估体系。针对既定种在既定地区的生态代价与经济代价的影响预测模式研究，研制出既定外来生物入侵的预测指标体系，以便将这种模式应用到其他地区或其他种的评估中。同时需要建立合理的潜在外来入侵种引入的经济控制机制，明确引入外来物种者应该承担的经济责任，包括对引入物种的危险性评估、实验、监测、治理，以及如果外来入侵种造成危害，引入者应该承担的经济赔偿责任等。如果这些责任被计算入经济成本中，引入者在引进物种时会谨慎得多。

二、入侵种的控制方法

(一) 人工、机械防除

人工、机械防治适宜于那些刚刚传入、定居，还没有大面积扩散的入侵物种。在群落中有其他敏感植物存在时，也要用机械法。在我国，人工防治具有悠久的历史。这种方法同样被用于水葫芦、空心莲子草、大米草、薇甘菊等外来入侵植物的防治。在过去的十年里，云南、浙江、福建、上海等地政府都曾组织人力打捞水葫芦。1991年，云南昆明曾发动10多万军民人工打捞；1999年，浙江温州市政府投入1000万元人工打捞；福建莆田专门成立了水葫芦打捞办公室，每年花费500万元。1999~2001年，深圳市政府曾多次组织军民人工拔除薇甘菊。陕西西安、咸阳和辽宁锦州等地通过采用人工剪除幼虫网幕、高截树头成功控制了美国白蛾(王伟平, 1996; 燕长安等, 1992)。对分布于低洼地里的外来杂草，可以用水淹的方法来消灭它。国外在消灭易燃的外来种时，有时采用火烧的办法，这种方法在控制草地里的外来树种时比较有效。我国人力资源丰富，人工防除可在短时间内迅速清除有害生物，但对于已沉入水里和土壤的植物种子和一些有害动物则无能为力。高繁殖力的有害植物容易再次生长蔓延，需要年年防治。人工、机械防治有害动植物后如不妥善处理动植物残体，它们可能成为新的传播源，客观上加速了外来生物的扩散。

(二) 替代控制

替代控制主要针对外来植物，是一种生态控制方法，其核心是根据植物群落演替的自身规律用有经济或生态价值的本地植物取代外来入侵植物。它的优点在于：①替代控

制植物一旦定植便长期控制入侵植物，不必连年防治；②替代植物能保持水土，改良土壤，涵养水源，提高环境质量；③替代植物有直接经济价值，能在短期内收回栽植成本，长期获益；④替代植物可使荒芜土地变成经济用地，提高土地利用率。替代控制的不足在于对环境的要求较高，很多生境并不适宜人工种植植物，如陡峭的山地、水域等，同时人工种植本地植物恢复自然生态环境涉及到的生态学因素很多，实际操作起来有一定的难度。研究利用替代植物控制外来有害植物，应充分研究本地土生植物的生物生态学特性，如它们与入侵植物的竞争力、化感作用等，掌握繁殖、栽培这些植物的技术要点，并探讨本地植物的经济特性、市场潜力等，以便同时获得经济和生态效益。沈阳农业大学和辽宁省高速公路管理局合作于1989年和1990年在沈大和沈桃高速公路两侧建立了200hm²的豚草替代控制示范区，所选取的替代植物包括紫穗槐、沙棘、草地早熟禾、小冠花和菊芋等具有经济价值的植物，示范区建成后三裂叶豚草的生物量由每平方米30kg降到0.2kg，这些替代植物还在饲料、绿肥、食品、医药、编筐条材、能源和化工原料等方面带来了巨大的经济效益(关广清等，1993)。

(三) 化学防除

化学农药具有效果迅速、使用方便、易于大面积推广应用等特点。但在防除外来生物时，化学农药往往也杀灭了许多种本地生物，而且化学防除一般费用较高，在大面积山林及一些自身经济价值相对较低的生态环境如草原使用往往不经济、不现实。而且，对一些特殊环境如水库、湖泊，化学农药是限制使用的(Schroeder, 1992)。国外在用化学方法处理外来杂草时，应用较多的有草甘膦和绿草烷两类除草剂。草甘膦是种广谱性的除草剂，它可以杀死几乎所有的植物。而绿草烷则是种选择性的除草剂，它只对阔叶木本植物有杀伤力，可以应用于消灭草原上的外来树种而有力地保护草本植物。由于这两种除草剂被植物吸收后可以传输到全植物体，也可传到根部，所以两者都是系统性的除草剂，用它们可以控制处理能以地下茎和地下根进行繁殖的外来种。化学杀虫剂杀灭害虫的作用方式有触杀、胃毒、驱避等，也有激素和生长调节剂类农药。外来害虫抗药性发展很快，应经常交替、轮换使用多种杀虫剂，以延缓和降低害虫的抗药性。化学防治是目前防治斑潜蝇、稻水象甲等外来害虫的最主要的方法，采用的化学杀虫剂包括巴丹、灭扫利、杀虫双、爱福丁等。喷施灭幼脲和溴氰菊酯也可有效控制美国白蛾。用化学农药要注意选择恰当的时间、温度。一是为了更好地发挥化学农药的药效，二是为了对其他生物不造成伤害。如用化学方法处理日本扁蓊 *Polygonum cuspidatum* 时，要求在低温但未冰冻时进行，先在离地面一定的高度砍断其茎秆，而后用25%的草甘膦或绿草烷溶液处理。用药液喷洒处理叶子时，多是在10~11月份进行，这时其他植物多已进入蛰伏期，这样可以避免伤害到其他植物，药液的浓度为2%，为了增加其渗透力，有时还加入0.15%的无离子表面活性剂。

(四) 生物防治

生物防治是指从外来有害生物的原产地引进食性专一的天敌将有害生物的种群密度控制在生态和经济危害水平之下。生物防治方法的基本原理是依据有害生物-天敌的生态平衡理论，在有害生物的传入地通过引入原产地的天敌因子重新建立有害生物-天敌之间

的相互调节、相互制约机制，恢复和保持这种生态平衡。因此生物防治可以取得利用生物多样性保护生物多样性的结果(丁建清和付卫东，1996)。通常从释放天敌到获得明显的控制效果一般需要几年甚至更长的时间，因此对于那些要求在短时期内彻底清除的入侵物，生物防治难以发挥良好的效果。但天敌一旦在新的生境下建立种群，就可能依靠自我繁殖、自我扩散，长期控制有害生物，所以生物防治具有控效持久、防治成本相对低廉的优点(Harley and Forno., 1992)。引进天敌之前要对外来种的原栖息地进行考察，了解其天敌和病原体，研究和评估它们的安全性，而后引进这些病原体、天敌等到受外来种入侵的地方释放，同时还要对释放的生防作用物进行监控和预测，可以提高预测性和增强其安全性，以防止引进的天敌成为新的外来入侵生物。例如，天敌昆虫非洲蛾 *Cactoblastis cactorum* 曾成功地控制了澳大利亚、南非、夏威夷等地的仙人掌 *Opuntia* spp.，但在 1989 年，美国的佛罗里达发现该虫威胁当地的一种花卉植物仙人掌，成为一种严重的害虫(Simberloff and Stiling, 1996)。生物防治措施防治外来入侵种的有利之处在于应用得恰当时，不会造成大的干扰和环境污染。对矢车菊 *Centaurea maculosa* 的控制就是一个例子。它是一年生植物，从欧洲传入美国，入侵性很强，能使土地的承载力减少，幅度高达 90%。用化学农药对它进行处理效果不错，但是价格高。后来，从其起源地选择性地引进了 12 种昆虫，有的可以取食其种子或茎叶，有的则以其根为食。通过这些昆虫的协同作用，这种杂草的繁殖能力受到极大的限制，入侵性大为降低。在我国，广东省成功开展了松突圆蚧的生物防治工作，1988 年从日本引进的松突圆蚧花角蚜小蜂在广东成功控制了松突圆蚧的危害。到 1993 年放蜂总面积达 73.83 万公顷，占疫区面积的 80% 左右，寄生蜂的定居率为 97.8%~100%，雌蚧被寄生率 40%~50%(潘务耀等，1993；何国锋，1995；陈永革和古德祥，1998)。截至 2000 年底，已有 7 种专一性天敌昆虫被成功地引入控制水花生、普通豚草、三裂叶豚草 *Ambrosia trifida* L.、水葫芦、紫茎泽兰等外来有害植物，其中 5 种在当地已经建立种群，南方水域中的水花生已基本得到控制(陈旭东和何大愚，1990；万方浩等，1993；丁建清等，2000)。截至 1996 年世界上已有 13 个国家采用生物防治技术成功控制了水葫芦的危害。例如美国，于 1884 年作为观赏植物引入水葫芦后蔓延成灾，20 世纪 60 年代开始释放水葫芦象甲、螟蛾和螨，在路易斯安那州水葫芦的发生面积已减少 75%；在佛罗里达的一释放点，水葫芦的覆盖面积从 1974 年的 90% 下降到 1980 年的 25%；在路易斯安那州的释放点，到 1976 年，水葫芦已完全消失。泰国 1896 年从印度尼西亚引入水葫芦，后成为泰国最重要的水生杂草，目前泰国主要河道上的水葫芦由于象甲的控制已明显减少。

(五) 综合治理

将生物、化学、机械、人工、替代等单项技术融合起来，发挥各自优势、弥补各自不足，达到综合控制入侵生物的目的，这就是综合治理技术。综合治理并不是各种技术的简单相加，而是它们有机的融合，彼此相互协调、相互促进。以利用生物和化学防治综合治理入侵植物为例，由于融合了化学和生物防治的优势，同时又弥补了各自的不足，因此具有以下特点：①速效性。在实施的前期，在一些急需除掉有害植物的地方，将选择地使用一定品种和剂量的除草剂，以在短期内迅速抑制有害植物种群的扩散蔓延，从而加快控制速度；②持续性。由于除草剂只能取得短期防效，难以持久，因此，使用

除草剂后，释放一定数量的专食有害植物的天敌昆虫并使其建立种群定居，长期自我繁殖，并逐渐达到和保持植物与天敌之间的种群动态平衡，取得持续控制的结果；③安全性。与单一应用化学除草剂相比，综合治理对化学除草剂的品种、使用浓度、剂量及应用次数都有严格的限制，所选择的除草剂对其他生物安全，使用浓度、剂量、次数都大大低于常规用量，因此具有较高的安全性，对环境影响不大；④经济性。综合治理技术体系以生物防治为主，在释放天敌后，天敌可自我繁殖，建立种群，在达到一定数量后基本上不再需要人工增殖，因此具有一次投资、长期见效的优势，防治成本相对较低(丁建清等，1995)。

(六) 生境管理和生态恢复控制

对于外来种可以根据外来种的生态学特征和当地生境的特点和生态规律，采用生境管理的方法来控制。例如，在掌握当地植被生长周期等生态规律的基础上，使用火烧和放牧的方法消耗一定的外来种；使用水淹的方法消灭旱生动植物；使用排空法清除水生的入侵生物；采用轮作倒茬的方法控制外来农田害虫等。

对于外来杂草，可以利用种树和覆盖地表的方法来控制。因为树木的遮蔽有利于耐阴植物的生长，可以在一定程度上控制外来杂草的滋生。利用树叶、干草、麦秆等覆盖地表可以大大减少杂草的生长，并保持土壤湿润、调节土温、增加土壤肥力。

当外来种已被控制或消灭之后，要及时地对这些受到干扰地带进行恢复建设。这种恢复性工作的目的有：①有效地阻止外来种的再次入侵。如果没有实行这种恢复工作，那么先前进行的工作会失去可持续性。②使生态系统的生产力得到恢复。③恢复群落的物种多样性。本地植物同当地的动物之间的关系得到重建后，有利于珍稀濒危物种的保护。④社会服务功能的恢复，包括两方面：一是经济功能，如农业、畜牧业、林业、渔业等方面的产量和质量的恢复和提高；二是间接的服务功能，如减少土壤侵蚀、野火等干扰，改良土质和水质，使景观得到恢复，其旅游等价值得以提高。消灭控制外来种的工作具有长期性，要建立长期的预警系统，给予长期的追踪监控。在对外来种进行科学评估的基础上，要进一步加强管理，通过对外来种入侵的管理阻止和减少其危害。

三、目前我国应采取的对策

(一) 立法与管理对策

国家目前并没有专门针对外来种的法规或条例，应迅速制定防止外来入侵和入侵种管理的法律条规，从法制高度重视生物入侵问题。由于外来入侵生物威胁到社会的方方面面，仅靠某一个或几个部门是不够的，应成立包括农业、林业、环保、海洋、贸易、检疫、卫生、国防、司法、教育、科研等国家主管部门在内的统一管理协调委员会，从国家利益的高度全面管理外来入侵种。

立法时应充分考虑到入侵种传入的各个环节，针对每一传入途径制定相应的法制管理对策。尤其应对生物引种(包括动物、植物、微生物和转基因生物)、交通运输、国际贸易货物、旅游等加强立法监管。例如，从国外引进植物时，应对引入目的、植物种类、引入地方、种植面积、可能的扩散地区等加强监管；引进昆虫用作生物防治或授粉昆虫

等目的时,也应严格审查引进这些昆虫的目的、数量、释放地区和风险分析评价报告,既要防止引进的昆虫对本地昆虫带来危害,也防止它们自身变成新的害虫。因此,应制订明确的、细致的管理规程,其中至少应包括:①引进者递交引进申请(引入前的可行性分析报告);②管理部门(专家联席委员会)对引进申请进行科学论证,同意或拒绝申请;③引进过程中的监管;④引进后的检疫、试种、监管、分析评价;⑤引进者申请释放或扩散;⑥管理部门(专家联席委员会)对释放申请进行论证,同意或拒绝释放;⑦释放后的监测和中长期评估。

(二) 致力于入侵外来生物问题的国家能力建设

国家能力建设是成功地解决入侵生物种问题的关键。中国是一个农业大国,任何种类的生物入侵无疑会对特定的生态系统和区域造成巨大的生态与经济损失。在承诺和履行生物多样性及生物安全性等国际公约的前提下,既要有效地防止异域有害生物的入侵,保卫中国国家生态安全,又要对国际社会提供可用的信息及经验。因此,国家能力建设应包括:

(1) 监管能力:根据我国的国情,建立健全有关预防、管理、防治外来有害生物的国家政策法规和条例,充分执行已有的政策、法令及条例。完善已有的动植物检疫法。成立跨部门的、多学科的外来入侵生物专家工作组。

(2) 狙击能力:建立黑色、白色和灰色名单,改革根据“黑名单”建立的针对性或指定性检疫体系,执行全面检疫体系(在没有证据说明进境的外来生物无害之前,均应将其视为有害,禁止或限制其入境),将外来有害生物拒之于国门之外(外检)。对已侵入但仅局部发生的外来有害生物,要采取严格的内检措施,防止扩散与蔓延。

(3) 预警能力:发展早期预警系统,建立风险评估体系。一方面,根据信息资料对可能入侵的生物进行风险评估与预警,加强防范措施与制定应急控制技术;另一方面,对已入侵生物的危害、分布、蔓延与流行进行风险评估与预警,加强监测与实施有效的技术予以扑灭、根除或控制。

(4) 快速反应能力:构建“快速反应”机制与体系,一旦发现有害的入侵生物,有能力快速地予以清除或消灭。这需要政府的支持、训练有素的专业人员、必要的仪器设备及可使用的经费。

(5) 信息处理能力:建立国家外来有害生物信息库和专门网站,与国际机构(SCOPE, UNEP, IUCN)、国际项目计划(GISP, DIVERSITAS)等交流信息;与国际、地区有关机构开展有关共同问题的合作或协作研究。

(6) 教育宣传能力:建立外来入侵生物培训中心或网络,在正确识别入侵生物及其危害,预防、清除、控制、灭绝外来入侵生物的管理方法,风险与环境影响评估,生态系统的恢复等方面,对有关人员进行强有力的技术培训。通过各种媒体对公众进行教育与宣传。

(三) 致力于入侵外来生物问题的研究能力建设

目前有关外来入侵生物的知识,还不足以准确地进行风险评估和设计有效的管理措施,有关入侵生物学、入侵生态学的研究基础极为薄弱。研究生物入侵在时间上是一个

长久的课题，在空间上是一个立体交叉的学科群领域，许多问题并不是短期“攻关”就能解决的，还有许多问题并不能因为入侵的不确定性而采用“亡羊补牢”的方式来解决，否则后果将极其惨重，代价也将远远高于先期研究投资的成千上万倍。因此，有关外来生物的研究是政府应优先发展的课题与领域。其研究能力建设包括：

(1) 完善阻止和预防外来有害生物入侵的检测技术(如实施全面检疫体系的技术与方法)，以及去除以各种形式(贸易产品、包装材料)携带入侵的有效技术。编制外来生物的黑色、灰色和白色名单。

(2) 外来入侵生物初始种群的野外监测技术与发展大面积发生蔓延检测技术(如遥感监测、雷达监测)的研究。

(3) 建立针对特定目标的有效的、可接受的消灭或控制外来有害生物的技术与方法；建立消灭或控制外来入侵生物的综合治理技术体系，制定最佳的优选方案与组合技术。对新发现的小面积危害的入侵生物，采用高效的紧急扑灭技术(如化学防治、人工防除、机械防除)；对暴发性的入侵者，采用紧急的化学防治及其他一次性的扑灭技术；对大面积发生并已基本稳定的，采用能建立自然生态平衡达到长久抑制效果的生物防治技术。

(4) 开展更深层次的外来入侵种生物气候限制、物种种系发生、地域分布限制、生态适应性等多方面的相互关联的系统研究，以便有能力识别、记载及监测入侵种的动态及更新资料。

(5) 加强建立外来生物(包括有意识地引进的物种)环境影响及风险评估系统。

(6) 强化对外来有害物种的生物防治基础、技术与方法的研究，及对引进的有益物种可能成为另类入侵种的收益与风险评估研究。

(7) 对既定种在既定地区的生态代价与经济代价的影响预测模式研究，研制出既定外来入侵生物的预测指标体系，以便将这种模式应用到其他地区或其他种的评估中。

(8) 被入侵生态系统的恢复研究。

(9) 创建外来入侵生物管理示范区。通过例证示范对外来生物监测、管理与控制的体系。

(10) 研制外来入侵生物的认识、控制、管理的技术程序与指南。

(四) 监测与管理能力建设

建立外来有害生物入侵的监管体系，组织协调各部门间的管理工作，严格引种的审核、批准与检疫程序。目前，我国的引种制度极不规范，对引种的监管还无章可循。只重视引种前的审批工作，而忽视引种释放后的管理。

建立经济惩罚体制，实行经济责任制度。无论是有意识、还是无意识地引入外来生物，均应采用经济政策规范引种的行为与责任。

四、外来生物入侵种的生物安全性优先行动计划

按照国际《生物多样性公约》及生物安全卡塔赫拉协议(the Cartagena Protocol on Biosafety)中的有关条款要求，签约国应阻止引入对生态系统、栖境、物种、人类健康带来威胁的外来物种(包括活体遗传改良或修饰生物)，建立和维护有效的方法与技术控制和根除已入侵的外来有害物种。1997年，环境问题科技委员会(Scientific Committee for

Problems of the Environment)基于生物多样性公约的有关内容,特别是针对外来有害生物物种对环境、生物多样性、农牧业生产造成的严重经济损失和危害,建立了全球入侵生物计划(GISP)。全球自然保护联合会(IUCN)提出了制定外来入侵生物管理法规与准则的指南(Shine *et al.*, 2000)。南太平洋区环境计划(SPREP-South Pacific Regional Environmental Programme)针对太平洋地区的外来生物进行了现状评估与策略(Sherley, 2000)。由此可看出,国际上对外来有害生物的问题是极为重视的。

第八节 生物入侵机制的研究发展趋势

外来生物入侵是生物多样性保护、农业可持续发展和国际贸易的重要障碍,所导致的生态灾难和后果已引起各国政府与国际社会的密切关注。针对生物多样性保护、农业安全生产和可持续发展,已有 40 多个国际公约(如生物多样性公约, CBD)、协议[如生物安全卡塔赫拉协议、实施卫生与植物卫生措施协定(SPS 协议)]和指导准则[全球入侵外来种项目规划(GISP)]涉及外来危险生物入侵的问题(Shine *et al.*, 2000)。

一、外来生物入侵研究的基础性工作

在 CBD 公约的指导下,全球环境基金(GEF)针对外来入侵生物问题提出了预防与管理的指导性原则。1996 年,由环境问题科学委员会(SCOPE)、世界自然保护同盟(IUCN)和英国国际农业与生物科学中心(CABI)共同组织的 GISP 开始实施以来,在发展外来入侵生物的最佳预防与管理策略及指南、外来物种的全球对策、组织实施国际合作项目的研究等方面取得了卓有成效的成果(Sherley, 2000)。针对外来生物入侵的问题,国际上已建立的重要信息数据库和网站大约有 80 余个,涉及控制与管理、早期预警与风险评估的网站 30 余个,不同生物类群的网站(脊椎动物、无脊椎动物、杂草、海洋生物、淡水水生生物等)50 余个,为有关研究提供了大量的信息与技术指导。

我国对外来生物入侵的研究起步较晚。“八五”以来,由于国家有关部门的重视,对农林危险生物入侵的研究积累了一定的工作基础。近些年,我国政府也签署了诸如 CBD、SPS、GISP 等多种国际公约,并明确提出了保障“农业安全生产”与维护“国家生态安全”的战略目标。中国农业科学院和国家环境保护总局还积极地参与了有关 GISP 的讨论、计划制定与实施。

对于外来生物入侵的研究由来已久。早在 1958 年,美国科学家就出版了 *The Ecology of Invasion by Animals and Plants*(动植物入侵的生态学)一书。此后,美国、加拿大、英国、澳大利亚和南非等国的科学家较系统地调查研究了外来动植物、微生物和海洋生物的种类、数量以及对本国农林牧业和生态系统的影响。近年来,外来生物入侵的机制又成为广泛研究的热点与焦点,国际众多刊物上相关研究报道日渐增多, *Nature* 和 *Science* 上也频频刊载有关论文与论述。

危险性外来入侵生物研究过程有别于本地有害生物的研究。一般来讲,外来物种指超出其自然分布范围以外的种群。但就大多数物种种群而言,“自然分布”的概念在进化的时间尺度及生态的空间尺度上难以准确认定。因此,大部分个案研究范围将外来物种定义为:无意识的传入或引进、在空间上以国土疆界或以地理障碍生态区(外来,空间

尺度)、时间上近期发生(时间尺度)、后果上导致生态与经济损失(入侵)为范围。外来生物的入侵一般分为传入、定居与种群建立、潜伏、传播/扩散、成灾几个阶段(Ehler, 1998)。由于外来生物的入侵呈现出一个有序的过程,因此各个阶段的研究应根据各个阶段的特点各有侧重。随着研究的深入,目前在各个阶段的研究都取得了一定的进展,但也存在着诸多尚未解决的关键性问题。

二、外来生物入侵机制的研究与发展趋势

影响外来生物入侵成功的因素是多种多样的,而入侵是诸多因素共同作用后产生的综合结果。在不同的个案中,起决定性作用的因子可以是不同的:可能单一因子起主要作用,也可能由多方面的因子导致入侵的成功。可以说生物入侵的机制是高度复杂多样的,也许并没有像早期推测中一般的、通用的模式。现在对生物入侵机制的研究已不满足于仅找出哪些因素影响入侵过程,而是越来越具体化,要进一步解决这些因子究竟产生什么样的效应,这些效应又是如何影响入侵过程的。发现了这些中间桥梁,人们对入侵机制的认识就更为具体和明朗。目前生物入侵的研究方法已从早期的观察、调查等经典方法转向通过设计受控实验、半自然半受控实验来验证假说,并倾向于通过严格的设计得到一些清晰、明确的结论。分子生物学技术也被引入这一领域,预计将得到越来越多的应用。此外,数学模型也被广泛采用。

(一) 传入前或传入过程中的预防与预警

阻止外来有害生物建立种群是防御外来生物入侵的第一道防线(Ehler, 1998)。有效地防止外来生物入侵的首要问题是如何进行科学的预测。由于传入途径的多样化,以及不同生物种具有不同的生物学特性,很难用某一通用模式来预测和解释各类外来生物入侵的方式和潜在的危害(Kolar and Lodge, 2001)。20世纪90年代后期,对预测植物、大型动物入侵的研究文献激增,大多数研究指出:物理屏障不再是阻止外来种入侵的重要因素,而会随着国际贸易往来的增加而增加。因而,预警能力的建设在预防和预测外来种的入侵中就显得更具有重要的科学地位和更具现实意义。众多研究表明,依据物种的系统发育限制因子:生活史特征、入侵种原产地与入侵地生物气候相似性、入侵种的生物学特性和遗传多样性在原产地与入侵地的分化特性、入侵种与本地种种群及近缘种间存在的差异、入侵种的传播方式等因子,可预测入侵种可能的分布范围与危害。因此,发展早期预警系统(风险识别、危害识别、地域识别、变异识别)是提高预防与预测准确性的首要关键科学问题。在早期预警系统的引导下,发展快速的检测技术,建立快速的狙击系统是防御不可缺少的一部分。这在实践上,是一种积极的、需要优先考虑的防御技术体系。

(二) 定殖与种群建立过程中的“前适应性”机制

对有详细记载的外来物种成功传入的分析表明:大部分的传入或引进是不成功的,传入种只有 1/10 的概率建立种群成为偶见种,偶见种中又只有 1/10 的概率成为常见种,在此之中,又只有 1/10 机会成为有害生物(实际上 1/10 原则中 10 的范围为 5~20,二项式分布的上下限)(Williamson, 1996)。传入过程中繁殖体的存活与死亡、入侵种群的环

境忍耐程度、环境的可容纳性、本身所具有遗传特征等共同决定是否成功入侵。其中，遗传特性是影响定殖与建立种群的一个重要因素。

遗传差异决定入侵成功与否及入侵效应，是遗传特性与入侵生物学特征相互作用的结果。入侵生物的系统发育特征(生活史特征及生态学特性)往往在初始入侵过程中起到决定性的作用。如可塑性的生殖对策与生殖机制(有性与无性、r-选择与 K-选择)、较强的生存适应与种群增长对策(种子量大与易于扩散、诱导性休眠与滞育、快速出苗与较短的幼苗期)、较宽的生态幅与较强的环境忍耐力(生态适应与抗逆能力)、掠夺性的竞争能力(食物资源的争夺与瓜分、时间与空间生态位的占领)等，以此解析入侵种最小种群的维持、潜伏与扩张的成功入侵特性。有关这方面的研究充满前景，但目前的研究并不令人满意(Williamson, 1996)。因为，迄今为止，还没有研究证实或分离到有利于入侵的单个基因，或者入侵后发生改变的基因。回答某个特性的改变是由多个基因还是单个基因控制也无太多的证据。

有研究表明入侵物种较低的种群遗传多样性反而能增强入侵种在新栖息地的竞争能力，如对入侵美国的阿根廷蚂蚁的研究，揭示了由于种群内遗传同质性的增加导致种群快速增长。有时入侵物种在新栖息地的选择压力下可产生新的有利于入侵的性状，并被选择和保留下来，加速了种群遗传结构的分化。而在初始入侵和定殖过程中外来入侵生物快速演变和协同进化的生态过程的影响比遗传过程更重要。外来生物试图建立种群过程中，为增强在新栖息地与本地种的竞争力可能发生遗传分化与演变，同时受影响的本地种也随之发生相应的遗传调整。因此，在定殖与建立种群的过程中，遗传过程与生态过程哪一个更具相对的重要性？成功入侵如果受遗传变异的影响，遗传差异在多大程度上决定其入侵效应？如果外来种丧失其遗传多样性与变异，是否会限制定殖及其入侵成功？目前的研究还不能完全回答这些问题。因此，外来种是否具有遗传的“前适应性”以及如何与生态学过程相互作用，即外来种入侵应力(invasive pressure)的综合研究，是成功定殖与建立种群过程中的关键问题。入侵种的生态学特征差异反映出遗传学背景的多样性。对入侵生物遗传学背景的研究，在揭示入侵过程中遗传过程(如遗传分化的格局、自然选择压力等)与生态过程(如生态适应性、生态位的保守性等)的相对重要性及其相互作用(如生态过程及格局与入侵种种群内和种群间快速演变的关系等)，以及解析导致入侵种的快速生态进化与生态适应的入侵机制方面是国际上的研究热点。此外，对入侵种群遗传结构特征的研究，可揭示入侵种的起源问题，如美国对地中海实蝇的研究。

(三) 潜伏与扩散传播过程中的“后适应性”机制

外来物种从定殖到扩散传播及其后的暴发成灾一般均有几年甚至几十年或更长时间。如引进的天敌昆虫释放后几年查不着踪影，经过一段时间后，突然发现种群激增。但没有证据说明其原因是遗传变异与生态适应能力的结合所致，抑或是由于 Allee 效应使种群构建的速度太慢。不过，在一定的遗传特性背景下，生态学特性(生态环境适应性、后代的繁殖力和扩散能力)，特别是繁殖特性是决定种群快速构建的重要因素(Holt, 1996)。当然，最初的潜伏期可能需要遗传上的调整，一个小的遗传变异可产生很大的生态影响。已经有证据表明杂交对入侵过程中的遗传改变是很重要的，杂交可导致入侵后快速的遗传变化。但其他的遗传变化是否同样快速发展，则很难回答。其一，遗传变异

在生态时间内常常难以测定；其二，遗传改变是很小的，生态上的重要变化是可测的；其三，进化是在一个很长的时间期内发生的。对昆虫而言，如果在最初建立种群的几个世代内有很强的选择压力，则可能导致快速进化。从比较生态遗传学的角度研究已入侵种与原产地种的遗传差异有可能解释一些遗传学上的问题。建立种群后的扩散传播，一方面取决于外来种的扩散能力(扩散方式、速度)与繁殖对策(内禀增长力是一个很重要的因素)；另一方面取决于快速的生态“后适应性”(适应性进化)。

因此，外来种生态适应的调整能力是研究其潜伏与暴发成灾机制的关键。其核心点在于：①生态学特征的差异能否反映出遗传学的背景；②种群扩展的生态适应机制；③直接选择作用可否导致快速进化。

(四) 暴发成灾过程与生态系统的可入侵性机制

美国科学家对外来生物入侵的分析资料表明，外来入侵种中只有很少部分产生严重的生态影响(tens role)；所有群落都是可入侵的，但大部分是人为造成(Nanako and Kohkichi, 1997)；入侵种在原产地并不一定是重要有害生物，但在入侵地往往引起巨大的生态与经济损失。如美洲斑潜蝇在我国的分布与危害就是典型的例证。对入侵生物而言，一个生态系统的抵抗力和可入侵性是一个事物的两个方面，也是目前研究的热点之一。外来生物的入侵改变入侵地的生态系统或群落结构，影响系统内的营养循环和能量分配，造成结构与功能的紊乱。生物多样性对抵抗外来种的入侵起着关键性的作用，物种组成丰富的群落较物种组成简单的群落对生物入侵的抵抗能力要强，已有许多野外研究结果和数学模型支持这些观点。一些设计性实验证明了群落生物多样性与群落对生物入侵的抵抗性之间呈正相关。生态系统所受的干扰(自然干扰和人为干扰)越强，生物入侵越易发生；过强的干扰会在群落中形成空生态位，降低对生物入侵的抵抗力，给入侵生物提供更多的生态位机遇。Brown(1989)提出了成功入侵的5条生态学规则，其具体内容包括：①具有较低多样性的孤立环境对入侵有不同的敏感性；②成功的入侵者大多是陆地上的本地种和非孤立陆地环境中的种类；③原产地与入侵地的物理条件具有相似性；④本地种不占据与入侵种类似的生态位；⑤栖息于受干扰环境的种类和那些与人类活动相关的种类易于在人工生态系统中入侵。这些研究表明：不同生境中的群落，其抵御或接受入侵的生态学过程存在极大的差别。新近提出的生态位机会(niche opportunity)理论从资源机会、逃避天敌的机会、环境机会的角度讨论了三者之间相互作用的关系。这些对入侵生物的资源竞争模式、栖境模式、入侵与协同进化的数学模式的研究为生态调控及生态修复技术提供了科学基础。但无论如何，这些机制的研究是相当复杂的，涉及到入侵种是否缺乏恰当的遗传变异(协同进化)，是否具备系统发育特征的生态位保守性特征，种间的相互作用是否导致快速进化以及这种快速进化对生物群落的生态过程(动态)具有何种潜在的影响等。

综上所述，外来物种入侵机制的研究是相当复杂的，不是一个简单的生物学、抑或生态学特性就能解释的问题，而是在不同层次上的多学科(生物学、生态学、遗传学、生物物理学、生物地理学、生物气候学、种群动态学、群落学、系统学等)相互融汇、相互交织、共同影响和作用的学科群理论。虽然近年来这方面的研究已经有了较大的进展，但应该说认识仍处在初级阶段，对很多问题尚未彻底清楚。比如引入频率对入侵的影响、

入侵过程中随机因素所起的作用、如何整合不同研究尺度下所得到的结果、外来种如何归化融入新栖息地群落而得到控制,以及在地质历史的尺度上生物入侵对生物区系形成的作用等都有待于深入研究。对生物入侵机制的深入研究,不仅能对外来生物入侵过程中的预测与预防、根除与灭绝、控制与管理、生态控制与修复的实践提供坚实的理论基础和依据,而且也可对转基因生物的环境释放与应用、传统生物防治中引进天敌的释放提供借鉴,同时有可能完善生物群衰老理论、生物群不协调论、生态释放的理论体系。无论对于其他相关科学学科的发展,还是对今后社会和经济的发展都有重要的指导意义。

(万方浩 郭建英 郑小波)

主要参考文献

- 白鸥,朱一农.1999.狙击生物入侵.科技新时代,5:54~57 [Bai O, Zhu Y N. 1999. Sniping biological invasion. *Popular Science*, 5: 54~57]
- 白章红,周国梁,钱天荣等.1997.小麦印度腥黑穗病菌在中国适生性的初步研究.植物检疫,11(6):331~334 [Bai Z H, Zhou G L, Qian T R *et al.* 1997. Study on establishment of karnal bunt disease in China. *Plant Quarantine*, 11(6): 331~334]
- 蔡蕾,于之的,王捷,王德辉.2003.中国防治外来入侵物种的现状与管理评估.环境保护,(8):27~34 [Cai L, Yu Z D, Wang J, Wang D H. 2003. Control alien invasive species to conserve biodiversity. *Environment Protection*, (8): 27~34]
- 蔡生力,陈专静.2001.凡纳对虾白斑综合征病毒的检测和预防.上海水产大学学报,10(4):364~369 [Cai S L, Chen Z J. 2001. Detection and prevention of the White Spot Syndrome Virus in *Penaeus vannamei*. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 10(4): 364~369]
- 曹文文.1999.松突圆蚧的监测与防范.植物检疫,13(5):297~298 [Cao W W. 1999. Monitoring and precaution of *Hemiberlesia ptytosphila* T. *Plant Quarantine*, 13(5): 297~298]
- 车晋滇,郭喜红.1999.北美一枝黄花.杂草科学,1:17 [Che J D, Guo X H. 1999. *Solidago altissima* L. *Weed Science*, 1: 17]
- 陈兵,康乐.2002.南美斑潜蝇在我国的发生趋势和地理差异分析.植物检疫,16(3):138~140 [Chen B, Kang L. 2002. Trends of occurrence and geographic variation of pea leafminer *Liriomyza huidobrensis* in China. *Plant Quarantine*, 16(3): 138~140]
- 陈兵,赵云鲜,康乐.2002.外来斑潜蝇入侵和适应机理及管理对策.动物学研究,23:155~160 [Chen B, Zhao Y X, Kang L. 2002. Mechanisms of invasion and adaptation and management strategies of alien leafminers. *Zool. Res.*, 23: 155~160]
- 陈兵,康乐.2003.生物入侵及其与全球变化的关系.生态学杂志,22(1):31~34 [Chen B, Kang L. 2003. Biological invasion and its relation with global changes. *Chinese Journal of Ecology*, 22(1): 31~34]
- 陈洪俊,范晓虹,李尉民.2002.我国有害生物风险分析(PRA)的历史与现状.植物检疫,16:28~31 [Chen H J, Fan X H, Li W M. 2002. The history and present condition of PRA in China. *Plant Quarantine*, 16: 28~31]
- 陈灵芝.1994.生物多样性保护现状及其对策.见:钱迎倩,马克平.生物多样性研究的原理和方法.北京:中国科学技术出版社.13~35 [Chen L Z. 1994. The Protection Status of Biodiversity and Its Countermeasure. In: Qian Y J, Ma K P eds. Principles and Methods of the Researches on Biodiversity. Beijing: China Science and Technology Press. 13~35]
- 陈萍,温硕洋,曾玲.2002.PCR-RFLP技术应用于鉴定美洲斑潜蝇和番茄斑潜蝇的初步研究.武夷科学,18:60~63. [Chen P, Wen S Y, Zeng L. 2002. Study on using PCR-RFLP technique to identify *L. astivie* and *L. bryoniae*. *Wuyi Science*, 18:60~63]
- 陈升碧,关德盛.1994.泽兰实蝇生物学特性观察及生物防治.西南农业学报,7(4):98~102 [Chen S B, Guan D S. 1994. Biological character observation and biological control of *Procecidochares utilis* Stone. *SW China J. Agric. Sci.*, 7(4): 98~102]
- 陈贤兴,陈永群,何献武,沈夕良.2002.几种植物对豚草的生化他感作用.甘肃科学学报,14(3):58~61 [Chen X X, Chen Y Q, He X W, Shen X L. 2002. The allelopathy of the extracts from several plants on *Ambrosia artemisiifolia*. *Journal of Gansu Sciences*, 14(3): 58~61]
- 陈旭东,何大愚.1990.利用泽兰实蝇控制紫茎泽兰的生防策略研究.应用生态学报,1(4):315~321 [Chen X D, He D Y. 1990. Study on strategy of biological control of *Eupatorium adenophorum* by using *Procecidochares utilis*. *Journal of Applied Ecology*, 1(4): 315~321]
- 陈永革,古德祥.1998.松突圆蚧与松突圆蚧花角蚜小蜂种间关系研究.昆虫天敌,20(3):136~142 [Chen Y G, Gu D X. 1998. The study on the interspecific relations between *Hemiberlesia ptytosphila* Takagi and *Coccobius azumai* Tachikawa. *Natural*

Enemies of Insects. 20(3): 136~142]

- 丁建清. 1995. 生物防治: 杂草综合治理的重要内容. 杂草学报, 9(1): 60~64 [Ding J Q. 1995. The important substance of weed integrated management. *Journal of Weed Sciences*, 9(1): 60~64]
- 丁建清. 2002. 外来生物的入侵机制及其对生态安全的影响. 中国农业科技导报, 4(4): 16~20 [Ding J Q. 2002. The mechanism of biological invasion and its effect on ecosystem safety. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 4(4): 16~20]
- 丁建清, 付卫东. 1996. 生物防治: 利用生物多样性保护生物多样性. 生物多样性, 4(4): 222~227 [Ding J Q, Fu W D. 1996. Biological control: using biodiversity to protect biodiversity. *Chinese Biodiversity*, 4(4): 222~227]
- 丁建清, 王韧. 1998. 外来种对中国生物多样性的影响. 见:《中国生物多样性国情研究报告》编写组. 中国生物多样性国情研究报告. 北京: 中国环境科学出版社. 58~61 [Ding J Q, Wang R. 1998. Impact of exotic species to biodiversity in China. In: Edition group of report on national condition in biodiversity in China ed. Report on National Condition in Biodiversity in China. Beijing: China Environmental Science Press. 58~61]
- 丁建清, 王韧, 范中南. 1995. 恶性水生杂草——水葫芦在我国的发生危害及其防治. 杂草学报, 9(2): 49~52 [Ding J Q, Wang R, Fan Z N. 1995. Damage caused by malignant aquatic weed, water hyacinth, and its control in China. *Acta of weed*, 9(2): 49~52]
- 丁建清, 王韧, 付卫东. 2000. 外来有害植物对我国生物多样性的影响及其治理现状与对策. 见: 许智宏. 面向 21 世纪的中国生物多样性保护. 第三届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 北京: 中国林业出版社. 297~306 [Ding J Q, Wang R, Fu W D. 2000. The effects of exotic plants on biodiversity in China and the control. In: Xu Z H ed. Biodiversity Protection in China in 21st Century. Beijing: China Forestry Publishing House. 297~306]
- 丁建清, 解焱. 2001. 中国外来种入侵机制及对策. 见: 汪松、谢彼德、解焱.《保护中国的生物多样性(二)》. 北京: 中国环境科学出版社. 107~128 [Ding J Q, Xie Y. 2001. The Invasive Mechanism and Control Strategies of Invasive Alien Species. In: Wang S, Xie B D, Xie Y eds. Conservation Biodiversity in China (Second). Beijing: China Environmental Science Press. 107~128]
- 董志峰. 2001. 生物安全问题. 中国家禽, 23(21): 19~20 [Dong Z F. 2001. A study on biosafety. *China Poultry*, 23(21): 19~20]
- 高志强. 1996. 福建滨海滩地米草资源开发利用问题. 福建农业大学学报, 25(1): 72~77 [Gao Z Q. 1996. Utilization of *Spartina* spp. in Fujian seashore. *Fujian Agricultural University*, 1996, 25(1): 72~77]
- 庚晋, 周洁. 2002. 物种入侵危害生物安全. 甘肃林业, 1: 33~35 [Geng J, Zhou J. 2002. Alien invasive species damage biosafety. *Gansu Forest*, 1: 33~35]
- 关广清, 韩亚光, 尹睿. 1993. 豚草替代控制研究. 见: 万方浩, 关广清, 王韧. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 227~241 [Guan G Q, Han Y G, Yin R. 1993. Studies on displacing and controlling of *Ambrosia artemisiifolia*. In: Wan F H, Guan G Q, Wang R eds. Integrated Management of Ragweed, *Ambrosia artemisiifolia* (compositae). 1993. Beijing: China Science and Technology Press. 227~241]
- 郭传友, 王中生, 方发明. 2003. 外来种入侵与生态安全. 南京林业大学学报(自然科学版), 27(2): 73~78 [Guo C Y, Wang Z S, Fang Y M. 2003. Exotic species invasion and ecological safety. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 27(2): 73~78]
- 郭水良, 李扬汉. 1996. 新外来杂草-常春藤叶婆婆纳. 杂草科学, 3: 6~7 [Guo S L, Li Y H. 1996. A new invasive weed-*Veronica hederifolia*. *Weed Science*, 3: 6~7]
- 国家林业局编. 1998. 中国林业年鉴. 北京: 中国林业出版社. [State Forest Bureau. 1998. Annual Report of Chinese Forestry. Beijing: China Forestry Publishing House]
- 何国锋. 1995. 广东省两种危险性林木害虫的传入及防治情况. 植物保护, 2: 47~48 [He G F. 1995. Introduction and control of two dangerous forestry pests in Guangdong Province. *Plant Protection*, 2: 47~48]
- 何衍彪, 张茂新, 何庭玉, 谷文祥. 2002. 飞机草化感作用的初步研究. 华南农业大学学报(自然科学版), 23(3): 60~62 [He Y B, Zhang M X, He T Y, Gu W X. 2002. Studies on the allelopathic effects of *Chromolaena odoratum*. *Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition)*, 23(3): 60~62]
- 贺水山, 闻伟刚, 杨兰英, 徐瑛, 顾建峰. 2002. 松材线虫 PCR 快速检测方法研究. 植物检疫, 16(6): 321~322 [He S S, Wen W G, Yang L Y, Xu Y, Gu J F. 2002. Rapid detecting *Bursaphelenchus xylophilus* by PCR. *Plant Quarantine*, 16(6): 321~322]
- 胡淑恒, 汪家权, 聂磊, 何琼. 2003. 生物入侵的危害及防治措施. 生物学杂志, 20(5): 12~15 [Hu S H, Wang J Q, Nie L, He Q. 2003. Harm and prevention and cure of biological invasion. *Journal of Biology*, 20(5): 12~15]
- 黄忠良, 曹洪麟, 梁晓东, 叶万辉, 冯惠玲, 蔡楚雄. 2000. 不同生境和森林内薇甘菊的生存与危害状况. 热带亚热带植物学报, 8(2): 131~138 [Huang Z L, Cao H L, Liang X D, Ye W H, Feng H L, Cai C X. 2000. The growth and damaging effect of *Mikania micrantha* in different habitats. *Journal of Tropical and subtropical Botany*, 8(2): 131~138]

- 黄宗国, 蔡如星. 1984. 海洋污损生物及其防除. 北京: 海洋出版社. 248~249 [Huang Z G, Cai R X. 1984. Marine Fouling Organism and its Prevention and Elimination. Beijing: China Ocean Press. 248~249]
- 蒋小龙, 丁元明, 王龙文, 刘忠善, 沐咏民, 张智英, 余宇平, 陶滔. 1997. 拉美斑潜蝇在云南的发生与防治. 植物检疫, 11(增刊): 20~23 [Jiang X L, Ding Y M, Wang L W, Liu Z S, Mu Y M, Zhang Z Y, She Y P, Tao T. 1997. The occurrence and control of *Liriomyza huidobrensis* in Yunan province. *Plant Quarantine*, 11(Suppl.): 20~23]
- 康乐. 1996. 斑潜蝇的生态学及持续控制. 北京: 科学出版社 [Kang L. 1996. Ecology and Sustainable Control of Serpentine Leafminer. Beijing: Science Press]
- 来燕学, 徐企尧, 陈小龙, 李国平, 周永平. 2002. 松材线虫病流行与松毛虫危害关系的研究. 江苏林业科技, 29(1): 16~18 [Lai Y X, Xu Q Y, Chen X L, Li G P, Zhou Y P. 2002. Study on the relations between the epidemic spread of pine wilt disease and pest of pine necaterpillars *Dendrolimus punctatus* Walker. *Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology*, 29(1): 16~18]
- 李博, 陈家宽. 2002. 生物入侵生态学: 成就与挑战. 世界科技研究与进展, (2): 26~36 [Li B, Chen J K. 2002. Biological invasion ecology: achievement and challenges. *World Science and Technology Research Progress*, (2): 26~36]
- 李明福. 1994. 信息技术在植保植检中应用的新前景. 植物检疫, 8(3): 186~192 [Li M F. 1994. Implication of information technology in plant protection and plant quarantine. *Plant Quarantine*, 8(3): 186~192]
- 李勤忠. 1999. 新疆霍城县发现美洲斑潜蝇和南美潜蝇. 植物检疫, 13(6): 362 [Li Q Z. 1999. *Liriomyza sativae* and *L. huidobrensis* were found in Huo County, Xinjiang. *Plant Quarantine*, 13(6): 362]
- 李尚义, 李宁. 2002. 经济全球一体化须防有害生物入侵. 安徽农学通报, 8(3): 48~49 [Li S Y, Li N. 2002. Economy globalization need take notice of biological invasion. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 8(3): 48~49]
- 李先誉. 1997. 我国稻水象甲的发生及治理. 植物检疫, 11(增刊): 62~63 [Li X Y. 1997. The occurrence and management of rice water weevil in China. *Plant Quarantine*, 11(Suppl.): 62~63]
- 李振宇, 解焱编. 2002. 中国外来入侵种. 北京: 中国林业出版社. 28~29 [Li Z Y, Xie Y (eds.). 2002. Invasive Alien Species in China. Beijing: China Forestry Publishing House. 28~29]
- 李志红, 沈佐锐, 杨铭华. 1999. 北京市蔬菜生产管理信息系统 BJ-CABBAGIS 的研制. 中国农业大学学报, 4(3): 48~52 [Li Z H, Shen Z R, Yang M H. 1999. Exploration of vegetable production management information system (BJ-CABBAGIS). *Journal of China Agriculture University*, 4(3): 48~52]
- 梁忆冰, 林伟, 王跃进, 徐亮, 翟国娜, 陆平, 克依木, 张兰. 1999. 生态因子在马铃薯甲虫地理分布中的作用. 植物检疫, 13(5): 257~262 [Liang Y B, Lin W, Wang Y J, Xu L, Zhai T N, Lu P, Ke Y M, Zhang L. 1999. Determination of the geographical distribution of Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, by ecological factors. *Plant Quarantine*, 13(5): 257~262]
- 梁玉波, 王斌. 2001. 中国外来海洋生物及其影响. 生物多样性, 9(4): 458~465 [Liang Y B, Wang B. 2001. Alien marine species and their impacts in China. *Biodiversity Science*, 9(4): 458~465]
- 廖衍伦, 叶能干. 1984. 恶性杂草-空心莲子的初步研究. 辽宁杂草科学, (3):28~31 [Liao Y L, Ye N G. 1984. Preliminary study on noxious weed *Alternanthera philoxeroides*. *Liaoning Weed Science*, (3):28~31]
- 林冠伦, 杨益众, 胡进生. 1990. 空心莲子草及生物防治研究. 江苏农学院学报, 11(2):57~63 [Lin G L, Yang Y Z, Hu J S. 1990. Biology and control of the alligatorweed. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 11(2):57~63]
- 林伟, 陈克. 1996. 地理信息系统及其在植检领域的应用前景. 植物检疫, 10(2): 81~83 [Lin W, Chen K. 1996. Implication foreground of GIS in plant quarantine. *Plant Quarantine*, 10(2): 81~83]
- 刘红霞, 温俊宝. 2000a. 重视生物入侵的影响(上). 世界农业, 8: 26~28 [Liu H X, Wen J B. 2000a. Pay attention to influences of biological invasion (1). *World Agriculture*, 8: 26~28]
- 刘红霞, 温俊宝. 2000b. 重视生物入侵的影响(下). 世界农业, 9: 34~35 [Liu H X, Wen J B. 2000b. Pay attention to influences of biological invasion (2). *World Agriculture*, 9: 34~35]
- 刘伦辉, 谢寿昌, 张建华. 1985. 紫茎泽兰在我国的分布、危害与防除途径的探讨. 生态学报, 5(1): 1~6 [Liu L H, Xie S C, Zhang J H. 1985. Investigation on distribution, harmfulness and control measure of Crofton weed. *Acta Ecologica Sinica*, 5 (1): 1~6]
- 刘淑杰, 李惠春, 王忠元. 2000. 美洲斑潜蝇在呼和浩特市发生与防治. 植物检疫, 14 (1): 25 [Liu S J, Li H C, Wang Z Y. 2000. The occurrence and control of *Liriomyza sativae* in Huhhot City. *Plant Quarantine*, 14 (1): 25]
- 刘文耀, 刘伦辉, 和爱军. 1991. 泽兰实蝇对紫茎泽兰生长发育及生物量分配影响的研究. 生态学报, 11(3): 291~293 [Liu W Y, Liu L H, He A J. 1991. The effect of *Procecidochares utilis* on growth and development, distribution of biomass of *Eupatorium adenophorum*. *Acta Ecol. Sinica*, 11(3): 291~293]
- 刘兴发, 李红卫, 钟志红, 侯顺利, 臧荣鑫, 赵卫平. 1997. 红鱒鱼传染性胰腺坏死病毒反转录-聚合酶链反应的建立. 中国兽医科技, 27(11): 26~27 [Liu X F, Li H W, Zhong Z H, Hou S L, Zang R X. 1997. RT-PCR technology of IPNV. *Chinese Journal of Veterinary Science and Technology*, 27(11): 26~27]

- 陆庆光. 1999. 生物入侵的危害. 世界农业, 4: 38~39 [Lu Q G. 1999. The damage of biological invasion. *World Agriculture*, 4: 38~39]
- 路瑞锁和宋豫秦. 2003. 云贵高原湖泊的生物入侵原因探讨. 环境保护, (8): 35~37 [Lu R S, Song Y Q. 2003. Reasons for biological invasion in lake of Yungui Plateau. *Environment Protection*, (8): 35~37]
- 罗晨, 姚远, 王戎疆, 阎凤鸣, 胡敦孝, 张芝利. 2002. 利用 mtDNA COI 基因序列鉴定我国烟粉虱的生物型. 昆虫学报, 45(6): 759~763 [Luo C, Yao Y, Wang R J, Yan F M, Hu D X, Zhang Z L. 2002. The use of mitochondrial cytochrome oxidase I (mtCOI) gene sequences for the identification of biotypes of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in China. *Acta Entomologica Sinica*, 45(6): 759~763]
- 罗玮, 赵先富, 胡征宇. 2001. 迎接入侵种的挑战. 水生生物学报, 25(5): 516~523 [Luo W, Zhao X F, Hu Z Y. 2001. Facing the challenge of invasive species. *Acta Hydrobiological Sinica*, 25(5): 516~523]
- 马敬能等. 1998. 中国生物多样性保护综述. 北京: 中国林业出版社. [Ma J N *et al.* 1998. Review of Biodiversity Conservation in China. Beijing: China Forestry Publishing House]
- 马骏, 万方浩, 郭建英, 游兰韶. 2003. 豚草卷蛾在我国的生物气候相似性分析. 中国农业科学, 36(10): 1156~1162 [Ma J, Wan F H, Guo J Y and You L S. 2003. Bio-climatic matching analysis for *Epiblema strenuana* (Lepidoptera: Tortricidae) in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 36(10): 1156~1162]
- 马以桂, 高崇省, 赵森. 1997. 松材线虫. 天津农林科技, 3: 32~38 [Ma Y G, Gao C S, Zhao S. 1997. *Bursaphelenchus xylophilus*. *Tianjing Agricultural and Forest Science and Technology*, 3: 32~38]
- McNeely J A. 2001. 外来入侵物种问题的人类行为因素: 环球普遍观点与中国现状的联系. 见: 汪松、谢彼德、解焱. 《保护中国的生物多样性(二)》. 北京: 中国环境科学出版社. 139~151 [McNeely J A. 2001. Human Dimensions of Invasive Alien Species: How Global Perspectives are Relevant to China. In: Wang S, Xie B D, Xie Y eds. Conservation Biodiversity in China (Second). Beijing: China Environmental Science Press. 139~151]
- 梅丽娟, 尤德康, 苏宏钧, 张自然. 2002. 美国白蛾国家级工程进展及治理对策. 中国森林病虫, 21(2): 42~44 [Mei L J, You D K, Su H J, Zhang Z R. 2002. National project development of *Hyphantria cunea* and control strategies. *For. Pest and Dis.*, 21(2): 42~44]
- 苗振旺. 2002. 红脂大小蠹成虫侵入孔的空间分布型研究. 山西林业科技, 7~9 [Miao Z W. 2002. Space distribution of entering tree hole of *Dendroctonus vales* Imago. *ShanXi Forestry Science and Technology*, 7~9]
- 聂呈荣, 黎华寿, 黄京华, 陈莉琼, 洪明祺. 2002. 薜荔菊对花生和其他作物的化感作用. 花生学报, 31(1): 30~32 [Nie C R, Li H S, Huang J H, Chen L Q, Hong M Q. 2002. The allelopathic effects of *Wedelia chinensis* Merr. on peanut (*Arachis hypogaea* L.) and other crops. *Journal of Peanut Science*, 31(1): 30~32]
- 潘务耀, 唐子颖, 谢国林, 连俊和, 丁德诚. 1993. 松突圆蚧花角蚜小蜂引进和利用的研究. 森林病虫通讯, 1: 15~18 [Pan W Y, Tang Z Y, Xie G L, Lian J H, Ding D C. 1993. The study on the introduction and utilization of *Coccobius azumai* Tachikawa. *Forest Pest and Disease*, 1: 15~18]
- 强胜. 1998. 世界性恶性害草-紫茎泽兰研究历史及现状. 武汉植物学研究, 16(4): 366~372 [Qiang S. 1998. The history and status of the study on crofton weed (*Eupatorium adenophorum* Spreng.), a worst worldwide weed. *Wuhan Botanic Research*, 16(4): 366~372]
- 强胜, 曹学章. 2000. 中国异域杂草的考察与分析. 植物资源与环境学报, 9(4): 34~38 [Qiang S, Cao X Z. 2000. Survey and analysis of exotic weeds in China. *Journal of Plant resources and Environment*, 9(4): 34~38]
- 阮小凤, 杨勇, 马书尚, 周媛月. 1998. 甜樱桃病毒病的 ELISA 检测研究. 山东农业大学学报, 29(3): 277~282 [Ruan X F, Yang Y, Ma S S, Zhou Y. Y. 1998. Research on virus detection by ELISA in sweet cherry. *J. of Shandong Agricultural University*, 29(3): 277~282]
- 商晗武, 祝荣增, 赵琳, 林云彪, 王荣洲, 周新昌. 2003. 外来害虫蔗扁蛾的寄主范围. 昆虫知识, 40(1): 55~59 [Shang H W, Zhu R Z, Zhao L, Lin Y B, Wang R Z, Zhou X C. 2003. Host plants of the invasive insect pest, *Opogona sacchari*. *Entomological Knowledge*, 40(1): 55~59]
- 商名清, 常兆芝, 华崇钊. 2002. 山东省发现检疫性害虫蔗扁蛾. 植物检疫, 16(4): 226~227 [Shang M Q, Chang Z Z, Hua C Z. 2002. *Opogona sacchari* found in Shandong province. *Plant Quarantine*, 16(4): 226~227]
- 苏荣辉, 姜治平, 张润志. 2002. 对生物入侵研究对策的思考. 中国科学院院刊, 5: 335~338 [Su R H, Lou Z P, Zhang R Z. 2002. Consider for the strategies research of bioinvasion. *Publication of Chinese Academy of Science*, 5: 335~338]
- 孙江华, 虞佩玉, 张彦周, 王小君. 2003. 海南省新发现的林业外来入侵害虫—水椰八角铁甲. 昆虫知识, 40(3): 286~287 [Sun J H, Yu P Y, Zhang Y Z, Wang X J. 2003. A new invasive coconut pest in Hainan province. *Entomological Knowledge*, 40(3): 286~287]

- 田家怡, 潘怀剑. 2000. 异地生物入侵危害及综合防治对策. 滨州师专学报, 16(2): 92~96 [Tian J Y, Pan H J. 2000. The harm of biological invasion of exotic organisms and its corresponding comprehensive prevention and control. *Journal of Binzhou Teachers College*, 16(2): 92~96]
- 万方浩. 1991. 物种引进——生态学理论对生物防治实践的启示. 见: 《青年生态学者论丛(一)》. 北京: 中国科学技术出版社. 278~283 [Wan F H. 1991. Species introduction – revelation of ecological theories on biological practices. In: Discussion of Yough Ecologists (1). Beijing: Chinese Science and Technology Press. 278~283]
- 万方浩, 叶正楚, Harris. P. 1997. 生防作用物的风险评价方法. 中国生物防治, 13(1): 37~41 [Wan F H, Ye Z C, Harris P. 1997. General methods of risk assessment of biological control agents. *Chinese Journal of Biological Control*, 13(1): 37~41]
- 万方浩, 关广清, 王韧. 1993. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社 [Wan F H, Guan G Q, Wang R. 1993. Integrated management of ragweed, *Ambrosia artemisiifolia* (Compositae). Beijing: China Science and Technology Press]
- 万方浩, 郭建英, 王德辉. 2002a. 中国外来入侵生物的危害与管理对策. 生物多样性, 10(1): 119~125 [Wan F H, Guo J Y, Wang D H. 2002a. Alien invasive species in China: their damages and management strategies. *Biodiversity Science*, 10 (1): 119~125]
- 万方浩, 郭建英, 王德辉. 2002b. 中国外来入侵生物的现状、管理对策及风险评价体系. 见: 王德辉, Jeffrey A M. 生物多样性与外来入侵物种管理国际研讨会论文集. 北京: 中国环境科学出版社. 77~102 [Wan F H, Guo J Y, Wang D H. 2002b. Alien invasive species in China: Current status, research development, management strategies and risk assessment frame. In: Wang D H, Jeffrey A M eds., International Workshop on Biodiversity and Management for Alien Invasive Species. Beijing: China Environmental Science Press. 77~102]
- 王福祥. 1997. 美洲斑潜蝇的发生及综合防治. 农业科技通讯, 2: 34 [Wang F X. 1997. Occurrence of *Liriomyza sativae* and its integrated management. *Economic crops*, 2: 34]
- 王履浙, 仲伦, 萧宁年. 1999b. 云南斑潜蝇的发生种类及影响因子调查初报. 西南农业学报, 12 (增刊): 1~7 [Wang L Z, Zhong L, Xiao N N. 1999b. Primary investigation report on the occurred species and influencing factors of *Liriomyza* in Yunan province. *Southwest China J. Agr. Science*, 12 (suppl.): 1~7]
- 王韧, 王远. 1988. 我国南方水生花发生危害及生物防治可行性的调查论证. 杂草学报, 3(1): 36~40 [Wang R, Wang Y. 1988. The discussion on feasibility of biological control and occurrence of *Alternanthera philoxeroides* in the south China. *Journal of Weed Science*, 3(1): 36~40]
- 王伟平. 1996. 美国白蛾防治模式推广与应用. 森林病虫通讯, 3: 44~45 [Wang W P. 1996. The extension and application of the models on control *Hyphantria cunea*. *Forest Pest and Disease*, 3: 44~45]
- 王献博. 1999. 生物入侵的生态威胁及其防控措施. 植物杂志, 4: 4~5 [Wang X B. 1999. Ecological threaten of biological invasion and its prevent measures. *Journal of Botany*, 4: 4~5]
- 王震洪, 段昌群, 起联春, 张世彪, 徐以宏. 1998. 我国桉树林发展中的生态问题探讨. 生态学杂志, 17 (6): 64~68 [Wang Z H, Duan C Q, Qi L C, Zhang S B, Xu Y H. 1998. A preliminary investigation of ecological issues arising in the man-made forest of *Eucalyptus* in China. *Chinese Journal of Ecology*, 17 (6): 64~68]
- 韦公远. 2001. “外乡客”导演的生态悲剧. 生态经济, 10: 84 [Wei G Y. 2001. Ecological tragedy caused by alien guests. *Ecological Economy*, 10: 84]
- 魏鸿钧. 1997. 我国稻水象发生态势与持续控制. 植物检疫, 11(增刊): 60~62 [Wei H J. 1997. Occurrence tendency and sustainable management for rice water weevil, *Lissorhoptru orzophilus* Kuschel in China. *Plant Quarantine*, 11(supplement): 60~62]
- 问锦曾, 王音, 雷仲仁. 1996. 美洲斑潜蝇中国新纪录种. 昆虫分类学报, 18(4): 311~312 [Wen J Z, Wang Y, Lei Z R. 1996. New record of *Liriomyza sativae* Blanchard (Diptera: Agromyzidae) from China. *Entomotaxonomia*, 18(4): 311~312]
- 吴克强. 1993. 滇池流域的生态失调. 国内湖泊(水库)协作网通讯, (1): 47~49 [Wu K Q. 1993. Ecological maladjustment in Tianchi drainage area. *Newsletter of the National Lake and Reservoir Collaboration Net*, (1): 47~49]
- 洗继东, 詹根祥, 梁广文, 周贤军, 范武. 2001. 植物乙醇提取物对荔枝蒂蛀虫的防治研究. 热带作物学报, 22(3): 45~50 [Xian J D, Zhan G X, Liang G W, Zhou X J, Fan W. 2001. Effect of plant alcoholic extracts on the control of *Conopomorpha sinensis* Bradley in litchi orchard. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 22(3): 45~50]
- 向言词, 彭少麟, 任海, 周厚诚. 2002. 植物外来种的生态风险评估和管理. 生态学杂志, 21(5): 40~48 [Xiang Y C, Peng S L, Ren H, Zhou H C. 2002. Management and ecological risk assessment of exotic plants. *Chinese Journal of Ecology*, 21(5): 40~48]
- 向言词, 彭少麟, 周厚诚, 方炜. 2001. 生物入侵及其影响. 生态科学, 20(4): 68~72 [Xiang Y C, Peng S L, Zhou H C, Fang W. 2001. Biological invasion and its impacts. *Ecologic Science*, 20(4): 68~72]
- 向业勋. 1983. 紫茎泽兰的分布、危害及防除意见. 杂草科学, (4): 10~11 [Xiang Y X. 1983. Distribution, damage and control

- methods of *Eupatorium adenophorum*. *Weed Sciences*, (4): 10~11]
- 解焱, 李振宇, 汪松. 2001. 中国入侵物种综述. 见: 汪松, 谢彼德, 解焱. 《保护中国的生物多样性(二)》. 北京: 中国环境科学出版社. 91~106[Xie Y, Li Z Y, Wang S, 2001. Invasive Species in China-An Overview. In: Wang S, Xie B D, Xie Y eds. Conservation Biodiversity in China (II). Beijing: China Environmental Science Press. 91~106]
- 徐承远, 张文驹, 卢宝荣, 陈家宽. 2001. 生物入侵机制研究进展. 生物多样性, 9(4): 430~438 [Xu C Y, Zhang W J, Lu B R, Chen J K. 2001. Progress in studies on mechanisms of biological invasion. *Biodiversity Science*, 9(4): 430~438]
- 燕长安, 陈玉文, 邢景光. 1992. 锦州市扑灭了美国白蛾. 植物检疫, 6(1): 37~38 [Yan C A, Chen Y W, Xing J G. 1992. Eradication of *Hyphantria cunea* in Jinzhou, Liaoning. *Plant Quarantine*, 6(1): 37~38]
- 杨集昆, 程桂芳. 1997. 中国新记录的辉蛾科及蔗扁蛾的新结构(鳞翅目: 谷蛾总科). 武夷科学, 13: 24~30 [Yang J K, Cheng G F. 1997. The family Hieroxestidae new to China and some new structures of *Opogona sacchari* (Bojer) (Lep.: Tineoidea). *Wuyi Science Journal*, 13: 24~30]
- 杨君兴. 1996. 云南的外来鱼类和土著鱼类: 影响的方式和程度及相关问题研究. 《保护中国的生物多样性(二)》. 北京: 中国环境科学出版社. 129~138 [Yang JX. 1996. The research of invasion fish and native fish in Yunna. In: Biodiversity Work Group. CCICED. Biodiversity Conservation in China (2). Beijing: China Environmental Science Press. 129~138]
- 杨平均, 梁铭球. 1996. 生物入侵的生态学问题及现状. 昆虫天敌, 18(1): 91~97 [Yang P J, Liang G Q. 1996. Summary on some ecological problems of biological invasion. *Natural Enemies of Insects*, 18(1): 91~97]
- 杨亚妮. 2002. 湿地生态系统研究及防治退化对策. 自然杂志, 24(2): 95~99 [Yang Y N. 2002. Study on degenerative wetland ecological system and preventing and controlling countermeasures. *Ziran Zazhi*, 24(2): 95~99]
- 姚一建, 魏铁铮, 蒋毅. 2002. 微生物入侵种和防范生物武器研究现状与对策. 中国科学院院刊, (1): 26~30 [Yao Y J, Wei T Z, Jiang Y. 2002. Current status of bio-weapons control and research on invasive microbes in China. *Academic Journal of Chinese Academy of Sciences*, (1): 26~30]
- 张爱良, 李彦连. 2003. 生物入侵与天敌引种. 生物学教学, 28(1): 54~56 [Zhang A L, Li Y L. 2003. Biological invasion and natural enemy introduction. *Biology Teach*, 28(1): 54~56]
- 张从. 2003. 外来物种入侵与生物安全性评价. 环境保护, 6: 29~30 [Zhang C. 2003. External invasion species and assessment of biological safety. *Environment protection*, 6: 29~30]
- 张历燕, 陈庆昌, 张小波. 2002. 红脂大小蠹形态学特征及生物学特性研究. 林业科学, 38(4): 95~99 [Zhang L Y, Chen Q C, Zhang X B. 2002. Studies on the emorphological characters and bionomics of *Dendroctonus valens* Leconte. *Scientia Silvae Sinicae*, 38(4): 95~99]
- 张润志, 任立, 孙江华, 吴坚, 曾睿. 2003. 椰子大害虫——锈色棕榈象及其近缘种的鉴别(鞘翅目: 象虫科). 中国森林病虫, (2): 3~6 [Zhang R Z, Ren L, Sun J H, Wu J, Zeng R. 2003. Morphological differences of the coconut pest insect, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier), and its related species (Coleoptera: Curculionidae). *Forest Pest and Disease*, (2): 3~6]
- 张友军, 吴青君, 徐宝云, 朱国仁. 2003. 危险性外来入侵生物——西花蓟马在北京发生危害. 植物保护, 29(4): 58 [Zhang Y J, Wu Q J, Xu B Y, Zhu G R. 2003. Dangerous alien invasive species—occurrence and damages of *Frankliniella occidentalis* in Beijing. *Plant Protection*, 29(4): 58]
- 赵国晶, 马云萍. 1989. 云南省紫茎泽兰的分布与危害的调查研究. 杂草科学, 3(2): 37~40 [Zhao G J, Ma Y P. 1989. The study on the distribution and damage of *Eupatorium adenophorum* in Yunnan province. *Weed Science*, 3 (2): 37~40]
- 赵清良, 赵强. 1997. 大米草对双赤围沙蚕生境中土壤改良作用的研究. 生态学杂志, 16(2): 28~30 [Zhao Q L, Zhao Q. 1997. Effects of *Spartina anglica* to the soil habitats of *Perenereis aibuhitensis*. *Chinese Journal of Ecology*, 16(2): 28~30]
- 赵友福, 张从仲. 1996. 利用 MARYBLYT 模型预测中国各栽培区划梨火疫病发生的可能严重性. 植物检疫, 10(4): 197~201 [Zhao Y F, Zhang CZ. 1996. The application of MARYBLYT model to prediction of fire blight *Erwinia amylovora* in China. *Plant Quarantine*, 10(4): 197~201]
- 赵友福, 林伟. 1995. 应用地理信息系统对梨火疫病可能分布区的初步研究. 植物检疫, 9(6): 321~326 [Zhao Y F, Lin W. 1995. The analysis of the possible distribution of fire blight *Erwinia amylovora* based on GIS. *Plant Quarantine*, 9(6): 321~326]
- 中国农业年鉴编辑委员会. 1997. 中国农业年鉴 1997. 北京: 中国农业出版社[Committee of China Agricultural Annual Report. 1997. China Agricultural Annual Report of 1997. Beijing: China Agricultural Press]
- 中国农业年鉴编辑委员会. 1998. 中国农业年鉴 1998. 北京: 中国农业出版社[Committee of China Agricultural Annual Report. 1998. China Agricultural Annual Report of 1998. Beijing: China Agricultural Press]
- 中国农业年鉴编辑委员会. 1999. 中国农业年鉴 1999. 北京: 中国农业出版社[Committee of China Agricultural Annual Report. 1999. China Agricultural Annual Report of 1999. Beijing: China Agricultural Press]
- 中国农业年鉴编辑委员会. 2000. 中国农业年鉴 2000. 北京: 中国农业出版社[Committee of China Agricultural Annual Report.

2000. China Agricultural Annual Report of 2000. Beijing: China Agricultural Press]
- 中国生物多样性国情研究报告编写组. 1998. 中国生物多样性国情研究报告(国家环保局主持). 北京: 中国环境科学出版社 [Edition group of report on national condition in biodiversity in China ed. 1998. Report on National Condition in Biodiversity in China (organized by State Bureau of Environment). Beijing: China Environmental Science Press]
- 周晓梅, 黄炳球. 2001. 薇甘菊的发生及防治. 世界农业, (10): 42~43 [Zhou X M, Huang B Q. 2001. Occurance and control of *Mikania* (*Mikania micrantha* H. B. K.). *World Agriculture*, (10): 42~43]
- 朱建雄. 1993. 松突圆蚧研究综述. 林业科技, 18(2): 22~24 [Zhu J X. 1993. Research review of *Hemiberlesia pytysoiphila* T. *Forestry Science and Technology*, 18(2): 22~24]
- 朱建裕, 廖晓兰, 高必达, 朱水芳, 陈红运, 戴富泉. 2003. 梨火疫细菌实时荧光 PCR 和诱捕 PCR-ELISA 检测方法的建立. 植物检疫, 17(1): 7~10 [Zhu J Y, Liao X L, Gao B D, Zhu S F, Chen H Y, Dai F Q. 2003. The establishment of detection of real-time-fluorescent-PCR and capture-PCR-ELISA for detection of fire blight *Erwinia amylovora*. *Plant Quarantine*, 17(1): 7~10]
- 祝心如, 王威, 赵国镇, 王大力. 1997. 三裂叶豚草对大豆根系生长及其结瘤的影响. 生态学报, 17 (4): 407~411 [Zhu X R, Wang W, Zhao G Z, Wang D L. 1997. Effect of *Ambrosia trifida* on root growth and nodulation of soybean. *Acta Ecologica Sinica*, 17 (4): 407~411]
- 卓国豪, 黄有宝, 吴运新, 潘礼增, 冯伟扬, 刘绍钦. 2003. 香蕉枯萎病的综合防治技术. 植物检疫, 17(5): 279~280 [Zhuo G H, Huang Y B, Wu Y X, Pan L Z, Feng W Y, Liu S Q. 2003. Integrated management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Plant Quarantine*, 17(5): 279~280]
- Adersen H. 1989. The rate plants of the Galapagos Islands and their conservation. *Biological Conservation*, 47: 49~77
- Alward R D, Detling J K, Milchunas D G. 1999. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming. *Science*, 283: 229~231
- Baskin Y. 1998. Winners and losers in a changing world: global changes may promote invasion and alter the fate of invasive species. *Bioscience*, 48 (10): 788~792
- Beerling D J, Dawah H A. 1993. Abundance and diversity of invertebrates associated with *Fallopia japonica* (Hutt. Rose Decraene) and *Impatiens glantulifera* (Royle): two alien plant species in the British Isles. *Entomologist*, 112(2): 127~139
- Beerling D J, Huntley B, Bailey J P. 1995. Climate and the distribution of *Fallopia japonica*: use of an introduced species to test the predictive capacity of response surfaces. *Journal of Vegetation Science*, 6:269~282
- Brothers T S, Spingarn A. 1992. Forest fragmentation and alien plant invasion of central Indiana old-growth forests. *Conservation Biology*, 6: 91~100
- Buell A C, Pichart A J. 1995. Introduction history and invasion patterns of *Annophila arenaria* on the North Coast of California. *Conservation Biology*, 9(6): 1587~1593
- Burdon J J, Chilvers G A. 1994. Demographic changes and the development of competition in a native Australian eucalypt forest invaded by exotic pines. *Oecologia*, 97(3): 419~423
- Burke M J W, Grime J P. 1996. An experimental study of plant community invisibility. *Ecology*, 77:776~790
- Byers J E and Go Idwasser L. 2001. Exposing the mechanism and timing of impact of nonindigenous species on native species. *Ecology*, 82(5): 1330~1343
- Callway R M, Aschehoug E T. 2000. Invasive plants versus their new and old neighbors: a mechanism for exotic invasion. *Science*, 290(20): 521~523
- Carlton J T, Geller J B. 1993. Ecological roulette: the global transport of non-indigenous marine organisms. *Science*, 261(2): 78~81
- Carroll S P and Dingle H. 1996. The Biology of post-invasion events. *Biological Conservation*, 78: 207~214
- Case T J. 1990. Invasion resistance arises in strongly interacting species rich model competition communities. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 87: 9610~9614
- Castello J D. 1995. Pathogens, patterns, and processes in forest ecosystems. *Bioscience*, 45: 16~24
- Castri F, Hansen A J, Debussche M. 1990. Biological Invasions in Europe and the Mediterranean Basin. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- Chen B, Kang L. 2002. Cold hardiness and supercooling capacity in the pea leafminer *Liriomyza huidobrensis*. *CryoLetters*, 23: 173~182
- Christian C E. 2001. Consequences of a biological invasion reveal the importance of mutualism for plant communities. *Nature*, 41(11): 635~639

- Clout M N. 1999. Biodiversity conservation and the management of invasive animals in New Zealand. In: Standlund O T, Schei P J, Viken A eds. Invasive species and biodiversity management. London, UK: Kluwer. 349-359
- Cohen A N, Carlton J T. 1998. Accelerating invasion rate in a highly invaded estuary. *Science*, 279:555-558
- Costello D A, Lunt I D, Willams J E. 2000. Effects of invasion by the indigenous shrub *Acacia sophorae* on plant composition of coastal grasslands in southeastern Australia. *Biological Conservation*, 96:113-121
- Crawley A J, Edwards M J. 1987. Colonization, Succession and Stability, 26th Symposium of the British Ecological Society. Oxford: Blackwell
- D'Antonio C M, Vitousek P M. 1992. Biological invasion by exotic grasses, the grass/ fire cycle, and global change. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 23: 63-87
- Daehler C, and Strong D R. 1997. Hybridization between introduced smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*, Poaceae) and native California cordgrass (*S. foliosa*) in San Francisco Bay, California, USA. *Amer. J. Bot.*, 84(5): 607
- DeFerrari C M, Naiman R J. 1994. A multi-scale assessment of the occurrence of exotic plants on the Olympic Peninsula, Washington. *Journal of Vegetation Science*, 5:247-258
- Drake J A. 1990. The mechanics of community assembly and succession. *Journal of Theoretical Biology*, 147(2): 213-233
- Drake J A, Mooney H A, di Castri F. 1989. Biological invasions: a Global Perspective. Chichester: John Wiley
- Driesche J V and Diresche R V. 2000. Nature out of Place: Biological Invasion in the Global Age. Washington, DC. USA: Island Press. 363
- Duggin J A, Gentle C B. 1998. Experimental evidence on the importance of disturbance intensity for invasion of *Lantana camara* L. in dry rainforest-open forest ecotones in north-eastern NS W, Australia. *Forest Ecology and Management*, 109:279-292
- Duke J S, Mooney H A. 1999. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14(4):135-139
- Dwyer M, Kaunzinger C K, Wyckoff P H, Webb S L. 2000. The myth of the resilient forest: case study of the invasive Norway maple (*Acer platanoides*). *Rhofora*, 102(911): 332-354
- Edgerly J S, Willey M S, Livdahl T P. 1993. The community ecology of *Aedes* egg hatching-implications for a mosquito invasion. *Ecological Entomology*, 18(2): 123-128
- Ehler L E. 1998. Invasion biology and biological control. *Biological Control*, 13:127-133
- Ellstrand N C, Schierenbeck K A. 2000. Hybridization as a stimulus for the evolution of invasiveness in plants. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 97(13): 7043-7050
- Elton. CS 1958, The Ecology of Invasion by Animals and Plants. London: Methuen and Co Ltd
- Enserink M, 1999. Predicting invasions: biological invaders sweep in. *Science*, 285: 1834-1836
- Gjerde I, Tersdal M S. 1997. Effects on avian diversity, composition and guild structures relationships between soil-stores seed banks and mature vegetation in alien plant-invaded South African fynbos shrubland. *Plant Ecology*, 133 (1): 107-122
- Hallegraeff G M. 1998. Transport of exotic dinoflagellates via ships' ballast water: bioeconomic risk assessment and efficacy of possible ballast water management strategies. *Mari. Ecol. Progress Series*, 168: 297-309
- Haltuch M A and Berkman P A. 2000. Geographic information system (GIS) analysis of ecosystem invasion: exotic mussels in Lake Erie. *Limnol. Oceanogr*, 45(8): 1778-1787
- Harley K L S, Forno I W. 1992. Biological Control of Weeds. Melbourne-Sydney: Inkata Press
- Higgins S I. 1996. Modeling invasive plant spread: the role of plant-environment interactions and model structure. *Ecology*, 77(7): 2043-2054
- Hill A M, and Lodge D M. 1999. Replacement of resident crayfishes by an exotic crayfish: the roles of competition and predation. *Ecological Applications*, 9(2): 678-690
- Hobbs R J, Huenneke L F. 1992. Disturbance, diversity and invasion: implication for conservation. *Conservation Biology*, 6: 324-337
- Hodkinson I D, Bird J, Miles J E, Bale J S, Lennon J J. 1999. Climatic signals in the life histories of insects: the distribution and abundance of heather psyllids (*Strophingia* spp.) in the UK. *Func. Ecol.*, 13(suppl. 1): 83-95
- Holmes P M, Cowling R M. 1997. Impact of biological invasion of *Robinia pseudoacacia* on zonal and species diversity of dune vegetation in central Japan. *Journal of Ecology*, 47(2): 131-143
- Holmgren M, Aviles R, Sierralta L, Segura A M, Fuentes E R. 2000. Why have European herbs so successfully invaded the Chilean matorral? Effects of herbivore, soil nutrients and fire. *Journal of Arid Environments*, 44(2): 197-211
- Holt R. 1996. Demographic constraints in evolution: towards unifying the evolutionary theories of senescence and niche

- conservatism. *Evolutionary Ecology*, 10: 1~10
- Holway D A. 1999. Competitive mechanisms underlying the displacement of native ants by the invasive Argentine ant. *Ecology*, 80(1): 218~251
- Holway D A, Suarez A V. 1999. Animal behavior: an essential component of invasion biology. *Trends in Ecology and Evolution*, 14(8): 328~330
- Howe H F, Smallwood J. 1982. Ecology of seed dispersal. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 13: 201~228
- Jenkins N L, Hoffmann A A. 1999. Limits to the southern border of *Drosophila serrata*: cold resistance, heritable variation, and trade-off. *Evolution*, 53: 1823~1834
- Jesson L, Kelly D, Sparrow A. 2000. The importance of dispersal, disturbance, and competition for exotic plant invasions in Arthur's Pass National Park, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 38(3): 451~468
- John H. S. 1973. List and summary of the flowering plants in the Hawaiian Islands. Pacific Tropical Botanical Garden Memoir, (1)
- Johnson L E, Carlton J T. 1996. Post-establishment spread in large-scale invasions: dispersal mechanisms of the zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Ecology*, 77(6): 1686~1690
- Johnson L. 1992. Dwarfbunt (*Tilletia controversa* Kühn) in winter wheat in Sweden: relationship to climate (1951~1987), survey result and cultivation measures (1967~1987). *Journal of Plant Diseases Protection*, 99 (3): 256~265
- Juliano S A. 1998. Species introduction and replacement among mosquitoes: interspecific resource competition or apparent competition. *Ecology*, 79(1): 255~268
- Julien M H, Chan R R. 1992. Biological control of alligator weed—unsuccessful attempts to control terrestrial growth using the flea beetle *Disonycha argentinensis*. *Entomophaga*, 37(2): 215~221
- Kitayama K, Muellerdombois D. 1995. Biological invasion on an oceanic island mountain—do alien plant species have wider ecological ranges than native species. *Journal of Vegetation Science*, 6(5): 667~674
- Knops J M H, Tilman D, Haddad N M, Naeem S, Mitchell C E, Haarstad J, Ritchie M E, Howe K M, Reich P B, Siemann E, Groth J. 1999. Effects of plant species richness on invasion dynamics, disease outbreaks, insect abundance and diversity. *Ecology Letters*, 2(5): 286~293
- Kolar C S & Lodge D M. 2001. Progress in invasion biology: predicting invaders. *Trends in Ecology and Evolution*, 16(4): 199~204
- Kraus B, Page R E. 1995. Effect of *Varroa jacobsoni* (Mesostigmata: Varroidae) on feral *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) in California. *Environmental Entomology*, 24(6): 1473~1480
- Latlin J D, Christie A, Schwartz M D. 1995. Native black grass bugs (Irbisia-Labops) on introduced wheatgrasses: commentary and bibliography (Hemiptera: Heteroptera: Miridae). *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 97(1): 90~111
- Levine J M. 2000. Species diversity and biological invasions: relating local process to community pattern. *Science*, 288: 852~854
- Linden A. 1990. Survival of the leafminer parasitoids *Chrysocharis oscinidis* Ashmead and *Opius pallipes* Wesm. after cold storage of host pupae. *Meded. Fac. Landbouwet. Rijksuniv. Gent.*, 55(2a): 355~360
- Louda S M. 1997. Ecological effects of an insect introduced for the biological control of weeds. *Science*, 277(22): 1088~1090
- Mack R N, Simberloff D, Lonsdale W M, Evans H, Clout M, Bazzaz F A. 2000. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecol. Appl.*, 10(3): 689~710
- Mark W. 1996. A framework for the study of invasions. In: *Biological Invasion*. Chapman and Hall Press. 1~27
- Maron J L, Connors P G. 1996. A native nitrogen-fixing shrub facilitates weed invasion. *Oecologia*, 105: 302~312
- McGrady-Steed J, Harris P M, Morin P J. 1997. Biodiversity regulates ecosystem predictability. *Nature*, 390: 162~165
- Meekins J F, McCarthy B C. 1999. Competitive ability of *Aliaria petiolata* (garlic mustard, Brassicaceae), an invasive, nonindigenous forest herb. *International Journal of Plant Science*, 160 (4): 743~752
- Milchunas D G, Lauenroth W K. 1995. Inertia in plant community structure: state changes after cessation of nutrient-enrichment stress. *Ecological Applications*, 5: 452~458
- Millers E L. 1993. Exotic species in the Great Lakes: a history of biotic crises and anthropogenic introduction. *J. Gr. Lakes Res.*, 19: 1~54
- Mitra S S, Sheldon F H. 1993. Use of an exotic tree plantations by bornean lowland forest birds. *Auk*, 110 (3): 529~540
- Mooney H A, Hobbs R J. 2000. *Invasive Species in a Changing World*. Covelo, CA: Island Press
- Mountainspring S, Scott J M. 1985. Interspecific competition among Hawaiian forest birds. *Ecological Monographs*, 55: 219~239
- Myster R W. 1993. Tree invasion and establishment in old field at Huteson Memorial Forest. *The Botanical Review*, 4: 252~272
- Naeem S, Knops J M H, Tilman D, Howe K M, Kennedy T, Gale S. 2000. Plant diversity increases resistance to invasion in the absence of covarying extrinsic factors. *Oikos*, 91(1): 97~108

- Nanako S. and Kohkichi K. 1997. *Biological Invasions: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press. 205
- Nancy P A. 2000. Meeting the invasive species challenge. *Aquatic*, 22(4): 11-12
- Parker I. 1999. Impact: toward a framework for understanding the ecological effects of invaders. *Biol. Invas.*, 1: 3-19
- Parrella M P. 1987. Biology of *Liriomyza*. *Ann. Rev. Entomol.*, 32: 201-224
- Patterson D T. 1995. Weeds in a changing climate. *Weed Science*, 43:685-701
- Peter A A. 1996. Evolution and the consequences of species introductions and deletions. *Ecology*, 77(5): 1321-1328
- Petren K, Bolger D T, Case T J. 1993. Mechanism in the competitive success of an invading sexual gecko over a sexual native. *Science*, 259:354-358
- Petren K, Case T J. 1996. An experimental demonstration of exploitation competition in an ongoing invasion. *Ecology*, 77(1): 118-132
- Petren K, Case T J. 1998. Habitat structure determines competition intensity and invasion success in gecko lizards. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 95: 11739-11744
- Philbrick C T. 1998. Invasion and spread of *Callitriche stagnalis* (Callitricaceae) in North America. *Rhodora*, 100 (901): 25-38
- Picketts T A, Ostfeld R S, Shachak M *et al.* 1997. *The Ecology Basis of Conservation: Heterogeneity, Ecosystem, and Biodiversity*. New York: Chapman and Hall. 202-216
- Pimentel D, Lach L, Zuniga R and Morrison D. 2000. Environmental and economic costs of non-indigenous species in the United States. *BioScience*, 50: 53-65
- Plam M E. 2001. Systematics and the impact of invasive fungi on agriculture in the United States. *BioScience*, 51(2): 141-147
- Planty-Tabacchi A-M, Tabacchi E, Naiman R J, D'eferrari C, Decamps H. 1996. Invasibility of species-rich communities in riparian zones. *Conservation Biology*, 10 (2): 598-607
- Post W M, Pimm S L. 1983. Community assembly and food web stability. *Mathematical Bioscience*, 64(2): 169-182
- Preece R C. 1995. Systematic review of the land snails of Pidaim Islands. *Biological Journal of the Linnean Society*, 56(1-2): 273-280
- Primack R B ed., Ji C J trans. 1996. *An Introduction to Conservation Biology*. Changsha: Hunan Science and Technology Press. 94-95
- Purdy L H, Kendrick E L, Hoffmann J A. 1963. Dwarfbunt of wheat. *Annual Review of Microbiology*, 17: 199-222
- Radford I J, Cousens R D. 2000. Invasiveness and comparative life history traits of exotic and indigenous *Senecio* species in Australia. *Oecologia*, 125: 531-542
- Raejmanek M, Richardson D M. 1996. What attributes make some plant species more invasive? *Ecology*, 77(6): 1655-1661
- Reush T B H. 1998. Native predators contribute to invasion resistance to the non-indigenous bivalve *Musculista senhousia* in Southern California, USA. *Marine Ecology progress Series*, 170: 159-168
- Rhymer J, Simberloff D. 1996. Extinction by hybridization and introgression. *Ann. Rev. Evol. Syst.*, 27:83-109
- Robinson J V, Valentine W D. 1979. The concepts of elasticity, invulnerability and invadability. *Journal of Theoretical Biology*, 81(1): 91-104
- Ruesink J L. 1995. Reducing the risks of nonindigenous species introductions. *BioScience*, 45(7): 465-477
- Saccheri I, Kuussaari M, Kankare M, Vikman P, Fortelius W, Hanski I. 1998. Inbreeding and extinction in a butterfly metapopulation. *Nature*, 392: 491-494
- Sahai K. 1994. Macro- and micromorphology of seed surface of some exotic pine species adapted in Indian Himalayan climate. *Phytomorphology*, 44(1-2): 31-35
- Sakai A K, Allendorf F W, Holt JS. 2001. The population biology of invasive species. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 32: 305-332
- Savidge J A. 1987. Extinction of an island forest avi-fauna by an introduced snake. *Ecology*, 68: 660-668
- Schroeder D. 1992. Biological control of weeds: a review of principle and trends. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27: 191-212
- Sherley G. 2000. Invasive species in the Pacific: a tecial review and draft regional strategy. South Pacific Regional Environmental Programme. 190
- Shine C, Williams N, Gundling L A. 2000. *Guide to Designing Legal and Institutional Frameworks on Alien Invasive Species*. IUCN, Gland, Switzerland Cambridge and Bonn. 138
- Simberloff D, Stiling P. 1996. How risky is biological control? *Ecology*, 77: 1965-1974
- Smith S D, Huxman T E, Zitzer S F, Charlet T N, Housman D C, Coleman J S, Fenstermaker L K, Seemann J R, Nowak R S. 2000. Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in arid ecosystem. *Nature*, 408:79-82
- Spencer K A. 1973. Agromyzidae (Diptera) of economic importance. *Series Entomologica*, 9: 201

- Spencer K A. 1992. Host Speciation in the World Agromyzidae (Diptera). Kluwer Academic Publishers
- Stachowicz J J, Whitlatch R B, Osman R W. 1999. Species diversity and invasion resistance in a marine ecosystem. *Science*, 286: 1577~1579
- Stolzenburg W. 1992. The mussels' message. *Nature Conservancy*, 42:16~23
- Stylinski C D, Alien E B. 1999. Lack of native species recovery following severe exotic disturbance in southern Californian shrublands. *J. Appl. Ecol.*, 36: 544~554
- Suarez A V, Bolger D T, Case T J. 1998. The effect of fragmentation and invasion on the native ant community in coastal southern California. *Ecology*, 79: 2041~2056
- Suarez A V, Richmond J, Case T J. 2000. Prey selection in horned lizards following the invasion of argentine ants in southern California. *Ecological Applications*, 10 (3): 711~725
- Suarez A V, Tsutsui N D, Holway D A, Case T J. 1999. Behavioral and genetic differentiation between native and introduced populations of the Argentine ant. *Biological Invasions*, 1(1): 43~53
- Sutherst, Maywald G F. 1985. A computerised system for matching climates in ecology. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 13: 281~299
- Symstad A J. 2000. A test of the effects of functional group richness and composition on grassland invisibility. *Ecology*, 81(1): 99~109
- Thompson J D. 1991. The biology of an invasive plant: what makes *Spartina anglica* so successful? *BioScience*, 41(6): 393~401
- Thompson J N. 1998. Rapid evolution as an ecological process. *TREE*, 13(8): 329~332
- Thorn R F. 1967. A floor of Santa Catalina Island. *California Aliso*, (6): 1~77
- Tsutsui N D, Suarez A V, Holway D A, Case T J. 2000. Reduced genetic variation and the success of an invasive species. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 97(11): 5948~5953
- Vasseur L, Potvin C. 1998. Natural pasture community response to enriched carbon dioxide atmosphere. *Plant Ecology*, 135:31~41
- Vila M, Dantonio C M. 1998. Hybrid vigor for clonal growth in *Carpobrotus* (Aizoaceae) in coastal California. *Ecological Applications*, 8(4): 1196~1205
- Vitousek P M. 1990. Biological invasions and ecosystem processes: towards and integration of population biology and ecosystem studies. *Oikos*, 57: 7~13
- Vitousek P M. 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. *N. Z. J. Ecol.*, 21: 1~16
- Vitousek P M, Walker L R. 1989. Biological invasion by *Myrica faya* in Hawaii: plant demography, nitrogenfixation, ecosystem effects. *Ecological Monographs*, 59: 247~265
- Vitousek P M, Walker L R, Whiteaker L D. 1987. Biological invasion by *Myrica faya* alters ecosystem development in Hawaii. *Science*, 238: 802~804
- Walker L R, Smith S M. 1997. Impacts of invasive plants on community and ecosystem properties. In: Luken J O, Thieret J W eds. Assessment and management of plant invasions. 59~58
- Wallner W E. 1997. Global gypsy, the moth that gets around. In: Britton K O. eds. Exotic Pests of Eastern Forests. Nashville, TN: Tennessee Exotic Pest Plant Council, USDA Forest Service, 63~70
- Wan F H, Harris P. 1997. Use of risk analysis for screening weed biocontrol agents: *Alica carduorum* Guer. (Chrysomelidae: Coleoptera) from China as a biocontrol agent of *Cirsium arvense* (L.) Scop. in North America. *Biocontrol Science and Technology*, 7:299~308
- Wedin D A, Tilman D. 1996. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands. *Science*, 274: 1720~1723
- Wells J D, Henderson G. 1993. Fire ant predation on native and introduced subterranean termites in the laboratory-effect of high soldier number in *Coptotermes formosanus*. *Ecological Entomology*, 18(3): 270~274
- Wells J D, Kurahashi H. 1997. *Chrysomya megacephala* (Fabr) is more resistant to attack by *Ch. rufifacies* (Macquart) in a laboratory arena than is *Cochliomyia macellaria* (Fabr) (Diptera: Calliphoridae). *Pan-Pacific Entomologist*, 73(1): 16~20
- White P S. 1997. Biodiversity and the exotic species threat. In: Exotic pests of eastern forests. Nashville, TN: Tennessee exotic pest plant council, USDA Forest Service, 1~8
- Wilgen B W V, Siergried W R. 1986. Seed dispersal properties of the three pine species as a determinant of invasive potential. *South Africa Journal of Botany*, 52: 546~548
- Wilgen W V, Richardson D M. 1985. The effects of alien shrub invasions on vegetation structure and fire behavior in South African fynbos shrublands: a simulation study. *J. Appl. Ecol.*, 22: 955~965

- Williamson M H, Fitter A. 1996a. The characters of successful invaders. *Biological Conservation*, 78: 163~170
- Williamson M. 1996. *Biological Invasion*. Chapman & Hall. 244
- Williamson M, Brown K C. 1996. The analysis and modelling of British invasions. *Philos Trans R Soc London B*, 314: 505~522
- Williamson M, Fitter A. 1996b. The varying success of invaders. *Ecology*, 77: 1661~1666
- Wiser S K, Allen R B, Clinton P W, Platt K H. 1998. Community structure and forest invasion by an exotic herb over 23 years. *Ecology*, 79(6): 2071~2081
- Wittenberg R and Cock M J W. 2001. *Invasive Alien Species: A Toolkit of Best Prevention and Management Practices*. Oxon, UK: CAB International, Wallingford. 227
- Xie Y, Li Z Y, William P G, Li D M. 2001. Invasive species in China — an overview. *Biodiversity and Conservation*, 10(8): 1317~1341
- Zalba S, Sonaglioni M I, Compagnoni C A, Belenguer C J. 2000. Using a habitat model to assess the risk of invasion by an exotic plant. *Biological Conservation*, 93: 203~208

第二部分 各 论



第二章 烟 粉 虱

第一节 起源、分布和为害	70	第五节 寄主植物	96
第二节 形态特征和生物学特性	74	第六节 天敌	102
第三节 种下变异：生物型或复合种	78	第七节 抗药性及其治理	106
第四节 B型烟粉虱传播与扩散	90	第八节 预防与综合治理	110

摘要 烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 属同翅目，粉虱科，小粉虱属，广泛分布于全球除南极洲外各大洲的 90 多个国家和地区，是棉花、蔬菜和园林花卉等植物的主要害虫之一。烟粉虱具有多种生物型，其食性广泛，但不同种群之间食性存在差异。我国的烟粉虱是近年外来入侵的 B 型生物种。B 型烟粉虱具有较强的竞争取代能力、寄主范围广和很强的生理适应性。烟粉虱的经济重要性在于其取食植物汁液、分泌蜜露污染植物产品、传播烟粉虱植物病毒并引起植物生理异常。本章详细介绍了烟粉虱的形态特征及生物学习性、不同生物种型的鉴别方法、烟粉虱的抗药性及其治理、预防与综合治理措施等。

关键词 烟粉虱 生物型 分布 寄主 综合治理

Chapter 2 Tobacco Whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius)

Abstract: Tobacco whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius), an important Homopteran insect pest on field and horticultural crops (*i.e.* cotton, vegetables, flowers), has been reported to distribute over 90 countries in the world except Antarctica. It is a highly variable species composed of different biological types. Although *B. tabaci* has a wide range of host plants, specialization in host selection was found in different geographic populations. *B. tabaci* broadly distributed in China was identified as B-type, which is an exotic pest occurring in recent years. Strong capability in replacement of other competitors and physiological adaptability make its invasion into new environmental location successful. Economic impacts of this insect pest consist of its damage to host plant health by sucking plant juice, its pollution to plant products by secreting honeydew, its transmission of plant virus, and its induction of abnormal physiology to host plant. In this chapter, the morphology, biology of the species and identification techniques of its different biological types were introduced in details. Its

pesticide resistance, prevention and IPM strategies were also summarized.

Key words: *Bemisia tabaci* (Gennadius), biological type, distribution, host, IPM

烟粉虱 *Bemisia tabaci*(Gennadius)是热带、亚热带及相邻温带地区主要害虫之一, 南美洲、欧洲、非洲、亚洲、大洋洲的很多国家和地区都有分布(Mound and Halsey, 1978; Brown *et al.*, 1995b; Oliveira *et al.*, 2001)。20 世纪 80 年代以前, 主要是在一些产棉国如苏丹、埃及、印度、巴西、伊朗、土耳其、美国等国家的棉花上造成一定损失。在我国台湾(李凤荪, 1953)、云南(张广学和王林瑶, 1972)也有为害棉花的记录。80 年代以后, 除了棉花, 在蔬菜和花卉上也发现了此虫的为害, 如也门的西瓜、墨西哥的番茄、印度的豆类、日本的花卉一品红等遭受此虫的危害都十分严重。烟粉虱食性杂, 寄主广泛, 通过取食植物汁液、传播病毒和引起植物生理异常造成危害, 是许多大田和温室作物的重要害虫(Oliveira *et al.*, 2001)。在我国, 自 90 年代中后期 B 型烟粉虱侵入以来, 迅速扩散并在许多地区暴发成灾(陈连根, 1997; 罗晨等, 2000; 赵莉等, 2000)。

从 Gennadius 1889 年描述该种到 1985 年近 100 年间, 全世界关于该种的研究文章约为 830 篇; 而从 1985 年到 1998 年的 10 余年间, 关于烟粉虱的研究文章猛增至约 3150 篇, 至 2004 年 2 月, 已增至 6957 篇, 其中全文发表的文献约 5200 篇, 以摘要形式报道的约 1750 篇(Naranjo *et al.*, 2002a; <http://wcr1.uswcl.ars.ag.gov/biblios/wf/wfbiblios.html>)。由此可见, 烟粉虱的发生和为害近 20 年来已引起广泛关注。

第一节 起源、分布和为害

一、起源与分布

烟粉虱属同翅目, 粉虱科, 小粉虱属。首先报道于 1889 年, 在希腊的烟草上发现, 命名为烟粉虱 *Aleyrodes tabaci*(Gennadius, 1889)。烟粉虱由于其形态的变异性, 产生了许多同物异名(见第三节)。因此, *B. tabaci* 有几种常用俗名, 如烟粉虱(tobacco whitefly)、棉粉虱(cotton whitefly)或甘薯粉虱(sweetpotato whitefly)。

虽然烟粉虱最早报道于希腊, 但有关其起源地至今仍只能做大致的推论。Cock(1986)、Gill(1992)根据烟粉虱寄生天敌的丰富度和多样性最高的记录地点, 推论该虫的祖先源于印度半岛或非洲北部到中东地区。依据 B 型烟粉虱较偏好十字花科、茄科植物, 以及特定种群线粒体 16S rDNA 基因序列的初步分析, 推论其源于东半球(Brown *et al.*, 1995b; Frohlich *et al.*, 1999)。另依据线粒体 DNA *COI* 基因序列, 核糖体 *ITS1* 基因序列的比较分析, 推论 B 型烟粉虱是欧亚非大陆的产物, 最有可能起源于干燥的中东-阿拉伯半岛或北非(Frohlich *et al.*, 1999; De Barro and Hart, 2000a)。至今全世界小粉虱属(*Bemisia*)已记录 43 种, 主要分布于欧、亚、非大陆, 其中以俄罗斯南部种类最多, 亚洲大陆亦有分布, 太平洋沿岸的东南亚及非洲均有分布, 然而, 南美洲及美国西部各只有 1 种。也有证据提示, 烟粉虱起源于巴基斯坦或印度, 因为有两个亲缘关系很近的种, 即 *B. capitata* 和 *B. graminosus*, 是印度特有种; 而在巴基斯坦北部和西部, *Bemisia* 属的寄生天敌种类丰富, 故可能是该属的起源中心(Brown *et al.*, 1995b)。

烟粉虱广泛分布于全球除南极洲外各大洲的 90 多个国家和地区(Brown *et al.*, 1995b; De Barro, 1995)。目前, 已是美国、巴西、以色列、埃及、意大利、法国、泰国、印度等国家棉花、蔬菜和园林花卉等植物的主要害虫之一。我国的烟粉虱最早记载于 1949 年(周尧, 1949), 分布于广东、广西、海南、福建、云南、上海、浙江、江西、湖北、四川、陕西、北京、台湾等 13 个省市、自治区(Xu, 1996), 近年在新疆、河北、天津、山东、山西等地也已发现。很长一段时间, 烟粉虱不是我国主要的经济害虫。但近年来, 烟粉虱有暴发之势。据广东省植保站记载, 烟粉虱 1997 年在东莞发生, 并逐年加重, 至 2000 年不少地区大发生。1998 年有关人员在乌鲁木齐市的一品红上发现烟粉虱, 随后在石河子、哈密、库尔勒、克拉玛依等地花卉上都采到此虫。在北京, 烟粉虱对黄瓜、番茄、茄子、甜瓜和西葫芦的危害损失, 严重时可达七成以上(罗晨等, 2000)。

二、经济重要性

(一) 为害方式

烟粉虱主要以 3 种方式为害作物: ①取食植物汁液, 分泌蜜露污染植物产品; ②传播植物病毒; ③引起植物生理异常。

1. 取食汁液

烟粉虱若虫、成虫均刺吸植物韧皮部的汁液。由于其发育快、繁殖力高, 往往在较短时间内种群就可达到很高密度, 从而吸取大量的汁液, 导致植物衰弱; 同时若虫、成虫还分泌蜜露, 污染植物器官和产品, 诱发煤污病的发生, 使植物光合作用受阻(Oliveira *et al.*, 2001)。棉花受害后, 叶正面出现褪色斑, 受害重时成片黄斑出现, 导致蕾铃脱落, 蜜露诱发煤污病, 严重影响棉花产量和纤维质量。甘蓝、花椰菜受害后, 叶片萎缩、黄化直至枯萎。萝卜受害后, 根茎白化、无味、重量减轻。一品红受害后, 出现白茎、黄叶及落叶。

2. 传播病毒

烟粉虱是许多病毒病的重要传毒介体, 尤以传播双生病毒组(Geminivirus)的病毒最甚, 传毒种类多达 40 余种(Oliveira *et al.*, 2001)。该虫在葫芦科、豆科、大戟科、锦葵科及茄科上, 最易传播双生病毒(Bedford *et al.*, 1994)。双生病毒侵染植物的主要症状: 感病后植株可矮化、黄化、褪绿、斑驳及卷叶; 有的作物叶片变小, 叶面皱缩, 中部稍凸起, 边缘向下或向上卷曲; 叶可缩成球状等(图 2-1 左)。不同植物及不同品种抗烟粉虱传病毒病能力不同。有些植物表现无症状带毒。其次传播长线形病毒组、香石竹病毒组和马铃薯病毒组的病毒; 此外还可传播其他病毒组的病毒。这些病毒病可引致植物叶片卷曲、植株黄化或矮化和果实败育, 损失惨重(冯兰香等, 2001)。

烟粉虱大暴发后不久, 它所传播的病毒病就会随之大发生(Bedford *et al.*, 1994)。B 生物型传到亚热带美洲 2~4 年间, 烟粉虱传播的双生病毒开始在十字花科和大戟科作物上流行, 而在这以前这两类作物被认为不是 WFT 双生病毒的寄主。1987~1994 年,

WFT 双生病毒流行于整个加勒比海、中美洲、东加勒比海、墨西哥和美国。在一些情况下,某些种群不能传播所有的 WFT 双生病毒。最具决定性的因素是有的烟粉虱生物型不能在病毒寄主植物上取食,而不是病毒与媒介之间不相容。例如,细裂珊瑚油桐 *Jatropha gossypifolia* 嵌纹病毒(JMV)在自然状态下由 *Jatropha* 生物型从一株细裂珊瑚油桐传到另一株细裂珊瑚油桐上,而在室内通过病毒 DNA biolistic 接种手段传到豆类植物上,结果 A、B 生物型都能从豆类传到豆类上。这些结果证明,烟粉虱与寄主的相互作用在植物双生病毒传播上起主要作用。当在烟粉虱生物型或种的问题上做结论时,不仅应该考虑某些种群在寄主植物上的特异性,还应考虑烟粉虱是 WFT 双生病毒的专一昆虫媒介。

烟粉虱能传播的双生病毒及其病毒的起源如下:大戟花叶病毒(euphorbia mosaic virus),北美;棉花皱叶病毒(cotton leaf crumple virus),北美;番茄花叶病毒(tomato mottle virus),北美;西瓜卷叶斑驳病毒(watermelon curly mottle virus),北美;西番莲花叶病毒(Passiflora leaf mottle virus),波多黎各;大豆杂色花叶病毒(bean calico mosaic virus),中美洲;番茄黄化花叶病毒(tomato yellow mosaic virus),南美洲;番茄金色花叶病毒(tomato golden mosaic virus),南美洲;菜豆矮化花叶病毒(bean dwarf mosaic virus),南美洲;马铃薯黄化花叶病毒(potato yellow mosaic virus),南美洲;番茄黄化卷叶病毒(tomato yellw leaf curl virus),中美洲、非洲、亚洲、也门、澳大利亚;番茄卷叶病毒(tomato leaf curl virus),地中海地区国家、日本、苏丹、印度;烟草卷叶病毒(tobacco leaf curl virus),澳大利亚;西瓜褪绿僵化病毒(watermelon chlorotic stunt virus),亚洲、也门、肯尼亚;大豆皱叶病毒(Soybean crinkle leaf virus),亚洲;鹰嘴豆黄化花叶病毒(horsegram yellow mosaic virus),亚洲;羽扇豆卷叶病毒(Lupin leaf curl virus),印度;印度木薯花叶病毒(Indian cassava mosaic virus),印度;非洲木薯花叶病毒(African cassava mosaic virus),非洲;棉花卷叶病毒(cotton leaf curl virus),苏丹、巴基斯坦。

3. 引起植物生理异常

烟粉虱若虫取食可导致多种植物生理异常现象。番茄严重受害后,表现出不规则地成熟,主要症状包括表皮颜色淡化或有条纹,有时表皮颜色正常,内部组织白化、硬化而未成熟(Schuster *et al.*, 1990)。另一种典型症状是葫芦科植物受害后,叶片上表皮与下面的叶片细胞产生脱离,所产生的夹层内空气反光,从而产生银叶现象(图 2-1 右),导致植物变白,植物产品质量下降(Segarra-Carmona *et al.*, 1990; Yokomi *et al.*, 1990)。另还有多种烟粉虱危害导致的植物生理异常现象,如莴苣叶片黄化和茎秆分枝、胡萝卜根茎重量减轻、青椒有条纹斑、甘蓝茎秆白化及许多植物新叶的萎黄等。有趣的是,常常每株植物只需少量(最少 5~10 头)若虫取食就可导致生理异常,而成虫的取食往往不导致这些生理异常现象(Costa *et al.*, 1993c)。

(二) 近年危害概况

烟粉虱已在全球各地造成极大的经济损失。1985 年后期在美国、加勒比海、欧洲的温室花卉上发生前所未有的烟粉虱的危害,被定为烟粉虱的 B 生物型。世界各地的危害现状大致如下:



图 2-1 B 型烟粉虱危害状

B 型烟粉虱危害西葫芦引起的银叶状(左); B 型烟粉虱传播的番茄双生病毒病症状(右)

美洲: 美国的昆虫学家认为 B 型烟粉虱在 20 世纪 80 年代中期侵入该国后, 使佛罗里达中南部的一品红生产遭到了沉重的打击, 以后危及到蔬菜作物。1991 年、1992 年该虫在加利福尼亚、佛罗里达、德克萨斯等州大暴发, 每年危害所造成的损失估计分别达 2 亿和 5 亿美元; 仅在加利福尼亚的 Imperial Valley 地区, 1991~1995 年每年该虫危害所造成的损失估计超过 1 亿美元; 在亚利桑那、加利福尼亚和得克萨斯州, 1994~1998 年棉农用于防治该虫危害的费用就达 1.539 亿美元, 成为美国中南部露地蔬菜、棉花和北部温室蔬菜、花卉中的主要害虫(Oliveira *et al.*, 2001)。不过近年来猖獗程度有所下降(Ellsworth *et al.*, 2001)。另外, 在美国北部加拿大的温室中也有发生。美洲南部地区, 以巴西为例, 1996 年调查仅发生在 5 个州, 到 1998 年间的一年半时间内, 已发展到 14 个州, 所造成的损失达 1 亿美元。

大洋洲: 澳大利亚 1994 年首次报道了 B 型烟粉虱的大发生。该国学者认为 B 型烟粉虱是从美国传入的, 现已是澳大利亚苗木产业和园艺花卉产业上的重要害虫(Gunning *et al.*, 1995)。在澳洲的棉花上, 除了 B 型烟粉虱外, 还有一种本地型烟粉虱, 两者共同存在, 但两者的竞争使 B 型烟粉虱的种群数量有所下降(De Barro and Hart, 2000)。

欧洲和非洲: 在欧洲中南部的田间和北部的温室发生。20 世纪 90 年代, 在西班牙严重危害一品红和蔬菜(Camero *et al.*, 1990)。目前烟粉虱 B 型和该国的烟粉虱 Q 型和 S 型同时存在, 其中 Q 型在西班牙南部仍然是优势种群, 由它传播的病毒病已使一些地区的番茄无法种植(Guirao *et al.*, 1997)。苏丹、贝宁、尼日利亚等都报道了烟粉虱的发生, 但大都是非 B 型, 危害并不严重。仅南非报道了 B 型烟粉虱的暴发危害(Bedford *et al.*, 1992)。

亚洲: 在巴基斯坦, K 型与 B 型烟粉虱共同危害, 但仍以本土的 K 型种群为优势种群, 由它引起的病毒病对本国的棉花生产造成了更大的威胁。以色列也报道了 B 型烟粉虱的发生(Horowitz, *et al.*, 1994, 2002)。

中国: 2000 年 8 月 29 日和 9 月 18 日人民日报(网络版)相继发表了题为“白粉虱成虫肆虐廊坊任丘规模之大实属历史罕见”和“天津: 空中飘着‘白粉虱’”两篇文章。前文称 8 月 14 日任丘及廊坊两市农村同时出现成团成团的白粉虱成虫乱飞乱撞现象, 黄瓜每单叶有白粉虱成虫 250~300 头, 茄子每单叶 40~400 头。后文报道了 9 月中旬天津市民发现走路时迎面飘来很多白色粉尘, 经有关部门解释说明这些白色飘浮物并非粉尘,

不属于“工业污染”，而是白粉虱。经专家鉴定，在我国北方大发生的是烟粉虱 *B. tabaci*。因为温室粉虱和烟粉虱成虫的翅上都覆盖着白色蜡粉，人们如不仔细观察，极易混淆。

温室粉虱和烟粉虱作为两个不同的种，对农业生产的危害和自身种群的增长至少有三点明显的不同：①烟粉虱的寄主范围更广。温室粉虱基本不为害十字花科蔬菜和棉花等大田作物，而烟粉虱则对甘蓝、花椰菜等十字花科蔬菜和棉花等大田作物能造成严重危害。②烟粉虱传播植物病毒能力强。据不完全统计，烟粉虱能传播 30 种植物上的 70 多种病毒病，而未见温室粉虱的有关报道。③烟粉虱的适应性更强。烟粉虱原产热带、亚热带地区，适应沙漠性气候，能忍受 40℃ 以上高温。据报道，温室粉虱在 33℃ 时单雌平均产卵量由 18℃ 时的 319.5 粒降到 5.5 粒，至 9℃ 时停止产卵。而烟粉虱在 32.2℃ 时单雌产卵量仍可达 72 粒，至 14.9℃ 时停止产卵。分析华北地区近年来夏季高温干旱有利于烟粉虱种群的增长，而冬季温室大棚等保护地迅速发展则提供了它的越冬场所。连年粉虱种群数量的累积导致 2000 年该虫大暴发(张芝利, 2000)。

近年来，烟粉虱已扩散到全国 22 个省市自治区，并且正不断扩散到更多的地区。经 DNA 技术分析鉴定，近年在我国大陆大发生的是 B 型烟粉虱(罗晨等, 2002; Wu *et al.*, 2002, 2003)。在我国台湾省，已记录的烟粉虱寄主植物至 2001 年达 45 属 158 种，在多种农作物上造成严重危害(柯俊成等, 2002)。烟粉虱在我国部分地区不仅对蔬菜和花卉为害严重，而且对经济作物棉花的生产构成了严重威胁。

第二节 形态特征和生物学特性

一、形态特征

烟粉虱的生活周期有卵、4 个若虫期和成虫期，通常将第 4 龄若虫称伪蛹。

(一) 卵

烟粉虱成虫只在自身羽化的叶片上产少量卵就转移到更新的叶片上。卵不规则散产在叶背面(少见叶正面)。卵椭圆形，有光泽，长×宽约 0.21mm×0.096mm，有小柄，长梨形，与叶面垂直。卵柄通过产卵器插入叶表裂缝中。卵柄除了有附着作用外，在授精时，卵柄充满原生质，有导入精子的作用。受精后，原生质萎缩，卵柄为一空管。卵柄周围有一些胶体物质，水分通过胶体物质进入卵中(Gammeel, 1974)。卵初产时淡黄绿色，孵化前颜色加深，至深褐色。

(二) 1~3 龄若虫

一龄若虫椭圆形，长×宽约 0.27mm×0.14mm，有 3 对发达各有 4 节的足和 1 对 3 节的触角，体腹部平、背部微隆起，淡绿色至黄色，腹部透过表皮可见两个黄点(mycetome)。Mycetome 中常有几种内共生菌，在营养生理上起重要作用。在孵化时身体半弯，直到前足能抓住叶片，脱离废弃的卵壳。一般在叶上爬行几厘米寻找合适的取食点，也可爬行到同一植株的其他叶片上。在叶背将口针插入到韧皮部取食汁液。开始取食后，大多 2~3 天脱皮进入二龄。一龄若虫只要成功取食合适寄主的汁液，就固定在原位直到成虫羽化。一龄若虫的死亡率与植物表皮的厚度和营养因素有关。Byrne 和

Draeger(1989)比较了烟粉虱取食莴苣嫩叶期(5片叶)和成熟期(>25片叶)叶片的成活率,发现在成熟莴苣上烟粉虱的死亡率为100%,而在嫩叶期莴苣上其死亡率只有58.3%。

在二龄、三龄时,烟粉虱的足和触角退化至只有一节(Gerling, 1990),在体缘分泌蜡质,蜡质有帮其附着在叶上的作用。体椭圆形,腹部平、背部微隆起,淡绿色至黄色,二、三龄体长分别约为0.36mm和0.50mm。

(三) 4龄若虫(伪蛹)

在文献中,粉虱的4龄若虫常称之为伪蛹。这种称谓暗示,粉虱的变态与其他同翅目昆虫不一,类似于全变态,故一直存在争议。Nechols和Tauber(1977)对温室白粉虱的变态进行了讨论,认为其4龄期存在3个形态上不同的亚龄期:前期扁平、半透明,据Gill(1990)报道,可取食;中期虫体变厚,渐成奶白色、不透明,体背和四周长出蜡质刺状突起,在此期表皮与真皮开始发生解离(apolysis);后期形成成虫的雏形,双眼红色,体黄色,完成表皮与真皮的解离,成虫表皮形成。不过,详细的组织学观察表明,在最后的若虫期与成虫期之间并未有一个明显的虫态(Brown *et al.*, 1995b)。Brown等(1995b)建议,可将第4龄后期,即皮层解离完成后的不取食阶段称之为“蛹”,而仍将整个末龄虫态称为4龄若虫。烟粉虱的4龄若虫的变态过程与温室白粉虱的类似,为描述方便,本文仍沿用“4龄若虫”、“伪蛹”两种称谓。

伪蛹蛹壳特征是粉虱分类的主要依据,主要包括管状孔(vasiform orifice)、尾脊(caudal ridges)、亚背盘刚毛(subdorsal setae)、瘤状突起(tubercles)(图2-2中)等。

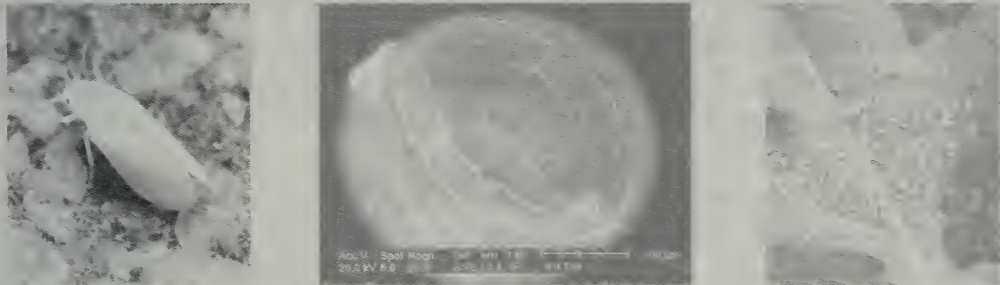


图2-2 B型烟粉虱

成虫及若虫(左);伪蛹(中);西葫芦上的B型烟粉虱,示聚集为害及分泌的蜜露(右)

烟粉虱伪蛹蛹壳黄色,长0.6~0.9mm,有2根尾刚毛,背面有1~7对粗壮的刚毛或无毛。管状孔三角形,长大于宽,孔后端有小瘤状突起,孔内缘具不规则齿。盖瓣半圆形,覆盖孔口约1/2,舌状器明显伸出于盖瓣之外,呈长匙形,末端具2根刚毛,腹沟清楚,由管状孔后通向腹末,其宽度前后相近(图2-2中)。

值得注意的是,烟粉虱不同种群间蛹壳形态变异较大,这种变异往往与所在寄主植物相联系。在有茸毛的植物叶片上,多数蛹壳背部具刚毛;而在光滑的植物叶片上,则多数无刚毛。其他还有虫体大小及边缘不规则等方面的差异。

(四) 成虫

烟粉虱的成虫体黄色,翅白色无斑点,体长♂:0.85mm、♀:0.91mm左右(图2-2左)。

在恒温 29.5℃、光照 14:10h 条件下, 90%以上蛹能羽化为成虫。绝大多数在光期羽化, 很少在黑暗中羽化, 温度波动时羽化高峰延迟。成虫幼嫩阶段在 27℃ 时约 4h。夏天, 成虫羽化后 1~8h 内交配。秋天、春天羽化后 3d 内交配。成虫可在植株内或植株间作短距离扩散, 也可借风或气流作长距离迁移(Cohen,1990)。雌虫利用视觉信息如植物色泽, 搜索并降落在一株植物上, 然后爬行或飞至叶片背面, 将口器试插并吸取少量汁液, 通过口器端部及口中的化学感受器来感受叶片的化学成分, 测试植物的适合性。若觉得植物适合, 雌虫则将口针从试插处插入到韧皮部, 然后边取食边产卵。

烟粉虱一般可存活 10~24d, 产卵 66~300 粒。产卵量依温度、寄主植物和地理种群不同而异。在棉花上每头产卵 48~394 粒(Azab *et al.*, 1971)。Bulter 等(1983)报道, 在 7 月、8 月份平均温度 28.5℃ 的条件下, 烟粉虱平均每头产卵 252 粒; 在 10 月、11 月份平均温度 22.7℃ 的条件下, 平均产卵 204 粒; 在 12 月、1 月份平均温度 14.3℃ 的条件下, 平均产卵 61 粒。在美国亚利桑那州, 棉花上的烟粉虱在恒温和光照条件下, 低于 14.9℃ 时不产卵, 在 26.7℃ 产卵 81 粒/头, 在 32.2℃ 产卵 72 粒/头; 在苏丹的棉田中, 烟粉虱秋初平均产 160.4 粒/头(Gammeel, 1974); 在印度的棉花上, 平均每头产卵 43 粒。Avidov(1956)报道烟粉虱在茄子上每头大约产 50 粒。Von Arx 等(1983)报道苏丹品系的繁殖力平均每头产 127.5 粒; 而 Dittrich 等(1985)却发现该品系在棉花上的繁殖力高达 344 粒/头。

(五) 烟粉虱与温室粉虱的区别

1976 年, 温室粉虱在北京地区大暴发以来, 我国北方均以温室粉虱为害为主。近年来, 粉虱种群数量出现了明显的变化。有关研究表明, 近年在北京地区的蔬菜、花卉及一些经济作物暴发为害的粉虱通过制片镜检均为烟粉虱(罗晨等, 2000)。当前, 温室粉虱和烟粉虱在我国北方地区设施蔬菜中常混合发生, 在形态上, 两者的主要区别如表 2-1(吴杏霞和胡敦孝, 2000)。

表 2-1 烟粉虱和温室粉虱的识别特征

		烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i>	温室粉虱 <i>Trialeurodes vaporariorum</i>
产卵习性		卵散产	在光滑叶片上, 卵成半圆形或圆形排列, 在多毛叶片上卵散产
卵		卵在孵化前呈琥珀色, 不变黑	卵初产时淡黄色, 孵化前变为黑褐色
伪 蛹	解剖 镜 观 察	(1) 蛹淡绿色或黄色, 0.6~0.9mm (2) 蛹壳边缘扁薄或自然下陷, 无周缘蜡丝 (3) 胸气门和尾气门外常有蜡缘饰, 在胸气门处呈左右对称 (4) 蛹背蜡丝有无常随寄主而异	(1) 蛹白色至淡绿色, 半透明, 0.7~0.8mm (2) 蛹壳边缘厚, 蛋糕状, 周缘排列有均匀发亮的细小蜡丝 (3) 蛹背面通常有发达的直立蜡丝, 有时随寄主而异
	制 片 镜 检	(1) 瓶形孔长三角形, 舌状突长, 匙状, 顶部三角形, 具一对刚毛 (2) 管状肛门孔后端有 5~7 个瘤状突起	(1) 瓶形孔长心脏形, 舌状突短, 上有小瘤状突起, 轮廓呈三叶草状, 顶端有一对刚毛 (2) 亚缘体周边单列分布有 60 多个小乳突, 背盘区还对称有 4~5 对较大的圆锥形大乳突(第四腹节乳突有时缺)
成虫		(1) 雌虫体长 0.91±0.04mm, 翅展 2.13±0.06mm (2) 雄虫体长 0.85±0.05mm, 翅展 1.81±0.06mm。虫体淡黄白色到白色, 前翅脉一条不分叉, 左右翅合拢呈屋脊状	(1) 雌虫体长 1.06±0.04mm, 翅展 2.65±0.12mm (2) 雄虫体长 0.99±0.03mm, 翅展 2.41±0.06mm。虫体黄色, 前翅脉有分叉, 左右翅合拢平坦 (3) 当与其他粉虱混合发生时, 多分布于高位嫩叶

二、生物学特性

(一) 生活史

如上所述,烟粉虱一生经历卵、4龄若虫、成虫3个阶段。成虫营产雄孤雌生殖,即受精卵为二倍体,发育成雌虫,未受精卵为单倍体,发育成雄虫。通常情况下,正常交配授精的雌虫产下雄性和雌性子代,而未交配、或未能成功交配授精的雌虫产下的子代均为雄性。

烟粉虱主要在热带、亚热带及相邻的温带地区发生。在适宜的气候条件下,一年发生11~15代,世代重叠。

(二) 寄主范围和生物型

烟粉虱作为一个复合种,其寄主范围是相当广泛的。Mound和Halsey(1978)列出了300多种寄主植物,Greathead(1986)报道为72科420种。最近几年的文献一般认为已记载的寄主植物已超过500种(Brown *et al.*, 1995b; Naranjo and Ellsworth, 2001)或超过600种(Oliveira *et al.*, 2001),但并未见具体的清单。柯俊成等(2002)具体列出了烟粉虱在中国台湾的寄主植物共36科148种,而有关该虫在中国大陆的寄主植物种类尚未有完整记录。

烟粉虱寄主植物广泛,在这些植物类群中,其较嗜好的包括豆科、菊科、锦葵科、茄科以及大戟科等;已记录的寄主植物中,最多的为豆科,达99种,而秋海棠科Begoniaceae、千屈菜科Lythraceae、蒺藜科Zygophyllaceae仅1种(Oliveira *et al.*, 2001)。

尽管烟粉虱作为一个复合种寄主广泛,但该复合种下种群间寄主范围有很大差异。现许多报道都表明,B生物型是多食性的,但也有许多寡食性、单食性的种群,且相互关系错综复杂。为了描述的方便,许多学者常以寄主关系来命名种群,即寄主型。例如,Bird(1957,引自Perring, 2001)在波多黎各发现2个种群寄主范围明显不同:其中一个种群寄主范围广,包括黄花稔属*Sida*中一些种,且是当地多种双生病毒的有效媒介;而另一种群则基本上只在常见杂草细裂珊瑚油桐上发现,并仅能在此杂草上传播嵌纹病毒。据此,Bird即将这两个种群分别称之为*Sida*寄主型、*Jatropha*寄主型。另一典型例证是非洲栽培木薯*Manihot esculenta*上的烟粉虱。非洲的木薯是从巴西引入的。在巴西,烟粉虱寄主范围广泛,但却不能在木薯上建立种群(Costa and Russell, 1975);而在非洲,烟粉虱很容易在木薯上建立种群,且食性窄,主要取食木薯。当巴西的木薯栽培种引入非洲栽培后,很快受到烟粉虱的为害,并被其所传播的非洲木薯嵌纹病毒严重危害,导致严重损失(Robertson, 1987)。最近Lisha等(2003)报道,在印度田间红薯上采集、用红薯饲养的烟粉虱品系不能在木薯上存活;而在田间木薯上采集、用木薯饲养的烟粉虱品系却不能在红薯上存活;木薯品系能传播木薯花叶病毒,而红薯品系却不能;不过两个品系均可在茄子、烟草上存活繁殖。

烟粉虱寄主范围如此广泛,而其在不同寄主植物上的不同种群在寄主范围上又表现出如此复杂的专化现象,表明其不同种群间在生物学特征上存在复杂、明显的差异,即这一复合种下无疑存在许多生物型。下一节将详细讨论烟粉虱的种下变异。

第三节 种下变异：生物型或复合种

一、分类历史及同物异名

烟粉虱最初报道于 1889 年,在希腊的烟草上采得的白粉虱,命名为烟粉虱 *Aleyrodes tabaci*(Gennadius, 1889)。此后的 100 多年中,烟粉虱的分类经历了多个曲折的过程,目前仍在困扰昆虫学家(Perring, 2001)。1900 年,在美国东南部的一种酸浆 *Physalis alkekengi* 上采得一种白粉虱,命名为 *Aleyrodes inconspicua* Quaintance(Perring, 2001)。1914 年,Quaintance 和 Baker 将该种移到一个新属,即 *Bemisia* 属,命名为 *Bemisia inconspicua*(Quaintance),并立为这个属的模式种。有趣的是,Quaintance 和 Baker 未把希腊的 *Aleyrodes tabaci* 归到 *Bemisia* 属,原因是认为最初的描述不够详细。从 1914~1964 年的 50 年间,有 14 个国家在不同植物上共又报道了 19 种白粉虱,后来都认为是 *Bemisia tabaci* 的同物异名(Perring, 2001)。在此过程中,最有意义的工作要数 Takahashi(Perring, 2001)将 *Aleyrodes tabaci* 归到 *Bemisia* 属,从而得到 *Bemisia tabaci* 这个种名,并沿用至今。

在上述过程中,粉虱分类学家也注意到用于分种的许多形态特征有较多的重叠,一些学者多次进行同物异名的研究,其中最有影响的是 Russell(Perring, 2001)将此前所报道的 9 个种都确定为 *B. tabaci* 的同物异名。

由于粉虱科昆虫成虫形态特征变异较小,而在 4 龄若虫(伪蛹)期形态特征变异更为明显,伪蛹的形态就成为粉虱科昆虫在族、属和种的水平上分类所采用的主要特征。然而,同一种粉虱的伪蛹形态常有较大变异,尤其是随所取食寄主植物的不同而改变(阎凤鸣, 1991; Mound, 1978; Perring, 2001)。这种与寄主植物相联系的形态变异为整理同物异名提供了客观的证据,到 1978 年, Mound 和 Halsey(1978)将原报道的 22 个种都归属为 *Bemisia tabaci* 的同物异名。

随着早期报道的许多种白粉虱都归属为 *Bemisia tabaci* 的同物异名,所有与这些种有关的生物学信息也都归属到这一个种下。这就使得针对烟粉虱所记载的寄主植物种类大大增加、地理分布区扩大,其与植物病毒的媒介关系也变得更为复杂(Brown *et al.*, 1995b; Perring, 2001)。

二、烟粉虱生物型的研究方法

Perring(2001)将有关烟粉虱种下变异研究文献做了全面的归纳和分析(表 2-2)。现参照该文简述有关研究方法。

(一) 形态特征

目前用于鉴定烟粉虱的主要形态特征包括体缘形状、胸气门摺(thoracic tracheal fold)的构造、位于管状孔内之舌状突起、管状孔盖瓣的形状及背盘孔、小孔、背刚毛(dorsal setae)的有无等。不同生物型在形态上尽管基本一致,但也可表现出一定差异。例如 Bellows 等(1994)报道, B 型烟粉虱与 A 型相比,缺乏体前缘亚缘区刚毛 ASMS4,胸气门摺、体前缘蜡缘的宽度不同。Rosell 等(1997)亦证实, ASMS4 缺乏是 B 型及与之亲缘关系较近的 N 型的特征。

表 2-2 已报道的烟粉虱生物型及鉴定技术(据 Perring, 2001)

生物型	国家(地区)	形态	银叶反应	寄主范围	生物学	杂交	病毒	生化	酯酶	其他同工酶	RAPD	DNA
A	墨西哥(Sinaloa)	*	*			*			***	*		**
A	墨西哥(Sonora)		*						**			
A	哥伦比亚										*	*
A	美国(Arizona)	**	*****	*	**	*	***	*	*****	**	**	***
A	美国(California)	**	*	*	**	*			*****	****	**	***
AN	澳大利亚 (North Territory)		*			*			*		*	*
AN	澳大利亚(New South Wales)		*								*	*
AN	澳大利亚 (Queensland)		*			*			*		*	*
AN	纽埃岛										*	
AN	巴布新几内亚										*	
AN	所罗门群岛										*	
AN	瓦努阿图										*	
B	美属萨摩亚										*	
B	安提瓜岛	*	*****				**		*****	*		
B	澳大利亚(North Territory)								*		*	
B	澳大利亚(New South Wales)								*		*	
B	澳大利亚 (Queensland)		*			*			*		*	**
B	澳大利亚 (Tasmania)								*			
B	奥地利								*			
B	贝里斯		*						**			
B	巴西		*						***			*
B	加拿大 (Nova Scotia)								**	*		
B	加那利群岛								*			
B	库克群岛										**	
B	塞浦路斯		***			*	**	*	***	*		
B	丹麦								*		*	
B	多米尼加		**						***			
B	埃及		*						*			

续表

生物型	国家(地区)	形态	银叶反应	寄主范围	生物学	杂交	病毒	生化	酯酶	其他同工酶	RAPD	DNA
B	斐济										*	
B	法国								*		*	
B	玻利尼西亚										*	
B	法属西印度群岛		*						*			
B	格林纳达								**			
B	加勒比群岛								***			
B	关岛										*	
B	危地马拉								**			
B	洪都拉斯								*			
B	伊朗											*
B	以色列		***			**	**	**	****	*	**	****
B	意大利										*	
B	日本								**	*	*	*
B	约旦		*						*			
B	巴基斯坦		*						*			
B	土耳其		*									
B	韩国											**
B	中国台湾										**	
B	马绍尔群岛										*	
B	墨西哥 (Quintana Roo)								**			
B	墨西哥(Sonora)		****						***			
B	哥伦比亚										*	*
B	巴西										*	
B	北马里亚纳群岛										*	
B	荷兰								*	*	**	
B	新喀里多尼亚										*	
B	尼加拉瓜		*						*			
B	纽埃岛										*	
B	巴拿马		*						**			
B	波兰								*			
B	波多黎各		**						***			
B	南非		***				**		***	*		
B	毛里求斯								*			
B	西班牙		*						*	**	**	

续表

生物型	国家(地区)	形态	银叶反应	寄主范围	生物学	杂交	病毒	生化	酯酶	其他同工酶	RAPD	DNA
B	圣基茨岛								*			
B	苏丹							*				*
B	多巴哥岛								*			
B	特立尼达岛								*			
B	英国						*	*	*			
B	美国(Arizona)	**	*****	*	**	*	**	*	*****	**	**	***
B	美国(California)	**	*****	**	**	*	**		*****	****	**	**
B	美国(Florida)	**	*****				**		*****	**	*	**
B	美国(Georgia)								*		*	
B	美国(Hawaii)		**						**			
B	美国(Mississippi)										*	
B	美国(New York)		*						**			
B	美国(Tennessee)								**			
B	美国(Texas)		*						***			*
B	也门		*				*		*			
B2	也门	**	**	*		*	*		**	*		*
C	哥斯达黎加		**						***		*	**
Cassava	科特迪瓦		*						*			
D	尼加拉瓜	*	****	*		*	**		****	*		
E	贝宁	**	**	**			***	*	***	**		**
F	危地马拉		*						*			
G	危地马拉	*	**				**		**	*		
G/H	印度(Kerala)	*	***	*	*		**		***		*	***
H	印度(Gujarat)								*		*	**
I	印度(Maharashtra)								*			
J	尼日利亚		***				***		**	*		*
K	巴基斯坦	**	*****	*		*	**	*	***	*	**	**
L	苏丹	**	**	*		*	**	**	****	*	*	***
M	土耳其	*	***			*	**		***	*	*	*
N	波多黎各	*	*	*			*		*			***
N	加勒比群岛								*			
NA	美属萨摩亚										*	
NA	密克罗尼西亚联邦										*	
NA	斐济										*	

续表

生物型	国家(地区)	形态	银叶反应	寄主范围	生物学	杂交	病毒	生化	酯酶	其他同工酶	RAPD	DNA
NA	关岛										*	
NA	基里巴斯										*	
NA	马绍尔群岛										*	
NA	北马利安那岛										*	
NA	瑙鲁岛										**	*
NA	纽埃岛										*	
NA	帕劳群岛										*	
NA	汤加群岛										*	
NA	图瓦卢										*	
NA	西萨摩亚										*	
Okra	科特迪瓦		*						*			
P	尼泊尔		*						*	*		*
Q	西班牙		* *						*	*	**	*
R	哥伦比亚								*			*
S	西班牙								*		*	**
O	波多黎各		*						*	*		**
?	孟加拉国											*
?	哥伦比亚								**			
?	埃及											*
?	海南岛										*	**
?	以色列								*			
?	日本											**
?	韩国											***
?	尼泊尔											*
?	新西兰										*	
?	巴基斯坦										**	*
?	葡萄牙								*		*	
?	西班牙		*						*		*	*
?	斯里兰卡											*
?	中国台湾											*
?	泰国											*
?	土耳其										*	
?	乌干达											*

注:表中1个“*”表示有一篇文献报道,两个“*”号表示有两篇报道,依次类推。

(二) 银叶反应

B 型烟粉虱若虫取食葫芦科植物, 可导致叶片反光呈白色, 即所谓的银叶反应(见图 2-1 右)。而非 B 型烟粉虱取食则不导致银叶反应。至少有来自 20 个生物型的近 50 个种群用银叶反应测试过(表 2-2)。迄今为止, 银叶反应是区别 B 型与非 B 型最可靠的一种方法(Perring, 2001)。

(三) 寄主范围

虽然烟粉虱作为一个复合种其寄主范围是十分广泛的, 但种群之间表现出复杂的寄主专化现象(见本章第二节)。事实上, 烟粉虱生物型的研究最早始于寄主型的探讨。迄今为止, 已对来自 10 个生物型的 13 个种群做了较详细地寄主范围比较(表 2-2)。

(四) 生物学特征

包括发育历期、存活率、产卵量、个体大小、对温度等因子的适应能力等方面的比较。不同生物型之间这方面的详细比较研究尚不多(表 2-2)。

(五) 杂交

生殖隔离是生物种定义中最基本的一个参数。由于烟粉虱营产雄孤雌生殖, 不同种群间杂交能否产生具有生殖能力的雌性子代及其数量就成为判断种群间基因能否交流的指标。至 2001 年, 至少对 8 个生物型的 15 个种群曾做过杂交试验(表 2-2)、B 型与多个非 B 型之间生殖上基本或完全隔离(Perring *et al.*, 1993; Bellows *et al.*, 1994; De Barro and Hart, 2000)。

(六) 与植物病毒的关系

烟粉虱能有效地传播多种病毒, 尤其是双生病毒, 但不同种群传播病毒的能力、与病毒的关系常表现出明显差异(见本章第一节)。至 2001 年, 已对来源于 13 个生物型的 21 个种群的传毒能力进行了比较(表 2-2)。

(七) 生物化学

这主要包括对不同杀虫剂抗性的生化机理, 如乙酰胆碱酯酶的比较等(表 2-2)。

(八) 酯酶分析

在烟粉虱的研究中发现, 普通酯酶(EST, esterase)标记法在区分生物型及与寄主相关的种群上发挥着重要作用(Wool *et al.*, 1989; Burban *et al.*, 1992)。Prabhaker 等(1985)描述了利用普通酯酶电泳图来区别 3 种粉虱。Wool 等(1989)利用蛋白质多态性分析烟粉虱不同种群, 他们用普通酯酶(EST)电泳图区分了哥伦比亚和以色列的烟粉虱种群。Costa 和 Brown(1991)以酯酶的 PAGE 电泳图区分了美国为害南瓜和棉花的种群, 它们分别代表了烟粉虱的 A 型和 B 型。此后, Brown 等(1994)用普通酯酶标记检测已知有明显生物学特

性的生物型,观察到至少 15 种 EST 图像,从而建立了烟粉虱生物型的分类基础:与美国棉花烟粉虱酯酶谱带相同的作为烟粉虱 A 型;与 B 型烟粉虱带型一致的作为 B 型,其他的既非 A 又非 B 的烟粉虱根据酯酶带型的差异依次命名为 C~Q 型。

(九) 其他同工酶

Perring 等(1993)使用等电聚焦法(IEF, isoelectric focusing electrophoresis)分析了包括 A 型和 B 型在内的 17 个烟粉虱种群中 8 种酶的等位基因多态现象,计算了 A、B 两型之间的 Nei 遗传距离为 0.24,从而认为 A 型和 B 型的差异已达到种的水平。2000 年, Brown 等(2000)对世界各地 21 个烟粉虱种群 3 个等位酶的 IEF 分析后,认为烟粉虱起源于东半球。

(十) 随机片段长度多态性

1990 年以来,烟粉虱在许多国家的频频暴发,对其的研究工作也逐步深入。因 RAPD-PCR(random amplified polymorphic DNA-polymerase chain reaction)技术成本低、对样本要求也较宽松、加之与酶谱分析相比较容易操作,被首先用于分析烟粉虱的生物型。Bellows 等(1994)用 7 个不同的引物对烟粉虱 A、B 生物型作了检测,结果显示同一生物型的个体扩增产物的相似性达到 80%~100%,不同生物型仅有 10%,认为把 B 型烟粉虱作为一新种来看比较合理,正式命名为银叶粉虱 *Bemisia argentifolli* Bellows and Perring (Bellows *et al.*, 1994)。Gawel 和 Bartlett(1993)认为尽管 RAPD 技术在区分生物亲缘关系是有用的,但并不适用来阐明分类地位,因为他们使用了 20 个引物进行 RAPD 研究,比较烟粉虱 A、B 生物型间的相似系数与山丁子粉虱 *Parabemisia myricae* 和束翅粉虱 *Trialeurodes abutilonea* 间的相似系数,发现前者竟然还小于后者,而后两者是形态差异很大的两个种。

(十一) DNA 技术

1. 扩增片段长度多态性

AFLP(amplified fragment length polymorphism)是一种 DNA 指纹技术,是对基因组 DNA 酶切片段的选择性扩增,也被用来分析烟粉虱的基因水平差异。Cervera 等(2000)通过对 11 个烟粉虱种群包括 A、B、S、Q、H、K、M 等生物型和另外两种粉虱(非洲小粉虱 *B. afer* 和 *B. medinae*)的 AFLP 分析发现,烟粉虱生物型间的相似系数为 0.32,而与另外两种粉虱的相似系数仅 0.07。并把烟粉虱种群归为四组:①近东和印度次大陆生物型归为一组;②B、Q 型和尼日利亚的豇豆种群归为一组;③新大陆 A 型;④S 型和尼日利亚的木薯种群归为一组。这个结果与 Guirao 等(1997)用 RAPD-PCR 分析 A、B、H、K、Q 型的结果一致。

2. 内共生菌的 16S rDNA

在分子水平上,最早涉及的工作是粉虱和蚜虫的内共生菌中编码 16S rDNA 的核苷酸序列。对烟粉虱不同生物型中原生细菌和肠细菌基因的鉴定表明,内共生菌不仅很难区分,并且 16S rDNA 还极端保守,根本无法确定烟粉虱的生物型(Clark *et al.*, 1992)。

Campbell(1993)在总结前人经验教训的基础上,通过对粉虱寄主的 18S rDNA 和其自身内共生菌 16S rDNA 的分析,以及 A、B 生物型之间的差异比较,总结认为寄主和共生菌的进化多样性趋势是一致的。

3. 线粒体 DNA

Simon 等定位了一段线粒体基因组区域来比较生物型和种群,测定了 50 个个体的线粒体核糖体亚单位中的 550 个碱基对序列,代表性序列的相似值矩阵表明相似值范围在 0.78~0.98 之间,并发现新北区和古北区的两组内个体间差异大于组间个体差异,这些实验结果初步表明烟粉虱可能是一个复合种(Simon *et al.*, 1991)。尤其当结合交配行为研究以及针对双生病毒-烟粉虱-寄主三者间互作的生物学特性考虑时,这一推论更合理。

Frohlich 等(1999)采用烟粉虱的 mtDNA 上编码 16S rRNA 和编码 *COI*(cytochrome oxidase I, 细胞色素氧化酶第一亚基)的基因的部分片段作为标记,分析了 10 个有代表性的烟粉虱种群或生物型的系统发生关系。尽管 16S 序列的变异程度不及 *COI* 序列,但是利用它们构建的系统树都能够清楚地区分来自新北区和古北区的种群,并且显示 B 型烟粉虱和古北区的种群是属于同一组的。从用 *COI* 构建的系统树中可以看出,古北区的粉虱种群分为 3 组,分别是印度种群,非洲贝宁种群,以及苏丹、也门、以色列的种群。B 型烟粉虱属于最后这一组,并和以色列、也门的种群最为接近。它们都能够使西葫芦产生银叶症状,而其余的烟粉虱种群均不能。Frohlich 等(1999)的研究为确定不同地理区域/不同寄主的烟粉虱种群(生物型)在遗传物质上的分化提供了直接的分子生物学证据。在对烟粉虱系统发育的研究中, Kirk 等(2000)比较了全世界不同种群烟粉虱 *COI* 基因 3'端 700~720bp 的序列,并利用最大简约法(maximum parsimony)构建了烟粉虱种群的系统发生树。他们发现来自美国的亚里桑那、佛罗里达、得克萨斯和以色列的 4 个 B 型烟粉虱种群组成一支,它们的序列互相之间有 99.4%~99.7%一致性,而这一支和与其亲缘关系最近的苏丹、西班牙一支的序列一致性为 94%~96%。在 B 型的这一支内还有以色列的寄主为 *Lantata* 的种群,它与同支内的 4 个种群亲缘关系略远,相似性为 98.1%~98.3%,属于近似于 B 型的一类。

4. 核糖体 DNA 的间隔区 rDNA-ITS1

核糖体 DNA 的间隔区是 rDNA 进化最快的区域,尤其是 *ITS1* 与线粒体 16S 和 *COI* 相比,进化速度稍快,能更好解决烟粉虱生物型的近缘分化定量问题。De Barro 等(2000a)采用通用引物 TW81 和自行设计的烟粉虱特异引物 5.8R,测定了来自世界许多国家的烟粉虱的 rDNA-*ITS1*,用来研究它们的系统发育关系,发现烟粉虱有很强的生物地理模式。北非/地中海地区的 B 型和非 B 型首先形成姊妹进化枝后,又与美国的烟粉虱本土种群(A 型)形成系谱较远的进化枝,表明银叶型(B 型)是最近演化形成的,而非银叶型是较早的祖先型;非银叶型的西班牙(寄主: *Ipomoea*)和贝宁种群形成较古老的姊妹进化枝,强有力证明 B 型起源于北非和中东一带。这一结果与 Frohlich 等(1999)做的线粒体 16S 和 *COI* 的序列分析中所涉及的种群系统聚类结果相吻合。

显然,目前用于烟粉虱生物型的研究方法已有多种,已有的结果清楚表明,依赖任

何一种方法所得结果来对种群的生物型做鉴别都有局限性。例如, Byrne 等(1995a)发现一个种群虽然能产生美国 B 型可导致的西葫芦银叶反应,但其酯酶图谱的特征不明显,仍难以确定其生物型。无疑,确定一个生物型需要多种方法综合研究。例如, Perring 等(1993)利用 RAPD-PCR 图谱、等电点聚焦、交配行为、杂交等 4 种方法来鉴别美国的 B 型和 A 型。

三、生物型抑或复合种

表 2-2 所列的许多研究都质疑可否将烟粉虱的所有种群归到一个分类单元。Wool 等(1991, 1994)提出数据说明,烟粉虱种下存在一系列异质性单元,世界各地烟粉虱种群的遗传组成不一。Gill(1992)对美国西南部小粉虱属 *Bemisia* 的情况做了综述,提出该地的 A 型与 B 型为同胞种(sibling species),即形态上无法区分但生殖完全隔离的近缘种。已有杂交试验表明,许多生物型,如 A、B、AN、D、K、L、M 型之间不能成功交配授精(表 2-2; Costa *et al.*, 1993b; Bedford *et al.*, 1994; Byrne *et al.*, 1995b; Brown *et al.*, 2000; De Barro and Hart, 2000)。这表明,烟粉虱是一个复合种下存在隐蔽种的典型例子。所谓隐蔽种是指种下的类群,它们相互间生殖上隔离、各具独立的基因流,但形态特征基本上无差异。Brown 等(1995b)对 20 世纪 90 年代中期以前的文献做了全面综述,推论烟粉虱为一组高度隐蔽的同胞种。最近利用同工酶分析和 DNA 技术所做的种下变异研究支持复合种的提法(Frohlich *et al.*, 1999; Brown *et al.*, 2000)。同时近期这些研究结果也提示,若以目前的证据将 B 生物型提升到一个新种,则其他生物型的分类地位也需重新定义。目前的大量证据实际上表明,烟粉虱种下目前含有多个正在快速进化的种群,故烟粉虱是一个复合种,种下有许多生物型和两个已被描述的隐蔽种(Perring, 2001)。

四、生物型类别及其分组

从表 2-2 可知,到 2001 年,烟粉虱就有 41 个种群被研究报道过,其中 24 个种群已被赋予特定生物型,其他 17 个种群尚未被认定。一些种群已被多种技术分析过,而另一些仅被用 1~2 种技术分析过。显然,当一个种群用多种技术分析后,我们对其了解就较全面,也可更易确定其在这个复合种内的位置,即更易于归类。一些学者曾应用特定的方法对世界范围内的多个种群进行了比较分析,如 Bedford (1994) 的杂交试验、Rosell 等(1997)的形态特征比较、Frohlich 等(1999)的线粒体 DNA 上编码 16S 和编码 *COI* 序列比较、Brown 等(2000)的同工异构酶分析、De Barro 等(2000a)的核糖体 DNA 的间隔区 rDNA-*ITS1* 序列比较等。这些研究结果对烟粉虱复合种内的生物型分组提供了最有价值的信息。Perring (2001) 利用这些信息,将这一复合种内的生物型归纳出 7 个组,现简述如下。

(一) 第一组: 新大陆组

这一组包括 A、C、N、R 四个生物型。发现于美国西南部及墨西哥的烟粉虱种群被指定为酯酶生物型 A。这个地理区域的 A 型原本是优势种群,直到 20 世纪 80 年代 B 型入侵定居后,被逐渐取代后衰退。在形态特征上, A 型个体大多具有前缘亚缘区刚毛

(ASMS4), 这在其他生物型中很少见到(Rosell *et al.*, 1997)。以核糖体 *ITS1* 进行比较分析, 美国西南部的 A 型与采于哥斯达黎加的酯酶生物型 C 关系接近(De Barro *et al.*, 2000a)。采于哥伦比亚的 R 型与 A 型、C 型亲缘关系较近, 共同形成一个分支(De Barro *et al.*, 2000a)。利用线粒体 16S 和 *COI* 序列比较, Frohlich 等(1999)将采于波多黎各细裂珊瑚油桐上的种群(酯酶生物型 N)归于新大陆组。在形态特征上, N 型具有 ASMS4, 故认为其与 A 型关系接近(Rosell *et al.*, 1997)。

(二) 第二组: 全球 B 型

这一组包括目前已广布于全球的 B 生物型(又称银叶粉虱 *B. argentifolii*)及 B2 生物型。B 型是近 20 年来的研究重点, 区别 B 型与其他生物型的特征之一是它们引起的植物生理异常, 包括西葫芦银叶反应和番茄的不规则成熟, 这也常是 B 型侵入一个新区的判断指标。银叶反应可以用来鉴定 B 型。区分 B 型与其他型还有多种方法(表 2-2; Brown *et al.*, 1995a; De Barro, 1995; Perring, 1996)。Perring 等(1993)通过生物学、遗传学的比较分析, 认为美国加利福尼亚州 A 型与 B 型的区别已达到种间水平, 在此基础上 Bellows 等(1994)将 B 型描述为一新种 *Bemisia argentifolii* Bellows and Perring, 并提出通用名“银叶粉虱”(silverleaf whitefly)。

B 型已随着人类贸易活动侵入世界各地。澳大利亚(De Barro and Hart, 2000)、塞浦路斯(Bedford *et al.*, 1994)、以色列(Bedford *et al.*, 1994; Byrne *et al.*, 1995b)、美国西南部(Liu *et al.*, 1992; Costa *et al.*, 1993a; Perring *et al.*, 1993; Bedford *et al.*, 1994)以及也门(Bedford *et al.*, 1994)的种群彼此间能成功交配。采于也门的 B 型在酯酶图谱上与 B 型其他种群有明显差异, 被定为 B2 型。在形态特征上, B 型个体常缺 ASMS4(Rosell *et al.*, 1997)。Frohlich 等(1999)和 De Barro 等(2000a)通过分子标记比较, 推论 B 型是近期侵入到西半部和澳洲的, 并推论 B 型起源于非洲北部—中东—阿拉伯半岛这一区域。利用 DNA 技术鉴定结果表明, 近年在我国暴发成灾的是新入侵的 B 型烟粉虱(罗晨等, 2002; Wu *et al.*, 2002, 2003)。

(三) 第三组: 贝宁和西班牙组

这一组包括源于贝宁的 E 型和西班牙的 S 型。E 型来自西非的贝宁的单一寄主植物 *Asystasia gangetica* (L) T. Anders 上, 并已经多种技术鉴定。在形态特征上, E 型缺乏 ASMS4, 为典型的 B 型特征, 但其体前缘蜡缘的宽度远比 B 型或 A 型的小(Rosell *et al.*, 1997), 而与源自苏丹的 L 型、尼泊尔的 P 型较相似, 都不引起银叶反应。Brown 等(2000)利用同工异构酶分析, 发现 E 型与其他型的遗传距离在 0.25~0.62 之间, 即达到亚种及种间的差异水平。Frohlich 等(1999)利用分子标记资料分析表明, E 型自成一个明显的分支。De Barro 等(2000a)用分子技术也发现 E 型自成一个分支, 但与源自西班牙的 S 型关系密切。

(四) 第四组: 印度组

本组包括 H 生物型, 但文献中有关 H 型的起源地有些混淆。Brown 等(1995a)将采自

印度古加拉棉花上的一个烟粉虱种群赋名 H 型。这个种群未经银叶反应鉴定。Bedford 等(1992, 1994)将于 1991 年采自印度喀拉拉地区西瓜上的烟粉虱也赋名 H 型, 这个种群经生测不能导致银叶反应。所有其他有关 H 型的文献均是指后一个不产生银叶反应的种群。Frohlich 等(1999)通过线粒体 16S 和 *COI* 分析, 将这一种群置于一个单独的组。De Barro 等(2000a)的 DNA 分析也发现 H 型与其他各型都有距离, 应为单独的一支。

(五) 第五组: 苏丹-埃及-西班牙-尼日利亚组

这一组包括采自苏丹的 L 型、埃及的未定型、西班牙的 Q 型和尼日利亚的 J 型。L 型是 1974 年采于苏丹棉花上的种群。Bedford 等(1994)发现, L 型不能导致银叶反应。Byrne 等(1995b)所做的杂交试验中, L 型与 B 型有交尾现象, 但作者未报道两个生物型杂交是否产生了子一代的成熟雌虫。线粒体 16S 和 *COI* 分析显示, L 型与 A、B、E 及 H 型均有明显区别(Frohlich *et al.*, 1999)。De Barro 等(2000a)利用核糖体 *ITS1* 区域分析比较, 发现 L 型与 1999 年采自埃及马缨丹上的种群(未知酯酶型)、1996 年采自西班牙番茄上的 Q 型、1990 年采自尼日利亚豇豆上的 J 型应归为一组。

(六) 第六组: 土耳其-海南岛-韩国组

这一组包括采自土耳其的 M 型、中国海南岛的未知型、韩国的未知型。M 型于 1985 年采自土耳其的棉花上, 具有明显不同的酯酶图谱。该型不能与 B、K、D 型成功杂交(Bedford *et al.*, 1994), 不能产生银叶反应。利用核糖体 *ITS1* 亲缘关系分析表明, M 型与采自中国海南岛、韩国的两个种群可归为一支(De Barro *et al.*, 2000a)。

(七) 第七组: 澳大利亚 AN 型

AN 型为采自澳大利亚昆士兰和达尔文地区棉花上的种群, 被认定为澳洲本地种群(Gunning *et al.*, 1997)。虽然酯酶图谱分析显示该型与 B 型相似性高(Gunning *et al.*, 1997), 但两型间的杂交未能产生有生殖力的子代(De Barro and Hart, 2000)。利用核糖体 *ITS1* 亲缘关系分析表明, 采自澳大利亚的多个烟粉虱种群与世界上其他种群均有明显差别(De Barro *et al.*, 2000a)。

(八) 第八组: 其他生物型

D 型和 K 型虽已利用多种技术分析鉴定过, 数据丰富, 但尚难以将它们归到特定的组。D 型是 1991 年采自尼加拉瓜棉花上的种群, 因采集地点与哥斯达黎加、墨西哥较为接近, 因此推论其应与新大陆组(即第一组)关系较为密切。但是, 酯酶 IV、PGM 及 PGI 异构酶分析比较表明, D 型不能归于新大陆组(Brown *et al.*, 2000)。事实上, 在特定的异构酶对偶基因上, D 型反而与 B 型关系较为密切。然而, Bedford 等(1994)证实, D 型不能与 B 型、K 型、M 型成功杂交, 也不能产生可由 B 型产生的植物生理异常。

K 型是 1991~1992 年采自巴基斯坦棉花上的种群。该种群不能导致银叶反应, 不能与 B 型、D 型、M 型成功杂交(Bedford *et al.*, 1994)。在形态上, K 型不具 ASMS4, 虽与 B、E、K、L 及 Q 型相似, 但其体前缘蜡缘的宽度远较其他型的要宽(Rosell *et al.*, 1997)。K 型在异构酶上与 B 型接近(Brown *et al.*, 2000); 但是核糖体 *ITS1* 亲缘关系分析却显示,

K 型与 B 型明显不同(De Barro *et al.*, 2000a)。

另一难以归类的是采自诺鲁等地的 NA 型。虽对其地理分布已有较多了解, 并有 RAPD-PCR 分析资料, 但对其遗传组成变异了解尚不够详细。NA 型沿太平洋西北延伸至东南均有分布, 包括美属萨摩亚群岛、斐济、密克罗尼西亚岛、关岛、基里巴斯、马绍尔群岛、诺鲁岛、纽埃岛、北马里安那群岛、帕劳群岛、汤加群岛、图瓦卢、西萨摩亚及中国台湾等地。De Barro 等(2000a)推论, NA 原产地应为亚洲。

在意大利, 烟粉虱 B、Q 两个生物型广泛分布。最近在意大利南部一个海拔 600~1000m 的高山区首次在大戟 *Euphorbia characias* 上采到烟粉虱, 这一烟粉虱种群目前观察似乎是单食性的, 只取食大戟, 且只分布于这一年均气温约在 10℃ 的高山区, 被命名为 T 生物型(Simon *et al.*, 2003)。

五、今后研究中如何考虑种下变异

一个复合种下的隐蔽种与一般的生物种在概念上没有根本的区别, 所不同的只是在具体操作上用于区别隐蔽种的特征与一般种的略有不同。就烟粉虱来说, 由于若虫形态的变异和可靠性差, 于是得发展和应用其他的方法来鉴别该复合种下的生物型。有必要发展大家认同的标准鉴定方法, 当新的不同的种群被发现时, 可将它们适当地归于该复合种下的类群。由于烟粉虱分布广泛, 种下类群变异复杂, 且仍在进化之中, 故没有一个研究小组可在一个项目中对所有的生物型予以鉴定, 但可以采用以下一些策略来帮助将研究过的种群适当地归于该复合种下的不同类群。

首先, 所有被研究的种群应采用统一的标识。只有做到这一点, 全世界不同地点、不同人员有关不同种群的研究资料才可有效地交流。过去在这方面有一些经验值得借鉴。例如, Bedford 等(1992, 1994)将从印度喀拉拉西瓜上采到的一个种群称为 H 生物型, 后来 Brown 等(1995a)将从印度古加拉棉花、茄子、马铃薯上采到的一个种群归于 H 型。还有一个例子是 Q 生物型, 通过研究发现, 在西班牙, 不同人员 1995 年从棉花上采到的一个种群(Secker *et al.*, 1998)、1992 年从西瓜上采到的一个种群(Brown *et al.*, 2000)、1992 年和 1993 年从西瓜和棉花上采到的一个种群(Rosell *et al.*, 1997)均是同一生物型, 都称之为 Q 型。这些统一的称谓有利于研究资料的交流。

其次, 对于任一被研究的种群, 应尽可能给予清晰、详尽地描述, 这样在将不同的研究报告进行综合整理时, 就可避免混乱。De Barro 和 Driver(1997)、De Barro 等(2000a)对烟粉虱多个种群进行了很好的比较研究, 他们比较了不同种群的 RAPD-PCR 图谱, 并依据核糖体 ITS1 建立了种群间的亲缘关系。在研究中, 应报道种群采集地和寄主植物、维持实验种群所用的寄主植物, 这样不同地点和人员对同一种群所做的研究结果才能有效地比较和归纳。只报道一个大区域或国家的名称是不可取的, 因为在一个大区域可存在多个不同的生物型。例如, 在印度除 B 型外, 还报道有 G、H、I 3 个生物型、在西班牙除 B 型外还有 Q、S 型(Brown *et al.*, 2000; De Barro *et al.*, 2000a)。

必须注意, 隐蔽种与形态上可区别的种相比, 需要更详细的资料来确定它们的位置。正如 De Barro 等(2000a)所指出的, 在不久的将来当有更多的有价值的信息后, 可能有必要对烟粉虱所有生物型的分类地位进行修订。在这个过程中, 不同生物型之间的杂交试

验是必须进行的,这样才能与生物种的基本定义相协调。

第四节 B 型烟粉虱传播与扩散

一、传播与扩散的历史

Brown 等(1995b)对 B 型烟粉虱的传播和扩散历史做了简要概述。20 世纪 80 年代中期,在美国佛罗里达州等地温室栽培的一品红等观赏植物上烟粉虱大发生。这些粉虱用原来防治粉虱的方法无法控制其危害。仅仅几年后,该虫发生量大大超过了温室白粉虱而成为温室及观赏植物的一种主要害虫。后经详细比较研究,这些发生量大增的粉虱与美国本土上的烟粉虱种群有许多不同之处。它们在葫芦科植物上取食能导致银叶反应,而当地种群却不导致这种反应;它们的酯酶图谱与当地种群的不同;形态上与当地种群也有差异,从而确定这些大发生的烟粉虱为新入侵的 B 型烟粉虱,而当地的为 A 型(参见本章第三节)。

美国学者在加勒比海地区所做的普查表明, B 型烟粉虱主要是通过引进的观赏植物传入的,然后从观赏植物上扩散到蔬菜及城郊的其他观赏植物上。在多米尼加和波多黎各的调查表明, B 型烟粉虱于 1987~1988 年通过一品红及其生产设备传入这两个国家,然后通过观赏植物传到各地;而在每一个地区,则从温室观赏植物、番茄的幼苗传播开来,然后扩散到四周的豆类、木薯、棉花、瓜类、辣椒、烟草等作物上。在美国,1988~1989 年在亚利桑那、加利福尼亚、佛罗里达、德克萨斯 4 个州发现 B 型烟粉虱零星发生,到 1990~1991 年就已普遍发生。与此同时,美洲、欧洲的温带地区以及日本的温室作物上都报道烟粉虱大发生。到 1993 年,中美、南美国家都已报道烟粉虱大发生(Brown *et al.*, 1995b)。如本章第三节所述, B 型烟粉虱的起源地极有可能是非洲北部-中东-阿拉伯半岛或巴基斯坦和印度。

二、在中国的入侵、传播与扩散

在我国,虽然早已有烟粉虱的记载(见本章第一节),但在 20 世纪 90 年代中期以前,为害并不严重。据陈连根(1997)报道,上海地区自 1994 年从国外引进一品红后,烟粉虱在园林植物上开始大发生,用药难以控制。据广东省植保站记载,烟粉虱 1997 年在东莞发生,并逐年加重,至 2000 年不少地区大发生。1998 年有关人员在乌鲁木齐市的一品红上发现烟粉虱,随后在石河子、哈密、库尔勒、克拉玛依等地花卉上都采到此虫(赵莉等, 2000)。在北京,烟粉虱从 90 年代后期以来对黄瓜、番茄、茄子、甜瓜和西葫芦的危害迅速加重,严重时可达七成以上(罗晨等, 2000)。近年来,烟粉虱在全国各地都开始有大发生的记录。

罗晨等(2002)通过比较 *COI* 基因序列,显示了所测的采自北京、广东、陕西、新疆 4 个不同地理区域的 5 个烟粉虱种群均为 B 型,这些种群采自相隔很远的地理区域,如果我国 B 型烟粉虱属于本地起源,它们应该与别的 B 型种群积累足够多的差异,而所测的几个种群与别的 B 型种群却基本上完全一致,从而推测我国的 B 型烟粉虱是近几年入侵的外来种群。Wu 等(2002, 2003)采用银叶反应、RAPD-PCR 和核糖体 *ITS1* 技术对采自北京、青岛、福州、南宁等地的多个烟粉虱种群做了比较分析,也推测我国的 B 型烟

粉虱是近年入侵的外来种群。

可见, B 型烟粉虱极有可能是由国外的一品红引入到我国多个地区, 随花木的调运在我国不同地区间互相传播, 从花木上扩散到周围的农业、园艺业生产区, 并暴发成灾。这种传播与扩散的途经和方式与美国等地所观测到的一致。

三、B 型烟粉虱入侵机制

(一) 竞争取代

B 型烟粉虱之所以能够成功入侵并造成巨大的危害, 这与其竞争取代能力密切相关。竞争取代一般是指一个生物种群通过直接或间接的竞争作用将一个原来已经建立的种群替代的现象, 是一种生物种群严重竞争的结果, 并随着人类对环境改变的增加而日益频繁(Reitz and Trumble, 2002)。

在许多地区已发现 B 型烟粉虱竞争并取代土著生物或已经定居外来生物的现象。在美国, B 型烟粉虱在很短的时间内取代了土著烟粉虱-A 型烟粉虱(Bellows *et al.*, 1994; Perring *et al.*, 1993); 并且这种取代现象的范围十分广泛(从佛罗里达州到得克萨斯州、亚利桑那州以及加利福尼亚州)(Perring *et al.*, 1991)。这些记录以及其他资料(Costa and Brown, 1991; Schuster *et al.*, 1990, 1991; Yokomi *et al.*, 1990)表明, 在上述地区以及其他地区存在着 B 型烟粉虱对土著烟粉虱的竞争取代。早在 1986~1989 年, 在一些地区就发现原来的烟粉虱(A 型)和美国的一品红上的新种群在生殖和寄主方面存在差异。1991~1992 年以前, 在墨西哥西南部、哥斯达黎加、危地马拉和尼加拉瓜地区存在 A 型、类 A 型、C 型、D 型或者 G 型的烟粉虱(Costa *et al.*, 1993b)。然而 1994 年的记录表明, 墨西哥南部的 B 型烟粉虱已经绵延到了墨西哥的东部和西部沿海地区以及委内瑞拉。1991 年 B 型烟粉虱传入巴西, Lima 等在 2002 年调查表明 B 型烟粉虱已经广泛分布并且超过土著 A 型烟粉虱(Lima *et al.*, 2002)。在哥伦比亚也发现了 B 型烟粉虱取代 A 型烟粉虱的现象(Quintero *et al.*, 1998, 2001)。在澳大利亚, B 型烟粉虱首次在 1994 年被发现(Gunning *et al.*, 1995), 土著粉虱原广泛分布于所有地区, 而近年该土著粉虱仅仅在棉花上可以发现, 并且研究结果表明, 在棉区 B 型烟粉虱的分布和数量有增长的趋势(De Barro and Hart, 2000)。

种间竞争包括资源利用性竞争和相互干扰性竞争。在资源利用竞争中, 一种生物获取的资源比另一种生物获取的要多, 而干涉竞争是指一种生物限制或不允许另一种生物接近或利用资源(Reitz and Trumble, 2002)。许多生物的竞争取代包括一种以上的竞争机制, 且常常被其他非竞争因素所影响。近年来研究表明, B 型烟粉虱竞争取代机制包括资源利用性竞争和相互干扰性竞争(Perring, 1996; Mayer *et al.*, 2002; McKenzie *et al.*, 2002)。该昆虫取代土著烟粉虱以及其他昆虫可能与以下因素相关: 生态位竞争, 生殖干涉以及 B 型烟粉虱危害和携带病毒粉虱危害寄主对其他昆虫的影响。

1. 生态位竞争

竞争排斥原理(principle of competition exclusion)认为, 生态位相同的两个物种不能共存, 即具有相似环境要求的两个物种, 为了争取有限的食物、空间等环境资源, 大多不

能长期共存于同一空间。Hardin(1960)将之归纳为“完全的竞争者不能共存”。Odum(1971)指出,“如果多个生物种亲缘关系密切,往往不能够共存于相同的地点”,“否则它们就会利用不同的食物,在不同的时间活动,或者占有不同的小生境”。Perring(1996)通过分析美国 B 型烟粉虱取代 A 型因素时发现,两者的许多生态位相同,包括相同的寄主植物、相似的季节活动时间以及相同的小生境。

B 型和 A 型的寄主范围重叠, B 型寄主植物范围广泛,包括 A 型的寄主(Byrne and Miller, 1990; Bellows *et al.*, 1994)。B 型烟粉虱除了危害经济作物外,还广泛分布于观赏植物和野生杂草上。B 型烟粉虱广泛的寄主范围有利于它的生存,尤其是有利于越冬生存和对春天瓜类作物和棉花的入侵(Perring, 1996)。

B 型和 A 型具有相似的季节活动时间。在加利福尼亚州,越冬的 B 型烟粉虱一月和二月迁入种植的葫芦科植物上,在四月 B 型入侵多种春季瓜类作物;而 A 型一月末在植株上孵化并于三月末迁移到葫芦上生存,几乎不危害春季种植的瓜类作物。B 型比 A 型更早地涌入棉花上并定居。B 型种群在八月和九月由于秋季葫芦和十字花科植物的种植而迅速增加;而 A 型在五月和六月迁入棉花幼苗上定居并在九月末才达到发生高峰(Perring, 1996)。

B 型和 A 型具有相同的生境,例如 A 型烟粉虱成虫和幼虫主要在远轴的叶子表面,在棉花(Naranjo and Flint, 1994; Riley and Sparks, 1993)和瓜类作物上(Tonhasca *et al.*, 1994a, b), B 型也有同样的分布方式。而且,两个生物型雌性均喜欢在幼嫩的叶片上产卵(Chu *et al.*, 1999, 2002)。

2. 生殖干涉

近几年来研究表明,生殖干涉可能是 B 型烟粉虱竞争取代的重要机制(Perring 1996; Pascual and Callejas, 2003),这种竞争取代不是通过资源竞争产生的(Reitz and Trumble, 2002),而是通过竞争对方雌性从而导致取代的现象。当 B 型和其他生物型之间求偶和交配出现不均衡时,其中一种雌性的繁殖率减少从而被取代(Perring, 1996)。B 型比土著型具有更强的生殖竞争力,从而取代土著型,这可能是这种生物成功入侵的重要因素。这种竞争取代是一种干涉竞争即生殖干涉,它是一种不直接导致土著型死亡的干涉形式。

烟粉虱是单、双倍体昆虫,即雄性(单倍体)由未受精的卵产生,而雌性(双倍体)是由受精卵产生。Perring(1996)使用 2 个 A 型烟粉虱种群(A1, A2)分别和 B 型烟粉虱进行杂交实验,A1 型雌性与 B 型雄性、A1 型雄性与 B 型雌性、A2 型雌性与 B 型雄性、A2 型雄性与 B 型雌性产生的 F1 代全部是雄性(每对平均产生雄虫分别为 9.5, 9.7, 19.6, 15.6 头)。A 型和 B 型异性之间虽然存在求偶行为,但由于没有 F1 代雌虫的产生,这说明在杂交中配子不能成功结合。B 型的交配时间比 A 型的短(分别 119.8s, 134.5s),而且 B 型雄性对 A 型雌性的求偶能力比 A 型雄性对 B 型雌性的求偶能力要强。因此,在混合种群中,较少的 A 型雄性能够成功交配,从而导致了较低的生殖力(Perring, 1996)。从生态学的角度来讲, B 型雄性和 A 型雄性竞争 A 型雌性资源,由于 B 型的数量在春天和初夏远远超过 A 型,因此 A 型雌性资源受到严重的限制。

将 B 型、Q 型烟粉虱在单个生物型种群和混合种群的情况下实验结果表明, B 型单头雌性的产卵数量和产生的 F1 代成虫数量均高于 Q 型的;而且它的 F1 代 50%孵化时间

均短于 Q 型; Q 型若虫的死亡率比 B 型的高; B 型这种较高的生殖力使得它在和 Q 型共存中占据优势。B 型的种内资源竞争在两种生物型共存时消失; B 型、Q 型分别饲养时, B 型比 Q 型产生更多的 F1 代雌性, 而且均比混合饲养种群产生更多的 F1 代雌性, 这些表明存在由生殖干扰引起的种间竞争(Pascual and Callejas, 2003)。

B 型烟粉虱的种内/种间竞争取代作用会受到一些因素的限制。如田间条件, B 型和寄主植物相互作用以及与其他生物型的数量比对它的种群建立有深刻的影响(Pascual and Callejas, 2003; De Barro *et al.*, 2003)。

3. 携带和传播双生病毒

一般观察表明, B 型烟粉虱危害后的寄主植物很少发现竞争性的昆虫。最近, 通过 B 型与寄主以及该型携带病毒等之间关系的研究结果为解释这种现象提供了一些依据(Mayer *et al.*, 2002; McKenzie *et al.*, 2002)。竞争性昆虫种群的降低是 B 型烟粉虱危害产生的直接和间接影响的结果。

在温室和田间条件下, 将拟尺蠖、非洲菊斑潜蝇放到被 B 型危害的植物上, 然后观察它们的行为差异(产卵、取食嗜好)和降低的生存率以及发育历期(Mayer *et al.*, 2002), 结果表明, 它们的相互作用并不均匀: B 型可以诱导许多寄主植物产生防御反应, 包括致病相关蛋白(PR)的积累(例如几丁质酶, β -1, 3 葡聚糖酶, 过氧化物酶, 脱乙酰壳多糖酶等)。PR 的出现与取食同种植物昆虫竞争者的取食减少密切相关。在 B 型烟粉虱危害的番茄上, 非洲菊斑潜蝇成虫的产卵刺孔和取食明显减少, 说明斑潜蝇成虫对 B 型未危害的作物有偏好。幼虫存活率在 B 型未危害的作物上明显的高, 这说明 B 型危害的作物对斑潜蝇的生长发育有负面影响。而斑潜蝇的危害对 B 型烟粉虱的产卵没有明显的影响。B 型烟粉虱危害后的羽衣甘蓝能够直接影响拟尺蠖, 使它从远轴变为近轴取食(Inbar *et al.*, 1999b)。

B 型烟粉虱所携带病毒可能有助于它的产卵和生存, 从而有利于 B 型烟粉虱在种间的竞争。B 型烟粉虱的间接影响可能对通常在近轴边缘定居的昆虫有很大的作用(Inbar *et al.*, 1999a)。对植株使用 3 种处理方法, 即烟粉虱危害和未危害的植株以及携带病毒的烟粉虱危害的植株。在 5 叶到 6 叶期的植株, 每叶大约被 5 头粉虱危害。将植株在危害前和危害后 14d, 28d, 42d, 56d 进行取样。在 56d, 被携带番茄斑点病毒(ToMoV)的 B 型烟粉虱侵害的植物比没有携带病毒时危害的植物落卵量和若虫量分别高出 2.5 倍和 4.5 倍; 同时, 携带番茄斑点病毒(ToMoV)的 B 型烟粉虱比仅有烟粉虱危害所诱导植物产生的 PR 量要多, 在 42d 所有的 PR 蛋白达到最大的差异。PR 活性的差异与特异性酶的变化和 P2、P4 致病相关蛋白(PR)同时增加相关(McKenzie *et al.*, 2002)。PR 的增加, 反过来必然影响其他昆虫的取食。

因此, 竞争性昆虫种群的降低是 B 型烟粉虱危害产生的直接和间接影响的结果。B 型烟粉虱没有受到植物防御体系的影响, 可能与它是取食韧皮部的昆虫有关。而防御化学物质, 无论它们是次级代谢物还是蛋白, 通常不在韧皮部表达或者有效。结果取食韧皮部的昆虫受到保护, 而咀嚼取食的昆虫对植物防御物质敏感。B 型烟粉虱利用这种保护方式以及诱导植物防御物质的能力使它在与其他昆虫竞争中占据优势(Mayer *et al.*, 2002)。

多层次的营养效应可能是 B 型烟粉虱在各种作物上突然暴发并成为主要害虫的原因,这些结果解释了 B 型烟粉虱危害后的寄主植物上竞争性昆虫较少的现象(Mayer *et al.*, 2002)。

(二) 对寄主的适应

截止 1998 年,被记载的烟粉虱寄主植物至少有 600 种(Oliveira *et al.*, 2001),其中, B 型烟粉虱具有最广泛的寄主植物范围,除了侵害大量的农作物,还危害多种观赏植物、野生植物和杂草(Perring *et al.*, 1992; Calvitti and Remotti, 1998), 寄主范围已超过 500 种(Brown *et al.*, 1995b)。虽然目前还没有很好的理解烟粉虱能适应如此广泛的寄主植物的机制,但是,综合近 20 年来的文献可以将烟粉虱对寄主的适应划分为行为适应和生理适应。

1. 行为适应

烟粉虱入侵种群到达新的生境时,对当地寄主植物接受与否往往依当时可供选择的寄主种类有关,当缺乏嗜好的寄主时,对潜在的寄主植物也能选择利用,这就需要首先从行为上对其逐渐适应。在行为适应过程中,取食和产卵嗜好性的形成具有重要意义。

随着离开寄主时间的增加,在“饥饿”状态下,烟粉虱在原本嗜好性不高的寄主植物上取食和产卵的几率就可能增加(Minkenbergh *et al.*, 1992; Veenstra and Byrne, 1998a),当烟粉虱在非嗜好的寄主上有了产卵和取食的经历后,就对其产生了明显的嗜好性。在植食性昆虫中,学习对昆虫取食嗜好性具有重要作用(李月红和刘树生, 2004)。Costa 等(1991)用试验数据表明,持续饲养在棉花或南瓜上的烟粉虱形成了对各自寄主的取食嗜好性;同莴苣相比,烟粉虱更嗜好甜瓜,这可能是由于已经适应了南瓜的烟粉虱个体对甜瓜的一种内在嗜好性,因为甜瓜与南瓜的亲缘关系要比莴苣的更近。同样如果烟粉虱先前没有接触嗜好寄主而是接触非嗜好的寄主,由于产卵嗜好性的形成,它们就更可能选择后者作为产卵场所(Courtney and Kibota, 1990; Veenstra and Byrne, 1998b)。例如,Chu 等(1995)发现,在田间,花椰菜(非嗜好)上的烟粉虱卵比棉花(嗜好)上的更多,但若虫数则较少。

烟粉虱具有的取食和产卵嗜好性能力,使其入侵种群在“饥饿”状态下,可以对潜在的寄主植物从行为上逐渐适应,同时也为从生理上适应创造了条件。

2. 生理适应

(1) 避免植物化学防御物质的特殊取食方式。烟粉虱是取食植物韧皮部汁液的害虫,而寄主植物的次生物质与诱导产生的 PR 蛋白,经常不在韧皮部中表达,即使口针穿过 PR 蛋白所在的细胞间空隙,口针外鞘也可起到保护作用。面对众多种类的寄主植物,这种取食方式使烟粉虱可以避免许多对咀嚼式口器昆虫敏感的植物化学防御物质,利用这种保护,也使得其在同其他植食者竞争中处于有利地位(Mayer *et al.*, 2002)。

(2) 次生物质的分泌和表型结构的变化。烟粉虱喜欢取食和产卵于叶片多毛的寄主植物(Butler and Henneberry, 1984; Wilson *et al.*, 1993; Balaji and Veeravel, 1994; Chu *et al.*, 1995; Heinz and Zalom, 1995; Cohen *et al.*, 1996),可能与需要定位无天敌的空间来为后代提供避难场所有关(Price *et al.*, 1980; Neal and Bentz, 1999)。由于植物具有的腺刺或黏刺,

对寄生蜂来说具有很高的危险性(Neal and Bentz, 1999), 并且这些植物上的刺毛更易中断捕食者的搜索和捕食行为(Moshe and Gerling, 1999), 因此, 使得烟粉虱在天敌防御上获得好处。为应对这些寄主植物对其自身的作用, 烟粉虱可以通过分泌蜡质、蜜露等次生物质来黏附并消除植物刺毛的影响(Neal and Bentz, 1999)。同时, 为了避免受到寄生蜂和捕食者的攻击, 烟粉虱的若虫还能在不同的寄主植物上发育形成不同的非遗传性表型结构, 在光滑的寄主植物叶片上发育, 大多数拟蛹缺乏背刺毛(Azab *et al.*, 1969), 而在具叶毛的寄主植物叶片上发育, 若虫体背常存在明显的刺毛(Azab *et al.*, 1969; Rosell *et al.*, 1997; Neal and Bentz, 1999; Guershon and Gerling, 1999)。低龄若虫由于扁平的外形可能提供视觉上的保护, 而高龄若虫由于酷似所依赖寄主植物的外形, 可同寄主叶片的附属物混合在一起而达到保护的目的(Neal *et al.*, 1999; Guershon and Gerling, 1999)。由此可见, 烟粉虱通过自身分泌的一些次生物质与非遗传性表型结构的变化, 使其能适应广泛的寄主植物, 进而在三营养层中具有了抵抗寄主植物物理防御的特性和逃避天敌搜索的本领。

(3) 对寄主植物营养需求的调控。烟粉虱一龄若虫以后至成虫羽化前, 常固定在一个位置取食, 由于植物韧皮部汁液中的低氮/碳比率, 它们必须适应寄主部分生长期不理想的营养(Dorschner, 1990)。粉虱碳水化合物代谢的独特之处就是合成利用海藻糖, 而韧皮部汁液中的主要碳水化合物是蔗糖(不含海藻糖)(Byrne and Miller, 1990)。Tetsuhiko 和 Ishikawa (1995)认为, 烟粉虱含菌细胞内的细菌 *Erwinia* spp.能利用蔗糖作为营养基质产生大量的海藻糖。获得足够的氮被认为是多食性昆虫成功地开发利用植物必须克服的一个主要障碍(Strong *et al.*, 1984; Schoonhoven *et al.*, 1998)。在寄主植物营养生长过程中, 烟粉虱若虫的聚集导致总氨基酸明显提升, 其中瓜氨酸、丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸等必需氨基酸是烟粉虱正常发育所必需的(Byrne and Miller, 1990; Blackmer and Byrne, 1999)。虽然植物韧皮部汁液中缺乏必需氨基酸(Douglas, 1993), 但 Tetsuhiko 等(1995)与 Veenstra 等(1998b)认为, 粉虱体内也含有与蚜虫(Douglas and Prosser, 1992; Febvay *et al.*, 1995)体内相似的内共生体, 它们能利用非必需氨基酸来合成所需的必需氨基酸。

昆虫在选择利用寄主植物的过程中, 必将遇到对其生长发育产生不利影响的植物次生代谢物质, 例如萜类、酚类、丹宁、生物碱和糖苷等(钦俊德, 1995), 但植食性昆虫可以利用体内的解毒酶系来解毒和排毒以适应这些次生物质(Lindroth, 1989)。此外, 寄主植物在逆境条件下可产生具有很强氧化能力的氧自由基(O)、氢氧自由基(HO)和过氧化氢(H₂O₂)等活性氧, 但昆虫体内也存在能降解这些自由基的保护酶系。因而, 除了以上讨论的烟粉虱对寄主植物适应的一些机理外, 面对如此众多的寄主植物, 其自身的解毒酶和保护酶将发挥重要作用, 而且这些酶系的保护作用也可能是 B 型烟粉虱能利用更多种类的寄主植物的一个主要原因。

(三) 抗药性与成功入侵

许多文章认为, 急剧增加的杀虫剂的施用通过对抗药性烟粉虱种群的选择作用以及对天敌的压制导致了该害虫的严重暴发。比如自从 1989 年以来, 在佛罗里达州 B 型烟粉虱的防治就需要频繁地施用杀虫剂。但是即使每周施药一次, B 型烟粉虱的控制仍然

未能解决。毒力和生化实验研究表明,烟粉虱尤其 B 型烟粉虱对广泛使用的各类杀虫剂产生了抗药性,包括 DDT、甲基对硫磷和硫丹(见本章第七节)。

虽然烟粉虱对化学农药的抗性早已为世界各地所认识,但是直到 20 世纪 80 年代 B 型烟粉虱的出现后,人们才将抗药性和生物型联系在一起。尽管研究发现 A、B 型烟粉虱的试验种群对有机磷具有相同的敏感性,但是 B 型对氯氰菊酯抗性要强 (Costa *et al.*, 1993a)。Byrne 和 Devonshire(1993)对古北区和新北区的烟粉虱研究表明,种群中存在 1 个乙酰胆碱酯酶的敏感体和 2 个不敏感变异体,而且大量的 B 型烟粉虱携带着氨基甲酸酯类和有机磷杀虫剂不敏感的乙酰胆碱酯酶。Byrne 等(2000)研究了在 B 型种群中的酯酶 E0.14 位点的功能,它是电泳时能够区分 B 型烟粉虱的一条特殊酯酶带。用亚致死剂量的丙溴磷(抑制酶的活性)处理后进行拟除虫菊酯生物测定,以及使用同位素放射性标记的氯菊酯测定新陈代谢,结果表明含有 E0.14 的 B 型烟粉虱对拟除虫菊酯的抗性主要是由于增强了酯的水解作用(Byrne *et al.*, 2000)。

Riley 和 Tan(2002)研究发现, B 型烟粉虱的氟氯菊酯抗性和敏感种群杂交可以增加种群的生殖。在 B 型的氟氯菊酯抗性和敏感种群杂交实验中,母系种群和 F1 雄性回交种群的净生殖力有显著差异,大概增加 2 倍。而且若虫的孵化率与净生殖力呈正相关,成虫的平均寿命、产卵量和后代中雌性的比例在种群中发生了改变,一些因素提高了氟氯菊酯抗性回交种群的生殖力(Riley and Tan, 2002)。

B 型烟粉虱和非 B 型对杀虫剂的反应存在差异。在对照和印楝素处理的植物上, B 型雌成虫、产卵量以及若虫数量几乎没有显著差异。选择性实验中,非 B 型雌性成虫、产卵量以及若虫在印楝素处理的植物上明显地减少(Toscano *et al.*, 1997)。

尽管上述实验表明化学杀虫剂的大量施用有利于 B 型烟粉虱的暴发成灾,但是 B 型暴发和化学杀虫剂之间的关系仍然存在一些问题,如 B 型烟粉虱抗药性突变在暴发成灾中的作用还不十分明确。在烟粉虱中发现了环戊二烯类杀虫剂产生的抗性突变,即 Rdl 基因中编码丙氨酸位点突变为丝氨酸位点的现象,该突变在果蝇中导致了对环戊二烯类杀虫剂的高抗性,但是在烟粉虱中这种突变并不是 B 型所独有,从而抗药性在 B 型烟粉虱暴发成灾中的推动性作用不能确定(Anthony *et al.*, 1995)。

第五节 寄主植物

一、对寄主植物的选择性

如本章第二节所述,烟粉虱作为一个复合种,其寄主范围是相当广泛的,从种下生物型及隐蔽种的层次来讲,寄主范围有很大差异,一些生物型是多食性的,如 B 型,但也有许多寡食性、单食性的种群,且相互关系错综复杂。有关烟粉虱对寄主植物的选择性,大部分研究是针对 B 生物型开展的,一些试验是同时供给亲缘关系较近的多种植物进行比较,如南瓜和西葫芦(McAuslane *et al.*, 1996);而另一些试验是同时供给多种非近缘植物进行比较,如棉花和一品红(Bethke *et al.*, 1991)。这样的比较是为了确定哪种植物可能在吸引和维持着更高的烟粉虱种群。从表 2-3 中可看出,西葫芦、甜瓜和棉花是烟粉虱最嗜食的,而花椰菜是最不嗜食的植物(Blua *et al.*, 1995; Costa *et al.*, 1991; Chu *et al.*, 1995)。

二、植物抗虫性机制

植物对烟粉虱的抗虫性研究可分为两个阶段：20世纪90年代以前，基于烟粉虱和植物相互关系基础上的作物抗虫性的利用在1978年就开始了，发现少毛的棉花品种抗性强(Omran, 1978)。但在栽培植物中，对烟粉虱具有抗性的寄主植物是较少的，大规模广泛的抗虫品种资源包括栽培品种、杂交种、野生种对烟粉虱的抗性筛选及鉴定工作还是非常有限的(De Ponti *et al.*, 1990)，在很多情况下，被评价的种质范围过于有限以致不能很好地了解或获得抗虫基因的多样性。而且，只有一些专门的发展项目来确定和筛选具有抗性的亲本基因型，再结合优良的农艺性状，来生产新品种(Bellotti and Arias, 2001)。

表 2-3 烟粉虱对不同寄主植物上的选择性

被比较的植物	观察结果	文献来源
西葫芦、香瓜、棉花、南瓜、莴苣、番茄	西葫芦上存活率最高，番茄最低	Costa <i>et al.</i> , 1991
棉花和一品红	两种植物上烟粉虱的发育时间和寿命均无显著差异	Bethke <i>et al.</i> , 1991
棉花、甜瓜、番茄、云苔属作物、多种观赏植物、本地植物品种等	甜瓜是烟粉虱最好的寄主植物，其次是棉花、云苔属作物，紫花苜蓿、番茄	Toscano <i>et al.</i> , 1994
十字花科	白菜和花椰菜比无头甘蓝、芥兰、芽甘蓝的感染轻	Elsey and Farnham, 1994
大豆和花生	花生上产卵极少	McAuslane <i>et al.</i> , 1995a
西葫芦、白菜、甜菜	最嗜食西葫芦	Blua <i>et al.</i> , 1995
棉花、花椰菜、香瓜、莴苣	产卵量、种群数量依次为香瓜>棉花>莴苣>花椰菜	Chu <i>et al.</i> , 1995
南瓜和西葫芦	南瓜上种群>西葫芦	McAuslane <i>et al.</i> , 1996
棉花、大豆、花生、玉米	种群数量比较为：棉花>大豆>花生，玉米上没有发现烟粉虱的卵及若虫，只有极少量的成虫在植株上逗留	林克剑等, 2002
烟草、番茄、棉花、甘蓝	成虫的取食嗜好性，排列顺序为：烟草>番茄>棉花、甘蓝；产卵量排列顺序为：烟草、番茄>甘蓝、棉花	张永军等, 2003

90年代以后，对烟粉虱抗性的研究工作在逐年增多(Bellotti and Arias, 2001)，这主要是由于烟粉虱危害日渐严重而引起的高度重视(De Ponti *et al.*, 1990; Brown *et al.*, 1995b; Drost *et al.*, 1998)。而且，对烟粉虱抗虫性的研究也逐渐波及到其他粉虱抗虫性的研究，包括大豆上的 *Trialeurodes abutilonea* (McPherson, 1996; Lambert *et al.*, 1997)；马拉维木薯上的 *Bemisia afer* (Munthali, 1992)；荷兰番茄上的温室白粉虱 *T. vaporariorum* (De Ponti

et al., 1990; van Giessen *et al.*, 1995), 还有哥伦比亚木薯上的 *Aleurotrachelus socialis* (Bellotti *et al.*, 1999)。可归纳为以下特点: ①植物对粉虱的抗虫性研究在不断增加, 主要集中在对烟粉虱-B 型烟粉虱复合种群抗虫性研究上; ②只有少数专门的育种项目来负责开发对烟粉虱具有较高抗性的栽培品种; ③只有有限的近缘野生种作为对烟粉虱抗虫性育种计划的种源; ④把具病毒抗性和对烟粉虱抗性整合到同一遗传型中的联合抗性的研究是非常有限的(Bellotti and Arias, 2001)。

迄今为止, 至少有 15 个国家进行过植物对烟粉虱的抗性研究, 其中以美国的工作最多, 其次是印度和以色列, 以及西班牙和埃及。植物对烟粉虱一定程度的抗性在多种主要作物上都有研究(Meagher, 1994; Muniz and Nombela, 1997)。已经研究的主要植物有豆科(普通豆、大豆、绿豆、菜豆、花生、紫花苜蓿、牛豆)、葫芦科(甜瓜、南瓜、黄瓜和西葫芦), 十字花科(白菜、芥兰、花椰菜), 茄科(番茄、茄子、烟草和马铃薯)和一些其他植物(如棉花和秋葵)。大多数情形只有有限的种质参与评估, 重点往往放在栽培品种上。但被选出的具抗性或有抗性潜力的种质数量经常是很低的, 常常报道为受害较轻或有较低的烟粉虱种群(表 2-4)。对烟粉虱传播病毒的抗性研究进展一直缓慢(Morales, 2001)。下面概述植物对烟粉虱抗性的形态和生物机制。

表 2-4 已研究的对烟粉虱进行抗虫性筛选和评价的作物种质

作物	参评种质	被选出的种质	研究国家	文献来源
苜蓿	73	2 个科具有抗性	美国	Teuber <i>et al.</i> , 1996
甘蓝	64	光叶品种和抗性有关	美国	Farnham & Elsey, 1995
普通豆类	4	2 个遗传型不嗜食	波多黎各	Peña Rojas <i>et al.</i> , 1992
棉花	19	3	土耳其	Ozgur & Sekeroglu, 1986
棉花	3	1(光滑型)	以色列	Navon <i>et al.</i> , 1991
棉花和野生近缘种	19	1(野生种)	美国	Wilson <i>et al.</i> , 1993
陆地棉	24	4 个遗传型具较少卵量、幼虫量	美国	Meagher <i>et al.</i> , 1997
陆地棉	13	1 个感虫, 1 个抗虫	美国	Chu <i>et al.</i> , 2001
花生	150	0(无抗性)	美国	McAuslane <i>et al.</i> , 1995b
甜瓜	31	8(受害轻)	美国	Simmons & McCreight, 1996
甜瓜	8	2	委内瑞拉	Morales & Bastidas, 1997
大豆	14	3	美国	Lambert <i>et al.</i> , 1997
大豆	36	7	美国	McPherson, 1996
夏南瓜	19	感虫性无差异	美国	Paris <i>et al.</i> , 1993
番茄	1200	3	印度	Channarayappa <i>et al.</i> , 1992
番茄商品型	20	产卵的差别	美国	Heinz & Zalom, 1995
野生番茄	7	2	美国	Heinz & Zalom, 1995
茄子和其野生型	8+2	4(种群密度很低)	埃及	Soundararajan & Baskaran, 2001

(一) 形态抗性

形态抗性指植株部分器官或整株所具有的特定形态结构对昆虫产生驱避或耐害的特性,包括植物表面的毛状体、蜡质、颜色等(Abdallah *et al.*, 2001)。

1. 表面的毛状体

植物体表聚集的毛状体统称茸毛,有些与腺细胞相联,能分泌一定的液体,称为腺毛。作物因茸毛长而密能抗虫的例证很多,而对烟粉虱来讲,植物体表无毛或少毛则不适于烟粉虱产卵,而腺毛分泌的液体可能直接将其杀死,起抗生作用。

作物因茸毛少而抗虫:腺毛的有无(Ali, 1988; Riley *et al.*, 2001; Soundararajan and Baskaran, 2001)、腺毛的长度和宽度(Soundararajan and Baskaran, 2001)、腺毛的丰富程度和生长方向方位(McCreight and Kishaba, 1991; Kishaba *et al.*, 1992; Wilson *et al.*, 1993; Heinz and Zalom, 1995; Lambert *et al.*, 1995; McAuslane *et al.*, 1995a; McAuslane, 1996),都与对 B 型烟粉虱的抗性有关。B 型烟粉虱的有卵株率和落卵量与棉叶的光滑程度有关,毛多有利于卵的附着,因此光叶少毛的棉株能有效地减少落卵量和虫口密度,受害程度远远低于叶面多毛的棉花,在棉花抗性基因型中,星形毛及总毛量分别为 $14.2/\text{cm}^2$ 和 $67.2/\text{cm}^2$,而感性品种中分别为 $428.1/\text{cm}^2$ 和 $2439.6/\text{cm}^2$ (Rao *et al.*, 1990)。在甜瓜 *Cucumis melon* L. 中,无毛品种的抗性也证明大于有毛品种(Riley *et al.*, 2001)。

腺毛在抗虫性中的作用:腺毛分泌物的有无证明与烟粉虱的抗性有关(Liedl *et al.*, 1995)。Muigai 等(2002)在进行番茄种质对 B 型烟粉虱的抗性机制研究中,发现大多数死成虫都被围困在腺毛分泌物中而死亡。Muigai 等(2002)还分析评价了分泌物中各组分对烟粉虱成虫的驱除、熏蒸和残留毒杀效果,发现不同组分各具有不同的毒杀作用,说明多因子抗性成分存在于野生番茄种质中,如把抗性的各化学成分用遗传的方法组合到一个种质中,将产生烟粉虱更难克服的抗性。

体表光滑或粗糙和有无蜡质层:叶表光滑型对烟粉虱的抗性在很多植物中都得到了证实(Riley *et al.*, 2001)。对 B 型烟粉虱产卵的驱避性也在芥兰和甘蓝具少蜡光滑的遗传型中发现(Elsey and Farnham, 1994; Farnham and Elsey, 1995; Jackson *et al.*, 2000)。如羽衣甘蓝 *Brassica oleracea* var. *acephala* L. 叶片蜡质少,而具有光滑而发亮的表面,属于光滑表现型,对 B 型烟粉虱具有产卵驱避。然而,如果将光滑和有叶蜡的植株分别提供让其产卵,粉虱在二类植株上产卵量则相似,而且它们后代的发育和存活情况相同(Elsey and Farnham, 1994; Jackson *et al.*, 2000)。

2. 解剖特性

棉花叶片的厚度与维管束的深度显著相关,具有抗性的棉花中,表皮层和韧皮部之间的距离较远,叶片较厚(Rao *et al.*, 1990)。维管束的密度(Cohen *et al.*, 1996)和在叶片里的深度(Chu *et al.*, 1998, 1999)都与对 B 型烟粉虱的抗性有关,这是因为烟粉虱需花费较大的力气才能到达取食部位进行取食。在带有 *Mi* 基因的番茄品种上,其部分抗性是由于表皮和叶肉抑制烟粉虱刺吸式口器到达韧皮部筛网造成的(Jiang *et al.*, 2001)。

3. 叶片部位、龄期和形状

叶片部位：烟粉虱成虫严重侵袭棉花的第 7~11 茎节(从植物顶端数起)，而幼虫多为害第 11~15 茎节。在茎节第 3 节上分布最少，主要是由于其上的腺毛分泌苯酚造成的 (Abdallah *et al.*, 2001)。Simmons (1994) 比较了 B 型烟粉虱在 10 种蔬菜上产卵部位的选择性，90%~95% 的卵都产在植物叶片的下表面上，产卵表现一定的向地性。

叶龄：在陆地棉上，腺毛和烟粉虱密度之间的正相关关系受主茎上各棉节叶叶龄的影响，一些最年幼的叶虽然着生有很多星状腺毛，但和老叶相比烟粉虱数量却较少 (Chu *et al.*, 2001)。

叶形：秋葵叶形的棉花抗性强。此外，植物的成熟程度 (Byrne and Draeger, 1989) 和作物的种植模式 (Jackson *et al.*, 2000) 都与对烟粉虱的抗性有关。

4. 颜色

害虫在植物上产卵有一定部位，而且所选部位可随着植物的生长阶段、组织的老嫩、花器的有无而有变化，因此其选择性与特定器官的颜色也有关。如红色棉株对烟粉虱的诱引能力较绿色植株为小。

(二) 生物化学特性

生化抗性是指植株器官所产生的特定代谢产物使害虫消化系统受阻、厌食、降低体重、延缓发育历期，甚至中毒死亡，包括植物次生代谢物和植物营养两方面的作用。

1. 次生代谢物

植物次生代谢产物是植物抗虫性的主要生物化学基础。茄子 Brinjal 品种中的龙葵碱、苯酚、糖分和 pH 在烟粉虱的取食偏好性上起着不同的作用，其中品种 TS 00052 和 Arka neelakanta 几乎没有腺毛，龙葵碱、苯酚含量较高，其上的烟粉虱种群数量很低，具有较强的抗虫性 (Soundararajan and Baskaran, 2001)，单宁酸、苯酚含量和抗虫性成正相关 (Soundararajan and Baskaran, 2001)。在抗性棉中，苯酚、单宁酸含量也都比感虫棉高 (Rao *et al.*, 1990)。

对一些生化关系的揭示可能会有助于解释植物中与感染 B 型烟粉虱有关的生理综合症状。番茄中与蛋白有关的病理表达是由于烟粉虱的取食造成的。取食持续的时间以及与果实结构的距离影响着果实不规则成熟的严重程度。 α -生育酚、鲨烯(即三十碳六烯)和亚麻酸(即十八碳-9, 12 二碳烯)在银叶症状表达之前都有所增加。这些化合物可能与寄主植物的营养或结构及害虫的营养有关。

2. 营养组分

了解植物韧皮组织的营养成分及浓度对于充分理解烟粉虱对寄主植物的嗜好性是必需的，同时对于确定营养成分怎样随着寄主植物生理的特定改变(如水分胁迫、氮营养)而变化也是非常重要的，而这种生理改变无疑对烟粉虱的种群动态有着重要影响。

棉花中 P 元素缺乏时将使烟粉虱在真叶上的产卵量下降 38%~40%，而对在子叶上的

产卵量无影响；同时，寄主可接受性与叶片低蔗糖含量显著相关，但似乎与氨基酸浓度或氨基酸与蔗糖比无关(Skinner and Cohen, 1994)。在抗性棉中，P、Mg、N、Fe 含量都比感虫棉的低(Rao *et al.*, 1990)。棉花中 N 营养有利于烟粉虱种群发展，因而也导致蜜露的分泌量增多(Bi *et al.*, 2001)。在 Giza 80、Giza 45 和 Giza 85 三个棉花品种上，低糖分与烟粉虱种群密度之间呈显著正相关，尤其是在品种 Giza 80 上表现更为显著。在 Giza 45 上，Cu 含量较高并与烟粉虱成虫数量呈正相关，Fe、N、K 的含量与 8 月、9 月份烟粉虱成若虫数量呈负相关；在 Giza 80 上，烟粉虱种群数量与 Zn 含量之间在 7 月份呈正相关，8 月份呈负相关；在 Giza 85 上，Fe、Zn、Mn、Mg 含量与烟粉虱 7 月份的若虫数量呈正相关(Abdallah *et al.*, 2001)。茄子 Brinjal 栽培和野生型中的糖含量、pH 与抗虫性呈负相关(Soundararajan and Baskaran, 2001)。

(三) 植物抗虫性的应用

植物对烟粉虱的抗虫性筛选及抗虫机制的研究工作，极大地推动了抗烟粉虱的作物品种在生产实际中的应用(表 2-5)。种植抗虫或抗病毒的作物品种，可减轻受害程度。如苏丹已对一种高抗棉花曲叶病毒(CLCV)-B6L 的棉花品种和一种抗番茄黄曲叶病毒(TYLCV)的耐性番茄品种种植多年。几种光滑无毛的棉花品种，如 Texas 121、Victory 等，对烟粉虱具有抗性，并且产量高，还有其他理想的特性，已经在生产上推广应用(Gutierrez, 1997)。在美国得克萨斯州 Lower Rio Grande Valley 地区的观察表明，一旦受到 B 型烟粉虱的威胁，可以通过种植光叶棉花来减少损失，提高产量。紫花苜蓿品种 UC Impalo F 对 B 型烟粉虱具有抗性，已在生产上推广应用(Teuber, 1996)。蔬菜上，芥兰的两个杂交种和自由授粉的种质相比有较强的抗性，但 3 个具光滑叶的遗传型是抗性最高的(Jackson *et al.*, 2000)，因此，对 B 型烟粉虱种群的控制可以通过种植少蜡型的芥兰或其他甘蓝品种来减少产卵量，并且对自然天敌也没有不利作用，有时甚至有促进作用(McAuslane *et al.*, 1997)。两种西葫芦品种 Sunseed 3 和 A21-7 已被证明对银叶症状有抗性，但对烟粉虱的种群数量无抑制作用。在番茄中，已定位到 Mi 抗性基因(Nombela *et al.*, 2000)。

表 2-5 对烟粉虱具有一定抗性基因型的作物

作物种类	抗性机制	研究国家	文献来源
番茄	驱避(腺毛)	印度	Channarayappa <i>et al.</i> , 1992
番茄	腺毛密度	美国	Heinz and Zalom, 1995
番茄(野生)	酰基糖	美国	Liedl <i>et al.</i> , 1995
莴苣	乳汁包围	美国	Dussourd, 1995
花椰菜	光滑叶片	美国	Farnham and Elsey, 1995
大豆	驱避	美国	Lambert <i>et al.</i> , 1995
大豆	无毛	美国	McAuslane, 1996
甜瓜	不选择性	委内瑞拉	Morales and Bastidas, 1997
甜瓜	无毛	美国	Riley <i>et al.</i> , 2001
棉花	耐害性	西班牙	Gutierrez, 1997
棉花	不明确	美国	Smith <i>et al.</i> , 1998
西葫芦	耐害性	美国	Cardoza <i>et al.</i> , 1999

第六节 天 敌

一、捕食性天敌

能够捕食烟粉虱的天敌种类很多,目前已报道的约有 114 种(隶属 9 目 31 科),其中瓢虫 24 种、捕食蝽 25 种、草蛉 14 种、捕食螨 17 种(Gerling *et al.*, 2001)。虽然已记录的烟粉虱天敌种类众多,但真正用于研究应用的只有很少几个种类,且大部分都是多食性捕食者。Dean 等(1995)指出多食性捕食者具有行为可塑性的特点,通过取食多种猎物,可以提高捕食者的作用,并且行为可塑性也可保证当烟粉虱种群密度较低或缺乏时,能够利用其他猎物得以保持种群的繁衍。Cohen 等(1997)比较了烟粉虱和蚜虫体内氨基酸含量的差异,结果表明烟粉虱体内的蛋氨酸含量明显较低,不能满足许多捕食者的发育和生殖需求,从而造成了捕食者的多样性。多食性捕食者需要含蛋氨酸丰富的猎物以满足其发育的需求,而专食性捕食者的发育则能与烟粉虱特有的生物化学组分相适应。

(一) 瓢虫类

能够捕食烟粉虱的瓢虫虽然种类较多,但研究应用较成功的是小黑瓢虫 *Delphastus catalinae*。小黑瓢虫原产于美国,为粉虱的专食性捕食者(Gordon, 1985),在美国加利福尼亚州等地已成功应用于控制棉花和观赏植物圣诞红上的烟粉虱(Heinz *et al.*, 1994; Hoelmer *et al.*, 1993)。小黑瓢虫的繁殖与粉虱种群密度的高低有关,当粉虱密度较低时,小黑瓢虫不能维持种群繁衍(Gerling and Stern, 1993)。Hoelmer 等(1993)报道小黑瓢虫在室内以取食粉虱的卵生殖力最强,在田间取食粉虱若虫时生殖力较大,研究还表明当粉虱密度较低时,还可取食红蜘蛛等其他猎物。虽然小黑瓢虫能够捕食已被寄生的粉虱若虫,但随着粉虱若虫体内蚜小蜂的发育,小黑瓢虫能够逐渐辨别并喜欢捕食未被寄生的粉虱若虫(Heinz *et al.*, 1994; Gerling and Stern, 1993)。此外, Liu 和 Stansly(1999)报道小毛瓢虫 *Nephaspis oculatus* 虽然捕食烟粉虱的潜能较小,但其搜索力明显强于小黑瓢虫,因此在粉虱密度较低时,该种瓢虫能够维持较高的种群。Legaspi 等(1996)用选择性试验表明,刀角瓢虫 *Serangium parcesetosum* 喜欢捕食烟粉虱的卵和若虫。Abboud 和 Ahmad(1998)报道该种瓢虫还可以捕食柑橘粉虱 *Dialeurodes citri* 等多种粉虱。Kirk 和 Thistlewood(1999)报道瓢虫 *Clitostethus arcuatus* 虽能取食多种粉虱,但更偏爱捕食烟粉虱。

(二) 捕食蝽类

捕食蝽类几乎全为多食性,可以捕食烟粉虱、蚜虫和蓟马等昆虫。研究应用较多的为盲蝽 *Macrolophus caliginosus*。盲蝽能够捕食烟粉虱的卵、若虫和成虫,且更嗜食粉虱卵(Barnadas *et al.*, 1998)。当粉虱密度较低时,该盲蝽可取食某些花卉植物以维持种群。在欧洲, *M. caliginosus* 已被大量应用于防治烟粉虱和温室白粉虱。由于该盲蝽需 1 个多月时间才能建立种群,因此配合释放粉虱丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 及时控制烟粉虱种群增长的技术已被提出。但是由于 *M. caliginosus* 能够捕食已被寄生的粉虱若虫,该释放技术曾有争议,但目前的研究表明,同时释放 *M. caliginosus* 和粉虱丽蚜小蜂是保持温

室中粉虱种群密度较低的关键因素(Castane *et al.*, 2000)。目前此项措施已在地中海流域的一些国家得到应用。Abd-Rabou(1999)报道,在茄子地以 2 头/株的释放量连续释放 3 次 *M. caliginosus*, 1 个月后粉虱种群便可得到有效抑制;以 0.5~1 头/m² 的释放量每两周释放 1 次,并同时每周释放 1 次粉虱丽蚜小蜂,则能有效地控制温室中番茄粉虱的危害。此外, Huang 和 Polaszek(1998)报道了几种小花蝽也可捕食烟粉虱,但尚缺乏详细研究报道。

(三) 草蛉类

草蛉属多食性捕食者,虽可取食粉虱若虫,但其仍以捕食蚜虫为主(Tauber *et al.*, 2000),其中研究应用最多的是普通草蛉 *Chrysoperla carnea* 和红通草蛉 *Chrysoperla rufilabris*。在实验室内两种草蛉捕食烟粉虱时都可完成发育,但发育时间明显较取食粉虱和其他猎物混合物的延长。普通草蛉偏爱取食粉虱而非蚜虫,红通草蛉则偏爱捕食蚜虫而非粉虱(Dean and Schuster, 1995)。Senior 和 McEwen(1998)报道,若普通草蛉只取食温室白粉虱则不能完成发育, Balasubramani 和 Swamiappan(1994)报道普通草蛉取食烟粉虱时发育历期比取食棉蚜或鳞翅目蛾卵的明显缩短,造成这种差异的原因尚未见报道。另外, Hoelmer 和 Kirk(1999)报道粉蛉 *Semidalis flinti* 可以捕食烟粉虱。

(四) 捕食螨类

多数捕食螨类可以以多种粉虱、叶螨和花粉等为食(Gerling *et al.*, 2001)。El-Banhawy 等(1999)报道,当植物上存在有大量烟粉虱时,捕食螨 *Cydnoseius negevi* 对二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 的捕食量降低,但可以提高该捕食螨的繁殖能力。Nomikou 等(2001)研究了捕食螨 *Typhlodromus swirskii* 和 *Euseius scutalis* 以烟粉虱为食物时的繁殖特性,发现这两种捕食螨比烟粉虱具有更高的内禀增长力,并且在温室内单一种植的作物上能够抑制烟粉虱种群的增长,从而表明这两种捕食螨可能有进一步利用的价值。

此外,寄主植物的形态特征与捕食性昆虫行为之间的关系也有研究报道。小黑瓢虫在无绒毛的番茄品种上行走的速率和生殖力均高于有绒毛的品种,但在有绒毛品种上的停留时间却长于无绒毛的品种,因此有绒毛的品种对小黑瓢虫的捕食率影响不大(Heinz and Zalom, 1996)。棉花品种的形态特征如有毛与无毛对小黑瓢虫的捕食量亦无影响(Guershon and Gerling, 1999)。Legaspi 等(1996)报道,刀角瓢虫在芙蓉属植物上的存活率明显高于在番茄、甜瓜和黄瓜上,但在黄瓜上对粉虱的捕食率高于在其他植物上;红通草蛉捕食甜瓜和黄瓜上的烟粉虱能正常发育,但取食圣诞红上烟粉虱的卵和若虫后不能羽化为成虫,这可能与不同植物上的烟粉虱其营养成分不同以及不同的植物形态特征有关。

二、寄生性天敌

烟粉虱的寄生性天敌种类众多,其中 *Encarsia* 属 200 余种, *Eretmocerus* 属 14 种, *Amitus* 属和 *Metaphycus* 属各有几种(Gerling *et al.*, 2001)。我国约有 19 种,主要是恩蚜小蜂属 *Encarsia* 和浆角蚜小蜂属 *Eretmocerus* 的种类(Huang and Polaszek, 1998)。van

Lenteren 等(1997a)综述了蚜小蜂科的寄生蜂在温室中对蚧虫、蚜虫和粉虱等害虫的生物控制效果。蚜小蜂均为孤雌生殖,可寄生烟粉虱的各龄若虫并从烟粉虱4龄若虫(即伪蛹)羽化出成蜂。恩蚜小蜂属和浆角蚜小蜂属的蚜小蜂主要产卵寄生烟粉虱的2~4龄若虫,但后者更喜欢产卵寄生烟粉虱的2龄若虫。蚜小蜂成虫可取食粉虱若虫和蜜露,以获取营养和能量。

(一) 恩蚜小蜂属

多数恩蚜小蜂为单寄生,少数为重寄生或多寄生。该属种类均将卵产在寄主体内,卵为双倍体,解剖研究发现恩蚜小蜂的1龄、2龄幼虫无气门,3龄以后方具有呼吸用的气门组织(Gerling, 1966)。由于粉虱丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 能成功地防治温室白粉虱(van Lenteren *et al.*, 1997a),因此,国内外对其控制烟粉虱的潜能也做了较多研究。Hoddle 等(1998)综述了丽蚜小蜂成虫和幼虫的生物学特性,与粉虱相互作用时的种群动态及在温室中的商业应用情况。Enkegaard(1993)研究了不同温度下丽蚜小蜂对烟粉虱的控制潜能,并认为在16~28℃范围内利用该蜂控制烟粉虱是可行的。De Barro 等(2000b)报道了丽蚜小蜂等5种寄生蜂对烟粉虱的控制作用,并探讨了寄主植物对寄生蜂行为的影响。Abd-Rabou(1998)研究了释放丽蚜小蜂对烟粉虱的控制作用,结果表明寄生率可达83%,取得了良好的控制效果。Hoddle 和 Driesche(1999)以圣诞红为寄主植物,评价了大量释放丽蚜小蜂和浆角蚜小蜂 *Eretmocerus eremicus* 控制烟粉虱的潜能后认为,丽蚜小蜂不能有效地控制圣诞红上的烟粉虱。以上研究结果的不同可能与丽蚜小蜂的地理种群、寄主植物等因素有关。丽蚜小蜂的 Beltsvilla 品系较 Koppert 品系能寄生更多的烟粉虱(Henter and van Lenteren, 1996; Henter *et al.*, 1996)。因此当温室粉虱和烟粉虱混合发生时,Beltsvilla 品系具有更好的控制潜能(van Lenteren *et al.*, 1997b)。

恩蚜小蜂(*E. pergandiella*)是另一种报道较多的寄生性天敌。Schuster 等(1996)研究了烟粉虱若虫不同龄期和不同的寄主作物对恩蚜小蜂发育和寄生行为的影响,结果表明恩蚜小蜂可寄生各个龄期的粉虱,但对3龄、4龄若虫的寄生率最高,而作物种类对其发育历期影响不大。Liu 和 Stansly(1996)通过烟粉虱不同龄期的组合研究了恩蚜小蜂对烟粉虱的寄生效率,也得出类似的结果。Hunter(1989)在研究中发现,如果未被寄生的粉虱数量和已被寄生的粉虱数量相当,恩蚜小蜂成虫所产的卵以雄性为主;如果未寄生的粉虱数量占优势,则其后代多为雌性,而且复寄生多发生在已被寄生过的寄主体内。Liu 和 Stansly(1996)认为这种现象有利于寄主-天敌系统的稳定,但其机理尚不清楚。Onillon 等(1994)认为释放恩蚜小蜂防治烟粉虱会导致粉虱丽蚜小蜂寄生率的降低。Gabarra 等(1999)在地中海流域引进该蚜小蜂防治烟粉虱时也发现粉虱丽蚜小蜂种群密度有所下降,但两种蚜小蜂相互作用的机理尚未见报道。

(二) 浆角蚜小蜂属

浆角蚜小蜂属的种类均为单寄生,多数为孤雌产雄生殖,少数也可行孤雌产雌(Gerling, 1966; Gerling *et al.*, 2001)。浆角蚜小蜂在烟粉虱1龄若虫腹部下面产卵,发育至1龄幼虫时,从寄主腹部钻进体内,1龄幼虫鸭梨形,2龄和3龄幼虫球形,具有凹陷的口器,以寄主体液为营养(Foltyn and Gerling, 1985)。浆角蚜小蜂 *E. mundus* 和 *E.*

eremicus 是该属中研究应用较多的两个种。*E. mundus* 寄生烟粉虱 2 龄若虫时寄生率和羽化率最高, 寄生 1 龄若虫时发育时间最长, 并且寄生 2 龄若虫引起的寄主死亡率和寄生蜂存活率最高(Jones and Greenberg, 1998)。Headrick 等(1999)研究了 *E. eremicus* 的生殖系统及繁殖参数, 并运用生命表方法评价了 *E. eremicus* 在两种寄主植物上的控制潜能。*E. eremicus* 既可寄生烟粉虱又可寄生温室粉虱, 而 *E. mundus* 不能寄生温室粉虱。因此, 当温室中两种粉虱同时存在时, 可释放两种寄生蜂对其加以控制。Hoddle 等(1999)对 *E. eremicus* 控制温室圣诞红上的烟粉虱的释放技术进行了两种释放方法(高-低释放策略和低-高释放策略)的研究。结果表明, 释放方法不同, 对粉虱的净生殖力、寄生率等影响不同。据报道在西班牙东南部等地利用 *E. eremicus* 控制番茄和辣椒上烟粉虱的面积已分别达约 500hm² 和 1000hm²。

此外, Joyce 等(1999)报道 *Amitus* 属的寄生蜂喜欢寄生 1 龄烟粉虱若虫, 并且成虫羽化后即可产卵寄生, 产卵期大约 3d, 一生可产卵 60 余粒。

三、病原真菌

由于细菌、病毒等微生物主要通过口器的浸染引起昆虫感染发病, 因此这类昆虫病原物对粉虱类害虫似乎不起作用。而病原真菌可以穿透昆虫体壁引起感染, 故在粉虱病原物中研究应用最多。

目前研究报道较多的烟粉虱病原真菌多集中在丝孢菌纲, 主要为拟青霉菌 *Paecilomyces*、轮枝菌 *Verticillium* 和座壳孢属 *Aschersonia* 的一些种类。玫烟色拟青霉菌 *Paecilomyces fumosaroseus* 是一种分布广泛的昆虫病原真菌, 能引起多种昆虫染病(Smith, 1993)。该菌对烟粉虱卵侵染率很低(Lacey *et al.*, 1999); 对烟粉虱若虫尤其是低龄若虫侵染率很高; 对烟粉虱成虫侵染率较低(Wraight *et al.*, 1998), 但在适宜条件下也能引起烟粉虱成虫流行病的发生(Osborne and Landa, 1992)。玫烟色拟青霉菌已在美国、印度次大陆等国家的温室和大田的烟粉虱种群中引起流行病(Lacey *et al.*, 1993); 在美国已作为微生物杀虫剂用于扶桑、一品红等烟粉虱的防治, 推荐使用量为 3kg/hm², 每隔 5~7d 施用 1 次, 连续使用 2~4 次, 效果较好(Osborne and Landa, 1994)。蜡蚧轮枝菌 *Verticillium lecanii* 是寄生蚜虫、介壳虫和粉虱等昆虫的一种虫生真菌, 对烟粉虱卵的侵染率极低, 但对粉虱若虫的侵染率很高, 并且各龄若虫间的侵染率无差异(Medae and Byrne, 1991)。在西班牙南部, 温室粉虱和烟粉虱往往混合发生, 当地居民在释放 *E. eremicus* 和小花蝽 *Orius laevigatus* 时, 结合使用蜡蚧轮枝菌, 取得了较好的控制效果。白僵菌 *Beauveria bassiana* 是一种寄生多种昆虫的病原真菌, 对烟粉虱卵的侵染率很低, 但对若虫的侵染率很高, 并且龄期越低越易被侵染(Wraight *et al.*, 1998; Ramos *et al.*, 2000)。白僵菌已在温室和大田试验中显现出较大的控制潜能。此外, Fransen(1990)报道粉虱座壳孢菌 *Aschersonia aleyrodis* 和扁座壳孢菌 *A. placenta* 对烟粉虱也有较好的侵染率, 并且粉虱若虫最易受感染, 同时还可引起粉虱成虫和卵流行病的发生。Faria 和 Wraight(2001)对烟粉虱病原真菌的自然发生、产品加工技术及商业应用等进行了论述。

对烟粉虱的生物防治研究已取得不少成绩, 通过释放天敌防治烟粉虱的工作至今已有 30 年的历史, 丽蚜小蜂、小黑瓢虫、草蛉及盲蝽等已实现工厂化生产(Cranshaw *et al.*,

1996; van Lenteren, 1997b; Gerling *et al.*, 2001)。但是,从烟粉虱的天敌资源及如何充分发挥它们的控害作用来看,仍然有许多问题需要研究,尤其是以下几个方面的工作尤为迫切:第一,烟粉虱天敌资源的鉴定和评价,尤其是优势种天敌的生物学和生态学特性的研究。第二,天敌、寄主及寄主植物之间的相互联系,不同种天敌的种内或种间作用机制。第三,烟粉虱天敌资源保护技术的研究。正如 Naranjo(2001)所指出的,天敌的保护应该是烟粉虱生物防治的中心内容,如何保护自然界的天敌使其与人类的生产活动相一致,如何协调生物防治与其他防治方法尤其是化学农药防治之间的关系,是烟粉虱综合治理的关键所在。第四,烟粉虱生物防治技术与烟粉虱传播病毒病之间关系的评价。由于烟粉虱传播多种病毒病并引起严重的经济损失,因此,如何制定烟粉虱生物防治策略,以及如何评价烟粉虱传播病毒病所引起的损失与生物防治成果之间的关系等有待更深入的研究。

第七节 抗药性及其治理

一、抗药性现状

防治烟粉虱的传统杀虫剂包括有机氯、有机磷、氨基甲酸酯和拟除虫菊酯类等。烟粉虱对有机磷和氨基甲酸酯杀虫剂的抗药性的产生报道较早。Prabhaker 等(1985)报道美国烟粉虱对甲基对硫磷和甲丙硫磷产生抗药性。Dittrich 等(1990)报道了在土耳其和苏丹的烟粉虱对久效磷、乐果、甲胺磷有较高的抗药性和对丙溴磷有较低的抗药性。近年来,有机磷类的抗药性表现分布更为广泛,早已经达到全球范围(Cahill *et al.*, 1995)。烟粉虱对菊酯类杀虫剂的抗药性也广泛存在(Denholtm *et al.*, 1996; Cahill *et al.*, 1996a),在苏丹棉田由于菊酯类农药的广泛使用,烟粉虱对氯氰菊酯和溴氰菊酯的抗药性比在 20 世纪 80 年代中期抗药性分别增长 3~170 倍和 350 倍,但是对氟氯菊酯的抗药性上升相对较慢。近年研究表明,巴基斯坦棉花上烟粉虱对氟氯菊酯和其他一些较老的菊酯类杀虫剂表现较高的抗性(Cahill *et al.*, 1995)。美国报道了通过实验室选育的 B 型烟粉虱对氟氯菊酯抗药性可达 28 000 多倍(Tan and Riley, 2000)。对菊酯类杀虫剂的抗药性还明显表现在温室等设施栽培较为发达的英国、荷兰、西班牙、以色列、土耳其、津巴布韦等国家(Cahill *et al.*, 1996a)。有机氯类杀虫剂在国外广泛使用的主要是硫丹,烟粉虱对硫丹在世界不同地区产生了 20~360 倍不等的抗性,尽管抗性要低于有机磷和菊酯类杀虫剂,但是通过田间模拟试验,也证明的确产生了抗性(Denholtm *et al.*, 1996)。

20 世纪 90 年代初以来,昆虫生长抑制剂噻嗪酮、吡丙醚和烟碱类杀虫剂吡虫啉、阿克泰等陆续投入市场。噻嗪酮是一类可以抑制烟粉虱几丁质合成的杀虫剂,通过干扰蜕皮过程几丁质的合成,导致幼虫死亡,并可引起烟粉虱产卵量减少,卵孵化率降低。噻嗪酮已经被广泛用于温室和大田防治烟粉虱,尤其是对传统杀虫剂产生抗药性的地区,噻嗪酮的使用更为广泛(Horowitz *et al.*, 1994; Dennehy and Williams, 1997)。自从 1989 年首次使用以来,在英国、荷兰、以色列、澳大利亚等地大田和温室,烟粉虱对其抗性达到 20~50 倍(Horowitz *et al.*, 1994; Cahill *et al.*, 1996b; Cottage and Gunning, 2002)。另一种使用较为广泛的昆虫生长抑制剂吡丙醚是保幼激素类杀虫剂,通过抑制蛹的羽化,可以减少成虫数量。吡丙醚于 1991 年在以色列开始使用(Horowitz *et al.*, 1999),1996 年美国西南部的几个州开始使用(Dennehy and Williams, 1997)。在以色列棉田上每

年使用 1 次,连续使用 4 年(1992~1995 年)即可产生中等以上强度的抗药性,随后连续 4 年(1996~1999 年)继续使用,抗性急剧上升,达到 500 多倍;90 年代中后期,随着烟碱类杀虫剂的推广使用,吡丙醚的使用量下降,同时对该药的抗性也在下降,目前已经降低到 1992 年时的水平(Horowitz *et al.*, 2002)。在以色列、西班牙和美国的研究还表明,烟粉虱对吡丙醚的敏感性随季节、地域变化很大,且通过限制使用或者轮用,其敏感性很快上升,防治效果提高(Horowitz *et al.*, 1999; do Valle *et al.*, 2002; Toscano *et al.*, 2001)。90 年代中后期,以烟碱型乙酰胆碱作为受体,作用害虫中枢神经系统的烟碱类杀虫剂用于防治刺吸类害虫的范围和用量不断扩大,由于其新的作用位点,很少或不受原来已经产生抗药性的杀虫剂的影响,可以更大范围地用来防治烟粉虱,目前广泛使用的是氯化烟碱类和硫代烟碱类。吡虫啉是世界上使用面积最为广泛的氯化烟碱类杀虫剂。烟粉虱对吡虫啉产生抗药性的报道始于西班牙南部的温室(Cahill *et al.*, 1996c)和在美国的室内汰选试验研究(Prabhaker *et al.*, 1997)。研究结果表明,B 型烟粉虱对吡虫啉的抗性有增长,但增长较为缓慢,数据显示烟粉虱在田间对吡虫啉的抗药性达到 78 倍时,室内抗性汰选达到 75 倍(Prabhaker *et al.*, 1997)。在西班牙的抗性监测表明,吡虫啉对啶虫咪、阿克泰有较强的交互抗性(Elbert and Nauen, 2000)。而在巴西、韩国报道了硫代烟碱类杀虫剂阿克泰可以很好的防治烟粉虱,且没有出现抗性(Lara *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2002)。但 Nauen 等(2002)报道在西班牙出现了对阿克泰、吡虫啉和啶虫咪的抗性达到 100 倍以上的 Q 型烟粉虱。Horowitz 等(2002)还报道在以色列棉田当啶虫咪使用 3 年后,B 型烟粉虱抗性达到 5~10 倍。

烟粉虱抗药性已经成为全球普遍存在的问题,目前,烟粉虱的抗药性问题要远远高于温室白粉虱的抗药性。根据烟粉虱在世界各地,尤其是在欧洲、美国、中亚和南亚以及澳大利亚的发生与防治状况,对其抗药性必须给予更多密切的关注。

二、抗药性产生的机理

昆虫对杀虫剂抗性的生化机制包括体壁穿透性降低、解毒代谢活性增强及靶标敏感性下降。烟粉虱对杀虫剂抗性的机制涉及到以下两个方面,但是不同的药剂种类其抗性机制有所不同。

(一) 解毒代谢酶活性增强

解毒代谢酶活性的增强是抗药性增加的重要因素,主要涉及重要的酶系有多功能氧化酶、羧酸酯酶和谷光甘肽转移酶等。

酯酶活性增强是抗性烟粉虱的重要生化特性。以 α -乙酸萘酯, β -乙酸萘酯作为底物测定对有机磷类杀虫剂产生 3~5 倍抗性的烟粉虱,酯酶活性要稍高于敏感品系的烟粉虱(Byrne and Devonshire, 1993),从而可用于鉴定抗性品系和敏感品系。Byrne 等利用电泳分离了在种群鉴定中起到重要作用的非特异性酯酶(Byrne *et al.*, 2000)。该研究以丁酸萘酯为底物,用缺乏 E_{0.14} 突变位点的 B 型烟粉虱系列和对拟除虫菊酯类杀虫剂产生抗药性、而对有机磷没有抗药性产生的 B 型烟粉虱,通过 ³H 标记的 DFP(羧酸酯酶抑制剂)、¹⁴C 标记氯菊酯的甲基和 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳分析,认为 E_{0.14} 的表达是因为酯酶活性

的增强,导致对菊酯类杀虫剂产生抗药性,同时认为 $E_{0.14}$ 分子质量不大于 66 000Da。从而结束了此前认为以乙酸萘酯为底物只能测定对有机磷和氨基甲酸酯类杀虫剂而不能有效测定菊酯类杀虫剂对烟粉虱的抗药性的研究(Cahill *et al.*, 1995)。

细胞色素 P_{450} 是昆虫体内微粒体多功能氧化酶系(MFO)的重要组成部分,尽管增效作用认为烟粉虱对烟碱类杀虫剂的抗性产生与 P_{450} 多功能氧化酶有关,但是 Byrne 等利用 ^{14}C 标记吡虫啉研究对吡虫啉产生达 126 倍抗性的 B 型烟粉虱,认为 B 型烟粉虱对吡虫啉的抗药性对 MFO 影响不明显,这与家蝇对吡虫啉的抗性对 MFO 影响明显的结果不同(Byrne *et al.*, 2003)。

利用增效剂增效研究表明,DEF 对有机磷类杀虫剂如马拉硫磷、甲基对硫磷和甲丙硫磷和拟除虫菊酯类杀虫剂氯菊酯有明显的增效作用,TPP 对马拉硫磷有明显的增效作用,这说明羧酸酯酶与对马拉硫磷的抗性有关(Prabhaker *et al.*, 1988)。PB 对拟除虫菊酯类杀虫剂和吡丙醚的增效结果比较明显(Devine *et al.*, 1998, 1999)。Nauen 等(2002)利用多功能氧化酶抑制剂 PBO 和 PPP 增效研究表明,Q 型烟粉虱对烟碱类杀虫剂的抗药性可能与微粒体细胞色素 P_{450} 多功能氧化酶有关。

(二) 靶标部位敏感性降低

乙酰胆碱酯酶敏感性的下降是导致害虫抗药性上升的主要原因之一。有机磷、氨基甲酸酯和昆虫生长抑制剂噻嗪酮主要是通过抑制乙酰胆碱酯酶(AchE)而发挥其毒性(Byrne *et al.*, 1993; Cottage and Gunning, 2002)。乙酰胆碱酯酶敏感性的变化改变了对这类杀虫剂的敏感性,使酶不受抑制或毒害而产生抗药性。Byrne 等(1993)采用微量滴定板法通过对氧磷或甲基吡啶磷的缺失表现,测定敏感和有机磷抗性品系乙酰胆碱酯酶比活力,结果分别为: $4.54(\pm 0.27)mOD/min$ 和 $6.32(\pm 0.48)mOD/min$ 。Cahill 等也认为烟粉虱对有机磷和拟除虫菊酯类杀虫剂的抗药性与乙酰胆碱酯酶有关(Cahill *et al.*, 1995)。Byrne 等在研究非敏感性乙酰胆碱酯酶动力学时又认为对不同的有机磷类杀虫剂产生抗药性的烟粉虱其乙酰胆碱酯酶活性可以和抗性比率不成正比,对久效磷产生 20 倍和 40 倍的以色列和巴基斯坦烟粉虱其相应的乙酰胆碱酯酶活性变化高达 2800 和 1400 倍,而对涕灭威和残杀威田间抗性达 116 倍的以色列和 4000 倍的巴基斯坦烟粉虱,其乙酰胆碱酯酶敏感性变化呈现中等。这一结果很好地解释了同一靶标酶杀虫剂其田间抗药性存在较大差异性的原因,对于指导农药合理混用有重要意义(Byrne *et al.*, 1997)。Byrne 等进一步证实对有机磷产生抗药性的品系其乙酰胆碱酯酶敏感性下降是产生抗性的原因(Byrne *et al.*, 2000)。Nauen 等利用 3H 标记吡虫啉进行受体结合研究表明,对烟碱类杀虫剂产生 100 倍左右抗药性的 Q 型烟粉虱的抗药性与乙酰胆碱酯酶受体关系不明显,认为烟碱类杀虫剂的解毒作用机制可能与氧化活性的降低有关,乙氧基香豆素可以阻止 AchR 与增强子相结合,当用来检查抗药性有关的多功能氧化酶的活性时,观察到对烟碱类杀虫剂产生抗药性的烟粉虱对乙氧基香豆素有较高的活性(Nauen *et al.*, 2002)。Cottage 和 Gunning 报道,同样作为入侵种的 B 型烟粉虱在澳大利亚使用噻嗪酮防治时出现的抗药性上升与乙酰胆碱酯酶的敏感性下降有关,这一结果也是对昆虫生长抑制剂新的作用位点的发现(Cottage and Gunning, 2002)。

有机氯环戊二烯类杀虫剂硫丹,在昆虫体内的主要作用是直接堵塞 GABA 受体离子通

道复合体的氯离子通道,导致神经抑制失灵,使神经突轴前乙酰胆碱释放量增加,引起重复后放,同时也造成 GABA 含量的增加,破坏机体维持兴奋与抑制的平衡状态,引起兴奋而死亡。研究认为对环戊二烯类产生抗性的烟粉虱出现相同位点丙氨酸到丝氨酸的突变。

此外,体壁穿透性降低是昆虫产生抗性的一个机制,已在多种昆虫中得到证实,但有关烟粉虱在这方面的研究尚未见报道。综上所述,在烟粉虱抗性发展过程中,常是几种因素联合在一起,形成更高的抗性。

三、抗药性监测

采用快速、简便、可重复性强的监测方法,精确地监测害虫敏感性变化可有效地控制抗药性的产生。目前已经报道的关于烟粉虱抗药性生物测定的方法有许多。其中成虫生测最广泛的使用方法是浸叶法,基本做法是将烟粉虱成虫接到浸过药液的叶盘上,叶盘的另一面放有琼脂(Horowitz *et al.*, 1988)。另外 3 种方法是 Potter 喷雾法、指型管药膜法和黄板黏胶法,在目前的抗药性监测中使用不多(Sivasupramaniam *et al.*, 1997; Prabhaker *et al.*, 1996)。Potter 喷雾法需要有 Potter 喷雾装置和配套的电冰箱等,试验中需要的虫量较大,在喷雾过程中,虫体易飞走;后两者仅适合对强触杀性杀虫剂的监测,实际使用中虫体易被黏死,有较大的局限性(Sivasupramaniam *et al.*, 1997; Prabhaker *et al.*, 1996)。我们通过试验也证明了浸叶法是切实可行的。

对噻嗪酮和吡丙醚类杀虫剂的监测需要观察烟粉虱的卵或者是幼虫,可以在接虫后观察从产卵到蛹的羽化率(Cahill *et al.*, 1996b)。

四、抗性治理

抗性治理的关键是科学合理使用杀虫剂,从而尽可能减少杀虫剂的使用(Palumbo *et al.*, 2001)。不同类型杀虫剂的轮用、混用可以降低、延缓烟粉虱的抗药性的发生。由于硫丹杀虫机制的独特,不会与现在广泛使用的有机磷和菊酯类农药产生交互抗性,被作为抗性治理的重要轮换农药品种。每季或每年严格限制某些杀虫剂的使用,尤其是生长抑制剂的使用,而使用其他杀虫剂,可成功地遏制烟粉虱的抗药性出现(Dennehy and Williams, 1997)。Cahill 等认为对吡虫啉产生抗性的烟粉虱对有机磷、氨基甲酸酯类和硫丹没有交互抗性,甲氰菊酯和乙酰甲胺磷混用导致药效降低,且更易产生抗药性(Cahill *et al.*, 1996c)。Prabhaker 等认为通过氟氯菊酯、硫丹和毒死蜱的混用及轮用可以有效控制烟粉虱大发生(Prabhaker *et al.*, 1998)。在韩国蔬菜田,吡丙醚和阿克泰的轮用可以降低烟粉虱对吡丙醚的抗药性(Lee *et al.*, 2002)。

根据不同杀虫剂对烟粉虱不同龄期和虫态的影响,Palumbo 等提出了在卵期使用吡丙醚,使用合成菊酯、吡虫啉和噻嗪酮防治 1 龄若虫,合成菊酯和噻嗪酮防治 2 龄若虫,噻嗪酮防治 3 龄若虫,吡丙醚防治 4 龄若虫(伪蛹),合成菊酯和吡虫啉防治成虫,可有效防治烟粉虱(Palumbo *et al.*, 2001)。Lee 等报道阿克泰防治成虫效果好于吡丙醚,但是对 3 龄若虫的防效相当,为 85%以上(Lee *et al.*, 2002)。

烟粉虱的抗药性将随着新的生物型的出现,表现出显著的生化和寄主范围的变化,产生更广泛的抗药性。已有报道,不同生物型在抗药性方面的差别较大,尤其以 B 生物

型烟粉虱抗药性要高于其他生物型。而入侵我国的烟粉虱为 B 生物型, 需要对与该虫的抗药性以及抗药性有关的农业技术防治、生物防治、化学防治、抗药性监测、酶系研究等方面进行大量的试验研究。目前, 对烟粉虱抗药性研究, 尤其是新烟碱类杀虫剂的抗药性研究, 还需从分子遗传与进化的角度进行深入探讨。

第八节 预防与综合治理

一、植物检疫

从本章第四节可见, B 型烟粉虱近 20 年来在全球许多国家和地区的扩散主要是通过引进观赏植物(尤其是一品红)人为传播的。因此, 在 B 型烟粉虱尚未发生的地区, 有必要严格实施植物检疫, 杜绝烟粉虱随花木等植物传入。

二、栽培防治

栽培防治就是设计和实施特定的作物栽培系统, 以创造不利于害虫繁殖、扩散、生存和为害, 而有利于天敌发挥控害作用的环境条件来减少害虫的危害。只有有了高效的栽培防治系统, 烟粉虱综合治理才可取得最佳的效果(图 2-3; 本节第五小节)。下面参照 Hilje 等(2001)有关烟粉虱栽培防治的综述, 将各种栽培防治方法按时间上避免、空间上避免、行为调控、寄主植物适合性调节、人工或机械去除 5 个方面进行介绍。这种归类主要是依据各种方法作用的方式或机制。另外, 这 5 类方式实施所需的范围依次从大到小, 即时间上避免的方法, 如作物休闲期、轮作等, 需要在一个区域范围内统一实施; 空间上避免、行为调控则需在田块、温室的层次上实施, 而后两类方法则往往涉及到单株的作物。

(一) 时间上避免

时间上有效避免的方法之一是在一个较大区域内一段时间停止种植烟粉虱喜食的作物, 使其缺乏食物而数量大减。由于烟粉虱寄主植物众多, 要在一个较大区域一段时间内彻底根除其寄主植物是难以或无法做到的, 但实践证明, 这种方法只要落实到位, 还是很有有效的。例如, 在多米尼亚 Azua 流域番茄种植区, 1988 年 B 型烟粉虱入侵后, 由于该虫及其所传植物病毒的危害, 随后几年整个产业遭受毁灭性的打击, 为了挽救当地番茄种植业; 1993 年起通过法规在整个产区内每年实施“一段时间无烟粉虱寄主作物”的做法, 即番茄主栽季节前 90d 内不允许栽种烟粉虱的寄主作物, 每年大约有 600hm² 的烟粉虱寄主作物在这段时间内特此被人工毁灭, 而将高粱作为这一段时间的替代作物。到 1997 年, 烟粉虱危害就大为减轻, 整个地区的番茄种植业得以恢复(Villar *et al.*, 1998)。

在以色列相对隔离的 Arava 地区, 1983 年以前, 只在每年 8 月到翌年 3 月种植作物, 每年 4~7 月是无作物的季节, 作物病毒病一直很轻。1983 年开始在春夏季节种植葫芦科作物, 从而开始周年不间断地种植各种作物。此后, 以烟粉虱传播的番茄黄化卷叶病毒、南瓜黄化花叶病毒、黄瓜花叶病毒开始流行成灾。从 1987 年起, 整个地区都统一实施在 6 月份终止种植所有作物, 清除所有作物残枝, 使作物地在再次种植之前至少保持一个月没有任何植被。实施这一措施后, 病毒病再未成灾(Ucko *et al.*, 1998)。

在美国南部,通过种植短季棉花使棉花收获提早、推迟冬季蔬菜和瓜类作物的种植,从而在两季作物之间形成了一个间隔期,对于压低烟粉虱的种群数量、控制其所传病毒病的危害起到了明显的作用(Hilje *et al.*, 2001)。

在中断烟粉虱寄主植物这一方法的实施中,一般需要对前茬作物的残枝予以彻底清除。

在一些情况下,调节作物播种期,避开季节性的种群高峰期和扩散期,也可有效地降低烟粉虱的种群数量。如在温带地区,春季敏感作物可早播,提前收获;秋季温室敏感作物适当晚播,避开秋季扩散高峰期。通过调整播种期可有效减轻烟粉虱危害也有许多成功的范例(Hilje *et al.*, 2001)。

(二) 空间上避免

空间上避免的方法主要有利用防虫网或非寄主植物阻隔、增加作物密度减少作物被害率。利用防虫网阻隔将在本节第五小节中予以介绍。

在寄主作物的四周种植一圈高秆的非寄主植物(如高粱)可以减少烟粉虱迁入到作物上的数量。这种方法用于防治蚜虫传病毒已证明相当有效。不过值得注意的是,蚜传病毒大多为非持久性病毒,蚜虫在获得病毒后几分钟到几小时就会丧失传病能力,而在非寄主植物上的刺探性取食行为又可加速其传病能力的丧失。而烟粉虱所传病毒一般为持久性和半持久性的,所以它们在获取病毒后几小时到几天一直能传毒(Nault, 1997)。因此,四周种植非寄主阻隔作物只能减少迁入寄主作物的虫量,而对烟粉虱个体的传毒能力影响不大,因此这一方法防治烟粉虱传毒的效果一般可能不如防治蚜虫传毒的好。

当单位面积上的作物株数增加,若烟粉虱种群数量不变,被病毒感染的作物比例就可下降,从而减少病毒病的危害。这一方法用于防治非洲木薯黄化病毒收到较好效果(Hilje *et al.*, 2001)。

(三) 行为调控

不同作物间作、地表覆盖物可以干扰烟粉虱在寄主搜索过程中的视觉和嗅觉行为。间作是指在一块作物地中两种以上的作物相间种植,如每 5~10 行主栽作物间种 1~2 行另一种作物。试验证明,葫芦科植物一般比番茄对烟粉虱的吸引力更强(表 2-3),但它们不是番茄黄花卷叶病毒的寄主植物。在约旦的大田试验表明,番茄作物中间种少量的黄瓜,并定期在黄瓜上喷施杀虫剂,可减少番茄上病毒病的危害。这一方法现已在中东一些国家广泛采用(Ioannou, 1997)。

其他已报道的间作组合有:木薯地中间作玉米、豇豆或花生;番茄地中间作绿豆、南瓜或茄子;棉花地中间作杂草 *Physalis wrightii* 或瓜类;瓜果地里间作花椰菜等(Hilje *et al.*, 2001),不过大多数组合都未经严格的试验来证明是否真的对防治烟粉虱有效。即使是同一组合,不同间作格局、作物地块大小等都可明显影响防治效果。

地表覆盖物可用无生命的材料如有色塑料碎片、也可以是地表覆盖植物。地表覆盖物,如塑料碎片、锯木屑、稻秆等,可以干扰烟粉虱的视觉,或因覆盖物吸收太阳能后发热,使降落在上面的烟粉虱被高温致死。银色、白色、黄色及透明的塑料碎片作为地

表覆盖物已被证明可有效降低作物上烟粉虱的数量及其所传的病毒病(Csizinszky *et al.*, 1995, 1997, 1999; Smith *et al.*, 2000)。这些覆盖物需要在作物的前期、即作物本身叶丛还不多时应用,才能达到较好的防治效果。值得注意的是,塑料覆盖物成本可能很高,且可对环境造成污染。

地表种植生长缓慢的覆盖植物也许是一种更可行、副作用更小的方法。在哥斯达黎加,多年生花生 *Arachis pintoi*、一种石竹 *Drymaria cordata*、芫荽 *Coriandrum sativum* 等植物已被用作番茄作物的地表覆盖植物。这些植物不是番茄黄化花叶病毒的宿主,也不被番茄的其他病原所侵染。这些植物对当地的小农场很适合,种子当地就有,植物本身可增加土地的有机质,且种子还可出售。大面积试验和示范表明,当在番茄地中种植这些植物作覆盖物后,可有效地控制病毒病,番茄产量大增(Cubillo *et al.*, 1999; Hilje, 2000)。

在夏威夷,当南瓜地中种植荞麦 *Fagopyrum esculentum*、黄芥 *Sinapis alba* 作为地表覆盖植物时,使南瓜上烟粉虱数量下降、银叶症状减轻(Hooks *et al.*, 1998)。

Finch 和 Collier (2000)在一系列实验研究的基础上就作物地面覆盖物对昆虫寄主搜索行为的干扰作用机理提出了一个理论,即“适当/不适当降落”理论。依据这一理论,植食性昆虫首先通过嗅觉找到寄主植物所在的生境,然后就会通过视觉降落到任何绿色或黄色的物体上,只有在降落到物体上后,它们才能通过触觉、味觉等来判断是否降落在合适的寄主植物上。如果发现不是合适的寄主,它们即离开做短距离飞行后再降落。如果反复多次降落在不合适的物体或寄主植物上,昆虫就会做长距离飞行离开所在生境。作物地表的覆盖物,无论是无生命的还是非寄主植物,都将增加昆虫不适当降落的次数,从而增加其离开的几率。

(四) 寄主植物适合性调节

植物营养,尤其是含氮量,对植物生长及烟粉虱的存活和繁殖可有明显影响。实验证明,烟粉虱体重随植物中必需氨基酸浓度下降而下降(Blackmer and Byrne, 1999)。在温室中的选择试验中发现,施肥量较多的一品红上,烟粉虱较多(Bentz *et al.*, 1995)。在棉花上,烟粉虱发育历期随氮肥施用量减少而延长(Blua and Toscano, 1994),发生高峰期的种群数量、蜜露分泌量随氮肥施用量增加而上升(Bi *et al.*, 2001)。可见,适当的施肥可减少烟粉虱的危害。

作物受水分胁迫往往有利于烟粉虱的种群增长。适当增加灌溉频率、使作物免受水分胁迫可减少烟粉虱的数量和危害。

(五) 人工或机械去除

观察表明,大雨后烟粉虱密度往往明显下降(Henneberry *et al.*, 1995; Hilje, 1995)。大雨可冲刷掉植物上的烟粉虱成虫、或提高湿度后对若虫发育和存活不利、或因湿度增加后昆虫病原真菌的侵染率提高。在用水量相同的情况下,喷灌与沟灌相比,作物上烟粉虱数量明显减少;同样是喷灌,加大单位时间喷水量也使虫口数量下降(Costle *et al.*, 1996; Costle, 2001)。

另外,在适当的时候拔除被烟粉虱或其所传病毒侵染的植株,也可起到一定的防治作用。

三、作物抗虫性利用

有关寄主植物对烟粉虱的抗性、抗性机理和实际应用已在本章第五节介绍。实践证明,许多寄主植物对烟粉虱具有显著的抗性。正如 Bellotti 和 Arias(2001)及 Morales(2001)所指出的,虽然有关寄主植物对烟粉虱抗性的研究近年在不断增加,但至今用于筛选的种质资源范围还很窄,针对病毒和烟粉虱的联合抗性的研究还很少(Bellotti and Arias, 2001; Morales, 2001)。因此,将传统育种方法与分子育种方法结合起来,选育对烟粉虱及其所传病的中抗或高抗作物品种,有必要受到更多的重视。

四、生物防治

烟粉虱的天敌十分丰富(见本章第六节),一些种类显示出很强的控害潜能,关键在于采用怎样的具体策略和方法以充分发挥它们的作用。

在害虫生物防治中,天敌的利用方法可归为 3 类,即输引(introduction)、助增(augmentation)和保护(conservation)。天敌的输引一般是针对外地传入的害虫,从害虫的原产地引进害虫的天敌,并通过少量的繁殖释放,使天敌在害虫入侵地定居并持续地控制这些害虫。助增一般是指大量繁殖和释放天敌,以增加温室或田间天敌种群的数量,提高天敌对害虫的控制效果,其中又分为接种式释放和淹没式释放两种策略。天敌的保护是指通过对生境的调控,削弱环境中那些不利于天敌存活的因子的作用,增强那些有利于天敌增殖和发挥控害效能的因子的作用。在现代农田生态系统中,杀虫剂的施用往往可直接杀死大量天敌,同时亚致死剂量的杀虫剂可对天敌的行为、生理等产生不利影响,降低其控害作用。因此,合理施用杀虫剂,在压低害虫数量的同时,使天敌少受或不受伤害,显得尤为重要。天敌生物要增殖和有效地发挥控害作用,其基本的生理和生态需求必须得到较好的满足,如替代寄主、成虫期食源、越冬场所、适宜的微栖境等。这就需要通过生境管理和调控、辅以一些直接保护措施来达到。事实上,无论是引进还是本地释放的天敌,往往都需要一个适宜的生境并辅以一些保护措施相配合,才能有效地发挥它们的控害作用。

针对烟粉虱生物防治的研究和应用主要是在近 20 年活跃起来的(Naranjo, 2001)。其中,天敌输引方面的工作正式报道尚很少,不过美国还是在这方面做了大量探索,并于 1989~1990 年,从意大利、以色列等地将恩蚜小蜂(*Encarsia partenopea*)引进到美国加利福尼亚州,在多点释放后成功定居(Lacey and Kirk, 1993; Kirk and Lacey, 1996)。B 型烟粉虱已被公认是一种入侵生物(本章第四节),但有关其天敌输引的工作却不多,原因可能包括:①烟粉虱作为一个复合种,世界各地都有其大量的天敌(本章第六节);②有关 B 型烟粉虱的起源中心虽有许多推论,但涉及的地域较广(本章第三节),给输引工作增加了难度。尽管如此,输引天敌在 B 型烟粉虱的生物防治中仍应受到必要的关注,因为从害虫原产地引进天敌已被反复证明是防治外来害虫最长期有效的一种方法。

通过天敌的助增防治温室作物上的烟粉虱已取得许多成功,丽蚜小蜂、小黑瓢虫、草蛉、盲蝽等已商业化生产应用,其中应用最广、最成功的当属丽蚜小蜂等寄生蜂(van Lenteren *et al.*, 1997a; Hoddle *et al.*, 1998; Gerling *et al.*, 2001)。荷兰、英国等国在多种温

室作物上释放丽蚜小蜂，结合使用少量噻嗪酮，可有效控制烟粉虱、温室白粉虱的危害。van Lenteren (2000)认为，温室中的烟粉虱可完全依赖释放天敌而得到有效控制，不需要施用任何化学杀虫剂。罗晨等(未发表资料)在北京市温室中的初步试验也表明，丽蚜小蜂是烟粉虱的有效天敌，并推荐如下使用方法：在保护地番茄或黄瓜上，要求温度在20~35℃之间，夜间不低于15℃，光照充足。①放蜂时期：作物定植后，即挂置诱虫黄板，发现烟粉虱成虫后，每天调查植株叶片，当平均每株有粉虱成虫0.5头左右时，即可第一次放蜂；②放蜂间隔期：每隔7~10天放蜂一次；③放蜂次数：3~5次；④放蜂数量：第一次3头/株，以后5头/株，原则上丽蚜小蜂与烟粉虱的比例为3:1；⑤释放虫态：可根据田间烟粉虱发生情况确定，原则上释放黑蛹的时间应比成蜂提前2~3d，最好成蜂与黑蛹混合释放；⑥放蜂位置：将蜂卡均匀分成小块置于植株上即可。

对于大田作物上的烟粉虱，其生物防治应立足于天敌的保护。对于生物防治中助增和保护这两类方法的采用，在认识上存在一些误区。由于人们易于注重短期效果，往往采用对待化学防治的观念来看待生物防治，以为人工繁殖大量的天敌生物，释放到害虫生境中将害虫迅速致死，就是生物防治的主要内容，这完全是一种曲解。在多数情况下，一个大田作物系统中除烟粉虱外常常还有其他数种主要害虫，而天敌生物往往作用对象较为专一，如果针对烟粉虱释放大量天敌，同时又针对其他害虫大量施用杀虫剂，释放的天敌就难以发挥作用，而同时针对多种害虫繁殖和释放多种、大量的天敌，即使技术上可以做到，经济上也难以可行。如前所述，烟粉虱能大量增殖的作物系统中，一般也存在有丰富的天敌生物，只要不被人为地大量杀死，环境条件保持适宜，它们就可迅速地繁殖起来，起着控制害虫的作用。可以说，农田是广阔无垠的天敌自然繁殖“工厂”，在种类和繁殖效率上，都是人工培育所望尘莫及的。20世纪90年代中后期在美国西南部半干旱区棉花上所做的大量试验表明，天敌的保护不仅是大田作物上烟粉虱生物防治的主要内容，而且是烟粉虱综合治理成功程度的一个基点和关键(Naranjo, 2001; Naranjo *et al.*, 2002b, 2003)。这个例证中，在作物早中期烟粉虱种群数量超过防治阈值时施用1次对烟粉虱高效、而对天敌低毒的选择性杀虫剂，如噻嗪酮或吡虫啉，就可使烟粉虱在此后的作物中后期被天敌等自然致死因子持续控制在防治阈值之下，而若使用对天敌选择性不强的杀虫剂，则需轮换不同杀虫剂施用5~6次以上，才能达到相似的防治效果。

除杀虫剂对天敌的作用外，作物品种、布局、生长状态都可对天敌的增殖和控害作用产生重要影响(Naranjo, 2001)。因此，天敌的保护往往与栽培防治紧密联系在一起。

五、物理防治

烟粉虱物理防治至今广泛成功应用的主要是防虫网阻隔和黄板诱杀。在许多情况下，整块作物在封闭的防虫网室内栽培，如在以色列，基本上所有的番茄都种在大的防虫网室内，可有效防治烟粉虱所传的番茄黄化卷叶病毒(Berlinger and Lebiush-Mordechi, 1996)。即使只在作物苗期或早期用防虫网或塑料薄膜隔离或覆盖，也可大大减轻烟粉虱的为害，尤其对其所传的病毒病防治相当有效(Hilje *et al.*, 2001)。

烟粉虱对黄色有强烈趋性，可在温室内设置黄板诱杀成虫。黄板可直接从市场购得，再涂上一层黏油(用10号机油加少许黄油调匀)。黄板可诱杀成虫，同时也可作为一种监测工具。方法是：均匀悬挂于植株上方，黄板底部与植株顶端相平，或略高于植株顶端。

当粉虱粘满板面时,需及时涂黏油,一般可 7~10d 重涂 1 次。

六、药剂防治

在大多数作物系统中,由于人为干扰打破了自然界的一些平衡,加之人类对作物经济性状的苛刻要求,即使是最成功的综合治理技术体系,往往也需要在一定的時候使用杀虫剂压低害虫数量。这里的问题往往不是杀虫剂是否有必要,而是如何实施最佳药剂防治策略,以最小的药剂用量,取得最佳的防治效果,并有利于形成一个持续有效的综合治理技术体系。药剂防治的最佳策略主要有 3 个组分:①简便、实用的防治阈值;②对天敌安全、害虫高效的选择性药剂;③预先启动且有效的抗药性治理策略。

Ellsworth and Martinez-Carrillo(2001)等美国昆虫学者针对棉花等作物上的烟粉虱发展了高效的取样技术,并通过大量的田间试验表明,若使用高效低毒的选择性杀虫剂,棉花上烟粉虱的防治阈值定为每叶 5 头成虫是可行的。

高效低毒的杀虫剂是药剂防治能否与生物防治相协调的又一个关键。正是由于有了吡虫啉、噻嗪酮、蚊蝇醚、三环锡等高效低毒杀虫剂的合理和广泛使用,才给美国西南部半干旱地区 20 世纪 90 年代中期以来棉花上烟粉虱的综合治理提供了机遇并获得巨大成功(Palumbo *et al.*, 2001; Ellsworth and Martinez-Carrillo, 2001)。高效低毒的选择性杀虫剂不仅可较快地压低虫口数量,还有助于天敌等生物因子在随后较长的时间持续发挥控制害虫的作用,即所谓的生物持效(bioresidual)(Naranjo, 2001; Ellsworth and Martinez-Carrillo, 2001)。

实践已经证明,烟粉虱对杀虫剂产生抗性的能力很强,即使是作用方式新颖的杀虫剂,该虫也可较快地产生抗性,因此,有必要预先启动有效的抗性治理策略,才能使高效的杀虫剂有较长的使用寿命并在烟粉虱综合治理中长期发挥作用(本章第七节)。

七、综合治理

综合治理就是依据生态学的原理,将上述各种防治方法有机地组成一个治理体系,经济、安全、持续有效地控制烟粉虱的危害,以求得最佳的经济、社会和生态效益。烟粉虱综合治理总体策略如图 2-3 所示。在这个总体策略金字塔中,栽培防治、抗虫品种的培育和利用、生物防治、物理防治是基础,这些方法的综合规划和实施,可以在较大区域内将烟粉虱的发生基数压到很低的水平,同时为药剂防治的成功实施提供了基础;而药剂防治只在当虫量较高时用于及时压低虫口数量,这一组分的策略和具体方法是否正确,又可直接或间接影响到金字塔基部组分尤其是生物防治的有效性和可行性;而只有有了经济、高效的取样技术和监测体系,才能随时客观地掌握害虫和天敌的发生动态,为金字塔顶部和基部各种方法的应用提供可靠的依据。

烟粉虱由于其一年多代且世代重叠、寄主范围广、扩散能力强、繁殖力高、耐高温、可传播多种植物病毒、对杀虫剂产生抗性快等特性,而使其危害严重且难以控制。尽管如此,近 10 年来在美国西南部半干旱农业区棉花上烟粉虱的综合治理实践表明,图 2-3 所展示的总体策略是可行和持续有效的(Ellsworth and Martinez-Carrillo, 2001)。在亚利桑那州,1991~1995 年每季棉花上针对烟粉虱的施药次数平均达 4.1 次,而从 1995 年以后

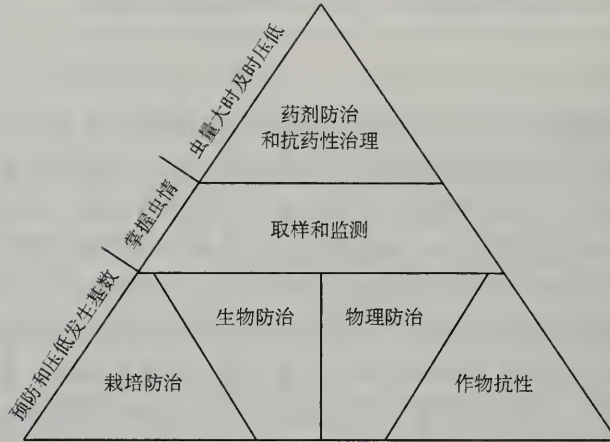


图 2-3 烟粉虱综合治理策略示意图

此策略的核心思想是强调栽培防治、作物抗虫品种的培育和应用、生物防治、物理防治方法的综合规划和实施，以预防和压低发生基数

大面积有效地实施如图 2-3 所示的综合治理，1996~2000 年平均每季棉花上针对烟粉虱的施药次数降至 1.18 次。许多棉农报道，他们在一些年份的整个季节都不需再针对烟粉虱施药。

在我国，烟粉虱在近两年呈现大面积暴发成灾之势，有些类似于美国 20 世纪 90 年代初期的情形。我们应参照美国烟粉虱综合治理的成功经验，尽快在全国协作开展烟粉虱的综合治理，以尽可能减少这一入侵害虫对我国农业和社会的影响。

(刘树生 张友军 罗 晨 万方浩)

主要参考文献

- 陈连根. 1997. 烟粉虱在园林植物上为害及其形态变异. 上海农学院学报, 15(3):186~189 [Chen L G. 1997. The damage and morphological variations of *Bemisia tabaci* (Gennadius) on ornamental plants. *J. Shanghai Agri. College*, 15(3): 186~189]
- 冯兰香, 杨宇红, 谢丙炎, 杨翠荣. 2001. 警惕烟粉虱大暴发导致新的蔬菜病毒病流行. 中国蔬菜, (2): 34~35 [Feng L X, Yang Y H, Xie B Y, Yang C R. 2001. Likely epidemics of virus diseases in vegetable crops caused by outbreaks of *Bemisia tabaci*. *China Vegetables*, (2): 34~35]
- 柯俊成, 陈秋男, 王重雄. 2002. 烟粉虱种群(*Bemisia tabaci* species complex)分类学综述. 台湾昆虫, 22: 307~341 [Ko C C, Chen C N, Wang C H. 2002. A review of taxonomic studies on the *Bemisia tabaci* species complex. *Formosan Entomol.*, 22: 307~341]
- 李凤荪. 1953. 中国经济昆虫(中册). 湖南农学院丛刊第 1 号 666 [Li F S. 1953. Economic Insects from China (Volume 2). *Publications of Hunan Agricultural College*, 666]
- 李月红, 刘树生. 2004. 植食性昆虫的学习行为. 昆虫学报, 47(1): 106~116 [Li Y H, Liu S S. 2004. Learning in phytophagous insects. *Acta Entomol. Sinica*, 47(1): 106~116]
- 罗晨, 姚远, 王戎疆, 阎凤鸣, 胡敦孝, 张芝利. 2002. 利用 mtDNA CO I 基因序列鉴定我国烟粉虱的生物型. 昆虫学报, 45(6): 759~763 [Luo C, Yao Y, Wang R J, Yan F M, Hu D X, Zhang Z L. 2002. The use of mitochondrial cytochrome oxidase I (mt COI) gene sequences for the identification of biotype of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in China. *Acta Entomol. Sinica*, 45(6): 759~763]

- 罗晨, 张君明, 石宝才, 张帆, 张芝利. 2000. 北京地区烟粉虱 *Bemisia tabaci*(Gennadius)调查初报. 北京农业科学, 18(增刊): 42~47 [Luo C, Zhang J M, Shi B C, Zhang F, Zhang Z L. 2000. Preliminary investigation of host-plant of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in Beijing. *Beijing Agri. Sci.*, 18(Suppl.): 42~47]
- 钦俊德. 1995. 昆虫与植物关系的研究进展和前景. 动物学报, 41(1): 12~20 [Qin J D. 1995. Studies on insect-plant relationships: recent trends and prospect. *Acta zool. Sinica*, 41(1): 12~20]
- 吴杏霞, 胡敦孝. 2000. 温室白粉虱、烟粉虱及银叶粉虱的识别. 北京农业科学, 18(增刊): 36~41 [Wu X X, Hu D X. 2000. Differences of three sympatric whiteflies, the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood), sweetpotato whitefly (*Bemisia tabaci* Gennadius) and silverleaf whitefly (*Bemisia argentifolii* Bellows and Perring). *Beijing Agri. Sci.*, 18(Suppl.): 36~41]
- 阎凤鸣. 1991. 粉虱的形态变异. 北京农学院学报, 6(1): 68~71 [Yan F M. 1991. Morphological variations in whiteflies. *J. Beijing Agri. College*, 6(1): 68~71]
- 张广学, 王林瑶. 1972. 棉虫图册. 北京: 科学出版社 [Zhang G X, Wang L Y. 1972. An Atlas of Cotton Insects. Beijing: China Science Press]
- 张永军, 梁革梅, 倪云霞, 吴孔明, 郭予元. 2003. 烟粉虱成虫对不同寄主植物的选择性. 植物保护, 29(2): 20~22 [Zhang Y J, Liang G M, Ni Y X, Wu K M, Guo Y Y. 2003. Selecton of the adult of *Bemisia tabaci* (Gennadius) to different host plants. *Plant Protection*, 29(2): 20~22]
- 张芝利. 2000. 关于烟粉虱大发生的思考. 北京农业科学, 18(增刊):1~3 [Zhang Z L. 2000. Some thoughts to the outbreaks of tobacco whitefly. *Beijing Agri. Sci.*, 18(Suppl.): 1~3]
- 赵莉, 张荣, 肖艳, 崔元珂, 黄伟. 2000. 危害棉花的重要害虫烟粉虱在新疆发现. 新疆农业科学, (1): 27~28 [Zhao L, Zhang R, Xiao Y, Cui Y Y, Huang W. 2000. Tobacco whitefly (*Bemisia tabaci*) – a new insect pest was founded on the cotton in Xingjing. *Xinjiang Agri. Sci.*, (1): 27~28]
- 周尧. 1949. 中国粉虱名录. 中国昆虫学, 3(4): 1~18 [Zhou Y. 1949. A list of Aleyrodidae from China. *Chinese Journal of Entomology*, 3(4): 1~18]
- Abboud R, Ahmad M. 1998. Effect of temperature and prey-species on development of the immature stages of the coccinellid, *Serangium parcesetosum* Sicard. *Arab J. Plant Prot.*, 16: 90~93
- Abdallah Y E Y, Ibrahim S I, Abd Elmoniem E M, Youssef L A. 2001. Incidence of some piercing-sucking insects in relation to morphological leaf characters, some chemical and nutritional components of some cotton cultivars. *Ann. Agric. Sci.*, 46(2): 807~827
- Abd-Rabou S. 1998. Inundative release of *Encarsia formosa* Gahan (Hymenoptera: Aphelinidae) for the control of *Bemisia tabaci* (Genn.) (Homoptera: Aleyrodidae) on outdoor crops. *Acta Phytopathol. Entomol. Hungarica*, 33: 389~394
- Abd-Rabou S. 1999. Biological control of the cotton whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae). *Egypt. Shashpa*, 6: 53~57
- Ali N A. 1988. Entomology. Biochemistry. *Agric. Res. Corp. Sudan*, 125~131
- Anthony N M, Brown J K, Markham P G, French-Constant R H. 1995. Molecular analysis of cyclodiene resistance-associated mutations among populations of the sweet potato whitefly *Bemisia tabaci*. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 51(3): 220~228
- Avidov Z. 1956. Bionomics of the tobacco whitefly (*Bemisia tabaci*) in Israel. *Isr. Ktavm*, 7: 25~41
- Azab A K, Megahed M M, El-Mirsawi H D. 1969. Effect of degree of pubescence of host-plant on the number and distribution of dorsal spines in pupa of *Bemisia tabaci*. *Bull. Entomol. Soc. Egypt.*, 53: 353~357
- Azab A K, Megahed M M, El-Mirsawi D H. 1971. On the biology of *Bemisia tabaci* (Genn.). *Bull. Soc. Entomol. Egypt.*, 55: 305~315
- Balaji K, Veeravel R. 1994. Leaf morphological and biochemical studies on the four varieties of brinjal to whitefly (*Bemisia tabaci* Genn.) incidence. *Prog. Hort.*, 26: 45~52
- Balasubramani V, Swamiappan M. 1994. Development and feeding potential of the green lacewing *Chrysoperla carnea* Steph. (Neur., Chrysopidae) on different insect pests of cotton. *Anz. Schaedlingskd Pflanzenschutz*, 67: 165~167
- Barnadas I, Gabarra R, Albajes R. 1998. Predatory capacity of two mirid bugs preying on *Bemisia tabaci*. *Entomol. Exp. Appl.*, 86: 215~219
- Bedford I D, Briddon R W, Brown J K, Rosell R C, Markham P G. 1994. Geminivirus transmission and biological characterization of *Bemisia tabaci* (Gennadius) biotypes from different geographic regions. *Ann. Appl. Biol.*, 125(2): 311~325
- Bedford I D, Briddon R W, Markham P G, Brown J K, Rosell R C. 1992. *Bemisia tabaci*: biotype characterization and the threat of this whitefly species to agriculture. *Proceedings 1992 British Crop Protection Conference — Pests and Diseases*, 3: 1235~1240

- Bellotti A C, Arias B. 2001. Host plant resistance to whiteflies with emphasis on cassava as a case study. *Crop Prot.*, 20(9): 813-823
- Bellotti A C, Smith L, Lapointe S L. 1999. Recent advances in cassava pest management. *Annu. Rev. Entomol.*, 44: 343-370
- Bellows T S, Perring T M, Gill R J, Headrick D H. 1994. Description of a species of *Bemisia* (Homoptera: Aleyrodidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 87: 195-206
- Bentz J A, Reeves J, Barbosa P, Francis B. 1995. Effect of nitrogen fertilizer source and level on ovipositional choice of poinsettia by *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 88(5): 1388-1392
- Berlinger M J, Lebiush-Mordechi S. 1996. Physical methods for the control of *Bemisia*. (Andover, Hants, UK: Intercept Ltd.), 617-634
- Bethke J A, Paine T D, Nuessly G S. 1991. Comparative biology, morphometrics, and development of two populations of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) on cotton and poinsettia. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 84 (4): 407-411
- Bi J L, Ballmer G R, Hendrix D L, Henneberry T J, Toscano N C. 2001. Effect of cotton nitrogen fertilization on *Bemisia argentifolii* populations and honeydew production. *Entomol. Exp. Appl.*, 99: 25-36
- Blackmer J L, Byrne D N. 1999. Changes in amino acids in *Cucumis melo* in relation to life-history traits and flight propensity of *Bemisia tabaci*. *Entomol. Exp. Appl.*, 93: 29-40
- Blua M J, Toscano N C. 1994. *Bemisia argentifolii* (Homoptera, Aleyrodidae) development and honeydew production as a function of cotton nitrogen status. *Environ. Entomol.*, 23(2): 316-321
- Blua M J, Yoshida H A, Toscana N C. 1995. Oviposition preference of two *Bemisia* species (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.*, 24(1): 89-93
- Brown J K, Coats S, Frohlich D R, Bedford I D, Markham P G. 1995a. Characterization and distribution of esterase electromorphs in the whitefly, *Bemisia tabaci* (Genn.) (Homoptera: Aleyrodidae). *Biochem. Genet.*, 33: 205-214
- Brown J K, Frohlich D R, Rosell R C. 1995b. The sweetpotato or silverleaf whiteflies: biotypes of *Bemisia tabaci* or a species complex? *Annu. Rev. Entomol.*, 40: 511-534
- Brown J K, Perring T M, Cooper A D, Bedford I D, Markham P G. 2000. Genetic analysis of *Bemisia* (Homoptera: Aleyrodidae) populations by isoelectric focusing electrophoresis. *Biochem. Genet.*, 38(1-2): 13-25
- Brown J M, Pellmyr O, Thompson J N, Harrison R G. 1994. Phylogeny of *Greya* (Lepidoptera: Prodoxidae) based on nucleotide sequence variation in mitochondrial cytochrome oxidase I and II: congruence with morphological data. *Mol. Biol. Evol.*, 11: 128-141
- Bulter G D Jr, Henneberry T J, Clayton T E. 1983. *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae): development, oviposition and longevity in relation to temperature. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 76: 310-313
- Burban C, Fishpool L D C, Fauquet C, Fargette D, Thouvenel J C. 1992. Host-associated biotypes within West African populations of the whitefly *Bemisia tabaci* (Genn.) (Hom. Aleyrodidae). *J. Appl. Entomol.*, 113: 416-423
- Butler G D, Henneberry T J. 1984. *Bemisia tabaci*: effect of cotton leaf pubescence on abundance. *Southwest Entomol.*, 9: 91-94
- Byrne D N, Draeger E A. 1989. Effect of plant maturity on oviposition and nymphal mortality of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.*, 18: 429-432
- Byrne D N, Miller W B. 1990. Carbohydrate and amino acid composition of phloem sap and honeydew produced by *Bemisia tabaci*. *J. Insect Physiol.*, 36: 433-439
- Byrne F J, Bedford I D, Devonshire A L, Markham P G. 1995a. Esterase variation and squash silverleaf induction in B-type *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Bull. Entomol. Res.*, 85: 175-179
- Byrne F J, Cahill M, Denholm I, Devonshire A L. 1995b. Biochemical identification of interbreeding between B-type and non-B-type strains of the tobacco whitefly *Bemisia tabaci*. *Biochem. Genet.*, 33: 13-23
- Byrne F J, Castle S, Prabhaker N, Toscano N C. 2003. Biochemical study of resistance to imidacloprid in B biotype *Bemisia tabaci* from Guatemala. *Pest Manag. Sci.*, 59(10): 347-352
- Byrne F J, Devonshire A L. 1993. Insensitive acetylcholinesterase and esterase polymorphism in susceptible and resistant populations of the tobacco whitefly, *Bemisia tabaci*. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 45: 34-42
- Byrne F J, Devonshire A L. 1997. Kinetics of insensitive acetylcholin esterases in organophosphate-resistant tobacco whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae). *Pestic. Biochem. Physiol.*, 58(2): 119-124
- Byrne F J, Gorman K J, Cahill M, Denholm I, Devonshire A L. 2000. The role of B-type esterases in conferring insecticide resistance in the tobacco whitefly, *Bemisia tabaci* (Genn). *Pest Manag. Sci.*, 56(10): 867-874
- Byrne F J, Gorman K J, Cahill M, Denholm I, Devonshire A L. 2000. The role of B-type esterases in conferring insecticide

- resistance in the tobacco whitefly, *Bemisia tabaci* (Genn). *Pest Manag. Sci.*, 56(10): 867-874
- Cahill M, Byrne F J, Gorman K, Denholm I, Devonshire A L. 1995. Pyrethroid and organophosphate resistance in the tobacco whitefly *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Bull. Entomol. Res.*, 85(2): 181-187
- Cahill M, Denholm I, Byrne F J, Devonshire A L. 1996a. Insecticide resistance in *Bemisia tabaci* - current status and implications for management. *Proceedings 1996 Brighton Crop Protection Conference*, 1: 75-80
- Cahill M, Jarvis W, Gorman K, Denholm I. 1996b. Resolution of baseline responses and documentation of resistance to buprofezin in *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Bull. Entomol. Res.*, 86: 117-122
- Cahill M, Gorman K, Day S, Denholm I, Elbert A, Nauen R. 1996c. Baseline determination and detection of resistance to imidacloprid in *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Bull. Entomol. Res.*, 86: 343-349
- Calvitti M, Remotti P C. 1998. Host preference and performance of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on weeds in central Italy. *Environ. Entomol.*, 27(6): 1350-1356
- Campbell B C. 1993. Congruent evolution between whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae) and their bacterial endosymbionts based on respective 18S and 16S rDNAs. *Curr. Microbiol.*, 26: 129-132
- Cardoza Y J, McAuslane H J, Webb S E. 1999. Mechanisms of resistance to whitefly-induced squash silverleaf disorder in zucchini. *J. Econ. Entomol.*, 92(3): 700-707
- Carnero A, Montesdeoca M, Pérez F, Siverio A, Rodriguez P. 1990. Presencia de *Bemisia tabaci* (Genn.) en cultivos comerciales de hortalizas y ornamentales en isla de Tenerife (Islas Canarias). *Cuadernos de Fitopatología*, 4^o Trimestre, 25: 176-180
- Castane C, Alomar O, Goula M, Gabarra R. 2000. Natural populations of *Macrolophus caliginosus* and *Dicyphus tamaninii* in the control of the greenhouse whitefly in tomato crops. *Bull. IOBC/WPRS*, 23: 221-224
- Castle S J. 2001. Differences between cotton and melon in host acceptance by *Bemisia tabaci*. (Memphis, TN: National Cotton Council, 2001), 1056-1059
- Castle S J, Henneberry T J, Toscano N C. 1996. Suppression of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) infestations in cantaloupe and cotton with sprinkler irrigation. *Crop prot.*, 15: 657-663
- Cervera M T, Cabezas J A, Simon B, Martinez-Zapater J M, Beitia F, Cenis J L. 2000. Genetic relationships among biotypes of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) based on AFLP analysis. *Bull. Entomol. Res.*, 90(5): 391-396
- Channarayappa S G, Shivashankar G, Muniyappa V, First R H. 1992. Resistance of *Lycopersicon* species to *Bemisia tabaci*, a tomato leaf curl virus vector. *Can. J. Bot.*, 70: 2184-2192
- Chu C C, Cohen A C, Natwick E T, Simmons G S, Henneberry T J. 1999. *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) biotype B colonisation and leaf morphology relationships in upland cotton cultivars. *Aust. J. Entomol.*, 38(2): 127-131
- Chu C C, Freeman T P, Buckner J S, Henneberry T J, Nelson D R, Natwick E T. 2001. Susceptibility of upland cotton cultivars to *Bemisia tabaci* biotype B (Homoptera: Aleyrodidae) in relation to leaf age and trichome density. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 94(5): 743-749
- Chu C C, Henneberry T J, Cohen A C. 1995. *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae): host preference and factors affecting oviposition and feeding site preference. *Environ. Entomol.*, 24: 354-360
- Chu C C, Natwick E T, Cohen A C, Simmons G S, Brushwood D E, Henneberry T J. 1998. *Bemisia argentifolii* colonization, vascular bundle depth relationships, lint yield, and nymphal parasitism in selected deltapine cotton cultivars. *Southwest Entomol.*, 23 (4): 293-299
- Chu C C, Natwick E T, Henneberry T J. 2002. *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) biotype B colonization on okra- and normal-leaf upland cotton strains and cultivars. *J. Econ. Entomol.*, 95(4): 733-738
- Clark M A, Baumann L, Munson M A, Baumann P, Campbell B C, Duffus J E, Osborne L S, Moran N A. 1992. The eubacterial endosymbionts of whiteflies (Homoptera: Aleyrodoidea) constitute a lineage distinct from the endosymbionts of aphids and mealybugs. *Curr. Microbiol.*, 25: 119-123
- Cock M J W. 1986. *Bemisia tabaci*, a literature survey on the cotton whitefly with an annotated bibliography. Silwood CAB 11 BC. Park, UK, 121
- Cohen A C, Brummett D L. 1997. The non-abundant nutrient (NAN) concept as a determinant of predator-prey-fitness. *Entomophaga*, 42: 85-91
- Cohen A C, Henneberry T J, Chu C C. 1996. Geometric relationships between whitefly feeding behavior and vascular bundle arrangements. *Entomol. Exp. Appl.*, 78: 135-142
- Cohen S. 1990. Epidemiology of whitefly-transmitted viruses. In: Gerling D ed. Whitefly, their Bionomics, Pest Status and Management, Intercept, Andover, UK. 211-226

- Costa A S, Russell L M. 1975. Failure of *Bemisia tabaci* to breed on cassava plants in Brazil (Homoptera: Aleyrodidae). *Ciencia Cultura (Sao Paulo)*, 27: 388-390
- Costa H S, Brown J K. 1991. Variation in biological characteristics and esterase patterns among populations of *Bemisia tabaci*, and the association of one population with silverleaf symptom induction. *Entomol. Exp. Appl.*, 61(3): 211-219
- Costa H S, Brown J K, Byrne D N. 1991. Host plant selection by the whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius), (Hom., Aleyrodidae) under greenhouse conditions. *J. Appl. Entomol.*, 112: 146-152
- Costa H S, Brown J K, Sivasupamaniam S, Bird J. 1993a. Regional distribution, insecticide resistance, and reciprocal crosses between the A and B biotypes of *Bemisia tabaci*. *Insect Sci. Appl.*, 14: 255-266
- Costa H S, Johnson M W, Ullman D E, Omer A D, Tabashnik B E. 1993b. Sweetpotato whitefly (Homoptera, Aleyrodidae): analysis of biotypes and distribution in Hawaii. *Environ. Entomol.*, 22: 16-20
- Costa H S, Ullman D E, Johnson M W, Tabashnik B E. 1993c. Squash silverleaf symptoms induced by immature, but not adult, *Bemisia tabaci*. *Phytopathology*, 83: 763-766
- Cottage E L A, Gunning R V. 2002. Insect growth regulators inhibit acetylcholinesterase activity in B-biotype *Bemisia tabaci*. (Farnham, UK: British Crop Protection Council), 741-744
- Courtney S P, Kibota T T. 1990. Mother doesn't know best: selection of hosts by ovipositing insects. *In: Bernays E A ed. Insect-plant Interactions*. CRC, Boca Raton FL, Volume II, 161-188
- Cranshaw W, Ward C R, Charles R. 1996. Turfgrass insects in Colorado & northern New Mexico. Fort Collins, Colo., 38
- Csizinszky A A, Schuster D J, Kring J B. 1995. Color mulches influence yield and insect pest populations in tomatoes. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 120(5): 778-784
- Csizinszky A A, Schuster D J, Kring J B. 1997. Evaluation of color mulches and oil sprays for yield and for the control of silverleaf whitefly, *Bemisia argentifolii* (Bellows and Perring) on tomatoes. *Crop Prot.*, 16(5): 475-481
- Csizinszky A A, Schuster D J, Polston J E. 1999. Effect of ultraviolet-reflective mulches on tomato yields and on the silverleaf whitefly. *HortScience*, 34(5): 911-914
- Cubillo D, Sanabria G, Hijle L. 1999. Efficacy of living ground covers for the management of *Bemisia tabaci* as a vector of geminivirus in tomato. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)*, 51: 10-20
- De Barro P J. 1995. *Bemisia tabaci* biotype B: a review of its biology distribution and control. Technical Paper, Division of Entomology, SCIRO, Canberra, Australia. 57
- De Barro P J, Borne A. 2003. B type vs AUS type –how many Bs do you need before establishment occurs? *In: Biology of Bemisia Session 1: 3rd International Bemisia Workshop Barcelona, 17-20 March, 17*
- De Barro P J, Driver F. 1997. Use of RAPD PCR to distinguish the B biotype from other biotypes of *Bemisia tabaci*(Genn.) (Homoptera:Aleyrodidae). *Aust. J. Entomol.*, 36: 149-152
- De Barro P J, Driver F, Trueman J W H, Curran J. 2000a. Phylogenetic relationships of world populations of *Bemisia tabaci* (Gennadius) using ribosomal ITS1. *Mol. Phylogenet. Evol.*, 16(1): 29-36
- De Barro P J, Hart P J. 2000. Mating interactions between two biotypes of the whitefly, *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in Australia. *Bull. Entomol. Res.*, 90(2): 103-112
- De Barro P J, Hart P J, Morton R. 2000b. The biology of two *Eretmocerus* spp. (Haldeman) and three *Encarsia* spp. Forster and their potential as biological control agents of *Bemisia tabaci* biotype B in Australia. *Entomol. Exp. Appl.*, 94: 93-102
- De Ponti O M B, Romanow L R, Berlinger M J. 1990. Whitefly-plant relationships: Plant resistance. *In: Gerling D ed. Whiteflies: their Bionomics, Pest Status and Management*. Andover, UK: Intercept Ltd. 348
- Dean D E, Schuster D J. 1995. *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) and *Macrosiphum euphorbiae* (Homoptera: Aphididae) as prey for two species of Chrysopidae. *Environ. Entomol.*, 24: 1562-1568
- Denholm I, Cahill M, Byrne F J, Devonshire A L. 1996. Progress with documenting and combating insecticide resistance in *Bemisia*. *In: Gerling D, Mayer R T eds. Bemisia 1995: Taxonomy, Biology, Damage, Control and Management*. Andover, UK: Intercept Ltd. 577-602
- Dennehy T J, Williams L. 1997. Management of resistance in *Bemisia* in Arizona cotton. *Pestic. Sci.*, 51: 398-406
- Devine G J, Ishaaya I, Horowitz A R, Denholm I. 1999. The response of pyriproxyfen-resistant and susceptible *Bemisia tabaci* Genn (Homoptera: Aleyrodidae) to pyriproxyfen and fenoxycarb alone and in combination with piperonyl butoxide. *Pestic. Sci.*, 55(4): 405-411
- Devine G. J, Ishaaya I, Horowitz A R, Denholm I. 1998. Effects of piperonyl butoxide on *Bemisia tabaci* Genn. (Homoptera: Aleyrodidae): mortality, development, parasitism and predation in Israeli cotton fields. *Crop Prot.*, 17(9): 717-726

- Dittrich V, Ernst G H, Ruesch O, Uk S. 1990. Resistance mechanisms in sweetpotato whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) populations from Sudan, Turkey, Guatemala, and Nicaragua. *J. Econ. Entomol.*, 83(5): 1665–1670
- Dittrich V, Hassan S O, Ernst G H. 1985. Sudanese cotton and the whitefly: a case study of the emergence of a new primary pest. *Crop prot.*, 4: 161–176
- do Valle G E, Lourenção A L, Novo J P S. 2002. Chemical control of *Bemisia tabaci* B biotype (Hemiptera: Aleyrodidae) eggs and nymphs. *Scientia Agric.*, 59 (2): 291–294
- Dorschner K W. 1990. Aphid induced alteration of the availability and form of nitrogenous compounds in plants. In: Campbell R K Eikenbary R D eds. *Aphid-Plant Genotype Interactions*. New York: Elsevier Science Publishing Co. 225–235
- Douglas A E. 1993. The nutritional quality of phloem sap utilized by natural aphid populations. *Ecol. Entomol.*, 18: 31–38
- Douglas A E, Prosser W A. 1992. Synthesis of the essential amino acid tryptophan in the pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*) symbiosis. *J. Insect Physiol.*, 38: 565–568
- Drost Y C, van Lenteren J C, van Roermund H J W. 1998. Life-history parameters of different biotypes of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in relation to temperature and host plant: a selective review. *Bull. Entomol. Res.*, 88: 219–229
- Dussourd D E. 1995. Entrapment of aphids and whiteflies in lettuce latex. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 88(2): 163–172
- El-Banhawy E M, Hafez S M, Saber S A. 1999. Effect of the nymph prey density of the two spotted spider mite *Tetranychus urticae* Koch on the consumption and reproduction rates of the predacious mite *Cydnoseius negevi* (Swirski & Amital) in absence and presence of nymphs of the whitefly *Bemisia tabaci* (Genn.) (Acari: Phytocetidae). *J. Pest Sci.*, 72(2): 55–56
- Elbert A, Nauen R. 2000. Resistance of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) to insecticides in southern Spain with special reference to neonicotinoids. *Pest Manag. Sci.*, 56(1): 60–64
- Ellsworth P C, Martinez-Carrillo J L. 2001. IPM for *Bemisia tabaci*: a case study from North America. *Crop Prot.*, 20(9): 853–869
- Elsey K D, Farnham M W. 1994. Response of *Brassica oleracea* L. to *Bemisia tabaci* Gennadius. *HortScience*, 29(7): 814–817
- Enkegaard A. 1993. *Encarsia formosa* parasitizing the Poinsettia-strain of the cotton whitefly, *Bemisia tabaci*, on poinsettia: bionomics in relation to temperature. *Entomol. Exp. Appl.*, 69: 251–261
- Faria M, Wraight S P. 2001. Biological control of *Bemisia tabaci* with fungi. *Crop Prot.*, 20(9): 767–778
- Farnham M W, Elsey K D. 1995. Recognition of *Brassica oleraceae* L. resistance against the silverleaf whitefly. *HortScience*, 30(2): 343–347
- Febvay G, Leadouze I, Guillaud J, Bonnot G. 1995. Analysis of energetic amino acid metabolism in *Acyrtosiphon pisum*: a multidimensional approach to amino acid metabolism in aphids. *Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 29: 45–69
- Finch S, Collier R H. 2000. Host-plant selection by insects—a theory based on ‘appropriate /inappropriate landings’ by pest insects of cruciferous plants. *Entomol. Exp. Appl.*, 96: 91–102
- Foltyn S, Gerling D. 1985. The parasitoids of the aleyrodid *Bemisia tabaci* in Israel: development, host preference and discrimination of the aphelinid wasp *Eretmocerus mundus*. *Entomol. Exp. Appl.*, 38(3): 255–260
- Fransen J J. 1990. Natural enemies of whiteflies: fungi. Andover, UK: Intercept, 187–210
- Frohlich D R, Torres-Jerez I, Bedford I D, Markham P G, Brown J K. 1999. A phylogeographical analysis of the *Bemisia tabaci* species complex based on mitochondrial DNA markers. *Mol. Ecol.*, 8(10): 1683–1691
- Gabarra R, Arnó J, Alomar O, Albajes R. 1999. Naturally occurring populations of *Encarsia pergandiella* (Hymenoptera: Aphelinidae) in tomato greenhouses. *Bull. OILB/SROP (IOBC/WPRS)*, 22: 85–88
- Gammeel O I. 1974. Some aspects of the mating and oviposition behavior of the cotton whitefly *Bemisia tabaci* (Genn.). *Rev. Zool. Afr.*, 88: 784–788
- Gawel N J, Bartlett A C. 1993. Characterization of differences between whiteflies using RAPD-PCR. *Insect Mol. Biol.*, 2: 33–38
- Gennadius P. 1889. Disease of tobacco plantations in Trikonía: the aleurodid of tobacco. *Ellenike Georgia*, 5: 1–3
- Gerling D. 1966. Studies with whitefly parasites of southern California. I. *Encarsia pergandiella* Howard (Hymenoptera: Aphelinidae). *Can. Entomol.*, 98: 707–724
- Gerling D, Alomar O, Arno J. 2001. Biological control of *Bemisia tabaci* using predators and parasitoids. *Crop Prot.*, 20(9): 779–799
- Gerling D. 1990. Whiteflies: their Bionomics, Pest Status and Management. Wimborne, UK: Intercept. 13–46
- Gerling D, Stern T U. 1993. Biology of *Delphastus pusillus*: the influence of density on fitness. *Bull. OILB/SROP (IOBC/WPRS)*, 16: 39–42
- Gill R J. 1990. The morphology of whiteflies. Andover, UK: Intercept. 13–46
- Gill R J. 1992. A review of the sweetpotato whitefly in Southern California. *Pan-Pacif. Entomol.*, 68: 144–152

- Gordon R D. 1985. The Coccinellidae of America North of Mexico. *J. New York Entomol. Soc.*, 93(1): 891~912
- Greathead A. H. 1986. Host plants. 17~25. In: Cock M J W ed. *Bemisia tabaci* - A Literature Survey on the Cotton Whitefly with an Annotated Bibliography. Ascot, UK: CAB International Institute of Biological Control
- Guershon M, Gerling D. 1999. Predatory behavior of *Delphastus pusillus* in relation to the phenotypic plasticity of *Bemisia tabaci* nymphs. *Entomol. Exp. Appl.*, 92: 239~248
- Guirao P, Beitia F, Cenis J L. 1997. Biotype determination of Spanish populations of *Bemisia tabaci* (Hemiptera:Aleyrodidae). *Bull. Entomol. Res.*, 87: 587~593
- Gunning R V, Byrne F J, Conde B D, Connelly M I, Hergstrom K, Devonshire A L. 1995. First report of B-biotype *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) in Australia. *J. Aust. Entomol. Soc.*, 34(2): 116
- Gunning R V, Byrne F J, Devonshire A L. 1997. Electrophoretic analysis of non-B and G-biotype *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) in Australia. *Aust. J. Entomol.*, 36: 245~249
- Gutierrez J C. 1997. Registration of "Victoria" cotton. *Crop Sci.*, 37(4): 1389
- Hardin G. 1960. The competitive exclusion principle. *Science*, 131: 1292~1297
- Headrick D H, Bellows T S, Perring T M. 1999. Development and reproduction of a population of *Eretmocerus eremicus* (Hymenoptera: Aphelinidae) on *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.*, 28(2): 300~306
- Heinz K M, Brazzle J R, Pickett C H, Natwick E T, Nelson J M, Parrella M P. 1994. Predatory beetle may suppress silverleaf whitefly. *Calif. Agric.*, 48: 35~40
- Heinz K M, Zalom F G. 1995. Variation in trichome-based resistance to *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) oviposition on tomatoes. *J. Econ. Entomol.*, 88(5): 1494~1502
- Heinz K M, Zalom F G. 1996. Performance of the predator *Delphastus pusillus* on *Bemisia* resistant and susceptible tomato lines. *Entomol. Exp. Appl.*, 81: 345~352
- Henneberry T J, Hendrix D L, Perkins H H, Naranjo S E, Flint H M, Akey D, Jech L F, Burke R A. 1995. *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) populations and relationships to sticky cotton and cotton yields. *Southwest. Entomol.*, 20(3): 255~271
- Henter H J, Brasch K, van Lenteren J C. 1996. Variation between laboratory populations of *Encarsia formosa* in their parasitication behavior on the host *Bemisia tabaci*. *Entomol. Exp. Appl.*, 80: 435~441
- Henter H J, van Lenteren J C. 1996. Variation between laboratory populations in the performance of the parasitoid *Encarsia formosa* on two host species, *Bemisia tabaci* and *Trialeurodes vaporariorum*. *Entomol. Exp. Appl.*, 80: 427~434
- Hilje L. 1995. Aspectos bioecologicos de *Bemisia tabaci* in Mesoamerica. [Bio-ecological aspects of *Bemisia tabaci* in Middle America]. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)*, 35: 46~54
- Hilje L. 2000. Use of living ground covers for managing the whitefly *Bemisia tabaci* as a geminivirus vector in tomatoes. In: Brighton Crop Protection Conference: Pests and Diseases. British Crop Protection council, Farnham, UK. 167~170
- Hilje L, Costa H S, Stansly P A. 2001. Cultural practices for managing *Bemisia tabaci* and associated viral diseases. *Crop Prot.*, 20(9): 801~812
- Hodde M S, Sanderson J P, van Driesche R G. 1999. Biological control of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on Poinsettia with inundative release of *Eretmocerus eremicus* (Hymenoptera: Aphelinidae): does varying the weekly release rate affect control? *Bull. Entomol. Res.*, 89(1): 41~51
- Hodde M S, van Driesche R G. 1999. Evaluation of inundative release of *Eretmocerus eremicus* and *Encarsia formosa* Beltsville strain in commercial greenhouses for control of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on Poinsettia stock plants. *J. Econ. Entomol.*, 92(4): 811~824
- Hodde M S, van driesche R G, Sanderson J P. 1998. Biology and use of the whitefly parasitoid *Encarsia formosa*. *Ann. Rev. Entomol.*, 43: 645~669
- Hoelmer K A, Kirk A A. 1999. An overview of natural enemy explorations and evaluations for *Bemisia* in the US. *Bull. IOBC/WPRS*, 22: 109~112
- Hoelmer K A, Osborne L S, Yokomi R K. 1993. Reproduction and feeding behavior of *Delphastus pusillus* (Coleoptera: Coccinellidae) a predator of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 86: 322~329
- Hooks C R R, Valenzuela H R, Defrank J. 1998. Incidence of pests and arthropod natural enemies in zucchini grown with living mulches. *Agric. Ecosystems Environ.*, 69(3): 217~231
- Horowitz A R, Forer G, Ishaaya I. 1994. Managing resistance in *Bemisia tabaci* in Israel with emphasis on cotton. *Pestic. Sci.*, 42(2): 113~122

- Horowitz A R, Kotsedalov S, Denholm I, Ishaaya I. 2002. Dynamics of insecticide resistance in *Bemisia tabaci*: a case study with the insect growth regulator pyriproxyfen. *Pest Manag. Sci.*, 58(11): 1096-1100
- Horowitz A R, Mendelson Z, Cahill M, Denholm I, Ishaaya I. 1999. Managing resistance to the insect growth regulator, pyriproxyfen, in *Bemisia tabaci*. *Pestic. Sci.*, 55: 272-276
- Horowitz A R, Toscano N C, Youngman R R, Georghiou G P. 1988. Synergism of insecticides with DEF in sweetpotato whitefly. (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 81(1): 110-114
- Huang J, Polaszek A. 1998. A revision of the Chinese species of *Encarsia* Forster: parasitoids of whiteflies, scales and aphids. *J. Nat. Hist.*, 32: 1825-1966
- Hunter M S. 1989. Sex allocation and egg distribution of an autoparasitoid, *Encarsia pergandiella* (Hymenoptera: Aphelinidae). *Ecol. Entomol.*, 14: 57-67
- Inbar M, Doostdar H, Leibe G L, Mayer R T. 1999a. Elicitors of plant defensive systems reduce insect densities and disease incidence. *J. Chem. Eco.*, 24: 135-149
- Inbar M, Doostdar H, Mayer R T. 1999b. Effects of sessile whitefly nymphs (Homoptera: Aleyrodidae) on leaf-chewing larvae (Lepidoptera: Noctuidae). *Environ. Entomol.*, 28(3): 353-357
- Ioannou N. 1997. Integrated pest management strategies for the whitefly- virus complex in the Near East. Rome, Italy: FAO Plant Production and Protection Paper 143, 159-180
- Jackson D M, Farnham M W, Simmons A M, van Giessen W A, Elsey K D. 2000. Effects of planting pattern of Collards on resistance to whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae) and on parasitoid abundance. *J. Econ. Entomol.*, 93(4): 1227-1236
- Jiang Y X, Nombela G, Muniz M. 2001. Analysis by DC-EPG of the resistance to *Bemisia tabaci* on an Mi-tomatoline. *Entomol. Exp. Appl.*, 99(3): 295-302
- Jones W A, Greenberg S M. 1998. Suitability of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) instars for the parasitoid *Eretmocerus mundus* (Hymenoptera: Aphelinidae). *Environ. Entomol.*, 27(6): 1569-1573
- Joyce A L, Bellows T S, Headrick D H. 1999. Reproductive biology and search behavior of *Amitus bennetti* (Hymenoptera: Platygasteridae), a parasitoid of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.*, 28: 282-289
- Kirk A A, Lacey L A. 1996. A systematic approach to foreign exploration for natural enemies of *Bemisia* and some current results. In: Gerling D, Mayer R T eds. *Bemisia: 1995 Taxonomy, Biology, Damage, Control and Management*. Intercept Ltd., Andover, Hants, UK. 531-533
- Kirk A A, Lacey L A, Brown J K, Ciomperlik M A, Goolsby J A, Vacek D C, Wendel L E, Napompeth B. 2000. Variation within the *Bemisia tabaci* species complex (Homoptera: Aleyrodidae) and its natural enemies leading to successful biological control of *Bemisia* biotype B in the USA. *Bull. Entomol. Res.*, 90: 317-327
- Kirk A A, Thistlewood H. 1999. Development of host specificity tests for predators as biological control agents: an example for *Clitostethus arcuatus* (Rossi) (Coleoptera: Coccinellidae) on *Bemisia tabaci* Gennadius (Homoptera: Aleyrodidae) B-biotype species complex. *Bull. IOBC/WPRS*, 22: 33
- Kishaba A N, Castle S, McCreight J D, Desjardins P R. 1992. Resistance of white-flowered gourd to sweetpotato whitefly. *HortScience*, 27: 1217-1222
- Lacey L A, Kirk A A, Millar L, Mercadier G, Vidal C. 1999. Ovicidal and larvicidal activity of conidia and blastospores of *Paecilomyces fumosoroseus* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) against *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) with a description of a bioassay system allowing prolonged survival of control insects. *Biocontrol Sci. Technol.*, 9: 9-18
- Lacey L A, Kirk A A. 1993. Foreign exploration for natural enemies of *Bemisia tabaci* and implementation in integrated control programs in the United States. (Association Nationale de Protection des Plantes, 1993), 351-360
- Lambert A L, McPherson R M, Espelie K E. 1995. Soybean host plant resistance mechanisms that alter abundance of whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.*, 24(6): 1381-1386
- Lambert A L, McPherson R M, Herzog G A. 1997. Field evaluations of fourteen soybean genotypes for resistance to whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) infestations. *J. Econ. Entomol.*, 90(2): 658-662
- Lara R I R, Ramiro Z A, Perioto N W, dos Santos J C C. 2001. Uso de thiamthoxam no controle de *Bemisia tabaci* (Gennadius, 1889) Biótipo B (Homoptera: Aleyrodidae) em cultura de jiló (*Solanum Gilo*) (Solanaceae), no município de riberao preto, SP. *Arq. Inst. Biol.*, 68(2): 83-87
- Lee Y S, Lee S Y, Park E C, Kim J H. 2002. Comparative toxicities of pyriproxyfen and thiamethoxam against the sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Asia-Pacific Entomol.*, 5(1): 117-122
- Legaspi J C, Jr Legaspi B C, Meagher R L Jr, Ciomperlik M A. 1996. Evaluation of *Serangium parcesetosum* (Coleoptera:

- Coccinellidae) as a biological control agent of the silverleaf whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.*, 25: 1421~1427
- Liedl B E, Lawson D M, White K K, Shapiro J A, Cohen D E, Carson W G, Trumble J T, Matschler M A. 1995. Acylsugars of wild tomato *Lycopersicon pennellii* alters settling and reduces oviposition of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 88(3): 742~748
- Lima L H C, Campos L, Moretzsohn M C, Navia D, de Oliveira M R V. 2002. Genetic diversity of *Bemisia tabaci* (Genn.) populations in Brazil revealed by RAPD markers. *Genet. Mol. Biol.*, 25(2): 217~223
- Lindroth R L. 1989. Chemical ecology of the luna moth: effects of host plant on detoxication enzyme activity. *J. Chem. Ecol.*, 15(7): 2020~2029
- Lisha V S, Antony B, Palaniswami M S, Henneberry T J. 2003. *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) biotypes in India. *J. Econ. Entomol.*, 96 (2): 322~327
- Liu H Y, Cohen S, Du. us J E. 1992. The use of isozyme patterns to distinguish sweetpotato whitefly (*Bemisia tabaci*) biotypes. *Phytoparasitica*, 20: 187~194
- Liu T X, Stansly A. 1996. Oviposition, development, and survivorship of *Encarsia pergandiella* (Hymenoptera: Aphelinidae) in four instars of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 89(1): 96~102
- Liu T X, Stansly P A. 1999. Searching and feeding behaviour of *Nephaspis oculatus* and *Delphastus catalinae* (Coleoptera: Coccinellidae), predators of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.*, 28: 901~906
- Mayer R T, Inbar M, McKenzie C L, Shatters R, Borowicz V, Albrecht U, Powell C A, Doostdar H. 2002. Multitrophic interactions of the silverleaf whitefly, host plants, competing herbivores, and phytopathogens. *Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 51(4): 151~169
- McAuslane H J. 1996. Influence of leaf pubescence on ovipositional preference of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on soybean. *Environ. Entomol.*, 25(4): 834~841
- McAuslane H J, Johnson F A, Colvin D L, Sojack B. 1995a. Influence of foliar pubescence on abundance and parasitism of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on soybean and groundnut. *Environ. Entomol.*, 24(5): 1135~1143
- McAuslane H J, Knauff D A, Johnson FA. 1995b. Evaluation of groundnut breeding lines for resistance to silverleaf whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *Florida Entomol.*, 78(1): 75~81
- McAuslane H J, Simmons A M, Jackson D M. 1997. Parasitization of silverleaf whitefly by *Eretmocerus* sp. (Hong Kong) on collard, *Brassica oleracea*, genotypes differing in leaf epidermal wax. U. S. Dept. Agric., *Agric. Res. Serv.*, 158
- McAuslane H J, Webb S E, Elmstrom G W. 1996. Resistance in germplasm of *Cucurbita pepo* to silverleaf, a disorder associated with *Bemisia argentifolii* (Homoptera; Aleyrodidae). *Florida Entomol.*, 79(2): 206~221
- McCreight J D, Kishaba A N. 1991. Reaction of cucurbit species to squash leaf curl virus and sweetpotato whitefly. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 116: 137~141
- McKenzie C L, Shatters R G Jr, Doostdar H, Lee S D, Inbar M, Mayer R T. 2002. Effect of geminivirus infection and *Bemisia* infestation on accumulation of pathogenesis-related proteins in tomato. *Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 49(4): 203~214
- McPherson R M. 1996. Rating soybean germplasm for whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) infestations. *J. Agric. Entomol.*, 13(1): 65~71
- Meagher R L, Jr. 1994. Resistance of bedding plants to twospotted spider mite and sweetpotato whitefly. *Subtrop. Plant Sci.*, 46: 62~65
- Meagher R L, Jr., Smith C W, Smith W J. 1997. Preference of Gossypium genotypes to *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 90(4): 1046~1052
- Medae D L, Byrne D N. 1991. The use of *Verticillium lecanii* against subimaginal instars of *Bemisia tabaci*. *J. Invertebr. Pathol.*, 57: 296~298
- Minkenberg O P J, Tatar M C, Rosenheim J A. 1992. Egg load as a major source of variability insect forging and oviposition behavior. *Oikos*, 65: 135~142
- Morales F J. 2001. Conventional breeding for resistance to *Bemisia tabaci*-transmitted geminiviruses. *Crop Prot.*, 20(9): 825~834
- Morales P A, Bastidas R. 1997. Evaluación de la resistencia de ocho cultivares de melon (*Cucumis melo* L.) al ataque de la mosca blanca *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae) en el sector Los Perozos, Estado Falcon, Venezuela. *Bol. Entomol. Venez.*, 12(2): 141~149
- Moshe G, Gerling D. 1999. Predatory behavior of *Delphastus pusillus* in relation to the phenotypic plasticity of *Bemisia tabaci* nymphs. *Entomol. Exp. Appl.*, 92: 239~248

- Mound L A, Halsey S H. 1978. Whitefly of the world. London: British Museum and John Wiley & Sons, 340
- Muigai S G, Schuster D J, Snyder J C, Scott J W, Bassett M J, McAuslane H J. 2002. Mechanisms of resistance in *Lycopersicon germplasm* to the whitefly *Bemisia argentifolii*. *Phytoparasitica*, 30(4): 347-360
- Muniz M, Nombela G. 1997. Development, oviposition and female longevity of two biotypes of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) on three varieties of *Capsicum annuum* L. *Bull. OILB/SROP (IOBC/WPRS)*, 20(4): 143-146
- Munthali D C. 1992. Effect of cassava variety on the biology of *Bemisia afer* (Priesner and Hosny) (Hemiptera: Aleyrodidae). *Insect Sci. Applic.*, 13(3): 459-465
- Naranjo S E. 2001. Conservation and evaluation of natural enemies in IPM systems for *Bemisia tabaci*. *Crop Prot.*, 20(9): 835-852
- Naranjo S E, Butler G D Jr, Henneberry T J. 2002a. Complete bibliography of *Bemisia tabaci* and *Bemisia argentifolii*. In: Silverleaf Whitefly: National Research, Action and Technology Transfer Plan, 1997-2001; Fourth Annual Review of the Second 5-year Plan and final report for 1992-2002. 227-415
- Naranjo S E, Ellsworth P C. 2001. Special Issue: Challenges and opportunities for pest management of *Bemisia tabaci* in the New century. *Crop Prot.*, 20(9): 707-869
- Naranjo S E, Ellsworth P C, Chu C C, Henneberry T J. 2002b. Conservation of predatory arthropods in cotton: role of action thresholds for *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 95 (4): 682-691
- Naranjo S E, Flint H M. 1994. Spatial distribution of preimaginal *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in cotton and development of fixed-precision sequential sampling plans. *Environ. Entomol.*, 23(2): 254-266
- Naranjo S E, Hagler J R, Ellsworth P C. 2003. Improved conservation of natural enemies with selective management systems for *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in cotton. *Bioc. Sci. Tech.*, 13(6): 571-587
- Nauen R, Stumpf N, Elbert A. 2002. Toxicological and mechanistic studies on neonicotinoid cross resistance in Q-type *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Manag. Sci.*, 58(9): 868-875
- Nault L R. 1997. Arthropod transmission of plant viruses: a new synthesis. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 90: 521-541
- Navon A, Melamed-Madjar V, Zur M. 1991. Effects of a primitive cotton accession on feeding of *Spodoptera littoralis* and *Helicoverpa armigera* and on oviposition of *Bemisia tabaci*. *Phytoparasitica*, 19(2): 143-147
- Neal J W, Bentz J A. 1999. Evidence for the stage inducing phenotypic plasticity in pupae of the polyphagous whiteflies *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) and the *raison d'être*. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 92(6): 774-787
- Nehols J R, Tauber M J. 1977. Age-specific interaction between the greenhouse whitefly and *Encarsia formosa*: influence of the parasite on host development. *Environ. Entomol.*, 6: 207-210
- Nombela G, Beitia F, Muniz M. 2000. Variation in tomato host response to *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in relation to acyl sugar content and presence of the nematode and potato aphid resistance gene Mi. *Bull. Entomol. Res.*, 90: 161-167
- Nomikou M, Janssen A, Schraag R, Sabelis M W. 2001. Phytoseiid predators as potential biological control agents for *Bemisia tabaci*. *Exp. Appl. Acarol.*, 25: 271-291
- Odum E P. 1971. Fundamentals of Ecology, 3rd ed. Philadelphia: Sanders
- Oliveira M R V, Henneberry T J, Anderson P. 2001. History, current status, and collaborative research projects for *Bemisia tabaci*. *Crop Prot.*, 20(9): 709-723
- Omran H H, El-khidir E. 1978. On the preference of *Bemisia tabaci* (Genn.) of leaf-hairs for oviposition. *Anz. Schadlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*, 51(11): 175
- Onillon J C, Maignet P, Cocquemot C. 1994. Premieres resultats sur l'efficacite d'*Encarsia pergandiella* (Hymenopt., Aphelinidae) dans le controle de *Bemisia tabaci* (Homopt., Aleyrodidae) en serres de tomate. *Bull. IOBC/WPRS*, 17: 71-80
- Osborne L S, Landa Z. 1992. Biological control of whiteflies with entomopathogenic fungi. *Fl. Entomol.*, 75: 456-471
- Ozgun A F, Sekeroglu E. 1986. Population development of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) on various cotton cultivars in Cukurova, Turkey. *Agric. Ecosystems Environ.*, 17: 83-88
- Palumbo J C, Horowitz A R, Prabhaker N. 2001. Insecticidal control and resistance management for *Bemisia tabaci*. *Crop Prot.*, 20(9): 739-765
- Paris H S, Stoffella P J, Powell CA. 1993. Susceptibility to leaf silverying in the cultivar groups of summer squash. *Euphytica*, 69: 69-72
- Pascual S, Callejas C. 2003. Intra and interspecific competition between biotypes B and Q of *Bemisia tabaci*. In: Biology of *Bemisia* SESSION I: 3rd International *Bemisia* Workshop Barcelona 17-20 March
- Peña-Rojas E A, Pantoja A, Beaver J S. 1992. Determinación de la pubescencia de cuatro materiales genéticos de frijol (*Phaseolus*

- vulgaris L.) y su efecto sobre el insecto *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Rev. Colombiana Entomol.*, 18: 41~48
- Perring T M. 2001. The *Bemisia tabaci* species complex. *Crop Prot.*, 20(9): 725~737
- Perring T M, Cooper A D, Kazmer D J, Shields C, Shields J. 1991. New strain of sweetpotato whitefly invades California vegetables. *Calif. Agric.* 45: 10~12
- Perring T M, Cooper A D, Rodriguez R J, Farrar C A, Bellows T S. 1993. Identification of a whitefly species by genomic and behavioral studies. *Science*, 259: 74~77
- Perring T M, Cooper A, Kazmer D. 1992. Identification of the poinsettia strain of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) on broccoli by electrophoresis. *J. Econ. Entomol.*, 85: 1278~1284
- Prabhaker A W, Coudriet D L, Meyerdick D E. 1985. Insecticide resistance in the sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Appl. Entomol.*, 103: 447~451
- Prabhaker A W, Coudriet D L, Toscano N C. 1988. Effect of synergists on organophosphate and permethrin resistance in sweetpotato whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 81: 34~39
- Prabhaker N, Toscano N C, Castle S J, Henneberry T J. 1997. Selection for imidacloprid resistance in silverleaf whiteflies from the Imperial Valley and development of a hydroponic bioassay for resistance monitoring. *Pestic. Sci.*, 51: 419~428
- Prabhaker N, Toscano N C, Henneberry T J. 1998. Evaluation of insecticide rotations and mixtures as resistance management strategies for *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 91: 820~826
- Prabhaker N, Toscano N C, Henneberry T J, Castle S J, Weddle D. 1996. Assessment of two bioassay techniques for resistance monitoring of silverleaf whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) in California. *J. Econ. Entomol.*, 89: 805~815
- Price P W, Bouton C E, Gross P, McPherson B A, Thompson J N, Weis A E. 1980. Interactions among three trophic levels: influence of plants on interactions between insect herbivores and natural enemies. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 11: 41~65
- Quintero C, Cardona C, Ramirez D, Jimenez N. 1998. First report of biotype B of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in Colombia. *Rev. Colombiana Entomol.*, 24(12): 23~28
- Quintero C, Rendon F, Garcia J, Cardona C, Lopez A A, Hernandez P. 2001. Species and biotypes of whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae) affecting annual crops in Colombia and Ecuador. *Rev. Colombiana Entomol.*, 27: 27~31
- Ramos E Q, Alves S B, Tanzini M R, Lopes R B. 2000. Susceptibilidade de *Bemisia tabaci* a *Beauveria bassiana* en condiciones de laboratorio. *Manejo Integrado de Plagas*, 56: 65~69
- Rao N V, Reddy A S, Ankaiah R, Rao Y N, Khasim S M. 1990. Incidence of whitefly *Bemisia tabaci* in relation to leaf characters of upland cotton *Gossypium hirsutum* L. *Indian J. Agric. Sci.*, 60(9): 619~624
- Reitz S R, Trumble J T. 2002. Competitive displacement among insects and arachnids. *Annu. Rev. Entomol.*, 47: 435~465
- Riley D G, Sparks A N, Jr. 1993. Managing the sweetpotato whitefly in the Lower Rio Grande Valley of Texas. *Bull. Tex. Agric. Exp. Stn.*, 5082: 1~12
- Riley D, Batal D, Wolff D. 2001. Resistance in glabrous-type *Cucumis melo* L. to whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Entomol. Sci.*, 36(1): 46~56
- Riley D, Tan W J. 2002. Increased vigor in whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) associated with bifenthrin-resistant males. *J. Entomol. Sci.*, 37(1): 77~82
- Robertson I A D. 1987. The whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius) as a vector of African cassava mosaic virus at the Kenya coast and ways in which the yield losses in cassava, *Manihot esculenta* Crantz caused by the virus can be reduced. [French summary]. *Insect Sci. Appl.*, 8(4~6): 797~801
- Rosell R C, Bedford I D, Fröhlich D R, Gill R J, Markham P G, Brown J K. 1997. Analyses of morphological variation in distinct populations of *Bemisia tabaci*. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 90: 575~589
- Schoonhoven L M, Jermy T, van Loon J J A. 1998. Plants as insect food: not the ideal. In: *Insect-plant Biology*. International Book Services (ISBN paperback: 0412587009). 83~120
- Schuster D J, Kring J B, Price J F. 1991. Association of the sweetpotato whitefly with a silverleaf disorder of squash. *HortScience*, 26(2): 155~156
- Schuster D J, Mueller T F, Kring J B, Price J F. 1990. Relationship of the sweetpotato whitefly to a new tomato fruit disorder in Florida. *HortScience*, 25(12): 1618~1620
- Schuster D J, Price J F. 1996. Parasitization of *Bemisia argentifolii* (Hom.: Aleyrodidae) by *Encarsia pergandiella* (Hym.: Aphelinidae). *Entomophaga*, 41(1): 95~103
- Secker A E, Bedford I D, Markham P G, de Courcy Williams M E. 1998. Squash, a reliable field indicator for the presence of the B biotype tobacco whitefly, *Bemisia tabaci*. *Br. Crop Prot. Counc. Brighton Conf.*, 3: 837~842

- Segarra-Carmona A E, Bird J, Escudero J. 1990. Silvering of *Cucurbita moschata* (Duchesne Poir) associated with *Bemisia tabaci* Genn. (Homoptera: Aleyrodidae) in Puerto Rico. *J. Agric. (Univ. Puerto Rico)*, 74: 477-478
- Senior L J, McEwen P J. 1998. Laboratory study of *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuropt., Chrysopidae) predation on *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hom., Aleyrodidae). *J. Appl. Entomol.*, 22: 99-101
- Simmons A M. 1994. Oviposition on vegetable by *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae): temporal and leaf surface factors. *Environ. Entomol.*, 23(2): 381-389
- Simmons A M, McCreight J D. 1996. Evaluation of melon for resistance to *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 89(6): 1663-1668
- Simon B, Cenis J L, Demichelis S, Rapisarda C, Caciagli P, Bosco D. 2003. Survey of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) biotypes in Italy with the description of a new biotype (T) from *Euphorbia characias*. *Bull. Ent. Res.*, 93(2): 259-264
- Simon C, Franke A, Martin A. 1991. The polymerase chain reaction: DNA extraction and amplification. In: Hewitt G M, Johnston A W B, Young J P W eds. NATO ASI series H57, Molecular techniques in taxonomy, 329-355
- Sivasupramaniam S, Johnson S, Watson T F, Osman A A, Jassim R. 1997. A glass-vial technique for monitoring tolerance of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) to selected insecticides in Arizona. *J. Econ. Entomol.*, 90(1): 66-74
- Skinner R H, Cohen A C. 1994. Phosphorous nutrition and leaf effects on sweetpotato whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) host selection. *Environ. Entomol.*, 23(3): 693-698
- Smith C W, Dugger P, Richter D. 1998. Tamcot 8104: a new mid season cultivar for central and south Texas. In: Proc. Beltwide Cotton Conf., San Diego, CA. 607-609
- Smith H A, Koenig R L, McAuslane H J, McSorley R. 2000. Effect of silver reflective mulch and a summer squash trap crop on densities of immature *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on organic bean. *J. Econ. Entomol.*, 93(3): 726-731
- Smith P. 1993. Control of *Bemisia tabaci* and potential of *Paecilomyces fumosoroserus* as a biopesticide. *Biocontrol News and Information*, 14: 71-78
- Soundararajan R P, Baskaran P. 2001. Mechanisms of resistance in brinjal (*Solanum melongena* L.) to whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Madras Agric. J.*, 88(10-12): 657-659
- Strong D R, Lawton J H, Southwood T R E. 1984. Insects on Plants. Cambridge, Mass: Harvard University Press. 313
- Tan W J, Riley D G. 2000. Effects on reproduction of silverleaf whitefly, *Bemisia argentifolii* due to bifenthrin resistance. *Resist. Pest. Manage.*, 11(1): 19-21
- Tauber M J, Tauber C A, Daane K M, Hagen K M. 2000. Commercialization of predators; recent lessons from green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae: Chrysoperla). *Am. Entomol.*, 46: 26-38
- Tetsuhiko S, Ishikawa H. 1995. Production of essential amino acids from glutamate by mycetocyte symbionts of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*. *J. Insect Physiol.*, 41: 41-46
- Teuber L R, Rupert M E, Gibbs L K, Taggard K L. 1996. Breeding resistant alfalfa holds promise for silverleaf whitefly management. *Calif. Agric.*, 51(3): 25-29
- Tonhasca A Jr, Palumbo J C, Byrne D N. 1994a. Aggregation patterns of *Bemisia tabaci* in response to insecticide applications. *Entomol. Exp. Appl.*, 72 (3): 265-272
- Tonhasca A Jr, Palumbo J C, Byrne D N. 1994b. Distribution patterns of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in cantaloupe fields in Arizona. *Environ. Entomol.*, 23 (4): 949-954
- Toscano N C, Prabhaker N, Castle S J, Henneberry T J. 2001. Inter-regional differences in baseline toxicity of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) to the two insect growth regulators, buprofezin and pyriproxyfen. *J. Econ. Entomol.*, 94(6): 1538-1546
- Toscano N C, Yoshida H A, Henneberry T J. 1997. Responses to azadirachtin and pyrethrum by two species of *Bemisia* (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 90(2): 583-589
- Toscano N, Henneberry T, Castle S. 1994. Population dynamics and pest status of silverleaf whitefly in the USA. *Arab. J. Plant Prot.*, 12(2): 137-142
- Ucko O, Cohen S, Ben-Joseph R. 1998. Prevention of virus epidemics by a crop-free period in the Arava region of Israel. *Phytoparasitica*, 26(4): 313-321
- Van Giessen W A, Mollema C, Elsey K D. 1995. Design and use of a simulation model to evaluate germplasm for antibiotic resistance to the greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* and the sweet potato whitefly (*Bemisia tabaci*). *Entomol. Exp. et Appl.*, 76: 271-286
- van Lenteren J C. 2000. A greenhouse without pesticides: fact or fantasy? *Crop Prot.*, 375-384

- van Lenteren J C, Drost Y C, van Roermund H J W, Posthuma-Doodeman C J A W. 1997a. Aphelinid parasitoids as sustainable biological control agents in greenhouses. *J. Appl. Entomol.*, 121: 473-485
- van Lenteren J C, Roskam M M, Timmer R. 1997b. Commercial mass production and pricing of organisms for biological control of pests in Europe. *Biol. Control*, 10: 143-149
- Veenstra K H, Byrne D N. 1998a. Effects of starvation and oviposition activity on the reproductive physiology of the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Physiol. Entomol.*, 23: 62-68
- Veenstra K H, Byrne D N. 1998b. The effect of physiological factors and host plant experience on the ovipositional activity of the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Entomol. Exp. Appl.*, 89: 15-23
- Villar A, Gómez E, Morales F, Anderson P. 1998. Effect of legal measures to control *Bemisia tabaci* and geminiviruses in the Valley of Azua. National Integrated Pest Management Program, Santo Domingo, Dominican Republic Rep., 16
- Von Arx R, Baumgartner J, Delucci V. 1983. Developmental biology of *Bemisia tabaci* (Genn.) (Sternorrhyncha, Aleyrodidae) on cotton at subsistent temperatures. *Bull. Sor. Entomol. Suisse*, 56: 389-399
- Wilson F D, Flint H M, Staff B R, Parks N J. 1993. Evaluation of cultivars, germplasm lines, and species of *Gossypium* for resistance to biotype "B" of sweetpotato whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.*, 86(6): 1857-1862
- Wool D, Calvert L, Constantino L M, Bellotti A C, Gerling D. 1994. Differentiation of *Bemisia tabaci* (Genn.) (Hom., Aleyrodidae) populations in Colombia. *J. Appl. Entomol.*, 117(2): 122-134
- Wool D, Gerling D, Bellotti A, Morales F, Nolt B. 1991. Spatial and temporal genetic variation in populations of the whitefly *Bemisia tabaci* (Genn.) in Israel and Columbia: an interim report. *Insect Sci. Applic.*, 12: 225-230
- Wool D, Gerling D, Nolt B L, Constantino L M, Bellotti A C, Morales F J. 1989. The use of electrophoresis for identification of adult whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae) in Israel and Columbia. *J. Appl. Entomol.*, 107: 344-350
- Wraight S P, Carruthers R I, Bradley C A, Jaronski S T, Lacey L A, Wood P, Galaini-Wraight S. 1998. Pathogenicity of the entomopathogenic fungi *Paecilomyces* spp. and *Beauveria bassiana* against the silverleaf whitefly, *Bemisia argentifolii*. *J. Invertebr. Pathol.*, 71: 217-226
- Wu X X, Hu D X, Li Z X, Shen Z R. 2002. Using RAPD-PCR to distinguish biotypes of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in China. *Entomol. Sinica*, 9(3): 1-8
- Wu X X, Hu D X, Li Z X, Shen Z R. 2003. Identification of Chinese populations of *Bemisia tabaci* (Gennadius) by analyzing ribosomal ITS1 sequence. *Progress Nat. Sci.*, 13(4): 276-281
- Xu R M. 1996. The occurrence and distribution of *Bemisia* in China. In: Gerling D ed. *Bemisia 1995: Taxonomy, Biology, Damage, Control and Management*. Andover, UK: Intercept., 125-131
- Yokomi R K, Hoelmer K A, Osborne L S. 1990. Relationship between the sweetpotato whitefly and the squash silverleaf disorder. *Phytopatholog*, 80: 895-900

第三章 稻水象甲

第一节 分类地位	131	第六节 生物学特性	142
第二节 起源与分布	132	第七节 种群生态学	146
第三节 识别特征与早期诊断	134	第八节 风险分析与早期预警	154
第四节 传播途径与入侵成因	136	第九节 检疫、预防、根除与控制	157
第五节 危害现状与生态经济影响的评估	139	第十节 应用与基础研究发展策略	165

摘要 稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel 属鞘翅目 Coleoptera 象虫科 Curculionidae 沼泽象亚科 Erihrininae 稻水象属 *Lissorhoptrus*。根据后足胫节前锐突的有无和锐突的形状可较准确地鉴别雌雄。

稻水象甲原产美国密西西比流域，是美洲新大陆特有的种。1959年加利福尼亚州北部首次发现，且为孤雌生殖型，之后扩展至全加利福尼亚州，成为20世纪初以来美国普遍发生的毁灭性水稻害虫。1976年从美国传入日本，1988年从日本传入韩国和朝鲜，同年在中国河北省唐山市唐海县首次发现，接着先后在环渤海6省市、东南沿海3省以及内陆3省被发现，是中国粮食作物上重点治理的检疫性害虫之一。亚洲的稻水象甲全为孤雌生殖型。

稻水象甲成虫取食水稻等植物叶片，留下与叶脉平行的取食斑可作为早期诊断的依据之一。与北方稻区的单季稻作种植相适应，稻水象甲年发生一代。北纬35°以南地区可年发生两代，发生代数与食料和水稻生育期有关。在南方，一代成虫大部分行夏季和冬季生殖滞育。稻水象甲成虫取食水稻叶片对水稻产量影响不大，幼虫食根危害后减低水稻的分蘖力、株高、对营养和水分的吸收、延缓水稻的生育期，从而影响产量。产量损失常高于10%，有时可高达25%以上。

稻水象甲在稻田与越冬场所间的季节性迁飞、爬行等短距离扩散，使发生区缓慢扩展；而远距离扩散主要借助于人为传带。高山是扩散的天然屏障，但公路可打破这种阻隔。

防治稻水象甲的主要技术有：灯光、水面浮标、锥型诱捕器等物理诱捕、采用耐害品种、推迟灌水、化学杀虫剂等。在美国，呋喃丹曾经是最防治稻水象甲的主要农药，1998年禁用后，高效氯氟氰菊酯(功夫菊酯)、 ζ -氯氟菊酯、氟虫腈(锐劲特)和除虫脲等取而代之。育苗箱施药、叶面喷施、水中漫施颗粒剂以及稻田周边施药是亚洲的主要药剂防治方式，中国可采用的药剂有锐劲特、吡虫啉及一些有机磷等，尽量兼治多种害虫。

针对未来南方广大水稻产区大面积发生稻水象甲的局面，有必要研究有关该虫传播与扩散、生殖-飞行发育、与寄主植物的互作、与同营养水平物种的资源竞争、经济安全并有效的检疫控制策略等基础和应用基础层面的科学问题。

Chapter 3 Rice Water Weevil *Lissorhoptus oryophilus* Kuschel

Abstract: The rice water weevil (RWW) *Lissorhoptus oryophilus* Kuschel belongs to Eriirhininae (Coleoptera: Curculionidae). The existence and shape of fore-mucro on the lower end of tibia of the hind leg of adult is the determinative trait for sexual identification. Native to Mississippi River Valley in the New World, RWW has been introduced into Japan, South and North Korea, Pan-Bohai Sea in northeast, and southeast of China. All RWWs in California, USA and in Asia are parthenogenes females. RWW is the most severe insect pest of rice in the North America and has become a serious pest and threat to rice production in the Asian invaded regions.

RWW adults feed on young rice and other grass leaves, leaving feeding scars paralld to the vention of leaves. These become the symptoms for early diagnosis of the existence of the alien insect.

Adapted to the local thermal, photoperiodic and nutritional conditions, RWW is univoltine in northern and can be bivoltine in southern China. Most of the first-generation adults in southeastern coastal China, however, emigrate from rice fields to oversummering and overwintering sites for reproductive diapause.

Both adults and larvae of *L. oryophilus* feed on rice, but it is generally the larval stage that causes yield losses. Adult leaf feeding damage is rarely of economic importance. Larvae feed on or in roots, progressing through four instars in 3~4 weeks depending on field conditions. Root pruning by larvae results in reduction in vegetation growth, tillering, nutrienting and water taking-up, grain number, and grain weight. Severely damaged plants are also more prone to wind damage because the pruned roots no longer provide anchorage in the soil. Yield losses caused by the weevil typically exceed 10%, and can reach 25% or more.

Seasonal migration between overwintering and breeding sites is the main modes for short-distance dispersal, and expands the distribution area slowly. Jumping long-distance dispersals of the weevil are assumed through unintentional human transmission. High mountains are natural barriers for the expansion, but can be broken by high-ways.

The main techniques for control of the rice water weevil are: light, cone, and water floating traps, tolerant rice varieties deployment, delayed flooding and application of chemical insecticides. In the USA, application of carbofuran post-flooding had been a major effective approach for 30 years to control the weevil. After its removing as registration for use in rice in 1998, lamda-cyhalothrin (Karate, Fury), delta-cypermethrin, fipronil (Icon) and diflubenzuron (Dimlin) have been the successors. Seed-box application, spray, slow-release and peripheral

application of some insecticides are the main methods for control of the weevil in Asia. A facultative control strategy, in which RWW is one of the multiple targets to be managed, must be recommended in southern China region must be recommended.

A series of topics related to the invasion, dispersal, population dynamics of the rice water weevil, and its interaction with host plants should be elucidated by further studies with methodologies at the levels of individual, population, physiological and molecular ecology.

Key words: *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, population dynamics, dispersal, invasive alien species

第一节 分类地位

稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, 又称稻水象, 属鞘翅目 Coleoptera, 象虫科 Curculionidae, 沼泽象亚科 Eriirrhinae, 稻水象属 *Lissorhoptrus*。1831 年 T. Say 将其定名为 *Bagous simplex* (Tucker, 1912)。1876 年 LeConte 将它归到稻水象属 *Lissorhoptrus* LeConte, Hydronomi 族, 象虫亚科 Curculioninae, 象虫科。1930 年, Boeving 和 Craighead 根据幼虫的特征将它从象虫亚科 Curculioninae 中分出, 归入 *Lissorhoptrinae* 亚科(Boeving and Craighead, 1930)。1882 年以来的早期学者均用异名 *Lissorhoptrus simplex* Leconte, 直到 1951 年, 分类学者 Kuschel 修订 *Lissorhoptrus* 属后, 确定了现在的种名。根据 Kuschel(1951)的分类, 稻水象属在美洲共有 16 个种 2 个亚种, 其中美国分布的有 6 个种, 分别是 *L. buchani* Kuschel, *L. chapini* Kuschel, *L. lacustris* Kuschel, *L. longipennis* Kuschel, *L. oryzophilus* Kuschel 和 *L. simplex*(Say), 但以水稻为寄主的仅 *L. oryzophilus* 和 *L. simplex*。*L. oryzophilus* 和 *L. simplex* 为近似种, 在外部形态特征和生活习性上极其相似, 因此两个种极易混淆, 鉴别雌虫主要根据背板 7 后缘凹陷的深浅, 其中 *L. oryzophilus* 雌虫背板 7 后缘凹陷深, 而 *L. simplex* 平截, 或稍具凹陷。雄虫则根据后足胫节锐突形状, 其中 *L. oryzophilus* 无前锐突, 锐突短而粗、深的分裂呈两叉形, 而 *L. simplex* 具前锐突, 雄虫锐突具 3 裂, 中间的较长、钩状, 基余 2 裂突出。*L. oryzophilus* 普遍存在于除西北部以外的其他美国大陆, 还分布在加拿大、墨西哥和古巴(Kuschel, 1951; O'Brien and Wibmer, 1982), *L. oryzophilus* 和 *L. simplex* 同时存在于美国南部水稻产区(Kuschel, 1951; O'Brien and Wibmer, 1982), 虽然前者的分布更普遍是主要优势种, 但早期的研究可能是其中的一个种也可能是包含两个种的复合体(Bowling, 1972)。*Lissorhoptrus* 属中危害水稻的还有 *L. brevisrostris* (Suffrain) 和 *L. isthmicus* Kuschel, 前者是限制古巴水稻生产的两大害虫之一(Pantoja and Medina, 1988), 后者分布在巴拿马(Kuschel, 1951)。

稻水象甲有两性生殖型和孤雌生殖型(parthenogenesis), 美洲发现的大多数 *L. oryzophilus* 种群为两性生殖型, 1959 年在美国西海岸发现的加利福尼亚种群(Lange and Grigarick, 1959; Grigarick and Beards, 1965), 1976 年始传入亚洲稻区日本(Hirao, 1988)、进而蔓延到朝鲜半岛和中国的均属孤雌生殖型。

我国学者管良华等(1995)对美国、日本模式标本(Morimoto, 1984)和来自加拿大、朝鲜的标本进行了比较, 认为亚洲种与美洲种不是一个种。主要依据有 3 条: 一是亚洲发

生的全为雌虫,美洲标本雌雄皆有;二是亚洲标本的体背面黑斑明显,美洲标本不明显;三是亚洲标本储精囊导管长约 380 μm ,导管着生点远离交配囊底端,棒状骨片腹片端部小弧线,其端宽 130 μm ,美洲标本储精囊导管仅长 168 μm ,导管着生点就在交配囊底端,棒状骨片端部斧头型,端宽约 227 μm ,从而认为亚洲发生的稻水象甲是 *Lissorhoptrus* 属内的新种,命名为伪稻水象甲 *L. pseudoryzophilus* n. sp. (管良华等, 1995)。但这有进一步研究澄清的必要(魏鸿钧, 1997),因为日本发生的孤雌生殖型稻水象甲经过该种的原定名人 Kuschel 博士确认(Kisimoto, 1993),而美国的 Caldara 和 O'Brien (1995)仔细检查后认为 *L. pseudoryzophilus* 应是 *L. oryzophilus* 的同物异名(Saito, 2001)。

第二节 起源与分布

稻水象甲原产美国东部,是美洲新大陆特有的种(Blatchley and Leng, 1916; Kuschel, 1951),水稻种植前的 100 多年,稻水象甲广泛分布于北美洲中部和东部,自新英格兰、加拿大往西到密歇根州、爱荷华州,向南到得克萨斯州和佛罗里达的辽阔地域(Blatchley and Leng, 1916),以沼泽地的禾本科、莎草科等潮湿地带生长的杂草植物为食。在 18 世纪后半叶,随着密西西比河流域的阿肯色、密西西比、路易斯安那和得克萨斯等州开始大规模种植水稻(注:水稻最早于 1646 年引种到美国,但到 1887 年后才显示经济重要性),稻水象甲逐渐转移危害水稻,进而成为水稻上的重要害虫(Bowling, 1972)。1959 年 6 月 1 日在加利福尼亚州萨克拉门托北部城市 Biggs 首次发现孤雌生殖型的稻水象甲(Lange and Grigarick, 1959; Grigarick and Beards, 1965),10 年后便扩展至全加利福尼亚州各稻区(Grigarick, 1993)。从而成为 20 世纪初以来美国普遍发生的毁灭性水稻害虫(Tucker, 1912; Webb, 1914; Gifford and Trahan, 1969; Bowling, 1980; Thompon *et al.*, 1994; Way, 1990)。

稻水象甲于 1972 年传播到西印度群岛岛国的多米尼加(注:也可能是两性生殖的不同种 *L. mexicanus*) (Kobayashi *et al.*, 1984)。

该虫自 1976 年从美国传入日本(Iwata, 1976; Isogawa, 1977; Hirao, 1988),1988 年传入韩国(Goh and Choi, 1993)和朝鲜,同年 6 月在我国河北省唐山市唐海县首次发现,接着先后在台湾(1990 年 3 月)、天津(1990 年 6 月)、北京(1990 年 8 月)、辽宁(1991 年 7 月)、山东(1992 年 8 月)、浙江(1993 年 5 月)、吉林(1993 年 7 月)、福建(1996 年 4 月)、安徽、湖南、山西、陕西等地被发现,并有进一步向邻近省份扩散蔓延的趋势,为我国对内和对外检疫对象,也是我国粮食作物上重点治理的检疫性害虫之一(李先誉, 1997)。

因此,到目前为止,已知稻水象甲分布在加拿大(艾伯特省)、美国(密执安、艾奥瓦、伊利诺伊、纽约、新泽西、康涅狄格、哥伦比亚特区、马里兰、弗吉尼亚、堪萨斯、阿肯色、路易斯安那、得克萨斯、印第安纳、佛罗里达、明尼苏达、蒙大拿、俄亥俄、肯塔基、密西西比、南卡罗来纳、加利福尼亚)、墨西哥、古巴、多米尼加、哥伦比亚、圭亚那(Blatchley and Leng, 1916; Kuschel, 1951; O'Brien and Wibmer, 1982)(图 3-1a)、日本(全国)、朝鲜(黄海南道、黄海北道、平安南道、开城、南浦、平壤、釜山)、韩国(庆尚南道、江源道、镜硬难道、京几道、庆尚北道)和中国(河北、天津、北京、辽宁、山



图 3-1 稻水象甲在北美洲(a)、亚洲东部(b)的分布图(祝增荣综合有关文献绘制)

东、吉林、浙江、福建、湖南、安徽、台湾、山西)(图 3-1b)。发生区约在北纬 $18^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间(全国农业技术推广服务中心, 1998; 赵成德等, 1996), 逐渐成为世界性大害虫。

第三节 识别特征与早期诊断

成虫：体长(不含管状缘)2.6~3.8mm，体壁褐色，密被相互连接的灰色鳞片。前胸背板和鞘翅的中区无鳞片，呈暗褐至黑褐色斑。缘端部和腹面、触角沟两侧、头和前胸背板基部、眼四周，前、中、后足基节基部、腹部第三节、第四节腹面及腹部末端被黄色圆形鳞片，其余各部鳞片均灰色(图 3-2)。缘和前胸背板约等长，近扁圆筒形，略弯曲。触角膝状，红褐色，着生于喙中间之前，柄节棒形，触角棒倒卵形或长椭圆形，长为宽的 2.0~2.1 倍，分为 3 节，第 1 节光滑无毛，第 2 节、第 3 节被浓密细毛(图 3-3a)；前胸背板宽略大于长，前端略收缩，两侧边近直形。小盾片不明显；鞘翅明显具肩，肩斜，翅端平截或稍凹陷，行纹细不明显，每行间被至少 3 行鳞片，第 1 行、3 行、5 行、7 行中部之后有瘤突。腿节棒形，无齿；胫节细长弯曲，中足胫节两侧各有 1 排长的游泳毛(图 3-3b)。

后足胫节锐突形状是稻水象甲成虫性别鉴定的一个有用特征，根据后足胫节前锐突的有无和锐突的形状可较准确地鉴别雌雄，其中雌虫的锐突单个，长而尖，有前锐突(图 3-4a)，雄虫后足胫节无前锐突，锐突短而粗，深裂呈两叉形(图 3-4b)。此外，稻水象甲

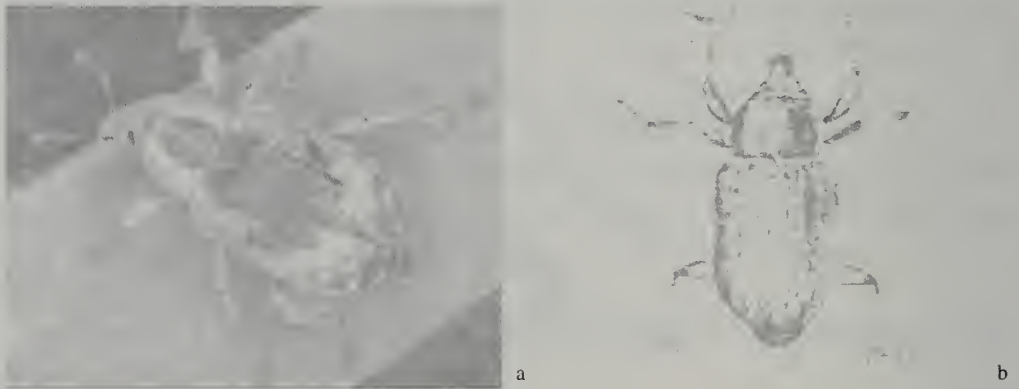


图 3-2 稻水象甲成虫

a. 在水稻叶面爬行(祝增荣, 2003); b. 在水中向前游泳(Hix *et al.*, 2000)

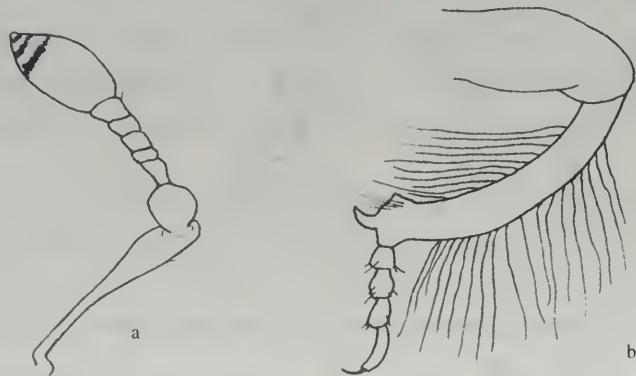


图 3-3 稻水象甲形态图(全国农业技术推广服务中心, 1998)

a. 触角的形态特征; b. 中足胫节的游泳毛形态



图 3-4 稻水象甲形态图(全国农业技术推广服务中心, 1998)

a. 雌虫后足胫节前锐突的形态; b. 雄虫后足胫节锐突的形态

雌虫的腹部比雄虫粗大, 雌雄虫在腹节 1、2 的腹面, 和腹节 5 腹面隆起的形状和程度也显见差异, 其中雌虫可见腹节 1 和 2 的腹面中央平坦或凸起, 雄虫在中央有较宽的凹陷; 雄虫腹节 5 腹面隆起不达腹节 5 长度的一半, 隆起区的后缘是直的, 而雌虫隆起区超过腹节 5 长度的一半, 隆起区的后缘为圆弧形(Everett and Newsom, 1964; 全国农业技术推广服务中心, 1998)(图 3-5)。

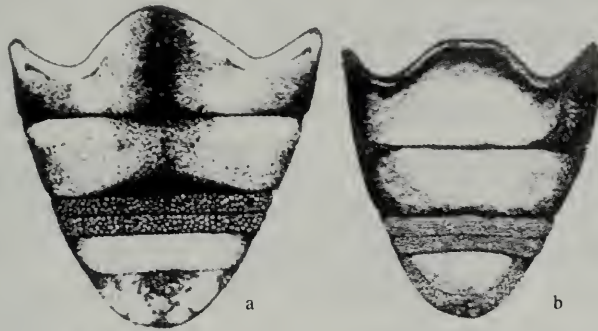


图 3-5 稻水象甲形态图(Everett and Newsom, 1964)

a. 雄虫腹板腹面观; b. 雌虫腹板腹面观

扫描电子显微镜分析表明: 稻水象甲成虫的主要感觉器位于分成 8 节的触角的梗节和棒节上(Hix *et al.*, 2003)。触角电位(electroantennogram, EAG)分析发现离体触角对水稻挥发物正己烷(hexanal)有电生理反应。这意味着电生理技术可能可用于筛选稻水象甲有反应的水稻的挥发物和稻水象甲成虫的挥发物(Hix *et al.*, 1998)。由于稻水象甲触角是疏水性的, 因此在进行触角电位实验时, 应该用钨电极丝插入触角。

· 卵: 长约 0.8mm, 珍珠白色, 圆柱形, 两端圆, 略弯。

幼虫: 共 4 龄, 各龄幼虫的头壳宽度(表 3-1)有明显的差异, 可作为分龄的参照。老熟幼虫体长 10mm, 白色, 头部褐色; 无足; 腹部 2~7 节背面各有 1 对向前伸的钩状呼吸管, 气门位于管中。

表 3-1 稻水象甲各龄幼虫的头壳宽度/mm

一龄	二龄	三龄	四龄	参考文献
1st instar	2nd instar	3rd instar	4th instar	References
0.14~0.18	0.20~0.26	0.28~0.38	0.40~0.60	Cave and Smith (1983)
0.16~0.22	0.23~0.30	0.32~0.40	0.41~0.53	Kayumi and Sakashita (1985)
0.15~0.23	0.25~0.31	0.33~0.40	0.42~0.60	Grigarick (1993)

幼虫龄期确定: $y(\text{头壳宽度}) = -0.855 + 0.133x(\text{龄期})$ (Kayumi and Sakashita, 1985)

蛹: 老熟幼虫在寄主根系上作茧, 然后在茧中化蛹。茧黏附于根上, 卵形, 土灰色, 长径 4~5mm, 短径 3~4mm; 蛹白色, 复眼红褐色, 大小、形状近似成虫。

第四节 传播途径与入侵成因

稻水象甲传播途径多样, 可通过自身的活动, 如爬行、飞翔等, 借助风、雨、水流等“海、陆、空”行为自然扩散。或由运输工具及装载的货物携带作远距离人为传播。其中稻水象甲从稻田到越冬场所的季节性迁飞, 使发生区不断向毗邻地区短距离扩散; 而向新区拓展的远距离扩散, 主要借助于人为传带(翟保平和高晗武, 1999b)。如日本的稻水象甲来源于美国加利福尼亚州的干草调运(Asayama and Nakagome, 1993), 中国台湾的虫源来源于日本(施锡彬, 1991)。

一、稻水象甲自然扩散的可能途径

(一) 水

稻水象甲的生活史始于稻田灌水, 一般在灌水后的稻田产卵(Isely and Schwarde, 1930), 而在灌水前很少产卵(Everett, 1966; Webb, 1914)。该虫的分布也与水关系密切, 目前稻水象甲在全世界的发生区大多数分布在沿海、沿江流域。稻水象甲有在水中游泳的习性, 可以借助河水、海水随水漂流移动。河北丰南县发现从唐海县流出的水闸处有 1 万多头稻水象甲成虫聚集在一起(郭云书, 1996)。成虫能在地上爬行, 在水中游泳和在空中飞翔, 爬行和游泳的起点温度为 10℃, 飞翔的起点温度为 20℃, 河北唐山成虫全年飞行的起止期为 4 月 28 日至 9 月 24 日(张玉江, 1997)。

(二) 气流

日本和韩国的学者研究认为稻水象甲可借助气流靠自身的飞行进行传播, Kisimoto 等(1980)用载网悬系气球在 30~50m 高空采到了随气流飞行的越冬代和第 1 代稻水象甲成虫; 而后在距陆地 8~10km 的伊势湾内同样采到了越冬代和第 1 代成虫。朝鲜 1989 年 5 月多次观察到, 宽 100~300m、高 30~40m 的大批成虫随气流成群结队迁飞, 乘车追踪调查发现, 稻水象甲飞行距离达 20~35km, 有的能飞行 3h 左右。在稻水象甲迁飞扩散的过程中, 风速和风向对其远距离传播有着重要的促进作用(Matsui, 1985), 日本在稻水象甲第 1 代成虫迁飞盛期的 7~8 月间盛行西南风, 稻水象甲的蔓延也有明显的向东北方向扩散的趋势(Matsui, 1984)。在韩国, 稻水象甲迁飞期间多偏西风, 所以向东扩散得相当快

(Lee and Uhm, 1993)。中国辽宁丹东和吉林集安与朝鲜隔鸭绿江相望,在稻水象甲迁飞期(5月和8月)盛行偏南风,大量稻水象甲越冬代和第1代成虫便随风跨江而入。由于对岸的朝鲜防治工作不力,每年为丹东和集安提供了源源不断的虫源。

但翟保平等(1999f)对浙江双季稻区稻水象甲起飞行为的研究表明,尽管稻水象甲属于典型的迁飞性昆虫,但其飞行力并不强(飞行速度低于 0.3m/s,伸手可逮),且基本上不借助风力扩散(只在无风和微风时起飞),故其自然扩散距离不会太远。田间调查表明,离山(越冬场所)越近的田块虫口密度越高;捕虫盆的入盆虫量也表明,山边 100m 以内的降虫量占总降虫量的 73.8%。沿公路路标查田间稻水象甲的发生量,估计其飞行距离不超过 2km。风是影响其迁飞扩散的重要因子,但稻水象甲随气流远迁的可能性不大,因为稻水象甲对起飞环境要求很高,其迁飞高峰期只出现在无风或微风条件下,风力稍大便无法展翅起飞;风不仅可直接破坏越冬代成虫的起飞环境,还可造成气温降至其起飞临界温度以下而阻碍其起飞;而第1代成虫的起飞发生在日落以后,低层大气处于稳定状态,不存在上升气流。

我国南方目前稻水象甲的发生区的自然地理环境以丘陵山地(地面以上高度几十米到上百米)为主,即使少量稻水象甲成虫在几十米的高度飞行,一旦与物体(山地植被等)相撞便假死坠落,或在临近地物(如梯田中的寄主植物)时主动降落,因而也难以形成远距离扩散。

从其蔓延速度看也能说明这一点。稻水象甲 1993 年在浙江省玉环、洞头、乐清、温岭等地初次被发现时,其种群已有相当规模,其中以乐清海屿虫量最高。1994 年 9 月在瑞安、温州交界处的山上取土调查,越冬种群密度高达 408 头/m²(山顶)和 856 头/m²(山腰),比乐清的虫量要高 10~20 倍。如此巨大的种群规模说明,乐清湾沿岸的稻水象甲种群已有多年的定居史了。1996 年发现稻水象甲分布的南界为福建福鼎,距虫源密度最高的瑞安场桥、梅头等地仅约 60km。稻水象甲是何时传入的已无从追溯,故无法推测其扩散速度。但与日本的每年平均传播 100km 的速度相比,稻水象甲在中国南方的蔓延速度显然要慢得多。因此,一般情况下稻水象甲不存在远距离迁飞,而严格控制人为传带是控制疫区扩大的有效途径。

在日本,也有学者认为稻水象甲是一种飞行力较弱的昆虫,其自主迁飞不可能在 10 年内在日本列岛扩散 1000km,其远距离扩散主要依赖于轮船、汽车和火车等交通工具传带(Kisimoto, 1991; Asayama and Nakagome, 1993)。稻水象甲传入中国吉林省,可能是随气流借助风力或随水流越江、沿岸城镇灯诱集由朝鲜境内自然扩散传入,或随边境贸易或国内其他疫区内的货物和运输车辆传入(王金伟和刘冬华, 1997)。

二、稻水象甲人为传播的可能途径

- (1) 卵、初孵幼虫和成虫由水稻秧苗和稻草携带作远距离传播,危险性最大。
- (2) 成虫随稻种、稻谷、稻壳、稻草、芦苇及其他寄主植物行远距离传播。

(3) 成虫利用其趋光性附着在交通工具和所运输的货物上行远距离传播(Kisimoto, 1993; 张玉江, 1997; 蔡悦等, 1997a, 1997b, 1997c, 1997d)。曾有研究发现稻水象甲成虫附着在汽车挡风玻璃上,行驶 30km,仍静止不动。但在田间虫口密度小的情况下,稻

谷传带成虫的几率很小(李秀文, 1999)。

(4) 近年发现该虫也可随蟹苗或鱼苗向外传播(张玉江, 1997), 或随着山坡、草地等稻水象甲越冬场所所培育苗木的调运传播。

因此, 加强发生区的检疫工作, 严禁染虫稻秧、稻草、稻种及其制品等的调运, 是控制该虫扩散蔓延的有效途径(蔡悦等, 1997a, 1997b, 1997c, 1997d; 高晗武等, 1998; 高晗武等, 2003; 翟保平等, 1999c)。

三、稻水象甲在主要分布区的扩散

(一) 在北美的扩散

在原产地美国, 稻水象甲在美国南部各州水稻生长区广泛分布, 并且通过大西洋沿岸各州传入加拿大(Blatchley and Leng, 1916; Kuschel, 1951; O'Brien and Wibmer, 1982), 水稻种植前在沼泽地带的杂草上取食, 南部水稻主产区因 19 世纪末期开始就普遍危害, 因而无法考证扩散的经过; 但在美国加利福尼亚州萨克拉门托流域(Sacramento Valley), 商业化水稻种植始于 1912 年, 自 1959 年 6 月在该州的比格斯(Biggs)附近发现稻水象甲危害幼嫩水稻后(Lange and Grigarick, 1959), Grigarick 等对其逐年的扩散规律作了详细的记载。1959~1970 年的 11 年间, 稻水象甲在该区内的年扩散速度为 32km, 发生区域沿着稻田和主要水路(Grigarick, 1993)扩展。由于稻水象甲繁殖期间的 6~9 月是加利福尼亚州的干旱季节, 平均降水量仅 4~19mm, Grigarick(1993)认为若加利福尼亚州不种水稻, 稻水象甲在加利福尼亚州可能是仅存在高尔夫球场或人工花坛小池杂草上的稀有种。

(二) 在日本的入侵、定居和扩散

1976 年 5 月下旬, 位于日本中部的爱知县长滑市约 50hm²的山谷水田首先发现稻水象甲。目前关于日本稻水象甲的来源已经达成共识, 即认为日本的稻水象甲来源于美国加利福尼亚州的干草调运传入(Asayama and Nakagome, 1993; Kisimoto, 1980; Kisimoto, 1993)。在侵入扩散地中, 山谷、山麓、不连接地发生多, 有向西北方向扩散快的倾向。其中, 初发年份的 1976~1981 年间, 稻水象甲逐渐向其相邻府、县逐渐扩大, 以爱知县为中心向四周呈轴心型扩散(Kisimoto, 1980), 其间年平均分布扩大的速度为 20~30km。至 1982 年, 该虫除向邻近地区扩散外, 还沿着高速公路或者越海相当距离向西南和东北方向迅速扩展, 到达 100km 以外的许多地区, 发生面积急剧上升, 呈现大范围的東西向扩大之势。

稻水象甲的扩散范围在日本为每年 20~100km(Matsui, 1984), 其中 1982 年比 1981 年范围扩大了 425km(Kisimoto, 1993)。稻水象甲这么一种行动迟缓的昆虫, 能在 10 年扩散 1000km(Kisimoto, 1991), 应该归因于: ①它能随气流在一定的高度飞行; ②风和交通工具对传播扩散的促进作用; ③孤雌生殖的高效繁殖率(Matsui, 1984)。

(三) 在韩国的入侵、定居和扩散

1988 年 7 月初首次在韩国南部庆尚南道河东的一块稻田发现(Hadong-gun, Kyungsang South province), 接着其他 3 个地区发生, 农林渔业部紧急拨款宣布了“根除稻水象甲计划”, 稻水象甲仍然从其发生地不断向外扩散(Lee and Uhm, 1993)。当年, 1422 块 247.1hm² 稻田发

生,范围属6省市43个乡,1992年扩散到20608块田3456.5hm²,面积扩大了14倍。稻水象甲的扩散方向主要沿着经低凹地区(包括河流)的繁殖和越冬场所之间迁移时的风向,扩散似乎会被高山阻隔,少数地区由于通过山脉的公路而打破了山脉的阻隔(Lee and Uhm, 1993)。

(四) 在中国大陆的入侵、定居和扩散

1988年6月在我国华北渤海湾边的唐海首次发现时,危害严重的地块绝产面积超过600hm²,可见当地若干年前已有入侵种群成功定殖。随后,1989年在台湾省,1990年在天津、北京,1991年在辽宁丹东,1992年在山东东营,1993年在吉林集安和浙江台州等地局部稻田先后发生稻水象甲危害,1996年底全国7省(市)54县(市)的33万公顷稻田发生了稻水象甲,约占全国稻田总面积的0.9%(全国农业技术推广服务中心,1998)。近年来,稻水象甲在南方稻区逐渐扩大,进而扩展到福建福鼎(高晗武和翟保平,1997)、湖南株州(2000年)、安徽桐城(2001)、山西代县(2003年6月)、陕西汉中(2003年6月)也相继发现了稻水象甲的危害。方海维等(2003)推测安徽桐城的稻水象甲可能随从浙江、吉林调运养鸭饲料传入。根据有关报表统计,2001年稻水象甲的发生面积已占水稻种植面积的1.8%。我国华北滨海稻区约以每年30km的速度由初发地呈同心圆向外扩散,在丹东以每年10~15km的速度向外扩展(孙如川和毛志农,1996)。

(五) 在中国台湾的入侵、定居和扩散

稻水象甲的最初(1990年3月)发生地(桃园县新屋乡)接近桃园机场,故推测疑为当初从日本进口高而夫球场的草坪草携入(施锡彬,1991)。稻水象甲的扩散分布在夏季(双季稻)甚于冬季,但危害程度则早稻较晚稻严重。1992年为止,其扩散分布往北受碍,因台北市水稻栽培稀少;往南则受丘陵地限制;1996年后已越过上述地理屏障的高山阻隔而快速向南扩散蔓延,发生乡镇扩大到46个(Cheng and Shih, 2001)。

综观稻水象甲的传播历史,该虫在北美大陆分布范围的扩大和危害性上升,首先是因为引种了水稻,使稻水象甲的适宜寄主产生了根本性的改变。寄主的转变导致其分布区的迅速扩大;而日本的虫源来自美国加利福尼亚州的干草,台湾的虫源来源于日本,说明人类活动帮助其克服了地理屏障,使其在不同的大陆分布扩展。该虫能不断侵入新区,适应新区而建立新的种群并在新区扩展而长期定居,暗示着其具有极不同寻常的生理和生态适应能力。该虫在亚洲稻区的进一步扩展蔓延也只是个时间问题。

第五节 危害现状与生态经济影响的评估

一、稻水象甲经济重要性的认识史

有关该虫的经济重要性最早于1881年引起Howard的注意(Riley, 1881),他发现该虫在佐治亚州大草原萨瓦纳(Savannah)上发生危害,并首次确认了稻水象甲的幼虫(Riley, 1883);他还最早提出用排水法控制幼虫(Isely and Schwardt, 1934)。1909~1914年间,路易斯安那州和美国农业部昆虫局对该虫进行了有关生物学和防治技术的观察和研究,其中比较详细的有Newell(1913)、Tucker(1912)和Webb(1914)的报道。他们根据该虫的广

泛分布、发生量及其幼虫对稻根的严重危害而一致认为稻水象甲是当地水稻上最重要的害虫，但危害后对产量的损失难以估计，因为无法找到一块完全不受稻水象甲侵害的田块与受害田进行比较(Webb, 1914)。直到 1930 年, Isely 和 Schwardt 用田间笼罩试验证实了稻水象甲对水稻确实造成了严重的产量损失(Isely and Schwardt, 1934)。

现在, 稻水象甲是美国分布最广而最具经济重要性的水稻食根者, 是美国发生最普遍而具毁灭性的水稻害虫(Bowling, 1980)。稻水象甲成虫和幼虫均可取食为害水稻, 成虫取食危害通常不严重, 除非严重危害引起水稻叶片致死或萎焉, 极少数情况下可能使植株致死(Tucker, 1912; Webb, 1914; Ingram, 1927), 而主要以幼虫食根致害(Bowling, 1972; Smith, 1983; 翟保平等, 1997)。早期研究认为稻水象甲造成产量损失 1%~75% (Tucker, 1912), 稍后 Ingram 和 Douglas (1930) 在路易斯安那州的系列笼罩试验认为稻水象甲对产量影响可忽略不计, 其重要性被高估; 但与此同期, 在阿色肯州的采用几乎相同方法的试验却证明稻水象甲危害后可造成 35.1% 的损失 (Isely and Schwardt, 1932; Isely and Schwardt, 1934)。

二、为害症状

稻水象甲成虫沿寄主植物的叶脉啃食叶肉或幼苗叶鞘, 一般从正面取食, 叶片被食部位仅存透明下表皮, 形成长短不等的白色长条斑; 条斑宽 0.38~0.8mm, 通常 0.5mm, 长一般不超过 30mm。在水稻上, 低龄幼虫在稻根内蛀食, 使稻根呈空筒状; 高龄幼虫在稻根外部咬食, 造成断根。移栽不久的稻秧被害后易形成浮秧。受害植株根系发育不良, 严重时变黑腐烂, 植株矮小, 生育期明显推迟(图 3-6)。



图 3-6 稻水象甲田间为害状(商晗武 摄)

a. 成虫在水稻叶片上的取食斑; b. 中间绿色部分为受害后的水稻植株, 生育期明显推迟

三、虫口密度与产量损失的关系

稻水象甲危害后影响水稻的分蘖力、株高、延缓水稻的生育期, 从而影响产量。如河北严重受害稻田水稻分蘖率降低 38%, 株高降低 56cm, 抽穗期推迟 16d, 成穗率、穗粒数、千粒重下降(郭云书, 1996), 产量减少 68.6%(张玉江, 1997)。在辽宁, 株高降低 14.7~35.2cm, 抽穗期推迟 5~7d, 结实率减少 7.5%~13.6%, 平均每公顷减产 934.5~2215.5kg, 损失 12.4%~32.6%(赫农等, 1997)。但 Palrang(1996)在加利福尼亚州进行连续 3 年的田

田间试验研究表明稻水象甲危害对水稻的生育期进程没有影响；成虫密度 0.4 头/丛(相当于 7 头幼虫 /株)时的稻株生长,株高、分蘖数及每株水稻的叶面积等因幼虫危害而显著低于 0 头/丛、0.2 头/丛、0.4 头/丛、0.6 头/丛密度处理的,但不同幼虫密度下水稻的成熟期没有差异。幼虫取食危害稻根后,水稻植株的光合作用效率下降,水稻产量在最高密度下危害减少 45%(1993)和 33%(1995),3 年间每头幼虫平均减产 1.6%。在日本,1 头/丛时的损失可超过 10%(Tsuzuki *et al.*, 1983b; Kobayashi, 1993),笼罩试验 0.25 头/丛达到损失的阈值(Tsuzuki *et al.*, 1983a);美国加利福尼亚州 Grigarick(1963)试验表明每株稻上接 1 头成虫可损失产量 35%,每核心样方(core sample, 直径为 10cm、深 10cm 的圆柱体)中幼虫每增加 1 条,每公顷产量将减少 45kg。

虫口密度与产量损失的关系一直受到各地研究者的普遍关注(Thompson, 1970)。台湾施锡彬和李宝煌(1996)分别对早、晚稻移栽后 3d、15d 在 0.7m² 小区 9 丛稻上(5 头/丛)接虫 3 头、6 头、9 头、18 头、27 头、36 头(接虫后 14d 除去成虫),比较移植时间及期作接种不同密度稻水象甲成虫对水稻生育及产量的影响,结果表明:稻水象甲危害后水稻生长发育受阻、植株矮化、分蘖数减少,产量降低,随着放饲成虫数增多受害量加重,水稻移栽后 3d 接虫的影响大于 15d 接虫,如移栽 3d 后接虫 0.33 头/丛,早、晚稻分别减产 7.8%和 7.6%,已超过 5%的经济危害水平,但 15d 后接虫同样密度下减产仅 3.6%和 3.8%,每丛需接虫 0.66 头才超过 5%的损失。

稻水象甲在早晚稻上的危害没有差异,危害程度视其侵入本田期的时间及数量而定,高密度下对早、晚稻的损失达 40.5%和 39.5%。认为延迟稻水象甲迁入本田期的时间,可以减轻危害、降低产量损失。在辽宁,通过设置 8 个不同密度成虫(0.25 头/穴、0.5 头/穴、1.0 头/穴、1.5 头/穴、2.0 头/穴、4.0 头/穴、8.0 头/穴)的田间笼罩(长×宽×高 = 1m×1m×1.5m),以及 6 个不同幼虫密度梯度的田间小区试验,发现随着稻水象甲成虫密度的增大,水稻的分蘖数、株高、根系长、每穴穗数及平均穗粒数都有不同程度的降低或减少,其中,成虫数量与分蘖数、根系长和每穴穗数之间的相关性达到显著或极显著水平,对千粒重影响不大。幼虫平均密度与分蘖数、株高和根系长显著负相关,即随着幼虫密度的增加,水稻的分蘖、株高及根系长有明显减少或降低的趋势,且幼虫危害对根系生长及分蘖发育有显著的抑制作用。幼虫危害对水稻生长发育影响最大,在水稻分蘖期内直接影响根系发育,从而影响分蘖,减少有效穗数。当 6 月上旬成虫密度为 2 头/穴或 7 月上旬幼虫密度为 12 头/穴时,即可造成有效穗减少 20%左右,稻水象甲主要通过幼虫危害稻根,减少分蘖数和有效穗而导致水稻减产(赵文生等, 1997a)。孙富余等(2000)试验表明在越冬代发生期的 6 月初稻田平均成虫数量在 0.25 头/丛、0.33 头/丛、0.48 头/丛、0.69 头/丛、1.0 头/丛时,将分别减产 2%、5%、10%、15%和 20%。

近年来的研究关注稻水象甲危害后对产量损失的机制,即对危害后究竟通过影响水稻生长发育的哪些指标和产量构成要素而影响产量进行了研究(Wu *et al.*, 1997; Zou *et al.*, 2004a)。一般认为,成虫啃食叶片,严重时影响稻叶的光合作用而使稻株的生长和分蘖略有延缓,仅在少数极高密度下才可能影响分蘖数,故对产量基本无影响;幼虫蛀食稻根,引起断根,减少根系与土壤的接触面积,导致植株对营养物质吸收能力降低,稻株的生长减缓,进而导致株高和分蘖下降(孙汝川和毛志农, 1996),但幼虫对水稻的危害是一个缓慢积累过程,需在移栽 5 周后方可看出危害与未受害稻株分蘖数的显著不同,产

量损失主要是有效穗的减少(Tsuzuki *et al.*, 1983b)。对稻水象甲危害后对水稻生理相关性研究发现, 稻水象甲幼虫危害根系后最主要通过减少分蘖而造成减产(Grigarick, 1984; Hesler *et al.*, 2000; Zou *et al.*, 2004a, 2004b), 稻株受害后营养生长阶段的根系生长总量、茎叶生长总量和分蘖数可分别减少 65%、21%和 36%, 每穗实粒数和千粒重分别下降 12%和 2%。减产的主要机理是通过分蘖数的下降而导致有效穗的减少, 因为分蘖数与有效穗显著相关(Miller *et al.*, 1991; Wu *et al.*, 1997), 每穗实粒数也与稻谷产量高度相关(Counce and Wells, 1990)。

四、经济损失的评价

稻水象甲危害后所造成的经济损失因国家和地区及试验的年份、方法和品种以及栽培措施的不同而异(Way, 1990)。综合各地的报道, 一般认为可引起水稻减产 15%~30%, 严重的减产达 50%~70%, 甚至绝产(Way and Wallace, 1993; Asayama and Nakagome, 1993; 郭云书, 1996)。在美国, 严重危害时产量损失大于 1123kg/hm², 全美国因稻水象甲危害造成的损失占稻谷产量的约 7%, 净损失 1220 万美元, 1990 年美国农业部报告全年防治费用超过 4000 万美元。该虫在美国路易斯安那州等南部水稻产区危害特别严重, 产量损失一般为 10%(Smith, 1983; Smith *et al.*, 1986), 密度较高时为 25%~50%(Smith and Robinson, 1982; Stout *et al.*, 2000; Smith, 1983), 严重时达 70%以上(Anonymous, 1994), 其中路易斯安那州每年损失 900 万~1000 万美元(Smith *et al.*, 1986)。发生重的 1998 年达 1500 万~3000 万美元, 若加上对稻米加工厂及水稻相关行业的间接影响, 总损失将达 5000 万~10 000 万美元(Odom, 2002)。在日本严重时损失稻谷 41%~67%、稻草减少 48%~65%(Asayama and Nakagome, 1993); 韩国估计损失在 4%~22%之间(Park *et al.*, 1991)。朝鲜 1992 年因稻水象甲使水稻总产减 20%(Nam, 1998); 中国北方稻区的河北省一般地块减产 10%~20%, 受害最严重地块减产 68.6%(张玉江, 1997), 其中初发生的 1988 年有 400hm² 受害减产 25%(郭云书, 1996); 在辽宁损失 12.4%~32.6%(赫农等, 1997)或 10%~60%(赵成德等, 1997)。南方稻区台湾省严重危害时产量损失 40%以上(施锡彬和李宝煌, 1996)。浙江省温岭市水稻受害后, 一般产量损失 5%~10%, 严重田块 40%~60%, 少数田块基本无收; 1994 年浙江乐清有 30hm² 严重受害田, 平均单产仅 1308 ± 82.5kg/hm²(幅度 453~2625kg), 减产近 80%(浙江省稻水象甲课题组, 1996)。

稻水象甲造成的经济损失不仅表现在直接危害引起的稻谷损失, 还表现为防治费用的增加。据我们推算, 浙江、福建沿海因稻水象甲的传入每年需额外使用农药的有效成分达 90t(每年发生面积 5 万公顷, 用药 3 次, 每公顷每次施用 40%有机磷 15 000ml)。

而由于稻水象甲侵入对农田生态系统多样性的直接影响, 以及增加了农药使用次数和农药品种造成的间接影响, 目前尚未有较明确的评估。

第六节 生物学特性

一、稻水象甲的生活史

稻水象甲以成虫在山坡、林地、田埂、稻茬、稻田周围的草丛、西班牙苔藓、枯枝

落叶层等各种栖息地(Tucker, 1912; Webb, 1914; Grigarick and Beards, 1965; Stevenson, 1972; Gifford and Trahan, 1967; Smith, 1983), 以滞育(Knabke, 1973; Nilakhe, 1977)或休眠状态(田春晖等, 1999)越冬, 头年7月份始向越冬、休眠场所迁飞(Stevenson, 1972; Smith, 1983; 翟保平等, 1997)。翌春滞育解除后, 越冬代成虫迁入稻田, 产卵于稻株基部的叶鞘内面组织中, 以幼虫食根致害。卵期6~10d, 幼虫期约一个月, 共4龄, 老熟幼虫在稻根上结土茧化蛹, 预蛹期1~2d, 蛹期5~7d(Kisimoto, 1993)。在单季稻作区, 新羽化的第1代成虫迁回越冬场所; 而在中、低纬稻区, 夏季部分第1代成虫迁入越冬场所越冬, 另一些则转入晚稻田形成第2代, 以第2代成虫滞育越冬(Muda *et al.*, 1981; Tanaka, 1986, 1987, 1988)。稻水象甲对各地不同的光温条件和种植制度相适应而形成了不同的生活史。

稻水象甲的季节性生活史开始于早春, 当越冬代滞育成虫从越冬场所复苏并迁飞到已灌水或未灌水的稻田(Muda *et al.*, 1981; Morgan *et al.*, 1984; Palrang and Grigarick, 1993), 越冬后成虫在越冬场所出现期开始于3月下旬并持续到5月份(Isely and Schwardt, 1934; Morgan *et al.*, 1984; Muegge *et al.*, 1996)或6月底(Webb, 1914), 在加利福尼亚州稻水象甲的春季迁飞始于3月底持续到6月初(Palrang *et al.*, 1993), 飞行活动主要受气候影响(Grigarick, 1984, 1993)。稻水象甲在任一给定田块的生活史始于灌水(Isely and Schwardt, 1934), 成虫通常在灌水后第一个星期大量侵入稻田, 随后密度便很快下降(Isely and Schwardt, 1934; Sooksai, 1976), 密度下降可能的原因是成虫死亡或迁移到其他更幼嫩的稻田危害, 但相信后者是更主要的原因(Isely and Schwardt, 1934)。该虫在灌水前很少产卵(Everett, 1966; Webb, 1914), 一般在灌水后1~2周内达到产卵高峰(Everett and Trahan, 1967; Rice *et al.*, 1999)。有研究表明成虫首选幼嫩的稻株和叶片取食, 其中最喜欢的是秧龄30~40d的稻株。

稻水象甲卵大多产在水下叶鞘内, 4~10d后孵化(Grigarick and Beards, 1965; Raksarat and Tugwell, 1975)。初孵幼虫先在叶鞘内取食一段时间后, 咬个洞脱出叶鞘并借助重力落到土壤根区危害(Bowling, 1972; Kuschel, 1952; Grigarick and Beards, 1965; Everett, 1965), 幼虫在植株外生活的这段时间是稻水象甲生活史中最脆弱的环节(Bowling, 1972)。幼虫共4龄(Cave and Smith, 1983), 第2到第7腹节背面有成对弯曲的气门钩(Isely and Schwardt, 1930), 用于刺穿根组织并获取空气(Smith, 1983), 幼虫能在土壤中移动81cm; 一般幼虫期14~20d, 蛹期至少7d(Isely and Schwardt, 1934; Smith, 1983), 故发育一个世代需要4~5周(Everett, 1966)。据此, Everett(1966)认为在路易斯安那州每年可发育4代。新成虫高峰在田间第1成虫高峰后5~6周出现, 故夏天的田间种群可能是越冬代和第1代并存组成的(Isely and Schwardt, 1934)。Stevenson(1972)报道成虫自8月份的第2周开始逐渐迁到杂草(fescue 酥油草)上休眠越冬。在加利福尼亚州, 稻水象甲在田埂、田边及其他非耕地多年生杂草基部越冬(Grigarick and Beards, 1965), 第2年春季从滞育中复苏并在附近取食杂草30~60d, 补充能量发育飞行肌(Muda *et al.*, 1981; Haizlip and Tugwell, 1983; Morgan *et al.*, 1984; Grigarick, 1993), 随后从越冬场所飞离或迁出到灌溉后的稻田或其他水生杂草上繁殖(Grigarick and Beards, 1965)。成虫的取食和产卵一般在稻苗长出水面的2周内, 然而, 春季迁飞一般在可利用的灌水稻田出现之前(Grigarick and Beards, 1965), 迁飞期间被水田周围的田埂植被所吸引并作临时栖息所, 直到可利用的稻苗出现。对卵孵化

温度的研究表明：35℃为卵孵化的高温上限，40℃时卵已不能孵化(Raksarat and Yugwell, 1975)。

年发生代数：主要取决于当地的水稻栽培制度和气候条件。一般地，在高纬度的单季稻区年发生一代，在中、低纬度的双季稻区年发生两至三代。在原产地美国，加利福尼亚、阿肯色、密苏里等州很可能仅发生一代(Grigarick and Beards, 1965; Way and Wallace, 1993)。对美国南部各州的发生代数，争议颇多，有人认为仅发生一代或部分两代(Webb, 1914)，而有人认为至少发生两代(Way and Wallace, 1993)。在我国北方单季稻区，年发生一代，其中部分地区(如河北)在非水稻寄主上可发生不完全二代；在南方双季稻区如浙江东南部、台湾等地，一年发生可发生两个完全世代，但相当一部分一代成虫羽化后直接转移到山坡田边越夏和越冬(图 3-7)。

发育：稻水象甲分成虫、卵、幼虫和蛹 4 个发育阶段，以成虫在田埂、稻茬、稻田周围的草丛、林地落叶层等各种栖息地滞育越冬(Nilakhe, 1977)，深度一般在土层 3cm 以内。翌年春季，冬后成虫先取食越冬场所的杂草(以禾本科、莎草科杂草为主)，飞行肌发育后迁至秧田或本田取食和产卵；若秧田尚未揭膜或移栽，则先集中在田埂等处取食杂草。幼虫老熟后在稻根上筑土茧化蛹。在单季稻区，新羽化的第 1 代成虫先在田间、田埂或田边其他地带取食杂草，飞行肌发育后即迁移至上述场所越夏，继而越冬；在双季稻区，1 代成虫中大部分个体羽化后迁至越夏越冬场所，少部分个体则迁至晚稻田取食产卵，形成 2 代(翟保平等, 1997, 1999a, 1999d)。

卵期 4~10d，幼虫期 14~30d，预蛹期 1~2d，蛹期 5~7d(Kisimoto, 1993)。卵期发育起点温度为 15.5℃，有效积温为 79DD；从初孵幼虫发育至成虫的起点温度为 12.1℃，有效积温为 568DD。对冬后成虫，产卵前期的有效积温为 150DD，从开始取食到第 1 代成虫羽化的发育起点温度为 12.5℃。温度对其生活史的其他方面也有重要作用(表 3-2)。

表 3-2 温度与稻水象甲的发育

发育阶段	发育起点温度/℃	有效积温/DD	文献
50%越冬成虫始取食	13.8	33.0	Yokoyama <i>et al.</i> , 1990
50%越冬成虫始取食	13.9	34.4	Kobayashi, 1988
产卵前期	12.5	150.0	Kobayashi, 1988
卵期	15.5	79.0	Matsui <i>et al.</i> , 1984
卵期	16.3	62.1	Lee <i>et al.</i> , 2002
产卵-成虫羽化	12.7	665.0	Matsui, 1984
产卵-成虫羽化	10.2	780.9	Goh and Choi, 1993
产卵-成虫羽化	13.9	577.6	Lee <i>et al.</i> , 2002
初孵幼虫-成虫羽化	12.1	586.0	Matsui <i>et al.</i> , 1984

行为：成虫可在水中游泳(Hix *et al.*, 2000a)，其活动和取食偏好有水的环境，具假死性，对黑光灯趋性较强。一般只选择被水浸没的寄主部分产卵。在水稻上，卵产于外围

2~3 张叶的叶鞘近中脉组织内,单产。越冬后成虫平均产卵 50 余粒,最多可达 200 余粒。初孵幼虫先在叶鞘内钻蛀取食一段时间(一般不超过 1d),其后离开叶鞘落入水中,转移至根部取食。在水稻田,幼虫一般在 0~6cm 的土层中取食为害;具转移为害习性,通过身体蠕动扩散至邻近的寄主植物。3 龄幼虫取食常造成寄主断根。

二、稻水象甲的寄主植物

稻水象甲食物复杂,寄主植物范围非常广泛,种类繁多。据报道,成虫能取食 13 科 104 种植物,幼虫能在 6 科 30 余种植物上完成发育(孙汝川和毛志农,1996)。

在日本成虫可取食 7 科 56 属 86 种植物,幼虫取食植物 5 科 18 属 22 种,稻田中发现有卵的寄主 7 种,18 种植物根部受幼虫为害,8 种植物上有土茧(Okada,1980)。

原产地美国仅报道 3 科 13 属 19 种 (Webb,1914; Isley and Schwardt,1934; Lange and Grigarick,1959)。最近,Tindall 和 Stout (2003)详细取样了路易斯安那州稻田杂草根部土壤,发现 8 种单子叶和 8 种双子叶杂草均有稻水象甲幼虫,双子叶杂草的每株带幼虫率在 11%~47%,而双子叶杂草的则高达 33%~100%;65%的杂草带蛹;单子叶植物的幼虫和蛹一般比双子叶植物高;寄主植物谱比以往报道的宽。稻水象甲在其中的稗草 *Echinochloa crus-galli*, 洋野黍 *Panicum dichotmiflorum*, 油莎草 *Cyperus esculentus* L., 阔叶臂形草 *Brachiaria platyphylla* Nash 等 4 种杂草上的产卵选择性显著高于在当地的推广水稻品种 Cocodrie。在温室的非选择性实验中也发现稗草是稻水象甲取食和成虫产卵的最适合寄主植物;但在另一些嗜好的杂草如阔叶臂形草上,幼虫体重、幼虫和蛹期的存活率显著比水稻上的低(Tindall and Stout,2003)。

中国河北省稻水象甲的寄主植物有 7 科 56 种,大多为野生杂草(郭云书,1996)。张玉江(1997)认为成虫可为害水、旱田植物 10 科 65 种,其中禾本科 45 种,莎草科 9 种,泽泻科、灯心草科、香蒲科各 2 种,鸭跖草科、茅渣科、天南星科、眼子菜科、鸢尾科各 1 种;幼虫可为害生长于水田的 5 科 20 种植物,其中禾本科 14 种,莎草科 3 种,泽泻科、香蒲科、天南星科各 1 种。山东发现寄主植物 7 科 49 种(全国农业技术推广中心,1998)。

稻水象甲除危害栽培水稻外,还是美国加利福尼亚州野水稻 *Zizania* sp.与茭白 *Zizania caduciflora* L.为同一属植物上的重要害虫,因发生较重,尚无有效的农业或生防措施,目前需要专门用马拉硫磷或拟除虫菊酯类农药进行防治。在浙江省温岭市近年来也发现危害茭白 *Zizania caduciflora* 在我国北方地区,如吉林省集安市和河北省抚宁县等,发现稻水象甲早春时大量为害玉米,有的株害率达 80%~100%,单株最高虫量 16 头,尤以稻改玉米田、近稻田玉米田、地膜玉米田发生较重(刘雅坤等,1998;汪志和,1999),该虫危害的栽培植物有扩大的趋势。

目前对稻水象甲的寄主或替代寄主研究很少,了解不多,而稻田生态系中杂草种类较多,极有可能与水稻共同影响稻水象甲的种群发展。在亚洲,稻水象甲作为一种新加入稻田生态系的入侵昆虫,对昆虫与杂草的相互作用研究将有助于对稻水象甲的种群动态规律的了解。此外,我们发现一些杂草可能是稻水象甲产卵和取食的嗜好植物,是比水稻更适宜的寄主植物,故极有可能通过杂草种群的调控来抑制稻水象甲种群。

三、种间关系

水稻叶片受黏虫 *Spodoptera frugiperda* 严重为害后, 地下的稻水象甲幼虫密度下降 32%、体重下降 48%; 而稻水象甲幼虫为害水稻根后, 地上部的秋黏虫受影响的程度较小, 其生长率下降 9%~37%。这些相互负面的影响表明当两种昆虫共享同一株水稻时, 他们之间存在通过寄主植物(水稻)调节的非平衡似然竞争(Tindall and Stout, 2001)。

第七节 种群生态学

一、主要生态区的种群动态

(一) 美国

美国南部各州稻水象甲的发生世代, 因研究地点和研究人员的不同颇有争议, 说法不一。有人认为至少发生两代(Stevenson, 1972), 有的认为可发育两代和一个不完全第 3 代(Gifford and Trahan, 1966), 甚至四代(Everett, 1966), 也有人认为仅有一代或部分两代(Tucker, 1912; Webb, 1914; Muda *et al.*, 1981), Way 和 Wallace (1993)则认为, 在墨西哥湾沿岸各州年发生至少两代, 而再偏北的阿肯色、密苏里等州则很可能仅一代(Way and Wallace, 1993; Clyde *et al.*, 1996)。

美国南方的水稻栽培一般在 3~5 月播种(撒播或条播), 撒播为水直播, 大多由飞机播种, 且在水稻成熟前稻田中一直有水。条播多为旱播。条播田出苗后灌跑马水, 直到开始分蘖(大约出苗后 3~5 周)时才灌水并保持到 7~8 月水稻成熟。8 月中旬前收割的稻田马上灌水施肥可栽培一茬再生稻, 再生稻通常在 10 月底~11 月收获。加利福尼亚州则无再生稻, 水稻在 4 月和 5 月由飞机撒播, 田间一直有水。新一代成虫一般在 6 月初到 8 月下出现。得克萨斯州的诱虫资料表明, 稻水象甲成虫在持久灌水前已在稻田活动, 但直到持久灌水后才开始产卵, 其种群峰期出现在持久灌水后 3~4 周(Way and Wallace, 1993)。7 月份下半月开始, 新羽化的第 1 代成虫大都又飞回越冬场所(Shang *et al.*, 2003a, 2003b, 2003c)。据 Muda 等(1981)的研究, 在阿肯色州确有一些成虫在幼嫩的晚植稻上(7 月 10 日灌水)形成第 2 代。Way 和 Wallace (1993)报道, 在南方稻区, 新一代稻水象甲成虫的为害对再生稻并无直接影响, 而原作水稻的受害程度则会继续影响到再生稻; 而且, 大多数在 8 月份或更迟羽化的第 1 代成虫将直接进入越冬(Smith, 1983)。

在加利福尼亚州, 孤雌生殖稻水象甲年发生一代(Grigarick and Beards, 1965)。3 月中旬~6 月中旬为越冬代成虫活动期; 发生早的年份, 高峰期出现在 3 月下旬, 迟发年份则一般为 5 月上旬; 新羽化成虫出现于 7 月初~8 月末(Grigarick, 1993)。

(二) 日本

Kobayashi(1984)根据日本各地的光温分布和耕作制度推断, 在 N36°以南早插稻与晚插稻(7 月份以后种植的第 2 茬水稻)的混栽区, 或称两茬栽培区, 稻水象甲每年可发生两代, 而 N36°以北则每年仅一代。

中、北部一代区: 这里为单季稻种植区, 水稻 5 月下旬~6 月上旬插秧。越冬成虫 4

月中旬开始在越冬场所活动取食,5月中旬达高峰,6月上旬结束。在越冬场所取食活动峰期后的1~2周(5月下旬左右),田间虫量达到高峰。成虫密度高峰后1周为产卵峰期,卵峰后4周为幼虫密度高峰,化蛹峰期出现在成虫峰后7周(7月上旬)。第1代成虫7月上旬开始出现,7月下旬到8月上旬达高峰。新羽化的成虫取食嫩草后进入越冬场所休眠越冬(Asayama and Nakagome, 1993)。

南部二代区:在日本南部,水稻种植方式有3种类型,即早插单季稻(4~5月插秧)、常规单季稻(5月下旬~7月上旬插秧)和双季稻区。与之相适应,出现了与种植类型相关的季节性消长(Tanaka, 1993)。

早插单季稻田(鹿儿岛):越冬成虫于4~5月从越冬场所迁入新插稻田,5月中旬达高峰。第1代幼虫在5月~7月下旬发生,峰期在6月下旬左右。第1代成虫于6月中旬~8月中旬羽化后,主要取食无效分蘖,或取食田埂上的禾本科杂草;此后其中的大多数个体迁入越冬场所,仅少数迁至常规单季稻田继续繁殖,第2代成虫于9月上中旬羽化(Tanaka, 1986)。

常规单季稻田(九州):越冬成虫5~7月产卵,而常规单季稻田间于6月下旬~8月下旬可见从早插单季稻田中迁入的第1代成虫,但其种群密度明显低于早插单季稻田中的成虫密度,仅为10~30头/百丛。其中可能还包括一些越冬代成虫,只是尚无法区分。第2代幼虫发生于7月中旬~8月下旬,峰期8月上旬。第2代成虫出现在9月中旬~10月中旬。

双季稻区(冲绳, N26°):越冬成虫于3~4月迁入早稻田,第1代幼虫出现于4月中旬~6月中旬,峰期在5月上旬。蛹在5月上旬~6月中旬可见,第1代成虫于5月中旬~6月羽化,5月下旬为羽化峰期。第1代成虫自6月上旬开始迁至灌木丛、树篱和田埂杂草中越冬,并且大多数滞留越冬。少数第1代成虫7月中旬再现于晚稻田间,8月上旬~下旬产卵,8月下旬~9月中旬出现第2代幼虫,9月上旬~10月上旬化蛹,9月中旬~10月第2代成虫羽化(9月下旬峰期),其种群密度约为第1代成虫的1/10。第2代成虫在越冬前卵巢不发育(Tanaka, 1993)。

(三) 韩国和朝鲜

一年一代。越冬场所中以山脚越冬虫量最高,其次是田埂、堤岸、稻田及附近的高地等。越冬后成虫4月开始活动,5月下旬~6月上旬迁入稻田,6月初为产卵盛期。在大田环境下,从卵到成虫的发育历期大约需8周(卵期7~9d,幼虫期28~37d,蛹期6~9d)。第1代成虫7月中旬出现,8月初为羽化峰期。新羽成虫从稻田迁往越冬场所休眠越冬(Goh and Choi, 1993)。朝鲜的发生期比韩国略推迟几天(转引自孙汝川和毛志农,1996)。

(四) 中国南方稻区

中国南方稻区1989年首先在台湾省发现稻水象甲,并逐渐向浙江[发现年份(下同):1993]、福建(1996)、湖南(2000)、安徽(2001)等地扩散,其中台湾和浙江东南沿海的双季稻区发生规律研究较深入,但福建、湖南和安徽因发现面积小,虫口密度低,发现年份较迟,目前为止仅见简要报道其发生规律(方海维等,2003a, 2003b)。

台湾省双季稻区:台湾地处亚热带地区,一年种植两季水稻。早稻通常在3月中旬

开始播种，7月底前收获；晚稻7月底~8月初栽插，12月中旬前收获。稻水象甲一年也发生两个世代(Shih and Cheng, 1993)，但在持续灌溉地区也可能发生3代，晚稻前期的高温 and 越冬场所的高湿是种群的主要限制因子(Cheng and Shih, 2001)，越冬代成虫2月底开始取食再生稻或杂草，早稻插秧后便迁入稻田，于水稻分蘖前出现高峰。第1代幼虫3月底初见，4月中旬达高峰；蛹4月底出现，5月中旬~5月底高峰。第1代成虫5月中旬~6月中旬羽化，在稻田停留数天后逐步迁出到田埂上或防风林或山坡上取食杂草，晚稻移栽不久后重返稻田发育第2代。第2代幼虫和蛹的种群高峰分别出现在插秧后第5~6周(9月初)和第9周(9月底)，第2代成虫于10月中旬出现。新羽化的成虫在短期取食无效分蘖后迁至田埂、树丛和山坡等越冬场所越冬(施锡彬, 1992)。两代稻水象甲的各发育阶段与早、晚稻的生长发育同步发生。不论早稻或晚稻，均是移栽后成虫便立即迁入，且在大约第3周出现一个明显的高峰。早稻受害重于晚稻(早稻田的幼虫虫口密度约为晚稻的两倍)。经济危害水平为移栽后3d、15d的阈值分别为每丛0.25头和0.5头(Cheng and Shih, 2001)，但晚稻期间其扩散程度比早稻季节要高些，台湾发生的稻水象甲第1代成虫无夏眠(或夏季滞育)现象。

浙江省双季稻区：稻水象甲在浙南双季稻区一年可发生两代，以成虫滞育越冬，在早稻上完成第1代发育(图3-7a)，部分1代成虫迁入晚稻，在晚稻上完成第2代发育(翟保平等, 1997；郑雪浩等, 1997)。春季气温回升后，越冬个体解除滞育并开始取食杂草，发育飞行肌，于4月下旬始陆续迁入早稻秧田和本田，产卵危害，4月底~5月上旬出现第1代卵盛期，第1代幼虫期在5月上中旬~7月上旬，峰期6月上中旬；第1代蛹5月底始见，峰期出现在6月中下旬。第1代成虫于6月中旬始见，6月下旬~7月上中旬达到峰期。所有第1代成虫均生殖滞育、脂肪体丰满，待飞翔肌发育完成后，绝大部分迁入越夏越冬场所，仅少量落入晚稻秧田和晚稻插秧时尚未迁出的部分第1代成虫，在晚稻上完成第2代发育(翟保平等, 1997, 1999a, 1999d)。第2代虫量较低，幼虫期从8月上旬~9月底，8月下旬见蛹，晚稻本田内第2代成虫于9月初始见，10~15d后达到峰期，先在无效分蘖或转移到田埂杂草上取食，飞行肌发育后于9月下旬~10月中旬陆续起飞上山，之后，尚未迁走的个体和羽化晚的第2代成虫因气温下降(日均温 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ ，飞行肌不能发育而滞留田间越冬)。在浙江，稻水象甲的发生期与双季水稻生育期基本一致，成虫在移栽前后迁入秧田或本田产卵，以本田产卵为主，新一代成虫在穗期羽化。绝大部分第1代成虫生殖滞育迁飞至山上草地、田间草地及混在稻草堆等场所越夏，并在以后与第2代成虫一起越冬。稻水象甲的发生量第1代大于第2代，危害第1代明显重于第2代，即早稻明显重于晚稻；同季稻中，早插田重于迟插田。通常在潮湿生境中越冬虫量多，存活率高。

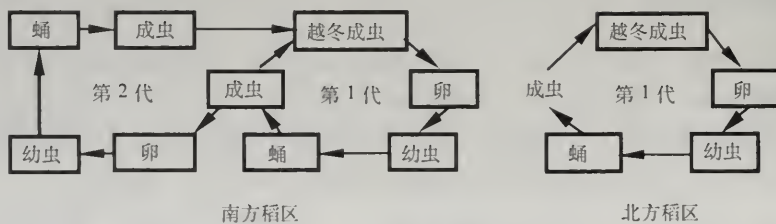


图3-7 中国南方稻区、北方稻区稻水象甲年生活史(祝增荣)

(五) 中国北方稻区

与北方稻区的单季稻种植相适应, 稻水象甲年发生一代(图 3-7b)。北纬 35°以南地区可年发生两代, 发生代数与食料和水稻生育期有关。

河北唐山: 越冬成虫 4 月上旬开始在越冬场所取食杂草, 首先取食稻田周围的芦苇、白茅、假稻、假牛鞭草等杂草叶片。5 月上中旬为取食杂草盛期, 邻近的玉米苗此时往往严重受害, 5 月中下旬成虫大量向有水处转移, 侵入稻田继续啃食水稻叶片, 一般以田块的边缘处虫量大。成虫产卵于水面下的水稻叶鞘组织和根组织中。5 月初开始迁入秧田, 于 5 月下旬(插秧后一周左右)出现迁入峰。本田越冬成虫峰期与卵峰期基本一致, 6 月下旬~7 月上旬达幼虫危害盛期。幼虫和土茧 80%以上集中在土表以下 6cm, 围绕株心 5~10cm 的范围内。幼虫发育期为 30~45d, 蛹期约 10d, 7 月中下旬为羽化出土盛期。从卵峰日到第 1 代成虫峰日(7 月下旬)约 60d, 第 1 代成虫虫量明显高于越冬代成虫。8 月中下旬, 绝大部分第 1 代成虫离开稻田, 迁入林带、房前屋后及道旁渠边、田埂、荒地等处, 以成虫主要在稻田周围的农渠、林带、路旁等场所的枯枝落叶下, 土块下、土缝中及浮土中等处越冬, 少量在稻草及稻田根茬间越冬, 很少量的成虫在有水的渠沟稗草等杂草上可继续繁育第 2 代(张玉江, 1997)。其中, 越冬种群密度以林带土下最高(460 头/m²), 占 50%; 房前屋后、道旁渠边密度相近, 共占 40%; 田埂及稻田分别仅占 1.4% 和 0.2%。越冬个体绝大部分分布在土表 3cm 以内(0~1cm 占 84%, 1~3cm 占 14%)(全国农业技术推广服务中心, 1998)。

辽宁丹东: 海边稻田以小山丘越冬为主, 山区稻田以田埂越冬为主。5 月初开始在越冬场所附近取食杂草, 5 月中下旬水稻插秧后迁入稻田。7 月上中旬出现幼虫高峰期, 7 月下旬化蛹峰期, 8 月上旬第 1 代成虫羽化后继续取食稻叶, 于 9 月上旬后逐渐迁离稻田(图 3-6b)。在低纬度地区, 寄主条件合适的话, 稻水象甲可能发生两代, 稻水象甲在辽宁以休眠或生殖滞育, 而不是生物学上的深度滞育越冬(田春晖等, 1997)。

吉林集安: 越冬成虫复苏活动开始在 4 月末~5 月初, 盛发期在 5 月下旬~6 月上旬, 与水稻插秧物候期一致。5 月末 6 月上旬水稻插秧后, 越冬成虫便从田埂杂草上转移到本田为害。6 月上中旬出现越冬代成虫峰期, 幼虫期为 6 月上旬~8 月下旬, 盛期在 7 月中下旬; 蛹及土茧为 7 月上旬~9 月中旬, 盛期在 8 月中旬左右; 新成虫虫期为 8 月上旬~9 月下旬, 盛期在 8 月下旬~9 月上旬, 9 月中下旬开始向越冬场所转移。稻水象甲在吉林的发生时期略晚, 但与本省的水稻栽培生长时间相同。新成虫羽化时间在 8、9 两月, 此时光照时间少于新成虫产卵临界日长 14.5h, 新一代成虫不产卵而转移到越冬场所滞育越冬。冬季最冷月平均气温为-14.4~-18.8℃, 对新一代成虫安全越冬无大的影响(王金伟和刘冬华, 1997)。

二、稻水象甲的重要生态现象

稻水象甲成虫的迁飞、夏眠和越冬滞育对其种群动态有着直接影响, 美国、日本、韩国、中国等国对此已有不少研究报道。在昆虫生活史对策的进化中, 迁飞和滞育具有共同的生理基础和生态功能, 尤其是出入蛰伏场所的迁飞, 更与滞育有着密切的联系。

Tauber 等(1986)将这种从蛰伏场所到繁殖场所之间的往返迁飞称之为滞育性迁飞。稻水象甲的迁飞正是典型的滞育性迁飞。

(一) 越冬与越夏

稻水象甲以成虫滞育(或休眠)越冬越夏。滞育是存在于昆虫生活史中、周期性出现的一个生理生态现象。在昆虫生存的自然环境中,影响昆虫滞育的主要环境因素有:光周期、温度、食物、湿度和种群密度,这些因素在不同的地理位置,对不同昆虫的滞育有着不同的作用效果。

美国南部稻区发生部分两代的事实表明稻水象甲可能是一种兼性滞育的种类。滞育前的个体脂肪体是春季个体的4~5倍,活动期的呼吸强度是秋天越夏虫的3~4倍,表明稻水象甲在加利福尼亚州以真正的滞育状态越冬,解除滞育的因子中温度起主要作用(Knabke, 1973)。Nilakhe(1977)对路易斯安那州越冬稻水象甲的研究发现,1/6的越冬雌虫已经交配过,部分卵巢内有被吸收的卵;根据卵巢小管萎缩、脂肪体肥大等特征断定稻水象甲以成虫滞育越冬。从10月~翌年5月采集的越冬成虫在模拟的夏季条件下呈现出不同的产卵前期、产卵期及产卵量(生殖力),2月21日之后采集的个体50%以上产了卵,而此前采集的个体产卵者不超过45%。这表明,越冬个体以不同的滞育强度越冬;到2月的第3周,半数以上的越冬个体已解除了滞育。打破滞育的因素尚不清楚,但温度起了主要作用(Knabke, 1973)。

越冬种群到底是以休眠还是以滞育状态越冬,目前尚有争论。美国学者认为是滞育,但日本、韩国及我国辽宁的田春晖等(1999)认为是一般性的休眠或生殖滞育,而不是深度滞育。田春晖等(1999)用低温和逐渐升温处理,可以使稻水象甲越冬成虫的绝大部分个体取食、大部分个体有飞行肌和卵巢发育,这表明稻水象甲成虫的越冬状态是休眠而不是滞育;人为改变条件可使其进入发育状态,即成虫经一定时间取食秧苗,其飞行肌和卵巢开始同步发育,这一结果与翟保平等(1998)的观点基本一致。

翟保平等对浙江省双季稻区稻水象甲夏季种群的研究表明,食物条件是引发滞育的主导因素,光照和温度可排除在第1代成虫夏季滞育的诱导因子之外。在自然状态下,即使是强迫滞育,早稻田内的第1代成虫也不转入正常发育,但取食稻秧能使新羽第1代成虫和稻田内外处于生殖滞育状态的第1代成虫的卵巢正常发育,并能解除已进入夏蛰的第1代成虫的生殖滞育;同时,不论是新羽成虫还是夏蛰成虫,取食稻秧后卵巢和飞行肌同时发育;若这种食料条件能持续下去,则飞行肌消解而卵巢发育产卵(翟保平等, 1998)。辽宁发现部分新成虫可能产第2代卵,由此认为稻水象甲成虫的滞育与温光条件和食物条件关系密切(田春晖等, 1997)。

加利福尼亚州稻水象甲成虫滞育的临界日长为14h(Knabke, 1973),但Kobayashi(1984)报道,第1代成虫滞育的临界日长在27℃和35℃时分别是14.5h和13.5h。在不同的光温条件下用鲜嫩稻苗饲养7月下旬从田间采集的第1代成虫,27℃和15h以上光照处理下取食38d后,40%的个体产了卵(产卵前期38~41d,约100粒/头),14h光照下不产卵;但在35℃处理中,14h和13.5h光照条件下产了少量卵(约20粒/头)。因此稻水象甲产卵的最适光温条件是25~27℃、光照15~16h,产卵量每头百粒以上(Asayama and Nakagome, 1993)。Kimura(1993)报道了光周期和温度对越冬后成虫产卵的影响。在高纬区,稻水象

甲滞育后产卵也有光周期要求,其临界光照时间位于 25℃ 下的 14h 和 15h 之间,而 20℃ 和 30℃ 时分别为 16h 和 14h,稻水象甲的光周期反应属长光照类型。但在温暖地区,越冬代成虫的产卵可能不受光周期控制。

(二) 季节性迁飞

翟保平等人对稻水象甲飞行行为的研究中表明,此虫从蛰伏场所到繁殖场所只有迁移性飞行(migratory flight)而无局地飞翔(trivial flight),甚至连爬行都很少,使得迁飞成为其主要的扩散方式(翟保平等,1999g)。

稻水象甲的间接飞行肌随着生活史的变化而出现兴衰交替的现象,迁飞完成后退化,到迁飞季节又开始再生(Muda *et al.*, 1981)。美国加利福尼亚州稻水象甲主要在田埂、路边、草地作物残骸碎末中越冬,第 2 年春季变暖时,在温暖(70°F = 21.1℃)、潮湿或静风天气迁入稻田。稻水象甲成虫可能迁飞几英里后,降落到灌水的稻田或田间的杂草地带(Godfrey, 2002)。在阿肯色州,第 1 代成虫羽化后,大多数个体具有发达的飞行肌而生殖滞育,大量成虫在 7 月下旬~8 月初迁入越冬场所,之后飞行肌退化,只有少量成虫迁入晚插稻田取食嫩苗后繁殖第 2 代(Muda *et al.*, 1981)。在日本南部(九州、冲绳),大多数第 1 代成虫迁飞到越冬场所夏眠并转入越冬,仅少量个体进入常规单季稻田或晚稻田完成第 2 代(Tanaka, 1993)。但台湾的第 1 代成虫并不夏眠,新羽化的成虫迁离稻田,取食杂草月余,待晚稻插秧后便再迁返为害晚稻,使得第 1 代成虫的峰值出现在晚稻本田,且高于越冬代虫量(但幼虫密度低于早稻)(Shih and Cheng, 1993)。

在浙江省双季稻区的系统解剖表明,稻水象甲表现出典型的“卵子发生-飞行共轭”,其飞行肌和卵巢的发育随生活史的变化而出现兴衰交替(翟保平等,1999a, 1999c, 1999d, 1999g)。通过飞行肌的季节性消长,稻水象甲在双季稻区每年有春夏秋 3 次迁飞:春季越冬代成虫迁入早稻田繁殖,形成第 1 代致害种群;第 1 代成虫生殖滞育,绝大部分个体(95%以上)迁出早稻田行夏蛰并越冬;少量落入秧田者和早稻收割时散落田内而晚稻插秧时尚未迁离的个体构成二代虫源,故二代种群一般不会对晚稻构成威胁;秋季二代成虫羽化后迁入越冬场所滞育越冬(翟保平等,1997, 1999a, 1999c, 1999d)。

有关稻水象甲早春迁飞与温度的关系,根据实验室内间接飞行肌与温度的关系,美国学者 Morgan 等(1984)报道飞行肌发育的起点温度是 18℃,有效积温达到 100DD 和 175DD 时,分别有 50%和 90%的越冬成虫飞离越冬场所;日本 Matsui(1985)认为是 13.8℃,50%的越冬个体飞行肌完全发育(发达)的有效积温为 91DD;而韩国 Goh 和 Choi(1993)报道的上侧片肌的发育起点温度为 14.9℃,50%的越冬个体飞行肌发达的有效积温为 63.1DD。影响稻水象甲春季迁入稻田早晚的因素有:不同的滞育强度、积温的多少、有效的食料来源、适合傍晚起飞的微风和较高气温等(Grigarick, 1993)。Muegge 等(1996)对稻水象甲迁飞行为的初步分析认为,美国路易斯安那州稻水象甲“第 1 个明显的迁飞峰”(first significant flight)必需伴随着连续几天日均度在 60°F(15.6℃)以上。翟保平等(1999a, 1999b)在浙江省双季稻区的系统调查和解剖也表明,当 13.8℃ 以上的有效积温达到 90DD 左右时,山上越冬种群约 50%的个体完成了飞行肌发育;而当有效积温达到 80DD 时,即可出现迁入峰,若此间与低温阴雨阻隔,还会出现另外 1 个或 2 个峰次。

故有效积温达到 80~100DD 的时间可作为施药适期, 遇雨则适当后延。浙江通过 1994~1996 年的验证, 表明用积温结合天气情况预测稻水象甲越冬代成虫迁入高峰期是完全可行的(翟保平等, 1999b)。

在日本对田间稻水象甲成虫飞行活动的观察表明, 越冬成虫大约在日落前 1h 左右处于飞行活跃期, 而第 1 代成虫的飞行则在日落后达到高峰。越冬成虫的迁飞受气温制约, 要求日最高气温在 25℃ 以上, 迁飞时段的气温在 20℃ 以上。无论越冬代还是第 1 代成虫, 在起飞前都要先爬到叶尖行一番与飞行有关的活动(频频展翅), 然后起飞。故风雨较强时会阻碍其起飞(Matsui *et al.*, 1983; Kisimoto, 1993; 翟保平等, 1998)。翟保平等(1996, 1999f, 1999g)的观察表明, 稻水象甲对起飞环境要求极高: ①气温达到 20℃ 以上; ②跗足须有附着之处; ③较长时间的展翅准备; ④风稍大便影响后两个条件(被晃落或无法展翅)而无法起飞。越冬代稻水象甲迁飞主要受温度的限制, 故降雨的多少与雨日的分布决定了当年越冬代迁入峰期的早迟。越冬代成虫大量起飞的最适条件是气温较高(>20℃)且无风或微风, 风和降雨直接影响气温的变化而左右峰期的出现时间。早春及 4 月上中旬的降水可影响飞行肌的发育速率, 从而影响第一波迁飞的迟早, 4 月下旬和 5 月上旬的降水则影响主迁峰的出现时间, 当日能否迁出仅取决于迁飞时段风力、气温、降雨的综合影响, 而与日最高气温无关。这与 Matsui(1984)关于越冬代成虫的迁飞要求日最高气温在 25℃ 以上的报道不一致。

三、影响稻水象甲种群动态的主要因素

(一) 栽培与耕作制度

如前所述, 初春气温影响越冬代稻水象甲迁飞的早晚; 同时, 水稻的育秧方法与移栽期也影响着稻水象甲的发生时期和为害程度。

日本爱知县 4 月份插秧的早插田因越冬代成虫发生晚而损失较轻; 但在 5 月中下旬~6 月上旬这段越冬代成虫迁飞盛期内, 移栽越早受成虫为害越重, 幼虫虫口越多; 而迟至 6 月下旬移栽的稻田, 虫口密度急剧下降。在长崎, 5 月下旬及此前移栽的稻田, 插秧越早迁入峰也越早, 且随虫量增加减产可达 20% 以上; 但 6 月上旬栽插的稻田, 产量损失在 10% 以下。Kobayashi(1984)报道, 随着海拔高度的增加, 水稻栽插期逐渐推迟, 越冬代稻水象甲的迁入高峰期也相应后延。

在美国南方稻区, 稻田内持久性灌水的早晚直接影响着稻水象甲种群的发展, 水稻受害的程度取决于灌水的时间(Isely and Schwardt, 1934)。因此, 适时排灌也是多年来研究应用的一项控制稻水象甲种群密度的方法(Morgan *et al.*, 1989)。

水稻秧龄是影响稻水象甲对不同氮肥水平选择性的的重要因素。在实验室条件下, 秧龄为 23d 时, 越冬代成虫明显选择使用了 60kg/hm² 的稻苗; 而在秧龄为 29d 和 36d 时, 越冬代成虫则明显选择使用了 90kg/hm² 和 120kg/hm² 的稻苗。同时, 随着氮肥使用量的增加, 取食量、产卵期、繁殖力和存活率等也增加(Jiang and Cheng, 2003)。

在我国北方稻区, 由于推广水稻早育稀植技术, 稻田的生态环境发生了一定程度的变化。封闭的早育秧方式避免了秧田被害, 而插秧期普遍提前了 20d 左右, 大大改善了稻水象甲早春的食料构成。稻水象甲已逐步适应了这一变化, 春季复苏后迁入水稻本田

的时期也随之提前,因而造成水稻本田前期受害期延长,受害程度加重。随着效益农业发展,以及国家粮食政策的调整,单季稻面积、轻型栽培面积比例上升,以及多种作物插花种植现象增多,稻水象甲的种群结构可能会发生相应的变化。

(二) 气象要素

在诸多气象要素中,光照、温度、降水、风等对稻水象甲的发生消长有最重要的影响。

1. 光

稻水象甲成虫具有一定的趋光性。檀振江等调查表明辽宁省盘锦地区越冬代稻水象甲的趋光性不强,在大洼县平安农场设置的黑光灯从5月28日~7月18日诱捕稻水象甲为零,7月19日后陆续诱捕到大量稻水象甲成虫,最高峰日期是7月28日,一昼夜诱捕到5万头以上,可见新一代成虫有较强的趋光性。田春晖试验表明,成虫对黄昏时分的散射光具有明显趋性,波长为30~40nm的黑光灯之光诱虫较日光灯或白炽灯诱虫量大得多。不同时期稻水象甲成虫对黑光灯的趋性不同,通常,新生成虫较越冬后成虫的趋光性强,而5月下旬~6月上旬的成虫又较6月中下旬成虫的趋光性强。另外,趋光性强弱与天气状况和风向关系密切,以黑光灯为例,通常晴好微风天和风向对光源时诱虫较多,阴雨大风天诱虫极少(田春晖等,1997)。

2. 温度

除光温条件直接调控稻水象甲的迁飞和滞育外,温度对其生活史的其他方面也有重要作用(表3-2)。

Takeda (1987)报道,摄食量(y)与温度(x)呈正相关: $y = 55.9 + 44x$ (起点温度 12.7℃);产卵量也受温度影响,15℃时只有个别个体产下零星的卵,而在20℃、25℃和27℃条件下平均每头虫的产卵量分别为183粒、283粒和248粒。Raksarart 和 Tugwell (1975)在恒定水温25℃、30℃、35℃和40℃条件下测定温度对稻水象甲卵发育的影响,结果在40℃的水中卵不能孵化,其他3个处理的孵化率分别为56%、58%和43%,平均孵化期分别为9d、6d和4d,发育中期的卵比发育前期和末期的卵更抗高温。在台湾,早稻田幼虫种群数量约为晚稻的两倍,尽管成虫数量的差异并不大(往往晚稻成虫密度更高),Shih 和 Cheng (1993)认为,晚稻早期发育阶段的高温可能是影响稻水象甲幼虫生存的一个重要抑制因素。

Nagano 等(1985)测算比较了气温、水温和地温与日本宫城县稻水象甲发生消长的关系。在卵发育期,用水温计算的15.5℃以上的有效积温达到79DD的日期与田间一龄幼虫的实际发生期一致,而用气温计算的日期要晚近3周;用气温和5cm地温计算的第1代成虫羽化盛期(12.1℃以上有效积温586DD)与实际发生期一致,而用水温算得的日期偏早一周,用10cm地温计算的结果则略偏晚。因而,用气温预测第1代成虫羽化期还是可行的。

(三) 种群密度

孙富余等(2002)通过扣笼接虫观测稻水象甲不同接虫密度所产下代虫量。结果表明,

稻水象甲种群增长具有明显密度依赖性, 接虫密度 X 越大, 代间增殖倍率 Y_2 越低。 X - Y_2 关系用 $Y_2 = 1/(0.0836 + 0.421X)$ 的双曲线拟合良好。以水稻移栽后稻田成虫密度 N 为指标, 越冬成虫存活率为 S_0 , 防治后成虫残存率为 S_1 , 则第 t 和 $t+1$ 年种群密度关系可表述为: $N_{t+1} = S_0 S_1 N_t / (0.0836 + 0.0421 S_0 S_1 N_t)$ 。该模型参数值稳定, 拟合度好。用该模型描述的种群增长规律与稻水象甲侵入辽宁省以来种群增长的实际情况相吻合, 模型预测辽宁省不同地区稻水象甲的发生趋势其准确率高。

第八节 风险分析与早期预警

准确预测害虫种群是害虫综合治理理论的核心。稻水象甲的监测方法包括为检疫服务的确定分布范围的空间动态监测, 为研究和防治技术服务的预测种群特征、密度、迁移时间等的时间动态监测, 根据不同试验研究的目的和精度要求, 所用的监测方法有所不同。国内对稻水象甲常用的监测方法有取食斑法、越冬成虫筛检法、根部幼虫水洗法、土茧漂检法、灯光诱集法、迁飞活动中的碰撞盆集法等(全国农业技术推广服务中心, 1998), 其中监测成虫密度主要有越冬场所调查的查土法、田间观察的计数法、灯诱法、网扫法, 以及滞育和迁飞动态监测的解剖法(孙汝川和毛志农, 1996; 翟保平等, 1997)。

一、发生分布范围的监测

主要用取食斑法和灯诱结合的办法。诱虫灯可诱到稻水象甲, 但与田间的种群高密度相比其诱集率显然偏低, 灯诱法对新成虫的监测效果好于越冬代(Kisimoto, 1993; 田春晖等, 1997)。新发生区, 往往虫口密度较低, 故除了灯诱外, 我国目前主要采取越冬代成虫取食危害的关键时期, 组织专业技术人员, 根据成虫取食趋嫩绿习性, 春天利用稻水象甲, 在林带田埂、沟渠、路旁新萌发的杂草嫩叶上寻找, 重点检查其喜食的白茅、狗尾草、狗牙根、稗草等嗜好植物上的取食斑。普查时查看稻田和周边沟渠中生长的嫩幼稗草、假稻等水生禾本科、莎草科杂草, 作为监测的易感指示植物以提高普查监测效率(全国农技推广中心, 1998)。

二、种群密度的调查取样方法

稻水象甲以成虫在草丛基部表土层越冬, 故目前国内外均是采用取表层土筛查或水漂法估计越冬成虫密度。稻水象甲在越冬场所主要分布在土表和覆盖物, 以及 3cm 以内的浅土层; 3~5cm 土层中很少, 而 5cm 以下的土层极少(田春晖等, 1997), 松软土层稍深于硬土层。Goh 和 Choi (1993)也报道, 大多数越冬成虫存在于土表 5cm 深度内。他们取样时采 30cm×30cm×3cm 的土样以 32 目的筛子过筛, 再置于加热盘上加热至 50~60℃, 当稻水象甲从土中爬出时计数。美国主要采用热水漂浮法(Gifford and Trahan, 1969a), 将样品先放在塑料大垃圾桶底层, 盖上网纱和中间开小孔的铝盖后, 加入 45℃左右的温水浸没样品和铝盖, 再盖上垃圾桶盖, 不时检查受热后沿着铝盖上的小口爬到桶壁的成虫, 此法省事方便, 但无法检查死虫。

对成虫在越冬场所和田间的取食活动的监测可以以其取食斑的面积或数量变化为依

据。稻田刚灌水时,加利福尼亚州和亚洲孤雌生殖的稻水象甲成虫,多聚集在稻田一侧的埂边,但很快就在全田呈均匀分布,两性生殖种群田中、田边密度分布较均匀。当种群密度达到致害 40%~60%的新生叶时,平均取食斑密度(1~5 个样本,25%的取样误差)能以足够的精度估测田间种群的发展变化(Sooksai and Tugwell, 1978)。对灌水后 3 周内每周新生叶片上的取食斑和幼虫密度做回归分析,确定 60%植株的新生叶片有取食斑可用作稻水象甲为害的经济阈值(相当于每核心样方 10 头幼虫)(Sooksai, 1976)。Kobayashi 等(1985)报道,田间越冬代成虫、第 1 代幼虫和蛹都近于随机分布,故可采用 Iwao 和 Kuno (1968)的方法确定按一定精度估测平均密度的样本大小。国内的研究表明稻水象甲卵在田间呈聚集分布,负二项分布的 K 值为 0.4796(宣维健等,2002),成虫在越冬场所和田间一般呈聚集分布(曲辉等,1998;黄雅文等,1999),在稻田中,先聚集分布,后均匀分布,并建立了相应的序贯抽样模型(田春晖和孟威,1996)。

原产地美国对稻水象甲的监测,呋喃丹防治时代主要采用取食斑监测法(leaf scar method)和幼虫核心样方法(larval core sample)(Morgan *et al.*, 1989),其中取食斑监测法根据成虫取食斑密度间接估计幼虫密度,而核心样方法可直接估计幼虫的密度(Smith *et al.*, 1986)。两种方法各有利弊,取食斑监测法较快速,但准确率不及幼虫取样法,且仅能粗略估计幼虫的大致密度(Morgan *et al.*, 1989),而核心样方法虽较准确,但耗时多,取样一块田需要 40~50min,且估计低龄幼虫时因虫体太小,不易从样品的有机物和碎屑中分离出来而不够准确(Muegge, 1996)。

近年来,随着呋喃丹的禁用,为适应新药剂叶面喷雾防治成虫之防治适期预测的需要,最近由阿肯色大学研制了一种新的监测方法——漂浮屏障诱集法(floating aquatic barrier trap),即在两个棉铃象甲诱集器中间连一片纱网,在水中游行的稻水象甲碰到纱网后沿网纱向左右移动,爬到两端的收集瓶中,一般诱到 1 头成虫可代表原核心样方的 1.4 头幼虫,由于稻水象甲 80%时间在水表层 7.6cm 内活动,田间设置诱集器时须放在水下 7.6~9.0cm 深处(Hix *et al.*, 2000b, 2001),稻水象甲每秒可游动 1.53cm(幅度 0.88~2.52cm),试验室内观察到 18.0cm 水深处游泳(Hix *et al.*, 2000a)。同时,应用灯诱(light trap)和黄色黏虫板预测追踪稻水象甲从越冬场所与稻田之间的运动规律(Muda *et al.*, 1981; Stout *et al.*, 2000),路易斯安那州立大学昆虫系的 Stout 博士正在研究利用积温模型预测迁飞开始日和峰期(Stout, 私人通讯)。各虫态密度估计和监测中,查卵使用酒精浸泡法(Gifford and Trahan, 1969b),准确率高(Stout *et al.*, 2001a, 2001b);稻水象甲卵主要产在叶鞘内,其中 93%在浸水的叶鞘内,5.5%在水面以上叶鞘内,根上卵仅占 1.5%(Grigarick and Beards, 1965; Everett, 1965)。国内通常采用直接解剖叶鞘镜检的办法查卵,或将带卵的植株收集浸泡在试管水中,利用稻水象甲初孵幼虫由于重力作用掉落沉积在试管底部而检查水中幼虫的方法来检查(商晗武等,2003b)。

国内一般用水洗法检测幼虫虫口密度(翟保平等,1997),据根据唐山市植检站(1991)的研究,稻水象甲幼虫和土茧分布于土下 0~6cm 深、根际周围 10cm 半径内;浙江的研究表明:幼虫主要集中在离土表 6cm 内,而土茧主要集中在离表层 3cm 内,幼虫结茧时有向上爬的趋势(颜仁贤,1997);在日本幼虫和土茧在稻田土表层 9cm (Okada, 1980)。故幼虫和土茧的取样一般取带泥稻株若干丛,其样本的直径和深度各约 10cm,然后水洗稻根查幼虫和土茧的数量(如 Goh and Choi, 1993)。美国常用核心样方法来确定幼虫的密

度,阿肯色、路易斯安那、得克萨斯州的经济阈值分别为每个核心样方 10 头、5 头和 5 头幼虫(Smith *et al.*, 1986; Way *et al.*, 1993),该方法的主要问题是低龄幼虫回收率低,幼虫在缺乏食物时可能转移而使估计失准,取样耗时、成本高(Way *et al.*, 1993)。

三、迁飞和滞育的监测

对越冬代和第 1 代成虫的迁飞和滞育主要采用灯光诱集、粘虫板捕虫、捕虫网扫查、飞行肌和卵巢解剖以及积温法预测等方法来监测。

Kurihara 和 Matsuzaki (1989)用电镜观察稻水象卵巢的超微结构和卵子生成过程,但田间调查中则主要以卵巢和卵粒的发育形态作为分级标准来监测稻水象的卵巢发育动态,一般分为 3~5 级别不等(Katayama, 1985; Matsui, 1983; Suzuki and Katayama, 1985; Goh and Choi, 1993)。翟保平等(1999e)根据我国病虫测报工作中害虫卵巢分级的实践及基层站点的可操作性,提出一套稻水象甲的卵巢发育程度的分级标准,即分为发育前期(0 级)、卵黄沉积前期(1 级)、卵黄沉积期(2 级)、产卵盛期(3 级)、产卵末期(4 级)和产后衰老期(5 级)6 个级别。根据稻水象甲的卵巢和飞行肌发育随生活史的季节性变化出现兴衰交替现象(翟保平等, 1998),据此结合飞行肌和脂肪体的发育程度,可作为常规监测中确定稻水象甲种群性质的指标(翟保平等, 1999g)。

Muda 等(1981)将稻水象甲成虫间接飞行肌的发育程度粗分为两类,即退化的与发达的。发达飞行肌的特征为:①各肌纤维束坚实致密,无分离的肌纤维;②与体壁附着结实;③体积较大。Haizlip 和 Tugwell (1983)对稻水象甲间接飞行肌的消解与再生的组织学研究表明,越冬成虫的飞行肌由 6 条细弱的肌纤维束组成,在其发育过程中逐渐变成 4 条,最终完成发育后形成两束粗大而坚实的肌肉带。故可用肌纤维束的条数及其坚实程度或宽度(退化飞行肌 31~38 μm ,发达飞行肌 260~302 μm)来表征飞行肌的发育程度。

Matsui 等(1983)报道,越冬个体的飞行肌尚未发育时的宽度在 48 μm 以下,飞行肌发育完成前的平均宽度为 88 \pm 48 μm ,而飞行中的个体(已完成飞行肌发育)的直接飞行肌宽度为 156~216 μm ,平均 189 \pm 13 μm 。Goh 和 Choi(1993)报道,能飞行的越冬成虫的直接飞行肌的最小宽度为 160 μm 。我们虽然没有进行测量,但根据其发育和降解状况分为 3 级,可操作性强,也能很好地预测种群的迁飞能力(翟保平等, 1999g)。

Kobayashi(1988)用 5 个表示越冬成虫活动与有效积温关系的逻辑斯蒂方程式来预测稻水象甲越冬成虫在越冬场所的活动:复苏(出现期)、取食、登攀植株活跃期(以飞行肌宽度达 144 μm 以上的个体累积率示之)、累积死亡率、发生消长等。Takeda 和 Nagata(1987)研究了越冬代成虫飞行肌发育与有效积温的关系,以 Matsui(1985)提出的 91DD 作为 50% 的越冬个体飞行肌发育到 156 μm 以上所需的有效积温指标,则当 13.8 $^{\circ}\text{C}$ 以上的积温累计百分率达到该指标的 70%~80% 时出现越冬代成虫的迁入高峰期。年度之间越冬代迁入时间的变化可用有效积温来解释。在迁入初期,稻田内成虫在地边呈聚集分布;但当有效积温(91DD)累积百分率达到 100% 时,则在全田近于随机分布。有效积温累积百分率达 80% 时施药对幼虫控制效果最好,达 100% 时施药也有效(Asayama and Nakagome, 1993)。Yokoyama 等(1990)的研究得出了相似的结论,当 13.8 $^{\circ}\text{C}$ 以上的有效积温达 70~90DD 时出现越冬代的迁入高峰,此期也即防治适期。

第九节 检疫、预防、根除与控制

稻水象甲的飞行扩散能力和对恶劣环境的适应能力以及孤雌生殖的特性,使其侵染、蔓延的区域逐年增多,而一旦传入便迅速定居并扩散,且难以根除(翟保平,1996)。严格控制向非疫区输入疫区的稻谷和稻草,并加强检疫,是控制该虫扩散的重要途径。对现有疫区,应采取化学防治为主、其他防治措施为辅的综合治理策略,极力压低其种群数量。下面对世界范围内防治稻水象甲的各种措施及其进展作一简述。

对新传入的危险性或暴发性害虫,只有农药才能大量杀灭害虫,为此,国内在稻水象甲检疫防治中,除严格检疫,密切监视虫情动态,防止扩散外,一般对发生区高频率使用化学农药,少有防治指标概念。而美国、日本等则作为常规害虫开展综合治理,在农业措施控害、生物防治、寄主植物抗性利用等作了较多的研究,但目前国内外防治该虫仍主要依赖化学农药(Stout *et al.*, 2000, 2002a; Way, 1993; 魏鸿钧, 1997)。国内还有用黑光灯诱捕防治稻水象甲的尝试(沈歌华, 2002)。

一、检疫控制措施

稻水象甲是我国公布的《中华人民共和国进境植物检疫危险性病、虫、杂草名录》中规定的二类危险病虫,也是我国对内检疫对象,控制策略上采取检疫与防治并重。一方面,通过行政手段,划定稻水象甲疫区、设立检疫检查站、对应检植物和植物产品严格施行检疫,禁止从疫区调运秧苗、稻草、稻谷和其他寄主植物及其制品,防止用寄主植物做填充材料等,延缓扩散蔓延;同时,对稻水象甲的适生区、适生场所、嗜好寄主植物,以及来自疫情发生区的应检疫产品,采样检验、复查,并开展普查、监测,力求做到早发现、早防治,实施法规控制(全国农业技术推广服务中心, 1998)。另一方面,对发生区或疫区,加强熏蒸(郑秀银等, 1998)、扑杀、防治,尽最大可能降低其虫口密度。

二、农业防治

农业防治措施主要有调整播种期的避害措施、排水晒田或延期灌水的水管理措施等。

(一) 调整移栽期回避危害

通过提早或推迟播种或移栽来回避危害。如在日本,5月下旬为成虫发生盛期,所以5月上中旬插秧的危害重,相反,4月中旬特早插秧或6月初迟插秧的田就能避开危害。在发生重的地方设置普通灌水秧苗区,诱集成虫集中侵入危害,也可回避危害(Kisimoto, 1980)。在中国,也是早插田危害重。适当迟栽,避开成虫迁移高峰则受害轻(河北、天津等),如黄雅文等(1999)发现迟秧成虫数量比早插秧田块减少26.5%。近来我们研究发现,在浙江省沿海,纯单季稻种植可以回避危害,室内的实验结果也证实供食水稻迟的稻水象甲成虫产卵量下降。

在美国南部路易斯安那州西南地区,早播田的种群密度明显低于晚播(Thompson *et al.*, 1991),适当早播可控制稻水象甲危害(Thompson *et al.*, 1994b),将播种时间提早至3

月中旬~4月中旬,虽不能避开致害种群,但可显著提高水稻对幼虫危害的耐害性,减少产量损失(Stout *et al.*, 2002; Thompson *et al.*, 1994b)。因为水稻能在 10℃ 以上时发芽生长,路易斯安那州西南地区 3 月 15 日开始播种已完全满足此温度条件(Saichuk *et al.*, 1999),可使水稻在分蘖阶段前度过稻水象甲严重危害期。水稻长大后根粗壮,根系更发达,可能比小苗更能耐受稻水象甲的危害(Wu and Wilson, 1998; Stout *et al.*, 2000)。相反,在 4 月上中旬播种的水稻出苗后不久遭到稻水象甲危害。根据历年来稻水象甲灯诱资料,一般年份初次迁飞在 4 月份的第 2 周,迁入高峰期在 4 月份的第 3 周(Stout, 个人通讯)。

日本爱知县试验了各种栽培措施与稻水象甲发生期的关系,得出可以通过调整栽培期、秧苗的种类和移植方法和水管理等来回避稻水象甲的危害,认为 6 月上旬后迟移栽、选用大苗、通过干田直播栽培来回避危害的效果明显,但增加每蔸栽植数及提高栽植密度、早期排水等不能应用于生产实际。

(二) 合理灌排水

美国早期控制稻水象甲使用农业防治措施,其中水管理即在幼虫大量危害前,排水晒田直至土块干裂,可有效地调控稻水象甲幼虫种群(Tucker, 1912; Newwell, 1913; Webb, 1914; Isely and Schwardt, 1934; Morgan *et al.*, 1989; Quisenberry *et al.*, 1992; Helsler *et al.*, 1992)。此法的缺陷是有可能导致减产并不利于杂草的防除(Newell, 1913)、增加用水成本(转引自 Helsler *et al.*, 1992),排水至少比使用呋喃丹增加 5.44~10.95 美元/hm² 的费用、导致肥料流失(Morgan *et al.*, 1989)、排水后不久复灌可能没有控制作用(Smith, 1983; Quidenberry *et al.*, 1992)、降水可能难使田土变干(Quisenberry *et al.*, 1992)等。Isely 和 Schwardt (1934)认为在幼虫蛀根为害前排水干田最有效,但实际上很难掌握适宜的排水时间,假如排水和复灌发生在大量的成虫扩散之前,复灌后稻水象甲还有可能继续产卵(Thompon *et al.*, 1994b; Helsler *et al.*, 1992),还与某些地区(如加利福尼亚州)蚊虫治理、除草剂使用的一些技术要求相抵触(Helsler *et al.*, 1992);在降雨较多的地区,此措施也可能难以奏效,故 Thompon 等(1994a)认为要谨慎使用此法。尽管如此,该方法在 Whitehead (1954)首次用狄氏剂喷雾或颗粒剂毒土防治稻水象甲以前,已经沿用了不止 75 年,也是目前路易斯安那州小龙虾寄养稻田的唯一、而且最安全的控制稻水象甲危害方法。排水的适宜时间是在第 1 次灌水后的 2.5~3 周低龄幼虫期排水,持续 2 周,太短了达不到杀幼虫效果,太长了会伤害水稻本身。

美国最近的研究表明,延期灌溉可以避免排水晒田法的不足和复灌问题(Rice *et al.*, 1999),控害效果良好(Stout *et al.*, 2001; Zou *et al.*, 2004a)。该方法将灌溉时间推迟 2 周,即从原来的 2~3 叶期推迟到 4~5 叶期灌水,使稻水象甲的发生数量显著下降,危害减轻,产量增加(Stout *et al.*, 2000)。其原理可能是植株已较健壮,对稻水象甲产卵的适宜程度明显下降,其根系趋于发达,对幼虫危害的耐受力显著提高(Wu *et al.*, 1997)。但推迟灌水也会对水稻植株产生生理胁迫,进而造成一定的产量损失。如果将该措施与使用抗除草剂的水稻品种结合起来,则可能减少用于防治稻水象甲和杂草的农药支出,所节省的费用有可能高于延迟灌水所致产量损失的价值(Stout *et al.*, 2000)。

灌水方式及时间对稻水象甲种群发生量的影响也是不可忽视的,干湿交替的灌水和持续式灌田,卵及幼虫发生量均明显小于持续保水 1.5cm 水层的田块。美国的研究表明

深灌水(5~10cm)的卵量明显比浅水(1.3cm)或无水的大,故可通过降低稻田灌水深度以影响成虫产卵行为,进而降低种群密度,减少危害(Stout *et al.*, 2002c)。调查发现早育秧可防治秧苗带卵(刘正恒, 2001),抛秧田虫量(由于干湿交替灌水)低于移栽田,因抛秧田为了使秧苗早生根,通常是在浅水灌溉或不灌水保持湿润的条件下进行的(黄雅文等, 1999)。稻水象甲成虫在抛秧田产卵较少,抛秧田对幼虫发育不利(田春晖等, 1997)。

稻水象甲在河北省昌黎县分布广,但密度低、危害轻、损失小,调查发现可能与该地种植形式多样化、插秧期偏晚(比唐山晚 20d 左右)、受灌溉条件所限缓秧后田间长期缺水有关。为此,作者提出了采用农业防治措施,如采用秋翻晒垡、轮作倒茬、调整播期、适时排灌等控制稻水象甲发生,以降低防治成本(胡新胜, 1997)。辽宁发现选用晚熟品种较选用早熟品种受害轻,因其幼穗的形成在幼虫为害高峰期过后。另外选用发根能力强的品种、培育壮秧、适期晚插、改造低洼区、合理施肥及抛秧技术都可减轻虫害(孙富余等, 1997; 赵文生等, 1997)。

台湾施锡彬和李宝煌(1994)对不同插秧期(间隔 10d)之水稻受稻水象甲危害的调查,结果显示,早栽稻遭受越冬成虫侵入最多,受害时间最长;其次为中植,以晚栽稻所遭受越冬虫侵入量最少,受害时间最短(日本亦通过晚栽逃避危害作为防治稻水象甲的策略)。晒田防治效果:日晒排水处理超过 10d 幼虫和蛹的种群显著减少。

另外,在地理条件相同的情况下,插秧田的稻水象甲发生量明显大于抛秧田,移栽早,其成虫产卵及幼虫孵化也相对早,发生量自然大。而晚栽及抛秧田块成虫发生量则明显减少,据东港市调查,晚插秧成虫数量比早插秧田块减少 26.5%。灌水持续方式及时间对稻水象甲种群发生量的影响也是不可忽视的,干湿交替的灌水和持续式灌田,卵及幼虫发生量均明显小于持续保水 1.5cm 水层的田块。而抛秧田为了使秧苗早生根,通常是在浅水灌溉或不灌水保持湿润的条件下进行的(黄雅文等, 1999)。

(三) 物理诱捕

稻水象甲的趋光性很强,可以利用这一习性设置诱杀田,点灯诱集成虫产卵,然后集中消灭,进行防治。采取黑光灯诱捕试验收到意想不到的效果,每台黑光灯每晚可诱捕 4000~10000 头,证明黑光灯诱捕是防治稻水象甲的好方法(沈歌华, 2002)。近年来, Hix 等(1998, 1999, 2000b, 2001)设计了如前面所述的一种锥形漂浮诱集器,用于开始灌水后成虫的诱集。诱集器的颜色对诱集效果有一定的影响,如黄色的诱集器优于白色的。此外,根据稻水象甲成虫在水中的划游行为特性,对诱集器进行了改进,设计了一种两端封闭的阻截器。研究表明,该阻截器所截获的成虫数量为锥形漂浮诱集器的 2.5~18 倍;所得成虫的数量与后来所查得的幼虫密度呈显著正相关,如每截获 1 头成虫,相当于后来每丛水稻根部可减少 1.2~2.8 头幼虫(Hix *et al.*, 1999, 2000b, 2001)。这些结果也为化学农药的使用提供了决策依据。

三、生物防治

有利用捕食性天敌和微生物防治两大类群。

(一) 捕食性天敌

应用捕食性天敌抑制稻水象甲种群的研究十分有限, Tucker(1912)报告一种长喙鹧鸪 *Telmatodytes palustris* 和一种野鸭 *Anas platyrhynchos* 能捕食稻水象甲。青蛙 *Hyla* spp. 和雨蛙 *Rana pipiens* 捕食稻水象甲, 但对种群的抑制作用很小; 田间笼罩试验发现, 草螽 *Conocephalus faciatius* (Der Gier)取食相当数量的稻水象甲成虫, 蜻蜓 *Pantola flavescens* (F.)稚虫则显著减低稻水象甲幼虫种群。河北唐海的调查发现稻水象甲的天敌有青蛙、蟾蜍、鱼类等(张玉江, 1997), 认为保护和利用青蛙、蜘蛛、蚂蚁、鱼类、麻雀、螳螂、蜻蜓等 8 种稻水象甲的捕食性天敌, 可降低田间成虫数量, 减轻为害。

(二) 病原微生物

生物防治稻水象甲研究较活跃的是微生物防治。国外曾在稻水象甲成虫上分离到多种病原生物, 如球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*(Urtz and Rice, 1997; Liete *et al.*, 1995)、绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* (Nagano, 1987)和琼斯多毛菌 *Hirsutella jonesii* (Yoshizawa, 1990), 并探讨了前两种病原微生物防治稻水象甲的作用(Yoshizawa, 1993; Nitta and Grey, 1996; Rice and Cogburn, 1999)。Yoshizawa(1993)发现虽然越冬代成虫被白僵菌和绿僵菌感染比率不低, 但已感染的成虫在其死亡前仍能产卵, 使得第 1 代幼虫和蛹的密度没有明显减少, 尤其在稻水象甲种群基数较高时。蒋明星等(2002)的研究结果表明稻水象甲成虫在感染球孢白僵菌后, 死亡前的产卵量接近于同期的健康成虫, 只是因感染后寿命缩短才使总卵量有所减少。但台湾地区发现冬季白僵菌侵染率达 42.4%, 是影响越冬种群变动的因子(施锡彬和李宝煌, 1996)。美国还对稻水象甲上分离到的球孢白僵菌进行遗传多样性和基因图谱的研究(Urtz and Rice, 1997)。一种索线虫寄生能导致稻水象甲成虫死亡, 产卵量下降(Bunyarat *et al.*, 1977), 但其对稻水象甲种群的抑制作用尚未得到证实(Smith, 1983)。美国得克萨斯州采用浇洒法将斯氏线虫 *Steinernema carpocapsae* 和异小杆线虫 *Heterorhabditis* spp. 施入潮湿或灌水的黏土或沙土稻田, 对稻水象甲幼虫的防效分别达 40%~80%(Way and Wallace, 1992a, 1992b), 但由于其高成本、施药量大, 药前需排水, 少阳光等而难以在生产上推广应用。古巴试验发现白僵菌和斯氏线虫施后 15d, 前者成虫死亡率达 88%, 后者对成虫和幼虫的死亡率约 80%(Meneses, 1983), 但苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis* 对稻水象甲无效。巴西白僵菌的田间试验效果仅 10%, 认为无应用价值(Liete *et al.*, 1995)。国内近年开展了金龟子绿僵菌对稻水象甲成虫致病性及田间防治效果的研究(柴一秋等, 1999; 陈祝安等, 2000), 应用白僵菌田间防治稻水象甲, 染病死亡率为 39.6%~90.4%, 与常量 1/4 的杀虫剂混用, 防效明显增加(张玉江等, 1997)。目前所有微生物制剂仅局限于室内毒力测定或田间小区试验, 离大田应用尚有距离。

四、寄主抗性利用

国内外生产实践表明, 选用抗性品种可以节省农药, 降低生产成本, 减少环境污染, 因而日益受到人们的重视, 并成为综合治理的关键措施(Heinrichs, 1994)。在稻水象甲防治技术研究中, 美国科学家一直致力于寄主抗性的筛选和利用, 美国农业部与各水稻生

产州对稻水象甲寄主抗性利用方面的育种合作项目一直持续了 35 年, 仅路易斯安那州前后就对 8000 多份育种材料进行了筛选, 也发现了少量有用种质(Heinrichs and Quisenberry, 1999), 筛选出了一些比感虫对照受虫量明显减少的品种(Smith and Robinson, 1982; Robinson *et al.*, 1988a, 1988b, 1988c; N'Guessan and Quisenberry, 1994a, 1994b; Rice *et al.*, 1994), 还发现了一些低到中等水平的耐害性品种(Gifford and Trahan, 1976; N'Guessan *et al.*, 1994), Smith and Robinson(1982)通过 100 多份栽培品种的筛选发现 5 个菲律宾品种对稻水象甲具低抗水平, 但因抗性水平极低而不具经济价值。加利福尼亚州用 WC1403 作亲本选育出了一些耐害性品系, 但产量等性状差, 仍无利用价值。Cook(1988)注意到, 稻水象甲雌虫取食不同抗性水平的水稻品种时, 其食叶量比雄虫更大。最近, Stout 等(2001)发现栽培品种的感虫、抗性差异大, 其中主栽品种 Jefferson 和 Cocodrie 等耐害性好, 若与种子药剂处理、延期灌水等其他措施结合, 在生产上似有利用价值。

日本鉴定了 150 多个水稻品种, 发现 Pe-Bi-Hun、力锦 2 号、爱国 1 号、WC1403、陆羽 20 号和毛稻等植株高大、生长势旺的品种能耐受稻水象甲危害; 所供试品种范围内的籼稻、粳稻或陆稻型不同类别间, 其抗性强弱没有一定的趋势; 在不同产地上, 日本及朝鲜的粳稻品种多数抗性强; 认为水稻品种对稻水象甲的抗性不属于非选择性及抗生性所致, 而是和受害后的补偿能力即耐害性有关。Iwata (1980)筛选了约 120 个品种, 发现有少量品种虫量较少。

我国对稻水象甲的抗性鉴定工作基本没有开展。但田春晖等(2003)发现农家品种 T03 对稻水象甲表现出高水平抗性, 表现在: 秧苗叶片被食害程度明显轻于其他材料; 取食 T03 的成虫寿命较短、产卵量明显降低、叶鞘内侧落卵明显少, 成虫取食 T03 所产卵孵化率低, 幼虫在 T03 根系取食生长时成活率极低。相同种植条件下, 接同密度成虫, T03 上发育的下代幼虫量明显少于其他品种。田间条件下, T03 亦表现出良好的抗稻水象甲特性。

植物的抗虫性分为抗生性(antibiosis)、忌避性(antixenosis)或非嗜好性(nonpreference)和耐害性(tolerance)。Robinson 等(1981)使用了根目测分级的方法测定稻水象甲的耐害性, Tseng 等(1987)建立了植物生长数据矩阵来评价水稻基因型抗稻水象甲幼虫取食的特性, 该矩阵包括幼苗存活、植株高度、叶片数、分蘖数、根长、根重、株重和籽粒重。Heinrichs 等(1985)对实验室和田间稻水象甲抗性筛选和鉴定的程序进行了专门的描述和介绍, 包括一般的实验室或温室筛选方法(Bowling, 1973)、田间筛选方法(Smith and Robinson, 1982)、成虫取食和产卵忌避性筛选、抗生性的筛选以及耐害性的田间和室内筛选方法(Gifford and Trahan, 1975)等。Heinrichs(1986)总结多年水稻抗虫性鉴定的结果表明, 仅 0.01%~2.60%的鉴定材料表现出抗性, 故应认识到害虫的抗虫性育种的困难性, 避免强行选育抗虫品种。而美国 30 多年来的抗性鉴定大多在田间进行, 通常仅根据几个核心样方的幼虫密度高低来确定抗性水平, 不可控制因素太多, 极有可能影响了该项工作的成效。故建立标准化的快速鉴定方法, 在试验室对种质库内品种进行大量筛选, 以确定稻水象甲的抗性水平, 也许是以后寄主抗性鉴定首先需要解决的问题。

得克萨斯州农业与工程大学的生物学家还进行了以稻水象甲为目标的转基因稻(Bt CryIII A)研究, 但所转入的基因沉默不能表达或仅在苗期表达而无法应用(Hall *et al.*, 2000)。路易斯安那州正在试验通过种植抗除草剂的水稻品种来协调控制稻水象甲, 因农民通常采取灌水除草, 种植抗除草剂品种可推迟灌水来减少或避免稻水象甲产卵(Tindall and Stout,

2003)。

五、化学防治

在美国,以直播为主的加利福尼亚州提出稻株出水后 4~7d,抽查田间叶片 20%有取食斑或稻株出水后 11~14d 10%新叶片有取食斑即需防治。阿肯色、路易斯安那、得克萨斯州的经济阈值分别为每个核心样方 10 头、5 头和 5 头幼虫(Smith *et al.*, 1986; Way *et al.*, 1991),日本爱知县实验认为,经济损失(5%)的密度为 0.51 头/蔸,但山谷地区或气温较低地带,营养生长期短,后期分蘖补偿有限,经济损失允许密度应更低。河北省的防治指标为 30 头/m²(成虫)(勾建军等, 1998; 汪志和等, 1998),辽宁省造成稻谷减产 2%、5%、10%、15%、20%的虫量分别为 6 月初稻田平均成虫数量 0.25 头/丛、0.33 头/丛、0.48 头/丛、0.69 头/丛、1.0 头/丛,故确定其防治指标为 6 月上旬成虫密度 0.3 头/穴(赵成德等, 1997; 孙富余等, 2000)。中国插秧后 7~10d 是越冬成虫的发生高峰期,也是防治最佳时间,插秧后 16~22d 田间一龄、二龄占幼虫总数的 90%以上,是防治幼虫的适期。若大部分根露出水面,则大部分卵产在根上(全国农业技术推广服务中心, 1998)。

美国: 稻水象甲药剂防治史正是化学农药发展应用史的印证。20 世纪 50 年代,广泛应用广谱的有机氯化学农药艾氏剂和狄氏剂等,曾被认为是美国南部增加水稻产量的重要措施(Whitehead, 1954)。之后,应用艾氏剂、狄氏剂、林丹作种子处理剂防治稻水象甲,表现不错的效果并可与肥料混用。1966 年,美国南部出售的种子中 90%用艾氏剂进行种子处理(Everett, 1966)。但应用不久就有稻水象甲对艾氏剂产生抗性的报道,其中 1964 年报道在路易斯安那州产生抗性,1965 年阿肯色州产生抗性,1968 年报道得克萨斯州产生抗性(Bowling, 1968)。随后,各种有机磷和氨基甲酸酯类药剂投入试验(Grigarik and Beards, 1965; Gifford and Trahan, 1967),但大部分对稻水象甲有效的药剂不是影响种子的发芽率和成苗率,就是对当时广泛应用的除草剂敌稗(propanil)有交互作用产生药害,造成烧苗(Everett, 1965),只有毒死蜱(Chlorpyrifos)和 PP-211{O-[2-(diethylamino)-6-methy-4-pyrimidinyl]O,O-diethyl phosphorothioate}两种药剂符合应用要求,其中灌水后施用的药剂呋喃丹(Carbofuran, Furadan)得以登记,全美约 10%(129 000hm²)的稻田用呋喃丹防治,应用呋喃丹颗粒剂防治稻水象甲每年对水稻产业的效益(贡献)约为 4000 万美元(Godfrey *et al.*, 2002),呋喃丹作为防治稻水象甲最有效、唯一的药剂推广了近 30 年。由于大量滥用,加利福尼亚州和得克萨斯州发生的几起鸟类中毒事件(Flickinger *et al.*, 1980)以及该药对环境、水域污染等负面影响,1990 年代初美国环境保护署(EPA)决定自 1995 年 9 月 1 日始禁用,而实际上自 1998 年始真正实行禁用,以 4 种对环境相对友好、成本与呋喃丹相当或更少的药剂:高效氯氟氰菊酯[功夫菊酯, λ -cyhalothrin, Karate(Fury)]、 ζ -氯氰菊酯(ζ -cypermethrin)、氟虫腈(fipronil, 即锐劲特, Icon)和除虫脲(diflubenzuron, Dimlin)(Stout *et al.*, 2002a)。其中氟虫腈 Icon 6.2FS 为毒杀幼虫的种子处理剂;功夫菊酯 Karate 1EC/Z 作为杀成虫剂在灌水前后 10 d 喷施,除虫脲 Dimilin 2L 作为杀卵剂在灌水后施用(Stout *et al.*, 2000; 2002a, 2002b; Boyd, 2003; Bernhardt, 1997, 1998, 1999)。

与使用呋喃丹相比,使用这 4 种替代药剂防治稻水象甲更具优势:因使用时间较早,可保护水稻早期根系免受幼虫为害,从而有利于植株中后期的生长。据 Stout 等 (2000),

与呋喃丹相比,使用高效氯氟氰菊酯、氟虫腈和除虫脲防治该虫,可明显减少产量损失,表明它们对该虫的防治效果优于呋喃丹,值得推广(Stout *et al.*, 2000)。呋喃丹 1999 年后退出历史舞台,但路易斯安那州 2002 年仍通过特别议案允许在特定时间内控制使用。

准确监测稻水象甲种群动态,是确定施药与否及施药时间的关键。在美国,针对呋喃丹的使用,通常有两种监测方法。一种是,在前期调查水稻叶片上的成虫取食斑数量动态,以此来推测可能达到的幼虫密度,进而决策是否需要施药。据此法可较早作出防治决策,缺点是准确度较低。另一种监测方法是,在稻田灌水 2~3 周后直接调查土中幼虫的密度。此法准确度较高,但比较耗时,工作量大,据此作出的防治决策时间较晚。由于高效氯氟氰菊酯、 ζ -氯氟菊酯和除虫脲主要作用于稻水象甲的成虫和卵期,上述两种监测方法显然不再适用,而准确监测成虫的密度成为确定施药时间的关键。

日本:1976 年日本发生稻水象甲后,1977 年爱知县采取紧急措施进行了有效药剂的筛选工作,最初登记的药剂为:以成虫为防治对象的倍硫磷粉剂,以成虫、幼虫为对象的水面防治剂残杀威颗粒剂,在育苗箱中施用的药剂残杀威和巴丹颗粒剂。1978 年后,随着稻水象甲的分布扩大,有稻水象甲发生的各县府开始独自研究各种各样的防治药剂,日本植物防治协会也于 1981 年始进行研究,至 1983 年日本政府正式批准了一批包括氨基甲酸酯和有机磷的两大类 10 多种单剂及复配制剂,包括用于育苗箱的药剂丁硫克百威、丙虫威、残杀威、丙虫磷、乙拌磷和巴丹粒剂等;用于本田水面的药剂残杀威、倍硫磷加巴沙、倍硫磷加叶蝉散、倍硫磷加残杀威、乙拌磷加地亚农等粒剂及异恶唑硫磷油剂;用于防治成虫的药剂倍硫磷、倍硫磷加巴沙、异恶唑硫磷、苯哒磷加速灭威、杀螟松加巴沙等粉剂。所注册的这些药剂均对稻水象甲有较好的防治效果,但对人畜、鸟类、鱼类及害虫天敌毒性较大。

1987 年后,日本又开发出了两种防治稻水象甲的新药剂——醚菊酯(多来宝, Trebon Ethofen prox 和 Ethofenp roxyfen)和乙腈菊酯(又称稻虫菊酯, Cyclosal, Cycleprothrin 和 Fencyclate),对稻水象甲防效高、击倒快、残效期较长,其油剂和粒剂在水中扩散性能好,使用方便,且对人畜毒性较低,成为后期日本防治稻水象甲的主要药剂。Kanno (1993) 报道日本共有 37 种药剂登记用于防治稻水象甲,近年来普遍使用的有氨基甲酸酯类的丁硫克百威、安克力,拟除虫菊酯的乙腈菊酯、多来宝和有有机氮的巴丹,1991 年 100 万公顷以上的稻田施用杀虫剂防治(注:当年稻水象甲发生面积 130 多万公顷,占水稻总面积的 70%)。

日本防治稻水象甲常用的方法为育苗箱施药、叶面喷施和水中漫施颗粒剂等(Kanno, 1993):

(1) 叶面喷施:叶面喷施粉剂、可湿性粉剂和乳油是害虫防治中常用的方法,稻水象甲侵入日本后不久,这种方法在大规模低费用的紧急防治中曾发挥了积极的作用;但由于持效性差,易发生漂移等问题,目前仅在灌溉水源困难的少数稻田使用。有 10 种药剂获得登记。

(2) 育苗箱施药:育苗箱施药法是日本农业部为节省农动力而开发的一种极受欢迎的高效防治法,1991 年育苗箱施药法占栽培面积的 50%以上,有 8 种药剂获登记,大多为具内吸作用的颗粒剂,每育苗箱(30cm × 60cm)用药量 30~50g,其中最常用的是丁硫克

百威、安克力和巴丹。育苗箱施药法防效高、残效期较长，单位面积上用药少，不需要特别的器械；缺点是容易产生药害，虫口密度低时有些浪费，施药的有效期约 30d，仅适用于机器插秧。

(3) 水中漫施：水中漫施法也是日本普遍采用的有效施药方法，占 1991 年日本防治稻水象甲面积的 30%。但需预注意施药适期和防治指标，最佳的防治时间是越冬成虫迁入稻田高峰期，防治指标为每丛 0.5 头成虫(Tsuzuki *et al.*, 1983b)。共有 11 种药剂得到登记，除异恶唑硫磷外，大多为具触杀活性的颗粒剂。新开发的醚菊酯(多来宝)和乙腈菊酯(Koyama *et al.*, 1987; Matsuura and Ishizaki, 1987)是主要药剂。水中漫施法的优点是药效高，能及时使用、手工施药；缺点是用药量大。

(4) 新型省工施药方法的开发研究：利用多来宝油剂和乙腈菊酯颗粒剂在水中扩散性能好，使用方便，并根据稻水象甲侵入稻田初期分布在田埂四周、成虫在水下叶鞘产卵的特性而设计。包括施用 2%乙腈菊酯颗粒剂的“周边施药法”(Peripheral Application, 或 concentric applications, Naba *et al.*, 1993)、侧条施肥施药(Shibuya, 1995)，在成虫高峰期沿田埂 4m 内集中用药；2%乙腈菊酯颗粒剂包的(乙腈菊酯 2UG-P)“抛掷施药法”(Throwing Application)，用手将外包水溶性聚乙烯醇薄膜的特制乙腈菊酯 2UG-P 药包抛掷离田埂 2~4m 处的一种简易省时施药法，该药剂获登记；4%多来宝油剂“滴入法”(Drip Application)，是一种在稻田入水口或上风面通过调节器直接滴入水面，使油剂很快扩散并覆盖整个水面，导致成虫触杀死亡的方法；还尝试将巴丹、安克力两种农药与化肥一起追施，应用氧化钙包衣配制的丁硫克百威种子包衣剂，以及飞机喷雾等省工、省时办法(Naba and Kohguchi, 1993)。

中国：稻水象甲传入中国后，在防治上提出了“防治越冬代成虫为主，治成虫、控幼虫(南方治早稻、保晚稻)”的方针。抓住关键时期，选用对路农药一年防治一次即可减少损失；但从最大限度压低发生程度、减少外传潜势的需要出发，河北、天津、辽宁、吉林、山东等地提出了“打好越冬场所成虫防治、秧田本田成虫防治、1 代幼虫防治三大战役”的方针。“八五”期间每年防治面积达 66 万公顷次以上，极大地遏制了稻水象甲的发生态势。河北唐山第 1 代成虫日上灯高峰 1988 年最高为单灯 13 万头，到 1991 年降到 1 万头以下。这些措施有力地延缓了稻水象甲在国内的蔓延速度，我国发现稻水象甲 8 年后的 1996 年，发生面积仅占我国 0.3 亿公顷水稻的 0.9%(李先誉, 1997)。

河北省自 1988 年始，进行了大量的药剂试验研究，对拟除虫菊酯类、有机磷、有机氯、氨基甲酸酯类、沙蚕毒素类杀虫剂等 50 多个品种进行防治试验，从中筛选出 5%来福灵 EC、3%呋喃丹 G 和 40%水胺硫磷 EC、20%多来宝等有效药剂推广应用(郭云书 1996; 张玉江, 1997)，水胺硫磷、奎硫磷、三唑磷等有机磷对稻水象甲有较好的防效，但施用后的稻田白背飞虱和褐飞虱往往发生严重(张玉江, 1997)。

天津先后对 15 种药剂进行筛选试验证明：氯杀威、稻乐丰、来福灵防治成虫效果均在 90%以上，呋喃丹、杀虫双防治幼虫效果较好(李秀文, 1999)，并推广飞机超低量弥雾马拉硫磷原油防治技术，防效达 91%以上(<http://www.tjagri.gov.cn/agriculture/dzts/plant-protect.htm>)。

辽宁根据近年来国外及中国南方经验，推荐防治稻水象甲的药剂为三唑磷、丁硫克百威和多来宝等(孙富余等, 1999)。但生产上防治稻水象甲的主体药剂仍是甲基异柳磷、

稻乐丰、呋喃丹以及菊酯类等农药,毒性大,且不符合国家农药应用的有关规定,故试验筛选了12种新药剂的防效(陈彦等,2000)。

目前,新发生区也针对当地实际,积极开展药剂品种筛选,如安徽朱红军等(2002)认为2.5%高氯EC、30%辛·氰EC、40%辛·三唑磷对稻水象甲成虫均表现较高防效,可用于稻水象甲成虫高峰期防治。40%毒死蜱、30%三唑磷药后7d对稻水象甲成虫也表现较好防效(90%以上),但药效相对较慢,可用于稻水象甲成虫初侵期防治。

作为一种我国新入侵和初发年份的外来害虫,防治措施上往往强调根除和扑灭的目标而首选甲基异硫磷、呋喃丹、三唑磷、菊酯类等高毒农药或常规禁用药剂进行高强度、高频率的扑杀,势必人为增加用药次数和用药量,恶化稻田生境,从而引发后期害虫的再增猖獗或抗药性的产生。因此,将稻水象甲防治纳入稻田可持续治理体系中,通过合理选用中低毒化学药剂,取代高毒农药或常规禁用药剂,同时达到与其他害虫的兼治,以减少化学农药的使用,保护稻田生境,减少对沿海稻区水产养殖业的风险,显得十分迫切和必要。

目前,我国防治稻水象甲的药剂仍为高毒品种当家,需要增加其他配套措施的综合研究,减少农药使用量。在化学防治上,提倡科学用药,针对水田特点,选用对鱼类等水生动物毒性小的农药品种,其次考虑兼治问题,如辽宁在5月末~6月初越冬成虫迁往稻田时,也正是稻潜叶蝇、负泥虫发生盛期,一次施药可兼治三虫;天津在防治稻水象甲的同时,兼治了稻蝗、二化螟、灰飞虱等,各地都千方百计结合当地的实际情况,减少用药次数,降低防治成本。同时,加强综合治理技术的研究,包括新农药的开发、筛选、减少环境污染,水田生态系的保护,抗虫水稻品种的选育以及农业和生物防治的可能性等,以便简易、经济、有效的综防体系的建立,提高综合治理水平(魏鸿钧,1997)。

中国台湾:基本上选取了日本、美国等有效的方法进行了试验筛选,认为育苗箱施药(插秧前24h)为稻水象甲防治最佳考虑的防治方法(施锡彬和叶祥汗,1991),经济阈值为移栽后3d、15d的分别每丛0.25头和0.5头(Cheng and Shih,2001)。防治稻水象甲主要用颗粒剂,其中育苗箱施用的有3%丁硫克百威、2%吡虫啉、3%呋喃丹颗粒剂等,本田初期施用的有5%免扶克 Benfuracarb、6%培丹 cartap(巴丹)、3%呋喃丹和3%丁硫克百威颗粒剂(施锡彬和李宝煌,1994)。其中,利用六行式插秧机附挂侧条施肥机将药剂(呋喃丹或 Cartap 颗粒剂)与肥料搅拌混和,与插秧时将肥料及药剂施入土中,不但具有育苗箱施药功能,同时有省时省工节省劳力,更能达到插秧、施肥及防治三重效能。同时,还试验了多来宝 Ethofenprox 1.5% PVA, 4% PVA, 4% oil(水溶聚合醇酯膜包裹的药剂及油剂),与周边投入药包使药包自行在水中分解后将药剂释放,籍风、水流漂散均匀;油剂在入水口以滴定方式施入等省工省时施药法。

第十节 应用与基础研究发展策略

综上所述,稻水象甲是国际、国内一种危险的检疫性、外来入侵害虫。稻水象甲对恶劣环境的适应能力以及孤雌生殖的特性,使其侵染、蔓延的区域逐年增多,而一旦传入便能迅速定居并扩散,且难以根治,已引起亚洲各水稻生产国的严重关注。我国南方

稻区河网纵横,水稻连片种植,阻止稻水象甲扩散的自然屏障较少。一年两代的生活史,发达的市场经济和交通运输条件更增加了稻水象甲进一步扩散的机会。我们目前所面临的疫情形势仍十分严峻,稻水象甲大规模南侵和北上不过是迟早的事情,如果得不到有效控制,将严重威胁我国南方稻区的水稻生产。

因此,需要面对未来南方广大水稻产区大面积发生稻水象甲的局面开展有关的基础和应用基础层面的科学问题研究。目前需要:

(1) 进一步明确稻水象甲迁飞扩散的时空动态、传播与扩散的途径与格局、环境因子对扩散的影响。可以以浙江省东南沿海复杂的地理、不同稻作类型地区作为研究基地,应用地理信息系统的空间分析技术,分析主动扩散的诱发机制、主要环境因子对扩散的影响,种群密度和地理障碍对扩张的制约机制,传播媒介的作用机制,分析寄主植物和种群密度等生物因子、气候条件和地理障碍等非生物因子对扩张方向及速率的影响,从而提出时、空间种群动态规律;

(2) 研究稻水象甲卵子-飞行肌发育共轭效应的生理生态学和分子生物学机理;

(3) 研究稻水象甲入侵后的生殖对策、繁殖潜能、种群增长规律等特征,探明其入侵和扩张过程中生态对策的调整及其效应;

(4) 研究稻水象甲对寄主植物种及其基因型的选择性与适应性的关系,阐明该入侵生物对新寄主的选择与适应机制,尤其对水稻类型品种和杂草的选择性与适应性的关系;

(5) 研究稻水象甲与同一营养水平上土著种之间的资源竞争和种间抑制过程,阐明入侵种与本地种间相互竞争的作用机制;

(6) 提出兼顾稻田整个生态系统的防治药剂和措施,对发生区的稻谷调运、粮食检疫工作提供技术支持,提出经济安全、有效的检疫控制策略;

(7) 研究稻水象甲入侵后作为常发性害虫的发生规律,这是制定检疫和防治策略的基础。

(祝增荣 商晗武 蒋明星 程家安 余海忠)

主要参考文献

- 蔡悦,陈洪存,王新,宋福,刘寿山,高宝柱. 1997a. 稻水象甲传播途径研究(三). 植物检疫, 11(3): 164~166 [Cai Y, Chen H C, Wang X, Song F, Liu S S, Gao B Z. 1997a. Transmission pathways of the rice water weevil: III. *Plant Quarantine*, 11(3): 164~166]
- 蔡悦,高宝柱,陈洪存,王新,宋福,刘寿山. 1997b. 稻水象甲传播途径研究(二). 植物检疫, 11(2): 103~104 [Cai Y, Gao B Z, Chen H C, Wang X, Song F, Liu S S. 1997b. Transmission pathways of the rice water weevil: II. *Plant Quarantine*, 11(2): 103~104]
- 蔡悦,刘寿山,宋福,王新,高宝柱,陈洪存. 1997c. 稻水象甲传播途径研究(四). 植物检疫, 11(4): 219~220 [Cai Y, Liu S S, Song F, Wang X, Gao B Z, Chen H C. 1997c. Transmission pathways of the rice water weevil: IV. *Plant Quarantine*, 11(4): 219~220]
- 蔡悦,王新,陈洪存,刘寿山,高宝柱,宋福. 1997d. 稻水象甲传播途径研究(一). 植物检疫, 11(1): 38~40 [Cai Y, Wang X, Chen H C, Liu S S, Gao B Z, Song F. 1997d. Transmission pathways of the rice water weevil: I. *Plant Quarantine*, 11(1): 38~40]
- 柴一秋,陈祝安,冯惠英等. 2000. 金龟子绿僵菌对稻水象甲的致病性. 中国生物防治, 16(1): 22~25 [Chai Y Q, Chen Z A, Feng H Y et al. 2000. Bioassay of pathogenicity of *Metarhizium auisopliae* to on the rice water weevil *Lissorhoptus oryophilus*. *Chinese Journal of Biological Control*, 16(1): 22~25]

- 陈彦, 田春晖, 李柏宏. 2000. 12种杀虫剂对稻水象甲的防效. 农药, 39(6): 30~32 [Chen Y, Tian C H, Li P H. 2000. Efficiency of 12 insecticides on the rice water weevil. *Pesticide*, 39(6): 30~32]
- 陈祝安, 冯惠英, 施立聪等. 2000. 田间施放绿僵菌防治稻水象甲效果评价. 中国生物防治, 16(2): 53~55 [Chen Z A, Feng H Y, Shi L C. 2000. Evaluation of *Metarhizium anisopliae* on the rice water weevil. *Chinese Journal of Biological Control*, 16(2): 53~55]
- 方海维, 方向群, 陈春秋, 陈奉楼, 许思衡, 冯骏, 方文杰. 2003a. 安徽桐城市发现稻水象甲. 植物保护, 29(5): 66~67 [Fang H W, Fang X Q, Chen C Q, Chen F L, Xu S H, Feng J, Fang W J. 2003a. The rice water weevil discovered in Tongcheng, Anhui province, China. *Plant Protection*, 29(5): 66~67]
- 方海维, 方向群, 陈春秋, 李青林, 冯骏, 李必好. 2003b. 双季稻北缘区稻水象甲发生规律初报. 植物检疫, 17(4): 215~217 [Fang H W, Fang X Q, Chen C Q, Li Q L, Feng J, Li B H. 2003b. Preliminary report on occurrence of the rice water weevil in northern marginal zone of double-cropping of rice in China. *Plant Quarantine*, 17(4): 215~217]
- 勾建军, 郭云书, 汪志和, 黄晓春, 刘春茹. 1998. 稻水象甲发生程度分级标准的研究. 植物保护, 24(6): 27~28 [Gou J J, Guo Y S, Wang Z H, Huang X C, Liu C R. 1998. Ranking standards of occurrence of the rice water weevil. *Plant Protection*, 24(6): 27~28]
- 管良华, 黄复生, 卢宝廉. 1995. 稻水象属一新种的研究: 鞘翅目: 象虫科. 昆虫分类学报, 17(3): 211~214 [Guan L H, Huang F S, Lu B L. 1995. A new species of the genus *Lissorhoptrus* (Coleoptera: Curculionidae). *Entomotaxon*, 17(3): 211~214]
- 郭云书. 1996. 河北省稻水象甲危险性评价和检疫对策. 植物检疫, 10(5): 288~290 [Guo Y S. 1996. Risk evaluation and quarantine strategy of the rice water weevil in Hebei province, China. *Plant Quarantine*, 10(5): 288~290]
- 赫农, 李腾友, 栗建富. 1997. 辽宁省稻水象发生规律及防治措施. 植物检疫, 11(增刊): 30~37 [He N, Li T Y, Li J F. 1997. Occurrence and control of the rice water weevil in Liaoning province, China. *Plant Quarantine*, 11(Suppl.): 30~37]
- 胡新胜. 1997. 稻水象在河北省昌黎县发生危害轻及其原因浅析. 植物检疫, 11(5): 297 [Hu X S. 1997. Lower population density of the rice water weevil in Changli county, Hebei, and its causes. *Plant Quarantine*, 11(5): 297]
- 黄雅文, 孟威. 1999. 稻水象甲田间分布型及复合抽样技术研究. 辽宁农业科学, (3): 11~13 [Huang Y W, Meng W. 1999. Spatial distribution and sampling technique for the rice water weevil. *Liaoning Agri. Sci.*, (3): 11~13]
- 蒋明星, 商哈武, 程家安. 2002. 球孢白僵菌对稻水象甲成虫的毒力测定. 植物保护学报, 29(3): 287~288 [Jiang M X, Shang H W, Cheng J A. 2002. Bioassay of *Beauveria bassiana* against the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 29(3): 287~288]
- 李先誉. 1997. 我国稻水象的发生及治理. 植物检疫, 11(增刊): 62~63 [Li X Y. 1997. Occurrence and management of the rice water weevil in China. *Plant Quarantine*, 11(Suppl.): 62~63]
- 李秀文. 1999. 天津市稻水象甲的发生及综合治理. 天津农林科技, (2): 32~35 [Li X W. 1999. Occurrence and integrated management of the rice water weevil in Tianjin, China. *Tianjin Agri Forestry Sci.*, (2): 32~35]
- 刘雅坤, 康尔艳, 郑兰芬. 1998. 稻水象在玉米上危害. 植物检疫, 12(6): 379 [Liu Y K, Kang E Y, Zheng L F. 1998. Maize plants damaged by the rice water weevil. *Plant Quarantine*, 12(6): 379]
- 刘正恒. 2001. 稻水象甲低密下的监测普查与防控技术. 植保技术与推广, 21(3): 31~32 [Liu Z H. 2001. Surveillance and control of the rice water weevil in lower density. *Plant Protect. Tech. Extension*, 21(3): 31~32]
- 曲辉, 丁秀云. 1998. 辽宁省稻水象甲成虫的空间分布型及抽样方法的研究. 沈阳农业大学学报, 29(1): 30~33 [Qu H, Ding X Y. 1998. Spatial distribution and sampling technique of the rice water weevil adults in Liaoning province. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 29(1): 30~33]
- 曲辉, 李腾友, 傅波, 王继善, 邹丽文. 1998. 辽宁省稻水象甲成虫越冬死亡原因初步分析. 辽宁农业科学, (3): 39~40 [Qu H, Li T Y, Fu B, Wan J S, Zou L W. 1998. Preliminary analysis of factors affecting mortality of the overwintering rice water weevil. *Liaoning Agri. Sci.*, (3): 39~40]
- 全国农业技术推广服务中心(编). 1998. 中国稻水象甲. 北京: 农业出版社 [China National Center for Agricultural Techniques Extension and Service (eds). 1998. Rice Water Weevil in China. Beijing: China Agricultural Press]
- 商哈武, 程家安, 蒋明星等. 2003a. 起始供食时间对稻水象甲冬后成虫繁殖、取食和存活的影响. 中国水稻科学, 2003. 17(1): 77~81 [Shang H W, Cheng J A, Jiang M X, Zhang Z T. 2003a. Effects of initial time of rice plant availability on reproduction, feeding and survival of overwintered rice water weevil (*Lissorhoptrus oryzophilus*). *Ch. J. Rice Sci.*, 17(1): 77~81]
- 商哈武, 程家安, 蒋明星等. 2003b. 稻水象甲成虫在早稻收获储藏期间的存活动态. 昆虫学报, 2003. 46(2): 190~195 [Shang H W, Cheng J A, Jiang M X, Tang Q Y, Gu Y J. 2003b. Survival of adult rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) during harvesting and storage of the first season rice crop in Zhejiang. *Acta Entomol Sinica*, 46(2): 190~195]
- 商哈武, 程家安, 吕劳富. 1998. 浙江省稻水象甲疫情扩展趋势及对策. 见: 程家安, 周伟军主编. 《跨世纪农业发展研究》. 北

- 京: 中国环境科学出版社. 429-433 [Shang H W, Cheng J A, Lu L F. 1998. Epidemics trends of the rice water weevil and its management strateies in Zhejiang province, China. *In*: Cheng J A, Zhou W J eds. Development and Research for Agri. Acrossing the New Century. Beijing: China Environmental Science Press. 429-433]
- 商哈武, 翟保平. 1997. 稻水象甲的南侵与控制策略. 见: 杨星科等主编. 昆虫学研究进展. 北京: 中国林业出版社. 217-221 [Shang H W, Zhai B P. 1997. Southward invasion and control strategies of the rice water weevil. *In*: Yang X K ed. Advances in Entomologica Research. Beijing: China Forestry Press. 217-221]
- 沈歌华. 2002. 黑光灯诱捕防治稻水象甲. 新农业, (10): 31 [Shen G H. 2002. Control of the rice water weevi by black-light trap. *New Agriculture*, (10): 31]
- 施锡彬. 1992. 水稻水象鼻虫族群变动及防治. 桃园区农业改良场研究报告第 11 号: 33-46 [Shih H P. 1992. Population dynamics of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in Taiwan and its control measures. *Bull. Taoyuan Agri Improve. Station*, 11: 33-46]
- 施锡彬, 李宝煌. 1996. 桃园地区水稻水象鼻虫之迁移及危害评估研究. 桃园区农业改良场研究报告第 27 号: 31-43 [Shih H P, Lee P H. 1996. Dispersal and estimation of damage to rice by the rice water weevil in Taoyuan district, Taiwan. *Bull. Taoyuan Agri. Improve. Station*, 27: 31-43]
- 施锡彬, 1991. 台湾新发现之水稻水象鼻虫生态. 桃园区农业改良场研究报告第 7 号: 61-67 [Shih H P. 1991. The newly found rice water weevil on rice plant in in Taiwan. *Bull. Taoyuan Agri. Improve. Station*, 7: 61-67]
- 施锡彬, 李宝煌. 1994. 台湾水稻水象鼻虫防治技术之改进. 桃园地区农业改良场研究报告第 19 号: 35-43 [Shih H P, Lee P H. 1994. Improvement of chemical control of the rice water weevil in Taiwan. *Bull. Taoyuan Agri Improve. Station*, 19: 35-43]
- 施锡彬, 叶祥汗. 1991. 桃园地区水稻水象鼻虫之药剂防治试验. 桃园区农业改良场研究报告第 7 号: 37-48 [Shih H P, Yeh S H. 1991. Insecticide tests for control of the rice water weevil in Taoyuan district. *Bull. Taoyuan Agri Improve. Station*, 7: 37-48]
- 孙富余, 田春晖, 赵成德, 赵文生, 王小奇. 2002. 稻水象甲种群增长规律初探. 生态学报, 22 (10): 1704-1709 [Sun F Y, Tian C H, Zhao C D, Zhao W S, Wang X Q. 2002. Preliminary researches on the population increasing regulation of rice water weevil *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. *Acta Ecologica Sinica*, 22(10): 1704-1709]
- 孙富余, 田春晖, 乔世文, 张建中. 吕晶等. 2000. 辽宁省水稻主要害虫化学防治指标的确定. 辽宁农业科学, (3): 4-6 [Sun F Y, Tian C H, Qiao S W, Zhang J Z, Lu J *et al.* 2000. Determination of chemical control of main insect pests in rice in Liaoning. *Liaoning Agri. Sci.*, (3): 4-6]
- 孙富余, 田春晖, 项亚萍. 1999. 辽宁省水稻害虫发生为害现状及综合防治策略与技术. 辽宁农业科学, (1): 28-32 [Sun F Y, Tian C H, Xiang Y P. 1999. Occurrence status of main insect pests in rice and their control strategie sand techniques in Liaoning province. *Liaoning Agri. Sci.*, (1): 28-32]
- 孙富余. 赵成德等. 1997. 稻水象甲的发生规律与防治研究: VIII. 稻水象甲综合防治技术. 辽宁农业科学, (6): 7-10 [Sun F Y, Zhao C D, Tian C H, Zhao W S. 1997b. Occurrence and control of the rice water weevil: VIII. Integrated management techniques of the rice water weevil. *Liaoning Agri. Sci.*, (6): 7-10]
- 孙汝川, 毛志农等. 1996. 稻水象. 北京: 农业出版社. 159 [Sun R C, Mao Z N. (eds.) 1996. Rice Water Weevil. Beijing: China Agricultural Press. 159]
- 田春晖, 赵文生, 孙富余, 赵成德, 刘兴远, 佟淑杰, 李玉国, 黄萌, 李骥, 孙福平, 魏福刚. 1997. 稻水象甲的发生规律与防治研究: V. 稻水象甲的生物学特性研究. 辽宁农业科学, (3): 3-10 [Tian C H, Zhao W S, Sun F Y, Zhao C D, Liu X Y, Dong S J, Li Y G, Huang M, Li J, Sun F P, Wei F G. 1997. Occurrence and control of the rice water weevil: V. Biological characteristics of the rice water weevil. *Liaoning Agricultural Sciences*, (3): 3-10]
- 田春晖, 赵文生, 赵承德, 孙富余, 刘兴远. 1996. 稻水象甲的发生规律与防治研究 II. 稻水象甲种群分布的空间格局及田间抽样技术. 辽宁农业科学, (6): 22-26 [Tian C H, Zhao W S, Zhao C D, Sun F Y, Liu X Y. 1996. Occurrence and control of the rice water weevil: II. Spatial distribution pattern anf sampling techniques of the rice water weevil. *Liaoning Agricultural Sciences*, (6): 22-26]
- 田春晖, 孙富余, 白雪婧, 张俊星. 1999. 人为解除稻水象甲越冬成虫的休眠状态. 辽宁农业科学, (3): 43-44 [Tian C H, Sun F Y, Bai X Q, Zhang J X. 1999. Artificial termination of herbination of the overwintering rice water weevil. *Liaoning Agri. Sci.*, (3): 43-44]
- 田春晖, 于凤泉, 刘培斌, 李志强, 孙富余. 2003. T03 对稻水象甲的抗性测定. 辽宁农业科学, (5): 5-7 [Tian C H, Yu F Q, Liu P B, Li Z Q, Sun F Y, 2003. Resistance evaluation of rice landrace T03 to the rice water weevil. *Liaoning Agri. Sci.*, (5): 5-7]
- 汪志和. 1999. 抚宁县春玉米上大面积发生稻水象甲. 植物保护, 25(4): 9 [Wang Z H. 1999. Spring maize in Funin county damaged by the rice water weevil. *Plant Protection*, 25(4): 9]

- 汪志和, 杨占起, 陈国民, 祁景乔, 刘振杰, 曹崇炬, 刘春茹, 郭云书, 勾建军. 1998. 稻水象甲对水稻危害损失和防治指标的探讨. 河北农业大学学报, 21(3):61~64 [Wang Z H, Yang Z Q, Chen G M, Qi J Q, Liu Z J, Cao C J, Liu C R, Guo Y S, Gou J J. 1998. Rice grain losses caused by the rice water weevil and economic thresholds for its control. *Journal of Hebei Agricultural University*, 21(3): 61~64]
- 王金伟, 刘冬华. 1997. 稻水象在吉林省的适生性分析及检疫对策. 植物检疫, 11(增刊): 38~40 [Wang J W, Liu D H. 1997. Analysis of suitability of the rice water weevil in Jilin province and quarantine strategies. *Plant Quarantine*, 11(Suppl.): 38~40]
- 魏鸿钧. 1997. 我国稻水象发生态势与持续控制. 植物检疫, 11(增): 60~62 [Wei H J. 1997. Trends of occurrence of rice water weevil and its sustainable control in China. *Plant Quarantine*, 11(Suppl.): 60~62]
- 宣维健, 杨星科, 刘虹, 苏建伟, 盛承发, 闫志利. 2002. 稻水象甲卵的空间分布型及抽样技术研究. 昆虫知识, 39(2): 107~110 [Xuan W J, Yang X K, Liu H, Su J W, Sheng C F, Yan Z L. 2002. The spatial distribution pattern and sampling techniques of the eggs of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus*, in rice paddy fields of North China. *Entomol Knowledge*, 39(2): 107~110]
- 颜仁贤. 1997. 稻水象甲幼虫及茧在稻根周围分布规律. 植保技术与推广, 17(6): 34~35 [Yan R X. 1997. Distribution of larvae and cocoons of the rice water weevil in rice root zone. *Plant Protect. Tech. Extension*, 17(6): 34~35]
- 翟保平. 1996. 浙江省双季稻区稻水象甲的迁飞和滞育. 浙江农业大学博士后研究工作总结, 113 [Zhai B P. 1996. Migration and diapause of the rice water weevil in double-cropping season area in Zhejiang, China. Final Report of Postdoctoral Research, Zhejiang Agricultural University, 113]
- 翟保平, 程家安, 黄恩友, 商晗武等. 1997. 浙江省双季稻区稻水象甲的发生动态. 中国农业科学, 30(6): 23~29 [Zhai B P, Cheng J A, Huang E Y, Shang H W, Zheng X H, Wu J A, Fang Y J, Xia W Q. 1997. Population dynamics of rice water weevil in double rice cropping area of Zhejiang province, China. *Scientia Agri. Sinica*, 30(6): 23~29]
- 翟保平, 商晗武, 程家安等. 1998. 双季稻区稻水象甲一代成虫的滞育. 应用生态学报, 9(4): 400~404 [Zhai B P, Shang H W, Cheng J A, Huang E Y. 1998. Diapause of the first generation adults of the rice water weevil in a double-cropping rice area. *Ch. J. Appl. Ecol.*, 9(4): 400~404]
- 翟保平, 程家安, 郑雪浩等. 1999a. 浙江省双季稻区稻水象甲致害种群的形成. 植物保护学报, 26(2): 137~141 [Zhai B P, Cheng J A, Zheng X H, Wu J, Xia W Q. 1999a. On the formation of destructive population of rice water weevil in double rice cropping area of Zhejiang province, China. *Acta Phytophylacica Sinica*, 26(2): 137~141]
- 翟保平, 商晗武. 1999b. 越冬代稻水象甲迁入峰期的积温预测. 植保技术与推广, 19(1): 8~9 [Zhai B P, Shang H W. 1999b. Forecast of immigration peak of the overwintered rice water weevil by means of thermal accumulation. *Plant Protect. Tech. Extens.*, 19(1): 8~9]
- 翟保平, 商晗武. 1999c. 双季稻区稻水象甲的生活史对策. 见: 全国农业技术推广中心主编. 农作物有害生物可持续治理研究进展. 北京: 中国农业出版社, 177~181 [Zhai B P, Shang H W. 1999c. Life-history strategies of the rice water weevil in region of double-cropping rice seasoning in China. In: China National Extension Center for Agricultural Techniques ed. Research Advances in Sustainable Pest Management. Beijing: China Agricultural Press. 177~181]
- 翟保平, 商晗武, 程家安, 郑雪浩. 1999d. 浙江省双季稻区稻水象甲二代虫源的构成. 植物保护学报, 26(3): 193~196 [Zhai B P, Shang H W, Cheng J A, Zheng X H. 1999d. Constitution of the autumn population of rice water weevils in double cropping rice area of Zhejiang Province, China. *Acta Phytophylacica Sinica*, 26(3): 193~196]
- 翟保平, 商晗武, 程家安. 1999e. 稻水象甲卵巢发育程度的分级及其应用. 中国水稻科学, 13(2): 109~113 [Zhai B P, Shang H W, Cheng J A. 1999e. Classifying the ovarian development of rice water weevil and its application. *Ch. J. Rice Sci.*, 13(2): 109~113]
- 翟保平, 郑雪浩, 商晗武, 程家安. 1999f. 风对稻水象甲起飞的影响. 中国农业气象, 19(4): 24~27 [Zhai B P, Zheng X H, Shang H W, Cheng J A. 1999f. Influence of wind on takeoff of the rice water weevil. *Ch. Agri. Meteorol.*, 19(4): 24~27]
- 翟保平, 郑雪浩, 商晗武, 程家安等. 1999g. 稻水象甲(*Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel)滞育征候群中的飞行行为. 生态学报, 19(4): 453~457 [Zhai B P, Zheng X H, Shang H W, Cheng J A, Wang P. 1999g. Flight behavior in the diapause syndrome of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. *Acta Ecol. Sinica*, 19(4): 453~457]
- 张玉江. 1997. 唐海县稻水象甲的发生特点及其防治. 植物检疫, 11(1): 40~41 [Zhang Y J. 1997. Occurrence and its control of the rice water weevil in Tanghai county, Hebei, China. *Plant Quarantine*, 11(1): 40~41]
- 张玉江, 张汉友, 孙仲祥. 1997. 白僵菌防治稻水象甲田间试验. 河北农垦科技, (4): 30, 25 [Zhang Y J, Zhang H Y, Sun Z X. 1997. Field experiment of control of the rice water weevil by *Beauveria bassiana* (Bals) Vuin. *Hebei Agri. Cultivat. Tech.*, (4): 30, 25]
- 赵成德, 孙富余, 田春晖, 赵文生, 刘兴远, 佟俊杰, 孙逢山. 1997. 稻水象甲的发生规律与防治研究 VII. 稻水象甲为害

- 损失估计及防治指标的确定. 辽宁农业科学, (5): 12~16 [Zhao C D, Sun F Y, Tian C H, Zhao W S, Liu X Y, Dong S J, Sun F S. 1997. Occurrence and control of the rice water weevil: VII. Estimation of rice grain yield loss and injury by the rice water weevil and economic thresholds for control of the pest. *Liaoning Agri. Sci.*, (5): 12~16]
- 赵成德, 孙富余, 赵文生, 田春晖. 1996. 稻水象甲的发生规律与防治研究 I. 稻水象甲的分布及其在辽宁疫区的发生现状. 辽宁农业科学, (5): 8~11 [Zhao C D, Sun F Y, Zhao W S, Tian C H. 1996. Occurrence and control of the rice water weevil: I. Distribution and status of occurrence in Liaoni, China. *Liaoning Agri. Sci.*, (5): 8~11]
- 赵文生, 孙富余, 刘兴远, 佟淑杰, 赵成德, 石守荣. 1997a. 稻水象甲的发生规律与防治研究 VI. 稻水象甲为害对水稻生育及产量构成因素的影响. 辽宁农业科学, (4): 9~11 [Zhao W S, Sun F Y, Liu X Y, Dong S J, Zhao C D, Shi S R. 1997a. Occurrence and control of the rice water weevil: VI. Effect of damage by the rice water weevil on growth and grain yield components of rice. *Liaoning Agri. Sci.*, (4): 9~11]
- 赵文生, 田春晖, 孙富余, 赵成德, 李玉国, 孙福平. 1997b. 稻水象甲的发生规律与防治研究 IV. 稻水象甲的种群动态研究. 辽宁农业科学, (2): 17~21 [Zhao W S, Tian C H, Sun F Y, Zhao C D, Li Y G, Sun F P. 1997b. Occurrence and control of the rice water weevil: IV. Population dynamics of the rice water weevil. *Liaoning Agri. Sci.*, (2): 17~21]
- 浙江省稻水象甲课题组. 1996. 稻水象甲发生规律和防治技术研究总结(1994~1996). [Zhejiang Provincial Rice Water Weevil Project Team. 1996. Final Report on Population Dynamics and Techniques of Control of the Rice Water Weevil (1994~1996)]
- 郑秀银, 王会君. 1998. 磷化铝熏蒸稻水象研究初报. 河北农业大学学报, 21(1): 35~39 [Zheng X Y, Wang H J. 1998. Preliminary report of fumigative effect of phosphorous aluminium on the rice water weevil. *J. Hebei Agri. Univ.*, 21(1): 35~39]
- 郑雪浩, 翟保平, 吴建. 1997. 浙江东南沿海地区稻水象发生规律及防治对策. 植物检疫, 11(增刊): 41~44 [Zheng X H, Zhai B P, Wu J. 1997. Occurrence and control strategies of the rice water weevil in southeastern Zhejiang coastal area. *Plant Quarantine*, 11(Suppl.): 41~44]
- 朱红军, 胡毛月, 徐卫忠, 盛明亮. 2002. 几种杀虫剂防治稻水象甲药效试验. 安徽农业科学, 30(5): 764~766 [Zhu H J, Hu M Y, Xu W Z, Sheng M L. 2002. Efficiency of several insecticides on the rice water weevil. *Anhui Agri. Sci.*, 30(5): 764~766]
- Anonymous (LSU Agcenter). 1994. Rice pesticide usage report and integrated pest management of rice in Louisiana. Louisiana State Univ. Agric. Center, Baton Rouge, LA. 27
- Asayama T, Nakagome T. 1993. Invasion and spread of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in Japan. In: Hirai K ed. Establishment, Spread, and Management of the Rice Water Weevil and Migratory Rice Insect Pests in East China. NARC, Japan, Tsukuba. 83~103
- Bernhardt J L. 1997. Control of rice water weevil with Karate, 1996. *Arthropod Management Tests*, 22: 289
- Bernhardt J L. 1998. Control of rice water weevil with Dimilin, 1997. *Arthropod Management Tests*, 23: 258
- Bernhardt J L. 1999. Control of rice water weevil with selected insecticides. *Arthropod Management Tests*, 24: 270~271
- Blatchley W S, Leng C W. 1916. *Rhynchophora* or weevils of North Eastern American. The Nature Publishing Co. Indianaapolis. illus. *Lissorhoptrus simplex*, 228~230
- Boeing A, Craighead F C. 1930. An illustrated synopsis of the principal larval forms of the order Coleoptera. *Entomologica Americana, Liddorhptrinae*, 330~331
- Bowling C C. 1968. Rice water weevil resistance to Aldrin in Texas. *J. Econ. Entomol.*, 61(4): 1027~1030
- Bowling C C. 1972. Note on the biology of rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus*. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 65: 990~991
- Bowling C C. 1973. Procedure for screening rice varieties for resistance to the rice water weevil. *J. Econ. Entomol.*, 66: 572~573
- Bowling C C. 1980. Insect pests of the rice plant. In: B. S. Luh ed. Rice: production and utilization. AVI, Westport, Co. 260~288
- Boyd M L. 2003. Rice Insect Management Guide – 2003. <http://aes.missouri.edu/delta/muguide/ricegsh.stm>
- Bunyarat M, Tugwell P, Riggs R D. 1977. Seasonal incidence and effect of a Mermithid nematode parasite on the mortality and egg production of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus*. *Environ. Entomol.*, 6(5): 712~714
- Caldara R O'Brien C W. 1995. Curculionidae: aquatic weevil of China (Coleoptera). In: Jach M A ed. Wined Water beetle of China. 389~408
- Cave G L, Smith C M. 1983. Number of instars of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 76: 293~294
- Cave G L, Smith C M, Robinson J F, Manly B F J, Taylor L R, Iwao S. 1984. Population dynamics, spatial distribution, and sampling of the rice water weevil on resistant and susceptible rice genotypes. *Environ. Entomol.*, 13: 822~827
- Cheng C H, Shih H P. 2001. Spread and management of rice water weevil. In: Kuala Lumpur ed., 4th APCE, 96
- Clyde E. 1996. Controlling Insects in Rice, Revised February 9, 1996. <http://muextension.missouri.edu/xplor/agguides/crops/g04362.htm>
- Cook C A. 1988. Evaluation of resistance in rice to the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. M. S. thesis, LSU,

- Counce P A, Wells B R, 1990. Rice plant population density effect on early-season nitrogen requirement. *J. Product. Agri.*, 3: 390-393
- Everett T R. 1965. Rice Insects. *Rice J.*, 68(7): 28-30
- Everett T R. 1966. Arthropod pests of rice fields in the United States. 11th Session of the Working Party on Rice Production and protection. International Rice Commission, FAO, Lake Charles, LA
- Everett T R, Newsom L D. 1964. External characters for separating the sexes of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera, Curculionidae). *Ann. Entomol. Soc. Amer.*, 57: 514-515
- Everett T R, Trahan G B. 1967. Oviposition by rice water weevils in Louisiana. *J. Econ. Entomol.*, 60: 305-307
- Flickinger E L, King K A, Stout W F, Mohn M M. 1980. Wildlife hazards from Furadan 3G applications to rice in Texas. *J. Wildl. Manage.*, 44: 190-197
- Gifford J R, Trahan G B. 1966. Overwintering of the rice water weevil in Louisiana. *Ann. Res. Rpt., Rice Res. Stn., La. Agric. Exp. Stn., LSU Agricultural Center*, 59: 173-175
- Gifford J R, Trahan G B. 1967. A preliminary study on insecticidal control of the rice water weevil. *In: 59th Ann. Prog. Rep., Rice Exp Station*, 153-170
- Gifford J R, Trahan G B. 1969a. Apparatus for removing overwintering adult rice water weevils from bunch grass. *J. Econ. Entomol.*, 62: 752-754
- Gifford J R, Trahan G B. 1969b. Staining technique for eggs of rice water weevils oviposited intracellularly in the tissue of the leaf sheaths of rice. *J. Econ. Entomol.*, 62: 740-741
- Gifford J R, Trahan G B. 1975. Rice water weevil and rice stalk borer resistance. *In: 67th annual progress report. Louisiana State University Rice Experiment Station*. 125-130
- Godfrey L. 2000. Rice water weevil light trap data-2000. <http://agronomy.ucdavis.edu/ucerrice/PRODUCT/rwvtrap.htm>
- Godfrey L, Cuneo T D. 2002. Integrated management of rice water weevil-California style. *In: Hill J E, Hardy B eds. Proc. 2nd Temperate Rice Conf. 13-17 June 1999, Sacramento, California, USA. Los Banos, Philippines: Intl. Rice Res. Institute.* 327-334
- Goh H G, Choi K M. 1993. Forecasting methods of the rice water weevil in Korea. *In: Hirai K ed.* 133-162
- Grigarick A A. 1963. Rice plant injury by invertebrate pests. *Calif. Agr.*, 17: 6-7
- Grigarick A A. 1984. General problems with rice invertebrate pests and their control in the United States. *Protection Ecology*, 7: 105-114
- Grigarick A A. 1993. Study of the rice water weevil, past, present, and future in the United States with emphasis on California. *In: Hirai K ed.* 12-31
- Grigarick A A, Beards G W. 1965. Ovipositional habits of rice water weevil in California as related to a greenhouse evaluation of seed treatments. *J. Econ. Entomol.*, 58: 1053-1056
- Haizlip M B, Tugwell N P. 1983. Degeneration and regeneration of indirect flight muscle in the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae). *J. Kansas Entomol., Soc.*, 56(2): 164-168
- Hall T C. 2000. <http://www.sciencedaily.com/releases/2000/12/001204071847.htm>
- Heinrichs E A. 1986. Perspectives and directions for the continued development of insect-resistant rice varieties. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 18: 9-36
- Heinrichs E A. 1994. Host plant resistance. *In: Heinrichs E A ed. Biology and Management of Rice Insects.* New York: Wiley. 517-547
- Heinrichs E A, Medrano F G, Rapusas R H. 1985. Genetic evaluation for insect resistance in rice. IRRI, Manila, Philippines
- Heinrichs E A, Quisenberry S S. 1999. Germplasm evaluation and utilization for insect resistance in rice. *In: Clement S L, Quisenberry S S eds. Global Plant Genetic Resources for Insect-resistant Crops.* CRC, Boca Raton, FL. 3-23
- Hesler L S, Grigarick A A, Orazé M J, Palrang A T. 1992. Effects of temporary drainage on selected life history stages of the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) in California. *J. Econ. Entomol.*, 85: 950-956
- Hesler L S, Orazé M J, Grigarick A A, Palrang A T. 2000. Numbers of rice water weevil larvae (Coleoptera: Curculionidae) and rice plant growth in relation to adult infestation levels and broadleaf herbicide applications. *J. Agri. Urban. Entomol.*, 17: 99-108
- Hirao J. 1988. Invasion of the rice water weevil into Korea in 1988. *Plant Protect.*, 42: 583-584
- Hix R L, Johnson D T, Bernhardt J L. 2000a. Swimming behavior of an aquatic weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae). *Florida Entomol.*, 83(3): 316-324

- Hix R L, Johnson D T, Bernhardt J L. 2000b. An aquatic barrier trap for monitoring adult rice water weevils. *Florida. Entomol.*, 83: 189-192
- Hix R L, Johnson D T, Bernhardt J L, Mattice J D, Lewis B L. 2000c. Trapping adult rice water weevil with aquatic barrier traps and floating cone traps, with notes on chemical ecology. *In: Rice Research Studies*. 1999. Univ. Ark. Agri. Exp. Stat. Res. Ser. 476: 147-157
- Hix R L, Johnson D T, Bernhardt J L. 2001. Trapping adult *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae) with aquatic barrier traps. *Environ. Entomol.*, 30(4): 770-775
- Hix R L, Johnson D T, Bernhardt J L, Lavy T L, Mattice J D, Lewis B L. 1998. Development of an IPM monitoring progress for the rice water weevil adults. *In: Rice Res. Studies* 1997. Univ. Ark. Agri. Exp. Stat. Res. Ser. 460: 95-102
- Hix R L, Johnson D T, Bernhardt J L, Mattice J D, Lewis B L. 1999. Trapping adult rice water weevil with floating cone and barrier traps. *In: Rice research studies* 1998. Univ. Ark. Agri. Exp. Stat. Res. Ser. 468: 135-141
- Hix, R. L., D. T. Johnson, and J. L. Bernhardt. 2003. Antennal sensory structures of *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae) with notes on aquatic adaptations. *Coleopterists Bull.*, 57: 85-94
- Ingram J W. 1927. Insects injurious to the rice crop. *USDA Farmers Bull.*, 1534: 17
- Ingram J W, Douglas W A. . 1930. Damage by the rice water weevil proved negligible. *La. Agr. Exp. Sta. Bul.*, 214: 8
- Isely D, Schwardt H H. 1932. The rice water weevil problem in Arkansas. *J. Econ. Entomol.*, 25: 218-222
- Isely D, Schwardt H H. 1934. The rice water weevil. *Univ. Arkansas Agr. Expt. Sta. Bull.*, 299: 43
- Isely D, Schwardt H H. 1930. The tracheal system of the larva of *Lissorhoptrus simplex*. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 23: 149-152
- Isogawa Y. 1977. Biology of rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus*. *Noyaku Kenkyu.*, 24: 7-13
- Iwao S, Kuno E. 1968. Use of the regression of mean crowding on mean density for estimating sample size and the transformation of data for the analysis of variance. *Res. Popul. Ecol.*, 10: 210-214
- Iwata T. 1976. Occurrence of the American rice water weevil in Japan. *Intl. Rice Res. Newsl.*, 1(2): 17
- Iwata T. 1980. Invasion of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzae* Kuschel, into Japan, spread of its distribution and abstract of the research experiments conducted in Japan. *Japan Pesticide Information*, 36: 14-21
- Jiang M X, Cheng J A. 2003. Feeding, oviposition and survival of overwintered rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) adults in response to nitrogen fertilization of rice at seedling stage. *Appl. Entomol. Zool.*, 38(4): 543-549
- Kanno H. 1993. Chemical control of the rice water weevil in Japan. *In: Hirai K ed.* 214-230
- Katayama E. 1985. Ovarian development in overwintered adults of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. *Proc. Kanto-Tosan Plant Prot. Soc.*, 32: 165-166
- Kayumi J I, Sakashita T. 1985. Determination of the instar of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae) by the widths of the head capsule. *Jpn. J. appl. Ent. Zool.*, 29: 168-170
- Kimura T. 1993. Effect of photoperiod and temperature on oviposition after hibernation in the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus*. *In: Hirai K ed.* 122-132
- Kisimoto R. 1979. Examination of original site of the rice water weevil. *Plant Protection*, 33: 503-507
- Kisimoto R. 1980. Expansion of geographical distribution of the rice water weevil. *Today's Pesticide*, 20(13): 50-54
- Kisimoto R. 1991. Long-distance migration of rice insects. *In: Heinrichs E A, Miller T A eds.* Rice Insect: Management Strategies. Springer-Verlag New York Inc. 167-195
- Kisimoto R. 1993. Spread and management of the rice water weevil, an imported pest insect of rice. *In: Hirai K ed.* 32-41
- Knabke J J. 1973. Diapause in the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae) in California. Ph. D. Dissertation. University of California. Davis. 134
- Kobayashi S. 1984. Life history of the rice water weevil and its climate suitability. *Plant Protection*, 38: 163-166
- Kobayashi S. 1988. Timing forecast of overwintered adults of *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel in overwintering sites. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.*, 32:13-19
- Kobayashi S. 1993. Assessment of rice yield loss due to the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae), in Japan. *In: Hirai K ed.* 183-190
- Kobayashi S, Kayumi J, Miyai S. 1985. Sampling techniques to estimate the population density of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in a paddy field. *Jap. J. Appl. Entomol. Zool.*, 29: 45-19
- Koyama S, Yamashiro C, Arisaka M. 1987. Effect of new pyrethroid insecticide, etofenprox, on the rice water weevil. *Annual. Rep. Jpn. Plant Prot. Assoc.*, 32: 99-100
- Kurihara M, Matsuzaki M. 1989. Ovarian structure and oogenesis in the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera:

- Curculionidae). *Jpn. J. Entomol.*, 57: 666-680
- Kuschel G. 1951. Revision de *Lissorhoptrus* 1c Contey generos vecinos de America. *Revista Chil. Entomol.*, 1: 23-74
- Lange W H, Grigarick A A. 1959. Rice water weevil: Beetle pest in rice growing areas of southern states discovered in California. *Calif. Agric.*, Aug. 10-11
- Lee K Y, Chang Y D, Ahn K S, Kang H J, Park S K. 2002. Effect of temperature on reproduction and development of rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae). *Korean J. Appl. Entomol.*, 41(2): 123-128
- Lee Y I, Uhm K B. 1993. Landing, setting and spreading of the rice water weevil in Korea. In: Hirai K ed. 42-57
- Leng C W. 1920. Catalogue of Coleoptera of America, North of Mexico. *L. simplex*. In: John D. Sherman, Jr. ed. New York: Mt. Vernon. 320
- Liete L G, Takada H M, Cardoso C L, Vilella O V, Filho A B, Aguiar J C. 1995. Control of rice water weevil, *Oryzophagus oryze*, by fipronil and mineral oil associated with *Beauveria bassiana* fungus. *Ann. Soc. Entomol. Brasil.*, 24(2): 339-345
- Matsui M. 1984. Spreading process and migration of the rice water weevil in Japan. *Plant Protection*, 38: 158-162
- Matsui M. 1985. Temperature dependence of flight muscle development and flight activity of overwintered adults of the rice water weevil adult, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.*, 29(1): 62-72
- Matsui M, Ito K, Okada M, Kisimoto R. 1983. Morphological changes in the flight muscles and the ovary of the rice water weevil adult, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae), collected at various sites during the period of migration. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.*, 27: 183-188
- Matsuura H, Ishizaki H. 1987. Effect of new pyrethroid insecticides, cycloprothrin, on the rice water weevil. *Ann. Rep. Jpn. Plant Prot. Assoc.*, 32: 111-112
- Meneses C R. 1983. Pathogens and nematodes for control of the rice water weevil in Cuba. *Intnl. Rice Res. Newsl.*, 8(6): 16-17
- Miller B C, Hill J E, Roberts S R. 1991. Plant population effects on growth and yield in water-seeded rice. *Agro. J.*, 83: 291-297
- Morgan D R, Slaymaker P H, Robinson J F, Tugwell N P. 1984. Rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) indirect flight muscle development and spring emergence in response to temperature. *Environ. Entomol.*, 13: 26-28
- Morgan D R, Tugwell N P, Bernhardt J L. 1989. Early rice field drainage for control of rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) and evaluation of an action threshold based upon leaf-feeding scars of adults. *Environ. Entomol.*, 82: 1757-1759
- Morimoto K. 1984. Taxonomic position and morphological characteristics of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera, Curculionidae). *Plant Protect.*, 38: 155-177
- Muda A R, Tugwell N P, Haizlip M B. 1981. Seasonal history and indirect flight muscle degeneration and regeneration the rice water weevil. *Environ. Entomol.*, 10: 685-690
- Muegge M A, Rice W C, Bollich P A, Papenburg T M. 1996. Preliminary analysis of adult rice water weevil flight behavior for southwest Louisiana. *Ann. Res. Rpt., Rice Res. Stn., La. Agric. Exp. Stn., LSU Agricultural Center*, 88: 578-587
- N'Guessan F K, Quisenberry S S, Thompson R A, Linscombe S D. 1994a. Assessment of Louisiana rice breeding lines for tolerance to the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae). *J. Econ. Entomol.*, 87: 476-481
- N'Guessan F K, Quisenberry S S. 1994b. Screening selected line for resistance to the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae). *Environ. Entomol.*, 23(3): 665-675
- Naba K, Kohguchi T. 1993. Labor saving chemical control of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel by concentric pesticide application. In: Hirai K, ed. 246-264
- Nagano T. 1987. Rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, parasitized by green muscardine fungus, *Metarhizium* sp. *Annual Report Soc. Plant Prot. North Jpn.*, 38: 90-91
- Nagano T, Fugisaki Y, Sato Y, Abe K. 1985. Relation between seasonal prevalence and temperature of air, water and soil of rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in Miyagi Prefecture. *Ann. Rept. Plant Prote. North Japan.*, 36: 30-31
- Nam S W. 1998. Prospects of Grain Production, Consumption, and Trade in North Korea. Ph. D. dissertation, University of Missouri
- Newell W. 1913. Notes on the rice water weevil and its control. *Jour. Econ Ent.*, 6: 55-61
- Nilakhe S S. 1977. Reproductive status of overwintering rice water weevils. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 70(4): 599-601
- Nitta A, Grey G. 1996. Microbial control of rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae) and green rice leafhopper, *Nephotettix cincticeps* (Hemiptera: Deltocephalidae) with two entomogenous fungi (Deuteromycotina). In: Biological pest control in systems of integrated pest management. Proc. Intl. Symp. "The use of Biological Control Agents under Integrated Pest Management", 231-251
- O'Brien C W, Wibmer G J. 1982. Weevils of North America. Memoirs of the Am. Entomol. Institute
- Odom R. 2002. <http://www.agctr.lsu.edu/news/newsarchive/6nws0618.htm>

- Okada T. 1980. Researches on the host-plants of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, and on the behavior of the adult in the field (Coleoptera: Curculionidae). *Bul Chugoku National Agri. Exp. Station*, E, 16
- Palrang A T. 1996. Rice water weevil affects yield but not maturity. <http://www.ipm.ucdavis.edu/IPMPROJECT/1996/1996decision.html>
- Palrang A T, Grigarick A A. 1993. Flight response of the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) to simulated habitat conditions. *J. Econ. Entomol.*, 86(6): 1376-1380
- Pantoja A, Medina G S. 1988. *Lissorhoptrus isthmicus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae), a new rice pest of Puerto Rico. *J. Agric. Univ. Puerto Rico.*, 72: 333
- Park K B. *et al.* 1991. Influence of damage by the rice water weevil (*Lissorhoptrus oryzophilus*) on the growth and grain quality of rice. *Korean J. Crop Sci.*, 35(4): 370-374
- Quisenberry S S, Trahan G B, Heagler A M, McManus B, Robinson J F. 1992. Effect of water management as a control strategy for rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae). *J. Econ. Entomol.*, 85: 1007-1014
- Raksart P, Tugwell N P. 1975. Effect of temperature on development of rice water weevil eggs. *Environ. Entomol.*, 4(4): 543-544
- Rice W C, Cogburn R R. 1999. Activity of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Deuteromycota: Hyphomycetes) against three coleopteran pests of stored grain. *J. Econ. Entomol.*, 92(3): 691-694
- Rice W C, Croughan T P, Ring D R, Muegge M A, Stout M J. 1999. Delayed flooding for management of rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae). *Environ. Entomol.*, 28: 1130-1135
- Rice W C, Trahan G B, Bollich P A. 1994. Evaluation of world collection lines-set 3. 86th Ann. Res. Report, Rice Exp. Station, Louisiana Agri. Exp. Station. Crowley, LA. 500-502
- Riley C V. 1881. Insect enemies of rice. *Am. Nat.*, 15: 148-149
- Riley C V. 1883. Report of the Entomologist in Executive Document, 1st Session, 47th Congress V. 26, Report of Commissioner Agriculture for 1881-1882. *Lissorhoptrus simplex*, 130-133
- Robinson J F, Liscombe S D, Jodari F, Trahan G B, Quisenberry S S. 1988a. Rice water weevil resistance: Evaluation of breeding lines. 80th Ann Res Report, Rice Exp Station, Louisiana Agri. Exp. Station. Crowley, LA. 245-246
- Robinson J F, Nowick E M, Quisenberry S S, Trahan G B, Michot R M. 1988b. Rice water weevil resistance: Four-way crosses. 80th Ann Res Report, Rice Exp Station, Louisiana Agri. Exp. Station. Crowley, LA. 243-244
- Robinson J F, Smith C M, Trahan G B. 1981. Evaluation of rice lines for rice water weevil resistance. *Ann. Prog. Rep., Rice Res. Sta., LAES, LSU Agri-Center.*, 73: 260-272
- Robinson J F, Trahan G B, Quisenberry S S. 1988c. Rice water weevil resistance: Evaluation of world collection lines. 80th Ann Res Report, Rice Exp Station, Louisiana Agri. Exp. Station. Crowley, LA. 247-248
- Saichuk J K, Linscombe S D, Bollich P K. 1999. DD-50 rice management program. *In: Louisiana Rice Production Handbook*, LSU Agricultural Center, Baton Rouge, LA
- Saito T. 2001. Rice water weevil. Reported to Kasetsart University and Department of Agriculture, Thailand in 1999. Kuala Lumpur, 4th APCE, 1-10
- Shang H W, Stout M J, Zhang Z T, Pousson R C, Chu Q R. 2003. Reproductive biology and survival of rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae), *Ann Res. Rep. La. State Univ., Baton Rouge, LA.* 474-479
- Shibuya S. 1995. Partial control of rice water weevil *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, (Coleoptera, Curculionidae) by chemical: 3. Control by buried application chemical in relation to maximum flying migration period. *Ann. Rept Soc. Plant Prot North Japan.*, 46: 127-129
- Shih H P, Cheng C H. 1993. Present status of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel in Taiwan. *In: Hirai K ed.* 104-121
- Smith C M. 1983. The rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. *In: Singh K G ed.* Exotic plant quarantine pests and procedures for introduction of plant materials. Selangor, Malaysia: ASEAN Plant Quarantine Centre and Training Institute. 3-9
- Smith C M. *et al.* 1986. Insect pests of rice in Louisiana. *Louisiana Agric. Exp. Stat., Bull.*, 774
- Smith C M, Robinson J F. 1982. Evaluation of rice cultivars grown in North America for resistance to the rice water weevil. *Environ. Entomol.*, 11: 334-336
- Sooksai S. 1976. Rice water weevil (*Lissorhoptrus oryzophilus*, Kuschel) feeding scars-larval density relationship. Thesis, University of Arkansas
- Sooksai S, Tugwell P. 1978. Adult rice water weevil feeding symptoms: number samples required, spatial and seasonal distribution in a rice field. *J. Econ. Entomol.*, 71: 145-148

- Stevenson T W. 1972. Relative abundance of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in selected rice fields in the Arkansas Grand Prairie: with notes on overwintering. M. S. thesis, University of Arkansas, Fayetteville, USA
- Stout M J, Rice W C, Linscombe S D, Bollich P K. 2001. Identification of rice cultivars resistant to *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae), and their use in an integrated management program. *J. Econ. Entomol.*, 94(4): 963-970
- Stout M J, Rice W C, Riggio R M, Ring D R. 2000. The effects of four insecticides on the population dynamics of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. *J. Entomol. Sci.*, 35(1): 48-61
- Stout M J, Rice W C, Ring D R. 2002a. Integrated management of rice water weevil. *Louisiana Agri.*, 45(1): 20-21
- Stout M J, Rice W C, Ring D R. 2002b. The influence of plant age on tolerance of rice to injury by the rice water weevil *Lissorhoptrus oryzophilus* (Coleoptera: Curculionidae). *Bull. Entomol. Res.*, 92: 177-184
- Stout M J, Riggio M R, Zou L, Roberts R. 2002c. Flooding influences oviposition and feeding behavior of the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae). *J. Econ. Entomol.*, 95(5): 715-721
- Suzuki T, Katayama E. 1986. Initial activation time of overwintered adults and initial overwintering time of the new generation of adults of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel. *Proc. Kanto-Tosan Plant Prot. Soc.*, 33: 170-171
- Tanaka A. 1986. Ecology and methods of control of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in Kagoshima prefecture. 2. Incidence of the weevil on rice transplanted at different times. *Proc. Assoc. Plant Protect. Kyushu.*, 32: 113-117
- Tanaka A. 1987. Ecology and methods of control of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in Kagoshima prefecture. 3. Activity of adults in early planted paddy fields. *Proc. Assoc. Plant Protection Kyushu.*, 33: 113-117
- Tanaka A. 1988. Ecology and methods of control of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in Kagoshima prefecture. 4. Emergence period of the first generation adults and number of adult catches in a light trap. *Proc. Assoc. Plant Protection Kyushu.*, 34: 112-116
- Tanaka A. 1993. Ecology of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, in Kyushu and Okinawa, Japan. In: Hirai K ed., 191-213
- Tauber M J, Tauber C A, Masaki S. 1986. Seasonal Adaptation of Insects. New York: Oxford Univ. Press. 411
- Tekeda M, Nagata T. 1987. Flight muscle development and immigration of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus*, in relation to day-degree accumulation. *Ann. Rep. Plant Protect. North Japan*, 38: 85-89
- Thomson R A, Quisenberry S S, Trahan G B, et al. 1994a. Water management as a cultural control tactic for the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) in Southwest Louisiana. *J. Econ. Entomol.*, 87(1): 223-230
- Thompson R A, Quisenberry S S, N'Guessan F K, Heagler A M, Giesler G. 1994b. Planting date as a potential cultural method for managing the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae) in water-seeded rice in southwest Louisiana. *J. Econ. Entomol.*, 87: 1318-1324
- Thompson R G. 1970. The relationship of the development of the rice plant to the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus*, Kuschel, and root damage. M. S. thesis, University of Arkansas, Fayetteville
- Tindall K V, Stout M J. 2001. Plant-mediated interactions between the rice water weevil and fall armyworm in rice. *Entomol. Exp. Appl.*, 101(1): 9-17
- Tindall K V, Stout M J. 2002. <http://www.agctr.lsu.edu/news/March2002/Headlines/ControllingRiceWaterWeevil03-12-02.htm>
- Tindall K V, Stout M J. 2003. Use of common weeds of rice as hosts for the rice water weevil (Coleoptera: Curculionidae). *Environ. Entomol.*, 32(5): 1227-1233
- Tseng S T, Johnson C W, Grigarick A A, Rutger J N, Carnahan H L. 1987. Registration of short stature, early maturing, and water weevil tolerant plant material lines of rice. *Crop Sci.*, 27: 1320-1321
- Tsuzuki H, Asayama T, Oishi K, Uebayashi Y. 1983a. Assessment of yield loss due to the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae). I. Effect of initial adult density on the growth of rice plants and yield. *Jpn. J. Appl. Entom. Zool.*, 27(3): 211-218
- Tsuzuki H, Asayama T, Takimoto M, Shimohata T, Kayumi J, Kobayashi S. 1983b. Assessment of yield loss due to the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae). II. Damage caused by adult and larval infestation and estimation of the tolerable injury level. *Jpn. J. Appl. Entom. Zool.*, 27(4): 252-260
- Tucker E S. 1912. The rice water weevil and methods for its control. *USDA Bureau of Entomol. Circular.*, 152: 1-20
- Urtz B E, Rice W C. 1997. RAPD-PCR characterization of *Beauveria bassiana* isolates from the rice water weevil *Lissorhoptrus oryzophilus*. *Let. Appl. Microbiol.*, 25(6): 405-409
- Way M O. 1990. Insect pest management in rice in the United States. In: Grayson B T, Green M B, Copping L G eds. *Pest Management in Rice*. New York, USA: Elsevier Science Publishing Co., Inc. 181-189

- Way M O, Wallace R G, Smith K. 1992a. Evaluation of two species of nematodes for rice water weevil control, 1989. *Insecticide and Acaricide Tests*, 17: 257-258
- Way M O, Wallace R G, Smith K. 1992b. Control of rice water weevil with nematodes, 1990. *Insecticide and Acaricide Tests*, 17: 254-256
- Way M O, Wallace R G. 1993. Rice water weevil integrated pest management in the United States with emphasis on the South. In: Hirai K ed. 58-82
- Webb J L. 1914. Notes on the rice water weevil, *Lissorhoptrus simplex* (Say). *J. Econ. Entomol.*, 7: 432-438
- Whitehead F E. 1954. Tests on insecticidal control of rice water weevil. *J. Econ. Entomol.*, 47: 676-680
- Wu G W, Wilson L T. 1997. Growth and yield response of rice to rice water weevil injury. *Environ. Entomol.*, 26: 1191-1201
- Wu G W, Wilson L T, McClung A M. 1998. Contribution of rice tillers to dry matter accumulation and yield. *Agro. J.*, 90: 317-323
- Yokoyama K, Saito T, Watanabe K. 1990. Estimation of maximum immigration period and control of the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, by using day-degree Accumulation. *Annual Rep. Soc. Plant Protec. North Japan*, 41: 99-101
- Yoo J K, Choi I H, Na S Y Lee J O. 1993. Chemical control of the rice water weevil in Korea. In: Hirai K ed. 231-245
- Yoshizawa E. 1990. *Hirsutella jonesii* (Spear) Evans et Samson (Moniliales: Stilbaceae) attacking the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel (Coleoptera: Curculionidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.*, 34(3): 259-262
- Yoshizawa E. 1993. Microbial control of the rice water weevil with entomogenous fungi. In: Hirai K ed. 265-274
- Zou L, Stout M, Rice W C, Dunand R T. 2004a. The effects of feeding by the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel, on the growth and yield components of rice, *Oryza sativa*. *Agri. Forestry Entomol.*, 6(1): 47-54
- Zou L, Stout M, Ring D. 2004b. Density-yield relationships for rice water weevil on rice for different varieties and under different water management regimes. *Crop Protect.* In press (doi:10. 1016/j. cropro. 2003. 10. 012)

第四章 美洲斑潜蝇

第一节 分布与起源	178	第五节 生物学特性	181
第二节 识别特征与早期诊断	178	第六节 生态学特性	187
第三节 传入途径与入侵成因	180	第七节 风险分析与监测预警系统	196
第四节 危害现状与生态经济影响的评估	181	第八节 预防、根除与控制	197

摘要 本章主要介绍了美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* Blanchard 的分布与起源、识别特征与早期诊断、传入途径与入侵成因、危害现状与生态经济影响评估、主要生物学和生态学特性、测报与预警及控制技术等内容。特别是对美洲斑潜蝇成虫的取食产卵、羽化及对黄卡的趋性，幼虫脱道化蛹等生物学行为和温度对斑潜蝇的生长发育、生殖、寿命，越冬与耐寒，对寄主植物的选择和种内竞争、空间分布和种群动态规律等生态学特性作了详细介绍，此外，对斑潜蝇的风险分析与早期预警系统也作了介绍；最后，对斑潜蝇的综合治理方法和技术，如检疫处理、休闲与轮作、黄卡诱杀、冷冻大棚及化学防治和生物防治等作了具体介绍。

关键词 美洲斑潜蝇 分布与危害 识别与诊断 生物学 生态学 监测与控制

Chapter 4 Vegetable Leaf Miner *Liriomyza sativae* Blanchard

Abstract: This chapter contains general overviews of various parameters of *Liriomyza sativae*, including its distribution and origin, recognition characters and early diagnosis, importation pathway and causes, damage and assessment of ecological and economic effects, biological and ecological characters, prediction, warning system and control techniques. Some biological characters concerning feeding, oviposition, eclosion, attractancy to yellow sticky traps, emergence, pupation and ecological characteristics concerning the effect of temperatures on the development, reproduction and longevity, overwintering and cold-hardiness, host selection, intraspecific competition, spatial distribution and dynamics of population are reviewed. In addition, it also gives some introduction of the risk analysis and early warning system of the leafminer. Finally, the integrated control methods and techniques, including quarantine, field fallowing and crop rotation, use of yellow sticky traps, greenhouse freezing,

chemical and biological control and so on, are presented.

Key words: *Liriomyza sativae* Blanchard, distribution and damage, identification and diagnosis, biology, ecology, monitoring and control

第一节 分布与起源

美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* Blanchard 是一种为害多种蔬菜和观赏植物的检疫性害虫, 属双翅目 Diptera、潜蝇科 Agromyzidae、斑潜蝇属 *Liriomyza*。原产于南美洲, 20 世纪 70~80 年代传至太平洋部分岛屿, 90 年代又在阿拉伯半岛南部、非洲、亚洲部分国家和地区发现。

1994 年初海南省三亚市(北纬 18.2°, 东经 109.5°)蔬菜上发现一种危害严重的潜叶性害虫。经中国农业科学院植物保护研究所问锦曾研究员鉴定确认是重要检疫性害虫美洲斑潜蝇, 系中国新记录种(问锦曾等, 1996)。美洲斑潜蝇传入我国后, 从南到北蔓延十分迅速, 1994 年底已有海南、广东、广西、福建、江西、四川 6 省(自治区)发现此虫。到目前为止, 该虫已广泛分布于我国 29 个省、市、自治区。对我国的蔬菜生产构成了严重威胁。

第二节 识别特征与早期诊断

一、形态特征

卵: 椭圆形, 乳白色, 半透明。大小为 0.2~0.3mm×0.10~0.15mm。

幼虫: 初孵半透明, 随虫体长大渐变为黄色至橙黄色(如图 4-1)。老熟幼虫体长 2mm 左右, 后气门突末端 3 分叉, 其中两个分叉较长, 各具 1 气孔开口。

蛹: 鲜黄色至橙黄色, 腹面略扁平(如图 4-2)。

成虫: 外形与南美斑潜蝇相似, 但体形较小, 体长 1.3~1.8mm, 翅长 1.8~2.2mm。额宽为眼宽的 1.5 倍, 稍突出于眼眶, 上眶鬃 2 对, 下眶鬃 2 对, 内顶鬃着生于黄与暗色交界处, 外顶鬃着生于暗色处(如图 4-3)。中胸背板黑色有光泽, 小盾片黄色, 胸部中



图 4-1 美洲斑潜蝇幼虫(雷仲仁 供)



图 4-2 美洲斑潜蝇蛹和为害状(雷仲仁 供)



图 4-3 美洲斑潜蝇成虫(雷仲仁 供)

侧片黄色，下缘带黑色斑，腹侧片有一三角形大黑斑。背中鬃 3+1，中鬃散生呈不规则 4 行。足基节、腿节黄色，胫节、跗节暗褐色。前翅中室较小， M_{3+4} 末段长为次末段的 3~4 倍。雄虫外生殖器端阳体褐色、分为两片，具圆齿状外缘，基阳体有一段暗色，精泵具短、狭的柄，扇状叶片褐色，略不对称，背针突末端具 1 齿(王音等，1998b)。

二、与南美斑潜蝇的区别

如表 4-1 所示。

表 4-1 美洲斑潜蝇与南美斑潜蝇的鉴别(雷仲仁, 2003)

	美洲斑潜蝇 <i>Liriomyza sativae</i>	南美斑潜蝇 <i>L. huidobrensis</i>
卵	较小, 0.20~0.30mm×0.10~0.15mm, 卵通常产于叶片正面, 反面很少	较大, 0.27~0.32mm×0.14~0.17mm, 卵产于叶片正反面
幼虫	橙黄色, 后气门突具 3 个气孔	乳白色, 微透明。后气门突具 6~9 个气孔
蛹	鲜黄色至黄褐色	淡褐色至深褐色
成虫	较小, 体宽 0.3~0.5mm, 头宽 0.3~0.6mm, 体长 1.3~1.8mm, 翅长 1.8~2.2mm。头部外顶鬃着生在暗色处, 内顶鬃着生在黄色与暗色交界处, 胸部中侧片黄色, 下缘带黑色斑。足基节、腿节黄色。前翅中室较小, M ₃₊₄ 末段长为次末段的 3~4 倍	较大, 体宽 0.4~0.7mm, 头宽 0.5~0.8mm, 体长 1.6~2.1mm, 翅长 2.1~2.8mm。头部内外顶鬃均着生在暗色处, 胸部中侧片下方 1/2 至大部分为黑色, 仅上方黄色。足基节黄色具黑纹, 腿节具黑色条纹至几乎全黑色。前翅中室较大, M ₃₊₄ 末段长为次末段的 1.5~2.5 倍
为害特点	在叶片上层(但不沿叶脉)形成潜道, 潜道由细到粗, 比较完整; 幼虫仅取食叶肉上层的栅栏组织。一般不钻蛀到作物的叶柄或茎秆中取食; 其老熟幼虫多从叶片正面钻出, 落地或在叶片表面化蛹, 常因寄主不同在叶片和土中化蛹的数量比例不同	沿叶脉形成潜道, 潜道比较粗短; 幼虫不仅取食叶肉上层的栅栏组织, 还取食下层的海绵组织, 叶片背面常有明显的潜道。虫量大时, 常钻蛀到一些作物(如蚕豆、芹菜)的叶柄和茎秆中取食; 其老熟幼虫多从叶片背面钻出, 一般落地化蛹, 在叶片或茎秆上化蛹较少
寄主差别	美洲斑潜蝇对芹菜、蚕豆、莴苣、生菜、葱、蒜等作物却很少为害或不为害, 所以, 根据上述寄主, 常常可以鉴别两种斑潜蝇	比美洲斑潜蝇寄主范围广。与美洲斑潜蝇嗜好不同的寄主有芹菜、蚕豆、莴苣、生菜、葱、蒜、马铃薯等

三、早期诊断

美洲斑潜蝇以雌成虫和幼虫危害寄主植物, 幼虫潜食寄主叶片是其主要的危害形式。成虫将卵产于寄主植物上表皮下, 幼虫孵化后, 取食叶肉栅栏组织, 残留白色上表皮, 形成潜道, 潜道随幼虫龄期的增加不断延长、加宽。所以, 根据植物叶片上的蛇形潜道很容易鉴别是否受到斑潜蝇的为害, 还可以根据潜道的长短、粗细等判断斑潜蝇幼虫的龄期及是否已脱道化蛹。

除此之外, 雌成虫以产卵器刺入叶片在叶片上形成刻点(取食孔、产卵孔), 用以取食、产卵, 特别是在较幼嫩叶片上形成刻点后, 随着叶片的进一步展开, 刻痕也随之扩大。有些寄主植物还产生相应的生理反应, 表现为刻点周围隆起肿胀。在高温时, 在刻点处易形成坏死斑。所以, 在斑潜蝇为害的早期即还没有潜道形成时, 我们首先发现的是斑潜蝇成虫取食、产卵造成的点刻, 根据点的密度可以估计斑潜蝇为害的程度。

第三节 传入途径与入侵成因

由于该虫个体较小, 而且卵和幼虫均在寄主植物组织中, 所以, 很容易随寄主植物的调运而传播。从该虫的传播扩散记录看, 主要是通过寄主传播的。如幼虫和卵可随蔬菜、瓜果及铺垫的寄主植物传播, 蛹可随盆栽植物、土壤、交通工具等远距离传播。另外, 美洲斑潜蝇自身也有一定的迁移扩散和飞行能力。

研究了美洲斑潜蝇在室内的飞行能力,吊飞结果表明,在最适温度下其平均最大飞行距离可达 0.95km,个别个体的最大飞行距离为 8.22km。在 18~36℃ 之间其平均飞行距离为 0.08~0.95km,均可靠自身飞行进入低空气流层(60~350m),有的个体还可以进入高空气流层,但靠其自身飞行能力进行远距离传播的可能性较小,如果借助气流很可能行远距离传播(雷仲仁等,2002)。近几年美洲斑潜蝇的突然暴发,在一些高山、高层楼房、大城市中心等,每到夏天均发现其对蔬菜和花卉的为害;特别是在我国东北、西北等美洲斑潜蝇不能越冬的地方,夏季也突然暴发成灾,这些现象表明,美洲斑潜蝇除随寄主调运传播外,很可能随气流进行远距离传播。这个问题还有待于进一步研究证实。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

美洲斑潜蝇为多食性害虫,寄主范围十分广泛。据调查北京地区美洲斑潜蝇寄主已涉及 20 科 130 余种植物。其中普通蔬菜 41 种,特种蔬菜 39 种,其他还包括花卉、粮棉及其他作物、杂草等。主要嗜食葫芦科、豆科和茄科,以菜豆、豇豆、黄瓜、西葫芦、番茄等被害最重,在云南还发现该虫对香料烟为害较重(王履浙等,1999)。

美洲斑潜蝇在我国的发生具有来势猛、蔓延快、为害重、毁灭性强的特点。在此虫发现之初,海南省冬春瓜菜被害面积就达 120 万亩,造成直接经济损失约 3 亿元,仅三亚市黄瓜一项就减产 30%~50%。据 1995 年统计山东因此虫为害,损失高达 11 亿元。广东省瓜、豆类和番茄一般减产 20%~30%,估计损失 16.16 万吨。1996 年北京郊区美洲斑潜蝇全面暴发,重发区损失 30%~50%,1400 多公顷蔬菜绝收。美洲斑潜蝇的猖獗为害,对我国的蔬菜生产构成了严重威胁。

第五节 生物学特性

一、成虫羽化特性

美洲斑潜蝇成虫羽化时,借助额囊不断收缩和舒张产生的压力,突破蛹壳,蛹壳前端沿两侧纵向裂开,成虫借助于体液的压力从蛹壳中钻出,3 龄幼虫口钩遗留在蛹壳前端腹面,蛹壳上留下裂口,或裂口上半部脱落,形成半圆形脱口,整个羽化过程约几分钟至 1 小时,在羽化过程中有些成虫未能脱离蛹壳即死亡。

刚脱离蛹壳的成虫喜趋向光亮处,一般在 20min 内翅完全展开,1h 后身体完全骨化着色(Oatman *et al.*, 1958)。土中蛹羽化后成虫即钻出地面,在土表爬行,待翅完全展开和身体骨化后才飞向寄主叶片。对成虫羽化出土能力测定结果表明:成虫出土率随蛹在土中深度的增加而减少,蛹位于 1~5cm 深度时,出土率达 80%以上。当蛹位于 20~30cm 深时,只有 20%~30%的成虫可以出土。蛹深 40cm 时,成虫无法出土(王音等,1998b)。

成虫羽化多在上午完成,下午 16 时以后成虫羽化极少。温度对成虫羽化有一定影响,主要表现为羽化持续时间和高峰期有所不同(表 4-2)。

表 4-2 不同温度下美洲斑潜蝇成虫羽化规律(王音等, 1998b)

温度/℃	羽化时间	羽化高峰	不同时间段羽化的百分比/%		
			6~11 时	11~15 时	16~20 时
31	6~10 时	7~8 时	100	0	0
28	6~14 时	8~11 时	97.5	2.5	0
26.5	6~17 时	7~14 时	71.16	26.92	1.92
20	6~20 时	9~15 时	57.38	39.34	3.28

蛹期光照条件与成虫羽化有密切关系。在光暗交替条件下发育的蛹几乎全部(98.5%)在光期内羽化,而在全光照条件下发育的蛹 24h 内均可羽化。幼虫发育期的光照条件对成虫羽化无影响(Petitt *et al.*, 1991)。

二、成虫交配习性

成虫羽化当日即可交配。白天各时间段均可交配,但以上午和中午交配较多。交配时,雌、雄虫重叠,雌虫位于雄虫下方,静伏于叶面之上,双翅水平略分开,雄虫以前、中足抱握雌虫腹部,后足支撑于叶面,双翅折叠于背面正常位置,交配器官向前向下弯曲与雌虫相连,交配过程一般持续几十分钟。雌、雄虫均可多次进行交配。王音(1998b)曾在温室中观察到不同雄虫竞争交配的现象,当一对雌、雄虫正进行交配时,另一雄虫会直接爬到正在交配的两虫背上,迫使原雄虫与雌虫中止交配,离开雌虫,闯入者随即继续与雌虫进行交配。美洲斑潜蝇雌、雄虫多次交配的现象可能有利于其产生最大卵量(Oatman and Michelbacher, 1958)。

三、成虫取食产卵习性

成虫通过雌虫产卵器在寄主植物叶面上形成的刻点进行取食。首先,成虫在叶面上不停地爬动,不时将腹部弯向叶面刺探,选定刺伤点后,将黑色产卵器伸出弯曲向下,接触叶表皮后,如钻头般旋转插进,然后身体前半部分左右摇摆,带动产卵器摇摆,使刺伤点扩大,或产卵器进一步向后刺入,产卵。拔出产卵器,虫体后退,喙伸出通过刺伤口进行取食(如图 4-4 所示)。形成刺伤点的过程只需几秒即可完成,然后又开始新的寻找—刺探—产卵器刺伤—(产卵)—取食活动。雌虫选取取食、产卵位点是随机的,选定位点后,往往在确定点周围小范围内连续形成多个刻点或产下几粒卵,曾在 1cm² 范围内发现 6 粒卵,卵粒之间仅相距 2~3mm。无论刻点中是否产了卵,每形成一个刺伤点,美洲斑潜蝇均后退进行取食,因而所有的刺伤点都可认为是取食孔,产卵孔只是取食孔的一种类型。雄虫不能形成取食孔,需通过雌虫形成的刺伤点进行取食。

自然条件下,美洲斑潜蝇取食、产卵活动均在白天进行,夜间不取食、不产卵。室内恒温试验发现暗周期内也有极少量取食活动,未发现产卵。温度对取食、产卵活动有显著的影响(详见后续章节)。美洲斑潜蝇成虫有正趋光性,因而取食、产卵活动表现出明显的边缘效应。

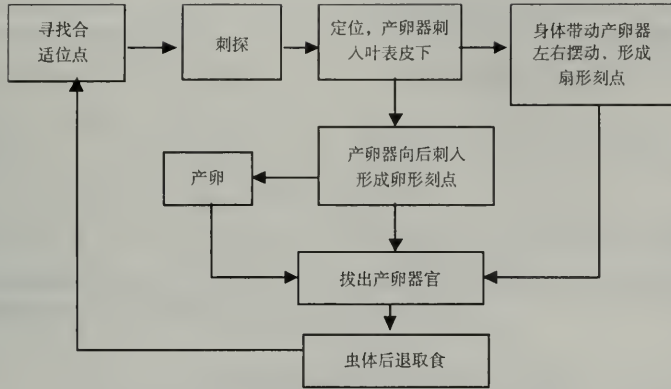


图 4-4 美洲斑潜蝇取食、产卵过程示意图

四、成虫趋黄性

美洲斑潜蝇传入我国后,雷仲仁等(1999a)开展了黄色黏性卡与美洲斑潜蝇诱捕关系的研究。主要结果如下。

(一) 黄卡在一日中的诱蝇规律

一天中,美洲斑潜蝇的趋黄高峰在 12:00~14:00 时之间,其次是 6:00~8:00 时(见表 4-3)。12:00~14:00 时温度最高,美洲斑潜蝇最活跃,所以上卡成虫最多,而第二个高峰在 6:00~8:00 时之间,这时在北京的夏季,天气逐渐转亮,温度逐渐升高,在天气逐渐转亮的过程中,唯有黄色穿透力最强,显得最亮,正好黄色是美洲斑潜蝇最喜欢的颜色,所以此时斑潜蝇只要活动就很容易上卡。此外从 18:00~20:00 时各次重复的诱蝇结果可以看出,各重复差异较大,这主要是由于天气状况不同所致,即晴天诱蝇较多,阴天诱蝇数量明显减少。这说明美洲斑潜蝇上卡的多少主要受光线和温度两个因素的影响。

表 4-3 黄卡日诱蝇规律(雷仲仁等, 1999a)

时刻	平均诱蝇数目(头/卡) $X \pm SE$	时刻	平均诱蝇数目(头/卡) $X \pm SE$
4:00~6:00	6.0±1.0 cb	12:00~14:00	13.7±2.5 a
6:00~8:00	12.7±1.2 a	14:00~16:00	6.0±2.6 cb
8:00~10:00	2.0±0.0 cd	16:00~18:00	3.7±3.2 cbd
10:00~12:00	7.7±5.0 b	18:00~20:00	0.3±0.6 d

注:表中不同字母表示在 Duncan 测试中差异显著($P < 0.05$)。

(二) 黄卡的诱集效果

无论在菜豆或黄瓜地,黄卡的设置在作物顶端时诱捕的虫量最大。高于或低于作物顶端诱集量均减少(表 4-4 和 4-5)。

表 4-4 黄卡在黄瓜田不同高度所诱美洲斑潜蝇数目比较(雷仲仁等, 1999a)

黄卡位置	平均每天诱蝇数目/(头/卡) $X \pm SD$
与植株顶端齐平	204.0±36.0 a
在株高 2/3 处	65.0±72.4 b
在株高 1/3 处	14.3±8.1 b

注:表中不同字母表示在 Duncan 测试中差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4-5 在菜豆上不同大小黄卡诱蝇效果比较(雷仲仁等, 1999a)

黄卡面积 /宽 cm×长 cm	平均每天诱蝇数目/(头/卡) $(X \pm SD)$
30×20	25.7±7.6 a
15×20	21.3±7.1 ba
8×20	14.3±1.2 bc
4×20	11.6±2.3 c
2×20	6.7±1.5 c

注:表中不同字母表示在 Duncan 测试中差异显著($P < 0.05$)。

相同面积的黄卡,放置方式的不同对诱虫数量影响很大。在菜豆上,黄卡面朝下水平放置时诱蝇效果最好,其次为筒状;而黄瓜田筒状诱蝇效果最好,黄卡水平放置面朝下次之。

黄卡大小不同,诱蝇效果也有较大差异(表 4-5)。在菜豆和黄瓜上都以面积为 30cm×20cm、15cm×20cm 的黄卡诱蝇效果最好。此外,黄卡诱捕美洲斑潜蝇有较明显的“边缘效应”,即对于筒状设置的黄卡所诱到的斑潜蝇主要集中在卡的上、下边缘。

(三) 黄卡设置密度影响诱集效果

在同一虫口密度下,黄卡总诱捕率随黄卡密度的增大而增加十分明显(表 4-6),其中黄卡密度为 2 卡/m²时诱捕率最高,约是黄卡密度为 0.25 卡/m²和 1 卡/m²时的 1.5 倍和 4 倍。但黄卡平均诱捕率却随黄卡密度的增大而减小(表 4-7)。黄卡密度与总诱捕率正相关(相关系数 $r = 0.828^{**}$),而与平均诱捕率负相关($r = -0.651^{**}$)。

表 4-6 黄卡密度、虫口密度与总诱捕率之间的关系(雷仲仁等, 1999a)

虫口密度/(头/m ²)	总诱捕率/%		
	0.25 卡/m ²	1 卡/m ²	2 卡/m ²
125	9.46	26.08	37.4
62.5	5.38	14.44	24.56
12.5	7.74	14.08	20.32

表 4-7 黄卡平均诱捕率(雷仲仁等, 1999a)

黄卡密度/(卡/m ²)	每卡平均诱捕率/%		
	125 头/m ²	62.5 头/m ²	12.5 头/m ²
0.25	4.73±1.45 a	2.69±0.47 a	3.87±1.29 a
1	3.27±0.17 b	1.81±0.04 b	1.77±0.27 b
2	2.34±0.08 b	1.54±0.05 b	1.27±0.21 b

注:表中不同字母表示在 Duncan 测试中差异显著($P < 0.05$)。

黄卡密度一定时,当虫口密度为 125 头/m²时诱捕率较高,随虫口密度的降低,诱捕率逐渐降低。

黄卡平均诱捕率(Z)与虫口密度(X)和黄卡密度(Y)的二元二次回归关系式为 $Z = 4.469 - 0.025X - 3.004Y + 0.806Y^2$ ($r = 0.7605^{**}$)。而黄卡总诱捕率(Z)与虫口密度(X)和黄卡密度(Y)均正相关, 其二元二次回归关系式为 $Z = 5.858 - 0.159X + 12.721Y + 0.001X^2 + 0.076XY - 2.86Y^2$ ($r = 0.9389^{**}$)。

在诱捕率试验中, 共释放成虫 2650 头, 有 40.3% 的成虫被黄卡诱捕, 其中雌虫占释放虫数的 13.9%, 雄虫则占 26.4%, 雌雄比为 0.53。

当黄卡以不同放置方式放置于自然被害的菜豆温室和黄瓜大棚中诱捕成虫, 在 8 张黄卡上粘得成虫雌/雄性比为 0.31~0.64, 平均 0.45(见表 4-8)。无论是人工释放诱捕, 还是对田间自然种群诱捕, 美洲斑潜蝇雄虫诱捕率均高于雌虫。

表 4-8 被诱捕斑潜蝇的性比(雷仲仁等, 1999a)

虫源	重复	诱虫数目	性比(雌/雄)
菜豆温室	1	215	0.41
	2	114	0.42
	3	86	0.64
	4	59	0.45
黄瓜大棚	1	816	0.35
	2	613	0.31
	3	433	0.47
	4	325	0.56

诱虫总数: 2661; 性比平均值: 0.45 ± 0.11 ; 加权平均性比: 0.41。

五、幼虫取食及脱道化蛹习性

(一) 幼虫的龄期划分及潜食行为

1 龄幼虫从卵中孵化后, 即开始取食, 用口钩不断刮食叶肉的栅栏组织, 残留上表皮, 形成蛇形潜道。新鲜虫道呈绿白色, 后逐渐变为锈褐色。解剖镜下观察, 可见幼虫口钩不停地左右摆动取食, 同时虫体内容物不断流动, 虫体随着向前蠕动, 腹末端收缩时将黑色粪便呈条形横向挤出。2 龄前粪便在虫道中呈交替排列, 十分规律, 3 龄幼虫粪便常在一侧连成线, 有时发生卷曲。

幼虫取食昼夜均可进行。随着龄期的增加, 虫道不断加粗变长。虫道初形成时平均宽 0.25mm, 幼虫老熟时虫道宽度平均达 1.5mm(Oatman and Michelbacher, 1958)。不同温度下美洲斑潜蝇幼虫取食面积没有差异, 但不同寄主间取食面积有显著差异。3 龄幼虫取食面积占总取食面积的 80%以上(曾玲等, 1998)。一些研究者对不同作物上不同龄期虫道长度进行了测量, 结果见表 4-9。

美洲斑潜蝇幼虫有 3 个龄期, 可根据口钩和头咽骨的形状及大小来判定不同的龄期(表 4-10)。1 龄、2 龄幼虫的口钩蜕皮时遗留在虫道中, 3 龄幼虫的口钩遗留在蛹壳腹面前端。幼虫发生龄期改变时, 虫道宽度和虫粪长度相应有明显变化, 在明显变化的部位, 挑开虫道上表皮, 往往可找到幼虫遗留的口钩, 因此在田间可根据虫道的长度和宽度及虫粪长度的变化来估测幼虫龄期(王音, 1998a, 1998b), 但应用时, 要因季节和不同寄主作物而做适当调整(曾玲等, 1998)。

表 4-9 各龄幼虫在不同寄主作物上取食的潜道长度(曾玲等, 1998)

寄主作物	总和/cm	1 龄/cm	2 龄/cm	3 龄/cm
豇豆	8.164±0.273	1.081±0.045	2.040±0.106	5.043±0.116
菜豆	6.445±0.092	0.911±0.016	1.685±0.073	3.849±0.196
节瓜	6.645±0.186	0.796±0.024	1.751±0.062	4.098±0.099
丝瓜	6.122±0.285	0.913±0.043	1.576±0.085	3.633±0.160
番茄	6.798±0.250	0.758±0.023	1.434±0.048	4.605±0.188
菜心	7.964±1.280	0.901±0.034	1.674±0.054	5.389±0.190
白菜	5.980±1.251	0.716±0.026	1.427±0.040	3.837±0.188

表 4-10 美洲斑潜蝇幼虫不同龄期口钩和身体的长度(Petitt, 1990)

龄期	n	平均长度(标准误)和范围/mm	
		口钩	头咽骨
1	133	0.021(0.0001) (0.015~0.025)	0.100±0.02a (0.084~0.116)
2	193	0.039 (0.0002) (0.033~0.045)	0.168±0.001b (0.156~0.179)
3	234	0.063 (0.0002) (0.053~0.068)	0.265±0.004c (0.237~0.285)

曾玲等(1998)对豇豆叶片上不同龄期幼虫的体长和头咽骨长度进行了测量, 发现不同龄期幼虫体长变异较大, 不宜作为分龄依据。

(二) 老熟幼虫脱道化蛹规律

幼虫老熟后, 在虫道末端附近咬破一半圆形切口, 通过虫体的蠕动收缩逐渐钻出虫道, 在即将脱离虫道时发生弹跳, 离开虫道, 寻找适宜化蛹场所。在温室自然变温情况下, 老熟幼虫脱道高峰为早晨 7~9 时, 脱道全部在上午完成。化蛹高峰为 7~11 时, 以 8~9 时最多。

在 31℃、28℃、25℃恒温条件下, 老熟幼虫脱道比例最高的时间段分别为 7~8 时、8~9 时和 9~10 时。上午 11 时之前 90%以上老熟幼虫完成脱道。

在光暗交替条件下, 幼虫脱道主要发生于光期开始后的 5h 之内(Petitt, 1991)。在连续光照条件下, 老熟幼虫昼夜均可脱道化蛹(见表 4-11)。

表 4-11 不同温度下老熟幼虫脱道规律(王音等, 1998b)

时间/h	31℃		28℃		25℃	
	百分比/%	累积百分比/%	百分比/%	累积百分比/%	百分比/%	累积百分比/%
6~7	21.05	21.05	15.12	15.12	0	0
7~8	33.68	54.73	20.93	36.05	3.85	3.85
8~9	14.74	69.47	46.51	82.56	10.28	14.43
9~10	14.74	84.21	16.28	98.84	51.92	66.35
10~11	8.42	92.63	1.16	100	25.00	91.35
11~14	6.32	98.95			8.65	100
14~15	1.05	100				

第六节 生态学特性

一、温度对美洲斑潜蝇发育历期和存活率的影响

不同温度条件下,美洲斑潜蝇各虫态发育历期明显不同(表 4-12)。在 14~31℃ 范围内,随温度的增加,各虫态的发育历期相应减少。14℃ 下卵平均历期为 8.46d,完成一代需 68d 左右,而 31℃ 下卵期只有 1.83d,完成一代只需 12d 左右。在北京地区,美洲斑潜蝇发生量较大的 7~8 月份平均温度为 24.7~26.1℃,每月可发生 2 代左右。

表 4-12 不同温度条件下美洲斑潜蝇各虫态的发育历期(王音等, 1998b)

温度/℃	卵期/d	幼虫期/d	蛹期/d	卵- 蛹期/d
14	8.46±1.31	18.91±1.99	41.15±2.13	68.53
17	5.21±0.22	12.31±0.81	25.85±1.02	43.37
20	3.95±0.11	7.21±0.32	15.69±0.46	26.85
25	2.61±0.11	4.28±0.14	9.05±0.27	15.93
28	1.95±0.09	3.94±0.08	7.70±0.33	13.59
31	1.83±0.08	3.21±0.38	6.87±0.04	11.91

不同温度条件下,各虫态在整个幼期中所占比例变化不大,卵期约占 12%~16%,幼虫期约占 26%~29%,蛹期约占 56%~60%。即蛹期是发育时间最长的虫态,约占整个幼期的一半时间,而害虫态幼虫期仅占 1/4~1/3。这就要求防治时应注意掌握好防治适期,才能达到事半功倍的效果。

美洲斑潜蝇各虫态存活率因温度不同而异,其中蛹期对温度变化最敏感,蛹期的存活率是决定整个未成熟期存活率的关键。25℃ 和 28℃ 条件下卵至成虫存活率最高,均在 90% 以上。当温度低至 13℃ 时,卵至成虫的存活率只有 42.0%。温度为 34℃ 时存活率为 69.3%(曾玲等, 1998)(表 4-13)。据陈艳等(1997)报道,各虫态的死亡率与温度之间呈二次曲线相关。

表 4-13 不同温度下美洲斑潜蝇各虫期存活率(%)(曾玲等, 1998)

虫期	温度/℃								
	34	31	28	25	22	19	16	13	
卵	0.936ab	0.949ab	0.974ab	0.981a	0.962ab	0.954ab	0.927b	0.818c	
幼虫	1+2 龄	0.982a	1.000a	1.000a	1.000a	1.000a	0.990a	0.982a	0.865b
	3 龄	0.983ab	0.980ab	0.987ab	0.985ab	0.982ab	0.986ab	0.994a	0.935b
蛹	0.767c	0.946a	0.968a	0.954a	0.930a	0.890b	0.848b	0.568d	
卵至成虫	0.693	0.880	0.931	0.922	0.879	0.829	0.767	0.420	

高温(35℃ 以上)不利于美洲斑潜蝇存活,尤其对幼虫存活和化蛹影响较大。36℃ 下 1~2 龄幼虫死亡率明显高于 25~26℃ 下,化蛹率也大大降低。高温对卵孵化影响较小,可能是由于周围空气温度与叶片温度存在差异造成的。Leibee (1985)研究温度对三叶斑潜蝇发育的影响时也发现了类似的现象。高温下 1~2 龄幼虫死亡率明显增加,可能与幼虫潜食叶片

形成虫道后使叶片结构遭到破坏,叶片蒸发性冷却能力降低,不足以补偿周围空气温度,于是叶片温度开始上升有关。36℃高温下化蛹率大大低于适温条件(25~26℃),原因在于美洲斑潜蝇化蛹前需有一段时间暴露于空气温度中,高温易使之发生脱水死亡。

王音等(1998b)对美洲斑潜蝇成虫的耐高温能力进行了测定,发现成虫有较强的耐高温能力。在 37℃恒温下成虫死亡高峰在 9h 前后,即使在 40℃高温下,经过 6h 后仍有 50%的成虫能够存活。43℃恒温下成虫绝大多数在 2h 内死亡。在田间自然状况下,环境温度很少能持续 40℃ 以上高温 8~9 h,根据作者观察测量,夏天温室内温度最高可达 45℃,40℃ 以上高温约持续 2h 左右。加之美洲斑潜蝇在自然生存状态下与寄主植物相伴,在高温时,常躲在叶片背面,其所处微环境温度大大低于气温,这种对高温的化解方式使美洲斑潜蝇忍受高气温的能力进一步增强。

二、温湿度对蛹羽化率的影响

蛹期是美洲斑潜蝇在叶片外生活阶段,因而更易受到环境因素的影响。王音等(1998b)的研究表明,温度、湿度及温湿度综合因素对蛹羽化均有极显著影响(表 4-14)。蛹羽化率与温度之间存在负相关关系,与湿度呈正相关。

表 4-14 不同温湿度条件对美洲斑潜蝇羽化率的影响(王音等, 1998b)

温度/℃	相对湿度%	蛹羽化率%	温度/℃	相对湿度%	蛹羽化率%	温度/℃	相对湿度%	蛹羽化率%
28	10	29.20 e	33	10	0.13 f	36	10	0.00 f
	30	42.24 cd		30	0.00 f		30	0.00 f
	50	52.24 bc		50	40.16 de		50	0.28 f
	70	61.91 b		70	40.98 cd		70	32.02 de
	90	72.56 a		90	74.82 a		90	38.48 de
	100	80.20 a		100	79.80 a		100	43.60 cd

注:表中英文字母不同者表示有显著差异($P < 0.05$)。

28℃、33℃与 90%~100%组合中美洲斑潜蝇蛹羽化率最高,为 70%~80%,当温度升高或湿度降低时,蛹羽化率均有不同程度下降。高温低湿组合最不利于蛹的羽化,即低湿度可加剧高温对蛹羽化的抑制作用。蛹羽化率(Y)与温度(X_1)和湿度(X_2)因子的二元二次回归关系式为:

$$Y = -48.247 + 9.195X_1 - 0.649X_2 - 0.231X_1^2 + 0.033X_1X_2 + 0.001X_2^2 \quad (r = 0.9219^{**})$$

三、各虫态的发育起点温度和有效积温

在恒温条件下矮生菜豆上美洲斑潜蝇卵的发育起点温度为 9.47℃,完成发育所需积温最少。蛹发育起点为 10.96℃,完成发育所需积温也最多。完成一个世代的有效积温为 241.07DD,发育起点温度为 10.74℃(表 4-15),根据北京市气象台 1987~1996 年十年月平均温度资料,按有效积温推算出北京地区全年可发生 8~9 代(8.76 代),年度之间因气温不同可能发生世代数变化(王音等, 1998b)。

表 4-15 美洲斑潜蝇各虫态发育起点温度与有效积温(王音等, 1998b)

虫态	发育起点温度/°C	有效积温/DD	发育率与温度回归关系式
卵	9.47	39.20	$V = 0.02551T - 0.24162$
幼虫	10.81	65.97	$V = 0.015167T - 0.16391$
蛹	10.96	136.40	$V = 0.007337T - 0.08039$
整个发育期	10.74	241.07	$V = 0.004157T - 0.04455$

四、温度对美洲蝇成虫取食产卵的影响

温度对美洲蝇成虫取食产卵的影响见表 4-16。

表 4-16 不同温度条件下产卵与取食比率(王音等, 1998b)

温度/°C	平均每雌—生产卵孔与取食孔比率	平均每雌每日产卵孔与取食孔比率
16.5	0.10±0.06 bB	0.14±0.08 bBC
21.5	0.17±0.05 aA	0.19±0.05 aAB
26.5	0.19±0.03 aA	0.21±0.04 aA
31.5	0.11±0.06 bB	0.12±0.07 bC
36.5	0.04±0.05 cC	0.05±0.06 cD

不同温度条件下, 美洲斑潜蝇一生取食产卵呈现出不同的规律(图 4-5)。

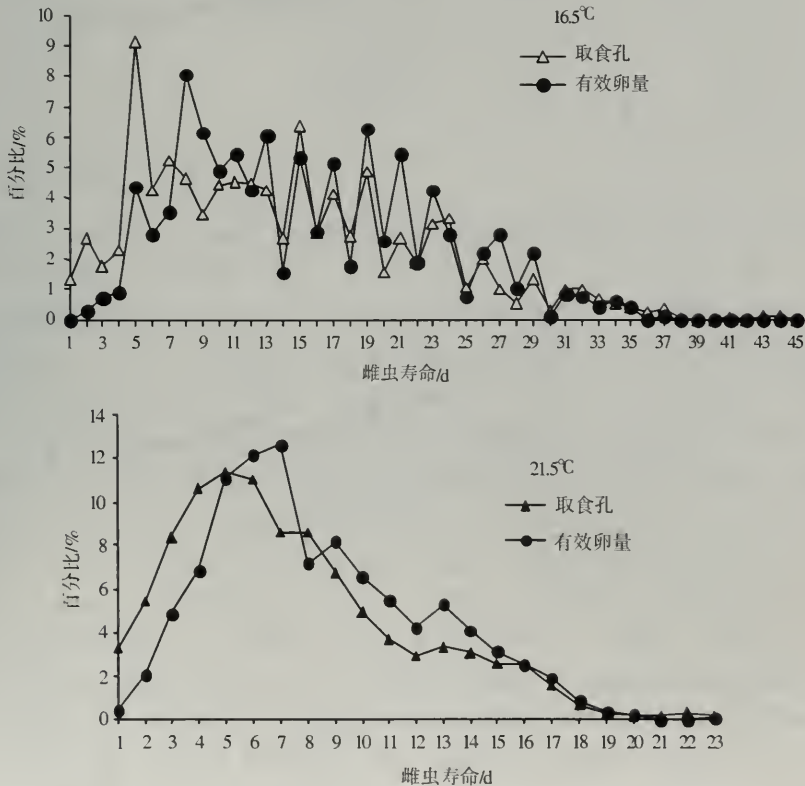


图 4-5 不同温度条件下美洲斑潜蝇成虫取食、产卵规律

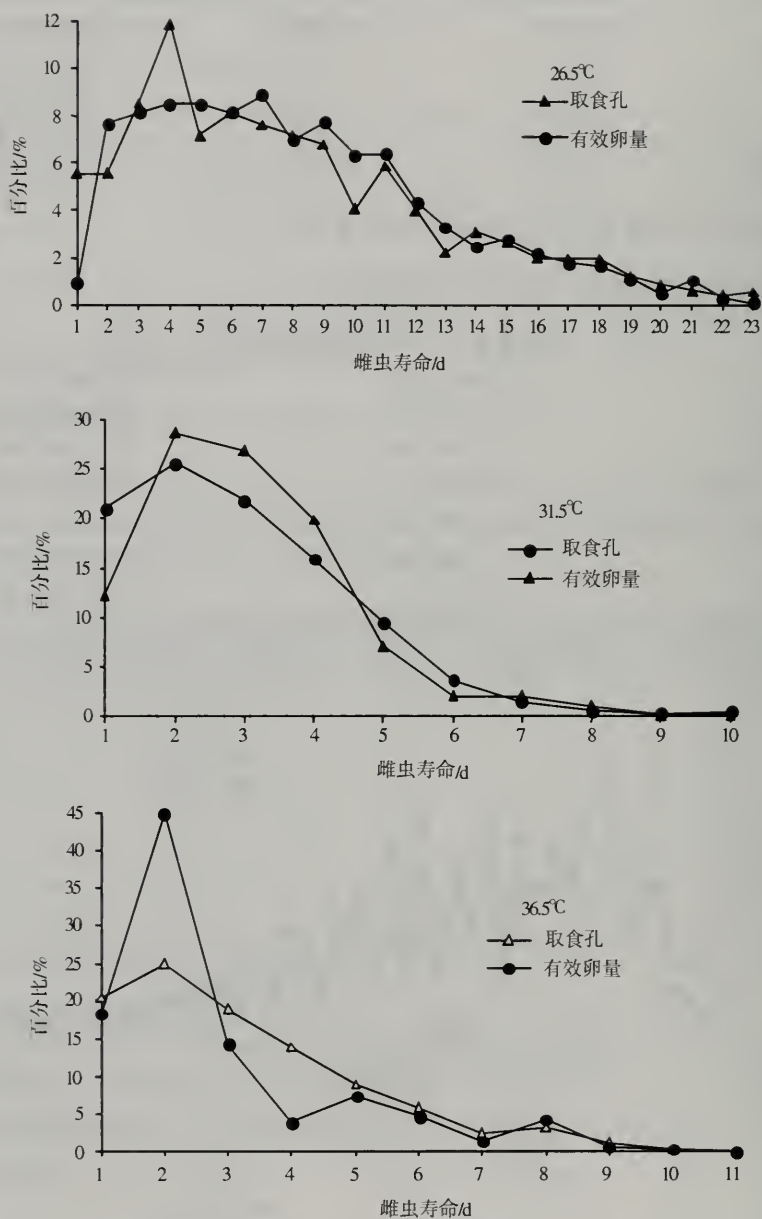


图 4-5(续)

16.5℃下取食、产卵在 5~23d 较为活跃，但日产卵量小，表现为卵期长，卵量少的特点。21.5℃和 26.5℃下取食、产卵高峰分别为 4~9d 和 2~11d，表现为产卵高峰期较长，产卵量大的特点。31.5℃下产卵、取食高峰集中于 2~4d。36.5℃产卵、取食高峰出现在第 2 天，其产卵量占总产卵量的 45%左右，第 3 天猛降至 14.29%，之后降至 10%以下，且总卵量少。

每雌总产卵量与温度(16.5℃，21.5℃，26.5℃)之间的关系可用回归式

$Y = 44.610X - 703.34$ (F 值 = 81.834, $P < 0.01$, $df = 41$, $r^2 = 0.6717$) 表示, 当 $Y = 0$ 时, 解出 $X = 15.77^\circ\text{C}$, 此为理论上的产卵阈值温度。在较高温度下(31.5°C , 36.5°C), 产卵量下降, 两者之间变为非线性关系。

将每日累积产卵百分比与各温度的累积日度数据用 Marquardt 最小二乘方法拟合标准生长曲线, 拟合结果为 $Y = 110.1[1 - \exp(-0.004339X)]$ ($r^2 = 0.9143$, $P < 0.01$)。

不同温度条件下, 美洲斑潜蝇雌虫寿命明显不同。在 16.5°C 下雌虫寿命平均为 26.67d, 单雌最长寿命达 45d, 显著长于 21.5°C 和 26.5°C 下的 13~15d。高温下(31.5°C 和 36.5°C)雌虫寿命明显缩短至 4~5d(王音等, 1998b)。

不同温度条件下, 美洲斑潜蝇雌虫寿命明显不同。王音等(1998b)研究结果表明, 在较低温度下雌虫寿命较长, 高温下雌虫寿命明显缩短。在 16.5°C 下雌虫寿命平均为 26.67d, 单雌最长寿命达 45d, 显著长于 21.5°C 和 26.5°C 下的 13~15d。高温下(31.5°C 和 36.5°C)雌虫寿命明显缩短至 4~5d(表 4-17)。

表 4-17 不同温度条件下雌虫寿命(王音等, 1998b)

温度/ $^\circ\text{C}$	雌虫平均寿命/d	雌虫寿命范围/d
16.5	26.67 \pm 10.06aA	10~45
21.5	13.27 \pm 4.74bB	7~23
26.5	14.50 \pm 5.33bB	7~22
31.5	4.28 \pm 2.12cC	2~10
36.5	5.38 \pm 2.62cC	2~11

五、实验种群生命表

王音等(1999)组建了 4 种不同温度下美洲斑潜蝇实验种群生殖力表, 并计算出相应的种群生命表参数。

美洲斑潜蝇实验种群的净生殖力和内禀增长率均在 26.5°C 时最高, 说明 26.5°C 是美洲斑潜蝇发育、存活、繁殖的最适温度。同时这些参数还反映出美洲斑潜蝇是一种具有极高繁殖潜能的昆虫。在适温 26.5°C 下经过一个世代其种群可增加 161 倍, 实验种群理论上将逐日以 1.27 倍的速率不断作几何级数增长, 世代平均周期为 20.99d, 种群加倍时间为 2.86d。温度升高或降低对种群增长均有不同程度影响, 就净生殖力而言, $21.5^\circ\text{C} > 31.5^\circ\text{C} > 16.5^\circ\text{C}$, 而就内禀增长率而言, $31.5^\circ\text{C} > 21.5^\circ\text{C} > 16.5^\circ\text{C}$ 。 16.5°C 下内禀增长率只有 0.0421, 种群加倍时间长达 16.46d。各温度的稳定年龄组配中, 成虫所占比例均小于 7%, 非成熟期占 93%以上, 说明美洲斑潜蝇在试验温度条件下, 种群处于增长状态。

曾玲等(1998)研究结果表明, 在 31°C 和 28°C 条件下美洲斑潜蝇实验种群的种群趋势指数最大, 分别为 54.11 和 51.42, 其他由大至小依次为 25°C 、 34°C 、 22°C 、 19°C 及 16°C 。 13°C 下种群趋势指数很低, 仅为 0.52(表 4-18)。种群趋势指数(Y_1)与温度(T)之间关系可用 $Y_1 = 5332.2 - 77.73T + 3.626T^2 - 0.052T^3$ 表示。

表 4-18 美洲斑潜蝇在不同温度下实验种群生命表(曾玲等, 1998)

虫期	作用因子	不同温度下各作用因子存活率(s)							
		34℃	31℃	28℃	25℃	22℃	19℃	16℃	13℃
卵	温度	0.936	0.949	0.974	0.981	0.962	0.954	0.927	0.818
幼虫	温度	0.965	0.980	0.987	0.985	0.982	0.976	0.976	0.809
蛹	温度	0.767	0.946	0.968	0.954	0.930	0.890	0.848	0.676
成虫	雌性概率	0.476	0.496	0.492	0.490	0.476	0.502	0.516	0.520
	标准卵量	400	400	400	400	400	400	400	400
	达标准卵量概率	0.419	0.625	0.494	0.414	0.284	0.103	0.035	0.011
种群趋势指数		26.32	54.11	44.53	36.65	22.61	9.14	2.84	0.50

六、越冬与耐寒

美洲斑潜蝇蛹的过冷却点为 $-9.96 \pm 0.69^\circ\text{C}$ ，结冰点为 $-9.06 \pm 0.75^\circ\text{C}$ 。秋季蛹过冷却点和结冰点略低于夏季蛹，但两者在统计学上无显著差异。不同发育阶段的蛹过冷却点和结冰点存在差异(表 4-19)，发育末期蛹的过冷却点和结冰点显著高于发育初、中期蛹的过冷却点和结冰点，两者相差约 1°C 。说明处于发育初、中期的蛹抗寒能力强于发育末期蛹，蛹接近羽化时，耐寒能力有所下降(王音等, 2000b)。

表 4-19 美洲斑潜蝇不同发育阶段蛹的过冷却点和结冰点(王音等, 1998b)

蛹发育时期	过冷却点/℃	结冰点/℃
发育初期	-10.65 ± 0.73 bB	-9.46 ± 0.63 bAB
发育中期	-10.65 ± 0.63 bB	-9.66 ± 0.46 bB
发育末期	-9.50 ± 0.82 aA	-8.78 ± 0.90 aA

不同发育时期的蛹在相同低温条件下耐寒能力不同，在 -15°C 低温下，随着蛹日龄的增大，其 LT_{50} 有减少的趋势，1d 期蛹对低温的耐受力最强， LT_{50} 和 LT_{95} 明显高于其他蛹期。同一发育时期的蛹在不同低温条件其耐受性也不相同，3 日龄蛹在接近其过冷却点的 -10°C 条件下，致死中时为 42.19h，而在低于过冷却点的 -15°C 下， LT_{50} 骤然降至 0.14h，即当环境温度低于昆虫的过冷却点时，极易引起昆虫迅速死亡。 0°C 下蛹 LT_{50} 为 5~6d(132.24h)，而在 $4\sim 8^\circ\text{C}$ 条件下 50%的蛹能存活 18d (432.72h) (表 4-20)。

表 4-20 美洲斑潜蝇蛹在低温条件下死亡率回归方程(王音等, 1998b)

温度/℃	蛹期/d*	回归方程	LT_{50} /h	LT_{95} /h
-15°C	1	$Y = 2.9042 + 1.4471X$	0.46	6.4
	3	$Y = 2.1603 + 3.0487X$	0.14	0.49
	5	$Y = 2.9089 + 2.8580X$	0.09	0.33
	7	$Y = 3.4418 + 2.0036X$	0.10	0.66
-10°C	3	$Y = -6.9430 + 7.3485X$	42.19	70.64
0°C	3	$Y = 2.9916 + 2.7103X$	132.24	534.72
$4\sim 8^\circ\text{C}$	3	$Y = 0.1403 + 3.8689X$	432.72	1152.00

* 蛹期指 25°C 下发育的天数。

采用笼罩法和埋蛹法进行越冬模拟试验表明：美洲斑潜蝇在北京地区田间自然条件下不能越冬，黄卡监测结果证实其越冬的主要场所为保护地。

越冬与耐寒性研究结果均表明，美洲斑潜蝇是一种耐寒性较弱的昆虫，在北方地区田间不能越冬。

七、寄主植物对美洲斑潜蝇发生的影响

在长期的协同进化过程中，昆虫与植物形成了相对稳定的关系，一些植物成为昆虫的寄主，而另一些则不适于某种昆虫取食。寄主植物是昆虫的食物来源，因而与昆虫的生长发育有密切的关系。就美洲斑潜蝇而言，成虫的取食选择决定了成虫生活力，表现为产卵能力和寿命，而成虫的产卵选择则决定了幼虫的生存环境和食物条件，从而影响到幼虫的生命参数。

(一) 寄主植物对美洲斑潜蝇各虫态发育历期的影响

张桂芬等(1998)对美洲斑潜蝇在不同寄主植物上各虫态历期进行了系统研究，发现美洲斑潜蝇卵的发育不受寄主植物种类的影响，而不同寄主植物对幼虫和蛹的历期及成虫寿命均有显著影响。在白菜上幼虫发育历期最长(4.09d)，在架芸豆、西葫芦、菜豆和番茄上幼虫发育历期较短(2.78~2.65d)。而蛹期则以在黄瓜上最长，为 8.85d，西葫芦、番茄、地芸豆和白菜上较短，为(7.51~7.29d)。茄子上的成虫寿命最长为 10.23d，番茄上成虫寿命只有 4.07d(表 4-21~表 4-23)。

表 4-21 不同寄主植物上美洲斑潜蝇幼虫发育历期(张桂芬等, 1998) (单位: d)

项目	白菜	地芸豆	茄子	倭瓜	架芸豆	西葫芦	菜豆	番茄
R1	4.00	3.86	3.25	3.15	2.77	2.76	2.50	2.50
R2	3.98	3.71	3.48	3.50	3.00	2.89	2.57	2.75
R3	4.25	3.88	3.38	3.00	2.79	2.67	2.89	2.77
R4	4.13	3.45	3.13	3.25	2.57	2.56	2.75	2.58
平均	4.09A	3.73B	3.31C	3.23C	2.78D	2.72D	2.68D	2.65D

注：幼虫发育期间温度为 25~27℃。

表 4-22 不同寄主植物上美洲斑潜蝇蛹发育历期(张桂芬等, 1998) (单位: d)

项目	黄瓜	架芸豆	茄子	菜豆	倭瓜	西葫芦	番茄	地芸豆	白菜
R1	8.50	8.50	8.20	7.89	7.83	7.31	7.50	7.36	7.50
R2	8.79	8.33	8.42	7.90	7.50	7.38	7.25	7.35	7.31
R3	9.00	8.75	8.20	7.99	7.67	7.83	7.38	7.37	7.27
R4	8.91	8.20	8.62	7.77	7.30	7.50	7.75	7.40	7.08
平均	8.85aA	8.45bB	8.36bB	7.89cC	7.58dCD	7.51dD	7.47dD	7.37dD	7.29dD

注：蛹发育期间温度为 26.88~29.10℃。

表 4-23 不同寄主植物上美洲斑潜蝇成虫寿命(张桂芬等, 1998) (单位: d)

项目	茄子	倭瓜	地芸豆	西葫芦	番茄
R1	10.00	7.58	6.40	5.60	4.00
R2	10.58	7.25	6.50	5.78	4.25
R3	10.50	7.50	7.00	6.00	3.88
R4	9.85	7.83	6.86	5.98	4.13
平均	10.23A	7.54B	6.69C	5.84D	4.07E

注: 成虫发育期间温度为 24.39~28.00℃。

(二) 美洲斑潜蝇对不同寄主种类的选择性

美洲斑潜蝇幼虫不能在寄主植物之间进行迁移, 因而选择寄主植物是由成虫来完成的, 成虫通过在寄主上产卵而确定了幼虫的生活环境。美洲斑潜蝇虽是一多食性种类, 但对不同的寄主植物嗜好程度不同。在美国美洲斑潜蝇主要为害温室和田间番茄、黄瓜、甜瓜等蔬菜 (York, 1988)。美洲斑潜蝇对不同寄主的嗜好程度为豆科>葫芦科>茄科>十字花科和叶菜类。有报道表明, 美洲斑潜蝇最喜食菜豆, 其次是黄瓜和豇豆, 再次是西葫芦、冬瓜、丝瓜、番茄、茄子、油菜等, 对青椒、辣椒、葫芦和苦瓜不选择。

(三) 寄主作物不同品种对美洲斑潜蝇的敏感性

一些作物虽为美洲斑潜蝇喜食寄主, 但不同品种对美洲斑潜蝇敏感程度不同, Kennedy 等(1978)对 50 个来自世界各地的香瓜品种抗美洲斑潜蝇能力进行了测定, 结果发现来自非洲的 PI282448 抗性是由隐性基因控制, PI313970 抗性是由部分显性基因所控制。而来自中亚和东亚的品种普遍表现为对美洲斑潜蝇最敏感, 其中包括中国的 12 个栽培品种。美国栽培品种也属感虫品种。菜豆不同品种对美洲斑潜蝇敏感性也存在差异, Eagle 与 Nemasnap 是美国两个菜豆品种, Hanna 等(1987)报道 Eagle 品种上美洲斑潜蝇明显少于 Nemasnap。我们对当前生产上常用的矮生菜豆品种 4 个、架豆品种 3 个、豇豆品种 2 个及番茄品种 4 个进行了产卵选择试验。结果表明, 美洲斑潜蝇对矮生菜豆“推广者”及架豆“绿龙”最为嗜好。番茄品种中, 美洲斑潜蝇对“中蔬 5 号”最为嗜好, 取食量和产卵量均最高, 其他依次为“西安早魁”、“中蔬 4 号”和“强丰”, “强丰”相对较抗虫。“津杂 1 号”、“津杂 4 号”黄瓜、“双抗”、“毛粉 802”茸毛植株番茄、特长架豆、“保丰”菜豆和“之豇 82-2”豇豆抗虫性较强, 田间虫口密度显著低于同期的其他品种。

八、美洲斑潜蝇种内竞争

当寄主植物上美洲斑潜蝇种群密度过高时, 由于可利用的食物资源有限, 就会发生种内竞争, 竞争的结果使美洲斑潜蝇生存质量受到一定影响(Petitt *et al.*, 1992)。美洲斑潜蝇 1 龄、2 龄幼虫存在自残现象, 这属于干涉性竞争。当棉豆(*Phaseolus lunatus* L.)上 1 龄幼虫密度高于 1 头/cm²时, 由幼虫自残引起的死亡率显著增加。老熟幼虫体重及幼虫存活率也与幼虫密度有关。幼虫存活率随 1 龄幼虫密度的增加而降低, 当幼虫密度小

于 1 头/cm² 时, 幼虫生存率均在 90% 以上, 但幼虫密度增加为 2.63 头/cm² 时, 幼虫存活率只有 32%, 这是由于幼虫密度过高时, 不但自残现象增加, 而且幼虫常会因叶片某一区域快速失水干燥而被困住, 导致死亡率上升。1 龄幼虫密度还影响老熟幼虫体重, 当 1 龄幼虫密度由 0.3 头/cm² 增至 2.8 头/cm² 时, 脱叶幼虫平均体重由 654±16μg 降至 414±13μg, 减少了 37%。原因在于当幼虫密度大于 1 头/cm² 时, 栅栏组织已无法满足其需要, 一些 3 龄幼虫会离开栅栏组织进入海绵组织中取食, 而对美洲斑潜蝇而言, 海绵组织并非是美洲斑潜蝇最适宜的食物。陈艳等(1998)研究报道, 美洲斑潜蝇卵期不存在密度效应, 但幼虫期存在密度效应。在豇豆上, 当每叶幼虫数低于 7 头时, 幼虫期死亡率与 1 龄幼虫密度无关, 每叶虫数超过 7 头时, 死亡率急剧增加, 幼虫密度与死亡率之间的关系为 $Y = 4.13 + 2.2029X (r = 0.9926^{**})$ 。预蛹重、成虫性比、成虫寿命及产卵量也受到幼虫密度的影响。当 1 龄幼虫密度大于 7 头/cm² 时, 雌性比随幼虫密度的升高而下降, 预蛹重、成虫寿命将差异均极显著。1 龄幼虫密度低于 7 头/cm² 的产卵量与幼虫密度超过 7 头/cm² 的产卵量间有极显著差异(表 4-24)。

表 4-24 幼虫密度对预蛹重、性比、成虫寿命及产卵量的影响(陈艳等, 1998)

虫口密度/(头/cm ²)	预蛹/mg	性比	成虫寿命/d	产卵量/(粒/雌)
1	0.59Aa	50.09	22.8AB	108.1BCDa
3	0.58ABa	50.05	22.6ABCD	112.1AB
5	0.57ABCa	50.08	23.5A	114.9A
7	0.56ABCDb	50.10	22.7ABC	109.2BC
9	0.48Ec	48.52	15.6E	104.7Db
11	0.38Fc	47.38	13.4F	104.7DEb
13	0.33Gc	46.37	12.8FG	94.7F
15	0.28Hc	44.08	10.4Ha	73.6G
17	0.25Ic	38.25	10.3HIa	56.1H
19	0.20Jc	37.42	8.2IJb	49.4I
21	0.18Jc	34.09	6.9Jb	49.0I

九、耕作栽培管理制度对美洲斑潜蝇种群的影响

由于美洲斑潜蝇种群受到寄主植物、气候条件、天敌寄生、药剂防治等多种环境因素的影响, 通过人为措施改变其发生的环境条件即可有效抑制发生数量。如调整播种期, 对作物进行合理布局、合理轮作、农药的合理使用等。美国印第安那州自 1980 年以来, 对现行耕作栽培制度进行了改进, 由原来从美国南部州引进幼苗移栽改为直接播种或自育苗移植, 推迟了美洲斑潜蝇的发生期与发生量。另外认真选择药剂种类, 尽量施用低毒农药, 根据实际虫情用药而不是按习惯用药, 大大减少了用药频率。通过这一系列的措施有效地减轻了美洲斑潜蝇的危害(York, 1988)。田间是否连续存在敏感寄主也是影响到美洲斑潜蝇种群数量的关键因素之一, 若田间连续种植美洲斑潜蝇嗜好的寄主作物, 则十分有利于其种群繁殖。采取与美洲斑潜蝇不喜食作物轮作的方法, 恶化了其生存条件, 可达到抑制美洲斑潜蝇种群的目的。有报道表明在美洲斑潜蝇夏秋发生较严重地区, 将冬季日光温室黄瓜、番茄和冬瓜生产改为生产韭菜、甘蓝和菠菜等美洲斑潜蝇不敏感

作物，第二年春季恢复种植黄瓜、番茄、冬瓜、西葫芦等，明显减少了田间虫量。

十、空间分布特点和种群动态规律

在寄主植物不同层面上，美洲斑潜蝇分布是不均匀的。Hanna 等(1987)报道菜豆植株的上、中、下部叶片上美洲斑潜蝇密度之间存在显著差异，下部叶片虫口密度最高，上部虫口密度最低。在豇豆上，自心叶起 0~50cm 卵密度最高，活幼虫密度则以 50~150cm 取样段为最高，而在 150~200cm、200~250cm 取样段死亡幼虫密度较高。

美洲斑潜蝇种群消长与地区、季节、寄主等多种因素有关。Chandler(1984)报道，美洲斑潜蝇幼虫种群消长及为害程度与青椒生长阶段有关。从苗期到开花期，美洲斑潜蝇种群数量维持低水平。子叶期虽然害虫密度不高，但由于可供取食产卵的叶片少，此时为害也对作物影响较大，子叶期过后至开花前这段时间，作物生长十分旺盛，补偿能力很强，对害虫的为害耐受性强，美洲斑潜蝇为害对青椒影响不大。从开花期开始，种群数量持续上升，直至成熟、收获期一直处于较高水平。对作物的为害也随之增加，一般接近收获时为害最重。此时的严重为害会导致青椒落叶严重及病菌的侵入。王音等(1998a)采用黄卡诱集成虫监测美洲斑潜蝇种群发生动态，结果(图 4-6)表明，在北京地区美洲斑潜蝇 6 月初始见，7 月上旬之前虫量很少，主要发生期是 7 月上旬~10 月上旬，虫口峰值出现在 8 月中旬。7 月中旬~9 月底，美洲斑潜蝇占潜蝇总虫量的 50%~100%，是这一时期蔬菜潜叶蝇的优势种。在美洲斑潜蝇主要发生期内，田间寄主作物以黄瓜、豇豆、架豆、白菜为主，可见明显被害状。10 月上旬以后，随着嗜食寄主作物的逐渐减少，气候转凉，美洲斑潜蝇虫量逐渐下降，11 月 10 日后未再诱到成虫。温室内美洲斑潜蝇一年四季均可发生，但冬季由于温度低，发育十分缓慢，虫口数量极低。春、秋季温室的环境温度高于同期田间温度，美洲斑潜蝇种群增长快于田间，因而具有春季发生早，虫口上升快，秋季发生持续时间长、虫口密度高的特点。

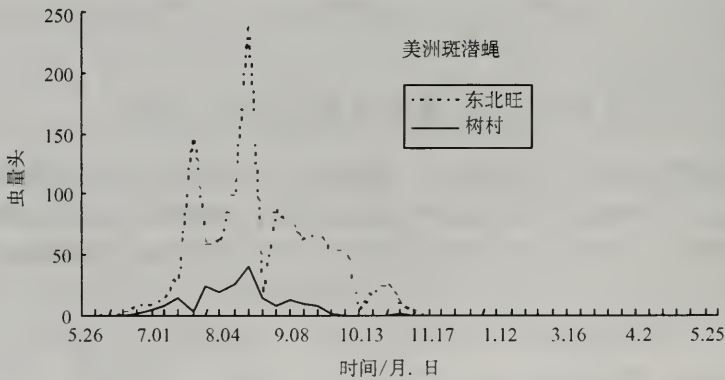


图 4-6 露地美洲斑潜蝇种群消长曲线

第七节 风险分析与监测预警系统

有关斑潜蝇的风险分析，国内研究报道很少，多数仅宏观地预测该虫可能对农业生

产造成的危害和损失。

有关斑潜蝇的预测预报国内外研究较多，主要是根据斑潜蝇成虫的趋黄性和幼虫的化蛹习性用黄卡(板)或蛹盘进行预测。

北京斑潜蝇攻关协作组(1999年)研制了美洲斑潜蝇的人工智能调查测报及决策系统；提出了“智能链”概念并成功地构建了人工神经网络(ANN)和专家系统(ES)有机结合的人工神经网络调查、预测专家系统。通过验证，准确率可达85%以上。

第八节 预防、根除与控制

斑潜蝇虫体小，繁殖力强，寄主广，为害严重，并且易产生抗药性。防治策略上要以加强检疫严防扩散，改进耕作栽培技术等农业防治措施和保护利用寄生蜂等为主，辅之以化学防治并注重抗性治理，实施持续综合治理。

一、植物检疫

依附于寄主植物远距离传播扩散是斑潜蝇传播的主要途径。虽然美洲斑潜蝇和南美斑潜蝇已广泛分布于我国大部分省市，但有的地区还没有发现南美斑潜蝇的为害，此外，另一种危险性检疫害虫——三叶草斑潜蝇 *L. trifolii* (Burgess)已在台湾和日本发生为害，很容易传入我国大陆。因此，实施严格的对外对内检疫是防止传入和控制检疫性斑潜蝇传播蔓延的重要措施。

二、农业防治

(一) 休闲与轮作

根据美洲斑潜蝇主要喜好豆类、瓜类和番茄等作物，而对青椒、辣椒、苦瓜、油菜、小麦、玉米，水稻等作物选择性很差或不为害等特点，对其进行轮作倒茬和休闲，可明显压低虫口，不用喷药防治。在北京根据美洲斑潜蝇在露地不能越冬的特点，将夏季发生较重的棚室，冬季改种韭菜、甘蓝、菠菜等耐寒蔬菜，第二年春季恢复种植黄瓜、番茄、冬瓜、西葫芦等果菜。另外，冬季休闲并冷冻棚室，也可冻死残存虫蛹，显著降低虫口密度。云南3种不同轮作方式的比较表明：前茬为水稻，后茬为蚕豆时，蚕豆上南美斑潜蝇的百株虫量为30头，无枯叶台率；而前茬为蔬菜后种蚕豆，其蚕豆上百株虫量为210头，枯叶率为36.2%，两者有明显差别。

(二) 种植隔离带或诱集作物

根据斑潜蝇对不同作物的喜好性差异，利用不选择寄主作为隔离带或种植喜好作物作为诱集区进行集中防治。如云南把小麦、大麦种植在虫源地(蔬菜)与大田蚕豆之间，以便阻隔南美斑潜蝇从蔬菜地直接传到蚕豆地，压低虫口，减少危害。结果表明，在苗期、盛花期和收获期调查，其百株虫量、危害叶台率和枯叶率，隔离区均明显低于无隔离区，而且在蚕豆苗期，斑潜蝇发生明显晚于无隔离区，危害株率在隔离区为32.3%，无隔离区为94.2%。另外，牛皮菜是南美斑潜蝇最喜好的寄主之一，农民常作为猪饲料种植在

田边、地头。所以，用此作为诱集作物来保护主栽商品蔬菜防效也很明显。可在牛皮菜叶片上出现虫道后及时采摘带虫叶片喂猪或集中喷药防治。在北京日光温室中的菜豆与西葫芦、番茄、茄子按 1/15~1/10 间作，以诱集美洲斑潜蝇进行集中防治，3 种处理明显降低了斑潜蝇的为害，其相对防效为 77.8%~100%，特别是以不太嗜食寄主(茄子)和嗜食寄主(菜豆)间套防效最好。可明显降低主栽蔬菜上的虫口密度，减少对诱集作物的喷药次数。

(三) 深翻浇水灭虫

斑潜蝇幼虫老熟后大部分钻出叶片掉落土中，并在 2cm 以内的表土层中化蛹。根据对斑潜蝇羽化出土能力的研究(王音等, 1998b)，发现在 30cm 深时，只有 19.6%的蛹可羽化出土，在 40cm 以下均不能出土羽化。所以结合耕翻土地可有效地消灭土中活蛹和残枝落叶上的活虫；同时也可对带虫枝叶采取挖沟深埋处理，均可消灭活虫。另外，用水浸泡斑潜蝇蛹发现(雷仲仁, 1997)，浸泡时间小于 12h 时，对蛹影响不大，但超过 48h 后，其死亡率明显增加，当浸泡时间为 72h 时，其死亡率为 81%~95%。另外，通过土壤含水量对美洲斑潜蝇蛹羽化率的研究发现，其土壤相对含水量在 10%以下或 90%以上时对其羽化有明显的抑制作用。土壤含水量在 10%~90%之间时，美洲斑潜蝇的羽化率为 68.7%~90%，土壤相对含水量为 30%其羽化率最高，其较适的含水量范围为 20%~40%。所以我们结合灌水，可有效地消灭土中斑潜蝇蛹。在云南，对蚕豆田在灌水前后南美斑潜蝇成虫数量进行了调查，发现 3 种田的虫口减退率为 10.6%~63.9%，说明适时灌水对降低虫口基数有一定的效果(王贵斌等, 1999)。

(四) 清除有虫枝叶

斑潜蝇幼虫和卵均在植物叶片或叶柄中，部分蛹也在植物叶片上或叶柄、嫩茎中，所以及时清除有虫枝叶，对其进行深埋、烧毁或放入特制的灭蝇收蜂装置中，不仅可有效消灭田间部分活虫，降低虫口，而且可保护利用寄生蜂，特别在秋季，一般田间寄生率都较高，保护利用天敌，对控制斑潜蝇为害更有意义。对番茄田用摘除有虫叶与不摘除虫叶进行比较研究，发现摘除有虫叶比不除虫叶可降低为害 50%(杨明英等, 1999)。堆沤杀灭美洲斑潜蝇试验表明，堆沤时，如在向阳处堆压，这样堆压温度可达 56℃，5d 内活虫全部死亡，在背阴处一般需堆 10d 以上。一般通过清除田间有虫枝叶，可降低虫口 30%~40%。

此外，调整播期、种植抗虫或非喜食品种，压缩感虫作物的种植面积等也可有效控制斑潜蝇的为害。如在云南元谋县，在不同时期播种番茄，其幼虫危害指数差异很大，即 8 月下旬播种危害最重，达 42.0%，9 月上旬播种为害指数为 17.5%，9 月下旬播种，受害最轻，为害指数是 0.5%。黄瓜在 9 月下旬~10 月上旬播种，菜豆 9 月下旬播种较好，严禁冬菜豆早播，否则将会受到严重危害。在云南很多州县也压缩了冬季蚕豆的种植面积，改种小麦、大麦、油菜等非喜作物，也可有效地压低虫口基数，减轻斑潜蝇第二年对蔬菜或花卉的危害。

三、物理防治

(一) 黄卡(板)诱杀

根据斑潜蝇的趋黄性及对高、低温的适应范围等而设计一些物理措施对其进行防治。在生产中研究较深入、应用最多的还是利用黄色粘板(卡、杯)等来诱集斑潜蝇成虫。国内外许多文献报道了应用不同大小、不同质地、不同黏胶、不同高度对斑潜蝇的诱捕效果。黄卡诱捕斑潜蝇主要受温度和光线两个因素的影响,对美洲斑潜蝇的诱捕高峰为(北京)6:00~8:00 时和 12:00~14:00 时;对南美斑潜蝇的诱捕高峰为(北京)6:00~8:00 时和 16:00~18:00 时。在云南其诱捕高峰却在 8:00~10:00 时和 18:00~20:00 时。对于一般作物,黄卡筒状放置和水平放置面朝下,并把黄卡放置在作物顶部诱集效果最好;黄卡以 15cm×20cm 大小诱蝇效果最佳,最经济方便。黄卡对美洲斑潜蝇的诱捕率在 14.1%~37.4%之间,对捕获成虫的雌雄性比为 0.45~0.53:1(雷仲仁等,1999b)。

在云南,在 180m²的大棚花卉中设置 21cm×15cm 的黄色黏卡纸 5~16 张,在菊花大棚,虫口减退率为 16.67%~37.50%,在满天星大棚,虫口减退率 25.60%~70.55%,提高了花卉的品质和产量,其经济效益提高了 20%~25%。另外,对黄卡诱虫保叶进行了比较,对满天星生长期的保叶率为 24%~60%,平均 51.5%,对照为 16.0%;其相对保叶率为 35.5%;对菊花的保叶率为 40%~68%,平均 59.3%,对照为 28%,其相对保叶率为 31.3%(沈发荣等,1999)。

黄卡诱捕美洲斑潜蝇的最佳时间段应在中午和早晨,也就是说,美洲斑潜蝇在这两个时间段较为活跃。因此如果利用黄卡配合化学药剂进行防治美洲斑潜蝇,在干热季节应在早晨和中午进行,效果最好。

如在田间大量使用黄卡,应选用面积为 15cm×20cm 的黄卡较为经济实惠。因为,虽然面积为 30cm×20cm 和 15cm×20cm 的黄卡都有较好的诱捕效果,但 30cm×20cm 大小的黄卡面积虽大,诱捕效果却与 15cm×20cm 大小的黄卡无显著差异;而 8cm×20cm、4cm×20cm、2cm×20cm 的卡因诱捕效果较差,因此从经济实惠的角度考虑,黄卡大小最好为 15cm×20cm,不宜太大,亦不宜太小。而北京林茂公司产的黄板诱捕效果虽明显优于动物所卡,但因制造成本高,价格昂贵,并且只有垂直放置诱捕比较方便,平放、筒状设置都不方便,而垂直放置诱捕效果不如筒状好。因此在改善粘蝇胶的情况下,制成卡纸,较为经济,而且使用方便。

美洲斑潜蝇对于不同种类,不同高度的作物,有在作物顶端层飞翔的活动特性。活动种群数量在此层面上最大。因此利用黄卡诱捕美洲斑潜蝇时,黄卡高度应设在作物顶端齐平处。所以黄卡筒状设置于作物顶部,可应用于种群系统研究和预测预报,通过黄卡诱捕法实测成虫活动峰期,然后利用期距法推算预测美洲斑潜蝇低龄幼虫高峰期(药剂防治适期):幼虫高峰期=成虫高峰期+产卵前期+卵期;也可以通过诱测时黄卡设置密度、平均每卡诱虫量,参照诱捕率试验中确定的诱捕率、黄卡密度及虫口密度三者之间的关系,推算田间虫口密度,作为衡量田间虫情危害程度是否达到防治指标的依据。

由诱捕率试验可知,当黄卡密度为 1 卡/m²、2 卡/m²时,诱捕一天,黄卡对美洲斑潜蝇的诱捕率在 14.1%~37.4%之间。在一定程度上能降低虫口密度,在实践中也发现黄

卡诱捕在苗期、虫源地有一定的防治效果,但仅用黄卡不能完全控制斑潜蝇的为害,必须配合其他防治措施。因此,把黄卡用于综合防治体系中,配合农药防治、生物防治,既可以降低斑潜蝇的种群数量,也有利于天敌的保护利用,又可以减少农药使用量,延缓斑潜蝇对农药产生抗药性,不失为当前斑潜蝇持续控制的有效措施之一。

(二) 保护地冷冻或闷棚防治

在北方(北京以北)美洲斑潜蝇在露地不能越冬(王音等,1998a),所以对一些斑潜蝇发生比较严重的棚室,在冬天可采取休闲揭膜冷冻大棚处理,这样可有效地压低虫口基数,切断斑潜蝇的终年循环。如北京朝阳区,在1997年比较了两个棚在冬季冷冻处理和不处理两种情况下的种群消长规律。两个棚在秋季番茄上的种群基数是基本相同的,经处理后的1号棚直到5月中旬种群才开始上升,而且种群密度最高时仅80头/卡,而未处理的2号棚,2月份种群就逐渐上升,种群最高峰达152头/卡,持续为害时间很长,对茄子造成了明显的产量损失;而1号处理棚,斑潜蝇种群基本处于允许危害水平以下,无须防治。由此可见,此方法是一种高效、简便易行的控制美洲斑潜蝇的方法,可在北方地区结合冬季休闲对一些日光温室采取揭膜冷冻大棚处理。

有研究曾在6月上旬选择美洲斑潜蝇发生较重的黄瓜大棚,对其采取高温闷棚处理,即闭棚升温至45℃,持续2h后慢开风口,让其恢复正常。结果可杀死99.9%的一龄幼虫,二龄、三龄幼虫死亡率为96.1%~94.8%,防效显著。但此方法技术难度大,如果温度低于43℃,防效不佳,高于48℃,可能毁坏黄瓜生长点,所以,应用时需特别注意。

(三) 机械吸虫

根据斑潜蝇成虫个体小,易飞行等特点,郑建秋等(1998)设计研制了一种小型防治用吸虫机。即根据人工玻璃吸瓶原理,在内部形成负压,当与大气连通时,小型昆虫随外界空气自动从连续口流入,起到物理集虫作用。该吸虫机重2.5kg,体积:20cm×22cm×35cm(不含吸虫管及头套)。功耗小于40W,电压24V,电流3.2A,吸虫口风速3~5m/s。在保护地番茄、黄瓜和架豆美洲斑潜蝇成虫发生期应用,使田间虫密度明显下降,虫口减退率达78%~93%。

四、化学防治

(一) 药剂筛选

化学防治是目前防治斑潜蝇的主要措施之一。为了对症下药,提高防效,首先应对防治不同虫态、不同作用机理的药剂进行筛选。对斑潜蝇幼虫和成虫防效都好的药剂是25%的百树得乳油;沙蚕毒素系列的杀虫单、易卫杀、杀虫双等7个品种及混配剂中的20%斑潜净微乳剂等,不到所选药剂的1/4;仅对幼虫防效较好的药剂有阿维菌素类药剂,如爱福丁、害极灭、杀虫素等,昆虫生长调节剂中的灭蝇胺,混配剂中的绿菜宝等,约占所选药剂的1/6;仅对成虫防效较好的药剂主要是80%的敌敌畏(击倒快,但持效期很短)、40%辛硫磷、48%乐斯本等有机磷类药剂和5%来福灵、10%氯氰菊酯、4.5%高效氯氰菊酯、20%灭扫利、2.5%功夫等拟除虫菊酯类药剂。所选择的植物杀虫剂类、芳基杂

环类、氨基甲酸酯类、硝基亚甲基类及除灭蝇胺外的昆虫生长调节剂类药剂对斑潜蝇无效或防效很差，在生产中不宜推广应用。此外，在所选药剂中几乎所有的有机磷类和拟除虫菊酯类药剂对斑潜蝇幼虫的毒力很小，防效一般小于 60%；相反，阿维菌素类却对斑潜蝇成虫防效较差，一般防效仅 60%左右；昆虫生长调节剂中的灭蝇胺对幼虫特效，但对成虫几乎无效。所以，根据上述农药筛选结果，在防治斑潜蝇幼虫时，可选用灭蝇胺和阿维菌素类药剂，而菊酯类和有机磷类药剂主要用于防治成虫，要二者兼治时，可用沙蚕毒素类药剂和斑潜净混剂。当然，在生产实践中要充分掌握斑潜蝇各生态的发生高峰，交替利用不同药剂进行防治，这样既可以提高防效，又可以防止或延缓斑潜蝇抗药性的产生。

药剂除对斑潜蝇幼虫和成虫有直接的致死作用外，有的药剂对斑潜蝇成虫的取食、产卵有明显的忌避作用，如阿维菌素类药剂及植物性杀虫剂中的印楝素等。

(二) 防治的最佳虫态

通过大量药剂对不同虫态的毒力和防效筛选，已了解了斑潜蝇成虫、幼虫、卵及蛹活性最高的药剂。此外，通过对幼虫不同龄期的防治试验，发现同种药剂对初孵幼虫的毒力明显大于对二龄、三龄幼虫的毒力。虫螨光、来福灵和杀灭菊酯对初孵幼虫的校正防效达 77.6%~92.1%，但对二龄、三龄幼虫的防效却很不理想。所以，在幼虫防治阶段，要掌握好初孵幼虫期用药这一关键，即把斑潜蝇消灭在为害初期。另外，在保护地，在秋季封棚初期和春季开棚前期最好用敌敌畏或来福灵、百树得等药剂对成虫进行防治，以便阻止其扩散。多数药剂对蛹防效很差或无效；沙蚕毒素类药剂对斑潜蝇卵的孵化有明显抑制作用，所以，在成虫产卵盛期施用可杀成虫、幼虫及卵，效果很好。

(三) 施药方法和技术

根据不同寄主作物、不同栽培环境、不同防治时期等可选用不同的施药方法和技术，以便达到安全、经济、有效并尽可能减少对环境的污染。如滴灌施药、常温烟雾施药、静电喷雾施药、选择性施药和常规施药等。

五、生物防治

检疫性害虫在传入一个新地区时，很容易暴发成灾。这主要是由于在害虫传入时，控制该害虫的天敌往往未能同时传入的缘故。检疫性美洲斑潜蝇和南美斑潜蝇在传入我国时也是如此，很快在全国各地暴发成灾。此外，这几种斑潜蝇在其原产地过去都属于次要害虫，但在第二次世界大战后，由于杀虫剂的广泛应用，杀伤了大量天敌，破坏了生态平衡，许多次要害虫转为主要害虫，斑潜蝇就是其中一类，为了防治斑潜蝇的危害，不断使用各种化学农药，导致其产生了抗药性，杀伤了更多的天敌，使斑潜蝇的为害越来越难以控制。斑潜蝇主要危害蔬菜、花卉经济作物，不允许有更多的残留和高毒农药的应用，要持续无公害地控制斑潜蝇，生物防治就显得尤为重要，而且势在必行。在发达国家，生物防治已越来越引起了人们的重视，并在许多地区获得了成功。如荷兰 Koppert 公司可生产防治斑潜蝇的 3 种寄生蜂 4 种产品，已在欧洲广泛应用，并且该产品

也销往美洲、非洲和亚洲等地用于防治保护地多种斑潜蝇的为害。美国、英国、法国等也都开展了斑潜蝇生物防治的研究和应用,现已发现斑潜蝇寄生蜂4科100余种。而且随着调查研究的深入,其寄生蜂的种类将会不断增加。

在国内,有关斑潜蝇寄生性天敌的调查才刚刚开始,已报道的寄生蜂共24种,其中中国农业科学院植物保护研究所问锦曾、雷仲仁等报道的就达22种(许在福等,1999;问锦曾等,1999,2000a,2000b;雷仲仁等,1999a,1999b;王音等,1999),在北京地区分布的已确定种名的19个。由此可见我国的斑潜蝇寄生蜂资源相当丰富。

有关斑潜蝇寄生蜂生物学、生态学及其繁殖技术等方面的研究也已展开。如冯红云和雷仲仁(2003)对潜蝇姬小蜂 *Diglyphus isaea* Walker 的行为学特性、发育和生殖、功能反应和繁殖技术等进行了系统研究,测定了几种植物挥发性物质对潜蝇姬小蜂的生物活性,并对主要植物挥发性物质的组分进行了分析鉴定,主要结果如下:

潜蝇姬小蜂对寄主龄期有选择性,主要寄生2~3龄寄主,其寄生行为分为4个过程:寄主定位、寄主检验、产卵和取食、清扫和梳理。成虫羽化一般在上午进行,温度对羽化时间和高峰有影响,温度越高,羽化时间越集中,羽化高峰时间越早。雄虫比雌虫羽化略早,成虫羽化当日即可交配,雌雄虫均可多次交配。潜蝇姬小蜂寄生活动主要在光照期内进行。成虫补充取食蜂蜜可显著延长其寿命。

潜蝇姬小蜂在美洲斑潜蝇上卵-幼虫、蛹和整个世代发育起点温度分别为10.41℃、7.72℃、9.29℃;在南美斑潜蝇上为10.44℃、8.49℃、10.40℃;在美洲斑潜蝇上的有效积温分别为90.62DD、88.59DD、178.27DD;在南美斑潜蝇上为91.60DD、107.75DD、170.00DD。24℃下,单雌在南美斑潜蝇和美洲斑潜蝇上分别产卵241.0粒和252.6粒,可致死242.2头南美斑潜蝇,最高为309头;致死304.1头美洲斑潜蝇,最高可达474头。

在温室条件下研究了笼养潜蝇姬小蜂的扩繁技术,在30cm×40cm×50cm的养蜂笼中,放入12钵蚕豆苗,接种250头南美斑潜蝇成虫一天,可获得796头寄主幼虫。再过7~8d接种50头雌蜂,可收获270头成蜂,出蜂率为34%。单笼在接种80头雌蜂、1488头南美斑潜蝇(20钵蚕豆)时,平均收获蜂量358.2头。在30cm×40cm×50cm的笼中,接蜂比为1:13~20时,可获得最佳寄生和繁蜂效果。研究表明,18~30℃适宜潜蝇姬小蜂的生长发育、寄生和羽化,在24℃下,繁殖一代约需15d。根据此繁蜂工艺,在温室进行小规模繁殖,每月可生产合格成蜂12172头,其繁蜂成本约为0.04元/头。

采用两种植物挥发性物质提取装置(液氮冷凝装置和Tenax GR吸附柱装置),对蚕豆、地豆、油菜、小白菜、甘蓝等受斑潜蝇为害的叶片、完好的叶片和机械损伤的蚕豆、地豆叶片的挥发性物质分别进行了提取,并利用四臂嗅觉仪测定了潜蝇姬小蜂对植物叶片的自然挥发物和挥发物质提取液的嗅觉反应。结果表明:①Tenax GR吸附柱提取法获得的植物挥发性物提取液和直接用植物自然挥发物对潜蝇姬小蜂的活性测定结果一致,说明该提取法比液氮冷凝提取法更接近自然;②潜蝇姬小蜂对所测试的几种受斑潜蝇为害的植物气味均表现出明显的趋性,特别是对南美斑潜蝇为害的嗜好植物-地豆和蚕豆叶片,雌蜂表现出了更强的趋性;对机械损伤和完好的蚕豆和地豆叶片也表现出较强的趋性,但不如对虫害叶片的趋性强。而完好的甘蓝、小油菜、小白菜叶片和非寄主植物小麦苗和玉米苗则对潜蝇姬小蜂无明显的引诱作用;说明这些植物受斑潜蝇为害后可能产生或释放了更多的对潜蝇姬小蜂具有引诱活性的物质;③上述植物叶片在培养皿中的生

测试也表明,潜蝇姬小蜂对被害叶片有明显的刺探行为;在寄生蜂近距离寻找寄主行为中,视觉和触角信号可能是不可或缺的。

应用 GC-MS 分析鉴定了蚕豆和地豆叶片主要挥发性物质的组分,初步结果表明:①完好蚕豆叶片和被斑潜蝇为害后的蚕豆叶片中 D-柠檬烯和反-3, 7-二甲基-1, 3, 6-辛三烯含量都较高。与完好蚕豆叶片相比,被害蚕豆叶片出现了新的成分,石竹烯、 β -香叶烯和奥类化合物;此外,被害蚕豆叶片中 D-柠檬烯(D-Limonene)和反-3, 7-二甲基-1, 3, 6-辛三烯(1,3,6-Octatriene,3,7-dimethyl-, E)的比例也有所增高。②完好地豆叶片和被害地豆叶片中 D-柠檬烯和 3-萜烯含量都较高。与完好地豆叶片相比,被害地豆叶片出现了新的成分,3, 5, 5-三甲基环己烯,石竹烯和奥类化合物。③植物被斑潜蝇为害后,挥发性物质发生了变化,生成了特定的化学指纹图谱,可能为寄生蜂寻找寄主提供了化学信号。

有关在田间或温室利用寄生蜂防治斑潜蝇的报道还很少,如有研究表明,在温室将带有 2 龄以上美洲斑潜蝇幼虫的盆栽菜豆摆满在温室铁架上,然后释放潜蝇姬小蜂。放蜂时间:傍晚 7:00 左右。共放蜂两次,每次 30 头,间隔 1 周。每天随机取 4 个有虫叶片,统计总虫数,变黑虫数,计算寄生率。连续观察 2 周。重复一次。结果:平均寄生率 78.8%,最高 100%。第 10 天以后的寄生率明显高于前期,有两天观察到 100%。原因是一些前期被寄生者开始羽化出蜂,从而自然地增强了温室中姬小蜂的种群密度,更大地发挥了控制斑潜蝇的作用。试验过程中,曾将带有变黑幼虫的枯黄叶片取回放在培养皿内,观察到寄生蜂羽化,羽化率 60%左右。表明姬小蜂发育到蛹期有一定的抗逆性,虽然有的叶片已严重干枯,仍有蜂羽化。

(雷仲仁 王音)

主要参考文献

- 陈艳,赵景玮,范青海. 1997. 温度对美洲斑潜蝇发育、存活和繁殖的影响. 中国昆虫学会第六次全国代表大会暨学术讨论会论文摘要集. 263 [Chen Y, Zhao J W, Fan Q H. 1997. Effect of temperature on the development, longevity and oviposition of *Liriomyza sativae* (Diptera: Agromyzidae). Annals of VIth Entomological Congress of China. (Abstract). 263]
- 冯红云. 2003. 潜蝇姬小蜂的生物学和对植物挥发物的趋性研究. 中国农业科学院研究生院硕士学位论文. 74pp. [Feng H Y. 2003. Biology of *Diglyphus isaea* and response to plant volatiles. Dissertation for Master's Degree. 74pp.]
- 雷仲仁, 问锦曾, 王音. 1997. 我国危险性斑潜蝇的研究进展及今后工作的建议. 中国青年农业科学学术年报. 北京: 中国农业出版社. 495~499 [Lei Z R, Wen J Z, Wang Y. 1997. Research progress of the vegetable leafminer in China and suggestion in the future control. Annals of Agricultural Science of China Youth. Beijing: China Agricultural Press. 495~499]
- 雷仲仁, 王音, 刘月英. 1999a. 南美斑潜蝇与美洲斑潜蝇的生物学比较研究. 植物保护与植物营养研究进展. 北京: 中国农业出版社. 280~284 [Lei Z R, Wang Y, Liu Y Y. 1999a. Biological comparison between *Liriomyza huidobrensis* and *L. sativae*. Research Progress in Plant Protection and Plant Nutrition. Beijing: China Agricultural Press. 280~284]
- 雷仲仁, 王音, 问锦曾. 1999b. 我国蔬菜潜叶蝇寄生蜂简介(二)潜蝇姬小蜂、粗脉姬小蜂和栉角姬小蜂. 植物保护, 25(4): 43~44 [Lei Z R, Wang Y, Wen J Z. 1999b. An introduction on the hymenopterous parasites from vegetable leafminers in China (2), *Diglyphus isaea* (Walker), *D. pulchripes* (Crawford) & *Hemiptarsenus varicornis* (Girault). *Plant Protection*, 25(4): 43~44]
- 雷仲仁, 王音, 黄冬如, 程登发. 2002. 美洲斑潜蝇在不同温度下的飞行能力. 昆虫学报, 45(3): 413~415 [Lei Z R, Wang Y, Huang D R, Cheng D F. 2002. Influence of temperature on flight potential of *Liriomyza sativae* Blanchard. *Acta Entomol. Sin.*, 45(3): 413~415]

- 沈发荣, 肖宁年, 邹立, 况荣平, 陈志媛, 杨曾实. 1999. 南美斑潜蝇为害满天星的经济阈值研究. 西南农业学报, 12(斑潜蝇专辑): 105~108 [Shen F R, Xiao N N, Zou L, Kuang R P, Chen Z Y, Yang Z S. 1999. Economic threshold of *Gypsophila elegans* damaged by broad leaf miner *Liriomyza huidobrensis*. *Southwest China J. of Agri. Sci.*, 12(Special issue): 105~108]
- 王履斌, 施文武, 龚化雪, 管春翠, 李发萍. 1999. 农业防治技术对蚕豆上南美斑潜蝇的控虫效果. 西南农业学报. 12(斑潜蝇专辑): 120~123 [Wang G B, Shi W W, Gong H X, Guan C C, Li F P. 1999. Effects of agricultural techniques to control *Liriomyza huidobrensis* in broad bean. *Southwest China J. of Agri. Sci.*, 12 (Special issue): 120~123]
- 王履浙, 仲伦, 肖宁年, 施发涛, 杨家鸾, 严位中. 1999. 云南斑潜蝇的发生种类及影响因子调查初报. 西南农业学报. 12(斑潜蝇专辑): 1~8 [Wang L Z, Zhong L, Xiao N N, Shi F T, Yang J L, Yan W Z. 1999. Primary report on investigation of the occurring species of *Liriomyza* and the influential factors in Yunnan. *Southwest China J. of Agri. Sci.*, 12(Special issue): 1~8]
- 王音, 雷仲仁, 问锦曾, 孙福在, 吴孔明. 2000a. 美洲斑潜蝇的越冬与耐寒性研究. 植物保护学报, 27(1): 32~36 [Wang Y, Lei Z R, Wen J Z, Sun F Z, Wu K M. 2000a. Overwintering and cold-hardiness of the vegetable leafminer *Liriomyza sativae* Blanchard. *Acta Phytophylacica Sinica*, 27(1): 32~36]
- 王音, 雷仲仁, 问锦曾, 黄虹. 2000b. 温度对美洲斑潜蝇发育、取食、产卵和寿命的影响. 植物保护学报, 27(3): 210~214 [Wang Y, Lei Z R, Wen J Z, Sun F Z, Huang H. 2000b. Effect of temperature on the development, oviposition, feeding and longevity of *Liriomyza sativae* (Diptera: Agromyzidae). *Acta Phytophylacica Sinica*, 27(3): 210~214]
- 王音, 雷仲仁, 问锦曾. 1999. 我国蔬菜潜叶蝇寄生蜂简介(三)圆形赘须金小蜂、底诺金小蜂、斯夫金小蜂和克氏金小蜂. 植物保护, 25(5): 38~40. [Wang Y, Lei Z R, Wen J Z. 1999. An introduction on the hymenopterous parasites from vegetable leafminers in China (3), *Halticoptera circulus* (Wlk.), *Thinodytes cyzicus* (Walker), *Sphigigaster* sp., *Trichomalopsis* sp. *Plant Protection*, 25(5): 38~40]
- 王音, 雷仲仁, 赵光文. 1998a. 京郊蔬菜上潜叶蝇种群动态调查. 植物保护, 24(4): 10~13 [Wang Y, Lei Z R, Zhao G W. 1998a. Population dynamics of vegetable leafminers in Beijing suburbs. *Plant Protection*, 24(4): 10~13]
- 王音, 雷仲仁, 问锦曾. 1998b. 南美斑潜蝇的形态特征及危害特点. 植物保护, 24(5): 30 [Wang Y, Lei Z R, Wen J Z. 1998b. Morphology and damaging characteristics of *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard). *Plant Protection*, 24(5): 30]
- 问锦曾, 雷仲仁, 王音. 1999. 我国蔬菜潜叶蝇寄生蜂简介(一)攀金姬小蜂和美新姬小蜂. 植物保护, 25(3): 39~40 [Wen J Z, Lei Z R, Wang Y. 1999. An introduction on the hymenopterous parasites from vegetable leafminers in China (1), *Chrysocharis pentheus* (Walker) and *Neochrysocharis formosa* (Westwood). *Plant Protection*, 25(3): 39~40]
- 问锦曾, 雷仲仁, 王音. 2000a. 我国蔬菜潜叶蝇寄生蜂简介(四)普金姬小蜂、冈崎姬小蜂等六种. 植物保护, 26(2): 40~42 [Wen J Z, Lei Z R, Wang Y. 2000a. An introduction on the hymenopterous parasites from vegetable leafminers in China (4), *Chrysocharis pubicornis* (Zetterstedt) and *Neochrysocharis okazakii* Kamijo et al. six species. *Plant Protection*, 26(2): 40~42]
- 问锦曾, 王音, 雷仲仁. 1996. 美洲斑潜蝇中国新纪录种. 昆虫分类学报, 18(4): 311~312 [Wen J Z, Wang Y, Lei Z R. 1996. New record of *Liriomyza sativae* Blanchard(Diptera: Agromyzidae) from China. *Entomotaxonomia*, 18(4): 311~312]
- 问锦曾, 王音, 雷仲仁. 2000b. 我国蔬菜潜叶蝇寄生蜂简介(五)宽脉姬小蜂、厚脉姬小蜂等七种. 植物保护, 26(6): 33~35 [Wen J Z, Wang Y, Lei Z R. 2000b An introduction on the hymenopterous parasites from vegetable leafminers in China (5), *Diglyphus pachyneurus* Graham, *D. crassinervis* Erdos et al. seven species. *Plant Protection*, 26(6): 33~35]
- 许再福, 高泽正, 陈新芳. 1999. 广东美洲斑潜蝇寄生蜂常见种类鉴别. 昆虫天敌, 21(3): 126~132 [Xu Z F, Gao Z Z, Chen X F. 1999. Identification of hymenopterous parasites on *Liriomyza sativae* from Guangdong of China. *Nat. En. Ins.*, 21(3): 126~132]
- 杨明英, 杨家鸾, 张雷, 孙道旺. 1999. 应用农业技术措施控制斑潜蝇危害蔬菜的试验. 西南农业学报, 12(斑潜蝇专辑): 115~119 [Yang M Y, Yang J L, Zhang L, Sun D W. 1999. Trials on applied the agricultural techniques to control the damage of leafminers on vegetable. *Southwest China J. of Agri. Sci.*, 12(Special issue): 115~119]
- 曾玲, 吴佳教, 梁广文. 1998. 温度对美洲斑潜蝇生长发育的影响. 华南农业大学学报, 19(3): 21~25 [Zeng L, Wu J J, Liang G W. 1998. Effects of temperature on the development of *Liriomyza sativae* (Diptera: Agromyzidae). *J. South China Agric. Uni.*, 19(3): 21~25]
- 张桂芬, 朱伟旗, 刘春辉. 1998. 寄主植物对美洲斑潜蝇各虫态发育历期的影响. 植物保护学报, 25(1): 11~14 [Zhang G F, Zhu W Q, Liu C H. 1998. Effect of hosts on the development of *Liriomyza sativae* (Diptera: Agromyzidae). *Acta Phytophylacica Sinica*, 25(1): 11~14]
- Chandler L D. 1984. Seasonal population fluctuations of *Liriomyza sativae* Blanchard in bell pepper. *The Southwestern Entomologist*, 9(3): 334~340
- Hanna H Y, Story R N, Adams A J. 1987. Influence of cultivar, nitrogen, and frequency of insecticide application of vegetable leafminer (Diptera: Agromyzidae) population density and dispersion of snap beans. *J. Econ. Entomol.*, 80: 107~110

- Kennedy G G, Bohn G W, Stoner A K, Webb R E. 1978. Leafminer resistance in muskmelon. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 103(5): 571-574
- Leibee G L. 1985. Effects of storage at 1. 1°C on the mortality of *Liriomyza trifolii* (Burgess) (Diptera: Agromyzidae) life stages in celery. *J. Econ. Entomol.*, 78: 407-411
- Oatman E R, Michelbacher A E. 1958. The melon leafminer, *Liriomyza pictella* (Thomson) (Diptera:Agromyzidce). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 51: 557-566
- Petitt F L. 1990. Distinguishing larval instars of the vegetable leafminer, *Liriomyza sativae* (Diptera:Agromyzidae). *Florida Entomologist*, 73(2): 280-286
- Petitt F L, Allen J C, Barfield C S. 1991. Degree-day model for vegetable leafminer phenology. *Environmental Entomology*, 20(4): 1134-1140
- Petitt F L, Turlings T C J, Wolf S P. 1992. Adult experience modifies attraction of the leafminer parasitoid *Opius disitus* (Hymenoptera: Braconidae) to volatile semiochemicals. *Journal of Insect Behavior*, 5(5): 623-634
- York A C. 1988. Leafminers (Diptera: Agromyzidae) on vegetables in India. *Acta Horticulture*, 219:115-117
- Zehnder G W, Trumble J. 1984. Intercrop movement of leafminers. *California Agriculture*, 38: 7-8

第五章 南美斑潜蝇

第一节 分布与起源	207	第四节 危害现状与生态经济影响的评估	209
第二节 识别特征与早期诊断	207	第五节 生物学特性	209
第三节 传入途径与入侵成因	208	第六节 生态学特性	213

摘要 本章主要介绍了南美斑潜蝇 *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard) 的分布与起源、识别特征与早期诊断、传入途径与入侵成因、危害现状与生态经济影响评估、主要生物学和生态学特性、测报与预警及控制技术等内容。特别是对南美斑潜蝇成虫的取食产卵、羽化及对黄卡的趋性, 幼虫脱道化蛹等生物学行为和温度对斑潜蝇的生长发育、生殖、寿命, 越冬与耐寒, 对寄主植物的选择和种内竞争、空间分布和种群动态规律等生态学特性作了详细介绍, 此外, 对斑潜蝇的综合治理方法和技术, 如检疫处理、休闲与轮作、黄卡诱杀、冷冻大棚及化学防治和生物防治等作了具体介绍。

关键词 南美斑潜蝇 分布与危害 识别与诊断 生物学 生态学 监测与控制

Chapter 5 South American Leaf Miner *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard)

Abstract: This chapter contains general overviews of various parameters of *Liriomyza huidobrensis*, including its distribution and origin, recognition characters and early diagnosis, importation pathway and causes, damage and assessment of ecological and economic effects, biological and ecological characters, prediction, warning system and control techniques. Some biological characters concerning feeding, oviposition, eclosion, attractancy to yellow sticky traps, emergence, pupation and ecological characteristics concerning the effect of temperatures on the development, reproduction and longevity, overwintering and cold-hardiness, host selection, intraspecific competition, spatial distribution and dynamics of population are reviewed. In addition, it also gives some introduction to the risk analysis and early warning system of the leafminer. Finally, the integrated control methods and techniques, including quarantine, field fallowing and crop rotation, use of yellow sticky traps, greenhouse freezing, chemical and biological control and so on, are presented.

Key words: *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard), distribution and damage, identification and diagnosis, biology, ecology, monitoring and control

第一节 分布与起源

南美斑潜蝇 *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard) 是一种为害多种蔬菜和观赏植物的检疫性害虫, 隶属于双翅目 Diptera、潜蝇科 Agromyzidae、斑潜蝇属 *Liriomyza*, 系 Blanchard E.(1926)于阿根廷瓜叶菊上发现和记述(Spencer, 1990)。原分布于阿根廷、巴西、秘鲁等南美国家, 后随菊花切枝传入美国、墨西哥, 20 世纪 80 年代末传入荷兰、德国、意大利等欧洲国家和以色列, 以后又传入大洋洲和亚洲一些国家, 并暴发为害, 引起了各国的重视, 被 EPPO 列为检疫性害虫。当时其英文名为 South American leaf miner, 故中文名译为南美斑潜蝇(国内有人译为拉美斑潜蝇, 但拉美 Latin America 系泛指包括中美洲的拉丁语系国家, 和南美意义不同)。1993 年该虫随花卉引种传入我国昆明花卉圃场, 逐渐蔓延到农田(问锦曾等, 1998)。由于南美斑潜蝇具有寄主广泛, 为害能力强, 防治困难等特点, 因而近年来蔓延扩展十分迅速, 自 1993 年在云南个别花卉场发现以来, 目前已在我国 20 多个省市自治区造成严重的危害, 主要为害蔬菜和花卉, 已成为农业生产上的主要害虫。

第二节 识别特征与早期诊断

一、形态特征

如图 5-1 所示。



图 5-1 南美斑潜蝇成虫、卵、幼虫、蛹和为害状(雷仲仁 供)

卵: 椭圆形, 乳白色, 微透明。大小为 $0.27\sim 0.32\text{mm} \times 0.14\sim 0.17\text{mm}$ 。

幼虫: 初孵半透明, 随虫体长大渐变为乳白色, 有些个体带有少许黄色。老熟幼虫体长 $2.3\sim 3.2\text{mm}$, 后气门突具 6~9 个气孔。

蛹：淡褐至黑褐色，腹面略扁平。大小为 1.3~2.5mm×0.5~0.75mm。

成虫：外形与美洲斑潜蝇相似，但体形较大，体长 1.6~2.1mm，翅长 2.1~2.8mm，额橙黄色，上眶鬃 2 对，下眶鬃 2 对，内、外顶鬃均着生于暗色处。中胸背板黑色有光泽，小盾片黄色，胸部中侧片下方 1/2 至大部分为黑色，背中鬃 3+1，中鬃散生呈不规则 4 行。足基节黄色具黑纹，腿节具黑色条纹至几乎全黑色，胫节、跗节黑褐色。前翅中室较大， M_{3+4} 末段长为次末段的 1.5~2.5 倍。雄虫外生殖器端阳体与中阳体前部之间以膜相连，中阳体前部骨化较强，后部几乎透明，精泵黑褐色，柄短，叶片小。背针突常具 1 齿(王音等, 1998b)。

二、与美洲斑潜蝇的区别

见第四章第二节部分。

三、早期诊断

南美斑潜蝇以雌成虫和幼虫为害各种寄主植物；幼虫潜食寄主叶片是其主要的为害形式。成虫将卵产于寄主植物叶片上、下表皮下，在矮生菜豆上，产于叶片上表皮下的卵不到总卵量的 5%；幼虫孵化后，沿叶脉潜食，并喜食叶肉海绵组织，产于叶片上表皮下的卵孵化后，在潜食几毫米后，也转到叶片下表皮下取食海绵组织，形成浅绿色或白色潜道。潜道随幼虫龄期的增加不断延长、加宽。所以，根据植物叶片上的蛇形潜道很容易鉴别是否受到斑潜蝇的为害，还可以根据潜道的长短、粗细等判断斑潜蝇幼虫的龄期及是否已脱道化蛹。但南美斑潜蝇和美洲斑潜蝇不同的是其潜道不仅在叶片上面，而且在叶片下面也有，往往在叶片上面形成一小段虫道后又转到叶片的下面，另外，南美斑潜蝇的潜道一般沿叶脉发展，潜道宽窄变化不规则，由于其幼虫较大，所以，潜道也较美洲斑潜蝇的宽。根据此特点可以与美洲斑潜蝇区别。

除此之外，雌成虫以产卵器刺入叶片在叶片上形成刻点(取食孔、产卵孔)，用以取食、产卵，特别是在较幼嫩叶片上形成刻点后，随着叶片的进一步展开，刻痕也随之扩大。有些寄主植物还产生相应的生理反应，表现为刻点周围隆起肿胀。在高温时，在刻点处易形成坏死斑。所以，在斑潜蝇为害的早期即还没有潜道形成时，我们首先发现的是斑潜蝇成虫取食、产卵造成的点刻，根据点刻的多少、密度可以估计斑潜蝇为害的程度。

第三节 传入途径与入侵成因

由于该虫个体较小，而且卵和幼虫均在寄主植物组织中，所以，很容易随寄主植物的调运而传播。如随菊花切枝传入美国、墨西哥，20 世纪 80 年代末传入荷兰、德国、意大利等欧洲国家和以色列，以后又传入大洋洲和亚洲一些国家，并暴发为害。根据调查，1993 年昆明动植物检疫局在云南嵩明县杨林镇菊花、洋桔梗等植株上发现了南美斑潜蝇，很可能是随花卉引种传入我国的，后逐渐随花卉、蔬菜调运传播扩散到云南的昆明市周围、呈贡、曲靖、通海、澄江、新平等地区和临近的四川、贵州(贵阳、兴隆、乌当、花溪、修义、凯里、兴义、安龙等)等省市(问锦曾等, 1998)，随后主要通过蔬菜、

花卉等调运传入北京、青海等省。通过对几个地区该虫的发生发展调查看，它是逐渐扩散，并加重为害，是典型外来入侵性害虫。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

南美斑潜蝇是一种典型的多食性害虫，寄主范围十分广泛。据昆明市植保站调查，其寄主植物达 41 科百余种，包括豆科、茄科、葫芦科、菊科、十字花科、石竹科、伞形花科、藜科、苋科、天南星科、落葵科、大戟科、车前草科、锦葵科、蓼科、酢浆科、禾本科的多种蔬菜、花卉及一些粮食作物、杂草等。嗜食作物有芹菜、生菜、菠菜、莴笋、黄瓜、蚕豆、马铃薯、满天星等，并能取食大麦、小麦和烟草(问锦曾等，1998)。该虫不仅是蔬菜上的重要害虫，而且还成为花卉的重要害虫，其为害的花卉达 30 科 94 种(杨曾实等，1999)。在云南，南美斑潜蝇造成大面积蚕豆绝收，蔬菜严重减产。1995 年昆明缤纷园艺有限公司，花卉大棚直接受害面积为 27hm²，经济损失达 30 万元人民币；兴海花卉公司 66 个满天星花棚，植株受害率达 100%，叶片受害率达 90%，经济损失 40 万元。据统计，1997 年云南省受害面积达 33.5 万公顷，其中蚕豆 15.1 万公顷，蔬菜 6.7 万公顷，马铃薯 2.5 万公顷，花卉烤烟等 9.3 万公顷。令人惊异的是小麦和大麦亦为其寄主，这在世界上尚是首次记录(问锦曾等，1998)，且在油菜、小麦、大麦上的危害有逐年扩大趋势，1997 年全云南省油菜被害达 1.76 万公顷，麦类被害达 1.64 万公顷。1998 年，在贵州省的贵阳、兴义、凯里、兴隆、花溪等地暴发南美斑潜蝇的危害，对多种蔬菜、花卉、蚕豆等作物造成了严重的为害；1998 年，在青岛蔬菜基地，芹菜受到南美斑潜蝇的毁灭性危害；随后在北京、四川、河北、天津、河南、内蒙等地都不同程度暴发了南美斑潜蝇的为害。南美斑潜蝇由于具有寄主范围广、繁殖力高、破坏力强、防治困难的特点，因而其蔓延扩展十分迅速，自 1993 年在云南个别花卉场发现以来，目前已在全国 20 多个省市造成不同程度的危害，目前该虫在我国的云南、四川、贵州等西南地区和北方地区已成为蔬菜、花卉及小春作物上的主要害虫。

第五节 生物学特性

一、南美斑潜蝇的为害特点

南美斑潜蝇的为害形式与美洲斑潜蝇相似，主要以幼虫潜食叶片，在叶片上形成潜道危害寄主植物。除此之外，成虫的取食、产卵也对植物造成一定的损害。

成虫将卵产于寄主植物的上、下表皮之下，与美洲斑潜蝇不同的是卵绝大部分产于叶片背面，如在菜豆上产于叶片正面的卵不到总卵量的 5%(雷仲仁等，1999)。幼虫孵化后，在叶片上、下表层来回潜食，既取食叶肉上层栅栏组织，又取食下层的海绵组织，因而从叶正面看潜道通常不完整。与美洲斑潜蝇相比，南美斑潜蝇更喜欢沿叶脉取食，还可取食一些植物如芹菜、茼蒿、蚕豆等的叶柄和茎。据贵阳市反映，一片蚕豆小叶有虫 40 余头，一段嫩茎有虫 70 余头(问锦曾等，1998)。由于南美斑潜蝇幼虫体形较大，食量相应也较大，加之上下层叶肉及叶柄、茎秆等均可取食，其破坏性比美洲斑潜蝇

更大。蚕豆被潜食后，往往整株变黑、枯死。在芹菜、茼蒿苗期幼虫喜钻蛀茎秆，造成毁苗。成株期的危害使商品价值大大降低，甚至无法食用。马铃薯受害后，由于造成叶片早枯，使薯块膨大受阻，薯块瘦小，减产 30%~70%，品质降低。而且由于其钻蛀行为的特殊性，使药剂防治更加困难。

与美洲斑潜蝇相比，南美斑潜蝇成虫危害较严重。由于其体形较大，雌虫以产卵器在叶片上形成的取食产卵孔明显大于美洲斑潜蝇的取食产卵孔，且南美斑潜蝇食量大，形成的刻点十分密集，并伴有明显的黑色粪便，污染了叶片，严重影响其光合作用和蔬菜的商品价值。

二、南美斑潜蝇成虫羽化特性

南美斑潜蝇成虫羽化过程与美洲斑潜蝇相似，借助于额囊的收缩与舒张产生的压力，突破蛹壳，在体液压力的作用下从蛹壳前端钻出。整个羽化过程几分钟至 1h。

不同温度下，成虫羽化高峰有所不同，但绝大多数羽化发生在中午之前，下午 16:00 时以后成虫羽化极少。温度越高，羽化时间越集中，羽化高峰时间越早(表 5-1)。在黑暗条件下没有成虫羽化。当给予连续光照时，成虫 24h 内均可羽化，且各时间段羽化量较均匀。

表 5-1 不同温度下南美斑潜蝇成虫羽化规律(刘月英, 1999)

温度/℃	羽化时段/h	羽化高峰时段/h	不同时间段羽化的百分比/%		
			6:00~11:00	11:00~16:00	16:00~20:00
29	6~10	6~8	100	0	0
24	6~14	8~11	88.27	11.73	0
20	6~16	8~13	78.65	21.31	0
14	7~18	9~14	52.44	43.31	4.26

三、成虫交配习性

成虫羽化当日即可进行交配，羽化第二天是交配的高峰期。温度越高，交配越早。大部分交配在上午和中午进行。雌雄交配时的姿态与美洲斑潜蝇相同。交配过程一般持续几十分钟。雌雄虫均可多次交配。

四、成虫取食产卵习性

南美斑潜蝇成虫取食产卵过程与美洲斑潜蝇基本相同。雌虫以产卵器在寄主植物叶片上形成刺伤点，成虫取食刺伤点渗出液，因而常把这种刺伤点称为取食孔，取食孔绝大部分位于叶片正面，近似圆形，较大。雌虫形成的另一种刺伤点是产卵孔，雌虫将卵产于其中，产卵孔一般呈椭圆形，雌虫不在产卵孔中取食(雷仲仁等, 1999)。南美斑潜蝇喜在叶背面产卵，卵散产，但往往在选定区域内连续产下几粒卵。从卵在植物上的分布看，前期危害植株中下部叶片着卵较多，中后期危害中上部叶片着卵多于

下部叶片；芹菜上靠近叶柄处着卵较多。雄虫不能形成取食孔，需通过雌虫形成的刻点进行取食。南美斑潜蝇形成的刺伤点可明显降低光合率、叶肉及气孔传导性(Parrella, *et al.*, 1985)。

自然条件下，南美斑潜蝇成虫取食、产卵活动均在白天进行，夜晚不取食，不产卵。室内恒温试验也证实取食产卵活动均在光期内进行，暗期内取食产卵活动停止。光照期内各时间段取食量无显著差异。产卵主要在 16:00 时之前进行。取食产卵活动随温度的升高而逐渐增加，与温度呈正相关关系。温室内的观察结果表明，13:00~15:00 时取食量最高，此时温度亦达一天中最高温度，11:00~13:00 时产卵量最大(雷仲仁等, 1999)。

五、南美斑潜蝇成虫活动规律

Weintraub 和 Horowitz(1996)采用黄板监测法对马铃薯田中南美斑潜蝇的活动规律进行了研究，结果表明，南美斑潜蝇成虫的飞翔活动是由日光启动的，并在日出后迅速达到高峰，之后逐渐下降。6:00~7:00 时为成虫最活跃的时间段，随气温的升高黄卡诱集量逐渐下降，且到傍晚当温度与光线条件与早晨相似时，种群数量未出现第二个高峰。

南美斑潜蝇成虫活动随季节而变动，在云南呈贡县该虫夏季日活动高峰在 7:30~9:30 时和 17:30~19:30 时，冬季日活动高峰期在 11:00 和 15:00。气温对成虫活动有明显影响，气温高成虫活跃，气温降低成虫活动缓慢，另外，风向，叶位，叶片正、反面等因素也与成虫活动有关，背风处可诱集到较多的成虫。成虫喜光，在叶片向光面成虫较多。

六、幼虫取食及脱道化蛹习性

(一) 幼虫的龄期划分及潜食行为

南美斑潜蝇幼虫有 3 龄，可根据头咽骨和口钩长度来区分(表 5-2)。1 龄、2 龄幼虫的口钩蜕皮时遗留在虫道中，3 龄幼虫的口钩遗留在蛹壳腹面前端。

表 5-2 幼虫各龄期的头咽骨和口钩长度(刘月英, 1999)

龄 期	长度/ μm	
	头咽骨	口钩
1 龄	126.36 \pm 8.70	29.21 \pm 1.20
2 龄	198.73 \pm 13.56	49.81 \pm 6.78
3 龄	294.12 \pm 22.25	83.60 \pm 7.22

1 龄幼虫从卵中孵化后，即开始取食。与美洲斑潜蝇不同，幼虫喜沿叶脉进行取食，用口钩不断刮食叶肉的海绵组织或栅栏组织，尤喜食下层的海绵组织，残留下表皮或上表皮，形成浅绿色或白色潜道，潜道比美洲斑潜蝇潜道略宽，从叶正面看，潜道常不连续或紧沿叶脉形成，易与美洲斑潜蝇形成的潜道区分。低龄幼虫在潜道内一般只向前取食，3 龄幼虫在潜道内常左右来回取食，形成的虫道较宽，有时形成一个潜食斑。幼虫昼夜均可进行取食，虫道宽度和面积随幼虫龄期的增加而不断增加，1 龄幼虫蛀食面积平均为 4.12mm²，而 3 龄幼虫达 163.2mm²(表 5-3)。

表 5-3 幼虫各龄期虫体大小及潜道宽度(刘月英等, 1999)

龄期	虫体长/mm	虫体宽/mm	被蛀叶面积/mm ²	潜道宽度/mm
1 龄	0.62±0.11	0.17±0.16	4.12±0.75	0.17~0.5
2 龄	1.31±0.24	0.28±0.05	20.46±10.11	0.5~1.0
3 龄	2.47±0.36	0.57±0.09	163.2±36.6	1.0~2.3

Parrella 等(1985)采用同位素标记的方法测定了南美斑潜蝇潜道对光合率的影响, 结果表明南美斑潜蝇的潜食对周围组织的各项生理指标均有明显影响。光合作用和叶肉传导性明显降低, 分别为对照的 80.5%和 78.4%。另外对气孔的传导性也有一定影响。

(二) 老熟幼虫脱道化蛹规律

幼虫老熟后, 在虫道末端附近咬破一半圆形切口, 脱出虫道化蛹。在温室自然变温情况下, 老熟幼虫脱道高峰为早晨 7:00~9:00 时, 脱道在上午全部完成。化蛹高峰为 7:00~11:00 时, 8:00~10:00 时之间化蛹最多(表 5-4)。

表 5-4 自然变温下幼虫脱道规律(刘月英等, 1999)

观察时间	脱道的幼虫数	化蛹数	温度/℃
6:00	18	6	22.5
7:00	46	17	24
8:00	75	45	27.5
9:00	37	63	29.5
10:00	15	37	33.5
11:00	4	25	35
13:00	0	2	37
17:00	0	0	34

在恒温条件下, 29℃、24℃、20℃和 14℃下老熟幼虫脱道比例数最高的时间段分别为 6:00~7:00 时, 7:00~8:00 时, 8:00~9:00 时和 9:00~10:00 时, 上午 12:00 时以前 90%以上老熟幼虫完成脱道(表 5-5)。

表 5-5 恒温下老熟幼虫脱道规律(刘月英等, 1999)

时间/时	29℃		24℃		20℃		14℃	
	百分比 /%	累积百分 比/%	百分比/%	累积百分比 /%	百分比 /%	累积百 分比/%	百分比/%	累积百分 比/%
6:00~7:00	49.37	49.37	27.03	27.03	10.87	10.87	3.21	3.21
7:00~8:00	32.91	82.28	56.76	83.79	17.39	28.26	4.11	7.32
8:00~9:00	11.39	93.67	8.11	91.90	43.48	71.74	26.5	33.82
9:00~10:00	6.33	100	5.42	97.32	19.56	91.30	29.50	63.32
10:00~11:00			2.68	100	6.52	97.82	18.75	82.07
11:00~12:00					2.17	100	12.4	94.47
12:00~15:00							5.53	100

当给予连续光照时, 老熟幼虫昼夜均可脱道化蛹, 且各时间段脱道虫量较均匀。老熟幼虫脱出虫道后即寻找适宜的场所化蛹, 化蛹场所因寄主和环境条件而异。多数情况

下老熟幼虫从叶片上滚落地面，在土表或表土层中化蛹，少数直接在植物叶片上化蛹。在一些寄主如矮生菜豆上，在叶片上化蛹的比例较高。极少数在叶片内或茎秆中化蛹。

七、成虫的趋黄性及其利用

与斑潜蝇属其他种类一样，南美斑潜蝇成虫对黄色也有强烈的趋性，许多学者对黄卡颜色、形状、大小、放置方式、位置等与诱捕南美斑潜蝇成虫效果的关系进行了研究。

不论何种作物和高度，均以柠檬黄诱捕效果最好，诱虫量比橘黄色、土黄色、淡黄色多 0.6~1.5 倍。一般作物地黄卡应与作物等高或稍低，搭架的高秆作物，黄卡高度在 60cm 即可。背风面诱虫量明显高于迎风面。黄卡平行放置诱虫量为垂直放置诱虫量的 1.3 倍，但因放置麻烦不易推广。自制黄卡时，塑料万通板优于塑料泡沫板、木板、硬纸板等。黄卡表面涂黏虫胶诱虫效果较好，凡士林效果差。

多数学者研究结果表明，黄卡对雄虫的吸引力强于雌虫。有报道表明黄卡上南美斑潜蝇雄虫与雌虫性比为 16:1。但也有些试验结果相反。如 Weintranub 和 Horowitz(1996)在马铃薯田距地面 10cm、30cm、50cm、70cm 高度设置了黄卡，捕获的雌虫占 51.2%~65.6%。

利用黄卡诱杀南美斑潜蝇具有简便易行、无污染的特点，特别在蔬菜、花卉大棚应用效果较好，能明显降低虫口密度，可作为综合防治南美斑潜蝇的技术手段之一，同时也是监测成虫发生动态的有效方法。

第六节 生态学特性

一、温度对南美斑潜蝇发育历期和存活率的影响

在矮生菜豆上，南美斑潜蝇各虫态发育历期随温度的升高相应变短(表 5-6)，温度与发育速率之间呈逻辑斯蒂曲线关系。14℃时卵平均历期为 6.54d，幼虫期及蛹期均较长，分别为 16.25d 和 23.10d，完成一代需 45.89d。29℃下卵期只有 2.00d，完成一代仅需 13.93d。根据北京市 10 年气象资料推算，在南美斑潜蝇发生量较大的 6~7 月，北京地区平均温度为 24.7~26.3℃，每月可发生 1 代多(刘月英，1999)。

表 5-6 不同温度条件下南美斑潜蝇各虫态发育历期(刘月英，1999)

温度/℃	卵期/d	幼虫期/d	蛹期/d	卵-蛹期/d
14	6.54±0.54	16.25±0.93	23.10±0.82	45.89
20	3.65±0.16	7.93±0.79	11.92±0.47	23.50
24	2.37±0.14	6.46±0.80	8.67±0.37	17.50
29	2.00±0.29	5.22±0.94	6.71±0.03	13.93

温度(t)与各发育期(V)之间的关系可表示为:

$$\text{卵期: } V=0.5417/[1+\exp(4.6720-0.2471t)] \quad (r=0.99^{**})$$

$$\text{幼虫期: } V=0.1724/[1+\exp(3.4528-0.2345t)] \quad (r=0.98^{**})$$

$$\text{蛹期: } V=0.1500/[1+\exp(3.4128-0.1925t)] \quad (r=0.99^{**})$$

$$\text{世代: } V=0.0691/[1+\exp(3.6491-0.2170t)] \quad (r=0.99^{**})$$

不同温度下，南美斑潜蝇各虫态历期在总历期中所占比例变化不大，卵期占

13%~15%，幼虫期占 33%~37%，蛹期占 48%~50%。

温度对南美斑潜蝇实验种群存活率的影响因不同虫态而异，卵和幼虫的存活受温度影响较小，蛹期存活受温度影响较大。在 14~29℃ 范围内，卵存活率均达 90% 以上，幼虫存活率为 87.8%~93.7%，而蛹存活率则因温度不同明显不同，20~24℃ 时存活率为 70% 以上，29℃ 下只有 25.3% 的蛹羽化为成虫。从温度对整个世代存活率的影响看，20℃ 和 24℃ 下世代存活率较高，分别为 64.6% 和 63.8%，14℃ 和 29℃ 下由于蛹期存活率的显著下降，导致了整个世代存活率的明显降低，高温比低温更不利于蛹的羽化，即温度对南美斑潜蝇种群的影响主要发生在蛹期，蛹期是决定世代存活率的关键期。整个世代的存活率(Y)与试验温度(X)呈抛物线关系，可用方程式 $Y = -231.058 + 29.0109X - 0.7114X^2$ 来表示(雷仲仁等，1999)。

南美斑潜蝇对高温较敏感，30℃ 以上即不能完成整个世代。31℃ 下卵的孵化率只有 57.9%，幼虫不能化蛹。33℃ 下卵孵化率仅为 1.2%。成虫在 37℃ 恒温条件下，致死中时在 4.5h 前后，41℃ 下成虫全部在 3.5h 内死亡。因此与美洲斑潜蝇相比，南美斑潜蝇对高温的耐受性较差，夏季高温可造成其种群数量显著下降。其生存的适温区也相应偏低，在 18~25℃ (刘月英，1999)，适宜在温凉的气候条件下生活。云南省的滇中地区处于低纬度、高海拔的区域，终年气候温凉，已成为南美斑潜蝇的重发生区。青海、贵州等省份的一些地区也具备类似特点，同样已成为南美斑潜蝇的适生区。

二、温湿度对蛹羽化率的影响

刘月英 (1999) 研究发现，温度、湿度及温湿度综合因素对蛹羽化均有极显著的影响(表 5-7)。

表 5-7 不同温湿度条件对南美斑潜蝇蛹羽化率的影响(刘月英，1999)

温度/℃	相对湿度/%	蛹羽化率/%
20	10	19.44 i
	30	27.78 h
	50	46.67 ef
	70	55.00 d
	90	75.00 a
	100	58.33 cd
24	10	25.00 h
	30	41.67 g
	50	50.00 c
	70	61.11 bc
	90	75.00 a
	100	61.82 bc
29	10	13.75 j
	30	26.5 h
	50	41.67 g
	70	44.44 fg
	90	63.34 b
	100	48.33 ef

注：表中英文字母不同者表示有显著差异($P < 0.05$)。

20℃、24℃与相对湿度90%组合中南美斑潜蝇蛹羽化率最高，为75%，温度升高或湿度降低时，蛹羽化率均有不同程度下降。湿度低于30%时显著影响蛹的羽化，高温低湿组合对蛹羽化影响最大，28℃、RH为10%时蛹的羽化率仅为13.75%。湿度为100%时蛹易发霉，影响羽化的正常进行。蛹羽化率(Y)与温度(X₁)和湿度(X₂)因子之间的关系可用 $Y = -167.803 + 16.117X_1 + 0.765X_2 - 0.341X_1^2 - 0.006X_1X_2 - 0.003X_2^2$ (r=0.9318**)表示(刘月英, 1999)。

三、各虫态的发育起点温度和有效积温

在恒温条件下，南美斑潜蝇幼虫发育起点温度最低，为6.24℃，蛹期的发育起点温度最高，为7.9℃，完成发育所需积温最多，为140.70DD。完成一个世代的有效积温为298.35DD(表5-8)(刘月英, 1999)。根据北京地区气象资料推算，北京全年可发生8代左右。

表 5-8 南美斑潜蝇各虫态发育起点温度与有效积温(刘月英, 1999)

虫 态	发育起点温度/℃	有效积温/DD	发育速率与温度回归关系式	相关系数
卵	7.78	41.52	$V=0.02414T - 0.18773$	0.9895
幼虫	6.24	117.19	$V=0.00861T - 0.05375$	0.9940
蛹	7.97	140.70	$V=0.00710T - 0.05660$	0.9996
卵- 蛹	7.37	298.35	$V=0.00336T - 0.02475$	0.9990

四、温度对南美斑潜蝇成虫取食产卵的影响

在室内恒温条件下，24℃成虫取食活动最活跃，一生总取食量最大，其他依次为20℃、14℃、29℃、33℃(表5-9)。日均食量也以24℃时最高，但与29℃和33℃的日均食量之间无显著差异，20℃和14℃下日均取食量显著减少，即低温条件下，成虫取食活动受到抑制，日食量减少，但由于寿命长，总取食量仍能保持较高水平。

表 5-9 不同恒温条件下南美斑潜蝇取食反应(刘月英, 1999)

温度/℃	平均每雌一生总取食孔数	平均每雌每日取食孔数
14	4148.1±1741.8 b BC	209.65±38.64 c C
20	5990.09±2712.93 a AB	351.02±53.63 b B
24	7383.91±2141.98 a A	505.13±90.81 a A
29	3939.82±783.17 b BC	450.87±58.81 a AB
33	2774.58±1204.36 b C	464.06±150.91 a A

注：表中不同大写字母表示差异极显著(P<0.01)，不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，下同。

温度对南美斑潜蝇成虫产卵有明显影响。不同温度条件下，成虫一生总卵量、日均

产卵量不同(表 5-10)。24℃ 下南美斑潜蝇总产卵量最高, 平均为 555.91 粒, 单雌最大卵量达 787 粒。日产卵量也最高, 平均为 38.97 粒, 最长达 96 粒。在 14℃ 下, 成虫总产卵量为 229 粒, 日均卵量为 10.98 粒, 而在 33℃ 下成虫一生卵量仅为 25.22 粒, 日均卵量为 4.37 粒。说明南美斑潜蝇对低温的适应性较强, 对高温较为敏感。

表 5-10 不同恒温条件下南美斑潜蝇的产卵反应(刘月英, 1999)

温度/℃	平均每雌总产卵量	一生最高产卵量	平均每雌日产卵量	日最高卵量	产卵前期/d
14	229.2±135.04 cB	493	10.98±4.18dCD	50	2.50±0.78aA
20	424.73±150.95 bA	682	25.99±4.36bB	57	1.00±0.49bB
24	555.91±141.75 aA	787	38.97±9.42aA	96	0.82±0.72bB
29	141.55±26.68cBC	180	16.6±4.03cC	47	0.73±0.45bB
33	25.22±18.35 dC	124	4.37±3.97 eD	45	0.75±1.53 bB

总产卵量(Y)与温度(X)之间的关系可用回归式 $Y = 1.262X - 13.7$ ($F = 25.844$, $P < 0.01$, $df = 31$, $r^2 = 0.4628$) 表示。由上式解出理论产卵阈值温度为 10.88℃。在较高温度下, 两者之间变为非线性关系。累积产卵百分比(Y)与累积日度(X)之间的关系为 $Y = 109.1[1 - \exp(-0.009988X)]$ ($r^2 = 0.8873$, $P < 0.01$)。

24~33℃ 范围内, 南美斑潜蝇成虫产卵前期平均短于 1d, 14℃ 下产卵前期平均为 2.50d。温度对雌虫产卵与取食比率也有影响(表 5-11), 24℃ 和 20℃ 下雌虫总产卵与取食比率显著高于其他 3 个温度, 日均产卵与取食比率显著高于 29℃ 和 33℃, 与 14℃ 无显著差异。33℃ 下总产卵与取食比率仅为 0.01, 表明 33℃ 已接近其产卵的上限温度(刘月英, 1999)。

表 5-11 不同温度条件下产卵与取食比率(刘月英, 1999)

温度/℃	平均每雌总产卵孔与取食孔比率	平均每雌每日产卵孔与取食孔比率
14	0.052±0.018bB	0.046±0.024aAB
20	0.076±0.018aA	0.059±0.021aA
24	0.077±0.012aA	0.059±0.027aA
29	0.036±0.006cB	0.029±0.018bB
33	0.01±0.014dC	0.008±0.005cC

不同温度条件下南美斑潜蝇成虫一生的取食产卵活动呈现出不同的变化规律。14℃ 下成虫日取食、产卵量均较小, 但因寿命较长, 取食、产卵活动持续时间也长, 较活跃的取食产卵活动出现在第 5~20d, 产卵高峰在第 7~9d, 取食高峰在第 5~7d。20℃ 下取食、产卵高峰在第 4~7d。24℃ 下取食、产卵高峰期长达 9d(第 3~11d), 第 3~4d 达到最高峰值。29℃ 下第 2~5d 为取食产卵高峰期, 33℃ 下取食产卵活动集中, 峰值出现在第 2d, 其产卵量占总卵量的 43.9%, 之后即明显下降。

雌虫寿命随温度的升高而缩短，在较低的 14℃ 下，平均寿命为 20d，最长可达 38d。20~24℃ 下雌虫平均寿命为 16.8~14.6d，33℃ 下平均寿命仅为 5.8d，最长寿命 8d(表 5-12)。

表 5-12 不同温度条件下雌虫寿命(刘月英, 1999)

温度/℃	雌虫平均寿命/d	雌虫寿命范围/d
14	20.00±7.84 aA	8~38
20	16.82±7.22 abA	8~36
24	14.64±4.00 bAB	9~23
29	8.91±1.83 cBC	6~13
33	5.75±1.48 cC	3~8

五、南美斑潜蝇的空间分布特点和种群动态规律

南美斑潜蝇对于不同种类、不同高度的作物，有在作物顶端层飞翔的活动特性，活动种群数量在此层面上最大。南美斑潜蝇幼虫和卵的空间分布为聚集分布，分布的基本成分为个体群。

南美斑潜蝇种群动态与季节变化有密切关系(如图 5-2)。王音等(1998)采用黄卡对北京地区南美斑潜蝇种群消长进行了监测。结果表明，在北京地区，南美斑潜蝇 3 月中旬始见，6 月中旬以前数量很少，随后虫口逐渐上升，7 月上旬达到最高虫量，同时田间作物出现明显的被害状。之后虫量逐渐下降。7 月底~9 月中旬进入越夏，黄卡未诱到成虫。9 月中旬~11 月上旬虫口数量维持低水平，11 月上旬以后进入越冬，田间再无成虫活动。温室内一年四季均可见南美斑潜蝇活动，但高峰期也出现于 6 月中、下旬~7 月初，与田间高峰同步。这是由于此时的温室处于开放状态，与田间环境相通，南美斑潜蝇成虫易于在温室与大田间迁移。田间发生盛期为 6 月中、下旬~7 月中旬，是这一时期田间蔬菜潜叶蝇优势种类，占潜蝇总量的 60%~90%。主要受害蔬菜为黄瓜。昆明地

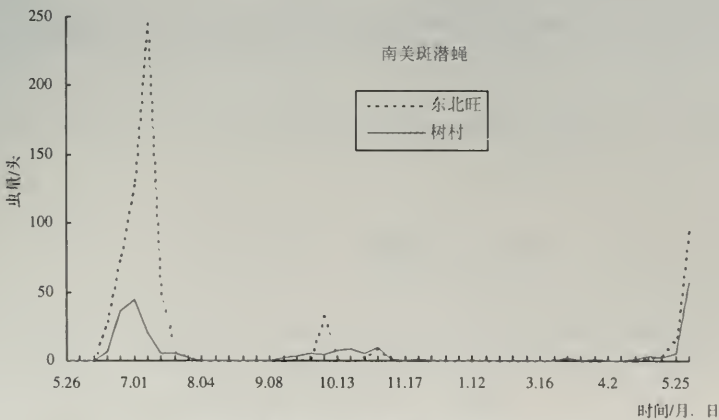


图 5-2 露地南美斑潜蝇种群消长曲线

区南美斑潜蝇一年四季都有发生,无明显越冬现象。成虫高峰期出现在4月中旬~5月上旬,最高种群数量出现在4月下旬(2895头/100网),此时,不同寄主上种群数量由高到低依次为茼蒿、芹菜、菜心、菠菜。成虫另一高峰期出现在10月下旬~11月下旬,种群数量低于前一峰期(356.2头/100网),这段时间受害较重的蔬菜有芹菜、茼蒿、苦菜、茼蒿、菠菜、菜心。冬季由于气温低,南美斑潜蝇发育缓慢,虫量较少,1月上旬虫口密度最低(15.7头/100网)。夏季由于雨水多,南美斑潜蝇自然死亡率较高,因而发生量也较小,6月中下旬每100网虫量为32头。

第七节 预防、根除与控制

见第四章第八节部分。

(雷仲仁 王 音)

主要参考文献

- 雷仲仁,王音,刘月英.1999.南美斑潜蝇与美洲斑潜蝇的生物学比较研究.见:植物保护与植物营养研究进展.北京:中国农业出版社.280~284 [Lei Z R, Wang Y, Liu Y Y. 1999. Biological comparison between *Liriomyza huidobrensis* and *L. sativae*. In: Reseach Progress in Plant Protection and Plant Nutrition. Beijing: China Agricultural Press. 280~284]
- 刘月英.1999.南美斑潜蝇主要生物学、生态学特性研究.西北农业大学硕士论文 66 [Liu Y Y, 1999. Biological and Ecological Studies of the vegetable leafminer *Liriomyza huidobrensis* Blanchard. Dissertation for Master's Degree. 66]
- 王音,雷仲仁,问锦曾.1998.南美斑潜蝇的形态特征及危害特点.植物保护,24(5):30 [Wang Y, Lei Z R, Wen J Z. 1998. Morphology and damaging characteristics of *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard). *Plant Protection*, 24(5): 30]
- 问锦曾,雷仲仁,王音.1998.云南贵州两省南美斑潜蝇的考察.植物保护,24(3):18~20 [Wen J Z, Lei Z R, Wang Y. 1998. A survey of south american leafminer in Yunnan and Guizhou provinces. *Plant Protection*, 24(3): 18~20]
- 杨曾实,肖宁年,李志敏.1999.昆明地区南美斑潜蝇寄主植物(花卉)及防治对策.西南农业学报,12(斑潜蝇专辑):14~19 [Yang Z S, Xiao N N, Li Z M, Liu P. 1999. Ornamental flower host plants and controlling tactics of *Liriomyza huidobrensis* in Kunming. *Southwest China J. of Agri. Sci.*, 12(Special issue): 14~19]
- Spencer K A.,1990. Host specialization in the world Agromyjididae(Diptera) Ser. Ent.,45, Dordrecht, Netherlands; Kluwer Academic Publishers. 444
- Parrella M P, Jones V P, Youngman R R. 1985. Effect of leaf mining and leaf stippling of *Liriomyza* spp. on photosynthetic rates of chrysanthemum. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 78: 90~93
- Weintraub P G, Horowitz A R. 1996. Spatial and diel activity of the pea leafminer (Diptera: Agromyzidae) in potatoes, *Solanum Tuberosum*. *Environ. Entomol.*, 25(4): 722~726

第六章 马铃薯甲虫

第一节 起源与分布	219	第四节 危害现状与生态经济影响	222
第二节 形态特征与早期诊断	220	第五节 生物学与生态学特性	222
第三节 传播途径	221	第六节 预防、根除与控制	226

摘要 马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata*(Say)是具有毁灭性的茄科作物大害虫,原产于北美洲,目前分布于欧洲和亚洲的 30 多个国家和地区,1979 年已扩展到中国的边界地带,对我国农业生产具有极大危险性。本章主要根据近十年的文献资料,对该虫的起源与分布、形态特征、传播、危害现状与经济影响、生物学与生态学、预防与控制等方面的内容进行了综述。

关键词 马铃薯甲虫 传播途径 生物学特性 综合防治

Chapter 6 Colorado Potato Beetle *Leptinotarsa decemlineata* (Say)

Abstract: Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say), originating from North America, is a disastrous pest to solanaceous crop. The pest has distributed in more than 30 countries and areas in Asia and Europe. In 1979 the pest had spread to the region near China. Based on literatures of the last 15 years, the origin and distribution, spread, damage and economic impacts, morphology, biological and ecological features were reviewed. The prediction, prevention and control strategies of the pest were also summarized in this paper.

Key words: *Leptinotarsa decemlineata* (Say), spread pathway, biology, control and management

第一节 起源与分布

马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata*(Say)(Colorado potato beetle) 最早于 1823 年在北美洲落基山脉发现,主要取食一种普通杂草(*Solanum rostratum*, Buffalo bur),但其原产地可能是墨西哥而非美国的克罗拉多州(Hare, 1990)。

马铃薯甲虫目前已分布于欧洲和亚洲的 30 多个国家和地区。19 世纪中叶,当美洲

开拓者在落基山脉开始种植新作物(特别是马铃薯)之时, 马铃薯甲虫即转移到其上并开始为害。1859年马铃薯甲虫进入美国内布拉斯加利福尼亚州猖獗为害, 并向东扩散, 在美国东海岸蔓延, 迅速成为该地区马铃薯最重要的和最具毁灭性的害虫。1876年马铃薯甲虫被无意地传入欧洲, 人们在 Bremen 附近发现了一些种群, 1877年在 Liverpool 港口也发现有马铃薯甲虫个体, 现在马铃薯甲虫已在除英国以外的整个欧洲地区定居下来, 并经由东欧和亚洲向东和向南扩展。1949年马铃薯甲虫传入原苏联, 蔓延到俄罗斯、乌克兰、哈萨克斯坦, 1979年已扩展到中国的边界地带(王春林和赵建周, 1994)。

第二节 形态特征与早期诊断

一、形态

如图 6-1 所示。



图 6-1 马铃薯甲虫及其为害状

A. 卵(W.Granshaw 摄) B. 幼虫(G.Brust 摄) C. 成虫(W.Granshaw 摄) D 为害状(W.Granshaw 摄)

成虫: 成虫体长 9~12mm, 体宽 6~7mm; 短卵圆形, 背方明显隆起, 红黄色, 有光泽; 鞘翅色稍淡, 每一鞘翅具有五条黑色纵带。

头下口式, 横宽, 背方稍隆起, 向前胸缩入达眼处, 唇基前缘几乎直, 与额区有横沟为界, 上面刻点大而稀; 额和头顶稍隆起, 刻点大而稀, 额中区刻点小; 复眼肾形; 触角 11 节, 第一节长而粗, 第二节短, 五六节等长, 六节明显宽于五节, 末节圆锥形; 口器咀嚼式; 上唇显著横宽, 中央浅缺切, 生有前缘刚毛; 上颚 3 个明显的齿; 第四齿

不显著，下颚为轴节和茎节，茎节端分为内颚叶和外颚叶，密被刚毛；下颚须四节，末节较前一节明显短而狭窄；下唇须3节。

前胸背板隆起，宽为长的两倍；鞘翅坚硬隆起，侧方稍圆形，端部稍尖，肩部不明显突出；翅表靠近翅缝的刻点行短，其他10个刻点行宽整齐，外侧两行远离相邻的行；鞘翅缘褶发达，端部生一系列短毛。

足短，转节三角形，股节稍粗侧扁，胫节向端部放宽，外侧有一纵沟，边缘锋利，跗节显4节，前三节下方具有浓密的毛刷，第三节卵圆形，端部凹入，第四节短，第五节狭长，两爪相互靠近，基部无附齿。

雌雄两性成虫外形差异不大，雄虫最末腹板比较隆起，具一纵凹线；雌虫体稍大，无凹线。

幼虫：1龄、2龄幼虫暗褐色，3龄以后渐变鲜黄色、粉红色或橙黄色；1龄、2龄幼虫头及前胸背板骨片及胸、腹部的气门片暗褐色或黑色，3龄、4龄幼虫色淡，幼虫背方明显隆起；头下口式，头盖缝短，额缝由头盖缝发生，开始相互平行延伸，然后呈一钝角分开；头每侧有6个小眼，分两组，上方4个，下方4个；触角3节，短；头壳只具初级刚毛，短；每一顶叶生刚毛5根，额阔三角形，前缘生刚毛8根，上方生刚毛2根；唇基横宽，着生刚毛6根，排成一排；上唇横宽，显著比唇基窄，前缘略直，中部凹缘狭而深，上唇前缘生刚毛10根，中区生刚毛6根和毛孔6个；上颚三角形，具端齿5个，上部1个齿小。1龄幼虫前胸背板骨片黑色，随龄变化，前胸背板颜色变淡，仅后缘仍为黑色，除最末两个体节外，虫体每侧有两行大的暗色骨片——气门骨片和上侧片骨片。腹部体节上气门骨片呈瘤状突出，包围气门。中、后胸因缺少气门，气门骨片完整。4龄幼虫气门骨片和上侧片骨片上无显著刚毛。背部骨片蜕化或保留短刚毛，每一体节背方约有8根刚毛，排列两横列。腹部第八、九节背板各有一大的不成对骨片，骨片后缘着生粗刚毛。气门圆形，缺少气门片，气门位于前胸后侧和第八腹节上。足中等长短，由4节组成，足基节长，转节三角形，具短刚毛3根，胫节和股节不太延长，爪大，骨化强，基部附齿呈巨形。

二、早期诊断

栽培作物、自生植物和田间放置马铃薯堆，均可用作早春马铃薯甲虫的监测。在这些植物基部可以放置一些枝叶，然后轻轻拍打植株驱赶马铃薯甲虫。如果发现了马铃薯甲虫，就应该进一步检查这些植株叶片的背面，以确认是否已有产卵。

第三节 传播途径

迁飞是马铃薯甲虫传播的主要途径，其生活对策具有迁飞和滞育等特点，允许其在一个不稳定的栖息环境中在时间和空间上通过其卵的分布来生存和繁衍，具有极强的适应能力，能长距离飞行，而且越冬种群的大部分在未取食情况下可存活一个月，有能力从其越冬场所到几公里以外的栖息地定居。雌虫在春天不需要交尾即可开始飞行和产生后代，单一定居的雌虫很容易发展成为成功的入侵种群。

第四节 危害现状与生态经济影响

马铃薯甲虫是世界范围内马铃薯的毁灭性害虫,可将马铃薯叶片吃光,在植物生长周期中的特定时期可造成绝产绝收。1991年马铃薯甲虫在美国引起了严重的经济问题,据密执根州马铃薯种植业研究会和生产研究组织1991~1994年间的报告,当地马铃薯甲虫对杀虫剂产生严重的抗性,引起防治费用剧增,马铃薯产量大幅下降,1991年以后的马铃薯甲虫平均防治费用高达306美元/hm²,在马铃薯甲虫危害严重地区,平均防治费用达412美元/hm²;在马铃薯甲虫抗性未出现之前,密执根州地区的防治费用为35~74美元/hm²,产量损失约为12.2%,而在马铃薯甲虫出现抗性并严重危害后其产量损失高达20.5%。1994年该区种植业损失为1.43亿美元,是该种作物受到其他多种农业害虫危害的总和,该州每年防治费用高达90万~140万美元(Grafius, 1977)。

第五节 生物学与生态学特性

一、生活周期

在美国马铃薯甲虫一年可发生2代,在欧洲1~3代,马铃薯甲虫大部分以成虫在深度为7.6~12.7cm的土壤内越冬,春季土温15℃时成虫出土后靠爬行和飞行扩散至其寄主上并立即取食,发育适温25~33℃,5~10d后卵块产于叶片的背面,卵块一般20~60粒卵。成虫可多次交配,雌虫在其滞育之前和之后均可交配。在25℃的室内,新羽化的雌成虫55d后约有50%死亡,寿命最长可超过120d。成虫在其繁殖期内可产多个卵块。在室内,雌虫羽化后5~7d开始产卵,羽化约15d后达到产卵高峰,30d后产卵量迅速下降,单雌产卵量可超过400粒,产卵期2个月。卵期5~7d,幼虫期15~35d,4龄幼虫食量占77%,老熟幼虫入土化蛹,蛹期7~10d,羽化出土后继续为害。多雨年份发生轻。

同一卵块的卵粒孵化较整齐,初孵幼虫立即取食。幼虫期分四龄,因环境温度高低的不同其历期为10~20d;幼虫期的食叶量因不同寄主植物的适合性而异,但在不同寄主中每一龄期食叶量的比例较稳定,1龄约占3%,2龄约占5%,3龄约占15%,4龄约占77%。

幼虫在4龄之后停止取食,坠入寄主下面的土表并入土做洞,变为静止不动的预蛹,然后化蛹。约10d后,新羽化的成虫出土,爬向其最近的寄主开始取食;受当时的气温,光周期及寄主植物条件等许多因素的影响,成虫有不同的反应,包括交配并繁殖下一代,飞行迁移或停止取食进入滞育状态。越冬种群可以有不同世代的个体。

在欧洲和北美洲都已对马铃薯甲虫滞育的生理学做了大量研究。诱导初羽化成虫滞育最重要的因素是光周期,环境温度和食料质量会对光周期的影响起辅助作用。马铃薯甲虫属于长日照型,当感受到临界短日照后会进入滞育。临界光周期因昆虫种群所处纬度而异,一般是南部种群比北部种群所需诱导滞育的光周期较短,北部种群(高于北纬45°)的临界光周期可达16h,而南部种群(如北纬32°)可缩短约为12h。有些种群对光周期反应不敏感,如得克萨斯州的一个种群(北纬26°)。

高温会降低甲虫对光周期的敏感性,这使得该虫在较温暖的高纬度地区也能发生。

不同的种群对于温度的反应也有异,如与长岛的沿海温暖地区相比诱导纽约州北部甲虫滞育的临界光周期较长,低温对滞育的诱导作用也更强。昆虫龄期、生理状态和马铃薯叶片营养质量对诱导滞育和咽侧体活动的影响,在同样的光周期条件下,取食衰老马铃薯叶片的新羽化的雌成虫会有 50%以上进入滞育,而取食同一植株上幼嫩或成熟叶片的甲虫其咽侧体小且无分泌活动,然而其中取食成熟叶片的甲虫其咽侧体比取食幼嫩叶片者小 26%,咽侧体这种差异与日均产卵量降低 50%呈正相关。此外,当将取食幼嫩叶片的甲虫咽侧体移植到取食成熟叶片的甲虫上时,即使该甲虫继续取食成熟叶片也会对产卵有刺激作用。

马铃薯甲虫取食适合性较差的寄主植物时易发生夏季滞育。完全用茄属野生植物 (*Solanum dulcamara*) 饲养的马铃薯甲虫,其第一代雌虫有 2/3 进入滞育,不能繁殖第二代,而完全用马铃薯饲养的雌成虫则全部能繁殖,由此推测野生寄主对滞育有诱导作用,是对寄主营养质量逐渐降低的适应性反应。

二、寄主范围与寄主扩大

马铃薯甲虫的寄主范围较窄,主要是茄科的 20 余种植物,其中大部分是茄属 *Solanum*,其他属很少。在这些较少的寄主植物中,其适应性有一定差异。对于大部分马铃薯甲虫种群来说,最适宜的寄主作物是马铃薯,以及其原始寄主 *Solanum rostratum*、*S. augustifolium* 和原产于欧洲现已广泛分布于北美洲的欧白英以及茄子,其他的一些种只是偶然取食,如作物番茄和野生寄主植物 *S. rostratum*、*S. sarrachoides*、*S. elaeagnifolium* 及天仙子 *Hyoscyamus niger* 等。

茄属植物产生的挥发性化学物质有引诱马铃薯甲虫成虫的作用,甲虫能接受茄属植物产生的挥发性混合物的引诱,但尚不明确是否有较远距离的作用和影响该虫在田间的运动行为。寄主和非寄主植物中的多种植物性化学物质可刺激马铃薯甲虫的取食行为,已知的取食刺激物包括蔗糖、丙氨酸、 γ 氨基丁酸、丝氨酸、氯原酸、多种磷脂和至少一种未鉴定出的类黄酮物质。

在茄属不同种植物对甲虫的适应性与植物产生的配糖生物碱之间存在一定的关系,在早期针对抗马铃薯甲虫育种的工作,大部分重点研究从不适于甲虫存活和生长的茄属植物中提取的特定配糖生物碱,对甲虫起驱避和有毒作用。

马铃薯甲虫最初将马铃薯扩展为寄主,是其最重要的寄主范围的变化,此外还发生了特定甲虫种群在寄主范围上的其他重要变化。这些变化绝大多数表现为寄主的扩大,而不是寄主种类的变换。当产生利用新寄主的能力时,并不随之丧失利用旧寄主的能力。即使将该虫从旧寄主中隔离开饲养 100 多代后,它仍具有识别旧寄主的感觉能力;其感觉系统不需产生任何较大变化即可扩展其寄主范围。

此外,寄主植物适应性不同的甲虫种群间,通常并没有同工酶或染色体核型上的差异,利用同工酶分析,可区分一个可能是古老的墨西哥种群与 11 个来自美国和欧洲的农田重要害虫种群,然而这 11 个农田种群间不能用电泳方法区分开,这也许与每个种群内的高度异质性有关。

马铃薯甲虫种群对当地丰富的新寄主植物具有很好的适应能力。例如,*S.*

elaeagnifolium 是大多马铃薯甲虫种群不大适宜的寄主,而美国亚利桑那州的一个地理上隔离的种群却能在这种寄主植物上存活,且生长良好。该种群也能在马铃薯上存活和生长。北卡罗莱纳州的甲虫已将其寄主范围扩展为可利用 *S. carolinense*, 且利用马铃薯的能力并未改变。该新寄主植物对于新英格兰地区和古老的墨西哥种群并非适宜寄主。北卡罗莱纳州的甲虫与其北边的种群相比,似乎在栽培的番茄上能更好的存活。另一来自非农田的马铃薯甲虫种群,除了马铃薯和 *S. rostratum* 之外还能取食 *S. sarrachoides*, 在这3种寄主植物上均存活良好,而不易见到 *S. sarrachoides* 的其他甲虫种群在此寄主上存活(王春林和赵建周, 1994)。

三、光照、温度和取食对马铃薯甲虫飞行的影响

马铃薯甲虫一般是通过爬行和飞翔来活动,其飞翔有不同类型, Voss 和 Ferro 报道有3种飞翔行为,即本地飞翔(在原栖息地的小飞翔)、离开原栖息地的长距离飞翔和发生在夏末飞行到附近树林中的滞育飞翔(Voss and Ferro, 1990)。

气温和太阳光对马铃薯甲虫的飞翔的影响。飞翔高峰的温度在 20~25℃ 范围内(Wegorek, 1959),开始飞翔的最低温度为 17℃。马铃薯甲虫飞翔的百分比随着太阳光的增加而增多(Le Berro, 1962)。密执安州立大学的研究结果,在 15℃ 以下时没有观察到马铃薯甲虫的飞翔,当温度达到 20℃ 时,所有没有取食的马铃薯甲虫全部飞翔。太阳光线强度大时,马铃薯飞翔更频繁。

取食对飞翔的影响。田间饥饿实验,70%的马铃薯甲虫在滞育后没有取食(饥饿 10d)就飞翔,只有 30%的甲虫在取食后飞翔。在马铃薯甲虫先取食再饥饿的实验中,增加饥饿时间,反应没有显著差异。但完全饥饿和完全取食后的马铃薯甲虫飞翔百分比差异显著。总的来说,饥饿的马铃薯甲虫比刚取食过的马铃薯甲虫能进行更长距离的飞行(高度大于 15m),能飞到 15m 高度的马铃薯甲虫还可飞得更高(大于 50m),大多数个体能穿过主流风层或逆风飞行。

四、马铃薯甲虫越冬后的产卵与飞翔行为

马铃薯甲虫能够在不稳定的栖息环境中在时间和空间上通过其卵的分布来生存和扩大繁衍。Lashomd 等人研究指出,马铃薯甲虫在距上年马铃薯地块不足 40m 的轮作地比连作地发生晚 54DD,产卵高峰在轮作地为 150DD,连作地为 101DD(Lashomd *et al.*, 1984)。

飞翔在马铃薯甲虫迁飞定居中具有重要作用,其扩散和迁飞物候学复杂。美国麻省越冬后的马铃薯甲虫,在五月初至月末爬到寄主栖息地在连作地定居(Voss and Ferro, 1990),成虫也可从远方飞来定居,根据温度可在 5~6d 内产卵。马铃薯甲虫的卵在 5 月下旬开始孵化,第一代幼虫种群持续到 7 月初,在 6 月下旬 4 龄的幼虫落地开始化蛹,在 7 月中旬第一代成虫开始出土。在最适条件下,从卵到成虫的生活周期为 21d(Ferr *et al.*, 1985)。成虫从土壤羽化后,其飞行肌和繁殖器官发育完全需 7~9d(de Kort, 1969),这些成虫在田间只呆 15~20d,总平均产卵量为 43 粒。8 月初,在飞行肌形成后,这些成虫即飞到越冬场所,这些飞行的成虫在落到马铃薯叶片上既不取食也不产卵,而是吐丝结网钻

入土壤滞育，滞育的诱因主要是短日照(de Wilde and de Loof, 1973)，其次是温度的影响(Tauber *et al.*, 1988)。

越冬后的雌甲虫在积温达 181DD 后从土壤中钻出。未取食和取食后的甲虫的最初飞行分别在出土后 47DD 和 60DD。未取食的甲虫比取食后的甲虫飞行频繁，前者飞行次数多、时间长、距离远(未取食的甲虫平均个体总飞行距离为 4879m，取食后的雌甲虫为 1346m)。未取食的甲虫的总产卵量实际上为 0(每个未取食的雌甲虫的平均总产卵量)，而取食后的雌甲虫平均日产卵量为 22 粒。取食后的甲虫在出土后 73DD(在 25℃ 时大约 5d)开始产卵，89%的卵量在出土后 30d 产出。

五、马铃薯甲虫的耐寒性

马铃薯甲虫取食马铃薯叶肉组织里的冰核细菌可导致耐寒性长时间降低。美国 Costanzo 观察到喂饲植物 *P. fluorescens* 和 *P. putida* 的马铃薯甲虫会降低抗过冷能力，甚至 8 周后仍然会降低抗过冷能力。*P. fluorescens* 的冰核细菌可在 10 周后(滞育后 10 周)分离出来，说明被取食的冰核细菌可存于滞育的甲虫体内。这些具有耐寒性的马铃薯甲虫或许能通过喂冰核细菌来缩短越冬的滞育期(Costanzo *et al.*, 1998)。

在德国 New Brunswick 地区，田间马铃薯甲虫群落随季节变化，其耐寒性也有一系列的变化。越冬马铃薯甲虫成虫的存活率在 9 月到翌年 5 月或 6 月，耐寒性季节变化影响滞育数量的变化，但在温度很低之下，滞育数量就基本稳定。在植物温度为 -8.8℃，土层温度为 -11.7℃ 的低温下，越冬马铃薯甲虫进入滞育。试验证明马铃薯甲虫减少肠内物质和积存脂肪有利于在较低温度下进入滞育，滞育本身也可以提高马铃薯甲虫耐寒性。马铃薯甲虫在北方 New Brunswick 地区生存范围的扩大与其滞育特性和掘穴入土行为密切相关(Boiteau and Coleman, 1996)。

六、马铃薯甲虫地理种群的遗传变异

一些害虫种内的遗传变异性、生物型的差异，可影响害虫防治的成功与否，可影响作物抗虫品种的应用和害虫抗药性的产生。马铃薯甲虫分布可从干旱的亚热带区到温带的北限，繁殖能力和环境适应性极强。不同地理种群遗传分析显示，马铃薯甲虫在寄主植物利用、季节适应、染色体结构和同分异构酶类型等方面具有差异，表明种内发生相当大的遗传变异。细胞遗传证据表明，北美的 2 个品系在过去几十年里已进行了杂交，种内存在一个扩大的基因流。这一基因库混合有两种可能，第一，在寄主植物的适应差别上已测出具有中间着丝粒的种群发生在本地茄属植物上，如银叶茄；而具近端着丝粒的种群则侵害栽培马铃薯。这些寄主适应性不相同的种群之间的杂交，可能产生寄主范围更广的后代。第二，具中间着丝粒的种群适于干热气候，是本地种；而不具中间着丝粒的种群则适于较冷气候，杂交系的生活力更强，可适于更广的环境条件。杂交系的发生可解释 1960 年以来马铃薯甲虫在北美的迅速发展，以及对番茄、茄子、茄科杂草侵害性的明显增加；也可解释该甲虫在美国东北部产生高度抗药性的内因(王春林和赵建周，1994)。

七、马铃薯甲虫对生物毒素的敏感性

苏云金芽孢杆菌(Bt)Cry3Aa3 和 Cry3Ca1 蛋白是马铃薯甲虫的一种毒素,应用高纯度的 δ -内毒素对马铃薯甲虫 3 龄幼虫进行生测,结果显示 Cry3Ca1($LD_{50} = 320.1\text{ng}$)比 Cry3Aa3 ($LD_{50} = 672.9\text{ ng}$)有更大的毒力, Cry3Ca1 是一种有效防治马铃薯甲虫的蛋白(Haffani, 2001)。Alyokhin 等人的研究马铃薯甲虫室内种群对 Bt.Cry3A 毒素的抗性,发现敏感雄虫种群占平均数的 13.5 倍,而抗性雄虫种群为 8.0 倍。敏感雌虫平均为 824.3 个卵和 591.0 个幼虫,远高于抗性种群雌虫的平均数,为 484.7 个卵和 335.0 个幼虫。几乎敏感性种群在越冬进入滞育的数量是抗性种群的两倍,说明在缺少芽孢杆菌 Bt 的环境下,抗性种群数量在降低(Alyokhin and Ferro, 1999)。

第六节 预防、根除与控制

目前防治马铃薯甲虫的主要措施是加强检疫,严防人为传入,一旦传入要及早铲除;与非寄主作物轮作,种植早熟品种,对控制该虫密度具明显作用;生物防治应用苏云金杆菌(*Bt. tenebrionia* 亚种)制剂和天敌昆虫;害虫发生初期喷洒化学药剂,但该虫对杀虫剂易产生抗性,需注意药剂的轮换和交替;物理防治是对付该虫的重要措施,丙烷火焰灭虫可获得显著的防治效果。

一、物理防治

应用火焰灼杀马铃薯甲虫也可达到控害的目的。在拖拉机前方安装火焰(500°C)装置,在田间以 2~3km/h 的速度行驶,对马铃薯甲虫的死亡率可达到 60%以上,而对马铃薯植株无大害,每公顷需要丙烷 27kg (Hicks, 1999)。

利用气体力学防治马铃薯甲虫, Lacasse 报道了一种适于捕捉马铃薯甲虫成虫和老龄幼虫(L3 和 L4)的机器,大田试验证明不同的气流速度对捕捉 L3 和 L4 龄的马铃薯甲虫幼虫有不同的效果,速度较低时,捕捉量较大。当田间气流速度为 6km/h 时,捕捉效果较好,说明了利用气流装置来防治马铃薯甲虫成虫和 3~4 龄幼虫有很大的潜力(Lacasse, 1998)。俄罗斯乌法科学中心分离出能招引马铃薯甲虫的马铃薯气味,在此基础上发明了一种有效诱捕马铃薯甲虫的捕捉器,也有一定的效果。

二、农业防治

以多毛的野豌豆作为有机覆盖物能减少马铃薯甲虫的为害。在秋天种植多毛野豌豆,春天种植马铃薯前将其刈割然后覆于地表。野豌豆不仅阻止甲虫迁移到马铃薯上为害,而且其为豆科植物,也为土壤增加了氮素营养。覆盖野豌豆的地块马铃薯受甲虫为害程度轻于覆盖黑塑料膜的地块。

许多茄科植物因为有取食抑制物质的存在,可被用来与马铃薯杂交,从而获得对马铃薯甲虫有抗性和阻食的品种。从理论看,选育具内在抗食力并有其全部优点的马铃薯品种是可能的,但至今未能成功。但转毒素基因的马铃薯育种已取得很大成功。转基因马铃薯含有 Bt

的 Cry3A 毒素基因,在田间能产生 Cry3A δ -内毒素来抑制马铃薯甲虫,可以明显降低田间马铃薯甲虫种群数量(Hamilton *et al.*, 1997)。马铃薯甲虫取食含有 Cry3A 毒素的转基因马铃薯,对其成虫的生活力和繁殖力有显著影响(Nault, 2001)。但转 *nptII* 和 *gus* 基因的马铃薯,却使马铃薯甲虫幼虫对叶片的取食量增大了 50%(Lecardonnell *et al.*, 1999)。

三、生物防治

(一) 天敌昆虫的应用

在加拿大,田间用一种昆虫捕捉器“Biollector”防治马铃薯甲虫,对成虫的防治效果为 52%,对 1~2 龄幼虫的防治效果超过 59%,对 3~4 龄幼虫的防治效果超过 56%,最好防治效果为 72%。当地有机蔬菜农业的农民对利用天敌昆虫防治马铃薯甲虫很欢迎(Rifai *et al.*, 1999)。

也可利用捕食蝽(*Perillus bioculatus* (F.))进行防治。1994 年美国 Hough-Goldstein 进行田间实验,发现 *P. bioculatus* 卵挂在马铃薯落叶上,或是放在容器上(或是在马铃薯植物底部的土壤里或是在被害的马铃薯落叶上),这种防治马铃薯甲虫的方法比释放 *P. bioculatus* 幼虫及每周喷 Bt 要好(Hough, 1996)。捕食蝽(*P. bioculatus*)和芽孢杆菌 Bt 同时使用,对马铃薯甲虫具有协同增效作用,害虫的死亡率可提高至 60%~97%(Cloutier and Jean, 1998)。

美国北卡州东部的田间调查(1991~1993 年)表明,在未施化学药剂的田块,存在大量取食马铃薯甲虫的天敌,有 13 种捕食卵和幼虫的天敌,其中 *Lebia analis* 和 *Collops quadrimaculatus* 是以前没有报道过的可捕食马铃薯甲虫的天敌, *Coleomegilla maculata* 是取食马铃薯甲虫数量最多的昆虫天敌,主要捕食马铃薯甲虫的卵和小幼虫(Hilbeck *et al.*, 1996)。在蔬菜田间带状间作适当的花卉有利于提高马铃薯甲虫捕食性天敌的数量(Patt *et al.*, 1997)。此外,马铃薯甲虫的卵寄生蜂 *Edovum puttleri* 可进行人工饲养,也有很大应用的潜力(Hu *et al.*, 1998)。

(二) 生物制剂的应用

Kuzmanova 报道,一种防治马铃薯甲虫的生物新制剂“Exobacillin 826”用于马铃薯甲虫幼虫,9d 后幼虫死亡率可达到 100%,但对马铃薯甲虫 3 龄、4 龄幼虫以及成虫的防治效果不佳(Kuzmanova *et al.*, 1997)。

Poprawski 1994 年使用白僵菌和捕食蝽 *P. bioculatus* 进行马铃薯甲虫的田间防治实验,对幼虫的防效可达到 76.5%(Poprawski *et al.*, 1997)。Wright 报道,在美国(1997 年、1998 年和 1999 年),田间应用白僵菌防治马铃薯甲虫,对第一代幼虫种群的防效可达到 53%~84%(Wright *et al.*, 2002)。

昆虫病原线虫也是马铃薯甲虫的有效天敌,室内测定,昆虫病原线虫(*Steinernema carpocapsae* 浓度为 5.0×10^5 条/ml)对马铃薯甲虫幼虫、蛹和成虫的致死率可达到 100%,但在德国 New Brunswick 田间,线虫对马铃薯甲虫的防效仅为 37%,可能是由于病原线虫在田间的寿命较短(Stewart *et al.*, 1998)。

利用 Bt(商品: M-One)和楝素(商品: NeemAzal-F 等)新产品来防治马铃薯甲虫也有很好的效果,NeemAzal-F(50g a.i./ha)对马铃薯甲虫幼虫和成虫的效果分别达到 80%和 91%;

M-One 防治马铃薯甲虫幼虫和成虫的效果分别为 73%和 77%(Baumgart *et al.*, 1997)。

四、化学防治

对马铃薯甲虫综合治理的方法之一是应用阻食剂(feeding inhibitor)和应用具有阻食能力的寄主植物。人们发现一些化合物对马铃薯甲虫具有显著的拒食作用,如:铜化合物和钙盐;有机金属化合物——有机锡、水杨酸、氧化喹啉和铜的复合物;植物次生化学物质——生物碱、酚、三萜烯;天然植物浸提物——尼姆树等;其他——杂环季铵盐、烃基-芳基-醚。20 世纪 60 年代,有机铜和有机锡的化合物在田间应用显示了防治马铃薯甲虫的效果,但它们对环境有害;70 年代和 80 年代拒食剂防治马铃薯甲虫的实际应用有一定的发展。

很多非寄主植物都含有抑制马铃薯甲虫取食的物质,它们中的许多可成为抗食剂的资源物质。来自丁香总科和木兰总科的植物对马铃薯甲虫的抗食率最高。从楝树籽和油桐树分离出的极性与非极性化合物,对一系列昆虫种具拒食效果,来自美国西北的 3 种鼠尾草的几种化合物的化学成分,对马铃薯甲虫有拒食作用。人们还发现柑橘柠檬苦素苷元对 4 龄幼虫具有很大的拒食活性(Murray *et al.*, 1999)。

在土耳其, Cetinsoy 从 *Xanthium strumarium* 果实和叶片中提取到一种物质,发现其对马铃薯甲虫有驱避作用,而对马铃薯植株的药害很小(Cetinsoy *et al.*, 1998)。

从紫苜蓿顶部和根部提取的皂角苷对马铃薯甲虫发育有抑制作用,很低剂量的皂角苷就可抑制幼虫的生长发育(Szczepanik *et al.*, 2001)。黏果酸浆(酸浆属,含环氨基羟基氧麦角甾酸内酯)对马铃薯甲虫幼虫体重和寿命有负面影响(Kroiss *et al.*, 2002)。Basedow 在德国应用印楝素(Neem-Azal T/S, 0.5%)防治马铃薯甲虫幼虫的效果也达到 71%(Basedow *et al.*, 1996)。

五、多项措施的综合应用

目前有好多措施可以改变马铃薯甲虫的行为并有助于减少害虫的种群数量。例如,①对寄主植株进行化学处理,使害虫成虫厌而离之;②对植株表皮结构进行遗传改变(如叶子多毛)或化学处理,达到抑制成虫产卵;③诱导植物产生次生代谢物质,此类物质作用于害虫习性、营养、发育、产卵力等方面,这种诱导通过喷洒不危及环境的物质或通过栽培方法或其他方法来实现;④使用能够控制马铃薯甲虫产卵和成虫种群密度的物质。从这些单项技术和措施的研究和应用现状来看,似乎不能提供持久的和很好的防治效果。但将这些防治方法或措施在一定条件下有机结合起来,却能达到有效控害的目的。例如生防与轮作结合可把马铃薯甲虫抑制在一个可接受的水平之下,物理火焰防治和生物农药联合应用能够显著提高控害效果(Hodik *et al.*, 1999)。

(谢明 万方浩)

主要参考文献

- 王春林, 赵建周. 1994. 马铃薯甲虫. 北京: 中国农业出版社. 1-266
Alyokhin A V, Ferro D N. 1999. Relative fitness of Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) resistant and susceptible to

- the *Bacillus thuringiensis* Cry3A toxin. *Journal of Economic Entomology*, 92(3): 510-515
- Bartlett P W. 1979. Preventing the establishment of Colorado beetle in England and Wales. *In: Ebbels D L, King J E eds. Plant Health*. 247-257
- Basedow T, Peters A, Kleeberg H. 1996. Control of Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) by an azadirachtin-formulation ('Neem-Azal T/S'), by *Bacillus thuringiensis tenebrionis* ('Novodor'), and by combinations of both short-term and long-term effects. *In: Practice oriented results on use and production of neem-ingredients and pheromones. Proceedings of the 5th Workshop Wetzlar, Germany, 22-25 January*. 59-65
- Baumgart M, Brocke K-vom, Crow M H, Vom-Brocke K, Kleeberg H ed. 1997. Control of the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) in organic gardening systems with *Bacillus thuringiensis var. san diego* (M-Onc) and new products from the neem tree (NeemAzal-F and AlignTM). *Practice oriented results on use and production of neem-ingredients and pheromones. Proceedings 5th Workshop Wetzlar, Germany, 22-25 January*. 67-73
- Boiteau G, Coleman W. 1996. Cold tolerance in the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae). *Canadian Entomologist*, 128(6): 1087-1099
- Cetinsoy S, Tamer A, Aydemir M. 1998. Investigations on repellent and insecticidal effects of *Xanthium strumarium* L. on Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* Say (Col.: Chrysomelidae). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, (22)6: 543-552
- Cloutier C, Jean C. 1998. Synergism between natural enemies and biopesticides: a test case using the stinkbug *Perillus bioculatus* (Hemiptera: Pentatomidae) and *Bacillus thuringiensis tenebrionis* against Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Economic Entomology*, 91(5): 1096-1108
- Costanzo J P, Humphreys T L, Lee R E Jr, Moore J B, Lee M R, Wyman J A. 1998. Long-term reduction of cold hardiness following ingestion of ice-nucleating bacteria in the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Journal of Insect Physiology*, 44(12): 1173-1180
- Cprio M A, Grafius E J. 1990. Effects of light, temperature, and feeding status on flight initiation in postdiapause Colorado potato beetles. *Environmental Entomology*, 19(2): 281-285
- de Kort C A D. 1969. Hormones and the structural and biochemical properties of the flight muscles in the Colorado beetle. *Meded. Landbouwhoges. Wageningen*. 69-72
- de Wilde J, Bongers W, Shooneveld H. 1969. Effects of hostplant age on phytophagous insects. *Entomol. Exp. Appl.*, 12(7):4-20.
- de Wilde & de Loof A. 1973. Reproduction-endocrine Control. *In: Rockstein M ed. The Physiology of Insecta*, Vol. 1. New York: Academic, 97-157
- Ferro D N, Logan J A, Voss R H H, Elkinton J S. 1985. Colorado potato beetle temperature dependent growth and feeding rates. *Environmental Entomology*, 14:343-348
- Grafius E. 1997. Economic impact of insecticide resistance in the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) on the Michigan potato industry. *Journal of Economic Entomology*, 90(5): 1144-1151
- Haffani Y Z, Cloutier C, Belzile F J. 2001. *Bacillus thuringiensis* Cry3Ca1 protein is toxic to the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say). *Biotechnology Progress*, 17(2): 211-216
- Hamilton G C, Jelenkovic G L, Lashomb J H, Ghidui G, Billings S, Patt J M. 1997. Effectiveness of transgenic eggplant (*Solanum melongena* L.) against the Colorado potato beetle. *Advances in Horticultural Science*, 11(4): 189-192
- Hare D J. 1990. Ecology and management of the Colorado potato beetle. *Annu. Rev. Entomol.*, 35: 81-100
- Hicks J, Couturier M, Pelletier Y. 1999. Insect scorch for the control of the Colorado potato beetle. *Canadian Agricultural Engineering*, 41(4): 227-231
- Hilbeck A, Kennedy G G. 1996. Predators feeding on the Colorado potato beetle in insecticide-free plots and insecticide-treated commercial potato fields in eastern North Carolina. *Biological Control*, 6(2): 273-282
- Hodik M, Rifai M N, Taborsky V. 1999. Physical control of Colorado potato beetle in comparison with bioinsecticide. *Rostlinna Vyroba*, 45(7): 311-316
- Hough-Goldstein J, Janis J A, Ellers C D. 1996. Release methods for *Perillus bioculatus* (F.), a predator of the Colorado potato beetle. *Biological Control*, 6(1): 114-122
- Hu J S, Gelman D B, Bell R A, Loeb M J. 1998. In vitro rearing of *Edovum putleri*, an egg parasitoid of the Colorado potato beetle-development from egg through the pupal stage. *BioControl*, 43(1): 1-16
- Kroiss L J, Broz K L, Tong C B S, Hutchison W D. 2002. Tomatillo resistance to Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Entomological Science*, 37(3): 244-253

- Kuzmanova J, Sapundjieva K, Jevtic S ed. 1997. Exobacillin-a potential control agent for the Colorado potato beetle. Proceedings of the first Balkan symposium on vegetables and potatoes. Yugoslavia: Belgrade. 977-981
- Le Berre J R. 1962. Les bases scientifiques des advertisements agricoles-in-Dix années de collaboration franco-britannique pour la defense des îles anglo-normandes contre les invasions de doryphore. *Phytoma*, 14(2):11-23
- Lacasse B, Lague C, Khelifi M, Roy P M. 1998. Field evaluation of pneumatic control of Colorado potato beetle. *Canadian Agricultural Engineering*, 40(4): 273-280
- Lecardonnell A, Prevost G, Beaujean A, Sangwan R S, Sangwan-Norree B S. 1999. Genetic transformation of potato with nptII-gus marker genes enhances foliage consumption by Colorado potato beetle larvae. *Molecular Breeding*, 5(5): 441-451
- Murray K D, Hasegawa S, Alford A R. 1999. Antifeedant activity of citrus limonoids against Colorado potato beetle: comparison of aglycones and glucosides. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 92(3): 331-334
- Nault B A. 2001. Survival and fecundity of Bt-susceptible Colorado potato beetle adults after consumption of transgenic potato containing *Bacillus thuringiensis* subsp. *tenebrionis* Cry3A toxin. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 101(3): 265-272
- Patt J M, Hamilton G C, Lashomb J H. 1997. Impact of strip-insectary intercropping with flowers on conservation biological control of the Colorado potato beetle. *Advances in Horticultural Science*, 11(4): 175-181
- Poprawski T J, Carruthers R I, Speese J III, Vacek D C, Wendel L E. 1997. Early-season applications of the fungus *Beauveria bassiana* and introduction of the hemipteran predator *Perillus bioculatus* for control of Colorado potato beetle. *Biological Control*, 10(1): 48-57
- Rifai M N, Lacko-Bartosova M, Minar M. 1999. Biollector as an alternative method for the control of Colorado potato beetle in organic farming. *Rivista-di-Ingegneria-Agraria*, 30(4): 193-197
- Stewart J G, Boiteau G, Kimpinski J. 1998. Management of late-season adults of the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) with entomopathogenic nematodes. *Canadian Entomologist*, 130(4): 509-514
- Szczepanik M, Krystkowiak K, Jurzysta M, Bialy Z. 2001. Biological activity of saponins from alfalfa tops and roots against Colorado potato beetle larvae. *Acta Agrobotanica*, 54(2): 35-45
- Tauber M J, Tauber C A, Obrycki J J, Gollands B, Wright R J. 1988. Voltinism and the induction of aestival diapause in the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 81:748-754
- Voss R H & Ferro D N. 1990. Ecology of migrating Colorado potato beetles (Coleoptera:Chrysomelidae) in Western Massachusetts. *Environmental Entomology*, 19(1): 123-129
- Wegorek W. 1959. The Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say). *Prace Naukowe Instytutu Ochrony Roslin*, 1(2): 1-171
- Wraight S P, Ramos M E. 2002. Application parameters affecting field efficacy of *Beauveria bassiana* foliar treatments against Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata*. *Biological Control*, 23(2): 164-178

第七章 西花蓟马

第一节 起源和分布	232	第五节 生物生态学特性	234
第二节 识别特征	233	第六节 风险分析与早期预警系统	240
第三节 传入途径与入侵成因	233	第七节 防治措施	242
第四节 危害现状与生态经济影响评估	233		

摘要 西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 又称苜蓿蓟马, 属缨翅目, 蓟马科, 是世界上重要的温室害虫及重要的检疫对象。西花蓟马主要随着植物材料的运输进行传播, 也可以随风进行远距离传播。现已广泛分布于世界 30 多个国家和地区, 2003 年在我国北京也有了西花蓟马的报道。西花蓟马具有较强的适应能力和变异能力, 因此其成功入侵不仅与寄主和生态气候条件包括温度、湿度、降雨、光照等有关, 而且与其生物学特性密切相关。其寄主范围广泛, 达到 60 多个科 200 多种植物, 而且寄主范围还在不断扩增, 并有寄主转移现象。西花蓟马还传播番茄斑点萎焉病毒, 常对蔬菜、花卉、果树、烟草等造成严重的经济损失。西花蓟马的抗药性很强, 而且其对新药的抗性增长快。此外, 西花蓟马的卵和蛹有较强的隐蔽性, 这都给西花蓟马的防治工作带来了一定的难度。国内对西花蓟马的研究刚刚起步。对其风险评估也是刚刚开始, 主要是根据西花蓟马的生物学习性和生态学习性, 利用国内外现有的资料、原产地和扩散地之间的环境相似性以及 GIS, 模拟出其适生区, 然后构建一些模型计算出其传入、定殖、扩散和经济损失的可能性, 最后评估出其总体风险。

关键词 西花蓟马 传播 生物学特性 风险评估 外来入侵物种

Chapter 7 Western Flower Thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande)

Abstract: Western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande), is a cosmopolitan greenhouse insect pest and one of the most important quarantine pests in the world. Transportation of plant materials is the most important way for the spread of western flower thrips. It can also be carried over long distances by wind. Now western flower thrips have been found in over thirty countries and regions in the world. Its occurrence is also reported in some greenhouses in Beijing in 2003. Western flower thrips has strong adaptability and variability. Its successful invasion is highly related not only to its host plants, relevant geographical and

climatic conditions, but also to its biological characteristics. Western flower thrips has a wide host range and it is reported to inhabit more than 200 plant species belonging to over sixty families. Furthermore, its host range is still expanding. It is also found to shift from one kind of host to another. In addition, western flower thrips has the potential to transmit tomato spot wilt virus (TSWV), which might take tremendous damages to vegetable, flower, fruit, tobacco *etc.* Western flower thrips is resistant to many pesticides and the resistance is still developing, to the very new kinds of pesticide. Its eggs and pupae hide well on the plants. For these two reasons, it is relatively difficult to control western flower thrips. Researches on western flower thrips only started recently, so did its risk assessment. The main task of its risk assessment is based on the information of its biological and ecological characteristics, and the environmental similarity between its original and dispersal areas. The assessment is fulfilled by simulating the hypothetical adaptation of western flower thrips and calculating the possibility of its entry, establishment, spread, economic losses *etc.* Thus the integrated risk is evaluated.

Key words: *Frankliniella occidentalis* (Pergande), dispersal, host, biology, risk assessment, invasive alien species

第一节 起源和分布

西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 又称苜蓿蓟马, 属缨翅目 Thysanoptera, 蓟马科 Thripidae, 英文名为 western flower thrips 或 alfalfa thrips。为北美本地种, 起源于美国西部 (Gerin *et al.*, 1994)。1955 年首次发现于夏威夷考艾岛 (Kauai Island), 很快在夏威夷全岛发生 (陈艳和张晓燕, 2002)。



图 7-1 西花蓟马世界分布图 (根据现有资料绘制)

深色区域表示西花蓟马分布区

西花蓟马传播速度非常快, 20 世纪 70~80 年代开始在世界各地广泛传播和扩散 (Gaum *et al.*, 1994; Brodsgaard, 1993), 1983 年便遍及整个北美, 并开始在新西兰、墨西哥、加拿大不列颠哥伦比亚省出现。同年侵入欧洲的荷兰, 1986 年进入法国, 1987

年在意大利和比利时出现并引起严重的危害，现在已经广布于整个欧洲、北美及东亚 (Gerin *et al.*, 1994)。目前西花蓟马已经广泛分布于世界各地，包括哥伦比亚、哥斯达黎加、夏威夷、日本、新西兰、丹麦、芬兰、法国、荷兰、挪威、西班牙、瑞典、瑞士、大不列颠、北爱尔兰、比利时、塞浦路斯、德国、匈牙利、冰岛、以色列、意大利、波兰、葡萄牙、英国、肯尼亚、南非、加拿大、墨西哥、中国台湾(肖良, 1992; 杜宇等, 2001)，此外挪威和芬兰等国家也发现了该虫并进行了根治(李景涵译, 1994)。西花蓟马的分布如图 7-1。

第二节 识别特征

卵：长 0.2mm，不透明，肾形。

若虫共 4 龄：1 龄若虫透明；2 龄若虫金黄色；前假蛹白色，身体变短，出现翅芽，触角竖起；后假蛹白色，很少活动，出现成虫的刚毛列，翅鞘较长，触角位于背面。

成虫：体形狭小，一般小于 2mm。翅具纒缘，呈黄色。雄虫较雌虫小，腹部窄，末端圆，淡黄色(几乎为白色)。雌虫的腹部末端更圆，颜色可分为黄色至棕色。在美国，有浅、中、深 3 种颜色类型，这种颜色的差异与季节有关。在春季和随后的湿润季节，以深色为主，在其他季节以浅色为主，中间型在全年始终保持一定的比例。仅雌虫表现颜色的生态性(肖良, 1992)。

如图 7-2 所示。

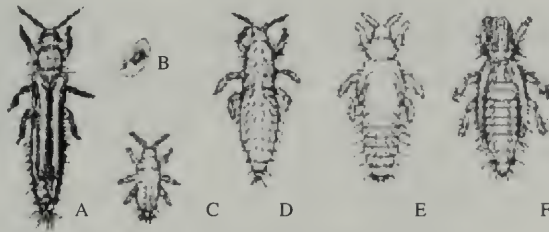


图 7-2 西花蓟马成虫与若虫

A. 成虫 B. 卵 C,D. 幼虫 E. 预蛹 F. 蛹

(摘自 <http://www.entomology.umn.edu/cues/inter/inmine/Thripm.html>)

第三节 传入途径与入侵成因

西花蓟马很容易随风带入温室，也容易随衣服、毛发、仪器、容器等被携带传播。据报道，国际间西花蓟马有两种传播方式，第一种也是最为重要的方式是随着植物原材料的进出口传播，另外一种随着气流进行长距离的扩散(Gaum *et al.*, 1994)。西花蓟马现已广布于欧美，在这些国家和地区，其主要在温室内造成严重危害。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

西花蓟马的寄主范围广，可寄生 66 科的 200 多种植物(杜宇等, 2001)，而且其寄主

范围还在不断增加,并存在寄主转移现象。西花蓟马的生活周期短,繁殖能力强,具有很强的抗药性,抗药能力增长迅速。所以自 20 世纪 80 年代开始在世界各地广泛传播以来,现已广布于世界各地,造成极其严重的危害。

一、危害症状

西花蓟马为害植物,可造成植株叶部上表皮失色,叶面产生凹缺。在花卉植物上,也能产生叶明、畸形、生长失调、棕色肿起等症状,还能引起晕斑——一种由苍白色的组织围绕小的黑点而形成的斑点。花盛开时西花蓟马的取食会导致花和花瓣失色和形成伤疤;花开之前取食,也能导致花蕊畸形,其症状与植食螨的为害症状很难区别,但蓟马为害的症状是产生暗绿色的小斑点,而螨为害则产生黑色粒状斑点。雌虫能产卵于花瓣组织中,引起脓疮效应。

二、危害现状与生态经济影响

西花蓟马主要为害植物的花和叶片,其为害方式随植物的种类和生长阶段而异。它既能用锉吸式口器吮吸植物的汁液,也能取食花粉、花蜜,因此可传播花粉导致授粉和早熟(Yudin *et al.*, 1986)

西花蓟马在温室主要为害蔬菜。在不列颠和哥伦比亚,曾因该虫的蔓延,致使黄瓜产量下降。1985 年,估计此虫引起哥伦比亚温室黄瓜减产达 20%(陈艳和张晓燕, 2002)。在室外,它也能为害苜蓿、果树的果和幼林,以及玫瑰等作物和花卉。较小种群的西花蓟马即可直接给作物、花卉和果树造成显著的伤痕,主要表现在产卵处可形成直径为 2~3mm 的肿块,从而影响蔬果花卉的品质。而根据 USDA 的果品质量分级标准,如果一个果实上有 5~7 个西花蓟马的产卵伤痕,果实的品质就得降级。此外,西花蓟马还传播番茄斑点萎蔫病毒(tomato spot wilt virus, TSWV),该病毒主要为害蔬菜和烟草。该病在夏威夷曾导致苜蓿严重减产达 50%~90%(Yudin *et al.*, 1986)。

西花蓟马的为害对象主要是蔬菜、花卉和果树等重要经济作物,而这些经济作物在我国各地都有广泛分布,是我国经济的重要组成部分和农民的重要经济来源,因此应警惕西花蓟马的暴发为害。烟草也是我国经济的支柱产业,应警惕西花蓟马传播的番茄斑点萎蔫病的暴发,否则损失将不可估量。目前,西花蓟马已被许多国家列为检疫对象,在我国也应加强其检验检疫和控制根除,以免其暴发,对我国蔬菜、水果、烟草等的生产和出口造成重创。

第五节 生物生态学特性

一、生活史

在美国的温室内,西花蓟马全年都能繁殖,每年 12~15 代(图 7-3)。

卵产在叶、花和果实等器官的薄壁组织细胞内,27℃时 4d 孵化。卵对失水敏感,死亡率在此阶段常很高(肖良, 1992)。

1 龄、2 龄若虫异常活跃,1 龄若虫从植物组织内孵化后马上开始取食,27℃时,1~3d

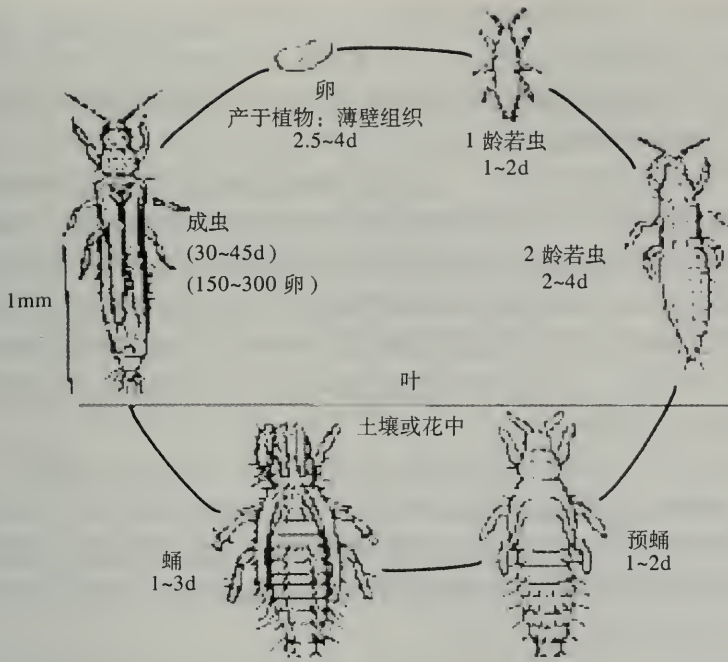


图 7-3 西花蓟马生活史

(摘自: http://www.umass.edu/umext/floriculture/fact_sheets/pest_management/wft_03.html)

蜕皮。2龄若虫属于贪食阶段，常在隐蔽的地方取食，2龄历期27℃时3d，15℃时12d。当透明的若虫取食叶片后，其内脏会变成绿色，但在化蛹前和停止取食后若虫体色恢复透明。2龄末期若虫渐渐停止活动，随后蜕皮进入预蛹期(Gaum *et al.*, 1994)。预蛹期27℃时1d，15℃时4d。西花蓟马通常在土壤里化蛹，有时也在花里化蛹，保护性好的花组织中可发现较多化蛹个体。蛹期极少活动，在30d的生活周期中，此阶段即占10多天。成虫和若虫一般在叶背面活动，种群数量多的时候也会在叶的正面出现。

刚羽化的雌成虫在24h内相对静止，但成熟后很活跃(Gaum *et al.*, 1994)。在实验室条件下，雌成虫寿命一般为40d左右，最长可达90d(肖良, 1992)；雄成虫寿命仅为雌成虫的一半。雌虫羽化后72h开始产卵，在整个生活周期内都可以断续产卵，产卵期平均24.4±6.9d。在27℃的条件下，雌虫平均每天产卵0.7~1.6粒。成虫可行孤雌生殖，未受精卵发育成雄虫。在种群中，一般雌虫数为雄虫的4倍。成虫没有滞育习性(Brodsgaard, 1993)。

二、越冬习性

微环境对西花蓟马的越冬有很大影响，较高的微环境温度有利于西花蓟马在室外越冬(Toapanta *et al.*, 2001)。

Cho等(1995)研究了西花蓟马在美国北卡罗来纳州的越冬情况。用50种寄主植物进行的室外越冬试验表明，西花蓟马以成虫和若虫越冬，冬小麦是其最佳越冬寄主，也可在一些杂草上越冬；越冬过程中西花蓟马可以继续发育和繁殖；成虫没有滞育的习性。1989~1990年和1990~1991年的调查均表明，越冬后的种群数量在3月份平均温度

10℃以上开始回升；4月份种群数量大幅增加，此期平均温度15℃左右。越冬期间，若虫主要集中在冬小麦的叶片上；成虫在12月至次年1月最冷的时期主要集中在小麦顶部(wheat crown)，当2~4月温度回升时主要集中在叶片上。土壤中发现极少量的越冬成虫，但未发现若虫在土壤中越冬。

Toapanta 等(1996)的研究表明，在得克萨斯州西花蓟马可以在许多周年生杂草上越冬。在佛罗里达州中北部，户外越冬的西花蓟马可以继续发育和繁殖，野豌豆成为其最适越冬寄主，冬小麦上也有越冬的西花蓟马成虫和若虫出现。越冬的成虫主要集中在野豌豆的叶片和花芽上，若虫主要集中在花芽和茎秆上。在乔治亚州南部，西花蓟马成虫可以在野生杂草上越冬。在佛罗里达州北部，从1992年12月到1993年4月的越冬期内西花蓟马完成3个世代。从1993年12月到1994年4月，则观测到其在越冬期内完成4个世代(Toapanta *et al.*, 1996)。

在加利福尼亚州，虽然偶尔能在花芽和叶芽内发现生长期的若虫越冬，但室外主要以成虫越冬。在欧洲，迄今尚未发现此虫在室外越冬(肖良，1992)。

英国的研究资料表明，在英国寒冷的冬季西花蓟马不能成功越冬，只在暖冬时可以越冬存活。但西花蓟马是一种不耐寒的昆虫，其过冷却点较高，只能在0℃以下的温度暴露很短的时间(McDonald *et al.*, 1997)。

在中东的以色列，西花蓟马则全年在室内室外均可发生(Chyzik and Orna, 2002)。

三、西花蓟马的耐寒性

发育起点温度在昆虫生态学研究中是一个重要的参数，它是研究昆虫年发生代数，预测其发生期的基础。西花蓟马卵、若虫、预蛹和蛹的发育起点温度分别为9.9℃、6.1℃、5.2℃和9.2℃，平均发育温度是7.9℃(McDonald *et al.*, 1998)。也有报道表明西花蓟马的平均发育起点温度是9.4℃(Gaum *et al.*, 1994)、6.5℃(Lowry *et al.*, 1992)和10℃(Robb, 1989)。

低温是确定西花蓟马越冬北界的重要限制性因子。McDonald 等(1997)的研究表明，西花蓟马的过冷却点在-13℃到-22℃之间，过冷却点的分布有两个高峰。Brodsgaard(1993)报道西花蓟马二龄若虫和成虫的过冷却点分别为-25.1℃和-21.3℃。

在低温条件下，逐渐减少光照时间能够提高成虫和若虫的抗寒性。经如此驯化，西花蓟马的抗寒性增加，可增加西花蓟马的室外越冬存活率。在0℃时，经驯化的成若虫的致死时间(LT_{90})分别为300h和580h，都较未经驯化的相应虫态显著延长(220h和480h)。在5℃、-5℃和-10℃的驯化则未出现如此显著的差异(McDonald *et al.*, 1997)。成虫和若虫在-5℃时的致死时间没有任何差异，但在5℃、0℃和-10℃时，成虫的存活时间明显长于若虫(McDonald *et al.*, 1997; Brodsgaard, 1993)。在25℃的条件下，光周期对成虫的过冷却点并没有太大的影响(Brodsgaard, 1993)。

此外，越冬种群的大小对西花蓟马的耐寒性有影响，低种群数量的西花蓟马的过冷却点较低，高种群数量西花蓟马的过冷却点则较高；成虫的致死温度略低于若虫，低群体致死温度成虫为-20.8℃，幼虫为-19.4℃。高群体致死温度成虫为-15.6℃，幼虫为-15.0℃(McDonald *et al.*, 1997)。

四、食性和寄主范围

西花蓟马若虫和雌成虫食性杂,除取食植物组织外,还能取食附于叶表面的螨卵(肖良,1992)。西花蓟马具有多食性,不同寄主对西花蓟马发育时间的影响不大,补充花粉有利于西花蓟马的发育(Trichilo and Leigh, 1988)。

Yudin 等人(1986)在夏威夷毛伊岛的库拉蔬菜种植区进行了西花蓟马寄主范围的试验,表明西花蓟马可在当地 48 种植物上为害,并在其中的长叶莴苣 *Lactuca sativa* var. *longifolia*、番茄、甘蓝和 3 种木本豆类植物(银合欢 *Leucaena glauca*, 木豆树 *Prosopis pallida*, 银白金合欢 *Acacia decurrens*)上的种群数量较高。西花蓟马在当地的 12 种常见杂草上也有发生。

五、传毒习性

西花蓟马是番茄斑点萎蔫病毒(TSWV)和烟草条纹病毒(to bacco streak virus, TSV)的传播者。它只能在若虫阶段获毒,并需在带病植株上取食 30min 以上方可获毒,然后在 3~10d 内成为传毒者;取食 15min 以上才能将病毒传播至新的植株(肖良,1992)。

六、昼夜活动节律

早晨西花蓟马主要分布在下半部的叶片上,11:00~16:00 时西花蓟马开始向上部叶片随机扩散。10:00~21:00 时西花蓟马主要分布在整株植物的叶片上,其中以下部叶片为主。夜间(1:00~5:00 时和 21:00~24:00 时)。西花蓟马在叶上的和茎上的数量差别不大(Sites *et al.*, 1992)。

七、影响西花蓟马存活和发育的因素

(一) 温度

西花蓟马的适宜发育温度范围是 15~30℃,最适温度为 25~30℃(Gaum *et al.*, 1994; McDonald *et al.*, 1998)。西花蓟马卵、若虫、预蛹和蛹的发育有效积温分别为 59DD、143DD、24DD 和 38DD(McDonald *et al.*, 1998)。在不同寄主植物上西花蓟马从卵至成虫的发育历期不同,在不同温度条件下的发育历期也不同,如表 7-1。随着温度的增加,发育历期缩短(Gaum *et al.*, 1994)。

西花蓟马对高温敏感。卵在 40℃ 的条件下暴露 20min 以上不能孵化;45℃ 条件下,成虫和若虫 1h 后全部死亡;40℃ 条件下,雌性成虫可存活 6h,若虫可存活更长时间(Kitamura *et al.*, 1999)。

(二) 湿度对西花蓟马的影响

在高湿条件下,西花蓟马的死亡率较高,Teulon 等(1992)认为这是高湿条件下真菌感染造成的,但 Mollema 等(1990)在试验中并没有发现真菌病原体。Robb(1989)及 Trichilo 和 Leigh(1988)的研究表明相对湿度 50% 的条件下,西花蓟马的死亡率非常低。目前普遍认为,高湿度条件下的真菌侵染是导致西花蓟马死亡的重要原因。

表 7-1 西花蓟马在不同寄主植物和不同温度条件下的发育历期

发育历期/d						
Bryan and Smith (1956)		寄主植物: 萝卜				
温度	卵	一龄幼虫	二龄幼虫	预蛹期	蛹期	卵至成虫
15℃	13.0	7.0	12.0	4.2	8.0	44.2
20℃	6.0	3.3	5.7	2.0	4.8	21.8
26.7℃	4.0	2.3	3.8	1.1	2.7	13.9
Lublinkho and Foster (1977)		寄主植物: 架豆				
温度	卵	一龄幼虫	二龄幼虫	预蛹期	蛹期	卵至成虫
15℃	11	5	9	3	6	34
30℃	4	1	4	1	1	11
Grassely (1988)		寄主植物: 黄瓜				
温度	卵	一龄幼虫	二龄幼虫	预蛹期	蛹期	卵至成虫
20℃	4.9	2.1	6.1	3.3	16.2	
Byc.Gerin (1994)		寄主植物: 法国菜豆(四季豆)				
温度	卵	一龄幼虫	二龄幼虫	预蛹期	蛹期	卵至成虫
25℃	3.7	2.8	3.0	2.2	2.4	14.1
Robb and Parrella (1991)		寄主植物: 菊花				
温度	卵至成虫					
15℃	39.1					
20℃	26.1					
25℃	12.9					
27.2℃	10.2					
30℃	9.3					
35℃	10.7					

Shipp 和 Gillespie(1993)研究了温度和湿度(用水蒸气气压差表示, water vapour pressure deficit)对西花蓟马的影响。在温度 15~35℃(15℃, 20℃, 25℃, 30℃, 35℃), 压差 12%~96%(12%, 33%, 53%, 75%, 96%)的范围内, 若虫和成虫的存活率与温度(T)、气压差(V , vapour pressure deficit)之间的关系可用下列二次方程表示:

$$\text{一龄若虫存活率} = -10.582 + 1.403T - 0.041T^2 + 6.674V - 0.001V^2 - 0.396TV, P=0.21$$

$$\text{二龄若虫存活率} = 5.343 - 0.271T + 0.004T^2 - 1.921V + 0.338E^{-3}V^2 - 0.0518TV, P=0.10$$

$$\text{雌成虫存活率} = -0.745 + 0.362T - 0.007T^2 + 3.103V - 0.031E^{-2}V^2 - 0.137TV, P=0.11$$

(三) 土壤对西花蓟马的影响

Nawrocka 和 Szwejda(1999)的研究表明, 针对同一种群(波兰本地种或引入种)和同一种寄主植物(黄瓜或番茄), 模拟土壤的不同类型介质(矿棉、聚亚安酯泡沫、泥炭底层)导致西花蓟马种群数量的显著差异。种植于非泥土介质的矿棉土和聚亚安酯泡沫中的寄主植物, 其上的西花蓟马种群数量要比种植于泥炭底层中寄主植物上的数量稍多, 其中以聚亚安酯泡沫上的种群数量最多。但就西花蓟马的发生趋势而言, 这 3 种土壤类型的

影响较小，对本地种的影响尤其小。

(四) 光照对西花蓟马的影响

3种光周期(光周期:暗周期分别为4:20、8:16、16:8)的研究表明,随着光照时间的延长,若虫的发育时间明显缩短(表7-2),在16:8的光周期条件下,若虫的发育历期是13.2d,在4:20的光周期下,则为14.8d;光周期对若虫历期的影响主要是对最为活跃的二龄若虫的影响;对一龄若虫和卵的影响则不大。随着光照周期的增长,若虫的死亡率增高。光周期的延长还会导致蛹期的延长,这是二龄若虫光周期反应效应的延续。成虫在短光照条件下寿命较长,产卵高峰期延迟,这是由于黑暗条件下成虫的活动明显减少,但是光周期对成虫的产卵前期、产卵期和产卵量影响不大。研究还表明,在25℃的条件下,这3种光周期都不能引起西花蓟马的繁殖滞育(Brodsgaard, 1994)。在15℃、8:16(L:D)的条件下,在加拿大不列颠哥伦比亚等地也没有采集到繁殖滞育的个体(Brodsgaard, 1993)。

表 7-2 不同的光照条件下,西花蓟马的生命表参数

光周期 L:D/h	净增长率 R_0	内禀增长率 r_m	周限增长率 λ	世代平均周期 T	种群倍增时间 DT
4:20	3.6987	0.0618	1.0637	21.1647	11.2160
8:16	7.5774	0.1105	1.1168	18.3273	6.2728
16:8	12.2046	0.1394	1.1496	17.9470	4.9724

为探明西花蓟马趋性行为的原因,美国科学家做了光谱功效的试验,表明西花蓟马对两种光谱有趋性,一种是紫外线范围内的光谱,另一种是 $\lambda_{\max} \approx 540\text{nm}$ 的光谱,其中,紫外线对雌性西花蓟马更有吸引力(Matteson *et al.*, 1992)。

(五) 降雨对西花蓟马的影响

降雨是影响西花蓟马种群数量的重要因子。一方面,降雨直接对若虫和成虫造成伤害,另一方面,降雨会淹没土壤中的蛹,使其致死。研究表明,成虫对浸水比较敏感,其 LT_{50} (半数个体致死时间)为20.7h。对浸水耐受力最强的是二龄若虫和蛹期, LT_{50} 分别为39.6h和45.3h。浸水后只有1%的个体可以存活13d。在浸水过程中,西花蓟马的发育并没有停止,可继续蜕皮(Brodsgaard, 1993)。

八、西花蓟马种群数量的时间动态

1996~1998年在以色列对西花蓟马种群数量动态的研究表明,西花蓟马种群数量在当地存在两个高峰期,主要发生在2~4月和10~12月两个时段。其种群密度高峰在春季与落花植物的开花高峰一致,在秋季与甜椒的开花期一致。春季的种群数量大于秋季,夏季的种群数量很低。在春季高峰期,以成虫为主(84.8%)。在第一朵花出现时(12~4月),蓟马便大量出现在花上,最初,种群主要由成虫构成(96.0%),其中雌性个体占87.6%。1月底至3月,蓟马种群中若虫的比例增至31.6%。在秋季高峰期,雌性个体占成虫总

数的 71%。在甜椒生长的早期,西花蓟马主要分布在花上,但在生长季后期,尤其是在冬季,西花蓟马主要分布在叶片上。在气温最高的 7 月、8 月份,西花蓟马的迁飞活动较活跃(Chyzik and Orna-Ucko, 2002)。

在美国库拉的研究表明,6 月份,在海拔为 200~450m 之间西花蓟马的种群数量最大,7 月份在海拔为 500~640m 之间西花蓟马的种群数量最大。蓟马的种群数量动态受海拔、寄主花期和温度的限制。在海拔 200~450m 之间,花期到 6 月底结束,同时气温也在升高,从而引起蓟马向温度较低的高海拔地区迁移,此时高海拔处正是植物的花期,比较适合西花蓟马的生长(Yudin *et al.*, 1986)。

第六节 风险分析与早期预警系统

西花蓟马已经在北京的温室内被发现(张友军等, 2003),因此对西花蓟马的风险分析和早期预警系统的建立已迫在眉睫。这方面的研究包括西花蓟马的适生性分析、风险分析和种群动态监测等。

一、适生性分析

主要是根据西花蓟马的生物学习性,利用 GIS 对西花蓟马在中国的可能分布区作出较为准确的预测。

二、风险分析和管理

外来物种的风险主要是指对生态、环境、人类、农业生产的影响及负作用,这方面的影响包括直接或间接的生物、生态及环境的影响和后果。风险分析是一种识别生防作用物潜在的为害、评价风险因子的作用、判别其后果的研究过程。风险管理则是在对风险分析结果进行评价、对风险的损失与收益进行判别的基础上,制定出风险接受水平,并形成风险的监控与管理措施程序。

(一) 危害识别(定性分析)

通过 GIS 模拟,如果存在有害生物适生区,则启动风险分析中的有害生物类别的划分,即危害识别(万方浩和叶正楚, 1997)。危害识别在整个体系中的作用是降低风险评估的成本。这方面研究的主要目的是在西花蓟马适生区分析的基础上确定其风险分布区;初步确定其对环境 and 经济所造成的损失;并综合这两方面的信息,将西花蓟马的危害划分为若干个等级,并利用 GIS 进行表示。根据以上资料,如果确定存在西花蓟马的风险分布区,且可能会造成一定的经济和环境损失,则启动风险评估。

(二) 风险评估(定量分析)

1. 进入可能性

该阶段的主要目的是根据各地检疫措施的严格程度(划为不同的等级)、有无传播媒介、外来生物在进入过程中的存活可能性等,确定传入的可能性(徐汝梅, 2003),并利

用 GIS 表现出来。如果西花蓟马进入的可能性很大或者已经进入且有一定的分布(但要小于定殖种群), 则启动定殖可能性风险分析。

2. 定殖可能性

在确定西花蓟马定殖所需最低种群的基础上, 根据环境的适宜性(温度、光照、湿度、降水等)和西花蓟马的生物学特性(繁殖对策、生存方法、遗传适应性/基因型变异、对其种群的抑制作用等), 确定西花蓟马在各地定殖的可能性, 并利用 GIS 表现出来。如果西花蓟马定殖的可能性很大或者已经定殖, 则启动有害生物扩散可能性风险分析。

3. 扩散可能性

此阶段分析的主要目的是要根据西花蓟马的繁殖能力、传播能力(传播途径和传播过程中的存活率等)、西花蓟马风险分布区该蓟马的潜在传播媒介和潜在天敌等, 确定入侵生物在各地扩散可能性, 并利用 GIS 表现出来。如果西花蓟马进入、定殖、扩散的可能性均很大, 则启动经济和环境的潜在危害性风险分析进行量化。

4. 对经济和环境的潜在危害性

有害生物对经济和环境的潜在危害性是启动整个风险分析的先决条件, 因此它应该是贯穿始终的, 只是在这一步才加以量化。

该阶段分析的主要目的是要根据有害生物危害类别和频度、受害作物的经济重要性(分布、数量等)、产量和/或质量损失估计、是否为其他有害生物的传播媒介、风险降低措施的应用与效应等确定入侵生物所造成的经济环境损失, 并利用 GIS 表现出来。

经过以上各个环节的有害性风险分析, 如果确定该有害生物或传播途径存在很高的风险值(包括进入、定殖、扩散风险和对经济环境的潜在危害), 则启动风险管理以降低风险。

(三) 风险管理

风险管理是一个行政管理过程。根据有关法规、条例及研究者提出的风险评价报告, 由职能部门组织专家组审查风险报告的可靠性, 分析比较应用该外来生物可能带来的后果与经济收益, 审核有风险的外来生物在应用过程中的有效应急控制措施以及确立风险监控与通讯的方法, 对释放或应用某一外来生物的申请给予公正的评价, 最终提交职能部门做出批准释放或应用与否的决策(万方浩, 1991)。

对于某种有害生物进行风险管理, 应该首先确定一个可接受的风险水平(ALP)(王福祥, 2000), 然后收集资料(包括管理经验和措施)确定合适的备选方案。

针对西花蓟马的风险管理也应遵循上述原则和方法。

(四) 总体风险评判

经过以上的风险分析形成西花蓟马的适生区分布图、传入风险分布图、扩散风险分布图和经济环境损失分布图等, 最终将这些风险结合起来, 利用 GIS 强大的数据分析能力形成一个总的风险分布概率图。

三、利用遥感技术对西花蓟马种群动态进行监测

遥感技术可用于有害生物扩散方向和扩散速度的监测,从而起到早期预警的作用。目前西花蓟马已经在我国部分地区定殖,在调查清其分布范围后,也可利用遥感技术对其扩散进行监测。

第七节 防治措施

因它具有在小的缝隙和重叠的植物组织间隐蔽自己的习性,以及卵受到寄主上皮组织的保护,也因为已对某些农药产生了抗性,故在运输过程中处理此虫不可能完全彻底。据此,唯一安全的方法是通过适当的检测,保持产地免受此虫为害。在实际发生地,由于西花蓟马的抗性和隐蔽性,任何单一的防治措施效果都不是很好,所以综合防治才是正确的方法。

一、生物防治

金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 对西花蓟马若虫的致死率为 27%,对成虫的致死率可达 100%(王成树等, 1998)。该菌在西花蓟马密度较低时(3~4 头/叶)效果较为明显(Azaizeh *et al.*, 2002)。

以喷雾的形式用球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 防治西花蓟马,连续喷两次,中间间隔 6d,防效为 75%;连续喷 3 次,防效为 65%~87%(Jacobson *et al.*, 2001)。

捕植螨 *Neoseiulus cucumeris* 对西花蓟马防治效果的研究表明,该螨对西花蓟马有良好的控制作用的,按 1000~2000 头/m² 的量在温室进行释放,每两周释放一次,防效为 72%~89%(Vanninen *et al.*, 2002),防治成本可控制在 0.16 元人民币/m²(Chambolle and Graff, 2001)。

二、物理防治

吴佳教等(1999)研究用气调的方法对葡萄上的西花蓟马等检疫性害虫进行杀灭处理,结果表明,CO₂ 含量高于 45%的气调对西花蓟马等取得很好的杀虫效果,但当 CO₂ 的含量超过 55%时,受处理的葡萄的品质将受到影响。

紫外线对蓟马的繁殖有促进作用,因而采用近紫外线不能穿透的特殊塑料膜作棚膜的方法可控制蓟马的增殖与危害(曹雅忠, 1994)。

利用缨翅目蓟马科昆虫借助植物气味寻找寄主的特性,将烟碱乙酸酯和苯甲醛混合在一起制成诱芯在田间使用,能够准确预测花蓟马的发生及为害时期,并能大量诱杀成虫。将茴香醛与上述两种化合物混合后涂在黏胶上用以防治大棚中的西花蓟马也有良好的效果(Teulon *et al.*, 1993; 杜家纬, 2001)。

西花蓟马对蓝色、粉红色、白色和天蓝色具有较强的趋性,因此通过悬挂有色粘板的方法,既可监测蓟马的种群发生动态,又可诱集西花蓟马,减少成虫产卵与危害;其中以蓝板的诱集效果最好(Hirano *et al.*, 2000)。

可以把大棚的温度加热到 40℃ 保持 6h, 雌成虫就会全部死亡, 卵在 40℃ 的条件下也只能存活 20min (Kitamura *et al.*, 1999)。

三、化学防治

由于西花蓟马具有较强的抗药性, 化学防治对西花蓟马的防治效果较差, 而且总的防治成本较高。目前发现以下两种方法的防治效果较好, 推荐试用。

方法一, 熏蒸法。Soma 等(2001)报道, 用甲基溴按 20g/m³ 的剂量进行熏蒸, 对西花蓟马成虫和若虫的防效可达 100%, 且不会对草莓等产生毒害作用。

方法二, 灌溉法。Heungens(1997)报道, 把甲胺磷(methamidophos)、克百威(carbofuran)和涕灭威(aldicarb)以 100ppm 的浓度分别加入灌溉水里面, 3 周后三者对西花蓟马若虫的防治效果分别为 85%、85%和 66%; 对成虫的防治效果分别为 85%、87%和 39%。

由于西花蓟马在 20 世纪 80 年代才开始在国际间传播流行并造成严重危害, 对其控制研究都是刚刚起步, 还停留在实验室阶段, 现有的防治措施还不足以对西花蓟马进行有效的防治和检疫。尤其在抗性品系上, 世界上该方面的成果少之又少, 需要加快这方面的研究进度, 特别是对那些已有西花蓟马发生的国家, 抗性品系是一个非常有效的防治措施。而对于还未发生西花蓟马的国家, 检疫措施的研究则需要加强, 以便尽可能长地延迟西花蓟马的入侵时间, 减少损失。

(郭建英 万方浩)

主要参考文献

- 曹雅忠. 1994. 日本设施园艺主要害虫. 世界农业. 00(07): 37~38 [Cao Y Z. 1994. Pests in protected horticulture in Japan. *World Agriculture*, 00(07): 37~38]
- 陈艳, 张晓燕. 2002. 石斛属植物主要害虫及其风险分析. 武夷科学. 18: 8~14 [Chen Y, Zhang X Y. 2002. Pest of *Dendrobium* and pest risk analysis. *WUYI Science Journal*, 18: 8~14]
- 杜家纬. 2001. 植物-昆虫间的化学通讯及其行为控制. 植物生理学报. 27(3): 193~200 [Du J W. 2001. Plant-insect chemical communication and its behavior control. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 27(3): 193~200]
- 杜宇, 杨碧, 周力兵, 曹云华, 刘忠善, 白松, 丁元明, 陈云勇. 2001. 输华石竹属种苗检疫性有害生物风险评估. 植物检疫. 15(5): 300~303 [Du Y, Yang B, Zhou L B, Cao Y H, Liu Z S, Bai S, Ding Y M, Chen Y Y. 2001. Risk assessment of quarantined pests on the seeds and seedlings of the genus *Dianthus*. *Plant Quarantine*, 15(5): 300~303]
- 李景涵译. 1994. 芬兰根除苜蓿蓟马和番茄斑点萎蔫病毒的费用和效益的比较研究. 植物检疫. 18(2): 126~128 [Li J H. 1994. Costs and benefits of the eradication of alfalfa thrips and TSMV in Finland. *Plant Quarantine*, 18(2): 126~128]
- 万方浩. 1991. 物种引进——生态学理论对生物防治实践的启示. 见: 青年生态学者论丛(一). 北京: 中国科学技术出版社. 278~283 [Wan F H. 1991. Species introduction revelation of ecological theories on biological control practices. In: *Youth Ecologists Argumentation*, vol. 1. Beijing: China Science and Technology Press. 278~283]
- 万方浩, 叶正楚. 1997. 生物防治作物风险评估的方法. 中国生物防治. 13(1): 37~41 [Wan F H, Ye Z C. 1997. General methods of risk assessment of biological control agents. *Chinese Journal of Biological Control*, 13(1): 37~41]
- 王成树, 李农昌, 李增智, 汤坚. 1998. 真菌杀虫剂标准化问题的探讨. 中国生物防治. 14(3): 134~138 [Wang C S, Li N C, Li Z Z, Tang J. 1998. Discussion on standardization problems of mycoinsecticide. *Chinese Journal of Biological Control*, 14(3): 134~138]
- 王福祥. 2000. 试论如何确定有害生物“可接受的风险水平”. 植保技术与推广. 20 (6): 32~33 [Wang F X. 2000. How to evaluate the acceptable level of pests, some preliminary discussion. *Plant Protection Technology and Extension*, 20 (6): 32~33]
- 吴佳教, 杨国海, 梁广勤, 梁帆, 司徒保禄. 1999. 气调检疫处理研究进展. 植物检疫. 13(1): 36~39 [Wu J J, Yang G H, Liang

- G Q, Liang F, SiTu B L. 1999. Progress in the CA quarantine treatments. *Plant Quarantine*, 13(1): 36~39]
- 肖良. 1992. 苜蓿蓟马. 植物检疫. 6(2): 129~130 [Xiao L. 1992. Western flower thrips. *Plant Quarantine*, 6(2): 129~130]
- 徐汝梅. 2003. 生物入侵-数据集成、数量分析与预警. 北京: 科学出版社 [Xu R M. 2003. Biological Invaion-Data Integration, Data Analysis and Risk Precaution. Beijing: Science Press]
- 张友军, 吴青君, 徐宝云, 朱国仁. 2003. 危险性外来入侵生物西花蓟马在北京发生危害. 植物保护. 29(4): 58 [Zhang Y J, Wu Q J, Xu B Y, Zhu G R. 2003. Dangerous alien invasive species – occurrence and damages of *Frankliniella occidentalis* in Beijing. *Plant Protection*, 29(4): 58]
- Azaizeh H, Gindin G, Said O, Barash I. 2002. Biological control of the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* in cucumber using the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Phytoparasitica*, 30(1): 18~24
- Brodsgaard H F. 1993. Cold hardiness and tolerance to submergence in water in *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Environmental Entomology*, 22(3): 647~653
- Brodsgaard H F. 1994. Effect of photoperiod on the bionomics of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera, Thripidae). *Journal of Applied Entomology*, 117(5): 498~507
- Bryan D E, Smith R F. 1956. The *Frankliniella occidentalis* (Pergande) complex in California. *Univ. Public. Entomol.*, 10(6): 359~410
- Chambolle C, Graff V. 2001. Growing mother plants of *Pelargonium*: control of thrips with the aid of *Neoseiulus cucumeris*. *PHM Revue Horticole*, 429: 43~47
- Cho K, Eckel C S, Walgenbach J F, Kennedy G G. 1995. Overwintering of thrips (Thysanoptera: Thripidae) in North Carolina. *Environmental Entomology*, 24(1): 58~67
- Chyzik R, Orna U. 2002. Seasonal abundance of the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* in the Arava Valley of Israel. *Phytoparasitica*, 30(4): 335~346
- Gaum W G, Giliomee J H, Pringle K L. 1994. Life history and life tables of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae), on English cucumbers. *Bulletin of Entomological Research*, 84(2): 219~224
- Gerin C, Hance T, Impe G van, van Impe G. 1994. Demographical parameters of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera, Thripidae). *Journal of Applied Entomology*, 118(4-5): 370~377
- Heungens A. 1997. Chemical control of western flower thrips (*Frankliniella occidentalis* Pergande) on azalea (*Rhododendron simsii*) through application of methamidophos, carbofuran or aldicarb in irrigation water. *Parasitica*, 53(4): 141~147
- Hirano T, Ishikawa Y, Morioka K, Nakagome-T. 2000. Behavior and control of western flower thrips in ornamental plants. *Research Bulletin of the Aichi-ken Agricultural Research Center*, 32: 189~196
- Jacobson R J, Chandler D, Fenlon J, Russell K M. 2001. Compatibility of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin with *Amblyseius cucumeris* Oudemans (Acarina: Phytoseiidae) to control *Frankliniella occidentalis* Pergande (Thysanoptera: Thripidae) on cucumber plants. *Biocontrol Science and Technology*, 11(3): 391~400
- Kitamura T, Kashio T, Matsui M. 1999. Effect of high temperature on survival of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Proceedings of the Association for Plant Protection of Kyushu*, 45: 113~115
- Lowry V K, Smith J W Jr, Mitchell F L. 1992. Life-fertility tables for *Frankliniella fusca* (Hinds) and *F. occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) on peanut. *Annals of the Entomological Society of America*, 85(6): 744~754
- Lublinkhof J, Foster D E. 1977. Development and reproductive capacity of *Frankliniella* (Thysanoptera: Thripidae) reared at three temperature. *Can. Ent. Soc.*, 50: 311~316
- Matteson N, Terry I, Ascoli Christensen A, Gilbert C. 1992. Spectral efficiency of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Insect Physiology*, 38(6): 453~459
- McDonald J R, Bale J S, Walters K F A. 1997. Low temperature mortality and overwintering of the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Bulletin of Entomological Research*, 87(5) 497~505
- McDonald J R, Bale J S, Walters K F A. 1998. Effect of temperature on development of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *European Journal of Entomology*, 95(2): 301~306
- Mollema C, Steenhuis G, Van Rijn. 1990. development of a method to test resistance to western flower thrips (*Frankliniella occidentalis* P. in cucumber. *IOBC/WPRS Bull.*, 13(6): 113~116
- Nawrocka B, Szejda J. 1999. Influence of soilless cultures on development and control of western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande) occurring on glasshouse vegetable crops. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 50: 47~54
- Robb K L, Parrella M P. 1991. Western flower thrips, a serious pest of floricultural crops. Proceeding International Conference on Thrips. February 21~23, 1989, Burlington Vermont USA

- Shipp J L, Gillespie T J. 1993. Influence of temperature and water vapor pressure deficit on survival of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Environmental Entomology*, 22(4): 726~732
- Sites R W, Chambers W S, Nichols B J. 1992. Diel periodicity of thrips (Thysanoptera: Thripidae) dispersion and the occurrence of *Frankliniella williamsi* in onions. *Journal of Economic Entomology*, 85(1): 100~105
- Soma Y, Akagawa T, Misumi T, Kawakami F, Kitamura T, Kashio T, Mochizuki T, Takaichi M, Tanaka K. 2001. Control of western flower thrips in strawberry nurseries with methyl bromide. *Research Bulletin of the Plant Protection Service, Japan*, 37: 35~38
- Teulon D A J. 1992. Laboratory technique for rearing western flower thrips (Thysanoptera: thripidae). *J. Econ. Entomol.*, 85: 859~899
- Teulon D A J, Penman D R, Ramakers P M J. 1993. Volatile chemicals for thrips (Thysanoptera: Thripidae) host-finding and applications for thrips pest management. *Journal of Economic Entomology*, 86(5): 1405~1415
- Toapanta M A, Funderburk J E, Chellemi D. 2001. Development of *Frankliniella* species (Thysanoptera: Thripidae) in relation to microclimatic temperatures in vetch. *Journal of Entomological Science*, 36(4): 426~437
- Toapanta M, Funderburk J, Webb S, Chellemi D, Tsai J. 1996. Abundance of *Frankliniella* spp. (Thysanoptera: Thripidae) on winter and spring host plants. *Environmental Entomology*, 25(4): 793~800
- Trichilo P J, Leigh T F. 1988. Influence of resource quality on the reproductive fitness of flower thrips (Thysanoptera: Thripidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 81(1): 64~70
- Vanninen I, Linnamaki M, Enkegaard E. 2002. Performance of *Neoseiulus cucumeris* as a biocontrol agent of the western flower Thrips in cut roses. *Bulletin OILB S*, 25(1): 289~292
- Yudin L S, Cho J J, Mitchell W C. 1986. Host range of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae), with special reference to *Leucaena glauca*. *Environmental Entomology*, 15(6): 1292~1295

第八章 棉红铃虫

第一节 分布与起源	247	第四节 危害现状与经济影响评估	251
第二节 识别特征与危害症状	249	第五节 生物学和生态学特性	252
第三节 传播途径与入侵成因	250	第六节 红铃虫的种群调控技术	254

摘要 红铃虫 *Pectinophora gossypiella* (Saunders) 是危害棉花的重要害虫, 目前我国除新疆、甘肃西北部的河西走廊及青海、宁夏等地区外, 各植棉区均有分布, 为国际间检疫对象。我国红铃虫的发生分布可以划分为以下几个类型区域: 无虫区、二代区、二至三代区、三至四代区、多代区, 三至四代区为常年重发区。红铃虫对棉花的为害一是通过幼虫蛀害棉花的花、蕾、铃直接为害, 二是由于钻蛀造成的伤口引发病菌入侵而间接为害。在棉花生长季节, 一代红铃虫为害棉花的花和蕾, 二代红铃虫为害青铃。其传播途径主要依靠棉籽调运传播以及自然飞翔传播, 能够生存的条件为冬季绝对低温不低于 -16°C , 月平均气温不低于 -5°C , 棉花生长期月平均相对湿度不能低于 60%, 最低温度不能低于 17°C 。卵的适宜发育条件为温度在 $25\sim 33^{\circ}\text{C}$ 之间, 相对湿度在 50%~100% 之间, 幼虫生长以 $25\sim 32^{\circ}\text{C}$ 及 80%~100% 最为适宜; 蛹的发育适宜温度是 $25\sim 32^{\circ}\text{C}$, 湿度在 80%~100%; 成虫寿命温度升高和湿度下降而缩短, 最长寿命可达 24d; 红铃虫羽化后 3d 进入交尾高峰, 交尾第二天即可产卵, 产卵量与棉叶的蜜腺、温湿度关系密切; 幼虫有明显的背光性, 成虫对普通灯光不敏感, 但是对波长在 3650\AA 的紫外光有较强的趋向性, 有一定的趋化性, 雌虫的性信息素可吸引雄虫交尾; 红铃虫属兼性滞育, 滞育幼虫表现有一定的抗寒能力, 红铃虫的种群调控技术主要包括越冬防治、改善栽培技术、选用抗虫品种、保护利用天敌、信息素干扰法和昆虫辐射不育技术。

关键词 红铃虫 分布 生物学 控制技术

Chapter 8 Pink Bollworm *Pectinophora gossypiella* (Saunders)

Abstract: The pink bollworm (PBW) *Pectinophora gossypiella* (Saunders) was first described by Saunders W W in 1843 from specimens found damaging cotton in India in 1842. Nowadays, the PBW is recorded in nearly all the cotton-growing countries of the world, and also in nearly the whole cotton-growing areas in China except Xinjiang, Ningxia, Qinghai provinces and Gansu Corridor. The distribution of the PBW can be divided in such zones: free

zone, 2 generation zone, 2~3 generation zone, 3~4 generation zone and multi-generation zone. The damage in the 3~4 generation zone is the most serious each year compared with other zones. The first generation of the PBW can be found in the flowers and buds and the second in the bolls. The PBW could be spread by cottonseed transportation and by adult flight. The minimal survival condition is the absolute temperature at -16°C and the average monthly temperature at -5°C for the diapaused larvae, and average RH 60% monthly and 17°C the lowest temperature for PBW at the cotton growing season. The suitable conditions are $25\sim 33^{\circ}\text{C}$ and RH 50%~100% for eggs, and $25\sim 32^{\circ}\text{C}$ and RH 80%~100% for larvae, $25\sim 32^{\circ}\text{C}$ and RH 80%~100% for pupae. The longevity of adult is related to temperature and moisture, the longest longevity is 24 day. The peak of copulation starts at the third day after emergence, eggs can be laid one day after copulation and the number of the eggs is related to the cotton nectary, temperature and moisture. Larvae have the tendency to the dark, but adult have the visible tendency to the light with the wave of 3500 \AA . Adult also have some tendency to some chemicals, especially the sex pheromone. PBW spends the winter as a mature (fourth instar) larva by hibernation or diapauses to resist the cold temperatures. The PBW could be controlled by using winter managements, planting techniques, resistant variety, sex pheromone and sterile insect techniques.

Key words: pink bollworm, distribution, biology, control

第一节 分布与起源

一、分类地位

红铃虫,在我国又被称作棉红铃虫、红花虫、红虫、棉花蛆等,英文名 pink bollworm, 学名 *Pectinophora gossypiella* (Saunders), 共存异名 *Platyedra gossypiella* (Saunders), 属鳞翅目 Lepidoptera 麦蛾科 Gelechidae。1843年, Saunders W W 根据 1842年从印度获得的标本, 首先将红铃虫定名为 *Depressaria gossypiella*。1904~1905年, Vosseler J 和 Meyrick E 将之更名为 *Gelechidae gossypiella*, 1917年 Busck, A 将红铃虫归到一个新属, 定名为 *Pectinophora gossypiella*, 而 Meyrick E 在 1918年将红铃虫归为 *Platyedra* 属, 定名为 *Platyedra gossypiella*。现在 *Pectinophora gossypiella* (Saunders) 和 *Platyedra gossypiella* (Saunders) 两个学名并存, 为同种异名。

二、红铃虫在我国的分布及区划

红铃虫主要危害棉花蕾铃, 分布极为广泛, 几乎遍布于世界各产棉区, 迄今为止, 世界上近 80 个产棉国中有 71 个国家受红铃虫的为害, 其范围都在北纬 40° 以南的棉区, 尚未发现红铃虫为害的国家有罗马尼亚、保加利亚、匈牙利、原苏联等国, 这些国家已将红铃虫列为国际间的检疫对象。

我国棉花种植面积广, 植棉范围自北纬 17° 直到北纬 40° 左右。经过全国范围内 1937

年、1952~1955年的两次普查和1981年对陕西、山西、辽宁三省北部棉区的调查,明确了我国尚未感染红铃虫的棉区有:除新疆、甘肃西北部的河西走廊及青海、宁夏,另外,山西北部的定襄县、太原市、交城县、平遥县、祁县、太古县、榆次县,陕西北部的佳县、绥德县、清涧县均无红铃虫的危害;辽宁省的黑山县与义县在20世纪50年代,曾有红铃虫的为害,因采取利用冬季自然低温防治措施后,1981年调查时已经没有再发生红铃虫的为害。黄河流域棉区50年代红铃虫曾经普遍发生,到70年代已经基本消灭为害,但是80年代后部分棉产区又有所回升。长江流域棉区和西南棉区则仍是红铃虫的主要发生为害区(曹赤阳等,1991)。

根据红铃虫在我国各个棉区的发生世代和危害程度,我国红铃虫的发生分布可以划分为以下几个类型(曹赤阳等,1991):

保护区(无虫区):我国西北内陆棉区,包括新疆、甘肃河西走廊等地,是冬季绝对低温 -16°C 和月平均温度 -5°C 的地方,同时在棉花生长季节内相对湿度经常处于60%以下,红铃虫既不能越冬,又不能在棉花生长季节顺利繁殖。没有红铃虫为害,为无虫区,列为保护区。

二代区:北纬 40° 以北的特早熟棉区和黄河流域北部。包括辽河流域和河北、山西、陕西三省的北部棉区,冬季温度低,红铃虫不能越冬,棉花生长季节约160d,红铃虫可以繁殖的 20°C 以上的时间为70d,可以完成两个世代。本区在20世纪50年代红铃虫有中等程度的为害,到60年代以后已消灭为害。

二至三代区:黄河流域棉区,河北、河南、山西、山东及甘肃西南部和江苏、安徽北部的淮北棉区,红铃虫可以越冬,棉花生长季节约180d,高于 20°C 的红铃虫有效生育期80~100d。红铃虫早发生的可以完成3代,一般1年2代。为中等程度为害区。

三至四代区:长江流域棉区包括四川、湖北、湖南、江西、浙江、上海和江苏、安徽的淮河以南棉区,红铃虫越冬数量大,棉花生长季节约200d,高于 20°C 的有120~140d,红铃虫都能完成3代,部分可以完成4代。是红铃虫的主要为害区。

多代区:云南、海南、两广、福建、台湾年平均温度 $18\sim 24^{\circ}\text{C}$,红铃虫一年可以完成5代以上。但棉花种植面积小,因此对生产影响较小。

三、红铃虫的起源

红铃虫是一种世界性的害虫,几乎分布于世界各个产棉区,对于它的起源,目前还没有一个确定的结论,比较认可的起源说是印度-巴基斯坦起源说(Ingram, 1994),或者是起源于东起澳大利亚西北,西至印度尼西亚-马来西亚诸岛的东印度洋地区(Common, 1958),主要理由是,印度是棉花的原产地,已经有3000多年的种植历史,棉花又是红铃虫最合适的寄主,同时印度是最早记录红铃虫的地方(Saunders, 1843),并且在巴基斯坦发现了多种红铃虫的寄生天敌(Cheema *et al.*, 1980a, 1980b, 1980c)。我国学者从红铃虫与棉花的密切关系的想法出发,认为红铃虫起源于印度(曹赤阳等,1991)。

第二节 识别特征与危害症状

一、形态特征

(一) 成虫

成虫棕黑色，体长 6.5mm 左右，翅展 12~20mm，头顶、额面浅褐色。下唇须发达，棕褐色，向上弯曲，超过头顶，第 1 节短，第 2 节粗壮鳞毛长，第 3 节细长，顶端部扁平，有两个界限明显的宽而黑的环纹。触角鞭状细长，灰褐色，基节纵列黑色栉毛 5~6 根。胸背淡灰褐色，侧缘、肩板褐色，无毛隆。前翅长尖叶形，深灰褐色，翅面在亚缘线、外横线、中横线处均具黑色横斑纹，近翅基部具 3 个黑色斑点。后翅呈宽菜刀状，外缘略凹入，灰褐色，缘毛较长。雄蛾具 1 根翅缰，雌蛾 3 根。如图 8-1 所示。



图 8-1 红铃虫成虫



图 8-2 红铃虫幼虫

(二) 卵

长卵椭圆形，长 0.4~0.6mm，宽 0.2~0.32mm，表面具网状纹，呈花生壳状，顶端有 4 个锯齿状缺刻，卵初产时乳白色，孵化前带红色。

(三) 幼虫

共四个龄期，初孵幼虫体长不足 1mm，胸腹部略带淡红色，体毛清晰可见。二龄体长 3mm 左右，乳白色。三龄幼虫体长约 68mm，多为乳白色，三龄以后才逐渐呈现红斑。末龄幼虫体长 11~13mm，头部红褐色，球形、坚硬，上颚黑色，具四齿，腹足趾钩单序缺环缺口向外呈马蹄状。各节体背有四个淡黑色的小毛瘤，两侧也各有一个，毛瘤周围呈现红色润斑，粗看似全体红色，实际各斑互不相连。如图 8-2 所示。

(四) 蛹

蛹纺锤形，棕色，长 6~9mm，有细绒毛，末端有上弯的短臀棘，周围有刚毛数根。

二、危害症状

红铃虫以幼虫为害棉花的蕾、花和铃，只能依赖棉花的蕾、花和铃生存，它不取食

棉花的其他部位。在生长季节，一代红铃虫的发生与棉花现蕾的时间相吻合，二代红铃虫则开始为害青铃(傅胜发等, 1953a, 1953b; 万胜印, 1982)。

(一) 一代红铃虫为害蕾、花

当棉花开始现蕾的时候，也正是越冬代红铃虫开始羽化的时候，羽化成虫趋向于在已经现蕾的植株上产卵，且产卵集中在现蕾多的植株上，卵散产于植株顶芽、嫩叶背面的叶脉附近。初孵幼虫从蕾冠处蛀害花蕾，在蕾冠处留下一个针孔状蛀孔，幼虫在蕾内取食，直到发育成熟，如果被害蕾很小，则被害后不能继续成长而脱落，若花蕾较大，虽然被害，仍然可以开花，但因幼虫吐丝缠绕花瓣，致使花瓣不能正常张开，形成风轮状花朵，有时呈几个花瓣粘连的不正常花瓣，形成“虫花”。“虫花”内柱头中间一面的花药总是被缠绕形成茧状，粘成小团，或变黑褐色，幼虫即潜伏其内为害。“虫花”容易鉴别，调查时可以一目了然。幼虫无转移为害的习性，每头幼虫只为害一个蕾或花。幼虫成熟后从花内爬出入土化蛹，或在落地的枯花瓣中化蛹，70%以上的被害花不能成铃。

(二) 二代红铃虫开始为害青铃

二代红铃虫发生时棉花已经开始成铃，红铃虫从第2代开始为害棉铃，此时红铃虫比较集中在棉铃的萼片下产卵，一处产卵数粒或数十粒。幼虫孵化以后在2h内蛀入棉铃，铃壳表面留针孔状侵入孔，如被害的棉铃日龄小，铃壳组织未老化，幼虫可直接穿透内壁，侵入棉絮，为害纤维和棉籽，铃壳内壁因刺激增生形成瘤状突起，成为“虫瘤”。如被害棉铃的日龄较大，铃壳内壁组织已经老化，幼虫则在铃壳内壁潜行一段，形成“虫道”，再穿透内壁进入棉絮为害。一个棉铃可有几头红铃虫幼虫同时为害。

第三节 传播途径与入侵成因

红铃虫何时传入我国无从考证，尽管我国棉花种植已经有700多年的历史，但是在早期的棉花文献中未见有关红铃虫的记述，最早见诸于文字的记载是1908年清朝农工商部刊印的《棉花图说》一书。

一、传播途径

(一) 人为传播

人为传播主要表现在棉籽或棉产物调运导致红铃虫的远距离传播，红铃虫的滞育幼虫能够混杂在棉籽和各种棉产物内，在调运过程中进行远距离的传播，Wilson (1972)认为红铃虫进入澳大利亚就是由于棉籽的调运，红铃虫从埃及分别于1911年和1913年进入西半球的墨西哥和巴西同样是由于棉籽的调运(USDA, 1977)，1916年从墨西哥调运棉籽到得克萨斯州榨油，导致了红铃虫在1917年首次发现于美国本土(Spears, 1968; USDA, 1977)。

(二) 自然传播

红铃虫的自然传播主要为成虫的飞翔扩散传播,红铃虫可以随风飘飞很长距离,在900m高空曾经用飞机航捕到红铃虫成虫(Glick, 1955),说明红铃虫可以借助风力进行扩散传播。

二、入侵成因

研究表明,红铃虫入侵以后,能否在当地建立种群,繁殖成功,取决于两个自然条件,冬季低温和棉花生长期的温湿度。冬季低温不能超过滞育幼虫的抗寒临界点,即绝对低温不低于 -16°C ,月平均气温不低于 -5°C ,否则幼虫就不能越冬,从而断绝了发生虫源;在棉花生长期,月平均相对湿度不能低于60%,最低温度不能低于 17°C ,否则红铃虫不能顺利产卵,卵和蛹也不能顺利发育,从而限制了红铃虫的繁殖(傅胜发等,1963)。我国红铃虫常年发生为害的地区均满足上述两个条件,而我国西北内陆棉区,包括新疆、甘肃河西走廊等地,上述两个条件都不具备,红铃虫既不能越冬,又不能在棉花生长季节顺利繁殖,所以没有红铃虫为害。同样在北纬 40° 以北的特早熟棉区和黄河流域北部,包括辽河流域和河北、山西、陕西3省的北部棉区,虽然棉花生长季节的气候条件能够满足红铃虫的繁殖要求,但是冬季温度低,红铃虫不能越冬。因此,合理利用冬季低温防治是可以消灭红铃虫的。

第四节 危害现状与经济影响评估

红铃虫对棉花的直接危害是蛀食棉花的蕾、花和铃,导致脱落或对棉铃内的纤维、棉籽造成损害,棉铃重量减轻、纤维品质下降、棉籽破碎、棉花的产量和品质下降;间接危害是由于幼虫的钻蛀造成伤口,使得病菌容易侵入棉瓢内,导致纤维霉烂,此种危害有时比红铃虫的直接为害对纤维和棉籽的损失更大。由于各地的气候条件、生产水平、栽培管理技术和为害程度的不同,造成损失程度也不同。

目前我国红铃虫常年重发生区为长江流域,棉区常年因红铃虫为害的综合损失率平均为28%;轻发生区为黄河流域棉区,平均损失率为12%(傅胜发等,1953)。

通过对红铃虫各代对棉花为害规律的研究表明,第一代红铃虫为害期与棉花结铃期错开,只能为害棉花的蕾、花,这些花、蕾80%会随棉花的生理脱落而自然脱落,另20%的虫花虽然能够结铃,但等虫花形成幼铃时,为害的红铃虫幼虫已经化蛹不再为害,使得此期间形成的棉铃没有受害铃,因此对于棉花品质不会造成影响,相反,被害虫花、虫铃的脱落是对健铃成铃和纤维发育的一种促进,因此对棉花产量、品质和结铃期无不良影响,防治意义不大(张振国,1994)。

对于红铃虫二代以后对棉铃为害造成的损失估计,可用Logistic方程来反映(曹赤阳等,1979)

$$Y = \frac{12.67}{1 + e^{3.2817 - 0.1395x}}$$

其中 Y 为样本损失率, x 为棉籽被害率, $k(12.67)$ 为样本损失率的上限。

杨樟法等(1990)根据 Seinhorst 的害虫为害损失曲线方程 $Y=m+(1-m)Z^{P-T}$ (Y 是产率, 不受害时为 1; m 是虫害造成的最低产率; Z 是参数; P 是害虫密度; T 是引起损失的密度阈值), 结合红铃虫的为害调查结果, 给出如下公式

$$Y = 0.67 + (1 - 0.67) \times 0.7608^{(P-0.4)}$$

第五节 生物学和生态学特性

一、生物学特性

(一) 卵

适宜的发育条件为温度在 25~33℃ 之间, 相对湿度在 50%~100% 之间, 发育起点温度为 15.6℃, 有效积温 64DD。

(二) 幼虫

有利于红铃虫种群繁殖的条件是温度 20~35℃, 相对湿度 50%~100%, 以 25~32℃ 及 80%~100% 最为适宜, 在南京的观察, 平均温度在 25.4~29.0℃ 时幼虫的发育历期平均为 11.9d, 平均温度在 31.6~36.9℃ 时幼虫的发育历期平均为 13.4d(傅胜发等, 1963)。

(三) 蛹

越冬幼虫所化的蛹和第 1 代蛹对温湿度的要求不同, 实验室恒温条件下, 第 1 代蛹发育所需的有效积温比越冬世代的蛹要少, 在相同温度下第 1 代蛹的发育速度比越冬世代的蛹快, 蛹的发育适宜温度是 25~32℃, 湿度在 80%~100%(傅胜发等, 1963)。

(四) 成虫

成虫的寿命与温度呈负相关, 随温度的升高和湿度的下降而缩短, 低温低湿往往使成虫展翅不良, 影响飞翔和交配活动。成虫最长寿命可达 24d(傅胜发等, 1963; 曹赤阳, 1991)。

二、生态学特性

(一) 交配习性

红铃虫白天羽化, 一般集中于上午 8:00~12:00 时, 雌雄性比为 1:1, 羽化当天即可交尾, 但交尾高峰在羽化的第三天, 交尾前期与环境条件和发生世代有关, 越冬代成虫的交尾前期较长, 成虫的交配与附近是否有棉花植株有关, 交尾时间一般集中在凌晨 2:00~3:00 时, 雌虫一般只交配一次, 但也有交配多次的, 最多可交配 9 次, 雄虫一般可交尾 3~4 次, 最多 8 次(川沙县植保站, 1975, 1979)。

(二) 产卵习性

雌虫交配第2天即可产卵，产卵期可最长达18d，多数卵集中在羽化后3~8d，产卵量一般在数十粒到100多粒，最多可达500粒，棉叶的蜜腺与雌虫的产卵量关系密切，并且温湿度与产卵量关系密切，在相对湿度70%以上，温度在21~31℃范围内产卵量随温度升高而增加，相对湿度在60%以下时雌虫不能产卵。在棉株结铃前，红铃虫一代卵主要分布于棉株新展开的叶上。在棉花单株结铃2.5个左右时，红铃虫卵均集中分布于棉青铃上。红铃虫二代、三代卵分别以由外到内第2、第3和第3、第4大铃圆锥体位上的青铃卵量分布最多。在十日以上日龄的青铃上均可产卵，其中在20~34日龄的青铃上产卵量最大，占青铃上总卵量的55%。一代和二代、三代红铃虫卵常分别以1~8粒和1~13粒聚产成堆，单个青铃上可同期产卵1~16个(冯成玉，1994)。

(三) 趋光性

幼虫有明显的背光性，成虫对普通灯光不敏感，但是对波长在3650Å的紫外光有较强的趋向性，用这种波长的黑光灯诱捕成虫效果很好。上半夜雌雄蛾诱集比例比较接近，2:00~3:00时交配高峰过后灯下雌蛾比例迅速下降。此外，应用黑白双光源黑光灯诱捕效果更佳。

(四) 趋化性

顺，顺-7，11-十六碳二烯-1-醇醋酸酯顺，反-7，11-十六碳二烯-1-醇醋酸酯的混合物(Gossyplure)是红铃虫性信息素(Humm *et al.*, 1973)，化学结构式是： $C_4H_9CH=CH(CH_2)_2CH=CH(CH_2)_6OAc$ ，对红铃虫的雄虫有吸引作用；此外，从人工合成的化合物中也筛选出了类似红铃虫性信息素的活性物质，7-十六碳烯醋酸酯，化学结构式是 $CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_6OAc$ (Green *et al.*, 1969)。尽管它的活性只有红铃虫信息素的18%，由于合成方便、价格低廉，也有应用价值。用二氯甲烷和乙醇浸泡棉枝嫩头、苞叶、花蕾和萼片的浸提液和杨树枝同样对红铃虫雄虫有吸引作用(汪荣康，1977)；另外，试验发现丙酮、二氯乙烷和甲醇等有机溶剂也对红铃虫成虫有一定的诱集作用(邬汉英，1984)。

(五) 滞育

红铃虫的滞育属兼性滞育，其滞育并不固定在哪一代，不同环境、不同地区红铃虫的滞育状况极不相同，甚至在一些地区不产生滞育，如南纬7°和北纬5°之间的非洲棉区(刚果、乌干达、肯尼亚等地)(Pearson, 1958)和印度南部个别地区(Raina, 1974)。滞育的诱导发生和终止，是光照、温湿度和食物中脂肪和水分含量的综合作用，短光照(<13h)、低温(低于21℃)、富含油脂而缺少水分的食料滞育率最高(Adkisson, 1961a, 1963b, 1964b, 1965a)。

(六) 抗寒性

滞育的红铃虫幼虫表现有一定的抗寒能力，其抗寒能力可以用过冷却点和冻结点表

示, 滞育幼虫的平均过冷却点为 -15°C , 冻结点为 -8.7°C 。不同地区的红铃虫滞育幼虫的抗寒能力不同, 北方的红铃虫滞育幼虫的抗寒能力大于南方的滞育幼虫。滞育幼虫的越冬死亡率取决于两方面的因素, 绝对低温和持续低温, 当绝对低温低于 -16°C 或者连续有一个月的平均温度低于 -5°C , 滞育幼虫会全部死亡。

第六节 红铃虫的种群调控技术

一、越冬防治

消灭越冬幼虫, 是压低次年繁殖基数、防治红铃虫的有效措施。代亦农(1994)总结了越冬防治的10字要诀, 即分、诱、开、拍、糊、杀、摘、处、沤、烧; 石鸿文等(1999)也对此进行了总结, 包括以下几个方面:

采摘时, 把有虫的僵瓣花和无虫的好花严格分收、分晒、分运、分贮、分轧, 以便集中处理虫花, 防止幼虫扩散。

利用幼虫喜温好阴的特性, 在堆放的虫花上面覆盖麻袋或草包, 次日清晨将诱集的幼虫扫下杀死。

晒花时要及时清扫从籽棉堆中爬出的幼虫, 并放鸡、鸭啄食; 在晒花场的四周开一条围沟灌水撒药, 以毒死外爬幼虫。

收花站、轧花厂、榨油厂等的仓库, 在进花之前, 务必将墙壁、屋顶等处的缝隙用石灰或泥涂塞; 棉仓周围墙壁贴纸, 放敌百虫做药带, 杀死寻找越冬场所的害虫。

仓库熏蒸棉籽。每立方米用溴甲烷 36g, 在室温 5°C 以上时熏蒸 96h, 杀虫效果可达 100%; 也可用 50% 敌敌畏乳油 100 倍液进行仓库密闭熏蒸, 杀虫效果也可达 70%~80%, 以防止棉籽带虫下田。

摘除棉秆上的枯铃全部烧掉。

将棉田里的枯枝、落叶、烂铃和杂草集中堆沤造肥, 以减少越冬寄主。

对晒花、运花工具等用开水烫、冷水泡、石灰水浸、泥浆水糊等办法进行处理, 消灭潜伏在工具上的幼虫。

在立春前烧完棉秆, 减少虫蛹羽化来源。

栽培短季棉避虫: 湖北选用短季棉优良品种“鄂 545 麦后棉”, 采用麦后棉晚期栽培方式, 不仅平均亩产皮棉 80~100kg, 而且可以避减部分棉花病虫的危害, 烂铃率下降 26.2%~100%; 一代、二代红铃虫为害率减少 25%~100%; 并对枯黄萎病也有一定抑制作用。每公顷可减少防治 2~3 次, 节省人工、药费 105 元左右。较对照增收 1290~1395 元/hm²(刘思义等, 1990)。

除早蕾、放弃伏前桃, 切断红铃虫食物链: 摘去 7 月上旬的全部早蕾, 可消灭大部分蛀铃虫源, 不需要打药也能显著减轻或基本控制二代为害。摘去全部早蕾, 造成本生育阶段无生殖器官的强烈刺激, 能促进棉株建立高光效营养体, 把开花结铃调整到霉雨结束后的最佳光能辐照期, 集中多结伏桃和早秋桃, 减少因红铃虫蛀害诱发烂铃造成的劣质棉(陈荣海, 1995)。

二、选用抗虫品种

选育抗虫品种,应用转基因抗虫棉。江苏省农科院在1986~1988年3年间,对238个棉花品种(系),在田间用罩笼接红铃虫蛾的方法,分代进行了抗性鉴定和筛选,按全国统一制定的红铃虫抗性标准进行分级,根据品种对红铃虫抗性稳定性分为7类,其中二代、三代均表现为高抗的品种有FB₂O、学院一号、矮1548和407-26等(万长寿和窦守元,1990);华中农业大学对34份棉花材料的抗红铃虫性进行了鉴定,结果为:Bt棉原材料基本未受红铃虫为害,属免疫类型;抗虫级材料有4个;中抗级材料16个;感虫级材料11个;高感材料2个,华112、“7064”和“7059”3个材料对红铃虫抗性较好并且稳定(吴征彬等,1997);1999年浙江金华市引进中棉所29、慈抗3号和国抗棉1号3个抗虫棉品种,其经济性状与产量皆优于对照泗棉3号,其中以中棉所29表现最佳。中棉所29抗红铃虫特性好,一代虫花率下降了13.2%,二代、三代铃害率也下降了37.7%(孔爱华等,2000)。

三、保护利用天敌

我国目前已知红铃虫的天敌包括寄生性天敌28种,捕食性天敌44种(雷朝亮,1997)。螟黄赤眼蜂防治试验表明,每公顷放蜂30万头可使单铃活虫数降低0.13头,每公顷放蜂90万头,可使单铃活虫数降低0.32头(雷朝亮等,1991)。

四、利用红铃虫性信息素干扰棉田红铃虫交配

江苏1986~1993年在红铃虫发生中密度和高密度区应用红铃虫性信息素2%微胶囊、2%改进微胶囊、塑料纤维夹片、PVC胶带、聚乙烯塑料管,采用干扰交配方式进行防治技术的研究。经过22个年次的试验结果表明:在红铃虫发生中密度地区以自然沟、渠为界,5~8hm²连片棉田为使用单位,所用剂型均能有效控制红铃虫的为害。清铃活虫、籽棉含虫量、僵瓣花比常规农药防治区减少70%~80%。在高密度区,试验区四周有100m以上的隔离带,使用PVC胶带剂型,在越冬代始蛾时施挂1次,干扰交配时间可达3个月以上,性信息素释放稳定,控制清铃活虫、籽棉含虫量与使用4~5次菊酯农药效果相对(束春娥等,1995)。

五、利用昆虫辐射不育技术

昆虫辐射不育技术(sterile insect techniques)的基本原理是通过一定剂量的放射性辐照处理某一时期的害虫,在尽量降低对体细胞损伤的同时最大限度地损伤其生殖细胞,导致害虫不育或亚不育,将这些辐照虫大量释放到田间,使之与田间野生虫竞争交尾,从而降低后代的可育性,压低虫口,直至消灭害虫种群。

美国从1967年开始至今一直在加利福尼亚州San Joaquin Valley的重要棉产区释放辐照蛾,成功地防止了从南方扩散来的棉红铃虫建立种群,现在已开始在加利福尼亚州南部的Imperial棉产区进行消灭棉红铃虫项目(Walters *et al.*, 1998)。

(张青文 路大光)

主要参考文献

- 曹赤阳, 何木极, 朱深甫. 1991. 红铃虫-防治理论与实践. 南京: 江苏科学技术出版社[Cao C Y, He M J, Zhu S P. 1991. Pink Bollworm-Research and Development of Control Theory. Nanjing: Jiangsu Science Technology Press]
- 曹赤阳, 束春娥, 陆伊文. 1979. 红铃虫危害棉铃的损失考察. 江西农业科学, (5) [Cao C Y, Shu C E, Lu Y W. 1979. Investigation of losses of cotton boll by pink bollworm. *Jiangsu Agricultural sciences*, (5)]
- 陈荣海, 黄言超, 疏长俊. 1996. 红铃虫生态对策与防治研究. 安徽农业科学, S1:8~11 [Chen R H, Huang Y C, Shu C J. 1996. Study on decision of ecological control for pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders). *Journal of Agricultural Sciences*, S1: 8~11]
- 陈荣海, 1995. 切断棉红铃虫食物链的探讨. 昆虫知识, 32(6): 333~336 [Chen R H. 1995. Studies on cutting off the food chain of pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders). *Entomol. Knowledge*, 32(6): 333~336]
- 川沙植保站. 1975. 棉红铃虫交配习性的初步观察. 昆虫知识, 12(2): 20~22 [Chuansha Plant Protection Station. 1975. Preliminary observation on mating behaviors of pink bollworm. *Entomol. Knowledge*, 12(2): 20~22]
- 川沙植保站. 1979. 红铃虫交配习性的初步研究. 昆虫知识, 16(3): 104~110 [Chuansha Plant Protection Station. 1979. Preliminary observation on mating behaviors of pink bollworm. *Entomol. Knowledge*, 16(3): 104~110]
- 代亦农. 1994. 棉红铃虫冬前防治要诀. 中国农垦, 11: 28 [Dai Y N. 1994. Key point for pink bollworm control before winter. *China Agricultural Cultivation*, 11: 28]
- 冯成玉. 1994. 棉红铃虫田间产卵规律的进一步研究. 昆虫知识, 31(6): 336~339 [Feng C Y. 1994. Further studies on the egg-laying patterns of the cotton pink bollworm (*Pectinophora gossypiella* (Saunders)) in the field. *Entomol. Knowledge*, 31(6): 336~339]
- 傅胜发, 曹赤阳, 万长寿. 1953. 中国棉红铃虫的研究与防治 (上). 华东农业科学通报, 3:12~19 [Fu S F, Cao C Y, Wang C S. 1953. Research and control of pink bollworm in China (1). *Bulletin of Huadong Agricultural Sciences*, 3: 12~19]
- 傅胜发, 曹赤阳, 万长寿. 1953. 中国棉红铃虫的研究与防治 (下). 华东农业科学通报, 4:11~19 [Fu S F, Cao C Y, Wang C S. 1953. Research and control of Pink bollworm in China (2). *Bulletin of Huadong Agricultural Sciences*, 4: 11~19]
- 傅胜发, 曹赤阳, 万长寿. 1963. 棉红铃虫的若干生态特性及其发生类型. 植物保护学报, 2(1): 75~87 [Fu S F, Cao C Y, Wan C S. 1963. Some ecological characteristics of the cotton pink bollworm and type of development. *Acta Photophyl. Sinica*, 2(1): 75~87]
- 雷朝亮, 宗良炳, 钟昌珍. 1991. 利用天敌和棉花品种抗性对棉红铃虫综合控制效应的研究. 全国生物防治学术讨论会论文集, 269 [Lei C L, Zong L B, Zhong C Z. 1991. Integrated control of cotton pink bollworm with biological agents and resistant cultivars. Proceedings of the 1991 National Symposium on Biological Control, 269]
- 雷朝亮. 1997. 红铃虫生物抑制. 北京: 科学出版社. [Lei C L. 1997. Biological Suppression of Cotton Pink Bollworm. Beijing: Science Press]
- 刘思义, 柯道秀, 熊映清. 1990. 鄂 545 麦后棉避病虫效应及防治策略. 棉花病虫害综合防治及研究进展. 62~66 [Liu S Y, Ke D X, Xiong Y Q, He B J, Huang M S, He H J. 1990. Control strategy and evasion effect of cotton variety of E545 against disease and pest. *Advance in IPM on Cotton*, 62~66]
- 清农工商部. 1908. 棉花图说 [Department of agriculture. industry and business of Qing Dynasty. 1908. Cotton illustration]
- 石鸿文, 李勋. 1999. 如何消灭越冬棉红铃. 河南农业, (12): 17 [Shi H W, Li X. 1999. How to eliminate pink bollworm in winter. *Heinan Agriculture*, (12): 17]
- 束春娥, 曹赤阳, 柏立新, 曹雁平, 孙洪武, 张永孝. 1995. 棉红铃虫性信息素应用技术研究. 华东昆虫学报, 4(2):106~112 [Shu C E, Cao C Y, Bai L X, Cao Y P, Sun H W, Zhang Y X. 1995. Studies on applying Gossypure in controlling pink bollworm (*Pectinophora gossypiella* Saunders) *Entomological Journal of East China*, 4(2): 106~112]
- 万长寿, 窦守元. 1990. 棉花品种对红铃虫抗性鉴定. 棉花病虫害综合防治及研究进展. 45~48 [Wan C S, Dou S Y. 1990. Identify of the cotton varieties on the resistant to pink bollworm. *Advance in IPM on Cotton*. 45~48]
- 万胜印. 1982. 红铃虫. 南昌: 江西人民出版社 [Wan S Y. 1982. Pink Bollworm. Nanchang: Jiangxi People Press]
- 汪荣康. 1977. 利用棉花嫩头、蕾、苞叶等诱集棉红铃虫初步观察. 昆虫知识, 14(4):120~122 [Wang R K. 1977. The preliminary study on the pink bollworm attraction by using some cotton organs. *Entomol. knowledge*, 14(4):120~122]
- 邬汉英. 1984. 化学试剂诱杀红铃虫试验. 湖北农业科学, (7): 23 [Wu H Y. 1984. The chemical reagent as attractants on the control of pink bollworm. *Hubei Agricultural Sciences*, (7):23]
- 吴征彬, 郭介华, 张金发, 冯纯大. 1997. 棉花抗红铃虫材料筛选. 湖北农业科学, 6: 15~17 [Wu Z B, Guo J H, Zhang J F,

- Feng C D. 1997. Screening for cotton materials resistant to pink boll worm. *Hubei Agricultural Sciences*, 6: 15~17]
- 杨樟法, 吕仲贤. 1990. 棉红铃虫为害棉铃的损失估计. *昆虫知识*, 27(4): 208~209 [Yang Z F, Lu Z X. 1990. Estimation on losses of cotton boll by pink bollworm larvae. *Entomol. Knowledge*, 27(4): 208~209]
- 张振国. 1994. 棉花红铃虫第一代不必防治. *江西棉花*, 4: 24~25 [Zhang Z G. 1994. Unnecessary for pink bollworm control at first generation. *Jiangxi Cotton*, 4: 24~25]
- Adkisson P L. 1961a. Effect of larval diet on the seasonal occurrence of diapause of the pink bollworm. *J. Econ. Entomol.*, 54: 1107~1112
- Adkisson P L. 1961b. Fecundity and longevity of the adult female pink bollworm reared on natural and synthetic diets. *J. Econ. Entomol.*, 54: 1224~1227
- Adkisson P L. 1962. Timing defoliant and desiccants to reduce overwintering populations of the pink bollworm. *J. Econ. Entomol.*, 55: 949~951
- Adkisson P L. 1963a. Time measurement in the photoperiodic control of diapause in an insect. *In: Proceedings 16th International Congress Zoology*. 51
- Adkisson P L. 1963b. Time-measurement in photoperiodic induction of diapause in the pink bollworm. *Texas Agric. Exp. Stn. Prog. Rep.*, 2274: 4
- Adkisson P L. 1964. Relative susceptibility of various geographical races of the pink bollworm to certain insecticides. *Texas Agric. Exp. Stn. Prog. Rep.*, 2300: 4
- Adkisson P L. 1964a. Action of the photoperiod in controlling insect diapause. *Am. Nat.*, 98: 357~374
- Adkisson P L. 1965b. Biological clocks and insect photoperiodism. *In: Cotton Improvement Conference*. GA: Atlanta. 99~104
- Adkisson P L. 1965c. Light-dark reactions involved in insect diapause. *In: Aschoff J ed. Circadian Clocks*. Amsterdam: North-Holland Publishing. pp. 344~350
- Adkisson P L. 1966a. Action of light in controlling insect growth and development. *In: Proceedings International Congress on Electromagnetic Radiation in Agriculture 1965*. Roanoke. VA: 30~33
- Adkisson P L. 1966b. Internal clocks and insect diapause. *Science*, 154: 234~241
- Busck A. 1917. The pink bollworm, *Pectinophora gossypiella*. *J. Agric. Res.*, 9(10): 343~370
- Cheema M A, Muzaffar N, Ghani M A. 1980a. Biology, host range and incidence of parasites of *Pectinophora gossypiella*(Saunders) in Pakistan. *Pakistan Cotton*, 24(1): 37~73
- Cheema M A, Muzaffar N, Ghani M A. 1980b. Investigation on phenology, distribution, host range and evaluation of predators of *Pectinophora gossypiella* (Saunders) in Pakistan. *Pakistan Cotton*, 24: 139~176
- Cheema M A, Muzaffar N, Hussain I, Salim M. 1980c. Role of natural enemies in the control of pink bollworm in Pakistan. *Pakistan Entomol.*, 2(1/2): 1~10
- Common I F B. 1958. A revision of the pink bollworms of cotton (*Pectinophora* Busck (Lepidoptera: Gelechiidae)) and related genera in Australia. *Aust. J. Zool.*, 6: 268~306
- Glick P A. 1955. Pink bollworm moth collections in airplane traps. *J. Econ. Entomol.*, 48: 767
- Green N, Jacobson M, Keller J C. 1969. Hexalure an insect sex attractant discovered by empirical screening. *Experientia*, 25: 682~683
- Hummel H E, Gaston L K, Shorcy H H, Kaae R S, Byrne K J. 1973. Clarification of the chemical status of the pink bollworm sex pheromone. *Science*, 181: 873~875
- Ingram W R. 1994. *Pectinophora* (Lepidoptera: Gelechiidae). *In: Matthews G A, Tunstall J P eds. Insect Pests of Cotton*. Wallingford: CAB International. 107~149
- Meyrick E. 1905. Descriptions of Indian microlepidoptera. *J. Bombay Nat. Hist. Soc.*, 16: 580~619
- Pearson E O. 1958. The Insect Pests of Cotton in Tropical Africa. Empire Cotton Growing Corporation and Commonwealth Institute of Entomology. London. 355
- Raina A K. 1974. Ecophysiological and genetic aspects of diapause in the pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders). North Dakota State University Dissertation Abstr. Int. 35-09B: 4491
- Saunders W W. 1843. Description of a species of moth destructive to the cotton crops in India. *Trans. R. Entomol. Soc. London*, 3: 284~285
- Spears J F. 1968. The westward movement of the pink bollworm. *Bull. Entomol. Soc. Am.*, 14(2): 118~119
- Staten R T *et al.* Genetic control of cotton insect: the pink bollworm as a working programme. IAEA-SM-327/28, Vienna, 1993. 269~284

- United States Department of Agriculture. 1977. Task force review report of the pink bollworm program. U. S. Dept. Agric., Anim. Plant Health Inspection Serv., Plant Prot. Quar., 42
- Vosseler J. 1904. Einige feinde der baumwolkulturen in Deutsh-Ostafrika. [Some enemies of the cultivation of cotton in German East Africa]. Mitteilungen Aus Den Biologisch, Landwirtschaftlichen Institut, Amani No. 18, 4. German
- Walters M L *et al.* Pink bollworm integrated management using sterile insect under field trial conditions. Programme book of abstracts, IAEA-CN-71, Vienna, 1998. 17
- Wilson A G L. 1972. Distribution of pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saund.), in Australia and its status as a pest in the Ord irrigation area. *Aust. Inst. Agric. Sci. J.*, 38(2): 95-99

第九章 美国白蛾

第一节 发生情况与分布	261	第六节 生态学特性	266
第二节 识别与早期诊断	261	第七节 风险分析与早期预警	268
第三节 传入途径与入侵成因	264	第八节 国内外美国白蛾的防治研究	
第四节 危害和治理情况	264	情况	269
第五节 生物学特性	265	第九节 美国白蛾的控制技术	278

摘要 美国白蛾是我国重大的外来入侵害虫，是重要的国际检疫对象。自 20 世纪 70 年代末传入我国后，已相继在 4 省 2 市发生。由于其适应性强，繁殖量大，危害的寄主植物种类多，缺乏原产地有效天敌的制约，所以在侵入我国后先后在这些地区暴发成灾，对林业和园林绿化造成了巨大的危害，对生态和经济造成了重大损失。本章阐述了美国白蛾的发生、扩散蔓延和目前的分布情况，概述了美国白蛾的形态分类特征、生活史、生物学特性、生态学特性、发生及危害特点等，回顾了国内外对美国白蛾的研究、防治状况。美国白蛾在我国北方 1 年发生完整的 2 代，有些年份少数个体可以完成 3 代。经调查，美国白蛾在我国危害的寄主植物达 49 科 108 属 175 种，几乎包括了我国造林、园林绿化的所有树种及果树、花卉、蔬菜、农作物，以及多种野生乔灌木和草本植物。经过系统调查，共发现了美国白蛾的天敌昆虫 27 种，其中 2 种为美国白蛾幼虫期捕食性天敌，2 种为幼虫期寄生蜂，18 种寄生于美国白蛾蛹期及“幼虫-蛹”期，5 种寄生蜂为重寄生天敌昆虫。从其中筛选出了白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 这种优秀的寄生性天敌。通过人工大量繁殖和试验释放白蛾周氏啮小蜂开展生物防治，有效控制了美国白蛾的危害。调查并筛选出了防治美国白蛾的优良 NPV 病毒毒株，研究出了美国白蛾的人工饲料，利用人工饲料可以大量和常年饲养美国白蛾幼虫，而后接种扩增病毒，为人工大量增殖扩繁 HcNPV 病毒并保证质量创造了条件。大大提高了病毒的生产量，做到了病毒的工厂化生产。进行了利用美国白蛾核型多角体病毒(HcNPV)防治美国白蛾幼虫试验，将 HcNPV 与苏云金芽孢杆菌(Bt)复配成复合制剂喷洒使用，大大缩短了杀虫时间(美国白蛾幼虫在施药后 3d 之内为死亡高峰期)，发挥了这两种生物杀虫剂的优点。HcNPV+Bt 复合生物制剂的试验成功和防治应用弥补了利用白蛾周氏啮小蜂防治时当代美国白蛾幼虫造成危害的不足，可在城区及风景园林区等特定而重要环境的美国白蛾防治中应用。利用病毒和白蛾周氏啮小蜂综合应用于美国白蛾的防治，持续控制效果十分显著，防治后连续 5 年美国白蛾的有虫株率都保持在 1% 以下，没有造成危害。这项生物防治技术在控制美国白蛾的同时，保护了生态环境和人畜安全，也保护了生物多样性，值得大力推广应用。

关键词 美国白蛾 生物入侵 生物防治 白蛾周氏啮小蜂 美国白蛾 HcNPV 病毒

Chapter 9 Fall Webworm

Hyphantria cunea (Drury)

Abstract: Fall webworm *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) is a severe harmful insect pest to China. It was the end of 1970's when fall webworm was found invaded in China. Since then, it spread to many areas in four provinces and two municipalities. Because fall webworm has high reproductive capacity and adaptability, there are less natural enemies in new inhabitation and plentiful host plants in the new spread areas, it has caused serious damages to forests and ornamental trees in China, and thus great losses in ecology and economy. In this chapter, the origin of the fall webworm and its invading process were discussed. Its morphology, biology and ecology were summarized. The studies on its control methods were also retrospectively reviewed. The achievements in preventing and controlling fall webworm in China were also discussed. Fall webworm develops two generations in northern China each year. However, some individuals could reach the third in certain years when the temperature is relatively high in September. The pest is polyphagous species which can attack 175 species of host plants belonging to 49 families and 108 genera, nearly including all the tree species which we reforested and cultivated, and fruit trees, flower plants, vegetables, agricultural crops, as well as many wild arbors, bushes and grasses. After investigations in details we found 27 species of insect natural enemies for this pest, among which two are predators, two are parasitoids in its larva stage, 18 species are primary parasitoids in its pupa and/or larva-pupa stages, and five are hyperparasitoids. A very effective pupal parasitoid, *Chouioia cunea* Yang (gen. and sp. nov.) (Hymenoptera: Eulophidae), has been selected as a biological control agent. By mass rearing and releasing experiments of the parasitoid wasp, an ideal control result was achieved. Meanwhile, a good strain of fall webworm NPV (HcNPV) was selected. For mass production of the HcNPV, an artificial diet was chosen to feed the larvae of the pest in lab. The fall webworm larvae can be reared by the diet during the year at large scale. Through inoculation, large amounts of HcNPV were manufactured for biological control. After experiments by spraying the HcNPV plus Bt in third larva instar of the pest, excellent control result was achieved. Thus, a new technique for biological control of fall webworm was created, *i. e.* using HcNPV plus Bt in its larva stage and releasing the parasitoid in pupa stage. The two kinds of the natural enemies have been integrated to apply in the pest infested areas. It has shown the pest has been controlled effectively both in the current generation and afterwards for five years with the tree-infested rate below one percent. By extending the biocontrol technique, fall webworm in China could be managed significantly and the sustainable control result could be reached.

Key words: *Hyphantria cunea*, biological control, HcNPV, parasitoid, *Chouia cunea*

第一节 发生情况与分布

美国白蛾 *Hyphantria cunea* (Drury) 属鳞翅目 Lepidoptera 灯蛾科 Arctiidae, 是林木、果树、花卉及农作物严重的食叶害虫。因其常在新传入地暴发成灾, 造成重大的经济损失, 故被列为国际检疫对象。该害虫自 20 世纪 70 年代末侵入我国以来, 逐步蔓延扩散, 目前已在我国辽宁、山东、河北、陕西、天津、上海等省市发生, 危害严重时能将植物叶片全部吃光。不仅严重影响树木生长, 造成果树减产, 还严重破坏了园林绿化景观, 对我国的林业和园林绿化造成重大威胁。

美国白蛾原产北美洲, 分布于北纬 19°~55° 的广大地区, 包括墨西哥、美国、加拿大。第二次世界大战期间, 美国白蛾随军用物资的运输由现代交通工具从美国传播到欧洲的许多国家和亚洲的日本。1940 年首先在匈牙利发现, 后逐渐扩散, 现已广泛分布于除北欧 4 个国家以外的几乎所有欧洲国家, 包括匈牙利、俄罗斯、波兰、西班牙等。在亚洲已从日本传播至韩国、朝鲜。我国于 1979 年首次在辽宁省丹东市发现美国白蛾; 1982 年发现于山东省荣成县; 1984 年发现于陕西省武功县; 1990 年传入河北省秦皇岛市; 1993 年传入天津市; 1994 年在上海市发现。由于这种害虫具有传播速度快、繁殖力强(成虫产卵量高达 1800 粒)、危害的寄主植物多、取食量大等特点, 因而常常暴发成灾, 造成巨大的经济损失。在上述欧洲、亚洲国家都曾大发生, 造成了严重危害。

美国白蛾在北美并不是重要的林木害虫, 但在侵入欧亚大陆之后, 迅速发展成为一种危险的检疫性大害虫, 主要原因是由于在新传入地缺少有效天敌的制约造成的。据 1967 年统计, 北美洲、欧洲和亚洲的天敌分布情况如下(表 9-1)。

表 9-1 美国白蛾的天敌数量

地区	北美洲	欧洲	亚洲
捕食性天敌	34 种	46 种	
寄生性天敌	50 种	39 种	6 种
共 计	84 种	85 种	6 种

从当时欧洲和北美洲天敌发生情况来看, 尽管两个洲天敌的总数基本相等, 但共有的天敌仅有 4 种, 在原产地北美洲控制美国白蛾的主要天敌在欧洲并不存在。因此, 当美国白蛾入侵到欧亚大陆之后, 其主要天敌并没有跟随而来。由于没有原产地天敌的制约, 而新侵入地的天敌在短期内对新来的寄主表现得不适应, 是造成美国白蛾暴发成灾的重要因素。另外, 美国白蛾为什么在北美大陆北纬 19°~55° 有如此广泛的分布呢? 据有关资料表明, 在北美美国白蛾原产地, 不同纬度的美国白蛾在长期演化过程中对光的反应特性产生了变异, 形成了一个纬度渐变群, 即不同的地理宗。

第二节 识别与早期诊断

一、美国白蛾的分类地位及形态特征

美国白蛾, 也有人称之为网幕毛虫。美国白蛾的名称曾经十分混乱, 18~19 世纪已

有8个异名。20世纪40年代,国外资料中还有 *Hyphantria cunea* (Drury)及 *H. textor* Harris 两种, 英名分别为 fall webworm 和 spotless fall webworm。前者分布于美国南部, 翅白色但有黑斑; 后者分布于美国及加拿大, 翅白色无斑。Morris(1963)做了进一步研究, 证明两种类型的成虫均可通过饲养任何一方的幼虫来获得, 因此认为是一个种, 并将 *H. textor* 列为 *H. cunea* 的同物异名。后经日本的 Ito 试验证明, 成虫翅斑的产生与蛹期所受的低温及短日照的影响有关, 其中主要是低温的影响。现将各虫态形态简述如下。

(一) 成虫

成虫体白色, 体型中等大小, 体长 9~17mm, 翅展 25~45mm。雄蛾触角呈双栉齿状, 雌蛾触角锯齿状。越冬代雄蛾前翅多有暗色斑点, 当年第 1 代雄蛾前翅只少数个体具暗色斑点。前足基节及腿节端部橘黄色, 胫节和跗节大部分为黑色(图 9-1 中的 1 和 2)。



图 9-1 美国白蛾及受害状

1. 雌蛾及其所产之卵; 2. 雄蛾(越冬代); 3. 泡桐树受害状; 4. 法桐树上的美国白蛾 2 龄幼虫网幕;
5~6. 农田防护林被美国白蛾严重危害; 7. 白蜡树受害状; 8. 美国白蛾 5 龄幼虫

(二) 卵

圆球形, 直径 0.4~0.5mm。初产时淡绿色或黄绿色, 有光泽, 表面具多数规则的小凹刻(图 9-1 中的 1)。

(三) 幼虫

美国白蛾幼虫有两种类型(图 9-1 中的 8)。一种类型幼虫的头和背部毛瘤为黑色, 另一类型幼虫的头和背部毛瘤为橘红色。Oliver 首先将美国白蛾分成两个宗, 即“黑色宗”

和“橘色宗”。并描述了两个宗幼虫在体色和行为上的显著区别。Ito 等建议采用黑头型和红头型的术语来代替“黑色宗”和“橘色宗”。从美国白蛾在北美洲总的分布情况看,红头型似乎在美国南部占优势,而在美国北部及加拿大,黑头型明显占优势。

20 世纪 70~80 年代, Ito 等在温哥华进行了调查,发现了一种“镶嵌型”的美国白蛾幼虫。其特点是头部颜色黑红镶嵌,幼虫的行为与红头型相似。经过更广泛的调查,目前认为“镶嵌型”乃是红头型在北部地区的暗色类型。Ito 等建议将红头型与“镶嵌型”合并,称之为 Malacosoma 型。这样,美国白蛾就分成了两个不同的型,即黑头型和 Malacosoma 型。目前,除了幼虫的体色及行为上有明显的差别之外,从形态分类学上还找不出一个关键的特征来区分上述各型的蛹和成虫。各型幼虫的头色及生活习性的区别归纳如下(表 9-2)。

表 9-2 3 种类型美国白蛾的比较

幼虫头部颜色	幼虫嗜食的植物	幼虫在网幕内生活的时间	幼虫每日取食期	成虫的翅斑
黑	蔷薇科, 楝木属, 柿属, 桑科, 杨柳科	至 5 龄	昼夜取食	至少某些越冬代雄虫有斑纹
黑红镶嵌	蔷薇科 桦属中一种	至末龄	夜间取食	无
红	胡桃 柿属	至末龄	夜间取食	无

我国的美国白蛾幼虫大多属“黑头型”,身体细长,圆筒状。老熟幼虫体长 28~35mm,头黑色有光泽。身体为黄绿色至灰褐色。背方有一条灰黑色或深褐色的宽纵带,上面着生黑色毛瘤。体侧淡黄色,着生橘黄色毛瘤。气门周围散布淡灰色不规则小斑纹,侧线及气门下线黄色,腹面灰黄色至淡灰色,腹足黑色有光泽。幼虫的体色常有变化,即使由同一卵块孵化出来的个体也是如此。秋季随着气温的降低,幼虫体色逐渐变深,甚至变黑。

(四) 蛹

蛹体长 8~15mm,宽 3~5mm,暗红褐色有光泽。外面有一层黄褐色薄茧。

美国白蛾低龄幼虫群集结网生活是该虫的一大特点,故又称网幕毛虫。1~2 龄幼虫只取食叶肉,留下叶脉,叶片呈透明纱网状。3 龄幼虫开始将叶片咬成缺刻。3 龄前幼虫群集在一个网幕内危害,4 龄幼虫开始分成若干个小群体,形成几个网幕,藏匿其中取食。1~4 龄幼虫一直生活在网幕中。4 龄末的幼虫食量大增,5 龄以后分散为单个个体取食并进入暴食期。

二、早期诊断

美国白蛾在我国北方发生区内基本为 1 年 2 代,可以在其成虫发生期内通过在海关或疫区外围设置黑光灯来引诱成虫或利用性信息素来进行监测(张庆贺等,1998;朱丽虹等,1998),然后通过鉴定成虫特征来诊断是否为美国白蛾。同时也可监测其种群动态。

美国白蛾的最佳调查期为幼虫网幕盛发期至盛末期,各地的具体发生时间稍有不同。辽宁省最佳调查美国白蛾的时间为6月20日~7月10日调查第1代,8月20日~9月10日调查第2代(金传玲等,1998)。

第三节 传入途径与入侵成因

据分析,欧亚大陆美国白蛾的来源大体可分为3支。第一支1940年由北美传入匈牙利,进一步蔓延到欧洲多个国家;第二支1945年由北美洲传入日本;第三支1958年由北美洲传入韩国,进一步蔓延到朝鲜和我国。如上所述,不同纬度的美国白蛾对光照引起滞育的反应不同。尽管欧亚大陆的美国白蛾极可能全部来自美国,但并不能肯定以上3支美国白蛾均来自美国的同一纬度地区。因此,3支美国白蛾的光反应特性和其他生理特性有可能不同。

任何一种昆虫都有扩大其自然分布的趋势。美国白蛾的飞翔力虽然不强,但仍具有一定的飞翔能力,老龄幼虫具有转移为害的习性。因此,它的分布范围逐渐扩大,由孤立的疫源地扩展成片,由疫区扩展到非疫区。由于幼虫周身多毛,成虫翅比较发达,因此幼虫和成虫均有较大的乘风面积,可被大风吹到数百米甚至数千米远的地方。在朝鲜,美国白蛾每年自然蔓延的速度平均为20~22km,在原苏联为25~40km。

美国白蛾的扩散最主要的途径还是借助于交通工具进行远距离传播。纵观美国白蛾的传播历史,造成洲与洲之间的远距离传播主要是通过这种方式。借助于现代化的交通运输工具,害虫可以在数小时之内由一个洲到达另一个洲。在国内,美国白蛾借助于火车、汽车等交通运输工具,从一个省被带到另一个省也不需要多少时间。在大发生季节,当汽车通过疫区的公路时,路两旁的行道树上就可能会有大量的幼虫栖息。如果汽车撞上了被害的枝条,幼虫就有可能落入车箱而被带到远方。幼虫有较强的耐饥力,在大发生时当局部树木的叶子被食光后,幼虫能够做较长距离的爬行,可以爬到路过疫区的交通工具上而被远距离传播扩散。老熟幼虫喜欢在老树皮、包装箱缝隙内、包装用的麻袋中以及作为填充物的麦秸、谷草内化蛹,蛹随木材或包装材料可以被运输到其他地区。另外,成虫有一定的趋光性,也有可能夜间飞到火车、汽车上而被运往它地;卵块也同样有可能随带叶的栽植材料被运往它地。这就是说,美国白蛾的各个虫态,都有可能借助交通工具进行传播的。但总的来看,以4龄以上的幼虫和蛹传播的机会最多。

第四节 危害和治理情况

由于美国白蛾的适应性强,分布广泛。从原产地分布的纬度来看,我国大部分地区均在美国白蛾适生范围区内(海南岛海口市为北纬20°,黑龙江最北部的大兴安岭为北纬50°~56°),具备美国白蛾发生、危害的基本条件。

我国的美国白蛾是1979年首先在辽宁省丹东发现的,后陆续在山东、陕西、河北、天津市等省市发生,涉及140多个县(区),发生面积105万公顷(梅丽娟等,2002),相继给这些省市的林业、园林和城市绿化造成了极其严重的危害,酿成了重大损失。尤其是

近年来美国白蛾的发生已接近首都北京，一旦传入，将给首都的林业和园林绿化和 2008 年的“绿色奥运”造成重大威胁。

美国白蛾在我国发生后，各级政府十分重视，投入了大量的人力、财力进行防治，“九五”期间发生面积和危害程度有所减轻，但目前美国白蛾仍然是威胁我国农林、园林的重要害虫。为此，国家林业局实施了对美国白蛾的国家级工程治理，京津冀美国白蛾工程治理区涉及 3 省(市)的 67 个县(区)。实施工程治理以来，工程治理区防治总面积达 11.65 万公顷，严重发生面积由原来的 3.57 万公顷压缩到 1.46 万公顷，除治区由 31 个县(区)压缩到 24 个县(区)；发生乡镇由 204 个压缩到 143 个；疫点由 2366 个压缩到 1113 个；监控区由 18 个县(区)扩大到 24 个县(区)；保护区北京市截止 2003 年底尚未发现美国白蛾，距北京最近的天津市宝坻县疫情发生点向后退了 10 公里多(潘宏阳和吴坚，2001)。

美国白蛾在传入欧洲、亚洲多个国家后，都曾大发生，造成了严重危害。这些国家都进行了防治，方法是以喷洒化学农药为主，同时也积极寻找生物防治等其他有效的控制方法，但始终未找到有效的和对环境安全的防治技术，美国白蛾在这些国家还经常暴发成灾。

第五节 生物学特性

一、美国白蛾的生活史

美国白蛾在我国北方 1 年发生完整的 2 代。越冬蛹于次年 4 月下旬开始羽化。第 1 代虫期发生比较整齐，第 2 代各虫期则比较紊乱，虫期重叠现象严重，在同一时间内，既有不同龄期的幼虫，又有蛹。第 2 代大部分幼虫化蛹越冬，少部分化蛹早的如果当年温度较高可再发生 1 代，即能够发生第 3 代。在大连市和秦皇岛市一般年发生 2 代，遇上秋季高温年份，第 3 代也能完成发育。天津市、陕西关中地区第 3 代美国白蛾发生量较大，化蛹率也高，占总发生量的 30%左右。

二、各虫期的生物学特性

(一) 成虫

成虫羽化期在 1 天内有 2 个高峰：上午 9:00~10:00 时和下午日落后的黄昏时。以黄昏时的羽化占多数。刚脱出蛹壳的成虫对直立物表现出强烈的趋性。黄昏时分，成虫最为活跃，求偶、交尾多在此时进行，一直可持续到天亮前。成虫交尾一般需 11~16h，有时长达 48h 以上。大多数成虫一生只交配 1 次，少数有 2 次交尾习性。交尾结束后，雌蛾便开始产卵，卵一般产在树冠外围的叶片背面，极少数在叶片正面及枝杆上。成虫产卵时间较长，在白天、黑夜均可进行，有时长达 2d 以上。一头雌蛾一般只产 1 个卵块，大部分卵为第一天生下。在不受干扰的情况下，雌虫产的卵为紧密单层排列，卵块上覆盖有一层致密的雌蛾腹部脱落的体毛保护。雌蛾最高产卵量可达 1800 粒，平均 800~900 粒。雌蛾寿命一般 5~8d，雄蛾 4~7d。成虫一次飞翔距离在 100m 以内。成虫有弱的趋光性。

(二) 卵

美国白蛾第1代卵期因环境温度较低,因而历期较长,为11~20d,平均为15d。第2代卵期时温度较高,卵期短,为7~15d,平均11d。卵即将孵化时变黑,部分因未受精等原因不能孵化的卵则变黄。同一卵块的卵孵化时间可相差1~2d,有时更长些。孵化率一般都在90%以上,大部分可达100%。相对湿度高有利于孵化。5月份的干热风往往使已变黑的卵粒不能孵化。

(三) 幼虫

幼虫有6~7个龄期,其历期随环境温度变化而不同,一般为40d左右。第1代幼虫一般发育6个龄期。第2代幼虫则出现分化,有的发生6个龄期,而有的则发生7个龄期。在烟台,发生早的幼虫经历6个龄期后于8月10日左右即开始化蛹,这部分个体可继续发育,蛹期结束后羽化产卵发生第3代。但有时同一卵块发育出的幼虫其中一部分在6龄时化蛹,随后发生第3代,其余大部分进入7龄继续取食,然后化蛹越冬。对这种分化的机制目前还不明了。8月15日以后仍未化蛹的幼虫则全部进入7龄继续取食,然后化蛹越冬。第3代卵于8月下旬即可见到,10月上旬可以见到幼虫和预蛹。这时易受气候的影响。若温度合适(高于15℃),能正常化蛹,若遇低温这部分幼虫和预蛹即死亡。在我国北方,这时常常温度骤降而有霜冻出现,所以第3代幼虫和预蛹常常不能正常化蛹而夭折。但在气温高的年份,这部分幼虫能够正常化蛹而后越冬,完成3代。1998年和1999年,烟台地区第3代美国白蛾老熟幼虫正常化蛹率近5%。

(四) 蛹

第1代美国白蛾在其为害的寄主树木的树皮裂缝、附近的碎砖瓦砾下、枯枝落叶下化蛹。第2代(即越冬代)化蛹场所较为分散,老熟幼虫往往爬行相当长一段距离,寻找合适的化蛹场所。一般在屋檐下、墙缝内、墙角处、碎砖瓦砾下和树干老皮裂缝内及枯枝落叶层下化蛹。第1代蛹期为12d左右,第2代蛹期为8~9个月。美国白蛾以蛹越冬,若冬季气候寒冷,蛹的死亡率较高。

第六节 生态学特性

一、美国白蛾的发生及危害特点

美国白蛾幼龄幼虫群集结网生活是该虫的一大特点,故又称网幕毛虫。1~2龄幼虫只取食叶肉,留下叶脉,呈透明纱网状。3龄幼虫开始将叶片咬成缺刻。3龄前的幼虫群集在一个网幕内危害,4龄幼虫开始分网,分成若干个小群体,形成几个网幕,藏匿其中取食。1~4龄幼虫一直生活在网幕中。4龄末的幼虫食量大增,5龄幼虫破网分散为单个个体取食,进入暴食期。幼虫有较强的耐饥力,5龄以上的幼虫9~15d不取食仍可继续发育,这时的幼虫爬行能力较强,可以爬附于交通工具进行远距离传播。

由于各发生地区温度不同,4月中旬或下旬首见越冬蛹羽化,成虫羽化期可延续到5

月中下旬。当年第一代卵最早可在4月下旬见到，卵期可延续到5月下旬和6月上旬。第1代幼虫最早见于5月上旬，至7月中旬仍能见到；6月中下旬为第1代幼虫危害盛期，6月中旬发育较早的幼虫已经开始化蛹，7月上旬，第1代成虫出现，成虫期可延至7月下旬。第2代幼虫7月中旬开始发生，幼虫一直可延续至9月下旬。8月中旬为第2代幼虫危害盛期，为美国白蛾全年危害最为严重的时期，常常造成整株树木叶子被吃光的现象(图9-1中的3, 5, 6, 7)。

(一) 光、温度、湿度等对美国白蛾发育的影响

美国白蛾为喜光性害虫，多发生在交通沿线，城市、居民区的园林绿化树木及公园、果园等处。在较大林分的林缘也多发现，但并不深入到林分深处。成虫将卵块产在树冠周缘和顶端枝条的叶片上，这一生物学特性也反映了该虫在发育上的这种要求。平均温度23~25℃，相对湿度75%~80%最适于卵的发育；平均温度24~26℃，相对湿度70%~80%最适于幼虫发育。温度过高或过低均不利于美国白蛾发育，但高湿却对美国白蛾发育有利。越冬蛹虽能忍受-30℃的低温，但早春温度的大幅度波动能够造成越冬蛹更多死亡；春季5~6月份的低温和阴雨连绵可阻止成虫的羽化和第1代幼虫的发育；7~8月的高温和干燥的气候可影响第2代的发育。据报道，当温度升至32~38℃，相对湿度降到30%~50%时，或者当气温降到13~14℃时，都会严重影响美国白蛾的发育和生存。在高温低湿条件下，造成卵块干瘪，幼虫畸形，蛹干死或发育不正常，成虫产卵量极低。而且，由于气候干燥又往往造成寄主植物提前落叶，导致第2代幼虫由于缺少食物而大批死亡。

(二) 美国白蛾的食性

美国白蛾是杂食性的食叶害虫，为害的寄主植物十分广泛，在美国有120种，日本300多种，欧洲234种。据我们调查，美国白蛾在我国北方危害的植物达49科108属175种。主要为害行道树、四旁树等风景园林树木以及果树，包括阔叶树，甚至针叶树，也包括多种草本植物。如此众多的寄主植物种类给防治带来了很大困难，是其难以用喷洒农药方法有效控制的主要原因之一。

虽然美国白蛾寄主范围很广，但对不同的寄主植物表现出一定的嗜食性。特别喜食的植物有：复叶槭、桑、白蜡、法桐、杨、柳、苹果、花曲柳、水曲柳、泡桐、臭椿、杏树、枫杨、山楂、榆等。在喜食的植物上，成虫产卵多，幼虫数量大，植物被害严重。一般喜食植物有：樱花、樱桃、海棠、赤杨、李、桃、板栗、核桃、核桃楸、刺槐、丁香、山定子、梨、葡萄及多种农作物、蔬菜、杂草等。偶然危害的植物有：国槐、楸树、柞树等。厌食植物有：银杏、落叶松。在一般情况下，美国白蛾并不为害针叶树，但在暴食期分散为害的老龄幼虫期，往往对个别针叶树(落叶松)造成一定程度的为害。

二、美国白蛾的生态适应性

美国白蛾食性杂，能够适应多种不同的生态环境。多数情况下，当春季气温升至15℃以上时成虫开始羽化；秋季进入滞育、停止活动也大都发生在15℃以下的温度条件下。

因此,可以将一年中日平均温度高于 15℃ 以上的天数作为美国白蛾全年活动的时间。美国白蛾发生 1 代需要全年有 90d 高于 15℃、发生 2 代需要全年有 120d 高于 15℃。在亚热带地区可发生 3 代。

在实验室和野外研究初始幼虫的种群大小对美国白蛾幼龄幼虫存活的影响中发现,在实验室内,种群的大小对幼虫的生存和发育影响不大,能保证最初孵化的幼虫进行取食并生存下来一般最少需要 10 头幼虫。在野外,美国白蛾幼虫若在桑树上保持高的生存率需至少 100 头幼虫。对于不同的寄主植物来说,保持高的生存率需要超过 250 头。幼虫种群越大,网幕越紧密,对幼虫越有保护性。

第七节 风险分析与早期预警

Saulich 研究了非生物因素在决定外来物种的分布范围方面所起的作用后,认为当地的条件如能与美国白蛾完成其生活史所要求的温度和光周期一致,那么美国白蛾可以很好地在该侵入地生存繁殖(Saulich, 1994)。

一、美国白蛾在我国的适生范围

对于美国白蛾在我国的适应性问题,应该在对美国白蛾种群进行光照、积温实验的基础上,结合我国各地的气候和植被情况加以分析。张生芳和于长义等(1985)曾作如下的估计:

(1) 鉴于美国白蛾目前已经向北扩展到我国辽宁省的辽阳,再往北继续扩展的潜力似乎不大,向南至长江以北的广大平原区应做为重点保护区。西北的山地和沙漠地带不利于生存。

(2) 美国白蛾喜欢温暖和高温条件,单从本身通过飞翔扩散考虑,有可能首先在我国辽宁、河北、山东甚至江苏的沿海地带迅速蔓延,同时由沿海向内地逐渐深入;如果借交通工具传播,可以在其适生区的任何位点上立足,我国陕西武功县的情况就是如此。后一种方式是最危险的,需要采取严格的植物检疫措施加以避免。

(3) 上述分析仅适于我国现存的美国白蛾群体。来自美国南部和墨西哥的美国白蛾群体,可能在我国更南部扎根;来自美洲美国白蛾分布区最北部的群体,有可能在我国更北的地区立足。

二、美国白蛾在我国扩散的风险

美国白蛾传入我国已 20 多年,由于采取了积极的防治措施,美国白蛾已经得到了一定的控制,但在疫区还经常暴发成灾,特别是美国白蛾进一步蔓延扩散的危险依然存在。因此,加强检疫措施依然是防止美国白蛾扩散的必要手段。

目前,在我国疫区周边的保护区依然是防范的重点。在其他能够满足美国白蛾生长发育的地方也须严密监控美国白蛾的传入。由于我国的大部分地区均适合美国白蛾生存,其传入和暴发的危险将长期存在。而其一旦传入新的地区,对其周边地区都应该加强检疫,避免进一步扩散。

第八节 国内外美国白蛾的防治研究情况

一、国际上对美国白蛾发生和防治的研究

美国白蛾在欧洲许多国家和亚洲的日本、韩国发生后,他们都进行了防治,方法是以喷洒化学农药为主,也开展了美国白蛾天敌的调查和研究,查明共有44种寄生性天敌和23种捕食性天敌昆虫,但都没有发现有效的天敌种类。根据国际经典生物防治理论,在害虫的新传入地,要有效控制该种害虫,就必须从害虫的原产地引进天敌,使其立足定居,逐步扩大种群数量,才能达到对该害虫的控制。据此,原苏联和南斯拉夫于1953年在欧洲植物保护组织(European Organization for Plant Protection)的资助下,开始了天敌引进的合作研究,分别从美国和加拿大分批引进天敌昆虫进行美国白蛾的生物防治研究。首批引进的天敌共8种(7种寄生蜂,1种寄生蝇):白蛾绒茧蜂 *Apanteles hyphantriae* Riley, 强壮高缝姬蜂 *Campoplex validus* (Cresson), 天幕毛虫镶颚姬蜂 *Hyposoter fugitivus* (Say), 槽沟镶颚姬蜂 *H. pilosulus* (Provancher), 贝克悬茧蜂 *Meteorus bakeri* Cook et Davis, 白蛾悬茧蜂 *M. hyphantriae* Riley, 白蛾内茧蜂 *Rogas hyphantriae* Gahan, 白蛾内寄蝇 *Mericia ampelus* (Walker)。后来在1958~1959年,又引进了一批天敌,除上述几种外,还增加了1种小蜂和1种寄生蝇,即白蛾狭面姬小蜂 *Elachertus hyphantriae* Crawford 和游走蠋寄蝇 *Lespesia aletiae* (Riley)。

上述10种天敌昆虫引入后,先在前南斯拉夫进行了释放利用研究,后来于1958~1966年在原苏联进行了引进试验。在1960~1963年,又引入前捷克斯洛伐克。虽然经过了近15年的努力,进行了大量的试验研究,但最后都失败了。这些天敌没有能够立足定居,更谈不上达到持续控制了。主要原因是引入的这些天敌缺乏转主寄主,仅仅以美国白蛾作为寄主不能保持其种群的延续。因此,欧洲这些国家的美国白蛾的危害依然十分严重,只能靠投入大量的财力、人力、物力进行化学防治。依赖化学防治的弊端有目共睹:污染了环境,杀伤了天敌,使害虫的抗药性增强,使生态平衡遭到破坏,造成美国白蛾每隔几年就要大发生一次的恶性循环。因此,美国白蛾至今仍然是欧亚几十个国家危害甚烈的严重害虫,对美国白蛾进行无污染的有效和持续控制仍然是一个世界性的难题。国际上进行的其他研究还有以下几个方面。

(一) 病原微生物研究

1. 病原细菌的研究

迄今尚未发现美国白蛾的专性致病细菌,目前研究和应用最多的是苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis*。韩国使用苏云金杆菌 AF101 菌株防治美国白蛾幼虫,取得了较好的效果,室外试验杀虫率达到98.6%(Kim et al., 1982)。意大利于1984~1985年利用苏云金杆菌库尔斯塔克亚种 *B. thuringiensis kurstaki* 防治美国白蛾幼虫,杀虫率高于90%(Deseo and Rovesti, 1986)。Ohba 和 Aizawa(1989)在日本发现了苏云金杆菌的两个新亚种: *B. thuringiensis sumiyoshiensis* 和 *B. thuringiensis pukuokaensis*, 证明对美国白蛾的幼虫有较强的毒性。在苏云金杆菌的分子生物学方面,韩国在1986年成功地克隆了苏云

金杆菌(库尔斯塔克亚种)的晶体内毒素(δ -内毒素)基因,而且表达出了有较强杀美国白蛾活性的蛋白毒素(Min and Park, 1986)。1989年,原苏联在室内对美国白蛾4龄幼虫做了敏感性试验,认为美国白蛾在19:00~23:00时对苏云金杆菌库尔斯塔克亚种最敏感,而7:00~11:00时抗性最强(Fedosov, 1989)。

2. 病原真菌的研究

至今为止尚未发现美国白蛾的专性寄生真菌,所以目前研究和应用的主要是白僵菌 *Beauveria bassiana* 等传统的病原真菌。意大利在室内测定了白僵菌和绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 对美国白蛾幼虫的毒性,在10g/l (10^9 分生孢子/g)浓度下,美国白蛾幼虫的死亡率达到83%~100%(Montermini *et al.*, 1985)。由于白僵菌在野外条件下,对湿度条件要求较高,故很难达到理想的防治效果,在使用中受到了一定的限制,所以近年来这方面的研究较少。

3. 病毒的研究和应用

美国白蛾的致病病毒目前已知的种类共有3类4种, NPV、CPV和两种GV。对这些病毒都有不同程度的研究和应用。1979年Im等在韩国的美国白蛾幼虫尸体上发现了核型多角体病毒(HcNPV),并对其进行了毒力测定(Im *et al.*, 1979)。日本用病毒糊、病毒悬液、病毒粉与凡士林的混合物处理未产卵的白蛾成虫,证明在室内外NPV均可以对后代起作用。而且以用病毒糊处理的效果最好。在野外条件下,用病毒糊处理的雌蛾产卵后,幼虫可以被NPV感染致病;而用病毒悬液、病毒粉与凡士林的混合物处理后,幼虫不感染病毒,对雌蛾交尾、产卵行为无影响,但卵的孵化率下降(Kunimi, 1982)。Lee以TNM-FH-T为媒体成功地在草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 细胞内复制出美国白蛾核型多角体病毒,并在1988年对其做了温度敏感性试验,在32℃的条件下,12个突变种基本上都不能形成多角体。后将苏云金杆菌库尔斯塔克亚种的HD-1菌株中的杀虫蛋白(δ -内毒素)基因(ICP)导入到美国白蛾核型多角体病毒中,命名为ICP-HcNPV病毒杀虫剂,杀虫活性较高(Lee and Lee, 1991)。

英国对美国白蛾核型多角体病毒和从美国白蛾幼虫上分离出的两种颗粒体病毒作了感染美国白蛾幼虫实验,在 10^5 PIB/ml的剂量下,美国白蛾核型多角体病毒的致病死亡率为62.5%~100%,颗粒体病毒在 5×10^9 PIB/ml剂量下的致病死亡率分别为88.1%和90.0%(Pritchett *et al.*, 1980)。Boucias和Nordin(1979)在室内对美国白蛾质型多角体病毒(HcCPV)进行了研究,白蛾幼虫的死亡率随病毒剂量的增加而提高,致死时间与幼虫龄期和病毒的剂量有关。

4. 病原微孢子虫研究利用

对美国白蛾病原微孢子虫和线虫的研究起步较晚,但是近年来这方面的研究工作比较多,取得了一些成果。首先在美国对美国白蛾的3种微孢子虫进行了形态、分布方面的研究(Nordin and Maddox, 1974)。继而,原苏联从柞蚕 *Antheraea pernyi* 幼虫体上分离出一种柞蚕微孢子虫(*Microsporidia* sp.),在室内人工接种美国白蛾幼虫,死亡率高于85%。随后,在1982年又从美国白蛾幼虫尸体上分离到两种致病的微孢子虫(*Nosema* sp.,

Thelohania sp.), 它们在室内对美国白蛾的杀虫活性很强(Simchuck and Lysenko, 1982)。日本从美国白蛾幼虫尸体上分离出一种梅氏微孢子虫 *N. mesnili*, 接种美国白蛾幼虫体上, 发现这种微孢子虫主要寄生在幼虫的神经组织内, 破坏它的神经系统。在研究中还发现, 微孢子虫能被幼虫体内的抗血清胶合而失活(Abe, 1998)。由于微孢子虫的杀虫活性较高、选择性比较强, 所以应用前景较好。但是在生产应用时也存在一些问题, 如致病力与环境条件的关系以及大规模制剂的扩增生产等。

5. 病原线虫的研究和利用

日本用夜蛾斯氏线虫 *Steinernema feltiae* 接种美国白蛾幼虫, 获得了较好的实验效果。在高湿、低温条件下, 线虫的存活率高, 致死时间短; 在低湿、低温条件下, 22h 后的死亡率为 85.1%(Yamanaka *et al.*, 1986)。此外, 嗜菌异杆线虫 *Heterorhabditis bacteriophora* 对美国白蛾的幼虫有致病力, 该线虫是 1976 年由波兰引入原苏联的(Ivanova and Danilov, 1995)。从目前美国白蛾病原线虫的研究来看, 由于线虫对环境条件的要求比较高, 受客观条件的影响较大, 所以近年来这方面的研究和应用较少。

(二) 捕食性天敌的研究和利用

在自然界中, 捕食性天敌对美国白蛾起着重要的控制作用。1978~1982 年, 韩国调查了美国白蛾的捕食性天敌, 发现 14 种捕食性昆虫, 39 种蜘蛛(10 科 34 属)。另外, 鸟类捕食也在美国白蛾自然种群控制中起到非常重要的作用(Kim *et al.*, 1982)。之后于 1986~1988 年又进行了天敌的调查, 发现的天敌包括蜘蛛目 Araneae、半翅目 Hemiptera 等 9 个目, 以蜘蛛目种类最为丰富, 共 49 属 11 科(Kim *et al.*, 1990)。Kunimi(1983)调查了东京地区的美国白蛾捕食性蜘蛛, 共计 10 科 34 属。在各个地方之间以及两代美国白蛾之间, 蜘蛛区系存在差异, 优势种为三突花蛛 *Misumenops tricuspidatus*, 个体数量占蜘蛛总数的 25.5%(Kunimi, 1983)。在欧洲, Sharov 和 Izhevskii(1987)调查了原苏联南部地区的美国白蛾网幕内的捕食性蜘蛛, 共有 10 科 25 属。在乌克兰美国白蛾的捕食性天敌有 21 种昆虫和 25 种蜘蛛, 在数量上以蜘蛛为优势类群。捕食性昆虫以姬蝽科 Nabidae、蝽科 Pentatomidae、草蛉科 Chrysopidae、瓢甲科 Coccinellidae 为主, 幼虫被捕食率为 5%~62%(Belskaya *et al.*, 1985)。一些地区美国白蛾幼虫被柞蚕马蜂 *Polistes gallicus* 攻击, 而且成为当地控制美国白蛾的有效手段(Valentyuk *et al.*, 1989)。意大利 Po Valley 地区至少有 10 种蜘蛛可以捕食美国白蛾的幼虫和蛹, 平均捕食率为 21.4%(Groppali and Priano, 1993)。在本地天敌对美国白蛾的控制方面, Tadic 经研究认为, 各种天敌对卵和幼虫的控制作用在年度间影响不大, 但对蛹和成虫的寄生或捕食却有相当大的影响(Tadic, 1975)。

从对美国白蛾的捕食性天敌的研究现状来看, 目前的研究主要集中在种类、区系和自然控制的调查上, 还未见有进一步利用于生物防治的研究。从研究结果来看, 蜘蛛目的种类、数量、控制能力较高。在应用方面, 主要提倡天敌群落和优势种群的保护和利用其自然种群的控制能力。由于捕食性天敌的捕食范围比较广, 不易对美国白蛾形成集中攻击, 不能完全控制美国白蛾的危害, 而且大规模人工繁殖捕食性天敌用于生物防治

存在许多的困难,所以依靠人工饲养、释放捕食性天敌来控制美国白蛾还未见有进一步研究。

(三) 寄生性天敌的研究和利用

美国白蛾寄生性天敌昆虫的研究主要集中在寄生蜂和寄生蝇两大类群上。

1. 寄生蝇的研究利用

韩国在美国白蛾越冬蛹中发现了 2 种寄生蝇,即日本丛毛寄蝇 *Eutachina japonica* 和饰腹寄蝇 *Sturmia picta*, 寄生率为 2.4%~10.7%, 前者在数量上处于优势(Poong *et al.*, 1981)。乌克兰在 1981~1983 年调查到 36 种寄生性天敌,其中古毒蛾追寄蝇 *Exorista larvarum*、康刺腹寄蝇 *Compsilura concinnata* 为优势种,对美国白蛾的寄生率为 22%(Sharov and Izhevskii, 1984)。在乌克兰 Stavropol 地区的调查表明,康刺腹寄蝇是当地美国白蛾蛹期的优势寄生种,是一种有可能被利用于生物防治的天敌(Sovirshenova, 1991)。在法国南部生物防治区,20%的美国白蛾蛹被透翅毛瓣寄蝇 *Nemorea pallucida* 寄生(Moussion and Gravaud, 1987)。在意大利 Po Valley 谷地,幼虫和预蛹被古毒蛾追寄蝇、康刺腹寄蝇、透翅毛瓣寄蝇寄生,寄生率为 3.52%~17.63%(Nanni, 1991)。

在寄生蝇的饲养繁殖方面,国外也进行了一些研究。用牛血清和寄主提取物为主的人工饲料饲养古毒蛾追寄蝇,效果与用大蜡螟 *Galleria mellonella* 作为替代寄主相似,可以取代大蜡螟用于寄生蝇的人工繁殖(Mellini and Campadelli, 1994)。在食料中加入 0%~5%的蜡螟提取物,可以提高成虫的羽化率,此后又成功地解决了配方中的昆虫物质以及寄蝇对食料的产卵选择性问题的(Bratti and Campadelli, 1995; Bratti and Coulibaly, 1995)。在寄生蝇的保护方面,经研究发现美国白蛾幼虫对杀螟松等几种化学杀虫剂不太敏感,但成虫却十分敏感,刚羽化出的日本追寄蝇也对这些药剂相当敏感,所以应在防治美国白蛾的过程中要注意选择专性强的杀虫剂,以免对天敌造成伤害(Yasuhiko, 1998)。从对寄生蝇的研究结果来看,寄生于美国白蛾的寄生蝇种类比较少,且优势种差异不大,主要寄生老熟幼虫和预蛹。由于寄生蝇的飞行、寻找寄主的能力较强,所以具有一定的生物防治利用前景。

2. 寄生蜂的研究

经调查,韩国的美国白蛾夏季蛹和越冬蛹共有 14 种寄生蜂,主要是姬蜂科和小蜂科的种类,自然寄生率达 36.6%(Kim, 1982)。汉城地区共发现 7 种寄生蜂,各地之间天敌的种类差异不大,舞毒蛾黑瘤姬蜂 *Coccygomimus disparis* 为优势种,美国白蛾幼虫期各种天敌总寄生率为 26.6%~45.6% (Poong *et al.*, 1981)。在原苏联的一些地区,金小蜂 *Psychophagus omnivorus*、古北黑瘤姬蜂 *Pimpla instigator*、卷蛾黑瘤姬蜂 *P. turionellae* 为美国白蛾寄生蜂中的优势种,寄生率达 30%左右。而寄生卵的赤眼蜂数量很少,对第二代卵的寄生率不超过 2%(Sharov and Izhevskii, 1987)。在意大利,古北黑瘤姬蜂和卷蛾黑瘤姬蜂 *Pimpla torionellae*、啮小蜂(*Tetrastichus goidanichi* 和 *T. pteromalids*)对白蛾蛹的寄生率为 2.07%~35.85%(Nanni, 1991)。在乌克兰南部地区,金小蜂 *Psychophagus*

omnivorus 是当地的优势种, 第一代的寄生率高于第二代, 寄生率最高可以达到 80%, 在当地没有发现该蜂的其他寄主 (Sharov and Tsimbulova, 1989)。法国西南部美国白蛾蛹期天敌中, 金小蜂 *Psychophagus omnivorus* 的寄生率为 5%, 是寄生蜂中的优势种类 (Moussion and Gravaud, 1987)。另外, 在 1992~1997 年对美国白蛾越冬蛹的研究中, 10 种寄生性天敌的总寄生率达到 48%, 其中分盾啮小蜂 *Terastichomyia disiocampae* 占 27%, 黑瘤姬蜂 *Pimpla hypochondriaca* 占 14%。研究者认为, 尽管寄生蜂不能把美国白蛾控制到一个低的经济允许水平, 但仍有必要加以保护和利用 (Marchesini *et al.*, 1998)。

为了利用寄生蜂生物防治美国白蛾, Izhevskii 等对曾经从美国引入俄罗斯的两种寄生蜂——白蛾绒茧蜂 *Apanteles hyphantria* 和外寄生于美国白蛾幼虫的白蛾姬小蜂 *Elachertus hyphantria* 生物学进行了研究, 认为尽管引种以后的一段时间内没有起到明显的防治作用, 但是从当时的寄生情况来看, 仍然有重新引种的必要 (Izhevskii and Mironova, 1993)。

在世界各新传入地国家对美国白蛾天敌的研究中, 查明共有 44 种寄生性天敌和 23 种捕食性天敌昆虫, 但都没有发现有效的天敌, 也未进行天敌昆虫的大量繁殖和利用研究。

(四) 美国白蛾性信息素研究

以美国白蛾性信息素诱捕美国白蛾雄成虫, 可以减少美国白蛾雌雄成虫交配几率, 降低下一代的虫口密度。Hill 分析了美国白蛾的性信息素, 成分包括 9, 12-十八烷二烯、9, 12, 15-十八烷三烯、3, 6-顺-9, 10-环氧二十一烷二烯三种成分, 与棉黑灯蛾 *Estigmene acre* 性信息素成分基本一样 (Hill and Kovaley, 1982)。在不同地区, 美国白蛾性信息素的 3 种成分的比例不同, 加拿大地区为 5:6:13; 乌克兰地区为 1:8:12; 美国为 1:6:27。意大利不同配比的 1, 3, 6-9, 10-环氧二十一烷三烯、3, 6-9, 10-环氧二十一烷二烯和亚麻酸 3 种化学物质在意大利不同地区进行了诱集美国白蛾雄成虫试验 (Trematerra *et al.*, 1993)。目前, 日本已生产出美国白蛾的性信息素诱芯, 可以用于测报和防治美国白蛾。

二、我国防治美国白蛾技术的研究

(一) 早期研究

自 1979 年美国白蛾传入我国后, 国内许多科研及生产单位进行了防治技术研究。在 20 世纪 80 年代, 陕西、辽宁等地曾进行了利用美国白蛾核型多角体病毒 (NPV) 防治试验 (艾德洪等, 1984; 刘岱岳, 居蜀生, 1986), 防效较好, 但没有解决病毒的大量扩增问题, 只是在小面积、小范围内做了试验, 随后也没有坚持下来。

在苏云金杆菌研究方面, 汤全正等 (1991) 从日本引入的苏云金杆菌制剂 (库尔斯塔克亚种) 中分离出 BT869 菌株, 室内试验, 对美国白蛾 3 龄、4 龄、5 龄幼虫的 LD_{50} 分别为 4.42×10^5 /ml、 1.26×10^6 /ml、 1.14×10^6 /ml。室外 1.14×10^7 /ml 浓度下, 48~72h 后 3~5 龄幼虫的死亡率可达 100%。

魏成贵和吴佩玉 (1984) 利用从柞蚕中分离出索科线虫 (*Complexomermis elegans* 和

Heramermis sp.)防治美国白蛾,证明它们可以寄生美国白蛾幼虫,但是寄生率不高。在下大雨后 12d 调查,对第一代幼虫的寄生率为 21%,第二代的寄生率也只有 27.7%,具体的原因尚不明了。

舒超然和于长义(1985)调查了美国白蛾的天敌,发现卵期的主要捕食性天敌为大草蛉 *Chrysopa septempunctata*、中华草蛉 *C. sinica*、丽草蛉 *C. formosa*、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 等;幼虫期的天敌主要有 20 多种蜘蛛,包括机敏漏斗蛛 *Agelena difficilis*、三突花蟹蛛 *Misumena tricuspidatus* 等,捕食性昆虫种类和卵期相似。另外,发现可以捕食白蛾幼虫的其他天敌还有两栖类和鸟类等;蛹期的捕食性天敌主要为步甲和蜘蛛、蚂蚁等,寄生性天敌有 1 种姬蜂、1 种茧蜂和 3 种寄蝇。成虫的天敌以鸟类和蜘蛛为主。

在信息素研究方面,张庆贺等(1998)报道,用 1, 3, 6-9, 10 环氧二十一烷三烯、9, 12, 15-十八烷三烯、3, 6-9, 10 环氧二十一烷二烯按 1:8:1 的比例混合后,以每剂 5mg 的剂量制成美国白蛾的人工性信息素与美国白蛾处女雌蛾的诱集效果相当。增加剂量或增加诱芯后,诱集的雄蛾数量无明显的变化。诱捕器放置的高度对诱集数量影响很大,在高度为 4~7m 时诱集的雄蛾比 2m 时多 2~4 倍。第一代雄成虫在日落后 3h 内诱集的数量比较集中,而第二代雄成虫在日出前 1.5h 有一个诱集高峰,刚日落时有一个弱高峰。表明该性信息素具有较好的引诱效果。但目前我国还不能人工合成该种性信息素。

(二) 近年的研究进展

1. 我国的美国白蛾发生和危害及防治具有下述特点和难点:

(1) 由于美国白蛾为喜光性昆虫,多发生在城市、乡镇、居民区、公园等处的园林绿化树木和行道树以及果园等处,要求我们防治时绝对不能使用对环境、人畜有害的化学农药。

(2) 美国白蛾危害的树木许多都是 15~25m 高(或以上)的大树,而目前我国的机动喷雾器扬程达不到这样的高度(最高扬程为 12m),不管是喷洒对环境安全的生物农药还是化学农药,由于喷洒不彻底而防治效果差。另外,在这样的地区和条件下也不适合飞机喷洒作业。

(3) 美国白蛾危害的寄主植物种类多,几乎包括了我国造林、园林绿化的所有树种及果树、花卉、蔬菜、农作物,以及多种野生乔灌木和草本植物,而我们在防治时往往只喷洒行道树及园林绿化树木,无法也不可能将各个地方各个角落所有的美国白蛾危害的植物都彻底防治到。而这部分未防治的植物上的美国白蛾随后又会迁飞转移到防治过的树木和植物上危害,因而就造成“年年防虫,年年有虫”的局面,杜绝不了危害。再者,美国白蛾幼虫有网幕保护,喷药防治时药剂不易接触虫体也是造成防治效果差的原因之一。

(4) 美国白蛾在我国发生区多分布在沿海地区(如辽宁大连市、河北秦皇岛市、山东烟台市、天津市),由于这些地区的水产养殖业(虾、蟹)发达,因而对环境安全的仿生型农药(如灭幼脲系列)不能使用;而且我国的美国白蛾发生区也是养蚕业(柞蚕、家蚕)地区,因而也限制了杀虫比较广谱的生物杀虫剂的使用。

(5) 由于美国白蛾的适应性强,分布广泛,在原产地分布于北纬 19°~55°之间的广大

区域,我国几乎全国均在美国白蛾适生区内,具备美国白蛾发生、危害的基本条件。在美国白蛾刚传入中国时,我国制定了“严防、扑灭”的控制策略,这是完全正确的,对阻止其蔓延扩散起到了很重要的作用,但在美国白蛾常灾区(辽宁大连、山东烟台、河北秦皇岛等),经过多年的防治实践,证明要达到完全扑灭的目标是十分困难的。从理论上讲,在害虫的适生区内要彻底扑灭一种害虫是做不到的。因此,对于这些地区的美国白蛾防治,我们应当调整策略,从“彻底扑灭”转变为“有效控制”,使其种群数量控制到低水平,将其危害降到经济允许水平以下的程度。这种形势要求我们必须研究探索达到这种控制策略的手段。

2. 主要研究进展

为了克服和解决美国白蛾在我国发生和危害的这些特点及难点,近年来,我们进行了美国白蛾的生物防治研究,解决了这些难点,取得了显著的控制效果。

(1) 通过野外观察和室内饲养相结合的方法,研究清楚了美国白蛾在我国各疫区的生活史和生物学特性,查明了我国各发生区各代美国白蛾发生的时期、历期,为开展生物防治打下了基础。

研究了美国白蛾卵块和网幕幼虫的空间分布型为负二项分布,即聚集分布。并调查了卵块和网幕幼虫在树冠上不同方位的分布规律,计算出了危害不同类型的寄主树木的理论抽样数,为释放小蜂防治时调查美国白蛾幼虫数量、进而准确计算放蜂量提供了重要依据。

(2) 系统、全面地调查了美国白蛾在我国危害的寄主植物。发现其可危害 49 科 108 属 175 种植物,并将这些寄主按美国白蛾的危害程度分为特喜食性、一般喜食性等 4 大类。

(3) 通过野外采集、室内饲养的方法,系统调查了我国的美国白蛾天敌昆虫种类及自然寄生情况,包括卵、幼虫、蛹期的天敌,以及它们的寄生率、控制作用等。共发现了 27 种天敌昆虫,其中 2 种为美国白蛾幼虫期捕食性天敌,2 种为幼虫期寄生蜂,18 种初寄生于美国白蛾蛹期及“幼虫—蛹”期,5 种寄生蜂为重寄生天敌昆虫。并阐述了这些天敌的寄生率、寄生习性、雌雄性比等。经过分类研究,天敌中包括 1 个新属,9 个新种及中国新记录属 1 个,新记录种 4 种。寄生性天敌昆虫在美国白蛾越冬蛹中的平均寄生率达 25.8%,在第 1 代美国白蛾蛹中的平均寄生率达 16.1%。表明这些天敌在自然控制美国白蛾上发挥着较大的作用,但还不足以达到能够自然控制美国白蛾的水平。经多元回归分析,计算出了表达白蛾周氏啮小蜂等寄生性天敌对美国白蛾寄生数量关系的回归模型。经多重比较分析,表明白蛾周氏啮小蜂的寄生率与其他各种天敌均没有重叠,远远超过了其他天敌,是控制美国白蛾最主要的天敌种类,是影响总寄生率的关键因子,而且无重寄生性天敌寄生。从而进一步证明,白蛾周氏啮小蜂是生物防治美国白蛾的优秀天敌。

同时,命名发表了重要的寄生蜂新类群。经过深入的分类研究,按照国际上最新的分类系统,命名、描述和发表了在研究中新发现的天敌新属新种(1 新属 9 新种):白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang(新属新种)、白蛾孤独绒茧蜂 *Dolichogenidea singularis*

Yang and You(新种)、白蛾聚集绒茧蜂 *Cotesia gregalis* Yang and Wei(新种)、白蛾黑棒啮小蜂 *Tetrastichus septentrionalis* Yang(新种)、山东白蛾啮小蜂 *Tetrastichus shandongensis* Yang(新种)、白蛾黑基啮小蜂 *Tetrastichus nigricoxae* Yang(新种)、白蛾短角啮小蜂 *Tetrastichus litoreus* Yang(新种)、白蛾圆腹啮小蜂 *Aprostocetus magniventer* Yang(新种)、白蛾索棒金小蜂 *Conomorium cuneae* Yang and Bauer(新种)。

(4) 研究了白蛾周氏啮小蜂的生物学、行为学和繁殖潜能,为人工繁蜂时接蜂、繁育、释放防治打下了基础。研究发现,这种小蜂为群集内寄生性,既可直接寄生美国白蛾蛹,又可在寄主老熟幼虫期爬附于寄主体上生活一段时间,刺蛰寄主促其提前化蛹,然后再产卵寄生。小蜂的卵、幼虫、蛹及成虫产卵前期均在寄主体内度过。由于成蜂已在寄主蛹内完成了交配,所以,刚一“羽化”出的雌蜂即可产卵寄生,而并非进行孤雌生殖。雌雄性比大,为 44~95 ♀:1♂;每寄主蛹出蜂 124~365 头,平均 274 头;成蜂趋光性强,寿命达 15d,寻找寄主的能力强,能找到寄主在各种隐蔽场所化的蛹,并能咬破寄主蛹外的薄茧而到达虫体产卵寄生。

通过解剖雌蜂内部生殖系统,发现其具 1 对卵巢,每个卵巢中的卵巢管数目不等,为 6~10 根,且有时左右卵巢中的卵巢管数目不对称。每个卵巢管中的卵粒数为 8~24 粒。因此,每头雌蜂卵巢内总怀卵量最多可达 680 粒,实际平均为 270.5 粒,表明这种小蜂具有较大的繁殖潜力。由于从野外采集的美国白蛾蛹每蛹平均出蜂为 274 头,这一数字基本与解剖的每头雌蜂的怀卵量一致,表明 1 头白蛾周氏啮小蜂即可寄生消灭 1 头美国白蛾。从而为人工繁蜂时确定种群的接蜂量和防治时放蜂量的确定提供了依据。

研究了白蛾周氏啮小蜂发育与温度的关系,为人工大量繁殖这种小蜂用于防治打下了基础。通过试验,测算出了白蛾周氏啮小蜂发育起点温度为 6.14℃,有效积温为 365.12DD。并利用 10 组不同温度饲养小蜂,得出了不同的发育历期值,然后选择了数学模型,求出了回归模型,以此模型计算出了发育历期理论值。根据理论值作出了小蜂发育历期与温度的函数关系曲线图,为人工繁蜂时温度的确定、按时出蜂和及时用于防治提供了可靠的保证,大大方便了生产单位人工繁蜂时的应用。

(5) 进行了人工大量繁蜂、放蜂防治试验,取得了理想的防治效果。主要进展体现在:研究找到了理想的繁蜂替代寄主。为了解决人工大量繁蜂、常年繁蜂和降低成本,在原来利用美国白蛾蛹繁蜂的基础上,进行了繁蜂替代寄主的研究。通过利用 14 种不同寄主繁蜂试验,发现柞蚕蛹出蜂量大(每头蛹出蜂最高达 11 256 头,平均 6552 头),而且繁殖出的小蜂个体正常,寄生力强,取材方便,成本低廉,是理想的繁蜂替代寄主,使繁蜂量比原先利用美国白蛾蛹提高了 84 倍。

研究解决了繁蜂替代寄主柞蚕蛹茧的长期保存问题,为常年繁蜂用于防治打下了基础。并研究出了一套十分成功的人工接蜂、温度、湿度控制人工大量繁蜂技术。

解决了蜂种复壮问题。为了防止恒温下人工饲养的白蛾周氏啮小蜂蜂种退化,影响防治效果,在人工繁殖 8~10 代后需进行蜂种复壮。通过试验,找到了理想的蜂种复壮方法。

试验确定了合适的放蜂防治时期和时间。由于小蜂可在美国白蛾老熟幼虫期爬附于其体上,因此,可在化蛹初期放蜂。为了保证达到良好的防治效果,每代美国白蛾放蜂两次,一次在老熟幼虫期,一次在化蛹初期化蛹盛期。放蜂时以一天中的 10:00~16:00

时效果最好。

研究确定了适宜的放蜂量。按公式 $TN = W \times EN \times 3$ 计算(TN - 总放蜂量, W - 美国白蛾网幕数, EN - 每一网幕中美国白蛾幼虫平均数量)。

取得了理想的防治效果。在美国白蛾 1 年 2 代发生区, 采用每代放蜂 2 次共放蜂 4 次进行防治, 使美国白蛾得到了有效控制。放蜂防治后白蛾周氏啮小蜂的寄生率最高达到 88.0%。平均为 67.7%。由于放蜂区没有施用化学农药, 保护了其他天敌(如日本追寄蝇、舞毒蛾黑瘤姬蜂、白蛾黑棒啮小蜂等), 因而放蜂区美国白蛾的总寄生率最高达 96.3%, 平均 90.3%, 加上其他一些天敌(如病原微生物等)的作用, 有效地控制了美国白蛾的种群数量和危害。大连、陕西、山东、秦皇岛一些防治区已连续 6 年未再发生美国白蛾危害。

通过回归分析, 建立了表述放蜂防治后白蛾周氏啮小蜂和其他天敌寄生美国白蛾数量关系的回归模型。由于白蛾周氏啮小蜂是决定总寄生率高低的因子, 因此, 经计算分析, 建立了表达这种小蜂与总寄生率关系的回归方程。据此方程, 在放蜂防治后, 只要调查出白蛾周氏啮小蜂的寄生率, 就可计算出多种天敌的总寄生率和防治效果, 可以大大减少调查的工作量。

(6) 用生命表技术评价了白蛾周氏啮小蜂对美国白蛾的控制作用。经过 2 年连续 4 代定点进行美国白蛾生命表研究, 结果显示第 1 代、第 2 代美国白蛾放蜂区其种群趋势指数(I)分别为 0.2964 和 0.1364, 表明美国白蛾下一代的种群数量将急剧减退。而其中白蛾周氏啮小蜂是控制其数量和发生的最主要的因子。进一步说明, 通过人工大量释放白蛾周氏啮小蜂能够将美国白蛾有效控制下去。

(7) 研究了白蛾周氏啮小蜂的转主寄主。小蜂在释放后能否在自然界中保持较高的种群数量, 达到对美国白蛾的持续控制, 取决于自然界中有无转主寄主及转主寄主的数量(小蜂年发生 7 代, 美国白蛾年发生 2 代), 欧洲一些国家引进天敌失败的结果也表明了这一点。经过 2 年多的调查和试验研究, 发现这种小蜂的寄主除美国白蛾外, 还有另外 6 种食叶害虫(榆毒蛾、柳毒蛾、杨扇舟蛾等), 而且这 6 种转主寄主都是发生普遍且种群数量比较稳定的种类。进一步详细研究了这些转主寄主的生活史与生物学特性, 表明它们的蛹期相互衔接, 加上美国白蛾世代重叠现象严重, 因而林间一直有小蜂寄生的寄主蛹存在, 故小蜂在释放后能够在这些寄主间转移寄生, 扩大和保持其种群数量, 达到对美国白蛾的持续控制。研究中还通过聚类分析的方法, 评价了各转主寄主间的关系。

在研究中发现, 在放蜂防治区美国白蛾数量极低的情况下, 小蜂在其他寄主中的寄生率很高。说明在利用白蛾周氏啮小蜂将美国白蛾控制下去后, 其可转而在其他的转主寄主上寄生, 使它的种群数量保持下来。一旦美国白蛾再次发生, 它们又可转而寄生美国白蛾, 控制其危害, 因而可以达到长期持续有效的控制美国白蛾的防治效果。

(8) 美国白蛾核型多角体病毒(HcNPV)的筛选和应用。调查并筛选出了防治美国白蛾的优良 NPV 病毒毒株, 研究出了美国白蛾的人工饲料, 利用人工饲料可以大量和常年饲养美国白蛾幼虫, 而后接种扩增病毒, 为人工大量增殖扩繁 HcNPV 病毒并保证质量创造了条件。攻克了 HcNPV 病毒规模化扩增的技术难关, 大大提高了病毒的生产量, 做到了病毒的工厂化生产, 为利用病毒大面积防治美国白蛾提供了保证。

进行了利用美国白蛾核型多角体病毒(HcNPV)防治美国白蛾幼虫试验。由于利用白

蛾周氏啮小蜂是在美国白蛾的蛹期防治,能够大大降低其下一代及以后各代的种群数量和危害,但在美国白蛾幼虫发生的当代,往往对一些重要地区的城市行道树及风景园林树木造成一定的危害,影响了城市景观。为了防治这部分美国白蛾,我们开展了对环境和人畜安全的利用 HcNPV 病毒防治美国白蛾幼虫技术研究。经林间和室内测试,生产出的 HcNPV 生物制剂对美国白蛾不同龄期的幼虫致死率都较高,但施药后至死亡高峰的历期较长(10~12d)。为了克服这个缺点,我们将 HcNPV 与苏云金芽孢杆菌(Bt)复配成复合制剂喷洒使用,大大缩短了杀虫时间(美国白蛾幼虫在施药后 3d 之内为死亡高峰期)。发挥了这两种生物杀虫剂的优点,杀虫率在 56.6%~98.3%之间。未致死的这部分美国白蛾在蛹期通过释放白蛾周氏啮小蜂予以防治。

HcNPV+Bt 复合生物制剂的试验成功和利用于防治弥补了利用白蛾周氏啮小蜂防治时当代美国白蛾幼虫造成危害的不足,可在城区及风景园林区等特定而重要环境的美国白蛾防治中应用。

(9) 总结出了一套以利用白蛾周氏啮小蜂为主的生物防治美国白蛾技术,即以放蜂防治为主,连续放蜂 4 次,防治两代即可将美国白蛾控制下去(有虫株率降至 0.1%以下)。经过定点在防治区连续 5 年的观察和调查,小蜂的持续控制效果十分显著,有虫株率都保持在 1%以下,没有造成危害。表明用这种生物防治的技术能够达到持续控制的效果。

第九节 美国白蛾的控制技术

一、美国白蛾的检疫

由于美国白蛾属国际性检疫害虫,所以对其执行严格的检疫措施是控制其蔓延扩散的有效手段。在疫区内,主要加强害虫的扑灭和防治工作。疫区划定之后,要严格执行检疫规定,防止美国白蛾随交通工具进行传播。保护区是与疫区相毗邻,害虫尚未发现但有可能蔓延进来的区域。在该区内要加强调查和监测工作。

二、防治措施

(1) 在美国白蛾幼虫期喷洒美国白蛾核型多角体病毒(HcNPV),在蛹期释放白蛾周氏啮小蜂综合防治美国白蛾,达到既控制了当代美国白蛾幼虫的危害,又控制了下一代美国白蛾种群数量的防治效果。为了提高杀虫率,应在美国白蛾 3 龄幼虫期以前喷洒浓度为 HcNPV 2.5×10^7 PIB/ml + Bt 8000IU/ml 的病毒与 Bt 复合制剂,随后,未杀死的这部分美国白蛾在预蛹期释放白蛾周氏啮小蜂进行防治。

(2) 在片林和防护林可以单独利用白蛾周氏啮小蜂进行生物防治,方法是在美国白蛾老熟幼虫期和化蛹初期各放蜂一次,放蜂量为美国白蛾数量的 3~5 倍,连续放蜂防治两代美国白蛾即可达到较长期的持续控制效果。也可单独使用 HcNPV 病毒与 Bt 复合制剂在幼虫期进行防治。

(3) 喷洒昆虫生长调节剂防治幼虫。灭幼脉能够抑制害虫几丁质的合成,为仿生制剂,能有效地杀死美国白蛾幼虫,对环境和天敌较为安全,但喷药后幼虫死亡有一个过程。因此,要在幼龄幼虫时喷洒效果较好。同时,要严格控制在水产养殖区使用。

三、营林措施

改善树种结构,在四旁植树和城市绿化中,营造多树种的混交林,多栽植美国白蛾厌食树种;可间隔栽植部分美国白蛾嗜食树种,作为引诱树,防治时重点放在这部分树木上。从植物群落上抑制美国白蛾的繁衍。再者,在树木多样性丰富的情况下,有利于美国白蛾天敌保持较高的种群数量,达到持续控制的效果。

四、人工防治

在美国白蛾 1~4 龄幼虫网幕期,人工剪除网幕,集中处理。再者,根据美国白蛾幼虫下树化蛹的习性,在受害树干绑草把诱集老熟幼虫在其中化蛹,然后处理。这些方法作为生物防治美国白蛾的补充措施,能够起到很好的辅助控制作用。

五、利用性信息素诱集成虫

利用美国白蛾性信息素,在成虫发生期诱杀雄性成虫,能够在一定程度上降低美国白蛾虫口密度。也可作为测报手段之一。

利用天敌昆虫——白蛾周氏啮小蜂和 HcNPV 病毒进行生物防治,做到了既消灭和控制害虫,又不污染环境,保证了人畜安全,保护了生物多样性,使林木健康生长,能够最大程度发挥林木的生态效益,值得全面推广应用。

(杨忠岐 魏建荣)

主要参考文献

- 艾德洪,于启文,李玉璠,叶维青. 1984. 美国白蛾核型多角体病毒的应用研究. 植物保护学报, 11(2): 127~132 [Ai D H, Yu Q W, Li Y F, Ye W Q. 1984. Study on the application of nuclear polyhedrosis virus (NPV) against *Hyphantria cunea*. *Acta Phytophyl. Sinica*, 11(2): 127~132]
- 金传玲,王昶远,原中岳,冯世强,庄宏伟. 1998. 美国白蛾预测预报技术. 辽宁林业科技, (3): 55~56 [Jin C L, Wang C Y, Yuan Z Y, Feng S Q, Zhuang H W. 1998. Techniques of forecasting and predicating the fall webworm. *J. Liaoning For. Sci. and Tech.*, (3): 55~56]
- 刘岱岳,居蜀生. 1986. 美国白蛾病毒的繁殖与飞机喷施. 生物防治通报, 2(2): 74 [Liu D Y, Ju S S. 1986. Rearing and aero-spraying of HcNPV. *Chin. J. Biol. Control*, 2(2): 74]
- 梅丽娟,尤德康,苏宏钧,张自然. 2002. 美国白蛾国家级工程进展及治理对策. 中国森林病虫, 21(2): 42~44 [Mei L J, You D K, Su H J, Zhang Z R. 2002. National project development of *Hyphantria cunea* and control strategies. *For. Pest and Dis.*, 21(2): 42~44]
- 潘宏阳,吴坚. 2001. “九五”期间重大森林病虫害发生动态及原因分析. 中国森林病虫, (4): 24~26 [Pan H Y, Wu J. 2001. Occurrence dynamics of important forest pests in the period of the Ninth-Five-Year Plan and analysis on the causes. *For. Pest and Dis.*, (4): 24~26]
- 舒超然,于长义. 1985. 美国白蛾天敌的调查. 昆虫天敌, 7(2): 91~94 [Shu C R, Yu C Y. 1985. A survey on natural enemies of *Hyphantria cunea*. *Nat. En. Ins.*, 7(2): 91~94]
- 汤全正,潘洪胜,赵惠林,戚凯,叶维青. 1991. 苏云金杆菌 869 菌株防治美国白蛾的研究. 森林病虫通讯, (1): 16~19 [Tang Q Z, Pan H S, Zhao H L, Qi K, Ye W Q. 1991. Study on Bt 869 control *Hyphantria cunea*. *For. Pest and Dis.*, (1): 16~19]
- 魏成贵,吴佩玉. 1984. 利用索科线虫防治园林害虫的试验. 昆虫天敌, 6(1): 43~45 [Wei C G, Wu P Y. 1984. Insect pests control experiments by using nematode (Mermithidae) in gardens. *Nat. En. Ins.*, 6(1): 43~45]
- 张庆贺,初冬,朱丽虹,戚凯,韩国生. 1998. 美国白蛾性信息素应用技术的研究. 植物检疫, 12(2): 65~69 [Zhang Q H, Chu

- D, Zhu L H, Qi K, Han G S. 1998. Application techniques of synthetic sex pheromone in *Hyphantria cunea*. *Plant Quar.*, 12(2): 65~69]
- 朱丽虹, 金传玲, 戚凯. 1998. 人工合成美国白蛾性信息素的应用研究. *昆虫知识*, 35(4): 225~227 [Zhu L H, Jin C L, Qi K. 1998. Application study of synthetic sex pheromone of *Hyphantria cunea*. *Entomol. Knowl.*, 35(4): 225~227]
- Abe Y. 1998. *Nosema mesnili* isolated from the fall webworm, *Hyphantria cunea*. *Journal of Sericultural Science of Japan*, 57(3): 200~203
- Belskaya E A, Sharov A A, and Izhevskii S S. 1985. Predators of *Hyphantria cunea* in the south of the European part of USSR. *Zoologicheskii Zhurnal*, 64(9): 1384~1391
- Boucias D S, Nordin G L. 1979. Susceptibility of *Hyphantria cunea* to a cytoplasmic polyhedrosis virus. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 52(4): 641~647
- Bratti A, Campadelli G. 1995. In vitro rearing of *Exorista larvarum* (L.) on diet without insect components. *Bollettino dell'Istituto di Entomologia "Guido Grandi" della Università degli Studi di Bologna*, 49(10): 225~236
- Bratti A, Coulbaly A K. 1995. In vitro rearing of *Exorista larvarum* on tissue culture-based diet. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 74(1): 47~53
- Deseo K V, Rovesti L. 1986. First microbiological control experiments on the American *Hyphantria*. *Informatore Fitopatologico*, 36(2): 17~22
- Fedosov S A. 1989. Daily rhythm of sensitivity of the larva of the American white butterfly. *Zashchita Rastenii Moskva*, (11): 33
- Groppali R, Priano M. 1993. Spider (Araneae) in larval nests of *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae) in the central Po Valley. *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura*, 25(2): 153~160
- Hill A S, Kovalev B G. 1982. Sex pheromone of the fall webworm, *Hyphantria cunea*. *Journal of Chemical Ecology*, 8(2): 383~396
- Im D J, Hyun J S, Park W H. 1979. The nature and pathogenicity of nuclear polyhedrosis virus of the fall webworm, *Hyphantria cunea*. *Korean Journal of Plant Protection*, 18(1): 1~10
- Ivanova T S, Danilov L G. 1995. Population of entomopathogenic nematodes *Heterorhabditis bacteriophora* from Krasodar area. *Parazitologiya*, 29(3): 219~222
- Izhevskii S S, Mironova M K. 1993. Two new promising entomophages of the American white butterfly. *Zashchita Rastenii Moskva*, (6): 36~37
- Kim J P, Lee H P, Jun J R. 1990. Species composition in the arthropod community overwinter in the straw band. *Korean Arachnology*, 6(1): 127~138
- Kim K H, Yi C K, Ko J H. 1982. Studies on pathogenic micro-organisms for the control of forestry insect pest. Investigation on the pathogenicity of *Beauveria* sp. and *Bacillus thuringiensis* AF-101 to the Japanese alder leaf beetle and the fall webworm. *Research Report of the Forest Research Institute Korean Republic*, (29): 229~238
- Kim O S. 1982. Study on the artificial and biological control of the fall webworm, *Hyphantria cunea* Drury. *Korean Journal of Entomology*, 12(2): 29~40
- Kunimi Y. 1982. Transovum transmission of a nuclear polyhedrosis virus of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae). *Applied Entomology and Zoology*, 17(3): 410~417
- Kunimi Y. 1983. Spiders inhabiting the colonial-webs of the fall webworm, *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera, Arctiidae). *Applied Entomology and Zoology*, 18(1): 81~89
- Lee H H, Lee H J. 1991. Reseach map of the genome of *Hyphantria cunea* nuclear polyhedrosis virus. *Kon Kun Journal of Genetic Engineering*, 4(0): 49~56
- Marchesini E, Tosi L, Galbero G. 1998. Natural enemies of *Hyphantria cunea* in Veneto. *Informatore Agrario*, 54(15): 115~119
- Mellini E, Campadelli G. 1994. Positive results in the rearing on artificial diet of the parasitoid *Exorista larvarum* L. (Diptera: Tachinidae). *Informatore Fitopatologico*, 44(2): 44~49
- Min S Y, Park H Y. 1986. Cloning of insecticidal crystal toxin gene from *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* HD-73 and its toxicity to the fall webworm, *Hyphantria cunea*. *Korean Biochemical Journal*, 19(4): 363~371
- Montermini A, Cortellini W, Deseo K V. 1985. Microbiological control of *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae) in North Italy. *Difesa delle Piante*, 8(2): 345~351
- Morris R F. 1963. Synonymy and color variation in the fall webworm, *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae). *Canadian Entomologist*, 95: 1217~1223
- Moussion G, Gravaud A. 1987. The fall webworm (*Hyphantria cunea* Drury) in southwestern France. *Revue Forestiere Francaise*, 39(2): 101~106

- Nanni C. 1991. Activity of indigenous entomophagous species against *Hyphantria cunea*. *Informatore Fitopatologico*, 41(7-8): 15-21
- Nordin G L, Maddox J V. 1974. Microsporidia of the fall webworm, *Hyphantria cunea*. Identification, distribution, and comparison of *Nosema* sp. with similar *Nosema* spp. from other Lepidoptera. *Journal of Invertebrate Pathology*, 24(1):1-13
- Ohba M, Aizawa K. 1989. New flagellar (H) antigenic subfactors in *Bacillus thuringiensis* H serotype 3 with description of two new subspecies, *Bacillus thuringiensis* ssp. *sumiyoshiensis*, new subspecies (H serotype 3a: 3d) and *Bacillus thuringiensis* ssp. *fukuoensis*, new subspecies (H serotype 3a: 3d: 3e). *Journal of Invertebrate Pathology*, 54(2): 208-212
- Poong L H, Kim O S, Kim J T. 1981. Studies on natural enemies parasitizing overwintering fall webworm pupae, *Hyphantria cunea* and the way of protection for parasitoids. *Korean Journal of Entomology*, 11(2): 11-16
- Pritchett D W, Young S Y, Yearian W C. 1980. Efficacy of baculoviruses against field population of fall webworm, *Hyphantria cunea*. *Journal of the Georgia Entomological Society*, 15(3): 332-336
- Saulich A Kh. 1994. Role of abiotic factors in forming of secondary ranges of adventive insect species. *Entomologicheskoe Obozrenie*, 73(3): 591-605
- Sharov A A, Izhevskii S S. 1984. Spiders, predators of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera, Arctiidae), in the south of the European part of the USSR. *Zoologicheskii Zhurnal*, 63(3): 392-398
- Sharov A A, Izhevskii S S. 1987. The complex of parasitoids of the American white butterfly *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera, Arctiidae) in the south of Europe of the USSR. *Entomologicheskoe Obozrenie*, 66(2): 290-298
- Sharov A A, Izhevskii S S. 1987. An analysis of the mortality of the fall webworm moth *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera, Arctiidae) during maturation. *Ekologiya (Moscow)*, (2): 46-53
- Sharov A A, Tsimbulova A A. 1989. *Trichogramma* parasitizing the American white butterfly. *Zashchita Rastenii Moskva*, (1): 41
- Simchuck P A, Lysenko M A. 1982. Morphobiologiya features of microsporidium isolated from *Hyphantria cunea*. *Parazitologiya (St. Petersburg)*, 16(4): 327-330
- Sovirshenova V A. 1991. Natural enemies of the American white butterfly. *Zashchita Rastenii*, (4): 50-51
- Tadic M. 1975. Process of adaptation of indigenous parasites and predators on the fall webworm (*Hyphantria cunea* Dr.) in Yugoslavia in 1963-1972. *Zastita Bilja*, 26(133): 247-267
- Trematerra P, Ferrario P, Binda M. 1993. Studies on trapping of fall webworm moth, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lep, Arctiidae). *Anzeiger fur Schadingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*, 66(3): 51-56
- Valentyuk E I, Derevyanko N M, Gensitskii I P. 1989. Polistes wasps and the fall webworm. *Zashchita Rastenii Moskva*, (7): 38
- Yamanaka S, Seta K, Yasuda M. 1986. Evaluation of the use of entomogenous nematode, *Steinernema feltiae* (str. Mexican) for the biological control of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae). *Japanese Journal of Nematology*, (16): 26-31
- Yasuhiko K. 1998. Comparison of insecticide susceptibility between fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) and its parasitoid fly, *Exorista japonica* (Diptera: Tachinidae). *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 42(3): 167-170

第十章 红脂大小蠹

第一节 起源与分布	284	第六节 生态学特性	292
第二节 识别特征与早期诊断	285	第七节 风险分析与早期预警系统	295
第三节 传入途径与入侵成因	288	第八节 预防、根除与控制	298
第四节 危害现状与生态经济影响的评估	289	第九节 应用与基础研究发展策略	300
第五节 生物学特性	290		

摘要 红脂大小蠹原产于北美洲，是在该地区分布最广泛的昆虫之一。该虫可能是20世纪80年代中期，随着从北美洲进口带皮松材传入我国的山西省。从1998年以来该虫在山西、河南、河北、陕西发现危害健康油松。有的严重受害林地有虫株率达80%，松树死亡率达30%以上，给当地的林业生产造成了巨大的损失。红脂大小蠹在原产地通常是立木的次要性害虫，经常攻击衰弱和长势不好的松树，也可侵害伐桩，但一般不造成严重为害，只是近年在加利福尼亚和墨西哥比较干旱地区的西黄松有由于红脂大小蠹危害致死的报道。在我国红脂大小蠹成为一种攻击性的害虫。当种群在新伐桩上或在其他小蠹虫侵染树上建立种群后，可侵害外表健康的树木。依纬度、海拔和林地条件不同，该虫1年1~2代，或1~2年完成1代。虫期不整齐，一年中除越冬期外，在林内均有红脂大小蠹成虫活动，高峰期在5月上旬~6月底。雌成虫首先到达树木，蛀入树皮到形成层，木质部表面也可被刻食。在雌虫侵入之后较短时间里，雄虫进入坑道。当达到形成层时，雌虫首先向上蛀食，连续向两侧或垂直方向扩大坑道，直到树液流动停止。一旦树液流动停止，雌虫向下蛀食，通常达到根部。侵入孔周围出现凝结成漏斗状的流脂和蛀屑的混合物，是典型的侵入症状。各种虫态都可以在树皮与韧皮部之间越冬，且主要集中在树的根部和基部。

由于传入区没有强有力的竞争种，加之较为干旱的气候条件、大量适宜寄主的存在使其成功地建立了种群，加之粗放不合理的经营、乱砍滥伐、割脂等促使其暴发成灾。根据地理气候条件、寄主和可能的寄主分布情况、扩散能力、传播病害、危害的严重性和控制的难度等进行有害生物危险性指标综合评价，为高度危险的森林有害生物，有可能成为全国性的针叶树重大害虫。

山西油松的主要萜烯类挥发性物质有(R)-(-)- α -蒎烯、(S)-(-)- β -蒎烯和(S)-(+)-3-萜烯，占总萜烯类挥发物的97.17%，其平均比例为32.82:27.16:37.19。另外还含有少量的(+)-柠檬烯、(R)-(+)- α -蒎烯和香叶烯、莰烯、萜品油烯等。触角电位反应中，雄性红脂大小蠹对油松挥发性物质中(R)-(-)- α -蒎烯、柠檬烯和(S)-(+)-3-萜烯的反应较为强烈，而雌性红脂大小蠹对油松挥发性物质中(S)-(+)-3-萜烯、柠檬烯、(R)-(+)- α -蒎烯和香叶烯的反应较为强烈。雌性红脂大小蠹较雄性红脂大小蠹对这些挥发性物质更为敏感。

主要防治措施是加强检疫,避免进一步扩散蔓延;对严重受害树清除后,必须对伐根进行处理,可采用塑料薄膜覆盖,投放磷化铝熏蒸等方法处理,消灭残余小蠹和避免再次在伐桩上产卵危害。在成虫侵入期采用菊酯类农药在树基部喷雾,可防止成虫侵害。

为了更加有效地对该入侵种进行管理和除治,应加强基础研究,从生物学特性、生态地理学和适生性、侵入及暴发机制、侵入区的种群时空动态及定居扩散机制、对侵入区生态环境的影响、风险分析等方面进行深入细致的研究;在应用技术方面应加强包括系统检测和监测技术、天敌利用、信息素利用等生物防治技术为主的系统管理技术的研究。

关键词 红脂大小蠹 生物学 入侵机制 风险分析 控制

Chapter 10 Red Turpentine Beetle *Dendroctonus valens* LeConte

Abstract: The red turpentine beetle (RTB) *Dendroctonus valens* LeConte (Coleoptera: Scolytidae) is originally distributed in North America. Historical data analysis showed that it was introduced into China in early 1980's when unprocessed logs were imported from the west coast of the United States. Since 1998 it has caused great damage to Chinese pines *Pinus tabulaeformis* Carr in China. At severe damaged stands the attack rate reached 80%, and the death rate of pines stands was over 30%. Now RTB has also been found in Shanxi, Shaanxi, Hebei, and Henan provinces. In North America this beetle usually occurs on injured or stressed trees. Despite the wide distribution, outbreaks have not been severe except in some dry areas, such as California and Mexico. In China it can attack healthy trees especially when the population density is high though it mainly attacks weak trees under low population density. Usually it has 1~2 generations per year or 1~2 years a generation, depending on the local latitude, altitude, and other weather and stand conditions. RTBs overwinter as adults, pupae, and larvae extensively in roots and at the base of the trees. Adults can be caught all year except overwintering stage with the flight peak from early May to late June. The female beetle attacks and bores into the pine first, there she is soon joined by a male beetle. They mine between the bark and the wood of trees and generally bore downward, although at first the gallery usually has a lateral or even slightly upward direction. Where attacks are made just above the ground line, the gallery may extend below the ground line and along the larger roots. Indicators of an attack are a pitch tube on the outer surface of the bark, boring particles either in bark crevices or on the ground at the base of the tree, or pitch pellets on the ground.

With abundance of suitable host trees and favorite climate conditions and without strong competitors, RTB established its population in China successfully. Several consecutive years of drought, illegal cutting, irrational management and resin collecting contributed to the outbreaks. Based on economical value, distribution and area of host plant, damaged degree,

spreading possibility and control difficulty etc. , the RTB was evaluated as a high level risk forest pest to China through the risk analysis and evaluation by the International Pest Risk Analysis Method.

The main monoterpenes of Chinese pine are (R)-(-)- α -pinene, (S)-(-)- β -pinene, (S)-(+)-3-carene, which account for 97.17% of total monoterpenes and the proportion of them is 32.816 : 27.16 : 37.194. Other monoterpenes are (+)-Limonene, (R)-(+)- α -pinene, Camphene, Myrcene, Terpinen. In the experiment of Electroantennograms(EAG), the male beetles are sensitive to (R)-(+)- α - pinene、limonene and (S)-(+)-3-carene; while the females beetles are sensitive to (S)-(+)-3-carene、limonene、(S)-(-)- α - pinene and myrcene. The females are more sensitive to the volatiles than the males. There is much difference in response of *D. valens* in Chinese pine compared to that in USA in ponderosa pine. The volatile difference of the two pine species and the environment condition may contribute to this change.

For the deeper understanding and better management of this exotic pest, both the comprehensive basic researches and management technologies are needed. The former include: the mechanism of RTB invasion, adaptability and pine resistance; the spatial-temporal dynamics and expansion pattern; environment impact assessment and risk analysis. The latter are: systematical detection and monitoring technology; biological control methods based on application of natural enemies and semio-chemicals.

Key words: *Dendroctonus valens*, biology, invasive mechanism, risk analysis

第一节 起源与分布

红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* LeConte, 又名强大小蠹, 英文名: red turpentine beetle (RTD), 原产于北美洲, 是在该地区分布最广泛的昆虫之一, 为小蠹科所发现种中个体最大的小蠹虫, 从北部的加拿大、美国的阿拉斯加一直延伸到南部的墨西哥、危地



图 10-1 红脂大小蠹在北美分布图(Smith, 1961)

马拉都有该虫的分布踪迹(图 10-1)。具体分布区包括美国的亚利桑那、加利福尼亚、科罗拉多、伊利诺伊、堪萨诸塞、密歇根、明尼苏达、蒙大拿、新罕布什尔、新泽西、新墨西哥、纽约、北卡罗来纳、俄亥俄、南达科他、弗吉尼亚、佛蒙特、华盛顿、西弗吉尼亚、威斯康星, 加拿大的艾伯塔、不列颠哥伦比亚、西北地区、新斯科舍、安大略、魁北克, 墨西哥的北下加利福尼亚、奇瓦瓦、联邦区、杜兰戈、伊达尔戈、墨西哥城、莫雷洛斯、普埃布拉, 以及危地马拉和洪都拉斯(Smith, 1961; 吴坚等, 2000; 苗振旺等, 2001)。

我国在没有发现红脂大小蠹之前, 只记载过 2 种大小蠹属的小蠹虫, 即与欧洲同种的云杉大小蠹 *D. micans* Kugelann 和我国特有的华山松大小蠹 *Dendroctonus armandii* Tsai (殷惠芬等, 1984)。1998 年, 在我国山西省境内, 首次发现有红脂大小蠹危害油松 *Pinus tabulaeformis* Carr. (Chinese pine)。目前红脂大小蠹在我国的分布范围包括山西省 8 地市的 47 个县(区), 7 个省直属林业局, 河北省 5 市的 17 个县(市)和河南省 9 地市的 21 个县(市、区), 24 个国有林场, 陕西的延安地区。合计发生面积近 50 多万 hm^2 。

该虫在北美发现的寄主树木很多, 包括松属 *Pinus*、云杉属 *Picea*、黄杉属 *Pseudotsuga*、冷杉属 *Abies* 和落叶松属 *Larix* 等针叶树。北美总计有 40 多个树种有该大小蠹为害的记录, 主要有亚利桑那松 *Pinus arizonica* Engelm、墨西哥白松 *P. ayacahuite* Ehrenb.、奇瓦瓦松 *P. chihuahuana* Engelm、扭叶松 *P. contorta* Loud、大果松 *P. coulteri* D. Don、萌芽松 *P. echinata* Mill、食松 *P. edulis* Engelm、灰叶山松 *P. hartwegii* Lindl、黑材松 *Pinus jeffreyi* A. Murr.、糖松 *P. lambertiana* Dougl.、劳森松 *Pinus lawsonii* Roetzl.、光叶松 *P. leiophylla* Schlecht et Cham.、山松 *P. montezumae* Lamb.、加州山松 *P. monticola*、玛利亚那松 *P. murrayana*、卵果松 *Pinus oocarpa* Schiede.、展叶松 *P. patula* Schlecht et Cham.、西黄松 *P. ponderosa* Dougl. et Laws.、北美乔松 *P. strobes* Linn.、辐射松 *P. radiata* D. Don.、多脂松 *P. resinosa* Ait.、刚松 *P. rigida* Mill.、粗糙松 *P. murericada* D. Don.、加州大子松 (*P. sabiniana* Dougl.、欧洲赤松 *P. sylvestris* Linn.、类球果松 *P. strobiformis* Engelm.、细叶松 *P. termifolia* Benth.、矮松 *P. virginiana* Mill.、花旗松(黄杉) *Pseudotsuga menziesii*、科罗拉多冷杉 *Abies concolor*、美加落叶松 *Larix laricin*、白云杉 *Picea glauca* (Moench) Voss. (*P. alba*)、欧洲云杉 *Picea abies* (L.) Karst.、红云杉 *P. rubens*、高大云杉 *P. asperata* Mast. var. *notabilis* Rehd. et Wils. 等, 但主要以松属的树种为主(Smith, 1961; 苗振旺等, 2001)。在我国除危害油松外, 还发现危害华山松 *Pinus armandi* France 和白皮松 *P. bungeana* Zucc. ex Endl.。

第二节 识别特征与早期诊断

一、形态特征

红脂大小蠹, 属鞘翅目 Cleoptera, 小蠹科 Scolytidae, 大小蠹属 *Dendroctonus*。各虫早期形态特征如下。

(一) 成虫

雄虫体长 5.9~8.1mm, 平均 6.5mm, 初羽化时呈棕黄色, 后变为红褐色, 少数黑褐色。额部不规则隆起, 在复眼上缘的下方至口上脊边缘的 1/3 处有一对瘤突, 瘤突间凹下。触角柄节长, 鞭节 5 节, 锤状部 3 节, 扁平近圆形。口上脊边缘隆起, 表面平滑有光泽, 口上片突起宽, 约等于两复眼间距的 2/3, 其侧叶斜, 与水平约呈 20° 角, 仅侧叶的内角隆起, 水平部分约为其总宽度的 2/3, 阔凹重叠, 末端正好在口上边缘的上方, 其端缘的下面生一稠密的黄色毛刷, 除口上片毛刷外, 毛被长度适中, 稀疏而不明显。前胸背板长为宽的 0.73, 两侧弱弓形, 基部 2/3 近平行。在宽阔线凹的前缘后方中度缢缩, 表面平滑有光泽, 刻点很稠密, 小而不规则, 浅但明显下陷, 背板后部刻点少, 有时具稍隆起的中线, 毛被稀少。鞘翅长为宽的 1.5 倍, 为前胸背板长度的 2.2 倍, 两侧直伸, 基部 2/3 近平行, 后部阔圆形, 基缘弓形, 生一系列约 12 个中等大小、隆起的重叠齿和几个更小的亚缘齿, 鞘翅刻点细小深陷, 沟间部宽度约为刻点沟宽度的 1.5 倍, 具大量杂乱的小横齿, 平均每个齿约为一条沟间部宽度的 1/3, 中域后部的齿不超过沟间部宽度的一半。斜面中度倾斜、隆起, 第 1、第 3 刻点沟之间稍陷, 沟中刻点略小于中域刻点; 沟间部刻点细小交合至粗颗粒, 茸毛密度适中。

雌虫体长 7.5~9.6mm, 平均 8.3mm, 与雄虫基本相似, 但额中部在复眼上缘高度处有一明显的圆形凸起, 前胸背板上的刻窝较大, 鞘翅坡面上的粗突和鞘翅中部的锯齿状突均较大(殷惠芬, 2000; 苗振旺等, 2001)(图 10-2)。

本种与云杉大小蠹 *D. micans* 的主要区别是后者老熟成虫呈黑褐色或黑色; 额面口上突明显较为狭窄, 口突基部宽度约占两眼上缘连线宽度的 0.36, 口突两侧臂基本不凸起, 口突表面平坦不下陷, 其两侧臂与水平夹角约 45°; 云杉大小蠹主要危害云杉属 *Picea* 树种, 而红脂大小蠹主要危害松属 *Pinus* 树种(殷惠芬, 2000)。



图 10-2 红脂大小蠹成虫

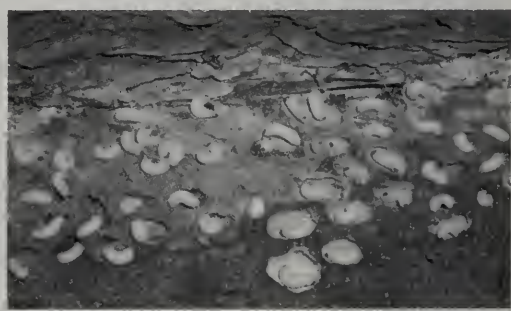


图 10-3 红脂大小蠹老熟幼虫

(二) 卵

圆形至长椭圆形, 乳白色, 有光泽, 长 0.9~1.1mm, 宽 0.4~0.5mm(苗振旺等, 2001)。

(三) 幼虫

蛴螬形，无足，体白色。老熟时体长平均 11.8mm，头宽 1.8mm，腹部末端有胴痣，上下各具有一列刺钩，呈棕褐色，每列有刺钩 3 个，上列刺钩大于下列刺钩，幼虫借此爬行。虫体两侧除有气孔外，还有一列肉瘤，肉瘤中心有一根刚毛，呈红褐色(图 10-3)。各龄幼虫头宽和体长见表 10-1(苗振旺等，2001)。

表 10-1 红脂大小蠹幼虫头壳宽及体长(mm)(引自苗振旺等，2001)

龄期	头壳宽度		体长	
	幅度	平均	幅度	平均
1	0.35~0.40	0.37	0.80~1.35	1.07
2	1.00~1.30	1.14	4.90~7.40	6.21
3	1.40~1.60	1.49	8.01~9.50	9.01
4	1.70~1.90	1.76	10.30~13.20	11.50

注：表中数据为 1999~2000 年调查。

(四) 蛹

平均体长 7.8mm，翅芽、足、触角贴于体侧。蛹初为乳白色，之后渐变浅黄色，头胸黄白相间，翅污白色，直至红褐、暗红色，即羽化为成虫(苗振旺等，2001)。

二、危害特点和症状

红脂大小蠹入侵时，选择伐后的粗大树桩，或选择不健康的、受过危害的、胸径 20cm 以上的树。原为次期性害虫，总是在初期性害虫，如西松大小蠹 *D. brevicomis* LeConte 入侵一段时间之后，方始入侵；但在特殊情况下，它完全可以独立入侵，成为初期性害虫。该虫在寄主植物的韧皮部和木质部间形成层钻蛀坑道取食造成危害，主要危害目标为已经成材的长势衰弱的大径立木，也常在新鲜伐桩和伐木上危害。雌成虫首先到达树木，侵入孔由雌虫开凿，孔口集中在主干基部地表以上几厘米附近，向上则数量减少，最高可达树干 1.8m 或以上。在雌虫侵入之后较短时间里，雄虫进入坑道。成虫为一雌一雄配对成穴，每一株树一般只入侵少数几对成虫。蛀入内外树皮到形成层，木质部表面也可被刻食。当达到形成层时，雌虫首先向上蛀食，连续向两侧或垂直方向扩大坑道，直到树液流动停止。一旦树液流动停止，雌虫向下蛀食，通常达到根部。母坑道形状变化很大，直线形至穴形，在此二极端之间有不同程度的过渡型，直线形母坑道一般长达 40cm。产卵成堆，每堆 10~40 枚不等，卵堆聚在母坑道一侧，在其另侧留出配对成虫的活动空间。上面盖着压紧的木屑；幼虫孵化后不单独



图 10-4 红脂大小蠹危害状

发育,因此无子坑道,而是形成共同坑,一起生长;在幼虫生长进程中,其身后的子坑道填以红色木屑。蛹室由木屑构成,环绕在幼虫共同坑末端附近。

侵入孔一般在寄主基干部 1.83m 以下,周围出现凝结成漏斗状的流脂和蛀屑的混合物,是典型的侵入症状(图 10-4)。根据树种的变化、流脂量和蛀屑含量的不同,凝结块呈不同的颜色和大小,通常流脂的颜色为白到黄色,蛀屑为红色。新侵入孔的凝结块一般红褐色,湿软。随着时间的推移,凝脂变硬,变干,呈灰褐色(Smith, 1961; 苗振旺等, 2001)。

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径与成灾原因

根据目前该虫在 4 省的危害情况、以及对发生历史的追踪调查,推测分析认为,该虫可能是 20 世纪 80 年代中期,随着从北美洲进口带皮松材传入我国的山西省。因初期种群数量少且在干基部和根部取食危害,很难被发现,种群定殖后由于天敌滞后,使得种群繁殖缺乏有效的抑制因子,加之该虫具有极强的飞行能力,最远飞行距离可达 16km 以上,对松树的危害不断扩散,以致蔓延到周边的河北省和河南省。

目前,经过几年的探索,对红脂大小蠹的发生原因基本达成以下共识:

(一) 生态环境的突然变化

传入病虫在当地潜伏、逐渐扩散定殖一定时期后,可以由于某种外界条件的突然变化适应而暴发成灾。而通常气候条件是造成种群大暴发的直接原因。

健康树的大量流脂会抑制侵入的红脂大小蠹产卵,而红脂大小蠹本身通过携带蓝变菌和取食的物理损伤使通过树木的含水量降低,减少流脂(Smith, 1961)。通过对我国大范围气候的历史回顾,该虫暴发地区连续几年的暖冬和干旱少雨造成树表层含水量降低,使其很容易产卵造成暴发。

(二) 丰富的可利用资源

食物通常是害虫暴发的限制性因子,而在红脂大小蠹侵入区大面积连片分布的油松纯林,为该虫迅速扩散蔓延提供了物质基础和适宜条件。

(三) 粗放的生产经营管理和乱砍滥伐

红脂大小蠹以侵害伐桩、伤害木、衰弱木和濒死木为主。树木伤口处分泌的松脂对蠹虫具有强烈的引诱作用。当前在我国的松林采伐中,受技术、人员素质和资金等条件的影 响,一方面对采伐木周围的树木造成伤害,另一方面伐木运输和林分更新改造等后续措施往往难以及时到位,加之边远林区存在大量无序的乱砍滥伐现象,伐桩和林地没有得到清理,这些因素都在很大程度上助长了小蠹虫对松林的侵害。

(四) 割脂可加重危害

在陕西北部 and 山西一些地区都已证实, 松树割脂以后, 由于造成伤口和树脂流出, 很容易吸引该虫产卵, 加之割脂以后树体的抗性减弱, 造成该虫的暴发成灾。而停止割脂以后危害又有所降低。

二、危害与原产地的比较

大小蠹属中许多种是攻击性害虫, 但是其中许多种也攻击衰弱的树木——即是次期性害虫。在北美危害松树的害虫中, 主要为山松大小蠹 *D. ponderosae*、西松大小蠹 *D. brevicomis* 和南松大小蠹 *D. frontalis*。而红脂大小蠹通常是立木的次期害虫(Eaton and Lara, 1967), 经常攻击衰弱的长势不好的松树(Smith, 1961), 也可侵害伐桩, 只是近年在加利福尼亚和墨西哥比较干旱的地区西黄松(ponderosa pine)有由于红脂大小蠹危害致死的报道(Britton and Jiang, 2002)。但是在我国由于没有其他竞争力更强的小蠹与之竞争和适宜的环境条件, 红脂大小蠹成为一种攻击性的害虫。当种群在新伐桩上或在其他小蠹虫侵染树上建立种群后, 可侵害外表健康的树木。飞出后的成虫主要侵害中龄以上的健康油松, 而且该虫的侵害为其他小蠹、吉丁虫、天牛、象甲等的侵害创造了条件。故此虫是导致油松大量枯死的先锋虫种和主要虫种。在油松因该虫危害而衰弱直到死亡的过程中还要遭受其他小蠹的入侵, 但每种虫种的分布都有一定的规律, 形成了其特有的垂直的分布(刘贤谦等, 2000)。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

红脂大小蠹 1998 年在我国山西省阳城、沁水首次被发现, 寄主为油松 *P. tabulaeformis*, 属于我国新记录种。与北美洲发生情况不同的是, 它不仅攻击树势衰弱的树木, 也对健康树进行攻击, 导致发生区内寄主的大量死亡。

1999 年底, 该虫在河北、河南、山西三省发生面积 526 万公顷, 其中严重危害 13 万公顷, 严重受害林地的有虫株率达 80%, 个别地区油松死亡率高达 30%, 已导致 600 多万株的松树枯死(宋玉双等, 2000; 李计顺, 2001)。直接经济损失 6.84 亿元, 造成的森林、生态损失约合人民币 81 亿元。2002 年在陕西省又发现了该虫的为害。据 2000 年的调查统计, 在山西省, 危害面积就达 18.3 万公顷, 其中成灾面积 9.1 万公顷, 已有 342.4 万株成材油松受害枯死。虫害发生区涉及山西省境内的晋城市、长治市、太原市、阳泉市、临汾地区、晋中地区、吕梁地区、忻州地区等 8 个地市和省直中条山、太岳山、吕梁山、关帝山、黑茶山等 6 个森林经营局以及天龙山、乌金山等国家、省级自然保护区和森林公园。虫害的发生, 不仅严重破坏了当地十分脆弱的森林生态环境, 而且对世界闻名的佛教圣地—五台山及其他风景区的旅游环境构成了极大的威胁。

红脂大小蠹的发生面积之大、危害之重、来势之迅猛, 使国家林业局将其作为仅次于松材线虫病的全国性森林病虫害灾害的工作重点, 不仅将红脂大小蠹的治理工作作为应急项目纳入国家级森林病虫害工程治理项目, 并组织科技人员迅速开展红脂大小蠹的各项研究工作。

第五节 生物学特性

红脂大小蠹成虫出现和侵入高峰期一般在春季。雌虫先寻找到攻击目标侵入并开掘主坑道，很快就有雄虫加入。通常为一雌一雄，但少数虫道内可发现一雌二雄现象。雌雄交尾后雌虫产长形的卵块于坑道内，由黏稠的分泌物将之与主坑道隔离。雌虫可产卵块数次。卵块长 2.5cm 到十几厘米不等，含卵粒数量也变化很大，从几粒到上百粒不等。母代雌雄成虫有的在坑道内继续停留取食直到死亡，有的飞出继续选择其他寄主为害，其寿命在活动取食期可达几个月。

卵期 10~14d。一旦孵化，幼虫在其发育过程中，一个挨一个取食形成扇形坑道。坑道在树皮和木质部之间形成。聚生的幼虫向上取食形成层和韧皮部内层树皮细胞。它们向侧垂直于成虫坑道取食，使幼虫坑道宽达十几厘米到 30cm。幼虫后面的坑道被红色的蛀屑填充。幼虫约 2 个月完成发育，但在北方地区可能需要一年或更长的时间。

当幼虫生长完成后，沿着幼虫坑道外侧边缘形成彼此分离的蛹室。当蛹室在韧皮部内层由蛀屑形成后，昆虫进入静止的预蛹阶段，并在一天之内转入蛹期。偶尔幼虫在主坑道外形成短的、单一的坑道并建筑蛹室。在幼虫发育期，成虫通常连续取食并向根部扩展主坑道。

蛹期约 1 周。初羽化成虫停留在蛹室约 1 周，直到外骨骼硬化且颜色变为暗红褐色。新成虫转群并停留坑道区几天，最后多数成虫用同一孔洞钻出树皮。

在北美洲从北到南，该虫一年可完成的世代不等(图 10-5)。在阿拉斯加等北部寒冷区域，2~3 年仅发生 1 代，而墨西哥、危地马拉热带地区一年可以完成 3 代。其世代重叠现象甚为普遍，在墨西哥中部一年之中都可以观察到包括卵期在内的所有虫态。在较冷的地区，主要以成虫越冬，也有少量的以蛹越冬，在较温暖的地区，冬季也有成虫出现。

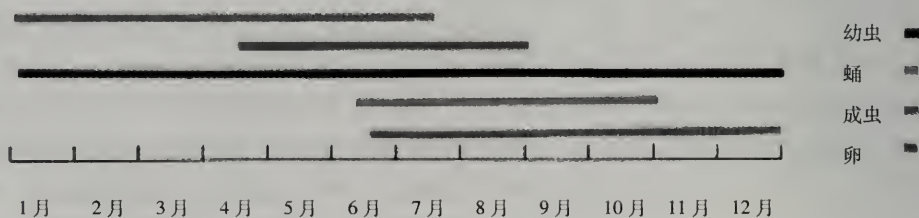


图 10-5 北美红脂大小蠹生活史图

红脂大小蠹属初期性害虫，当数量较少时，主要为害新伐桩、新伐倒木、过火木，一旦数量较大，能迅速入侵胸径 $\geq 10\text{cm}$ ，树龄在 20 年以上的健康木。这是由于伐桩、伐倒木和过火木，一方面从伤口流出大量的松脂，其中挥发性萜烯类化学物质对小蠹成虫具有极强的引诱力的缘故；另一方面，这些林木的抗性大大减低，因此，被红脂大小蠹首选入侵定居、繁殖。当种群密度增大，生存空间拥挤，就大量侵入萜烯类化学物质分泌旺盛的健康木(张历燕等，2002)。

表 10-4 红脂大小蠹生活史(山西省沁源, 1999~2000)(引自张历燕等, 2002)

月份	4			5			6			7			8			9			10~3			
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	
以成虫越冬	⊖	⊖	+	+	+	+	+	+
以老熟幼虫越冬	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
以低龄幼虫越冬	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

注: ⊖越冬幼虫 ⊕越冬成虫 ⊙越冬蛹 ·卵 -幼虫 ○蛹 +成虫

成虫从4月下旬~8月下旬,但羽化高峰主要集中在5~6月。各种虫态都可以在树皮与韧皮部之间越冬,且主要集中在树的根部和基部,基部死亡率99.4%,高于根部死亡率32%。越冬成虫在不同纬度、不同海拔和不同坡向的林地迁飞期也不同。一天中,8:30~19:30时均可以诱到成虫,其中以15:00~19:00时诱捕量最大,为羽化高峰期。成虫在林中每次只能飞1~2m,风雨天不飞出。

第六节 生态学特性

一、生态学

小蠹虫类害虫的生态学在很多方面是相似的,它们都在树皮下的坑道中完成其生活史。飞行对种群扩散和寻找食物及隐蔽场所起着重要作用。鞘翅目小蠹科的昆虫组成了居住在韧皮部、枝条、球果以及木本植物根部的一个群体,其中有些种可以寄生并杀死寄主树。

由于红脂大小蠹在北美主要是次期性害虫,除了相关的生物学文章外(Smith, 1961; Burgos-Martinez *et al.*, 1975; Eaton and Lara, 1967),很多研究都着重于与其他攻击性病虫害相关的生态学研究。这些攻击性的种类主要是大小蠹属 *Dendroctonus*, 齿小蠹属 *Ips*, 小蠹属 *Scolytus* (Raffa and Smalley, 1998; Hall, 1983)。

在我国河北有与油松梢小蠹 *Cryphalus tabulaeformis* Tsai *et Li* 共同发生的报道,不同树龄、不同胸径的油松,两种小蠹虫所发生危害的程度不同。一般树龄在25年生以上、胸径10cm以上的树主要发生强大小蠹危害,油松梢小蠹危害以10~25年生为主,但两者间没有明显的界限(李淑丽等, 2001)。

另外与很多其他蠹虫一起,红脂大小蠹作为林木病原真菌的携带和传播媒介被广泛研究(Fox *et al.*, 1992; Goheen *et al.*, 1985; Pettey and Shaw, 1986; Owen, 1985, 1987;

Klepaig *et al.*, 1995; Raffa and Smalley, 1988), 从病菌的种类、感染方式到病树对蠹虫的吸引程度和抗性都做了较为细致的研究工作。Brand(1974, 1976)发现蠹虫本身的携带菌是驱避剂的产生部位。

红脂大小蠹属喜光性害虫, 因此, 林分郁闭度的大小与该虫危害程度呈负相关关系。在发生较重的太岳、管涔、忻州 3 个地区的阴坡、半阴坡的中坡位 40 年生以上林分中对不同郁闭度的 34 块标准地调查表明, 郁闭度超过 0.7 以上、林相整齐生长旺盛的林分, 受害很轻或不受害。郁闭度为 0.3、0.4 时受害最为严重(表 10-5)(张历燕等, 2002)。

表 10-5 郁闭度与红脂大小蠹危害程度的关系(引自张历燕等, 2002)

郁闭度	标准地数	平均有虫株率	平均株虫口密度/头
0.3	4	50.1	6.29
0.4	6	52.5	4.35
0.5	8	21.3	2.44
0.6	4	10.0	0.55
0.7	5	5.5	0.23
0.8	4	1.7	0.07
0.9	3	0	0

同一地域阳坡重于阴坡, 同一坡向, 相同的郁闭度, 坡下重于坡上。尤其是坡下林缘, 经调查比坡上部平均有虫株率高出 6%~10%, 平均虫口密度要高出 0.7~1.0 头(张历燕等, 2002)。

二、化学生态学研究

Hopkins 在 1909 年就记载了红脂大小蠹和黑脂大小蠹 *D. terebrans* Oliver 对单萜类物质具有反应的现象。油性松脂或纯松节油的气味对许多小蠹科的昆虫具有吸引作用, 包括黑脂大小蠹 (Fatzinger, 1985; Payne *et al.*, 1987; Phillips *et al.*, 1988)和红脂大小蠹 (Vite and Gara, 1962)。

树体挥发性物质的组分可以提供给小蠹虫有关树是否易于攻击的信息(Erbilgin and Raffa, 2000)。寄主树的挥发性物质是对红脂大小蠹和黑脂大小蠹起干扰选择与聚集作用的主要化学物质(Vite and Gara, 1962; Vite *et al.*, 1964)。雌雄红脂大小蠹都受到受伤树和病树分泌的树脂的吸引(Vite and Gara, 1962; Owen, 1985; Borden, 1985), 并经常攻击那些已经被其他小蠹虫攻击过的树干的基部(Hobson *et al.*, 1993)。松树体内单萜类物质的浓度在干旱、根部受真菌感染(Klepzig *et al.*, 1995)、落叶(Wallin and Raffa, 1999)的影响下发生改变。并且蠹虫的侵入也会引起寄主树单萜类物质的浓度及其释放速率的改变。

在加利福尼亚中部内华达山脉的山脚下, 红脂大小蠹主要取食两种松树: 美国黄松 *P. ponderosa* Lawson 和糖松 *P. lambertiana* Dougl. 美国黄松树脂的主要成分是(S)-(-)- β -

蒎烯、(S)-(+)-3-蒎烯、(R)-(+)- α -蒎烯、(S)-(-)- α -蒎烯以及少量的香叶烯和(S)-(-)-柠檬烯 (Smith, 1977; Hobson *et al.*, 1993)。糖松树脂的主要成份含量由高到低的排列如下: (R)-(+)- α -蒎烯、(S)-(-)- α -蒎烯、(S)-(-)- β -蒎烯、(S)-(+)-3-蒎烯和香叶烯(Hobson *et al.*, 1993)(表 10-6)。红脂大小蠹的雌雄虫都被其树脂中的(S)-(-)- β -蒎烯强烈吸引, 并且随着该物质释放速率的增加, 对其引诱作用增强。(S)-(+)-3-蒎烯与(S)-(-)- β -蒎烯相比而言引诱能力较弱, 但是引诱效果仍然很明显。美国黄松中两种含量较少的单萜类物质 α -蒎烯(两种对映体的混合物)和柠檬烯引诱能力不强, 与空白对照没有太大的差别。含量更少的香叶烯的引诱能力很弱。(R)-(+)- α -蒎烯对红脂大小蠹具有很重要的吸引作用, 而(S)-(-)- α -蒎烯却对引诱过程起到干扰作用。这说明对映体的选择在红脂大小蠹寄主树的选择过程当中有很重要的作用(Hobson and Wood, 1993)。

分布于我国山西的油松树树脂中挥发性物质主要成份为(R)-(-)- α -蒎烯、 β -蒎烯和(S)-(+)-3-蒎烯, 占总萜烯类挥发物的 97.2%, 3 种物质的平均比例为 32.8 : 27.2 : 37.2。另外还含有少量的(+)-柠檬烯、(R)-(+)- α -蒎烯、香叶烯、苈烯和萜品油烯等成份。触角电位反应中, 雄性红脂大小蠹对油松挥发性物质中(R)-(+)- α -蒎烯、柠檬烯和(S)-(+)-3-蒎烯的反应较为强烈, 而雌性红脂大小蠹对油松挥发性物质中(S)-(+)-3-蒎烯、柠檬烯、(S)-(-)- α -蒎烯和香叶烯的反应较为强烈。雌性红脂大小蠹较雄性红脂大小蠹对这些挥发性物质更为敏感(表 10-6)。

表 10-6 美国两种红脂大小蠹寄主的主要挥发物含量百分比(%)

组份	美国黄松 <i>Pinus ponderosa</i>	糖松 <i>Pinus lambertiana</i>
(S)-(-)- β -蒎烯	35.8	20.3
(S)-(+)-3-蒎烯	34.4	4.7
香叶烯	7.0	4.5
(S)-(-)-柠檬烯	5.5	0.1
(R)-(+)-柠檬烯	<0.1	0.1
(S)-(-)- α -蒎烯	14.3	21.1
(R)-(+)- α -蒎烯	0.9	47.9
(S)-(-)- β -	0.6	0.3

国内红脂大小蠹触角电位的反应与国外的结果有显著的不同(表 10-7)。Hobson 等(1993)研究认为, 雌性和雄性红脂大小蠹对树体挥发性物质的反应没有什么不同。另外 Hobson 测定的红脂大小蠹对各种挥发性物质的反应值的大小顺序也与作者的实验结果有差异(表 10-7)。最为明显的差异为对(S)-(-)- β -蒎烯的反应, 在 Hobson 的试验过程中红脂大小蠹对(S)-(-)- β -蒎烯的反应最为强烈, 对(R)-(+)-柠檬烯的反应最弱, 但是在作者的试验中对(S)-(-)- β -蒎烯最弱, 对(R)-(+)-柠檬烯的反应却高居第二位。对其他各种物质反应也都不同。引起这种差异的原因可能有几个方面, 一是寄主不一样, 在美国 Hobson 等(1993)的研究主要针对美国黄松和糖松, 而在中国红脂大小蠹主要危害油松, 不同松树种类的挥发物成分是不一样的。美国两种松树的挥发物以(S)-(-)- β -蒎烯和

(S)-(-)- α -蒎烯的含量较大(表 10-6), 触角电位的反应也较强, 而油松中(S)-(+)-3-蒎烯含量最大, 而相应的触角电位反应和野外引诱作用也较强(待发表论文), 但柠檬烯含量很少, 触角电位反应也很大, 红脂大小蠹对寄主挥发物的反应的产生机制还有待于进一步研究, 但可以肯定寄主挥发物成分的不同会影响小蠹虫的反应; 另外环境条件的改变, 也可能对此产生影响。

表 10-7 美国 Hobson 和作者的红脂大小蠹触角电位试验结果比较

Hobson 的触角电位试验结果		作者的触角电位试验结果	
化合物	EAG/ μ V	化合物	EAG/mV
(S)-(-)- β -蒎烯	467 \pm 165	(S)-(-)-柠檬烯	1.4059 \pm 0.9529
(S)-(-)- α -蒎烯	452 \pm 155	(R)-(+)-柠檬烯	1.405 \pm 0.6449
香叶烯	385 \pm 262	(S)-(+)-3-蒎烯	1.3603 \pm 0.6651
(S)-(-)-柠檬烯	208 \pm 154	(S)-(-)- α -蒎烯	1.3427 \pm 0.6995
(S)-(+)-3-蒎烯	193 \pm 115	(R)-(+)- α -蒎烯	1.2946 \pm 0.5136
(R)-(+)- α -蒎烯	162 \pm 92	香叶烯	1.0837 \pm 0.6947
(R)-(+)-柠檬烯	146 \pm 71	(S)-(-)- β -蒎烯	0.881 \pm 0.4194

到目前为止, 还没有鉴别出红脂大小蠹本身所分泌的信息素(Erbilgin and Raffa, 2000; Wood, 1982; Borden, 1985; White and Hobson, 1993)。

红脂大小蠹性别之间对单萜类物质的反应没有明显区别, 表明雌雄红脂大小蠹拥有相近数量和相同类型的利它激素的接收器(Payne, 1975)。对红脂大小蠹雌雄成虫的触角扫描电镜观察结果也表明红脂大小蠹雌雄之间触角形态没有显著差异, 触角锤状部感受器的分布最为丰富, 约占全部的 94.5%, 柄节感受器较多占全部的 4%左右; 鞭节的感受器较少, 只占全部的 1.5%左右。触角上的感受器可以分为 4 种: 毛形感受器、刺形感受器、锯齿形感受器和芽形感受器。毛形感受器、刺形感受器和锯齿形感受器分别约占 70%、24%和 6%, 芽形感受器非常少。锯齿形感受器着生于柄节和鞭节上; 毛形感受器和刺形感受器只着生于锤状部; 芽形感受器主要着生于柄节的基部(王玉刚等, 2003)。从信号接收系统上来说, 红脂大小蠹的触角上至少有两套信号接收器, 其中一套专门对(S)-(-)- α -蒎烯有反应, 另一套对(R)-(+)- α -蒎烯和(S)-(-)- α -蒎烯都有反应。但是这并不表明没有专门对(R)-(+)- α -蒎烯起反应的接收器(White and Hobson, 1993)。

另外, 雌雄红脂大小蠹后翅和腹部末端摩擦发出不同频率的声音, 可以辨别雌雄。有可能作为释放信息素的声音刺激信号, 或者寻找潜藏在树皮下的红脂大小蠹的识别信号(Ryker, 1988; Rudinsky, 1973)。

第七节 风险分析与早期预警系统

一、适生寄主种类

红脂大小蠹在我国的初始建立种群并危害的树种是油松。油松是我国特有的用材树种, 同时也是我国西北地区重要的水土保持和防风固沙树种, 适应性强, 分布广泛, 在

我国的针叶树种中居第二位，南起北亚热带、北到温带森林、草原交错带均有分布，大体在北纬 $31^{\circ} \sim 43^{\circ}$ ，东经 $103^{\circ} \sim 125^{\circ}$ 之间，跨越了 12 个省(自治区、直辖市)，其中以陕西、山西两省面积最大(徐化成，1981)，见图 10-6。而目前油松主要分布区的 4 个省区山西、陕西、河南、河北都已经发现该虫的危害，而在其他没有发现的地区是否存在或已经建立了该害虫的种群虽然是未知数，但可以预见随着该虫的传播扩散，这些油松分布区都存在该害虫发生的可能。

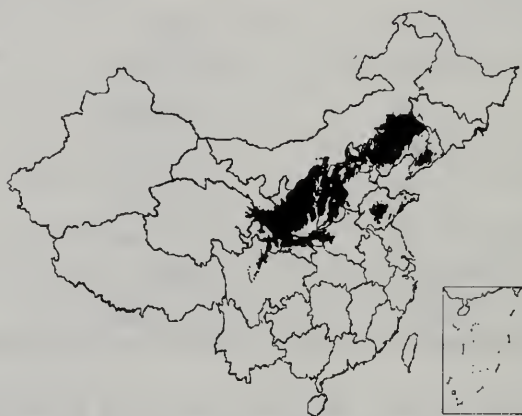


图 10-6 我国油松的极限分布图(郭泉水, 1995)

除了油松，其他松树或针叶树种也普遍存在遭侵入的可能性。因为在北美，共有 40 多种针叶树报道过遭遇此害虫的侵入，包括松属、云杉属、黄杉属、冷杉属和落叶松属等针叶植物 (Smith, 1961)。而松树是我国重要的用材林和生态林造林树种，在防风固沙、涵养水源、改善生态环境等方面起着重要的作用，其适应性和抗逆性强，在消灭荒山、绿化国土等方面一直发挥着先锋树种的作用。我国有着丰富的松树资源，种类在 20 种以上，分布几乎遍及全国。在山西已经发现华山松、白皮松上有该害虫的侵入，但由于该虫的发现时间尚短，其他松树能否遭受侵害目前还未有记录，但从国外的情况看，随着危害时间的持续发展，一些种类的松树极有可能成为红脂大小蠹的新寄主。因此，寄主植物不能成为红脂大小蠹扩散蔓延的限制因素，如果没有找到基本的控制措施和方法，该害虫将日渐成为全国性的针叶树种的重大害虫。

二、适生区分析

从纬度来讲，红脂大小蠹在北美的适生区域北纬 $15^{\circ} \sim 155^{\circ}$ 包括了我国的绝大部分地区，而国外研究的该种大小蠹存在分布的海拔高度 500~3000m，也囊括了我国大部分的山区和丘陵地带——我国主要针叶植被的生长区域。从理论上讲，这种红脂大小蠹的可以传播的范围也是全国性的(李计顺，2001)。

但这是否真正是该虫在我国适合生存的分布区还有待于进一步研究。因为仍旧不能确切知道该害虫的初始种群是从北美何地传入的。因为在国外的研究也发现，不同地域间该虫的适生性强弱很不相同。从基因分子水平上分类探索该虫的传入地，以

及北美不同地区类群的适生范围,将能更有效地解决该侵入害虫的有效分布。结合环境条件,温度、湿度、地形、海拔以及天然、人工隔离带等的共同作用也将决定该害虫的适生范围。

三、传播扩散能力评价

红脂大小蠹的自然扩散能力很强,其飞翔距离可达 16.1km 以上(Smith, 1961)。因此通过自然扩散其完全可以跨越农田、水塘等非寄主的天然隔离带,寻找到寄主目标。

而一些人为因素导致的传播,如害虫发生地未经检疫和脱皮处理的原木、薪材调运则可以造成该害虫远距离扩散。因为刚砍伐下的原木和伐桩等本身是该类害虫侵入的理想对象,可以避免大量的流脂,增加它的侵入成功率,提高它的存活时间和存活率。一些比较远的新疫区的产生已被证实和人为因素有关。

四、为其他有害生物的传播媒介的危险

有研究表明,蠹虫只有和真菌共生才能更好地生存。在小蠹虫侵害树木的同时,也将有害的真菌传到了被侵害的寄主树上,之后该有害菌与小蠹虫一起对松树造成危害。许多蠹虫对树的致死结果,往往是由蠹虫和真菌两者共同造成的。虽然在我国发生的该害虫危害后油松死亡多是大量的蠹虫群体危害结果,但仍有部分油松的致死原因是由于侵入害虫携带的蓝变菌造成。而一旦因为该虫的扩散带来该种蓝变菌的相应扩散,或者蓝变菌被其他害虫或媒介携带传播成为针叶树的杀手,其危险性是不言而喻的。

五、自然天敌控制能力评价

由于红脂大小蠹属于外来种,发生地的自然天敌控制能力较弱。目前发现的红脂大小蠹捕食性天敌种类主要有郭公虫、步行虫、蠼螋、啄木鸟、蚂蚁等;寄生性的天敌有细菌、绿霉菌、白僵菌、茧蜂、姬蜂等。其中捕食性种类和绿僵菌、白僵菌均非专性捕食寄生大小蠹,属于比较广谱的天敌,而茧蜂、姬蜂量又极少。初步野外调查发现,老熟幼虫期天敌自然寄生率为 25.1%,蛹期自然寄生率为 10.1%,初羽化成虫自然寄生率为 3.4%。基本不能控制该虫的暴发(常宝山等, 2001; 苗振旺等, 2001)。另外还有发现大小蠹成虫身体上基本上都有螨类的寄生,但通过观察似乎对大小蠹活动和生活能力并未造成不利影响。也许随着红脂大小蠹发生的持续不断扩散,由于跟随效应和适应,将来会出现能够利用其生存和发展的天敌种群,但目前想通过自然天敌进行控制是行不通的。

六、监测、控制性难度评价

一个物种进入新生态环境并成功定殖后,要想从根本上彻底清除是很困难的,最终目标只能是达到基本监测和控制。由于红脂大小蠹在我国的发现时间尚短,在国内同类害虫的发生又不多,而在国外分布区基本上又都是次期性害虫,因此对其在我国的发生规律、控制技术 etc 研究深入程度不够,很多研究都仅是初步的探索,没有切实可行的措施来参照借鉴。因此,对于该害虫的成功监测和控制有很高的难度。

当然,由于在北美和欧洲蠹类害虫是十分重要的害虫,一些相关种的研究和技术国外的研究已经非常深入,可以作为我国控制该害虫研究的指导,如信息素监测控制应用技术、原产地天敌引进控制技术,但这些技术在我国的成功应用仍需要大量的基础研究工作。

参照国际上有害生物危险性分析(pest risk analysis, PRA)方法,从有害生物的国内分布状况、潜在的危害性、寄主植物的经济重要性、传播扩散的可能性以及危险性的管理难度等几个方面进行定性和定量分析,对红脂大小蠹的危险性做出综合评价。评价结果表明红脂大小蠹在我国属于高度危险的森林有害生物(宋玉双等, 2000)。

第八节 预防、根除与控制

红脂大小蠹在美国发生历史较长,但在我国为新记录种。由于发生的生态环境与美国不同,其发生发展也与美国不完全相同。近年来,我国科研人员在红脂大小蠹的预防及防治技术方面进行了一些研究,取得了一些进展,结合国外的技术将红脂大小蠹的预防、根除和控制技术总结如下。

一、应用引诱剂和驱避剂进行害虫监测和防治

信息素在探测、监控和抑制害虫种群方面很重要(Cardé and Minks, 1997)。由于信息素的应用属于生物防治的范围,它具有方便、无环境污染、准确、高效等多种优点,今后的应用范围必将得到进一步的扩展。将信息素与化学农药合理混用,用信息素将害虫诱引聚集,而后施以农药进行毒杀,将会有很好的效果。由于信息素被蠹虫的不少天敌用作利他激素(Borden, 1982; Dahlsten, 1982; Payne, 1989),因此大量的天敌也会被杀死(Ross and Daterman, 1997)。在 20 世纪 70 年代末, Lanier 等人首先将信息素饵树与除草剂结合起来对波纹小蠹进行诱杀防治。用驱避剂对树体进行保护也是一种较好的方法。驱避剂可以在不了解害虫种群水平的情况下减轻危害(Munakata, 1997)。害虫抑制并不总是减轻危害,这主要是因为一些补偿机制,如害虫不断地从其他林地迁入,以及减轻了竞争压力,这样以来,虽然诱到了大量的害虫,但是危害仍然可能保持在较高的水平上。Ross 等(1996)应用 MCH 作为驱避剂进行防治,发现这种方法在保护树木的同时并不减少天敌的数量,表明蠹虫可以受到相对高的天敌捕食。反式马鞭烯酮和 4-AA 可被用作驱避剂保护目标树(Goyer *et al.*, 1988)。

中国林业科学院利用红脂大小蠹信息素成功地在野外对其发生期进行了监测,结果表明,越冬代成虫扬飞期为 4~8 月,高峰期出现在 5 月中下旬。一天中,8:30~19:30 时均可以诱到成虫,其中以 15:00~19:00 时诱捕量最大。对其发生量的监测也取得了一些进展。

在利用松树挥发物(利他激素)防治红脂大小蠹方面取得了较好的引诱效果,但对红脂大小蠹的防治效果还在进一步研究评价中。反式马鞭烯酮用作驱避剂对红脂大小蠹有一定的抑制作用,但用量大,防治费用太高,实际应用受到局限。

二、加强营林和检疫措施

今后在植树造林时要注重适地适树，树种的选择可以影响蠹虫的种群数量，树种不合适也会使其易受蠹虫的攻击(Filip, 1994)。在造林设计和更新改造时都要进行科学合理的规划，大力营造混交林、复层林，要及时清理林内的过火木、感病树，疏伐过密林分，在采伐树木时，尽量避免伤害周围健康树木，保持林内良好的卫生状况(Fitzgerald, 1994)。这种林分结构，可以减少蠹虫的寄生资源，也可减轻树与树之间对水分和营养物质的竞争，阻碍蠹虫之间的化学通讯，提高林间的温度以减少蠹虫的存活率(Goyer *et al.*, 1988)，并且对于保持水土，预防森林火灾都具有很好的作用。

应及时砍伐清理受大小蠹危害的枯死木和濒死木。在美国将伐除受害树作为主要的治理措施。这是降低虫口密度、减轻林分受害的非常有效的方法(Goyer *et al.*, 1988)。砍伐时间应在休眠期和成虫羽化前。由于此时大小蠹大部分集中于树干，特别是集中在伐桩的主根和主侧内，因此处理砍伐下的木材和留在林地内的伐桩就成为关键所在。在森林管理过程中注意不要使树干或树的基部受伤，并且一定不要在林内长期堆积木材。砍伐下的木材一定要运出林地后进行剥皮或药物熏蒸处理。伐桩必须进行处理，否则将成为红脂大小蠹的繁殖基地，使危害更加严重。处理方法可采用塑料覆盖，投放磷化铝熏蒸，林丹油剂全面喷洒或林丹粉剂制成毒土覆盖(高宏旭等，2001)。

三、合理利用化学防治

一是继续采取现有的干基部绑塑料布投放磷化铝熏蒸的办法(美国在最初也使用虫孔注二硫化碳熏蒸杀虫的办法)；二是在成虫羽化尚未出孔前于树干、树基部喷洒林丹、西维因(Fitzgerald, 1994)、马拉硫磷等油剂(高宏旭等，2001)。Svihra(1995)曾提到用 Dragnet(permethrin)对松树的基部进行喷洒，可以确保松树在 147d 内不受红脂大小蠹的侵害，并且认为可以将 Dragnet 用于害虫的综合治理当中。虫孔注药也有一定的效果，范俊秀等(2001)采用 20%高渗甲胺磷乳油、40%氧化乐果乳油、80%敌敌畏乳油 5 倍稀释液在主干上用注射器进行虫孔注药(每孔注药 5ml)，成虫防治效果可达 90%以上，初孵幼虫防治效果可达 80%以上。但是化学防治具有先天的不足，容易造成环境污染，并且杀伤天敌，林间实施也比较困难。

四、引进大小蠹天敌和开利用本地天敌资源进行生物防治

目前，国际上应用天敌防治大小蠹比较成功的是比利时，利用大啮腊甲防治云杉大小蠹，取得了非常好的效果(吴坚等，2000)。中国林科院已从比利时引进大啮腊甲，正在研究其繁殖技术和防治效果。在美国红脂大小蠹的天敌资源丰富，主要有郭公虫、步甲、啄木鸟、线虫等，白僵菌也感染红脂大小蠹。这说明利用天敌控制该虫危害是有希望的(张海军等，2001)。

第九节 应用与基础研究发展策略

近年来,我国科研人员已经初步掌握了红脂大小蠹的部分生活史和生物学特性,在引诱剂和防治技术方面都取得了一些进展和初步成果,但总体研究还处于刚刚起步的阶段,远远不能满足对这种外来有害生物进行有效管理的需要,所以应在加强基础研究的基础上,全面进行该入侵害虫的管理和除治技术研究。

一、基础研究

基础研究应从系统生态学、化学生态学、分子生态学不同方面和基因、个体、种群、群落、生态系统、景观不同层次,研究红脂大小蠹在我国自然生态环境条件下的侵入、扩散和暴发机制,探索为什么在原产地危害轻,而侵入我国后能暴发成灾,具体内容包括如下几个方面:

(一) 生物学特性

入侵种往往具有有利于在新侵入地区生存的生物学特性(高增祥等,2003),通过对生物学特性的进一步深入研究,不但有利于该入侵种的风险分析和控制,也能提供其入侵机制的信息。

(二) 生态地理学和适生性

研究分布区及其环境条件,决定分布区的因素分析,包括起源因素、地质变动因素、生态学因素和人类活动因素、现有寄主和扩散后的可能寄主研究。进一步进行适生性分析,为风险分析提供理论基础和依据。

(三) 生态位机遇与危险生物成功入侵的关系

研究红脂大小蠹入侵对生态位的选择与利用的时空动态,生物多样性结构与格局对入侵生物的抵抗与接受机制,生境破碎和人为干扰与生物成功入侵的关系;揭示生态位机遇(资源机遇、掠夺与瓜分能力、天敌逃避机遇等)在生物入侵过程中的作用,从我国松林群落对红脂大小蠹的易感性和抵抗性研究其入侵机制。

(四) 天敌作用机制

红脂大小蠹侵入后,当地天敌对它的选择性、适应性和控制作用如何?引进天敌大啮腊甲的作用及其与本地天敌之间的关系等问题都需要进行深入地研究,这是红脂大小蠹入侵机制的重要方面,也是有效合理地保护利用各种天敌资源的重要理论基础。

(五) 蓝变菌的作用机制

内容包括我国红脂大小蠹分布区蓝变菌的种类、特性及其与原产地的比较,蓝变菌在红脂大小蠹对松树侵害过程中的作用。

(六) 侵入及暴发的化学生态机制

对影响红脂大小蠹的益他素、性信息素和聚集信息素等化学信息物质及其作用机制进行研究,从化学生态学角度揭示寄主-小蠹-天敌之间的相互关系及其调控机制、树体对小蠹及小蠹与天敌之间的适应机制和抗性机制、人为因素对小蠹暴发的影响。

(七) 侵入区的种群时空动态及定居扩散机制

研究红脂大小蠹的扩散距离、扩散速度及其与环境因子的关系;摸清种群时空动态变化规律,建立种群动态扩散模型。

二、控制技术研究

对该入侵种应在加强管理的基础上控制其扩散,并在现有疫区加强除治工作,争取逐步缩小分布区和危害区。为达到此目的,还要加强控制技术研究,其重点应在如下几个方面:

(一) 检疫技术研究

由于红脂大小蠹目前仅在山西、陕西、河北、河南分布,对我国大部分的松林具有高侵入危害风险,必须加强检疫技术及有关行政管理技术研究,以保证疫区不扩展。

(二) 监测技术研究

加强对红脂大小蠹的检测和监测是有效控制该入侵种的前提,目前利用信息素的检测、监测初步取得成功,但还需要进一步深入系统地研究,形成系统配套的检测、监测技术。

(三) 天敌利用技术研究

从比利时引进大啮腊甲防治红脂大小蠹初步显示了很好的应用前景,应在进一步深入研究其控制作用的基础上,从防治效果、与本地天敌的关系、对环境的影响评估等方面进行全面的研究;同时还应在对本地天敌资源研究的基础上,研究其保护利用途径和技术。

(四) 信息素利用技术研究

在对松林-红脂大小蠹-天敌之间化学生态学研究的基础上,发展以信息素为主的红脂大小蠹的根除和防治技术。

(张 真 王鸿斌 孔祥波)

主要参考文献

- 常宝山,段东红,霍履远. 2001. 树干喷药防治红脂大小蠹试验. 山西林业, (5): 25 [Chang B S, Duan D H, Huo L Y. 2001. Experiment of trunk spray for the control of red turpentine beetle. Shanxi Forestry, (5):25]
- 常宝山,刘随存,赵小梅等. 2001. 红脂大小蠹发生规律研究. 山西林业科技, (4):1~4 [Chang B S, Liu S C, Zhao X M et al.,

2001. Occurrence Regularity of *Dendroctonus valens*. *Shanxi Forestry Science and Technology*, (4): 1~4]
- 陈庆昌, 张世忠. 2001. 太岳林区红脂大小蠹调查报告. *山西林业*, (3): 12~13 [Chen Q C, Zhang S Z. 2001. Report of red turpentine beetle in Taiyue forest area. *Shanxi Forestry*, (3): 12~13]
- 范俊秀, 曲晓晨, 刘建光等. 2001. 虫孔注药法防治红脂大小蠹试验. *山东林业科技*, (5): 30 [Fan J X, Qu X C, Liu J G *et al.* 2001. Experiment of injection for the control of red turpentine beetle. *Shandong Forestry Science and Technology*, (5): 30]
- 高宏旭, 苗振旺, 王日龙等. 2001. 红脂大小蠹的发生与治理. *林业科技通讯*, (3): 17~18 [Gao H X, Miao Z W, Wang R L *et al.* 2001. The occurrence and management of red turpentine beetle. *Forest Science and Technology*, (3): 17~18]
- 高增祥, 季荣, 徐汝梅, 谢宝瑜, 李典谟. 2003. 外来种入侵的过程、机理和预测. *生态学报*, 23(3): 559~570. [Gao Z X, Ji R, Xu R M, Xie B Y, Li D M. 2003. Biological invasions: process, mechanism and prediction. *Acta Ecological Sinica*, 23(3): 559~570]
- 郭泉水, 徐德应, 阎红. 1995. 气候变化对油松地理分布的影响. *林业科学*, 31(5): 393~402 [Guo Q S, Xu D Y, Yan H. 1995. A study on the impacts of climate change on the distribution of *Pinus tabulaeformis* in China. *Scientia Silvae Sinica*, 31(5): 393~402]
- 李计顺, 常国彬, 宋玉双等. 2001. 实施工程治理控制红脂大小蠹虫灾—对红脂大小蠹暴发成因及治理对策的探讨. *中国森林病虫害*, (4): 41~44 [Li J S, Chang G B, Song Y S *et al.*, 2001. Carrying out project management and controlling plague of red turpentine beetle. *Forest Pest and Disease*, (4): 41~44]
- 李淑丽, 王路芳, 刘志群, 牛敏生. 2001. 邢台市油松死亡情况调查及原因初析. *河北林果研究*, 16(1): 66~67. [Li S L, Wang L F, Liu Z Q, Niu J S. 2001. Investigation and analysis of pine death causes in Jingtai city. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 16(1): 66~67]
- 刘贤谦, 高宏旭, 任俊义, 程志枫. 2000. 强大小蠹生物学特性的研究. 走向 21 世纪的中国昆虫学. 北京: 中国科学技术出版社. 817~819
- 苗振旺, 周维民, 霍履远等. 2001. 强大小蠹生物学特性研究. *山西林业科技*, (1): 34~40 [Miao Z W, Zhou W M, Huo L Y, Wang L, Fan J X, Zhao M M. 2001. Study on the biological characteristic of *Dendroctonus valens*. *Shanxi Forestry Science and Technology*, (1): 34~40]
- 宋玉双, 杨安龙, 何嫩江. 2000. 森林有害生物红脂大小蠹的危险性分析. *森林病虫害通讯*, (6): 34~37 [Song Y S, Yang L A, He L J. 2000. Pest risk analysis of red turpentine beetle (*Dendroctonus valens*). *Forest Pest and Disease*, (6): 34~37]
- 王玉刚, 张真, 王鸿斌, 周淑芷. 2003. 红脂大小蠹成虫触角扫描电镜的观察. *林业科学研究*, 16(6): 726~730 [Wang Y G, ZHANG Z, Wang H B, Zhou S Z. 2003. Scanning electron microscope observation on antenna of red turpentine beetle (*Dendroctonus valens* LeConte). *Forest Research*, 16(6): 726~730]
- 吴坚等. 2000. 赴美红脂大小蠹防治考察报告 [Wu J *et al.*, 2000. Report investigation in United States on red turpentine beetle (*Dendroctonus valens*)]
- 徐化成等. 1981. 油松天然林的成长与地理气候因素的关系. *北京林学院学报*, (4): 9~13 [Xu H C *et al.* 1981. Relationship between growth of *Pinus tabulaeformis* and geological and climate factors. *Journal of Beijing Forestry College*, (4): 9~13]
- 殷惠芬. 2000. 强大小蠹的简要的形态学特征和生物学特征. *动物分类学报*, 25(1): 120, 43 [Yin H F. 2000. The synopsis on morphological and biological characters of *Dendroctonus valens* Leconte. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 25(1): 120, 43]
- 殷惠芬, 黄复生, 李兆麟. 1984. 中国经济昆虫志(第二十九册)鞘翅目 小蠹科. 北京: 科学出版社. 56~58
- 张海军, 段东红, 李计顺. 2001. 平定县红脂大小蠹越冬调查简报. *山西林业*, (2) [Zhang H J, Duan D H, Li J S. 2001. Report on overwintering of red turpentine beetle in Pinding county. *Shanxi Forestry*, (2)]
- 张历燕, 陈庆昌, 张小波. 2002. 红脂大小蠹形态学特征及生物学特性研究. *林业科学*, 38(4): 95~99 [Zhang L Y, Chen Q C, Zhang X B. 2002. Studies on the morphological characters and bionomics of *Dendroctonus valens* LeConte. *Scientia Silvae Sinica*, 38(4): 95~99]
- Borden J H . 1982. Aggregation pheromones. In: J B Mitton and Sturgeon K B eds. *Bark Beetles in North American Conifers*. Austin, Texas: University of Texas Press. 74~139
- Borden J H. 1985. Aggregation pheromones. In: Gilbert L I ed. *Comprehensive Insect Physiology Biochemistry and Pharmacology*. Oxford: Pergamon Press. 257~285
- Brand J M. 1974. Production of verbenol pheromone by a bacterium isolated from bark beetles. *Nature*, 154: 136~137
- Brand J M. 1976. Bark beetle Pheromones: production of verbenone by a mycangial fungus of *Dendroctonus frontalis*. *J. Chem. Ecol.*, 2: 195~199
- Britton K O, Sun J H. 2002. Unwelcome guests: exotic forest pest. *Acta Entomologica Sinica*, 45(1): 121~130
- Burgos M F, Islas S F, Villa S A B. 1975. Preliminary studies on the biology and control of two pine bark-beetles in the forests of

- the San Rafael Forest Unit and adjacent areas (*Dendroctonus mexicanus* Hpk. and *Dendroctonus valens* LeC.). *Boletín Unidad Industrial de Esplatación Forestal de San Rafael.*, 7: 61
- Carde R T, Minks, A K 1997. *Insect Pheromone Research, New Direction*. New York: Chapman and Hall.
- Dahlsten D L. 1982. Relationships between bark beetles and their natural enemies. In: Mitton J B, Sturgeon K B eds. *Bark beetles in North American Conifers*. Austin, Texas: University of Texas Press, 140–182
- Eaton C B, Lara R R. 1967. Red turpentine beetle *Dendroctonus valens* LeConte. In: Davidson A G, Prentice R M eds. *Impotent Forest Insects of Mutual Concern to Canada, the United States and Mexico*. Ottawa: Canada Department of Forestry and Rural Development Pub. 248
- Erbilgin N, Raffa K E. 2000. Opposing effects of host monoterpenes on responses by two sympatric species of bark beetles to their aggregation pheromones. *Journal of Chemical Ecology*, 26(11): 2527–2548
- Fatzinger C W. 1985. Attraction of the black turpentine beetle (Coleoptera: Scolytidae) and other forest Coleoptera to turpentine-baited traps. *Environ. Entomol.* 14: 768–775
- Filip G M. 1994. Forest health decline in central Oregon: a 13-year case study. *Northwest Science*, 68:233–240
- Fitzgerald T J. 1994. Pine bark beetles. Extension Bulletin Cooperative Extension, College of Agriculture and Home Economics, Washington State University. No. EB0936, 4
- Fox J W, Wood D L, Akers R P, Parmeter J R S. 1992. Rivalry and development of *Ips paraconfusus* Lanier (Coleoptera: Scolytidae) reared axenically and with tree-pathogenic fungi vectored by cohabiting *Dendroctonus* species. *Canadian Entomologist*, 124(6): 1157–1167
- Goheen D J, Cobb F W, Wood D L, Rowney D. 1985. Visitation frequencies of some insect species on *Ceratocystis wageneri* infected and apparently healthy ponderosa pines. *Can. Entomol.* 117: 1535–1543
- Goyer R A, Wagner M R, Schowalter T D. 1988. Current and proposed technologies for bark beetle management. *Journal of Forestry*, 96: 29–33
- Hall R W. 1983. Attraction of *Dendroctonus valens* (Coleoptera: Scolytidae) to ponderosa pines baited with *Dendroctonus brevicomis* (Coleoptera: Scolytidae) pheromone. *Environmental Entomology*, 12(3): 718–719
- Hobson K R, Wood D L, Cool L G, White P R, Ohtsuka T, Kubo I, Zavarin E. 1993. Chiral specificity in responses by the bark beetle *Dendroctonus valens* to host kairomones. *Journal of Chemical Ecology*, 19(9): 1837–1846
- Klepaig K D, Smalley E B, Raffa K F. 1995. *Dendroctonus valens* and *Hylastes porculus*. (Coleoptera: Scolytidae): vectors of pathogenic fungi (Ophiostomatales) associated with red pine decline disease. *Great Lakes Entomologist.*, 28(1): 81–87
- Munakata K. 1997. Insect feeding deterrents in plants. In: Shorey H H, Mckelvey J J eds. *Chemical Control for Insect Behavior: Theory and Applications*. New York: John Wiley & Sons. 93–101
- Owens D R. 1985. The role of *Dendroctonus valens* and its vectored fungi in the mortality of ponderosa pine. PhD dissertation. University of California, Berkeley, 64
- Owens D R, Lindhal K Q Jr, Wood D L, Parmeter J R Jr. 1987. Pathogenicity of fungi isolated from *Dendroctonus valens*, *D. brevicomis*, and *D. ponderosae* to pine seedlings. *Phytopathology*, 77: 631–636
- Payne T L. 1975. Bark beetle olfaction. III antennal olfactory responsiveness of *Dendroctonus frontalis* Zimmerman and *D. brevicomis* LeConte (Coleoptera:Scolytidae) to aggregation pheromones and host tree terpene hydrocarbons. *J. Chem. Ecol.*, 22: 1569–1572
- Payne T L. 1989 Olfactory basis for insect enemies of allied species. In: Kulhavy D L and Miller M C eds. *Potential for Biological Control of Dendroctonus and Ips Bark Beetles*. Stephen F. Nacogdoches, Texas: Austin State University Press. 55–69
- Payne T L, Billings R F, Delorme J D, Andryszak N A, Bartels J, Francke W, Vite J P. 1987. Kairomonal-pheromonal system in the black turpentine beetle, *Dendroctonus terebrans* (O1). *J. Appl. Entomol.*, 103: 15–22
- Petty T M, Shaw C G. 1986. Isolation of fomitopsis pinicola from in-flight bark beetles (Coleoptera: Scolytidae). *Canadian Journal of Botany*, 64(7): 1507–1509
- Phillips T W, Wilkening A J, Atkinson T H, Nation J L, Wilkinson R C, Foltz J L. 1988. Synergism of turpentine and ethanol as attractants for certain pine-infesting beetles (Coleoptera). *Entomological Society of America*, 17: 456–462
- Raffa K F, Smalley E B. 1988. Host resistance to invasion by lower stem and root infesting insects of pine: response to controlled inoculations with the fungal associate *Leptographium terebrantis*. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(6): 675–681
- Ross D W, Daterman H E. 1997. Using pheromone-baited traps to control the amount and distribution of tree mortality during outbreaks of the Douglas-fir beetle. *Forest Science*, 43: 65–70
- Ross D W, Gibson K E, Their R W, Munsox A S. 1996. Optimal dose of an antiaggregation pheromone (3-methylcyclohex-

- 2-en-1-one) for protecting live Kouglass-fir from attack by *Dendroctonus pseudotsugae* (Coleoptera:Scolytidae). *Journal of Economic Entomology*, 89(1): 204-207
- Rudinsky J A. 1973. Michael-RR. Sound production in Scolytidae: stridulation by female *Dendroctonus* beetles. *Journal of Insect Physiology*, 19(3): 689-705
- Ryker L C. 1988. Acoustic studies of *Dendroctonus* bark beetles. *Florida Entomologist*, 71(4):447-461. Paper presented at the First National Agroacoustics Symposium, Jackson, Mississippi, 26-27
- Smith R H. 1961. Red turpentine beetle. Forest Pest Leaflet 55(revised). Washington DC: U. S. Department of Agriculture. *Forest Service*, 8
- Smith R H. 1977. Monoterpenes of ponderosa pine xylem resin in western United States. USDA Tech. Bull. 1532, Washington, D. C.
- Svihra P. 1995. Prevention of red turpentine beetle attack by Servimol [Sevimol] and Dragnet[permethrin]. *Journal of Arboriculture*, 21(4): 221-224
- Vite J P, Gara R I. 1962. Volatile attractants from ponderosa pine attacked by bark beetles (Coleoptera: Scolytidae). *Contrib. Boyce Thompson Inst.*, 21: 251-274
- Vite J P, Gara R I, von Scheller H D. 1964. Field observations on the response to attractants of bark beetles infesting southern pines. *Contrib. Boyce Thompson Inst.*, 22: 251-274
- Wallin K F, Raffa K F. 1999. Altered constitutive and inducible phloem monoterpenes following natural defoliation of jack pine: implications to host mediated interguild interactions and plant defense theories. *J. Chem. Ecol.*, 25: 861-880
- White P R, Hobson K R. 1993. Stereospecific antennal response by red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* to chiral monoterpenes from ponderosa pine resin. *Journal of Chemical-Ecology*, 19(10): 2193-2202
- Wood D L. 1982. The role of pheromones, kairomones, and allomones in the host selection and colonization behavior of bark beetles. *Annu. Rev. Entomo.*, 27: 411-446

第十一章 松突圆蚧

第一节 分布与起源	307	第七节 寄主及其对松突圆蚧的抗性	315
第二节 识别特征与早期诊断	308	第八节 天敌	316
第三节 传入途径与入侵成因	310	第九节 引进花角蚜小蜂控制松突圆蚧	317
第四节 危害现状与生态经济影响评估	311	第十节 风险分析与早期预警	326
第五节 生物学特性	312	第十一节 预防和控制技术	327
第六节 生态学特性	314	第十二节 应用与基础研究发展策略	328

摘要 松突圆蚧的原产地是日本的冲绳群岛和先岛群岛。目前,松突圆蚧在国外分布于日本的冲绳诸岛、先岛诸岛,在国内分布于台湾、香港、澳门、广东和福建。

松突圆蚧是20世纪70年代后期传入我国大陆,1982年5月首次在广东省珠海市发现该蚧,随后该蚧以低龄若虫随气流等传播,呈现半弧形辐射状的形式向西部和西北部扩散蔓延,据广东省森林病虫害防治与检疫总站统计,截至2002年,广东省有虫面积达111.58万公顷,发生危害面积为31.88万公顷。

松突圆蚧广泛危害松属树种,在广东主要危害马尾松。松突圆蚧主要以成虫和雌若虫群栖于较老针叶基部叶鞘内吸取汁液,致使松针受害处变褐、发黑、缢缩或腐烂,继而针叶上部枯黄卷曲或脱落,枝梢萎缩,抽梢短而少,影响松树生长,使马尾松等松树树势衰弱。马尾松受害后,年平均生长率比受害前下降了4.3%,有些松林遭受松突圆蚧危害后,相继发生较严重的蛀干害虫及其他病害,出现松树枯死现象。

松突圆蚧在广东南部1年发生5代,世代重叠,无明显的越冬期。该蚧整个生活史的有效积温为728DD。根据松突圆蚧的生物学、生态学特性,特别是发育起点温度与有效积温的计算分析,该虫有可能进一步蔓延到湖南和江西的南部。

松突圆蚧侵入广东省后,本地天敌对松突圆蚧的寄生和捕食效能极低,1986年我国专家在日本冲绳县找到了松突圆蚧的重要天敌—松突圆蚧花角蚜小蜂,1987年引进后进行了系统研究,结果表明,花角蚜小蜂具有寄主专一、搜索能力强、对寄主兼有寄生和捕食的双重作用。1989年底,花角蚜小蜂已在我国广东省受松突圆蚧危害的马尾松林内定居。放蜂后半年,50m范围内的平均寄生率为17.7%,各地放蜂的成功率平均为93.4%;放蜂2年后,花角蚜小蜂年平均扩散距离200~300m,寄生率已接近或稍高于日本冲绳22.8%的平均寄生率,雌蚧密度还低于日本冲绳0.85头/针束的水平,充分说明花角蚜小蜂对广东马尾松上的松突圆蚧具有与原产地同样高的控制效能。

松突圆蚧的蔓延和危害给广东省等疫区造成极大的经济损失,对广东等省的松林资源、生态环境、自然景观、外贸出口和社会经济发展产生灾难性的后果,直接威胁到我国南方松林及重点生态区的安全。在全面总结我国松突圆蚧防治的基础研究、应用基础

研究和应用技术研究经验与教训的基础上, 笔者认为, 对松突圆蚧的控制, 要加强检疫封锁, 以营林为基础, 以天敌利用为主, 应用花角蚜小蜂控制新疫区松突圆蚧, 开发利用本地天敌控制老疫区松突圆蚧, 加快马尾松纯林林分改造, 提高松林本身的自我调控能力, 综合、持续地控制松突圆蚧的发生和蔓延。

关键词 松突圆蚧 花角蚜小蜂 天敌 引进 生物防治

Chapter 11 Pine Scale *Hemiberlesia pitysophila* Takagi

Abstract: *Hemiberlesia pitysophila* Takagi originated in Okinawa archipelago and Sakishima archipelago. At present, its distribution areas include Okinawa archipelago and Sakishima archipelago in Japan; Taiwan, Hong Kong, Macao, Guangdong and Fujian in China. *H. pitysophila* streamed into Guangdong province in 1980s. It was firstly discovered in May, 1982, in Zhuhai city. The junior nymphs spreaded to west and northwest of Guangdong through airflow. According to the survey by Quarantine and Control Station of Forestry Pests and Diseases in Guangdong, the distribution and infested areas of *H. pitysophila* in Guangdong were 1,115, 800 and 318,800 hm² respectively in 2002.

The main host of *H. pitysophila* is *Pinus massoniana* Lamb in Guangdong. The adults and female nymphs of the scale inhabit collectively in the inner side of vaginae of older pine-needles. While the male nymphs inhabit in the outside of the vaginae or in the fresh pine-cones, few on the middle and lower part of the young needles. They suck the sap of pine tree, which make the infested needles wither or fall, and then make the growing potential of *P. massoniana* weak, the average growth rate is 4.3% lower than that before scale occurrence. In some places, the pine forests will encounter wood-boring insects and other diseases after suffering from the damage of the scale. As a result, the pine trees wither or die.

There are 5 generations per year in southern Guangdong, with severe generation overlapping and without obvious over-wintering. The effective accumulative temperature of the scale is 728 day-degrees. On the basis of analysis of biological and ecological characters, especially on the developmental base temperature and effective accumulative temperature, the scale is likely to spread into northern Guangdong, Hunan and southern Jiangxi provinces.

In Guangdong, although *H. pitysophila* is parasitized and predated by local natural enemies, it can't be controlled effectively because the parasitism rate is very low. In 1986, the Chinese experts went to Okinawa, Japan and they discovered an important natural enemy of *H. pitysophila* - *Coccobius azumai* Tahikawa. Since 1987, studies have been done on the biological and ecological characteristics of *C. azumai*, also including its control efficiency on *H. pitysophila*. These studies demonstrate that *C. azumai* has the following advantages:

specific host; strong searching ability; dual functions of parasitization and predation. By the end of 1989, the wasp has already settled down at scale-damaged *Pinus massoniana* forest in Guangdong. Half a year after release, the parasitism rate of *C. azumai* was 17.7% within 50m from the released site, the average successful rate is 93.4%. Two years later the effective control radius had increased to 200~300 m. The parasitism rate is near or slightly higher than the average parasitism rate of 22.8%, the density of female *H. pitysophila* is lower than 0.85 per needle in Okinawa, Japan. This approved that *C. azumai* has as high control efficiency to *H. pitysophila* in *P. massoniana* forest of Guangdong as in Japan, and has the potential to control scale under the economic injure level chronically.

The dispersal and damage of the scale result in tremendous economic losses in Guangdong and other distribution areas. At the same time, it can bring a disastrous result to forest resources, ecological environment, natural landscapes, commercial exportation and social economy. And it can cause a direct threat to the pine forests and key ecological areas in southern China. Based on the experiences and lessons of basic researches and applied technology about the scale, the authors suggest that: (1) strengthening quarantine and preventing the spread of the scale; (2) carrying out essential principles of silvicultural control measures; (3) using *C. azumai* in the new infectious areas, applying local natural enemy to control the scale in the old infectious areas; (4) reconstructing pine forest, developing the anti-stress ability of pine stand, and controlling the dispersal and damage of the scale.

Key words: *Hemiberlesia pitysophila* Takagi, *Coccobius azumai* Tahikawa, natural enemy, introduction, biological control

第一节 分布与起源

松突圆蚧 *Hemiberlesia pitysophila* Takagi 属于昆虫纲 Insecta, 同翅目 Homoptera, 蚧总科 Coccoidea, 盾蚧科 Diaspididae, 突圆蚧属 *Hemiberlesia*。

松突圆蚧在国外分布于日本的冲绳诸岛、先岛诸岛, 在国内分布于台湾、香港、澳门、广东和福建。

松突圆蚧的原产地是日本的冲绳群岛和先岛群岛。该虫是高木贞夫 1956 年据在我国台湾省台北市阳明山上采到的标本, 1969 年在日本《松村昆虫》(*Insecta Matsumur*)杂志上发表的一个新种。1980 年河合省三在他编著的《日本蚧虫原色图鉴》(*Scale Insects of Japan in Colors*)一书中确认此蚧分布于冲绳诸岛、先岛诸岛。

据河合省三著的《日本介壳原色图鉴》所述及东清二的调查结果, 松突圆蚧主要寄生在琉球松 *Pinus luchuensis* Mayr 上。在日本冲绳, 松突圆蚧 1 年可发生 6~7 代, 4 月、5 月和 10 月、11 月分别出现虫口高峰。松突圆蚧主要发生在村庄与公路之间的平原地带, 但未见松树严重受害的迹象, 而生态环境较好的松林发生较少。1970 年河合省三调查时发现虫口密度较大, 但不造成灾害, 主要是由于松突圆蚧是当地原有的, 有较长时间与

生态环境互相适应，其天敌种类和数量较多，自然控制能力较强。此外，琉球松是较好的乡土树种，树冠浓密，针叶粗壮，抗性较强。

1982年，广东省森防技术人员应邀到澳门考察路环岛松林病虫的发生情况，全岛 400 hm² 松林，出现有枯黄、枯萎现象的达 266.67 hm²，占松林面积的 66.7%，每针束有蚧虫 15.7 头，最多的达 24 头，危害程度相当严重。据澳门方面反映，1977 年前就有明显的病症出现。1984 年，林业部应香港渔农处邀请对香港松林进行考察，确认香港于 1978 年“松针蚧虫”就大面积发生。1982 年 5 月，我国大陆首次在广东省珠海市发现该蚧，经杨平澜先生鉴定，确认该害虫为松突圆蚧。1984 年，通过香港渔农处与英国皇家博物馆鉴定和收藏的标本对照，以及东清二教授对冲绳和广东两地的玻片标本对照鉴定，确认广东与香港、冲绳所发生的均系同一虫种，即松突圆蚧(梁承丰，2003)。

第二节 识别特征与早期诊断

一、松突圆蚧的形态特征

松突圆蚧雌虫一生经过成虫、卵、若虫 3 个时期，雄虫则在若虫与成虫之间还有个蛹期。若虫 2 龄。伍建芬(1990)和潘务耀(萧刚柔，1992)曾对松突圆蚧的形态特征进行深入的研究。

(一) 各虫期介壳

雌成虫介壳：比 2 龄后期雌若虫介壳大。多为蚌形或近椭圆形或稍有不规则变化，大小约为 1.0mm×1.2mm。在 1 龄的红黄色蜕外增加了一个大小约为 0.6mm×0.7mm 的红黄色椭圆形 2 龄若虫蜕。1 龄蜕与 2 龄蜕相重叠，但偏于 2 龄蜕的一边，有时稍凸出一部分于 2 龄蜕之外。雌成虫孕卵前介壳略呈圆形，扁平，中心略高，亮点位于中心或略偏，橘黄色，周围一圈淡褐色，介壳其余部分灰白色。孕卵后介壳变厚，并偏向尾部伸展，成为雪梨状。

雄成虫介壳：与 2 龄后雄若虫介壳形态、颜色相同，只是稍大一点，雄成虫介壳大小约为 0.5mm×1.1mm。

1 龄若虫介壳：白色，近圆形，直径 0.2~0.4mm，外缘宽约 0.05~0.1mm 的边色稍淡并略显透明。剥开介壳，下有淡黄色、椭圆、大小约 0.12mm×0.22mm 的 1 龄若虫。

2 龄若虫介壳：2 龄初期若虫介壳大小与 1 龄后期若虫介壳相近，介壳中央有大小约为 0.3mm×0.35mm 的红黄色、椭圆形第 1 龄若虫的蜕，蜕上方近中央有一大约为 0.17mm×0.2mm 的浅白色分泌物。蜕的周缘为宽约 0.05mm 的浅白色圆圈。剥开介壳，下有近圆形、大小约为 0.3mm×0.35mm 的红黄色 2 龄若虫。介壳呈龟背形凸起。

2 龄后期若虫介壳分为雌雄二型。

雌介壳：近圆形，除蜕皮区外，介壳主要为白色，大小约为 0.7mm×0.8mm。蜕上的白色椭圆形分泌物偏于介壳增加较少的一边。

雄介壳：主要向一端延伸，除蜕皮区外，介壳蜡黄色。整个介壳呈长椭圆形，长 0.8~0.9mm 宽 0.45~0.50mm。蜕上方近中央的浅白色椭圆形分泌物偏于延伸的蜡黄色介

壳的一边。

预蛹、蛹及成虫介壳：预蛹、蛹及雄成虫介壳完全相同，因为雄若虫化为预蛹后，介壳就不再变化了。

(二) 各虫态形态

雌成虫：体宽梨形，淡黄色，膜质，臀板硬化。体长 0.7~1.1mm；头胸部最宽，0.5~0.9mm。第二至第四腹节侧缘稍突出，臀板较宽。触角疣状，上有毛 1 根。口器发达。臀叶 2 对，中臀叶突出，宽略大于长，顶端圆，每侧有 1 凹刻。基部的硬化部分深入臀板中，第二臀叶小，不两分。在中臀叶和第二臀叶间有 1 对顶端膨大的硬化棒；缘鬃细而短，其长度不超过中臀叶，中臀叶间有 1 对，在第二臀叶与中臀叶间各 1 对，第二臀叶前各 3 对。肛孔位于臀板基部。臀背管腺细长，中臀叶间有 1 个，中臀叶和第二臀叶间有 3 个，在第二臀叶前 2 纵列：分别为 4~8 个和 5~7 个。另外，在后胸到第五腹节的边缘均有管腺分布。腹面的管腺细小，分布在头胸部和第一至第五腹节的边缘，在前后胸间间呈横带，口器前面近体边缘处的背面有 1 圆形突起。

雄成虫：体橘黄色，长 0.8mm 左右，翅展 1.1mm。触角 10 节，长约 0.3mm，每节有数根毛。单眼 2 对。胸足发达。前翅膜质，翅脉 2 条。后翅退化为平衡棒，端部有毛 1 根。体末端的交尾器发达，长而稍弯曲。

卵：椭圆，淡黄，长约 0.25mm，宽约 0.12mm。

1 龄初孵爬动若虫：卵圆形，扁平，淡黄，长约 0.22mm，宽约 0.12mm；触角 4 节，三对足及腹末丝浅色稍淡。

2 龄初期若虫：圆形，淡黄，长约 0.35mm，宽约 0.30mm，形态和雌成虫大体相似。性分化已开始，雄若虫比雌若虫身体稍窄，身体后端更明显。

2 龄后期若虫：雄性体型与 2 龄初期若虫相似，但进一步向预蛹形态发展。体长约 0.6mm，宽 0.4mm。雌性近似雌成虫，体长约 0.6mm，宽约 0.5mm。

预蛹：椭圆，后端略小，长约 0.75mm，宽约 0.40mm，淡黄色，前端出现眼点。

蛹：椭圆，淡黄，长约 0.75mm，宽约 0.40mm。复眼黑色，触角、足、翅及交配器淡黄而稍显透明。

二、松突圆蚧的危害特点

松突圆蚧主要以成虫和雌若虫群栖于较老针叶基部叶鞘内(图 11-1)，雄若虫则在叶鞘外部或鲜球果的鳞片上，少数在嫩叶的中、下部吸取汁液，致使松针受害处变褐、发黑、缢缩或腐烂，继而针叶上部橘黄卷曲或脱落，枝梢萎缩，抽梢短而少，严重影响松树生长，使马尾松等松树树势衰弱(图 11-2)。有些地方松林遭受松突圆蚧危害后，



图 11-1 松突圆蚧寄生在松针上(陈沐荣 供)

相继发生较严重的蛀干害虫及其他病害，出现松树枯死现象。我国广东省等松突圆蚧疫

区内的松树，不管幼龄、中龄或老龄，疏、密或混交的各种林分以及幼苗均受其害。松突圆蚧的危害明显有别于常见的松树病虫害，主要表现在：



图 11-2 松突圆蚧危害状(黄焕华 摄)

(一) 危害隐蔽，难于发现，增加人为传播的可能性

松突圆蚧有介壳包被，虫体群栖，固定寄生，世代重叠，往往多层堆叠在一起，且多藏于针叶基部危害，比较隐蔽，加上其虫体小，往往不易引起人们的注意而较难发现，故在无意之中即可把它从某地传到另一地方发生危害，给防治带来很大困难(陈芝卿和陈佩珍，1989)。

(二) 松突圆蚧与其他松树病虫害的区别

松突圆蚧致死松树的老针叶由下而上变成灰白至灰色，嫩枝萎缩，老针叶脱落，多年后逐渐枯死，死树多集中连片发生。

在我国广东省等林区，对松树造成严重危害的还有松材线虫病 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Buhrer) Nickle、松梢枯病 *Diplodia pinea* (Desm.) Kickx，松针褐斑病 *Lecanosticta acicola* (Thuem.) Syd.等病害，马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* Walker、松褐天牛 *Monochamus alternatus* Hope、马尾松角胫象 *Shirahoshizo patruelis* Voss、松瘤象 *Hyposipalus gigas* Fabricius、纵坑切梢小蠹 *Tomicus piniperda* Linnaeus 等害虫，这些病虫害的发生一般是局部的，甚至是零星的，且枯死树的范围扩散缓慢。

第三节 传入途径与入侵成因

据专家分析认为，松突圆蚧是随每年从日本、我国台湾省等地输出的带松突圆蚧的圣诞树(松树)传入香港和澳门；其低龄若虫随气流等传播(何国锋，1995)，20世纪70年代后期传

入广东省的深圳市和珠海市，随后向广东省的西北部扩散和蔓延，造成大片松树枯死。

据徐世多等(1992)1987~1989年在此虫发生边缘区进行的研究结果也表明，松突圆蚧自然传播媒介为气流。气流运载初孵若虫和雄成虫作无规律跳跃式传播。水平传播距离为3~5km；垂直传播距离为0.1km。3~12月为传播期，高峰期为5~6月，18~20℃为最适传播期。松突圆蚧入侵广东20年来，呈现半弧形辐射状的形式不断向内地西部和西北部扩散蔓延，平均每年扩散蔓延5.27万公顷(梁承丰等，2003)。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

根据广东省森林病虫害防治与检疫总站调查，1983年全省发生面积11.40万公顷，其中轻度发生面积6.31万公顷、中度4.25万公顷、重度0.82万公顷，主要分布在沿海地区6市9县(区)。2002年松突圆蚧已扩散蔓延至全省17个市、58个县级行政区，有虫面积111.58万公顷，发生面积31.88万公顷，其中轻度发生面积16.05万公顷、中度10.82万公顷、重度5.09万公顷，而受害枯死或濒死已更新改造的达18万公顷。从1983~2002年，松突圆蚧的分布范围由11.40万公顷发展到111.58万公顷，增加100.18万公顷，平均每年扩散蔓延5.27万公顷。广东省历年松突圆蚧分布和发生面积如图11-3(梁承丰等，2003)。

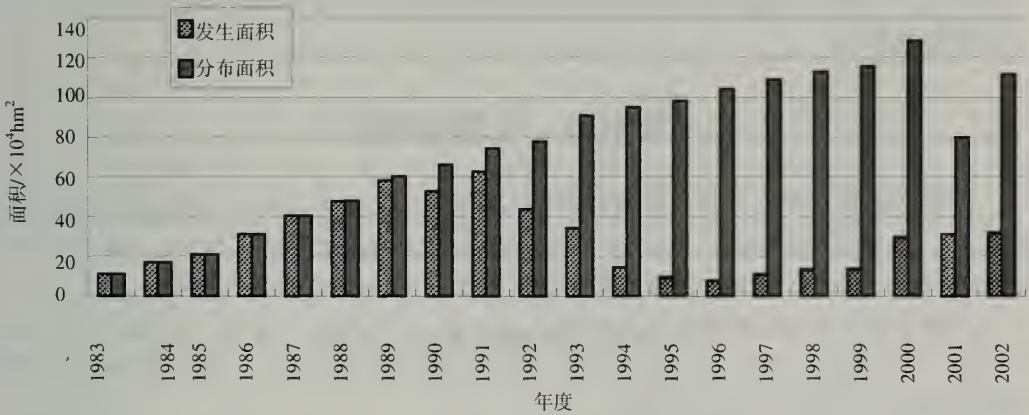


图 11-3 广东省历年松突圆蚧分布和发生面积

从图11-3可见，松突圆蚧的分布面积呈现逐年扩大的趋势。发生面积从1983~1989年呈现上升趋势，1991~1996年出现下降的趋势，1997年后又呈现上升趋势，其主要原因是1989~1997年大面积应用花角蚜小蜂控制了松突圆蚧的蔓延，1997年后因花角蚜小蜂种源缺乏，中断了生物防治，使灾害又趋严重。2000年分布面积比1999年减少48.28hm²，是由于将有虫无灾的湿地松林面积从原来的分布面积中剔除。

广东省森防部门的调查结果还表明，松突圆蚧入侵广东后，呈现半弧形辐射状的形式向内地不断扩散蔓延。松突圆蚧传播蔓延较快的方向主要是向西部和西北部，东部于1983年就在惠东发现该蚧，现在向东只扩展了几十公里。此外，2001年已在广东省的罗定、信宜与广西岑溪的接壤处发现松突圆蚧，只是新入侵时虫口密度较低，缺乏经验的

人员难以发现该蚧;在广东连平县的松突圆蚧发生区与江西的边界也只有 20 多公里,松突圆蚧从广东省扩散蔓延到邻省,对南方诸省松林的威胁已难以避免(梁承丰等,2003)。

松突圆蚧的为害直接影响木材和松脂产量。黄茂俊和陈芝卿(1988)对惠东县寨场山林场 1968 年飞播的马尾松林(树龄为 17 年生,郁闭度 0.5,每公顷约 900 株)的调查表明,松突圆蚧大发生前的 1978~1983 年 6 年的平均生长率为 12.3%,而松突圆蚧大发生时的 1984~1985 年的年平均生长率仅为 8.0%,比大发生前下降了 4.3%,每年松林材积生长量下降了 $2.5485\text{m}^3/\text{hm}^2$,而松毛虫大发生时与前 1 年相比,每年材积生长仅下降 $0.7860\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。由此可见,松突圆蚧对松林的危害比松毛虫的危害更为严重,其对松林造成的材积生长量的损失为松毛虫的 3.2 倍。胡焯海(1992)在惠东县寨场山林场进行了该虫危害对马尾松产脂量影响的研究,结果表明,马尾松林受松突圆蚧危害后,针叶变枯黄,抽梢长度和针叶长度受抑制,减弱了林木的光合作用,从而使松脂的产量减少。针叶枯黄率与松脂损失率呈正相关关系,并有随着针叶枯黄率的增大松脂损失量加大的趋势,当针叶枯黄率达 30%时,松脂总损失量达 $666.1\text{kg}/\text{hm}^2$;当针叶枯黄率达 80%时,松脂损失总量达 $1776.0\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

由此可见,松突圆蚧是一种危害松属树种的害虫,为我国大陆的危险性检疫害虫,其蔓延和危害给广东省等疫区造成极大的经济损失,对广东等省的松林资源、生态环境、自然景观、外贸出口和社会经济发展产生灾难性的后果,直接威胁到我国南方松林及重点生态区的安全。

第五节 生物学特性

据潘务耀等(1989a)研究,松突圆蚧在广东南部 1 年发生 5 代,世代重叠,无明显的越冬期。各世代雌蚧完成 1 代的历期分别为 52.9~62.5d, 47.5~50.2d, 46.3~46.7d; 49.4~51.0d, 114.0~118.3d。松突圆蚧年生活史如表 11-1(梁承丰等,2003)。

初孵若虫出现的高峰期是 3 月中旬~4 月中旬,6 月初~6 月中旬,7 月底~8 月上旬,9 月底~11 月中旬,其中,以 3~5 月第一次盛发期增殖数量最多,以后逐次减少,其变化情况如图 11-4(梁承丰等,2003)。

据潘务耀等(1989a)研究,松突圆蚧雄成虫羽化后一般在介壳内蛰伏 1~3d,出壳时,尾端先从介壳较低的一端露出,继而运足力量,使整个身躯退出介壳,而且翅呈 180° 倒折,覆盖住头部,出壳后经数分钟,翅方呈正常状态。刚羽化的雄虫十分活跃,爬动或飞翔,寻找合适的雌蚧,然后腹部朝下弯曲,从雌蚧介壳缝中插入交尾器,进行交尾。1 头雄虫可多次交尾,交尾后数小时即死去。

雌成虫交尾后 10~15d 开始产卵。各代雌蚧产卵期少则 1 个月,多则 3 个月以上,其产卵量以越冬代(第五代)和第一代最多,约 64~78 粒;8~9 月第三代产卵量最少,约 39 粒。雌雄蚧虫比例一般为 1.5~2.0:1,1 年中随季节不同性比也略有不同。

表 11-1 松突圆蚧年生活史

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
越冬代	●●●●●●●●●●											
第一代			— — — —	==	===	=	●●●●●●●●	●				
第二代					—	— — — —	==	==				
第三代						●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●				
第四代									==			
第五代										●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

注：—：1 龄若虫 =：2 龄若虫 ●：雌成虫。

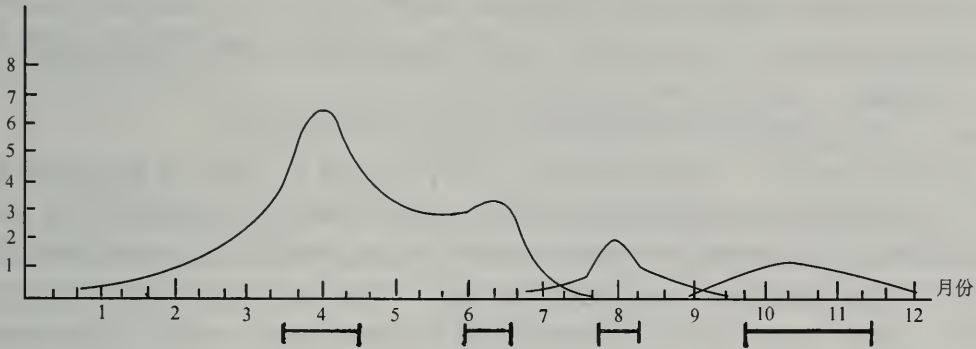


图 11-4 松突圆蚧初孵若虫高峰期

初孵若虫一般先在介壳内滞留一段时间，待环境适宜时再从母体介壳边缘的裂缝爬出。出壳时先露出头部，触角不断摆动，继而露出躯体。出壳时间，以 10:00~14:00 时为最多，如遇闷热天气，出壳高峰提前到 8:00 时左右，阴晦天气则延至 15:00~16:00 时，雨天一般不出壳。冬季气温较低时，林间仍有少量若虫出壳。光照对各代若虫的孵化出壳无明显的影响。刚出壳的若虫很活跃，常沿针叶来回爬动，寻找合适的寄生场所。经 1~2h 后即把口针插入针叶内固定吸食，5~19h 开始泌蜡，泌蜡腺有单线和双线两种。蜡丝首先缠盖住体缘，然后逐渐延至背面中央，经 20~32h 可封盖全身。此时，除边缘外，蜡被尚薄而透明，可见到里面黄色的虫体。再经 1~2d 蜡被增厚变白，形成圆形介壳。固定在叶鞘内的多发育为雌虫，而固定在叶鞘外针叶上的及球果上的多发育为雄虫。

第六节 生态学特性

一、突圆蚧的空间分布型

陈佩珍等(1990)采用扩散系数、负二项分布 K 值、样本平均拥挤度等 7 种聚集度指标对 4 种郁闭度标准地样树上的活虫数进行分析,表明各郁闭度林地的松突圆蚧均属聚集分布,即以好多虫体成个体群聚集在林地的不同树木上,个体群数量的多少是不固定的。据此,在取样调查虫口密度时,只须采用平行线或 Z 字形取样株,不必多考虑树冠的不同方位和不同层次对抽样调查结果的影响。

二、有效积温与海拔高度对松突圆蚧分布的影响

刘清浪等(1990, 1992)对松突圆蚧发育起点温度及有效积温的测试,结果表明:

松突圆蚧的发育起点温度:1 龄若虫为 $6.7 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$; 2 龄若虫为 $10.4 \pm 2.6^{\circ}\text{C}$; 蛹期为 $13.8 \pm 3.3^{\circ}\text{C}$; 雌成虫期为 $11.5 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$; 整个生活史为 $13.0 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ 。

松突圆蚧的有效积温:1 龄若虫为 227.5DD; 2 龄若虫为 172.0DD; 蛹期为 61.4DD; 雌成虫期为 378.8DD; 整个生活史为 728DD。

松突圆蚧在海拔 41~1073m 均能生存发育,并随着海拔高度的升高,发育历期延长,年发生代数减少;海拔 100~900m 均有松突圆蚧的自然分布,但主要分布于 700m 以下的松林;松突圆蚧越冬代的死亡率随海拔升高而增高,繁殖力降低。

通过相关分析表明,气温是松突圆蚧生长发育的主要因子。依据广东省各地的气象资料,应用有效积温法估算松突圆蚧在珠海市,惠东县及河源市发生的世代数,与实际观察到的年发生世代数基本吻合,说明用这种方法预测松突圆蚧的发生世代数是较可靠的。此外,预测结果还表明,非疫区的英德、韶关、乐昌及梅州等地其可能发生世代数为 3~4 代,说明广东省北部和东北部均潜在着松突圆蚧发生蔓延的可能性,根据松突圆蚧的生物学、生态学特性,特别是各虫期发育起点温度与有效积温的计算分析,该虫有可能进一步蔓延到粤北和湖南、江西的南部为害。

三、松突圆蚧的发生、危害与环境关系

童国健等(1988)认为,松突圆蚧的发生及其对马尾松等松树的危害程度的大小,是松突圆蚧与生态环境综合作用的结果,在不同的环境条件下,各因子的作用也不同。

(一) 气候因子

影响松突圆蚧数量消长的气候因子有气温、相对湿度、降雨量和风等。

气温起主导作用,旬平均气温与死亡率呈抛物线关系。旬平均气温高于 23°C 与死亡率呈正相关,即气温愈高,死亡率越大;夏秋高温期,日平均气温达 28.1°C 时出现虫口死亡高峰;旬平均气温低于 18°C 呈负相关,即气温愈低,死亡率愈大。

相对湿度作为单独因子对虫口数量的影响不太明显,但与温度共同作用时则呈正相关,即相对湿度增大,有利虫口数量的发展

月降雨量大于 100mm 时,呈负相关,即月降雨量越大,虫口密度则相应减小,原因是降雨对初孵若虫有机械杀伤作用,并影响其固定和取食。

风对初孵若虫的传播有决定性的作用,初孵若虫随风传播的距离,最远的可达 8km。林地荫蔽多湿有利于松突圆蚧的发生,林木郁闭度 0.9 的林内虫口密度要比郁闭度 0.5 的大 1 倍以上。因此郁闭度过大,或立地条件差,林木的生长势差以及养份补偿力弱的林份,易受害枯死。

(二) 土壤条件与松针养分

顾茂彬等(1990)对影响土壤理化性状的 12 个土壤因子[有机质、全 N、速效 P、速效 K、pH(H₂O)、代换盐基总量、盐基饱和度、物理性黏粒含量、土壤容重、黑土层、土层厚度及母质类型]作自变量,林分危害程度作因变量。经相关和逐步回归分析,危害程度与土壤有机质、全 N、黑土层、土层厚度及物理性黏粒含量间有着极显著的负相关关系,即随着其含量或厚度的增加,危害程度减轻。其中起主导作用的是黑土层厚度和物理性黏粒含量。与土壤容重的关系与之相反。

何雪香和刘清浪(1992)以松针中全 N、全 P、全 K 及反映养分平衡关系的 N/P、N/K、P/K 比值为自变量,危害程度为因变量,逐步回归分析,结果表明:松针中 N、P、K 含量越高,危害程度越轻,特别是 P、K 含量。

第七节 寄主及其对松突圆蚧的抗性

松突圆蚧的寄主有马尾松 *Pinus massoniana* Lamb.、湿地松 *P. elliotii* Engel.、火炬松 *P. taeda* Linn.、本种加勒比松 *P. caribaea* var. *caribaea* Morelet、巴哈马加勒比松 *P. caribaea* var. *bahamensis* Geiseb.、洪都拉斯加勒比松 *P. caribaea* var. *hondurensis* Senecl.、卵果松 *P. oocarpus* Schiede.、展松 *P. patula* Schl et Cham.、短叶松 *P. echinata* Mill.、卡锡松 *P. kesiya* Royle ex Gord.、晚松 *P. rigida* var. *serotina* Michx.、光松 *P. glabra* Walt.、裂果沙松 *P. clausa* var. *immuginata* Ward, 南亚松 *P. merkusiana* Cooling et Gaussea 和黑松 *P. thunbergii* Parl.、琉球松等松属树种。在广东,松突圆蚧主要危害马尾松。

陈泽藩等(1988)在珠海市以 2 年生湿地松作砧木,高干嫁接 15 种松树,接虫观察 3 年的结果表明:

15 种松树发生松突圆蚧的数量差异很大。其中马尾松、光松、南亚松和裂果沙松虫口数量为最大,这 4 种松树和本种加勒比松、洪都拉斯加勒比松、火炬松共 7 种松树之间虫口差异不显著,可划分为虫口量大的一类;黑松、展松、湿地松、巴哈马加勒比松、短叶松等 5 种松树虫口量基本上在同一水平,而且显著低于第一类松树。与马尾松相比卵果松、卡锡松、晚松,发生的虫量最少(仅为马尾松的 1/10~1/37)可视为抗虫树种。

从松树的外观看,不同种类的松树受一定数量蚧虫的危害后所表现出来的受害状有明显的差异,大致分为下列 3 种情况:①马尾松和裂果沙松有明显受害状。马尾松全株发黄,老叶干枯脱落,春梢短,裂果沙松虫口量虽较马尾松少,但其枝细叶小,虫口相

对集中在嫩梢基部,造成老针叶干枯,新梢短,有缩叶和死梢现象;②光松、南亚松、黑松、展松和火炬松有少量针叶枯黄;③在试验地苗圃内生长正常的有湿地松、3种加勒比松、晚松、卵果松、短叶松和卡锡松。

由此可见,松突圆蚧广泛危害松属树种,各种松树种植区都要作好检疫和防治工作。林间种植光松、南亚松、本种加勒比松、洪都拉斯加勒比松、火炬松、马尾松和裂果沙松可能遭受松突圆蚧的严重危害。卵果松、卡锡松和晚松在15种松树中最抗虫,作为抗虫树种可进一步作扩大试验。

此外,湿地松在我国江南各省大面积栽培,该种松树在广东省受松突圆蚧危害后,有虫株率、有虫针束率、每针束虫口密度等均明显低于相邻种植的马尾松,而且湿地松长势旺盛,未见受害引起黄叶、枯死现象,有虫无灾。

第八节 天 敌

1985年以来,梁承丰(1988)、梁铭球和陈振耀(1990)在广东惠东、深圳、珠海、中山等松突圆蚧疫区,对松突圆蚧天敌做了调查,并对一些优势种进行了观察研究;同时对来自日本冲绳县的以琉球松为寄主的松突圆蚧寄生性天敌进行了分析。采集到的天敌,经鉴定的有18种,其中,捕食性天敌10种,寄生性天敌8种。

一、捕食性天敌昆虫

红点唇瓢虫 *Chilocorus kuwanae*、细绿唇瓢虫 *C. circumdatus*、整胸寡节瓢虫 *Telsimia emarginata*、日本方头甲 *Cybocephalus nipponicus*、八斑绢草蛉 *Ancylopteryx octopunctatu*、牯岭草蛉 *Chrysopa kulingensis*、圆果大赤螨 *Anystis baccharum*、黄胫长鬃蓟马 *Karnyothrips flavipes*、捕虱管蓟马 *Aleurodothrips fasciapennis*、中华筒管蓟马 *Haplothrips chinensis*。

二、寄生性天敌昆虫

长缨盾蚧丽蚜小蜂 *Encarsia citring* 或 *Aspidiotiphagus citrinus*、爱友丽蚜小蜂 *E. amicula*、花角蚜小蜂 *Coccobius azumai* Tahikawa、软蚧蚜小蜂 *Coccophagus* sp.、*Archenophagus* sp.、范氏黄蚜小蜂 *Aphytis vandenboschi*、瘦柄花翅蚜小蜂 *Marietla carnesi*、双带巨角跳小蜂 *Comperella bifasciata* 分布于日本冲绳。

从调查的结果分析,国内松突圆蚧的天敌优势种是红点唇瓢虫和圆果大赤螨,日本的天敌优势种是花角蚜小蜂。总的来看,松突圆蚧属外部侵入的一种害虫,蔓延扩散的速度非常快,这与国际上危险性害虫传进一个新地区后发展很快相一致。而在新疫区,中国大陆当时尚没有抑制此虫的生态环境,松突圆蚧发生时几乎不受制约,有些地方虽发现一些天敌,但自然条件下,天敌捕食和寄生率一般为3%~5%,最高也仅达20%左右,因此,急需寻找有效的天敌控制松突圆蚧的扩展和危害。

三、昆虫病原微生物

殷凤鸣等(1996)曾利用枝孢霉 *Cladosporium cladosporioides*、寄生曲霉菌 *Aspergillus*

parasilicus 对松突圆蚧进行致病力试验。

第九节 引进花角蚜小蜂控制松突圆蚧

松突圆蚧侵入我国广东省后,当地寄生和捕食性天敌对雌蚧的控制效能极低,因此未能有效地抑制住松突圆蚧的发生。1986年国家林业局组织了“中国松树害虫考察团”赴松突圆蚧原产地日本冲绳县进行考察,找到了松突圆蚧的重要天敌—松突圆蚧花角蚜小蜂。该蜂经 Tahikawa 鉴定确认是一新种,定名为 *Coccobius azumai* Tahikawa。松突圆蚧花角蚜小蜂属小蜂总科 Chalcidoidea, 蚜小蜂科 Aphelinidae, *Coccobius* 属。该属的部分种类曾使用过 *Physcus* 的属名,1983年 Hayat 将 *Physcus* 属并入 *Coccobius* 属。该属只有很少几种被作过生物学研究。

1987年以来, Tachikawa(1988)、潘务耀等(1989, 1993)、丁德诚等(1995)、谢国林等(1997)、古德祥和陈永革(1998)、陈永革和古德祥(1998)对从日本引进的松突圆蚧花角蚜小蜂的生物学特性及其控制松突圆蚧的作用等方面进行研究,内容包括花角蚜小蜂的形态、生物学特征和花角蚜小蜂对松突圆蚧的寄生作用等。结果表明,花角蚜小蜂具有寄主专一、搜索能力强、对寄主兼有寄生和捕食的双重作用。到1989年底,该蜂已在我国广东省受松突圆蚧危害的马尾松林内定居。采取林间小片自然繁蜂、地面人工挂放和飞机撒放寄主枝条方法助迁花角蚜小蜂,1989年建立 106hm² 种蜂基地后,到1993年,累计放蜂总面积 73.83 万公顷,占当时疫区面积的 80%左右,寄生蜂的定居率在 97.8%~100%之间,雌蚧被寄生率达 40%~50%,有效地控制了灾情,被害松林恢复了生机。现把引进花角蚜小蜂控制松突圆蚧技术研究情况介绍如下。

一、花角蚜小蜂的形态特征

(一) 成虫

雌蜂(图 11-5): 体长 0.7~1.1mm, 头、前胸、中胸背板黑褐色,小盾片淡褐色。腹部褐色或暗褐色,两侧黑色。触角柄节下半部、第 1 索节、棒节暗褐色,其余部分为黄白色。复眼暗紫红色。足淡黄色。翅透明无色。头横宽。复眼光裸。触角 7 节,着生于颜面下部,柄节长约 4 倍于宽,约与棒节等长,梗节三角形,长约 1.5 倍于端宽,索节 3 节,自第 1 到第 3 索节略膨大,每一索节与梗节在长度上几乎相等,棒节 2 节,整个棒节的长度稍短于索节。前胸背板两侧各着生有一长刚毛,中胸盾片中叶带有横的网纹,具较多刚毛,小盾片有纵的网纹,具 6 根刚毛和一对明显的圆形凹陷。前翅长约为宽的 2.6 倍,上遍布翅毛,亚缘脉稍短于缘脉,缘脉上具 14 根或更多的刚毛,刚毛长度超过缘脉的宽度,最长缘毛位于翅后缘端部。跗节 5 节,中足胫节的距与其跗节等长。



图 11-5 花角蚜小蜂雌成虫(陈沐荣 供)

腹部盾圆形，腹部第 7+8 节背面两侧各有一圆形须板，其上分别着生 3 根长须，须长为腹部长度的 1/3，产卵器从腹部的第 3 节延伸至腹端，稍突出。

雄蜂：体长 0.6~0.8mm。体黑色。形态与雌蜂相似，但触角均为暗褐色，腹部为黑褐色。触角 8 节，柄节基部有一类似于感觉器的突起，梗节三角形，长宽几乎相等，鞭节由索节和棒节组成，每节间很少有区别。前翅长约是宽的 2.2 倍。

(二) 卵

乳白色半透明。雌性卵为典型的膜翅目昆虫型，卵长约 207 μm ，大端宽 49 μm ，小端宽 30 μm 。雄性卵为长卵形，稍短于雌性卵，在卵的前端附有一软的袖状突起。

(三) 幼虫

乳白色。低龄雌性幼虫有一相对长的头部和 13 节界限不太分明的体节，身体向腹面弯曲，尾端尖，气门不明显。雄性低龄幼虫头部较短，身体分节较明显，尾端钝圆，有 4 对气门。老熟的幼虫雌雄性均为典型的小蜂型，体节 13 节，分节明显，从第 2 到第 10 体节两侧各有一对气门。

(四) 蛹

黑色。裸蛹。表皮较坚硬。头顶向前稍突出，附肢紧贴蛹体，腹部背片一直延伸到腹面。雄性蛹比雌性蛹小，触角等附肢较长，腹部背片包裹腹面的程度较轻。

二、生物学特性

(一) 寄主

松突圆蚧花角蚜小蜂雌雄虫的寄主不同。雌虫为内寄生蜂，以松突圆蚧的雌性成蚧作为寄主。在不同发育阶段的雌性成蚧中，雌蜂更喜爱寄生产卵初期和盛期的雌蚧，其次为孕卵期和卵巢发育期的雌蚧，卵巢尚未发育的早期雌蚧很少被寄生。雄虫则是营体外寄生的重寄生蜂，以松突圆蚧雌性僵蚧体内的同种或它种寄生蜂的老熟幼虫、预蛹和蛹作为寄主。

(二) 发育历期和世代数

松突圆蚧花角蚜小蜂雄性的发育历期较雌性为短。在平均气温 22.8 $^{\circ}\text{C}$ 时，雌性蜂发育 1 代的历期约为 35d，雄性蜂为 30d。在平均气温 27.5 $^{\circ}\text{C}$ 时，雌雄性蜂的发育历期分别为 25d 和 22d 左右。在 21 $^{\circ}\text{C}$ 、24 $^{\circ}\text{C}$ 、27 $^{\circ}\text{C}$ 和 30 $^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下，雌性蜂从卵到成虫的整个发育历期分别为 41.2d、32.6d、25.6d 和 23.0d。其中卵的发育历期分别为 4.2d、3.1d、2.5d 和 2.0d，幼虫期(包括预蛹期)分别为 17.9d、15.1d、13.0d 和 11.7d，蛹期分别为 19.2d、14.3d、10.0d 和 8.6d。在 33 $^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下雌性蜂的发育历期与 30 $^{\circ}\text{C}$ 时的相接近，未见有明显缩短，这表明高温可能对松突圆蚧花角蚜小蜂的发育不利。

经测定，松突圆蚧花角蚜小蜂雌性蜂的发育起点温度为 10.1 $^{\circ}\text{C}$ ，有效积温为 448.3DD。卵、幼虫和蛹的发育起点温度和有效积温分别为 12.9 $^{\circ}\text{C}$ 、4.1 $^{\circ}\text{C}$ 、14.3 $^{\circ}\text{C}$ 和

34.6DD、300.8DD、133.1DD。松突圆蚧花角蚜小蜂年发生代数因地区而不同。在广东省的紫金地区该蜂1年发生9代，惠东地区1年9~10代，阳江地区1年10代。松突圆蚧花角蚜小蜂在林间主要以蛹态越冬，但其他各个虫态亦均可发现。

(三) 羽化

初羽化的成虫先在介壳内静伏一段时间，然后再咬破介壳钻出。松突圆蚧花角蚜小蜂的羽化孔为圆形，边缘不太整齐，孔的直径为0.32mm。成虫破壳外出的时间以上午7:00~8:00时最多，其次是9:00~10:00时。

(四) 性比

原产地的自然性比：1989年从日本冲绳县分春(5~6月)、秋(9~10月)两季引进蜂种材料共计7批，春季3批材料共羽化出松突圆蚧花角蚜小蜂2662头，其中雌性占85%。秋季4批材料共羽化出蜂745头，其中雌性占75%。

放蜂区的性比：在放蜂一年后对广东省惠东县稔山林区1989年1号放蜂点的调查表明，距放蜂点10m、50m和90m处的雌性比分别为75.9%、77.2%和86.7%，与原产地日本的自然性比相接近，但在距放蜂点130m的扩散边缘区的雌性比则明显高于自然性比，为94.7%。

(五) 成虫寿命

观察结果表明，性别、气温、食物和成虫期的活动对松突圆蚧花角蚜小蜂成虫的寿命均有明显影响，其中尤以糖类食物的影响最大。

(六) 交配和产卵

交配：松突圆蚧花角蚜小蜂雌雄蜂羽化不久即能交配。雄蜂一生能进行多次交配，但雌蜂通常只交配一次。交配过的雌蜂可产雌性(受精)和雄性(未受精)两种卵，但未交配的雌蜂仅产雄性(未受精)卵。

产卵：雌蜂产卵时首先用触角对寄主进行敲打检查，在找到初步合适的寄主后，才插入产卵管作进一步探查。如该雌蚧适宜寄生，雌蜂即将产卵管稍稍拔起，然后有节奏地收缩腹部进行产卵。反之，雌蜂就立即拔出产卵管，另外寻找其他合适的寄主寄生。当雌蜂将产卵管刺入后，发现蚧壳下是已被寄生的僵蚧时，就用产卵管反复刺探，以寻找产雄性卵的适宜位置。雌蜂不仅能寄生暴露的雌蚧，而且对隐藏在叶鞘下或松针间的寄主亦能寄生。

在19.7~30.9℃的变温条件下，采用单蜂饲养和逐日更换解剖寄主方法，结果表明：每头雌蜂的平均产卵量为 14.8 ± 1.7 粒。在观察产卵量的同时，对71头羽化1~2d的雌蜂的怀卵量进行了解剖检查，结果表明，雌蜂的平均怀卵量分别为 14.1 ± 0.4 粒，与平均产卵量基本吻合。

(七) 对已寄生寄主的辨别能力

松突圆蚧花角蚜小蜂为单寄生种类。1头雌蚧只能发育出1头蜂。通常雌蜂产卵都是1蚧1卵,但亦观察到有1蚧2~3卵的现象,这就提出了该蜂是否能辨别已寄生寄主的问题。实验结果表明松突圆蚧花角蚜小蜂对已寄生寄主具有明显的辨别能力。当将未寄生过的寄主和已有寄生卵的寄主同时提供给雌蜂寄生时,雌蜂主要选择未寄生过的寄主产卵,在未寄生寄主的寄生率达36.5%时,对已寄生寄主的过寄生率仅为8.1%。雌蜂对已有寄生幼虫的寄主具有更强的辨别能力,在未寄生寄主的寄生率已达31.4%时,仍未见雌蜂在这些已被寄生的寄主中产卵。

总的看来,松突圆蚧花角蚜小蜂具有不少优良的生物学特性,主要表现在:①雌蜂选择松突圆蚧雌蚧作为寄主,寄主专化性强,迄今还未曾发现它在其他种蚧虫上寄生;②该蜂具有很强的搜索寄主的能力,不但能寄生暴露的雌蚧,而且对隐藏在松针叶鞘内的雌蚧亦能寄生;③除寄生外,雌蜂还取食雌蚧,从而进一步增强了该蜂对松突圆蚧的歼灭能力;④该蜂对已寄生过的寄主具有明显的识别能力,从而保证了该蜂最大寄生效能的发挥;⑤发育历期短,世代数多,该蜂在广东地区1年发生的世代数是松突圆蚧年发生世代数的两倍,这大大提高了该蜂对松突圆蚧的控制效能。

三、花角蚜小蜂种蜂的输引、检疫及室内繁殖

从日本输引花角蚜小蜂时,选取松突圆蚧密度大、花角蚜小蜂寄生率高的琉球松小枝条及针叶,剪去没有寄主的枝段和嫩梢,用绢纱袋套装后,放入塑料盒或纸箱(留有通气孔),随身携带、邮寄或航空货运。

在隔离养虫室内,将种蜂材料放入木制收蜂箱(50cm×50cm×80cm,四周用黑布围住,顶上留有收蜂口),收蜂口用玻璃漏斗扣罩住,漏斗管上套一个合适玻管。利用昆虫的趋光性,使羽化的小蜂通过漏斗进入玻管。每天2~3次换玻管收蜂,并及时将其他昆虫或动物用酒精浸泡杀死,只留花角蚜小蜂。雌雄按4~6:1的比例装入洁净的玻管,每管50~70头,再用15mm×3mm的滤纸条浸10%~20%的蜜糖水后置于玻管内壁,供小蜂补充营养,用棉花球封好瓶口,放入不透光的纸盒内,置于阴凉背光处,保存备用。收集完目标蜂的寄主材料、包装物和收蜂用具等,按检疫要求进行熏蒸或焚毁。

2~3年生的盆栽松苗接上松突圆蚧,雌蚧出现后接蜂;或采集林间松突圆蚧密度大的松枝,在室内水培保鲜;或直接利用林间有松突圆蚧的枝条,套上绢纱后接蜂,15~20d后,将枝条取回,室内收蜂。

四、花角蚜小蜂林间繁蜂与助迁

(一) 花角蚜小蜂的林间繁殖

选择7~10年树龄枝繁叶茂,冠幅大,松突圆蚧种群处于上升时期,每束松针的活雌蚧数在1头以上,地势较平坦,交通方便的松林作为林间繁蜂地。每100m距离设1个放蜂点,每点放蜂3~4玻管(每管50头左右),在晴天将玻管绑扎在松树下层松突圆蚧较多的枝条上,轻轻拨出棉花塞,让小蜂飞出。放蜂10d左右,以同样的方法在同一放蜂

位置上再放蜂一次。繁殖 1 年后, 全林平均寄生率达 35% 以上, 即可作为采集蜂种用。

(二) 花角蚜小蜂的助迁放蜂

(1) 人工挂枝助迁。在 3 月下旬~6 月上旬, 松突圆蚧雌蚧种群数量高峰期, 当花角蚜小蜂大部分进入蛹期或老熟幼虫期时, 将繁蜂地松树的下部松枝剪下, 选取蚧虫和小蜂密集的枝条, 捆扎成 2~3kg(有蜂 150 头以上)一把, 装入透气的布袋中, 及时运往放蜂区, 2~3d 内挂放到林间。在放蜂区每 600m 距离设一放蜂点, 将上述捆扎成束的种蜂枝条, 绑挂在放蜂树的下部枝条上。

(2) 航空撒枝助迁。采用“运五”型飞机, 作业航速为 180km/h, 航带宽 600m, 作业区四角设白旗各一面作信号。按每 33hm² 设一投放点, 即机上放蜂操作人员每隔 13s 从舱门投出一束种蜂枝条(地面人员及时观察, 纠正投放准确度), “运五”每架次撒放种蜂枝条 200 束, 放蜂控制面积 6700hm²。助迁放蜂 3 个月后, 调查花角蚜小蜂的放蜂成功率和雌蚧的寄生率。

五、花角蚜小蜂对松突圆蚧的控制效能及其稳定作用的评估

为探明松突圆蚧的种群动态和松突圆蚧花角蚜小蜂的寄生效能, 对不同时间放蜂的放蜂区和对照区进行调查, 结果如下。

(一) 花角蚜小蜂扩散速度

花角蚜小蜂一经在林间定居后即迅速增殖, 并不断向四周呈辐射状扩散。花角蚜小蜂引入定居 3 年时增大扩散速率的趋向, 除因种蜂来源、释放时间和放蜂量等因素影响外, 似乎主要与释放蜂种的驯化程度逐步提高, 以及适应广东沿海马尾松林生态环境有关。

花角蚜小蜂的扩散速度受寄主密度的制约非常明显。寄主密度在制约花角蚜小蜂种群数量增殖的同时, 必然影响其自身向外扩散的速度。在寄主密度低, 且分布不均匀的松突圆蚧疫区边缘, 初步结果显示花角蚜小蜂的扩散速度基本上能与松突圆蚧保持同步。

(二) 寄生率和寄主密度

寄生率和寄主密度是天敌和害虫之间对立过程和相互作用结果的两项最重要的指标。对 1989 年放蜂试验区的寄生率和雌蚧密度作了 5 年的系统调查, 结果表明花角蚜小蜂在广东释放 2 年后的寄生率已接近或稍高于日本冲绳 22.8% 的平均寄生率, 雌蚧密度还低于日本冲绳 0.85 头/针束的水平, 充分说明花角蚜小蜂对广东马尾松上的松突圆蚧具有同样高的控制效能。

对不同时间放蜂的放蜂区和对照区进行调查, 在对照区, 1989 年、1990 年和 1991 年的放蜂区分别组建 6 组共 24 个松突圆蚧自然种群生命表, 用相关回归分析法对生命表进行分析。结果表明: 放蜂区松突圆蚧种群数量变动的关键因子是花角蚜小蜂的寄生; 而对照区种群数量变动的关键因子则是雌成蚧的被捕食。对松突圆蚧危害时间和放蜂时间长短各异的 4 个样区, 调查松突圆蚧和天敌的种群密度, 运用相关的数学模型, 拟合

得出了各调查区的松突圆蚧和松突圆蚧花角蚜小蜂种群的平衡密度,认为当松突圆蚧种群的平衡密度保持在 0.5 头雌成蚧/松针左右的低水平时,既不妨碍松枝生长,又对花角蚜小蜂种群的维持起到相当的作用。

(三) 松突圆蚧虫口下降率

松突圆蚧的数量变动除了花角蚜小蜂的作用外,还受其他因子影响。其中以松突圆蚧种群季节性增减的影响尤为明显,高峰期(4~6月)和低谷期(8~12月)可相差数倍乃至数十倍之多;另外花角蚜小蜂的追随时滞特性,也影响了寄生率和雌蚧密度之间因果关系的判定。选择对放蜂区和同期对照区连续抽样调查统计方法,分别计算 1989 年和 1990 年放蜂区的 3 年雌蚧虫口密度下降率,所得结果为:第 1 年下降 50%~60%,第 2 年 80%~85%,第 3 年达 90%左右,放蜂区每针束平均雌蚧密度比对照区降低 6~10 倍,显示出很高的防治效果。

(四) 林间小蜂种群组成对花角蚜小蜂稳定作用的影响

广东松突圆蚧疫区内最常见的本地小蜂主要有恩蚜小蜂属 2 种、黄蚜小蜂属 2 种和瘦柄花翅蚜小蜂 1 种。恩蚜小蜂属和黄蚜小蜂属的小蜂为初级寄生蜂,寄生松突圆蚧 2 龄若虫、雄蚧和雌成虫;瘦柄花翅蚜小蜂则为次级寄生蜂,寄生于恩蚜小蜂属和黄蚜小蜂属小蜂,营重寄生,因此当花角蚜小蜂引入疫区定居增殖后,必将对林间这些小蜂的种群结构产生影响;反之,这些小蜂也会影响花角蚜小蜂种群的建立和数量的稳定。1991 年 10 月~1993 年 2 月分别在惠东县的调查结果表明:

(1) 花角蚜小蜂引入前,恩蚜小蜂属小蜂在数量上占绝对优势,它们占各类小蜂总数的比率平均达 81.1%;引入花角蚜小蜂后,恩蚜小蜂属优势种地位被花角蚜小蜂取代,1 年、2 年和 3 年后放蜂区花角蚜小蜂的比率分别为 73.0%、72.5%和 60.5%,恩蚜小蜂属小蜂的比率则降 11.2%~20.0%。从绝对值来看,恩蚜小蜂属小蜂在引入花角蚜小蜂之后,其数量几乎下降 2/3,这可能是花角蚜小蜂引入后食源竞争和产雄重寄生造成的结果。

(2) 其他常见的黄蚜小蜂属小蜂、瘦柄花翅蚜小蜂及其他小蜂在放蜂区和未放蜂区的绝对值和比率均无显著差异。其中作为重寄生蜂的瘦柄花翅蚜小蜂的数量始终很少,1 年、2 年和 3 年放蜂区的比率只占 4.1%、3.0%和 2.0%,与未放蜂区的 3.0%比率相近,没有因引入花角蚜小蜂及随着引入时间增长而增大其比率,也未发现对花角蚜小蜂产生明显的数量抑制。

(3) 引入花角蚜小蜂后的第 1 年和第 2 年,林间花角蚜小蜂种群数数有明显增加,与未放蜂区相比,分别增长 49.6%~93.7%,这是由于大量松突圆蚧寄主存在,导致花角蚜小蜂种群迅速增殖的缘故;第 3 年松突圆蚧虫口急剧下降到最低水平后,林间花角蚜小蜂数量也随之下降,几乎比上一年下降了 1/3;之后松突圆蚧密度开始适度回升,花角蚜小蜂寄生率则随之逐步提高,呈现了一种相互制约的波动状态。

(4) 各种小蜂全年数量变动显示,花角蚜小蜂羽化高峰期分别出现在 4 月、6 月、8 月和 10 月,加上不明显的 3 月越冬代高峰期,先后共有 5 次,与寄主松突圆蚧 1 年发生

5 代相吻合,反映它们之间存在紧密的追随时滞关系。恩蚜小蜂属小蜂一般春季数量较多,6 月份以后则大为减少。黄蚜小蜂属小蜂和瘦柄花翅蚜小蜂全年数量都不大,且分散,形成不了高峰期。

经 5 年系统研究表明:花角蚜小蜂 1989 年在惠东县首批释放定居成功以来,花角蚜小蜂释放 1 年后,在中心区 50m 以内最高寄生率达 55.8%~64.2%,雌蚧密度由每针束 3.1 头下降为 0.6 头;2 年后控制松突圆蚧的有效半径增至 300m 左右,寄生率稳定在 20.8%~32.9%,每针束雌蚧密度保持在 0.6 头左右,二者处于低密度的平衡状态。未放蜂对照区的雌蚧密度则由每针束 3.4 头上升到 4.2 头,高出放蜂区 5~10 倍。瘦柄花翅蚜小蜂在花角蚜小蜂释放区内的重寄生率仅为 3.1%~5.3%,对花角蚜小蜂的控制效能没有影响。

六、花角蚜小蜂防治松突圆蚧的效果

在广东惠东县稔山松林的第 1 个放蜂点,经过几年的跟踪调查,发现松突圆蚧的虫口密度不断下降。放蜂后的第 1 年,雌蚧密度比对照区下降 50%~60%,到第 2 年比对照下降 80%,到第 3 年比对照下降 90%以上。放蜂 2~3 年后,每束松针的活雌蚧数比对照区减少 62.8%~91.8%,达到日本冲绳的雌蚧水平,甚至更低。放蜂两年后的雌蚧寄生率与冲绳的(22.8%)相近。

截至 1991 年止,经过人工助迁,已在广东省 19 个县市放蜂,释放点 2100 个,面积达 2.8 万公顷。调查结果表明,各放蜂点放蜂后半年,10m 内的平均寄生率为 27.5%(最高 39%,最低 12%),50m 内的平均寄生率为 17.7%(最高 33.1%,最低 7.9%)。除中山市蚧虫密度较低,放蜂成功率较低外,其余各地的成功率均在 80%以上,平均为 93.4%。

在广东某些地区,山高林密,交通不便,人工助迁较困难,这些地区可采用飞机撒枝条助迁的方法。1992 年 5 月中旬,在广东惠东、博罗、东莞等地进行了飞机撒枝助迁的试验,共作业飞行 6 架次,防治面积 4.0 万公顷,比地面人工挂枝助迁速度快,成本低。

1989 年引进花角蚜小蜂后,建立了林间蜂种基地 106hm²。1991 年放蜂防治松突圆蚧的面积达 2.8 万公顷,1992 年达 25.3 万公顷,1993 年增至 60.0 万公顷。到 1996 年,花角蚜小蜂通过助迁和本身的扩散,基本覆盖整个松突圆蚧发生区。

国家林业局《关于广东省利用生物防治技术成功控制松突圆蚧危害的情况通报》[1992]79 号指出:广东省的实践表明,生物防治是防治森林病虫害的一种经济、有效和安全、简便的好方法,是我国森林病虫害防治的方向。引进日本花角蚜小蜂防治松突圆蚧是我国生物防治又一成功例子,是广大科技人员组织联合攻关的成果,是生物防治技术的重大突破。

七、问题与讨论

(一) 花角蚜小蜂控制松突圆蚧的稳定性问题

观察和研究结果表明,花角蚜小蜂除具备优良的生物学特性外,在生态适应能力,

包括对寄主的紧密追随关系、聚集攻击效应、种间竞争优势和数量稳定水平等方面，均显示出该蜂对松突圆蚧有很强的控制作用。花角蚜小蜂的引进成功，是天敌和寄主害虫在诸多环境因素作用下种群动态变化的结果，随着外界环境的不断变化，二者种群数量的相对平衡是暂时的，不稳定的波动是绝对的，而以这种长期波动的上限和下限的平均作为评估防治效果的最后结论，尚待作较长时间的考核。

(二) 重寄生问题

从传统生物防治观点看，引进天敌是不能允许有重寄生的，因此通常在引进天敌过程中都严格制止重寄生者的侵入。广东松突圆蚧疫区内出现的重寄生者瘦柄花翅蚜小蜂，并不是随花角蚜小蜂引入的，而是分布广泛的本地种。这种重寄生蜂在花角蚜小蜂引入区的比率和绝对值，与未引入区一样都很小。瘦柄花翅蚜小蜂与花角蚜小蜂一样，均属单寄生种类，其重寄生率如果都以花角蚜小蜂为寄主来推算，也只有 3.1%~5.3%，远低于 Neuenschwander 和 Hammond(1988)根据 Benntt 提出的重寄生率超过 20%才影响生物防治效果的界限，不会对花角蚜小蜂形成明显的数量抑制而影响其控制效能。

在松突圆蚧花角蚜小蜂中所观察到的与性别相联系的重寄生现象在蚜小蜂科的其他一些种类上亦同样被观察到，以这方式繁殖的大多数蚜小蜂种类常会发生雄虫重寄生在雌虫体上的自寄生情况，从而使自己的繁殖潜能受到某种程度的损失。在松突圆蚧花角蚜小蜂中也存在着一个对自寄生数量自我抑制的机制，由于雌蜂产雌性卵时仅选择雌性老熟幼虫、预蛹和初蛹作为寄主，而这 3 个阶段的发育时间均很短，总起来只占雌性蜂整个发育历期的 1/4 左右，因而在通常发育不整齐的情况下，适宜雄性蜂重寄生的雌性个体始终是少数，真正能被雄蜂找到的则更少，因此自寄生数量始终被抑制在一较低的水平。通过调查，证实松突圆蚧花角蚜小蜂自然雄性比通常不超过 25%，这为上述分析提供了有力的支持。另外，自寄生数量还受控于以下两个条件，一个是寄主的丰富程度，在寄主缺乏时，寄生蜂与寄主的比率上升，导致更多的自寄生，从而造成该蜂的雌性比的下降和种群数量的减少。反之，在寄主数量充足时，因适宜产雌性卵的未寄生的寄主很容易获得，交配过的雌蜂通常将产较多雌性卵，再加上在寄主数量充足的情况下遇到已寄生寄主的机会亦相对减少，致使自寄生数量明显下降，在这种情况下，寄生蜂的雌性比将上升，同时繁殖力增加。因此存在于蚜小蜂中的与性别相联系的重寄生现象构成了一种自我操纵的种群数量调节机制，它进一步强化了寄主数量对寄生蜂数量的影响。在松突圆蚧花角蚜小蜂放蜂 1 年后的调查中所观察到的随着蜂的扩散，自放蜂株向外，寄主与寄生蜂的比率逐渐增大，蜂的雌性比也逐渐增高的现象为上述观点提供了证据。减少自寄生数量的另一个条件是可被雄性后代寄生的其他膜翅目昆虫的存在，当雄虫以其他种类为寄主时，自寄生数量亦将减少。Williams 在蚜小蜂中还观察到，具有与性别相联系的重寄生现象的蚜小蜂通过雄性子代对其他寄生蜂的重寄生，使它在与其他初级内寄生蜂的竞争上占有优势，并能削弱专性重寄生蜂的不利作用。因此，雄性子蜂的重寄生现象对整个松突圆蚧花角蚜小蜂种群来说，虽因自寄生使自己的繁殖能力受到某种程度的损失，但在自我调节种群数量和与其他蜂的种间竞争上，则显示出更明显的利益。

(三) 寄生率与寄主密度问题

Viggiani(1984)认为, 蚜小蜂科一些种类的摄食行为对寄主密度有很大的抑制作用, 因此在评价其防治效果时, 不能仅以寄生率高低来衡量, 还应加入摄食寄主的效果。对花角蚜小蜂生物学研究的结果和对该蜂控制效能的调查, 也同样证实了这一点。在放蜂1年最高寄生率达60%左右的条件下, 2年后即可把雌蚧密度降低到1头/针束以下, 其中就包括花角蚜小蜂摄食致死的作用在内。对呈平衡状态的2年放蜂区和对照区进行了雌蚧死亡率调查, 结果前者雌蚧死亡率比后者高出近一倍, 这与花角蚜小蜂生物学实验观察中所得的摄食作用可提高40%左右的歼灭效果是一致的。

(四) 松林天敌种群组成的变化问题

花角蚜小蜂引入以后, 林间原有天敌种群组成的最大变化是恩蚜小蜂属小蜂数量急剧下降, 其寄生率比未放蜂区相应减低一倍, 这对广东沿海马尾松林整个昆虫区系有何影响, 尚待今后进一步作详细的观察和研究。

(五) 花角蚜小蜂扩散距离问题

花角蚜小蜂年平均扩散距离200~300m, 为放蜂1年后的调查数据, 第2年因各释放点相互连接并覆盖全林, 无法确切统计它的扩散范围。生产上据此按间隔500~600m设置的放蜂点, 2年后即能抑制松突圆蚧危害, 说明此蜂年控制有效距离为150m。

(六) 环境问题

松突圆蚧疫区的马尾松林, 以生物防治使灾情得到基本控制, 林木恢复正常生长的時候, 往往发生松毛虫的危害, 使用敌杀死、灭杀毙等化学农药防治松毛虫的同时, 亦会大量杀伤花角蚜小蜂。为了保护花角蚜小蜂, 宜考虑使用灭幼脲一类的仿生农药, 或使用生物农药(如白僵菌、松毛虫质型多角体病毒等)。

(七) 影响防治效果的因素及对策

个别地方放蜂定居率不高, 需重复放蜂, 其主要原因是放蜂区虫口密度低、分布不均匀、没有将种蜂挂放在蚧虫虫口较大的放蜂树; 有些地方种蜂运达后不及时挂放, 影响种蜂质量; 也有小部分由于种蜂枝条含蜂量少而使放蜂效果差。主要对策是做好种蜂繁育、把好种蜂采集质量关, 加强放蜂技术管理等。

松突圆蚧自然扩散速度较花角蚜小蜂快, 有些地方松突圆蚧出现跳跃式的扩散, 使花角蚜小蜂在疫区边缘难以跟随。因此每年需要在松突圆蚧新扩散区进行人工放蜂助迁。

有些地方松突圆蚧入侵时间长, 已造成松林的严重危害才进行放蜂防治, 小蜂未能及时发挥应有的效能, 其放蜂效果不够理想; 有些边远山区仍有漏放蜂现象。因此必须加强松突圆蚧发生情况的调查监测工作, 一旦发现虫情便及时放蜂。

第十节 风险分析与早期预警

为加强该虫的管理, 有效地控制其危害和防止在我国进一步扩散蔓延, 现从国内分布状况、寄主植物的经济重要性、潜在的经济危害性、传播扩散的可能性与控制难度等 5 个方面对松突圆蚧进行风险分析。

(1) 国内分布状况 松突圆蚧在我国已广泛分布于广东省、福建等地, 目前还在继续蔓延扩散。其中, 2002 年松突圆蚧已扩散蔓延至广东省的 17 个市、58 个县级行政区, 有虫面积 111.58 万公顷, 发生面积 31.88 万公顷, 其中轻度发生面积 16.05 万公顷、中度 10.82 万公顷、重度 5.09 万公顷, 而受害枯死或濒死已更新改造的达 18 万公顷。

(2) 寄主植物的经济重要性 松属树种是我国重要的用材林、生态公益林、风景林的造林树种, 马尾松是我国南方荒山造林绿化不可替代的先锋树种, 在我国分布广, 栽培历史久, 仅我国长江以南的马尾松造林面积就达 3300 万公顷。松属树种也是我国人造板、造纸、林产化工等林产工业的最主要原料, 具有重要的经济、社会和生态效益。然而, 松突圆蚧广泛危害松属树种, 林间种植马尾松、光松、南亚松、本种加勒比松、洪都拉斯加勒比松、火炬松和裂果沙松都可能遭受松突圆蚧的严重危害, 松突圆蚧已对马尾松等松属树种造成严重的危害, 并直接影响木材、松脂的生产。

(3) 潜在的经济危害性 根据松突圆蚧的生物学、生态学特性, 特别是各虫期发育起点温度与有效积温的计算分析, 该虫有可能进一步蔓延到粤北和湖南、江西的南部危害。而这些地方也是马尾松的分布区、纯林比例大, 蔓延扩散也会很快。

(4) 传播扩散的可能性 松突圆蚧自然传播主要是初孵若虫随气流向外扩散, 扩散速度快, 为非疫区的防范带来困难; 而该虫的人为传播主要是随疫区松属植物的苗木、接穗、球果、原木等传播, 由于各地区之间苗木调运频繁、旅游业的兴起以及物流量的加大, 使得人为的被动传播可能性加大。总的来说, 该虫发生的危险性高。

(5) 控制难度 松突圆蚧的监测预警研究不多, 林间监测主要靠定期取样解剖。由于扩散渠道多, 疫区内繁殖材料的控制较困难。在松突圆蚧的持续控制策略上, 研究较多, 从引进天敌昆虫角度出发, 已经取得了重大的进展, 花角蚜小蜂曾发挥重要作用, 但种源一度也出现危机, 常规农药起到了一定的作用, 但大面积应用效果不理想, 而且可能造成大范围的环境污染, 本地寄生性天敌昆虫的开发利用正在进行中。从控制角度上讲, 该虫控制难度大, 其对各地区的危险性依然很大。

综上所述, 松突圆蚧的蔓延和危害给广东省等疫区造成极大的经济损失, 对广东等省的松林资源、生态环境、自然景观、外贸出口和社会经济发展产生灾难性的后果, 直接威胁到我国南方松林及重点生态区的安全, 但其蔓延、扩散、危害的潜在威胁依然存在, 控制技术的研究任重道远。

第十一节 预防和控制技术

一、控制策略

松突圆蚧入侵我国大陆,已成为我国的森林重大生物灾害之一,究其原因,一方面是外来害虫找到适生地,本地天敌未能及时发挥作用;另一方面是我国南方大部分地方在植树造林工作中,没有遵循森林生态学的基本原则,过度强调了某些树种的优势,过多营造单一树种的纯林,给病虫害的泛滥提供了有利环境。对病虫害的控制,最根本的是提高森林本身的自我调控能力。对于松突圆蚧的控制,应切实贯彻“预防为主,综合治理”的治虫方针,根据其发生特点和危害情况,采取治标与治本并举的原则,在做好测报工作的基础上,应立足开发和利用天敌昆虫,综合采取营林、化学等措施控制松突圆蚧的蔓延和危害。

二、预防和控制技术

(一) 松突圆蚧的预防

在准确掌握疫情的基础上,分非疫区和疫区两种类型,采取相应的预防措施。

(1) 松突圆蚧非疫区 针对我国南方松林已发生和可能发生的松材线虫病、松针褐斑病、马尾松毛虫、松突圆蚧、松褐天牛、萧氏松茎象、小蠹虫等病虫害,结合生态公益林、生态景观林建设,综合规划造林和林分改造,已期尽早使林分在人工辅助下向接近自然的森林植被发展。同时,严格控制可能染疫的材料的传入。

(2) 松突圆蚧疫区 加强检疫措施,对松突圆蚧发生区的马尾松、湿地松、加勒比松等松属树种的枝桠、松针和球果,应禁止外运,就地作为薪炭材使用、处理。对发生区内的松类苗木、盆景、圣诞树等特殊用苗,一般不能调运出发生区,确需调运时,要经过严格检验,确保不带松突圆蚧,并要采用溴甲烷进行熏蒸处理,用药量 $20\sim 30\text{g}/\text{m}^3$,熏蒸24h。调入方要经过隔离试种、观察6个月以上,确认不带松突圆蚧后才能分散种植。

(二) 松突圆蚧的控制

(1) 营林措施 切实贯彻执行以营林措施为基础的治本方针,按适地适树的原则选择树种,集约经营,使之尽快成林。对现有松林,亦应加强抚育管理,增强马尾松的抗虫能力,达到持续控制的效果。保护林下植被,补植蜜源植物,创造适宜于天敌昆虫生存繁殖的生态环境。

(2) 化学措施 对于集约经营的商品林和幼苗,必要时,选用高效低毒的化学药剂进行防治。现在常用的松脂柴油乳剂对松突圆蚧进行防治是有一定效果的(潘秀耀等,1987)。利用飞机喷药时,可在10~11月间进行。如地面喷雾,宜在4~5月份进行,因在此时期,为蚧虫繁殖的高峰期,故杀虫效果好,对抑制松突圆蚧的扩散蔓延作用较大。

(3) 生物措施 继续利用花角蚜小蜂控制松突圆蚧,在新疫区全面释放花角蚜小蜂控

制松突圆蚧, 在老疫区充分发挥花角蚜小蜂和本地天敌的作用。

第十二节 应用与基础研究发展策略

松突圆蚧传入我国大陆 20 多年来, 一直在蔓延扩展, 新疫区的马尾松林也一直未能避免松突圆蚧的危害, 而在松突圆蚧的防治上, 除花角蚜小蜂外, 还未有能用于大面积控制松突圆蚧的措施, 而在我国大陆松突圆蚧疫区, 松突圆蚧、天敌昆虫(含花角蚜小蜂和本地天敌)、松树三者已有了较长时间的相互适应过程, 并表现出一些规律性的关系, 因此, 应深入调查总结, 继续深入开展松突圆蚧控制的应用与基础研究。

松突圆蚧扩散的范围仍在预测的范围内, 主要的危害对象仍是马尾松, 在新疫区仍然造成明显的危害症状, 但在老疫区相对有所减轻, 马尾松的耐害性和本地天敌所起的作用可能是主要因素; 另外, 从日本引进的花角蚜小蜂曾发挥了重要作用, 但在广东疫区, 其种源也曾出现危机。鉴于这些现象, 需要重新评估松突圆蚧在南方松林的扩散、危害趋势和损失, 评估花角蚜小蜂和本地天敌在控制松突圆蚧上的作用。

对于大面积松突圆蚧的控制, 从现实可行性、防治成本、环境保护和持续控制的角度来看, 首选的控制措施是生物防治, 尤其是已经过实践检验较为有效的花角蚜小蜂。在继续利用花角蚜小蜂控制松突圆蚧方面, 一是要研究花角蚜小蜂在新老疫区的生态适应性; 二是研究花角蚜小蜂人工辅助繁殖及种蜂基地建设技术, 力争能实现室内工厂化、规模化繁殖; 三是制定利用花角蚜小蜂控制松突圆蚧的技术规程。与此同时, 充分挖掘本地天敌的潜力, 综合地、持续地控制松突圆蚧的蔓延和危害。

(黄焕华 骆有庆)

主要参考文献

- 陈佩珍, 陈芝卿, 连俊和, 翁锦泗. 1990. 松突圆蚧空间分布型的初步研究. 林业科学研究, (6): 629~632 [Chen P Z, Chen Z Q, Lian J H, Weng J Q. 1990. A preliminary study on the spatial distribution pattern of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Forest Research*, (6): 629-632]
- 陈永革, 古德祥. 1998. 松突圆蚧与松突圆蚧花角蚜小蜂种间关系研究. 昆虫天敌, 20(3): 136~142 [Chen Y G, Gu D X. 1998. The research on interspecific relation between *Hemiberlesia pitysophila* Takagi and *Coccobius azumai* Tahikawa. *Natural Enemies of Insects*, 20(3): 136-142]
- 陈泽藩, 杨肇兴, 徐家雄, 翟才梁, 黄慕娥, 黄永进. 1988. 十五种松树对松突圆蚧抗性的初步研究. 森林病虫通讯, (2): 1~3 [Chen Z P, Yang Sh X, Xu J X, Zhai C L, Huang M E, and Huang Y J. 1988. The preliminary studies on resistance of 15 species of pines to *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Forest Pest and Disease*, (2): 1-3]
- 陈芝卿, 陈佩珍. 1989. 松突圆蚧发生的特点及防治意见. 广东林业科技, (3): 6~7 [Chen Z Q, Chen P Z. 1989. Outbreak characteristic of *Hemiberlesia pitysophila* and some pest control suggestion. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, (3): 6-7]
- 丁德诚, 潘务耀, 唐于颖, 谢国林, 连俊和. 1995. 松突圆蚧花角蚜小蜂的生物学. 昆虫学报, 38(1): 46~53 [Ding D C, Pan W Y, Tang Y Y, Xie G L, Lian J H. 1995. Biology of *Coccobius azumai* Tachikawa (Hymenoptera: Aphelinidae). *Acta Entomologica Sinica*, 38(1): 46-53]
- 古德祥, 陈永革. 1998. 松突圆蚧种群生命表与花角蚜小蜂的寄生作用的研究. 昆虫天敌, 20(4): 156~163 [Gu D X, Chen Y G. 1998. The research of population life table of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi and parasitic effectiveness of *Coccobius azumai* Tahikawa. *Natural Enemies of Insects*, 20(4): 156-163]
- 顾茂彬, 王宝生, 李意德, 杨曾奖. 1990. 松突圆蚧对马尾松危害程度与生态因子关系的研究. 林业科学研究, (6): 562-567 [Gu

- M B, Wang B Sh, Li Y D, Yang Z J. 1990. Relationship between the ecological factors and the damage level of *Pinus massoniana* Lamb. attacked by *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Forest Research*, (6): 562-567.]
- 何国锋. 1995. 广东省两种危险性林木害虫的传入及防治情况. 植物保护. 21(2): 47-48 [He G F. 1995. Invasion and management of two dangerous forest tree pests in Guangdong. *Plant Protection*, 21(2): 47-48]
- 何雪香, 刘清浪. 1992. 受松突圆蚧为害的马尾松松针内含物的分析. 广东林业科技, (1): 10-12 [He X X, Liu Q L. 1992. Analyses on the abstracts from needles of Masson's pine attacked by *Hemiberlesia pitysophila*. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, (1): 10-12]
- 胡焯海. 1992. 松突圆蚧危害与马尾松松酯损失量关系的研究. 广东林业科技, (4): 25-28 [Hu Ch H. 1992. A study on the rosin loss of Masson's pine attacked by *Hemiberlesia pitysophila*. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, (4): 25-28]
- 黄茂俊, 陈芝卿. 1988. 松突圆蚧大发生对马尾松生长影响的调查. 广东林业科技, (3): 5-7 [Huang M J, Chen Zh Q. 1988. Damage of *Hemiberlesia pitysophila* to Masson's pine after an out-break. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, (3): 5-7]
- 梁承丰. 1988. 松突圆蚧天敌研究初报. 林业科技通讯, (6): 20-24 [Liang C F. 1988. A preliminary report about natural enemies of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Forest Science and Technology*, (6): 20-24]
- 梁承丰主编, 余海滨, 蔡卫群, 林育红, 童国建, 黄茂俊, 王忠, 方天松, 刘建锋, 钟填奎, 王卫文, 徐家雄, 黄焕华, 谢诚, 陈荣雄, 李南林. 2003. 中国南方主要林木病虫害测报与防治. 北京: 中国林业出版社
- 梁铭球, 陈振耀. 1990. 松突圆蚧寄生蜂调查初报. 昆虫天敌, 12(1): 1-6 [Liang L Q, Chen Zh Y. 1990. A preliminary report about parasitic wasps of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Natural Enemies of Insects*, 12(1): 1-6]
- 刘清浪, 何雪香, 张欣泉, 朱瑞强, 利锦东. 1990. 松突圆蚧发育起点温和有效积温的测定及应用. 中南林学院学报, 10(2): 149-154 [Liu Q L, He X X, Zhang X Q, Zhu R Q, Li J D. 1990. The base temperature and effective accumulative temperature of development of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Journal of Central South Forestry College*, 10(2): 149-154]
- 刘清浪, 何雪香, 张欣泉, 朱瑞强, 利锦东. 1992. 松突圆蚧向北蔓延可能性的研究. 广东林业科技, (2): 6-14 [Liu Q L, He X X, Zhang X Q, Zhu R Q, Li J D. 1992. The research on the possibility of spreading to north of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Guangdong Forestry Science and Technology*, (2): 6-14]
- 潘务耀, 谢国林, 丁德诚. 1993b. 引进花角蚜小蜂防治松突圆蚧的研究. 林业科学研究, 6(专刊): 1-8 [Pan W Y, Xie G L, Ding D Ch. 1993b. The research on introduction of *Coccobius azumai* Tahikawa to control *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Forest Research*, 6: 1-8]
- 潘务耀, 唐子颖, 陈泽藩, 杨肇兴, 连俊和. 1989a. 松突圆蚧生物学特性及防治的研究. 森林病虫通讯, (1): 1-6 [Pan W Y, Tang Z Y, Chen Z P, Yang Sh X, Lian J H. 1989a. Studies on the bionomics of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi and its control. *Forest Pest and Disease*, (1): 1-6]
- 潘务耀, 唐子颖, 连俊和, 王军. 1987. 松脂柴油乳剂防治松突圆蚧的研究. 森林病虫通讯, (1): 14-17 [Pan W Y, Tang Z Y, Lian J H, Wang J. 1987. Studies on control of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi with resin-diesel emulsion. *Forest Pest and Disease*, (1): 14-17]
- 潘务耀, 唐子颖, 梁承丰, 谢国林, 林建新, 邹德靖. 1989b. 引进日本花角蚜小蜂试验. 林业科技通讯, (7): 21-24 [Pan W Y, Tang Z Y, Liang C F, Xie G L, Lin J X, Zhou D Q. 1989b. Experimental introduction of *Coccobius azumai* Tahikawa from Japan. *Forest Science and Technology*, (7): 21-24]
- 潘务耀, 唐子颖, 谢国林, 连俊和, 丁德诚. 1993a. 松突圆蚧花角蚜小蜂引进和利用的研究. 森林病虫通讯, (1): 15-18 [Pan W Y, Tang Z Y, Xie G L, Lian J H, Ding D Ch. 1993a. Introduction and utilization of *Coccobius azumai* Tahikawa. *Forest Pest and Disease*, (1): 15-18]
- 童国健, 唐子颖, 潘务耀. 1988. 松突圆蚧自然种群数量消长规律的初步研究. 林业科技通讯, (2): 6-11 [Tong G J, Tang Z Y, Pan W Y. 1988. Preliminary studies on the population dynamics of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Forest Science and Technology*, (2): 6-11]
- 伍建芬. 1990. 松突圆蚧形态. 广东林业科技, (6): 3-5 [Wu J F. 1990. Morpha of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Guangdong Forestry Science and Technology*, (6): 3-5]
- 萧刚柔主编. 1992. 中国森林昆虫. 北京: 中国林业出版社 [Xiao G R. 1992. *Forestry insects of China*. Beijing: China Forestry Publishing House]
- 谢国林, 潘务耀, 唐子颖, 丁德诚, 连俊和. 1997. 花角蚜小蜂对松突圆蚧的控制效能及其稳定作用的评估. 昆虫学报, 40(2): 135-144 [Xie G L, Pan W Y, Tang Z Y, Ding D Ch, Lian J H. 1997. The valuation on controlling effectiveness and its stable function of *Coccobius azumai* Tahikawa to *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Acta Entomologica Sinica*, 40(2): 135-144]

- 徐世多, 谢伟忠, 陈纪文, 张景权. 1992. 松突圆蚧传播及控制的研究. 林业科技通讯, (1): 5~8 [Xu Sh D, Xie W Zh, Chen J W, Zhang J Q. 1992. Researches on the spread and control of *Hemiberlesia pitysophila* Takagi. *Forest Science and Technology*, (1): 5-8]
- 殷凤鸣, 叶燕华, 马辉腾. 1996. 蜡蚧轮枝菌防治湿地松粉蚧的技术研究. 林业科技通讯, (5): 15~18 [Yin F M, Ye Y H, Ma H T. 1996. Study on the application of *Venticillium lecanii* on control of *Oracella acuta*. *Forest Science and Technology*, (5): 15-18]
- Neuenschwander P, Hammond W. 1988. Natural enemy activity following the introduction of *Epidinocarsis lopezi* (Hymenoptera: Encyrtidae) against the cassava mealybug, *Phenacoccus manihoti* (Homoptera: Pseudococcidae), in southwestern Nigeria. *Entomology*, 17(5): 894~902
- Tachikawa T. 1988. A new and economically important species of *Coccobius* (Hymenoptera: Aphelinidae) parasitic on *Hemiberlesia pitysophila* takagi (Homoptera: Diaspididae) in Okinawa, Japan. *Trans. Shikoku Ent. Soc.*, 19: 67~71
- Viggiani G. 1984. Bionomics of the Aphelinidae. *Ann. Rev. Entomol.*, (29): 257~276

第十二章 湿地松粉蚧

第一节 分布与起源	333	第五节 生物学、生态学特性	336
第二节 识别特征与早期诊断	333	第六节 风险分析与早期预警	341
第三节 传入途径与入侵成因	335	第七节 预防和控制技术	342
第四节 危害现状与生态经济影响评估	335	第八节 应用与基础研究发展策略	342

摘要 湿地松粉蚧于 1988 年随引种材料由美国佐治亚州传入我国广东省台山市, 1990 年 6 月我国首次在台山市红岭种子园发现该虫的危害, 1992 年被我国列为危险性检疫害虫。20 世纪 30 年代, 美国已有该虫的记录, 80 年代因在种子园和苗圃施用化学农药, 引起该虫短期暴发流行。现在该虫在国内分布于广东、广西、福建, 在国外分布于美国。

湿地松粉蚧在我国的寄主有湿地松、火炬松、加勒比松和马尾松等松属树种, 目前主要危害湿地松。湿地松粉蚧主要寄生在松树的嫩梢, 以若虫和雌成虫刺吸汁液, 部分寄生于嫩枝和新鲜的球果上, 造成新梢及针叶缩短, 不能伸展, 甚至形成丛枝, 老针叶提前枯黄脱落, 严重时会出现枝梢弯曲、萎缩、流脂, 使松树生长量下降, 球果发育不良, 小而弯曲。据广东省森林病虫害防治与检疫总站统计, 截至 2002 年, 广东省有虫面积达 37.7 万公顷, 发生危害面积为 14.0 万公顷。

湿地松粉蚧在广东每年发生 4~5 代, 以 4 代为主, 世代重叠, 以一龄若虫聚集在老针叶的叶鞘内或叶鞘层之间越冬。湿地松粉蚧完成 1 代的发育起点温度为 $7.8 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, 有效积温为 $1042.9 \pm 88.4\text{DD}$ 。湿地松粉蚧入侵后的第 1 年形成一定种群密度, 第 2 年越冬代种群密度最大, 第 3~5 年越冬代种群密度明显下降。通过该虫生命表的组建和分析表明, 温度和寄主是影响虫口数量变动的主要因素, 夏季高温和被害松树营养成分下降是种群数量回落的主要原因, 捕食性天敌对该虫作用不明显。

湿地松粉蚧仍在不断向疫区外围蔓延扩散, 对火炬松种植区及我国东南部的松树产区仍有潜在的威胁。湿地松粉蚧原产地的天敌种类丰富, 7~8 月的寄生率高达 90% 以上。在广东湿地松粉蚧发生区, 已引进和发现的湿地松粉蚧天敌已有十几种, 主要是短索跳小蜂、长索跳小蜂和迪氏跳小蜂, 这些天敌对湿地松粉蚧种群数量增长虽有一定的抑制作用, 但还仍处于试验阶段, 其控制效能有待检验。因此, 应切实加强加强对湿地松粉蚧监测和检疫, 重新评估湿地松粉蚧的危害和损失, 制定新的预防和控制的策略与措施。

关键词 湿地松粉蚧 湿地松 火炬松 短索跳小蜂 长索跳小蜂 迪氏跳小蜂

Chapter 12 Loblolly Pine Mealbug

Oracella acuta (Lobdell) Ferris

Abstract: *Oracella acuta* (Lobdell) Ferris spreaded to Taishan city of Guangdong province along with plant materials from Georgia of America in 1988, and it was first found in Hongling Seed Orchard of Taishan city in June of 1990. subsequently, it was put in the quarantine pest list of China in 1992. *O. acuta* had been recorded early in 1930s. In 1980s, it caused short-term outbreak as a result of the misuse of chemical pesticide in seed orchards and nursery. At present, *O. acuta* distributes in Guangdong, Guangxi and Fujian provinces in China.

O. acuta attacks *Pinus* trees such as *P. elliottii*, *P. taeda*, *P. caribaea*, *P. massoniana* etc. in China. Among them, *P. elliottii* is most susceptible to the scales. *O. acuta* mainly damages the tender top of pine tree, living on sucking liquid from pine trees. Some also damage burgeons or new cones. It makes the new treetop and pine needle shorten, unable to extend, old pine needle falling off ahead of time. In the situation of severe damage, the scale results in treetop bend, shrink, resinosis, and lower volume augment. At the same time, the pine cones will be runtish, small and curve. By 2002, distribution area and the damage area of *O. acuta* are 377 thousands and 140 thousands hm^2 respectively.

O. acuta occurs four to five (mostly four) generations a year in Guangdong with overlapping generations, and overwinters as first instar nymph within vagina of old pine needles or between vaginas. The scale begins to develop over $1.8 \pm 1.0^\circ\text{C}$, and effective accumulated temperature is 1042.9 ± 88.4 day-degrees. After its incursion, steady density of population comes into being in the first year, then in the second year population density of the overwintering generation reaches the peak. The density of overwintering generation descends obviously after 3~5 years. Based on analysis of the life table, it shows that temperature and hosts are main factors influencing its population and that high temperature in summer and low nutrition component of infested pine result in the descend of population density. In addition, control efficiency of the predator on the scale population density is weak.

O. acuta still spreads around the area where it has occurred, and potentially threatens *P. taeda* growing area and pine growing area in southeastern China. There are sufficient natural enemy species in its original distribution area, with the parasitic rate of the scale over 90% between July and August. In Guangdong, its local or introduced natural enemies mainly include *Acerophagus coccois*, *Anagyrus dactylopii* and *Zarhopalus debarri*, which can play a certain role to depress population of *O. acuta*. The control efficiency of these natural enemies is being experimented at present. In consequence, it is necessary that pathosanitary, monitoring measures, and revaluing the affection and damage of the scale should be carried out effectively. At the same time, new defendable control steps should be established.

Key words: *Oracella acuta*, *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Acerophagus coccois*, *Anagyrus*

第一节 分布与起源

湿地松粉蚧(又名火炬松粉蚧)*Oracella acuta* (Lobdell) Ferris, 属于同翅目 Homoptera, 粉蚧科 Pseudococcidae, 松粉蚧属 *Oracella* Ferris。

国内分布于广东、广西等省(区)(李振宇和解焱, 2002)。国外分布于美国。

湿地松粉蚧 20 世纪 30 年代在美国已有记录, 在大西洋沿岸各州湿地松种植区广为分布, 80 年代因在种子园和苗圃施用化学农药引起该虫短期暴发流行, 才引起注意。1988 年该虫随引种材料由美国的佐治亚州传入我国广东省台山市, 1990 年 6 月首次在该市红岭种子园采穗的松梢上发现, 经汤祊德先生鉴定, 确认该虫为分布于美国东南部为害火炬松、湿地松等多种松树的火炬松粉蚧。中国科学院上海昆虫研究所杨平澜先生建议给予中文名称为“湿地松粉蚧”(杨平澜, 1991)。该虫在我国迅速蔓延扩散, 1996 年被列为国内森林植物检疫对象加以控制。

第二节 识别特征与早期诊断

一、湿地松粉蚧的形态特征

(一) 成虫

雄虫体长 0.88~1.06mm, 翅展 1.5~1.66mm, 粉红色, 触角基部和复眼朱红色; 中胸大, 黄色; 第七腹节两侧各具 1 条 0.7mm 长的白色蜡丝; 有翅型雄虫具 1 对白色的翅, 软弱, 翅脉简单。

雌成虫(图 12-1)体长 1.52~1.90mm, 浅红色, 梨形, 中后胸最宽; 在腊包中腹部向后尖削; 复眼明显, 半球状; 口针长度为体长的 1.5 倍; 触角 7 节, 其上具有细毛, 端节较长, 为基节 2 倍, 并有数根感觉毛刺; 气门 2 对; 胸足 3 对, 发育正常, 爪下侧无小齿; 体背面前后有 1 对背裂唇, 腹面在第三、四腹节交界的中线处横跨 1 个较大的脐斑; 肛孔在第八腹节末端的背面, 肛环有许多小孔纹环列, 肛环刚毛 6 根; 阴孔在第七腹、第八腹节间交界处; 在腹部后几个腹节的两侧各有 1 个腺堆, 从腹末往前数共有腺堆 4~7 对, 腺堆在愈向前的腹节上愈不清楚, 每个腺堆由 2 根粗短的刺和为

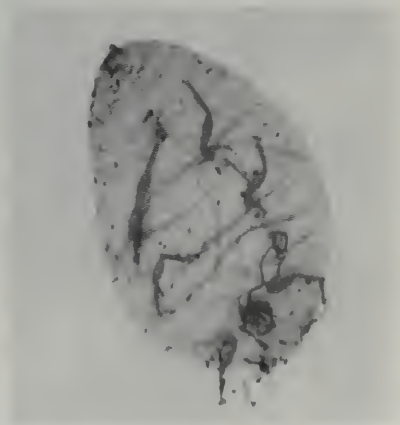


图 12-1 湿地松粉蚧成虫(陈沐荣 供)

数不多的三孔腺组成, 并杂有少数短刚毛; 全身背腹两面除散布稀疏的短刚毛外, 还有许多

三孔腺分布。在头胸部外侧边缘附近和腹部背腹两面有大量具有泌腊功能的多孔腺分布。

(二) 卵

长椭圆形， $0.32\sim 0.36\text{mm}\times 0.17\sim 0.19\text{mm}$ ，浅红色至红褐色。

(三) 若虫

椭圆形，体长 $0.44\sim 1.52\text{mm}\times 0.18\sim 1.02\text{mm}$ ，浅黄色至粉红色，足 3 对。中龄若虫体分泌白粒状蜡质物，腹末有 3 条白色蜡丝；高龄若虫营固定生活，分泌蜡质物形成蜡包覆盖虫体。

(四) 雄蛹

离蛹，体长 $0.89\sim 1.03\text{mm}\times 0.34\sim 0.36\text{mm}$ ，粉红色；触角可活动，复眼圆形，朱红色；足 3 对，浅黄色；在头、胸、腹部有分泌出白色粒状蜡质和 2~3 倍于体长的灰白色蜡丝，并逐渐覆盖蛹体。

二、湿地松粉蚧的为害特点

湿地松粉蚧主要寄生在松树的嫩梢，部分寄生于嫩枝和新鲜的球果上，特别粗壮的枝梢虫口数量最多，仅在越冬时部分若虫匿藏于老针叶叶鞘内。若虫和雌成虫以口针刺吸松树或幼苗嫩梢的汁液，造成新梢及针叶缩短，不能伸展，甚至形成丛枝，老针叶提前枯黄脱落，严重时会出现枝梢弯曲、萎缩、流脂，使松树生长量下降，球果发育不良，小而弯曲。此外，湿地松粉蚧为害还分泌蜜露，导致煤污病的发生，影响林木光合作用，也影响林木的生长，削弱树势(图 12-2，图 12-3)。



图 12-2 湿地松粉蚧寄生在松梢上(蔡卫群 摄)



图 12-3 湿地松粉蚧危害状(徐家雄 摄)

第三节 传入途径与入侵成因

湿地松粉蚧可借助苗木、球果、接穗的调运人为传播到它自身所难以到达的地方，并于 1988 年随引种的繁殖材料传入广东，迅速定殖，随后其初孵若虫随气流自然扩散。该虫在广东等地扩散为害的主要成因包括以下 3 点：

首先是寄主资源丰富。近 30 年来，中国自美洲大量引入松树优良种源，其中种植最广的是湿地松 *Pinus elliottii*、火炬松 *P. taeda* 和加勒比松 *P. caribaea*。3 种松树皆为湿地松粉蚧的寄主，从而为该虫的扩散提供了丰富的寄主资源。广东中部沿海的低海拔地带为害已相当严重，为害区仍在迅速扩散。

其次是湿地松粉蚧在我国适生范围很大。庞雄飞等(1994)对此虫的发生状况、我国湿地松、火炬松的引种栽培范围、栽培区的地理纬度、气候条件和原产地美国发生区域等因素的比较分析认为，虽然广东发生相当严重，但并不是该虫的最适生长区，它的最适生境在中国的东南部。另据徐家雄等(1996)研究表明，华南地区为该虫年发生 4 代区，在长江以南地区为年发生 3 代区，在黄河以南地区为年发生 2 代区，湿地松粉蚧的最适生境在湖南省、江西省中南部。湿地松粉蚧在我国具有广阔适生区域，为该虫的入侵与扩散提供了条件，从现在的分布区来看，该虫可以忍受冬季低温，并且有继续向北扩散的可能性。

第三是控制难度大，目前还未研究出有效的控制措施。在该虫的控制上，主要寄希望于引进天敌，在这方面也进行了大量工作，引进的寄生蜂在释放林地初步定居，但尚未在野外建立稳定的种群(潘志萍等，2002；周昌清等，1994)。化学药剂防治和微生物防治取得一定的效果，但在生产上还未能进行大面积使用(潘务耀等，1994；叶燕华等，1995；秦长生等，1998)。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

湿地松粉蚧在广东省台山定殖后，初孵若虫随气流自然扩散，也可借助苗木、球果、接穗的调运传播，主要向广东西部、西北部迅速蔓延扩散，已入侵邻省广西。根据广东省森林病虫害检疫与防治总站调查，2002 年已分布到 13 个市(地)的 54 个县级行政区，有虫面积达 37.7 万公顷，发生危害面积为 14.0 万公顷。湿地松粉蚧在广东省历年分布及发生危害的面积如图 12-4(梁承丰，2003)。

张心结等(1996)按林木被害状划分湿地松的受害等级的基础上，测定了湿地松受害后的生长情况，对湿地松粉蚧侵入后连续 5 年的材积测定表明，第 2 年和第 3 年材积生长显著下降，第 5 年受害较轻。

1994 年联合国粮农组织总部官员 Ciesla 应中国林业部邀请，考察台山湿地松粉蚧危害时认为，湿地松粉蚧的危害程度还不算很高，但并不是说不要防治。

湿地松粉蚧的寄主植物包括湿地松 *P. elliottii* Engel.、火炬松 *P. taeda* Linn.、长叶松 *P. palustris*、裂果沙松 *P. clausa* var. *immuginata*、萌芽松 *P. echinata*、矮松 *P. virginiana*、马尾松 *P. massoniana* Lamb.、加勒比松 *P. caribaea* 等松属植物。目前，湿地松粉蚧还仅

局限在湿地松种植区危害，尚未发现造成松树死亡的现象。Sun J H 等(1996)分析认为，由于没有自然屏障的阻隔，使该虫在我国北方的扩散成为可能。

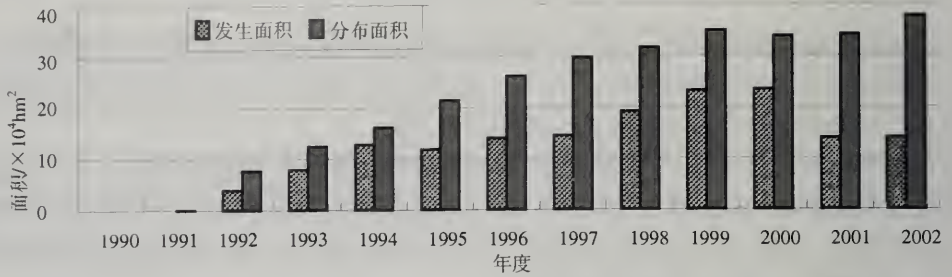


图 12-4 湿地松粉蚧在广东省历年分布及发生危害的面积

第五节 生物学、生态学特性

一、生活史

湿地松粉蚧在广东每年发生 4~5 代，以 4 代为主，世代重叠，以一龄若虫聚集在老针叶的叶鞘内或叶鞘层之间越冬(徐家雄等，2002)。越冬虫态在翌年 3 月开始活动，4 月上旬出现成虫。湿地松粉蚧的生活史如表 12-1(徐家雄等，2002)。

表 12-1 湿地松粉蚧的生活史

月 份	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬	上中下旬
第一代		=== ●	=== ●●● ○○○	=== ●●● ○○								
第二代				=== ●	=== ●●● ○○	= ●●● ○○○	●					
第三代						=	=== ●●● ○○	= ●●● ○○○	●● ○			
第四代 (越冬代)	== ●●● ○○○	●● ○○										
第四代 (非越冬代)									=== =	●●● ○○	● ○	
第五代 (越冬代)	=== ●● ○○○	●●● ○○○	●									===

注：○：卵 —：1 龄若虫 =：2 龄若虫 ●：雌成虫 (—)：越冬若虫。

二、生活习性

对湿地松粉蚧的生活习性,徐家雄等(2002)进行较深入的研究。

(一) 孵化

刚产出的卵淡黄色,并逐渐变为黄色;2~3d后出现浅红色;孵化前2~3d变为茶红色。孵化率85.6%~97.0%。

(二) 若虫的涌散与聚集

初孵若虫在蜡包内停留2~5d后,天气适宜时爬出,在松树枝、梢、叶处活动,在晴暖、微风天气下,可随气流向外大量涌散。涌散后的若虫在松梢和松针叶上四处爬行,2~4d后在老针叶的叶鞘内聚集。若虫扩散方向与东南季风一致,扩散距离一般为17km,最远可达22km(徐世多等,1994)。

(三) 若虫蜕皮

若虫分为2龄,1龄若虫发育10~13d后出现蜕皮,进入2龄若虫;2龄若虫发育14~16d后,雄若虫再次蜕皮形成有翅型预蛹,雌若虫则泌蜡形成蜡包。

(四) 泌露与泌蜡

若虫(特别是2龄若虫)大量分泌蜜露,在6月份诱发湿地松林间煤污病。2龄若虫后期,雌若虫泌蜡逐渐形成白色蜡包,雄若虫(有翅型)泌蜡形成白色绒团状的蜡丝团。蜡包随着虫龄增大,分泌增多,形成蜡包,覆盖整个虫体,蜡包初时为白色,质地较轻,后渐变黑,质地坚硬。有时数头雌虫同在一处固定,其蜡包融合一起。

(五) 若虫性分化

2龄若虫发育7~10d后,出现性分化。雄若虫虫体较长,在松树的老针叶、枝条或树干上爬动,最终在老针叶的叶鞘内、枝条或树干的树皮裂缝内定居并化蛹;雌若虫顺着松梢向松梢顶端爬动,最终在松梢顶端的松针叶基部固定下来。

(六) 雄虫的化蛹与羽化

雄虫有无翅型和有翅型两种类型。无翅型雄虫主要出现在湿地松粉蚧越冬代种群中,但在第1代种群中也出现部分个体,其虫体长,个体较大,且很活跃,在春梢上的湿地松粉蚧蜡包堆之间不停爬动。有翅型雄虫主要出现在湿地松粉蚧非越冬代种群中,在比较干旱和气温较高的夏、秋季节比较常见,预蛹期和蛹期时间短,雄虫羽化后虫体较弱,很容易死亡。

(七) 雌虫产卵

雌虫固定生活在蜡包内。各代雌虫的产卵量差异较大,越冬代每头雌虫的平均产卵

量为 272.4 粒, 第 1 代雌虫为 158.0 粒, 第 3 代雌虫为 89.3 粒, 第 2 代雌虫和第 5 代雌虫林间种群数量少没有进行统计。越冬代雌虫出现少数白色变异个体并产出大量白色卵。

(八) 性比

雄虫占湿地松粉蚧总虫口量的比例很小, 有翅型雄虫占林间粉蚧总量的 18.9%~37.6%; 无翅型雄虫只占越冬代林间粉蚧总量的 0.4%。

三、湿地松粉蚧的天敌

湿地松粉蚧原产地的天敌种类丰富, 仅捕食湿地松粉蚧的瓢虫就有 30 多种, 其中黄尾基瓢虫 *Diomus terminatus* 是优势种, 分布区与湿地松粉蚧一致(Gordon, 1985)。主要的寄生性天敌有短索跳小蜂 *Acerophagus coccois*、迪氏跳小蜂 *Zarhopalus debarri* 和广腹细蜂 *Allotropia oracellae*。据 Clarke (1992)在佐治亚州 Bulloch County 种子园调查, 寄生性天敌在控制湿地松粉蚧种群密度方面起很重要的作用, 7~8 月的寄生率可高达 90%以上。

目前在广东湿地松粉蚧发生区, 引进和发现的湿地松粉蚧主要天敌已有十几种。其中寄生性天敌有短索跳小蜂、迪氏跳小蜂、广腹细蜂、长索跳小蜂 *Anagyrus dactylopii*(任辉等, 2000), 捕食性天敌有孟氏隐唇瓢虫 *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant、台毛艳虫 *Pharoscyrmus taai* Sasaji、台湾凯瓢虫 *Keiscyrmus taiwanensis*、卵斑小瓢虫 *Scymus (Pullus) ovimaculatus*、亚非草蛉 *Chrysopa boninensis*, 病原微生物有芽枝状孢霉 *Cladosporium cladosporioides* (Fres.) Derrues 和蜡蚧轮枝菌 *Verticillium lecanii*。这些天敌对湿地松粉蚧种群数量增长虽有一定的抑制作用, 但仍仍处于试验阶段, 其控制效能有待检验。

四、发生规律

(一) 林间种群的空间分布

李奕震等(1994)认为湿地松粉蚧在湿地松林间呈聚集分布, 其虫口密度在湿地松树冠东、南、西、北向之间无显著差异, 而在树冠上、中、下层之间有极显著差异, 虫口密度大小是树冠上层>中层>下层。5 种抽样方法中, 以双对角线法最佳, 其次为 Z 字形法; 每 667m² 湿地松抽样 10 株较适宜。徐家雄等(2002)在人工营造湿地松纯林对湿地松粉蚧种群密度调查结果表明: 湿地松粉蚧世代均数间差异极显著(第 2 代湿地松粉蚧林间数量太少未进行调查)。树冠层次的湿地松粉蚧数量上层的种群密度比下层多 1.8 头/梢, 湿地松粉蚧均数达极显著; 而上层与中层、中层与下层之间的种群密度只相差 0.4 头和 0.3 头, 均数差异未达到显著。湿地松春梢受越冬代和第 1 代湿地松粉蚧的共同为害, 上半年春梢上的越冬代湿地松粉蚧与第 1 代湿地松粉蚧种群密度存在相互协调关系。

(二) 疫区边缘种群分布规律

余海滨等(1998)应用定点观察和跟踪调查的方法, 研究了湿地松粉蚧林间种群数量

消长规律表明：湿地松粉蚧种群在疫区边缘存在 8~10km 宽的高密度区，虫口密度达 60~70 头/松梢，湿地松粉蚧侵入的季节不同，种群密度高峰出现时间也不同，一般湿地松粉蚧侵入半年后种群密度达到最大，之后锐减。湿地松粉蚧从边缘分布的高密度(达 60~70 头/梢)区域在春季和秋季逐年向外扩散，扩散速度在成片的湿地松纯林为 30~40km/年，不成片湿地松林或湿地松与其他树种混交林为 15~20km/年，而且与季节风向有关，西北方向扩散速度较快。

(三) 年份间种群数量消长规律

徐家雄等(2002)对粉蚧侵入湿地松林分第 1~5 年进行研究，对第 2~5 年进行抽样调查结果表明：第 1 年湿地松粉蚧从零星分布至越冬时形成一定种群密度，第 2 年越冬代种群密度最大，第 3~5 年越冬代种群密度逐年明显下降，每年平均密度下降 1.4 头，而第 2~5 年非越冬代的种群密度差异不显著。对每年 11 月~翌年 2 月湿地松粉蚧(越冬代)均数进行多重比较，12 月份~翌年 2 月份的差异不显著，但与 11 月份的差异达极显著，11 月份出现极显著是抽样方法造成，该月份部分越冬代湿地松粉蚧卵未孵化或刚孵化的 1 龄若虫未爬出蜡包，检查时这部分粉蚧没有统计在内。

(四) 全年种群数量消长规律

湿地松粉蚧全年种群数量消长规律研究认为：上半年虫态整齐，种群密度大；下半年世代重叠，种群密度小；全年湿地松粉蚧种群密度呈单峰型。林间的有虫松梢率变化也呈单峰型。在湿地松种子园，5 月中旬湿地松粉蚧数量达到 965 头/梢、有虫梢率达到 100%；而在 8 月上旬~9 月上旬湿地松粉蚧数量只有 1.1~1.5 头/梢、有虫梢率为 1.0%~2.0%；湿地松粉蚧越冬时，数量为 9.9~15.1 头/梢，有虫梢率为 14.5%~16.5%。调查表明，在 6 月下旬~7 月上旬，第 2 代初孵化若虫大量涌散后林间 2 龄若虫的数量并没有上升。湿地松粉蚧种群密度、有虫松梢比率全年变化规律如图 12-5 和图 12-6(徐家雄等，2002)。

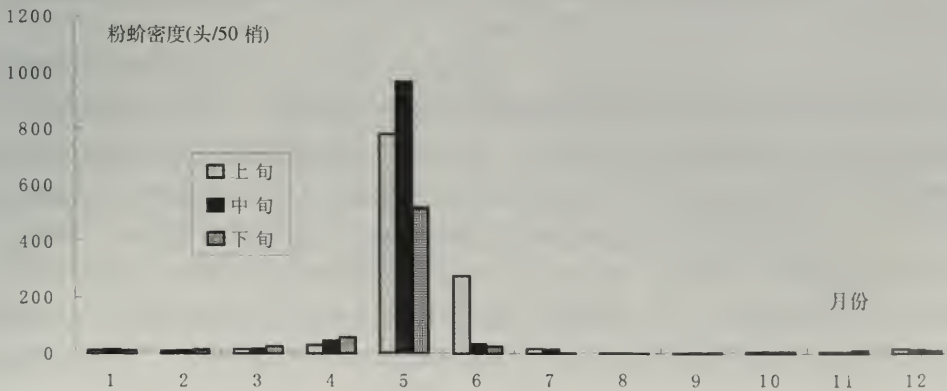


图 12-5 湿地松粉蚧种群密度全年变化规律

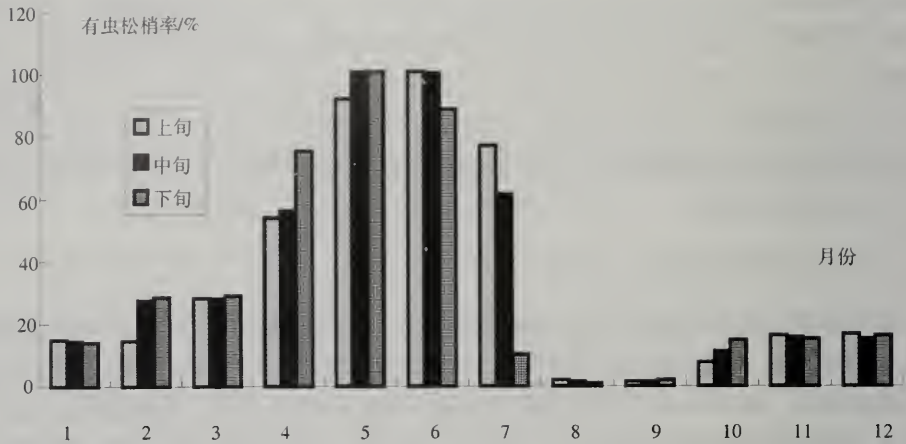


图 12-6 湿地松粉蚧在湿地松树上有虫梢率全年变化规律

五、影响湿地松粉蚧种群密度数量消长的原因

湿地松粉蚧完成 1 代的发育起点温度为 $7.8 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ，湿地松粉蚧的合适温度为 $16 \sim 30^{\circ}\text{C}$ ，最适发育温度为 $24 \sim 25^{\circ}\text{C}$ ，有效积温为 $1042.9 \pm 88.4\text{DD}$ (徐家雄等, 1996)。雌虫在 40°C 的高温能够存活 22h，雌虫耐饥力为 6d。

据汤才等(2000, 2001 年)通过梯度恒温与梯度变温研究表明，温度对湿地松粉蚧越冬代成虫死亡率、产卵量、繁殖力有着显著影响。湿地松粉蚧雌成虫存活率随温度升高逐渐下降，高温对成虫产卵有一定抑制作用，持续较高温处理成虫，其产卵量显著降低，湿地松粉蚧成虫生长发育的最适温度为 $27 \sim 21^{\circ}\text{C}$ ，卵的孵化和发育的最适变温组合是 $29 \sim 23^{\circ}\text{C}$ ，在 $29 \sim 23^{\circ}\text{C}$ 以上的温度波动对卵的发育速率有增速作用，而在 $29 \sim 23^{\circ}\text{C}$ 以下的温度波动对卵的发育速率则有减速作用；该蚧卵的发育起点温度为 6.64°C ，有效积温为 153.31DD ，发育的最适温度在 29°C 左右，在 $19 \sim 32^{\circ}\text{C}$ 时，卵的孵化率均在 90% 以上，差异不显著，但在 $35 \sim 37^{\circ}\text{C}$ 时，卵几乎不孵化。

通过该虫生命表的组建和分析表明，温度和寄主是影响虫口数量变动的主要因素：夏季高温和被害松树营养成分下降是种群数量回落的主要原因；大量春梢萌生是上半年种群数量猛增的必要条件(汤才等, 1996)。在我国，高温是新侵入区湿地松粉蚧夏季种群数量显著下降的主要原因之一。通过生命表的组建和分析也证明捕食性天敌对该虫作用不明显，而“其他”类因子是影响种群数量发展趋势的重要因子(汤才等, 1996)。据汤才和田明义(1995)对“其他”类因素的研究表明，夏季高温引起的松梢老化、上代受害以后引起的营养质量的变化、拥挤以及煤污病的严重发生等对湿地松粉蚧夏季种群数量的凋落的排除作用指数 EIPC 为 46.9，如果排除这几个因子的作用，下代种群数量将为当代的 46.9 倍。

余海滨等(1998)应用定点观察和跟踪调查的方法，研究了湿地松粉蚧林间种群数量消长规律表明，湿地松新梢为影响林间种群数量消长的主要因素。王卫华和梁民(1999)

为研究湿地松粉蚧为害与新梢树皮组织内部营养状况的关系,对湿地松新梢树皮进行化学成分分析,认为,均衡、协调的营养对湿地松粉蚧生长和繁殖有利,湿地松粉蚧为害主要导致新梢树皮蛋白质、粗灰分含量明显增加,还原糖含量明显减少,湿地松粉蚧发生高峰期,新梢树皮组织内部营养含量与湿地松粉蚧虫口密度呈显著正相关。研究结果和湿地松粉蚧在同一林地一般种群大发生后,种群数量急剧下降,次年林木抽梢正常后,种群数量再度上升相一致(潘务耀等,1995)。

顾茂彬和陈佩珍(1994)对湿地松粉蚧的种群密度与林木抗性、林分郁闭度、林分结构、海拔高度、坡向等因子的关系,以及该虫在林分内分布密度也作了初步的研究。

第六节 风险分析与早期预警

为加强该虫的管理,有效地控制其危害和防止在我国进一步扩散蔓延,现从国内分布状况、寄主植物的经济重要性、潜在的经济危害性、传播扩散的可能性与控制难度等5个方面对湿地松粉蚧进行风险分析。

国内分布状况:湿地松粉蚧在我国主要分布在广东省,福建和广西也有报道(李振宇和解焱,2002)。2002年,湿地松粉蚧在广东省已分布到13个市(地)的54个县级行政区,有虫面积达37.7万公顷,发生危害面积为14.0万公顷。2000年6月,湿地松粉蚧在广西主要分布在与广东交界的玉林市,梧州市的北流、陆川、容县、博白、岑溪5个县(市)的18个乡镇,有蚧虫面积0.49万公顷,对广西现有13.3万公顷湿地松林构成威胁(吕送枝,2000)。福建省具体分布区未见报道。

寄主植物的经济重要性:在国内,目前湿地松粉蚧的主要寄主植物为湿地松和火炬松,这些树种是我国重要的用材林和生态林造林树种,同时也是我国人造板、造纸、林产化工等林产工业的最主要原料,具有重要的经济、社会和生态效益。

潜在的经济危害性:湿地松粉蚧在我国适生范围很大。庞雄飞等(1994)认为对湿地松粉蚧的最适生境在中国的东南部。徐家雄等(1996)研究表明最适生境在湖南省、江西省中南端区域。Sun J H等(1996)分析认为,由于没有自然屏障的阻隔,该虫在我国北方的扩散是有可能的。

传播扩散的可能性:湿地松粉蚧自然传播主要是初孵若虫随气流向外扩散,扩散速度快,为非疫区的防范带来困难;而该虫的人为传播主要是随疫区松属植物的苗木、接穗、球果、原木等传播,由于各地区之间苗木调运频繁、旅游业的兴起以及物流量的加大,使得人为的被动传播可能性加大。总的来说,该虫发生的危险性高。

控制难度:湿地松粉蚧的监测预警研究不多,Sun J H等(2002)年试验表明湿地松粉蚧雄虫可能比雌虫对黄色更为敏感,黄色黏胶诱捕器可用于进行生物控制天敌的定种群监测和湿地松粉蚧的扩散研究。由于扩散渠道多,疫区内繁殖材料的管理较困难。在湿地松粉蚧的持续控制策略上,研究较多,但至今还没有经济简便的防治办法,其中常规农药起到了一定的作用,但效果不理想(秦长生等,1998),持续控制的策略从引进天敌昆虫角度出发,已经取得了一定的进展,引进的寄生蜂在释放林地初步定居,但尚未

在野外建立稳定的种群(潘志萍等,2002),本地寄生性天敌昆虫的开发利用正在进行中(任辉等,2000),从控制角度上讲,该虫控制难度大。

第七节 预防和控制技术

一、控制策略

湿地松粉蚧传入我国大陆,已成为我国的森林重大生物灾害之一,究其原因,一方面,外来害虫找到适生地,本地天敌又未能及时发挥作用;另一方面,湿地松是广东省“十年绿化广东”期间营造速生丰产林的首选树种,基本是块状的纯林,给病虫害的泛滥提供了有利环境。对于湿地松粉蚧的控制,应切实贯彻“预防为主,综合治理”的治虫方针,根据其发生特点及危害情况,根据其实际危害和潜在的威胁,有针对性地预防和控制湿地松粉蚧的蔓延和危害。

二、预防和控制技术

(一) 湿地松粉蚧的预防

湿地松粉蚧既可借助苗木、球果、接穗的调运人为传播到它自身所难以到达的地方,又能随气流自然扩散。而湿地松粉蚧仍在不断向疫区外围蔓延扩散,对火炬松种植区及我国东南部的松树产区仍有潜在的威胁。可采用黄色黏胶诱捕器进行湿地松粉蚧的扩散监测(Sun *et al.*, 2002),采取相应的措施加以控制。湿地松粉蚧发生区内的湿地松、火炬松、加勒比松等松属树种的枝桠、松针和球果,应禁止外运,就地作为薪炭材使用、处理,松类苗木、盆景等特殊用苗,一般不能调运出发生区,确需调运时,要经过严格检验确保不带湿地松粉蚧,并要采用溴甲烷进行熏蒸处理,用药量 $20\sim 30\text{g}/\text{m}^3$,熏蒸 24h;调入方要经过隔离试种、观察 6 个月以上,确认不带湿地松粉蚧后才能分散种植。

(二) 湿地松粉蚧的控制

(1) 化学措施:对于集约经营的商品林和幼苗,必要时,选用高效低毒的化学药剂进行防治。经过有机磷、矿物油等 11 种农药的筛选试验和林间试验,机油乳剂混鱼藤氰 1:20 浓度的效果为 52.7%(梁承丰, 2003)。

(2) 生物措施:用孢子液浓度为 2 亿孢子/ml 和 1 亿孢子/ml 的芽枝状孢霉和蜡蚧轮枝菌对湿地松粉蚧寄生致病力较强,有一定控制作用。两种菌与机油乳剂混合使用,可提高防治效果(梁承丰, 2003)。

第八节 应用与基础研究发展策略

1991 年以来,我国对湿地松粉蚧作了大量的研究工作,但尚未从根本上解决防治问题。捕食性天敌昆虫的研究在释放点小范围取得一定效果;从原产地美国引进寄生性天

敌昆虫研究取得一定进展,引进的寄生蜂在释放林地初步定居,但尚未在林间建立起稳定的种群。本地寄生性天敌昆虫的开发利用正在进行中(任辉等,2000),病原微生物仅在室内和林间小范围应用,有一定效果;化学防治在林间未能取得良好的防治效果,同时林间大面积应用也存在环境污染问题。因此,湿地松粉蚧的防治技术仍然是林业生产上急需解决的难题。为切实解决湿地松粉蚧危害问题,有必要全面总结十多年来的研究成果,深入分析湿地松粉蚧入侵的内外因,客观评价湿地松粉蚧的危害现状和潜在的危害,加强相关的应用与基础研究。现提出一些有关湿地松粉蚧控制的想法。

一、湿地松粉蚧扩散的可能范围和寄主

湿地松粉蚧在我国适生范围很大(庞雄飞等,1994;徐家雄等,1996;Sun J H *et al.*,1996)也有可能严重危害火炬松,宜根据湿地松粉蚧在我国十多年来的发生和危害情况进行全面而深入的分析,评估其扩散的可能范围和寄主。

二、重新评估湿地松粉蚧的危害

湿地松粉蚧目前主要为害湿地松,以后有可能为害火炬松等松属树种,而湿地松、火炬松等国外松树优良品种是作为速生、优质、丰产林树种引种的,在生产上通常采用集约经营措施造林、经营,对其病虫害的发生和危害,要从集约经营的角度考虑投入和产出,如果需要防治,应制定其经济阈值,对其造成的损失应进行确切的评估,为制定控制策略和措施提供科学的依据。

湿地松粉蚧疫情发生后,曾做过损失评估,根据早期的危害情况,湿地松粉蚧为害湿地松后,对湿地松生长的影响表现出初期较严重,往后有所减轻的现象,也未出现湿地松枯死的现象。对湿地松粉蚧侵入后连续5年的材积测定表明,第2年和第3年材积生长显著下降,第5年受害较轻。如果考虑湿地松受害后本身的自我补偿能力,实际损失处于什么水平,宜重新评估湿地松粉蚧对湿地松粉蚧的生长、产脂和生态效能的影响。

三、湿地松粉蚧的控制策略和措施

湿地松粉蚧在我国1年中有2个扩散高峰,在广东南部的新侵入区每年7月初种群数量开始迅速下降,7~8月虫口数量最低,高温的夏季难寻其踪影,表现出大起大落的特点,而湿地松粉蚧种群的消退更是任何生物防治措施难以比拟的。如果按常规利用天敌昆虫进行控制,在哪个阶段进行,又如何在林间维持天敌昆虫的种群,需要重新研讨必要的和有效的湿地松粉蚧控制策略与措施。

(刘海军 黄焕华 骆有庆)

主要参考文献

顾茂彬,陈佩珍.1994.影响湿地松粉蚧种群密度因子的初步研究.林业科学研究,(5):534~537 [Gu M B, Chen P Z.1994. A Preliminary study on the factors influencing population density of *Oracella acuta*. *Forest Research*, (5): 534~537]

- 李奕震, 苏星, 卢川川, 谢维辉, 张惠. 1994. 湿地松粉蚧空间分布型及抽样技术的研究. 华南农业大学学报, 15(4): 52~57 [Li Y Z, Su X, Lu C C, Xie W H, Zhang H. 1994. Studies on the spatial distribution patterns of *Oracella acuta* and sampling techniques. *J. South China Agr. Univ.*, 14(4): 52~57]
- 李振宇, 解焱. 2002. 中国外来入侵种. 北京: 中国林业出版社. 69 [Li Z Y, Xie Y. 2002. Invasive Alien Species in China. Beijing: China Forestry Publishing House. 69]
- 吕送枝. 2000. 湿地松粉蚧蔓延进入广西. 森林病虫通讯, (6): 39
- 潘务耀, 唐子颖, 余海滨等. 1995. 新传入我国的湿地松粉蚧研究. 林业科学研究, (8): 67~72
- 潘务耀, 叶燕华, 殷凤鸣, 陈权才. 1994. 芽枝状孢霉和蜡蚧轮枝菌防治湿地松粉蚧的技术研究初报. 森林病虫通讯, (1): 14~15
- 潘志萍, 曾玲, 叶伟峰. 2002. 湿地松粉蚧的天敌及生物防治. 中国生物防治, 18(1): 36~38 [Pan Z P, Zeng L, Ye W F. 2002. The natural enemies and biological control of the loblolly pine mealybug, *Oracella acuta*. *Chinese Journal of Biological Control*, 18(1): 36~38]
- 庞雄飞, 汤才. 1994. 新入侵害虫-湿地松粉蚧的防治问题. 森林病虫通讯, (2): 32~35 [Pang X F, Tang C. 1994. Management of the newly invaded pest, loblolly pine mealybug *oracella acuta*. *Forest Pest and Disease*, (2): 32~35]
- 秦长生, 殷凤鸣, 陈权才. 1998. 化学药剂防治湿地松粉蚧的研究. 广东林业科技, 14(3): 43~46 [Qin Ch Sh, Yin F M, Chen Q C. 1998. Study on the chemical control of *Oracella acuta*. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, 14(3): 43~46]
- 任辉, 陈沐荣, 余海滨, 徐家雄, 方天松. 2000. 湿地松粉蚧本地寄生天敌—粉蚧长索跳小蜂. 昆虫天敌, 22(3): 140~143. [Ren H, Chen M R, Yu H B, Xu J X, Fang T S. 2000. A newly found native parasitoid, *Anagyrus dactyloph* of loblolly pine mealybug, *Oracella acuta*. *Natural enemies of insects*, 22(3): 140~143]
- 汤才, 黄德超, 董晓立, 黄智. 2001. 梯度变温对湿地松粉蚧实验种群的影响. 华南农业大学学报, 22(1): 46~48 [Tang C, Huang D C, Tong X L, Huang Z. 2001. Effect of alternate temperatures on the experimental population of *Oracella acuta*. *Journal of South China Agricultural University*, 22(1): 46~48]
- 汤才, 田明义, 黄寿山, 庞雄飞. 1996. 湿地松粉蚧自然种群生命表的构建和分析. 华南农业大学学报, 17(1): 31~36 [Tang C, Tian M Y, Huang S S, Pang X F. 1996. Construction and analysis of the life table for natural population of the loblolly pine mealybug *Oracella acuta*. *J. South China Agr. Univ.*, 17(1): 31~36]
- 汤才, 田明义. 1995. 湿地松粉蚧夏季数量凋落的原因分析. 生态科学, (2): 38~41 [Tang C, Tian M Y. 1995. A analysis of the causes of *Orecella acuta* population decreases in Summer. *Ecologic science*, (2): 38~41]
- 汤才, 董晓立, 黄德超, 刘玉标, 何练新. 2000. 梯度恒温对湿地松粉蚧实验种群的影响. 华南农业大学学报, 21(3): 36~39 [Tang C, Tong X L, Huang D C, Liu Y B, He L X. 2000. Effects of constant temperatures on the experimental population of *Oracella acuta*. *Journal of South China Agriculture University*, 21(3): 36~39]
- 王卫华, 梁民. 1999. 湿地松新梢化学成分与粉蚧为害关系初步研究. 湛江海洋大学学报, 19(3): 59~62 [Wang W H, Liang M. 1999. A primary study on the relation between the chemical compositions in current twigs of the slash pine and the damaged by pine-feeding mealybug. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 19(3): 59~62]
- 徐家雄, 余海滨, 方天松. 1996. 湿地松粉蚧有效积温及其在国内可能扩散范围的研究. 广东林业科技, 12(3): 19~24 [Xu J X, Yu H B, Fang T S. 1996. A study on effective accumulated temperature for development of *Oracella acuta* and forecasting of domestic spread scope. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, (4): 19~24]
- 徐家雄, 余海滨, 方天松, 黄茂俊. 2002. 湿地松粉蚧生物学特性及发生规律研究. 广东林业科技, 18(4): 1~6 [Xu J X, Yu H B, Fang T S, Huang M J. 2002. A study of biological and the outbreak of pine mealybug *Oracella acuta*. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, 18(4): 1~6]
- 徐家雄, 余海滨, 方天松, 蔡卫群. 1998. 湿地松粉蚧林间种群量消长规律研究. 林业科技通讯, (8): 16~17
- 徐世多, 黄茂俊, 谭大临, 张景权, 郑驰麟, 易建盈. 1994. 湿地松粉蚧自然传播规律研究初报. 森林病虫通讯, (2): 16~17
- 杨平澜. 1991. 我国松树上一种新传入的大害虫——湿地松粉蚧. 昆虫学研究集刊, 10(2): 158~159 [Yang P L. 1991. An important pine pest, *Oracella acuta* (Lobdell) (Pseudococcidae), newly introduced in China. *Contributions of the Shanghai Entomological Institute*, 10(2): 158~159]
- 叶燕华, 潘务耀, 殷凤鸣, 陈权才. 1995. 芽枝状孢霉防治湿地松粉蚧的试验初报. 林业科技通讯, (1): 14~15
- 张心结, 李奕震, 苏星, 卢川川, 张波. 1996. 湿地松粉蚧为害对湿地松生长的影响. 华南农业大学学报, 18(2): 40~45 [Zhang X J, Lu Y Z, Su X, Lu C C, Zhang B. 1996. Effects of *Oracella acuta* on the growth of *Pinus elliottii*. *J. South China Agr. Univ.*, 18(2): 40~45]
- 周昌清, 周洪, 潘务耀, 杨瑞华, 徐海. 1994. 引进天敌防治湿地松粉蚧的展望. 昆虫天敌, 16(3): 114~118 [Zhou C Q, Jiang H, Pan W Y, Yang R H, Xu H B. 1994. Prospect of controlling loblolly pine mealybug *Oracella acuta* with introducing natural enemies. *Natural Enemies of Insect*, 16(3): 114~118]

- Clarke S R. 1992. Effects of four pyrethroids on scale insect(Homoptera)population and their natural enemies in loblolly and shortleaf pine seed orchards. *Journal of Economic Entomology*, 85(4): 1246-1252
- Gordon R D. 1985. The Coccinellidae (Coleoptera) in America North of Mexico. *New York Entmol. Soc.*, (1): 1-19
- McClure M S, Dshlsten D L, DeBarr G L, Hedden R L. 1983. Control of pine bast scale in China. *Journal of Foretry*, 81(7): 445-450
- Sun J H, Clarke S R, DeBar G L, Berisfoed C W. 2002. Yellow sticky traps for monitoring males and two parasitoids of *Oracella acuta* (Lobdell) (Homoptera: Pseudococcidae). *Journal of Entomological Science*, 37(2): 177-181
- Sun J H, DeBarr G L, Liu TX, Berisford C W, and Clarke S R. 1996. An unwelcome guest in China, a pine-feeding mealybug. *Journal of Forestry*, 94(10): 27-32

第十三章 蔗 扁 蛾

第一节 起源与分布	348	第五节 生物学特性	355
第二节 识别特征与寄主植物	348	第六节 预防、根除与控制	358
第三节 传入途径与入侵成因	353	第七节 应用与基础研究发展策略	359
第四节 危害现状与生态经济影响	354		

摘要 蔗扁蛾 *Opogona sacchari* (Bojer) 是新传入我国的害虫, 属鳞翅目 Lepidoptera, 辉蛾科 Hieroxestidae, 扁蛾属 *Opogona*, 起源于非洲潮湿的热带和亚热带地区。目前, 已扩散至除撒哈拉沙漠中心外的非洲、美洲、欧洲和地中海地区。我国于 1997 年报道发现此虫, 现几乎分布于全国各地。

该虫在原产地并不重要, 因其于 1920 年在加那利群岛给香蕉造成严重危害而受到关注, 并被许多国家和地区列为检疫害虫。蔗扁蛾主要为害巴西木、发财树等花卉植物, 也为害甘蔗、香蕉等经济作物。自 1997 年报道我国发现此虫以来, 已记载的寄主植物由 22 科 49 种增加至 29 科 104 种, 且寄主范围有不断扩大的趋势。

蔗扁蛾随香龙血树(巴西木) *Dracaena fragrans* (L.)、马拉巴栗(发财树) *Pachira macrocarpa* (Cham and Schlecht) Wall 等虫源花木进入我国, 首先在广东、海南等地的花卉场定殖下来, 然后随花木的调运传至全国各地。很强的繁殖与适应能力以及适宜的环境条件, 促进了该虫在我国的定殖, 频繁的寄主植物调运和认识的不足乃至地方保护主义加速了该虫在我国的迅速扩散蔓延。

蔗扁蛾完成一个世代平均需要 90.5d, 在华南全年可发生 4 代。幼虫是该虫的为害期, 长达 35~75d, 分为 7 龄。幼虫的食性复杂, 钻蛀性是其对寄主植物造成危害的主要方式, 寄主植物的被害症状因种而异。24~28℃ 是该虫的最适发育温度。成虫在羽化 4~7d 后产卵, 平均产卵量为 253.2 ± 65.2 粒。

对蔗扁蛾的防治, 首先必须加强虫情监测, 严格检疫管理, 防止带虫植物运入非疫区。对受害植物可采用化学防治、生物防治和栽培措施管理等方法进行防治。斯氏线虫 *Steinernema carpocapsae* A₂₄ 品系是比较理想的生物防治因子, 大棚条件下可用 3000 条/ml 线虫悬浮液进行喷雾处理, 效果理想。

关键词 外来害虫 蔗扁蛾 寄主植物 检疫 化学防治 生物防治

Chapter 13 Banana Moth

Opogona sacchari (Bojer)

Abstract: The banana moth *Opogona sacchari* (Bojer), belonging to the genus *Opogona* in the family Hieroxestidae of Lepidoptera, is a newly introduced insect pest in China and originated from the tropical and subtropical areas of Africa. So far, this insect has dispersed to the areas including Africa besides the center of the Sahara Desert, South, Middle and North America, Europe and Mediterranean area. It was reported in 1997 that the banana moth was found in China and it distributes almost all over the country now.

The banana moth is not an important pest in its original area. However, more attentions have been paid to this insect since it started to result in serious damage of banana in the Canary Islands in 1920s. Some ornamental plants, e.g. *Dracaena fragrans* (L.) and *Pachira macrocarpa* (Cham et Schlecht) Wall and industrial crops such as banana and sugarcane are favorite host plants to banana moth. More and more host plants have been reported since this insect was found in China in 1997. The recorded host plants have increased from 49 species of 22 families to 104 species of 29 families.

The banana moth might be introduced into China with the importation of some ornamental plants, e.g. *D. fragrans* and *P. macrocarpa*. The insect firstly colonized in Guangdong and Hainan, the tropical and subtropical areas of southern China, and then was brought to the other areas of China with the transportation of infected plants without quarantine. Because of the high reproductive ability and wide adaptability of banana moth and the suitable climatic conditions, this pest colonized very fast and the transportation of infected plants without quarantine accelerated the dispersal of banana moth in China.

The average duration of one generation of banana moth is about 90.5 days. It occurs four generations each year in southern China. Larval stage, including seven instars, takes about 35 to 75 days. The feeding of larvae under the bark of infected plants is the major cause of the damage. The damaged characteristics of host plants by banana moth vary with the different host species.

Temperature influences the development of banana moth. The suitable temperatures for the development of banana moth are from 24°C to 28°C. Too high or too low temperature impacts the development of every immature stage. Female adults start to lay eggs four to seven days after emergence. The mean number of eggs laid per female is about 253.

The most important control strategy of banana moth is to monitor the occurrence all the time and prevent the infected plants from transporting to other areas where no banana moth record. When the insect is found to infect plants, chemical and biological methods and cultural measures should be taken to control the insect within the limited area. The entomopathogenic nematodes *Steinernema carpocapsae* A₂₄ is an effective biological control agent. The spray of 3000-nematodes/ml nematode suspensions can be used to control banana moth in greenhouse.

Key words: exotic insect pest, *Opogona sacchari*, host plant, quarantine, chemical control, biological control

第一节 起源与分布

蔗扁蛾(banana moth) *Opogona sacchari* (Bojer)属鳞翅目 Lepidoptera, 辉蛾科 Hieroxestidae, 扁蛾属 *Opogona*(杨集昆和程桂芳, 1997)。该虫起源于非洲潮湿的热带和亚热带地区(Bojer, 1856), 但并非重要害虫。20 世纪 20 年代, 因其在加那利群岛给香蕉造成严重危害而首次引起人们的注意。70 年代传入巴西和中美洲, 并在欧洲和地中海地区也陆续出现, 80 年代传入美国佛罗里达(Florida)。Davis 和 Peña 等(1990)总结了该虫在全球的分布, 主要分布在以下地区。

欧洲和地中海地区: 意大利(南部温室相当普遍)、葡萄牙(亚速尔、马德拉)和西班牙(加那利群岛)。此外, 在比利时、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊和荷兰也曾大发生过, 但现在已被根除。非洲: 除撒哈拉沙漠中心外的广大地区, 也包括马达加斯加、毛里求斯、留尼旺群岛、罗德里格斯群岛和塞舌尔群岛。南美洲: 巴西。中美洲和加勒比海地区: 广泛分布。北美洲: 美国(佛罗里达)。

我国 1997 年报道在北京发现此虫(程桂芳和杨集昆, 1997a, 1997b; 杨集昆和程桂芳, 1997)。此后, 相继报道该虫出现在广东(程桂芳和杨集昆, 1997c; 张古忍等, 1998; 李建, 1998; 王晓容等, 1999; 田世尧等, 2000; 古德祥等, 2001; 商名清等, 2002)、海南(程桂芳和杨集昆, 1997c; 黄宏辉, 1998; 刘奎等, 2001; 商名清等, 2002)、福建(程桂芳和杨集昆, 1997c; 商名清等, 2002)、新疆(朱广济等, 1998; 孟祥永和张飞, 1999; 商名清等, 2002)、甘肃(贾迎春, 1999)、吉林(魏国先等, 1999)、江苏(龚伟荣等, 1999; 杜予洲等, 2003; 鞠瑞亭等, 2003; 商名清等, 2002)、浙江(商晗武等, 2001b; 沈杰等, 2002; 陈品南和何秀珍, 2002; 商晗武等, 2002; 商晗武等, 2003)、江西(丁清龙等, 2002; 李蔚明, 2002)、山东(商名清等, 2002; 刘发邦等, 2002)、广西(吴志红, 2001; 庞联东等, 2001a, 2001b)、上海、四川和河南(商名清等, 2002)等地的花卉市场或对花卉生产造成危害。

第二节 识别特征与寄主植物

一、识别特征

蔗扁蛾的形态特征已有详细描述(Davis and Peña, 1990; 杨集昆和程桂芳, 1997; 程桂芳和杨集昆, 1997a, 1997b) 蔗扁蛾不同发育时期的形态特征如图 13-1 所示。

成虫: 体长 7.5~9 mm, 翅展 18~26 mm, 雄虫多小于雌虫; 颜色黄灰带褐为主, 具强金属光泽; 体较扁平, 翅平覆于体上; 前、后翅后缘有长毛; 喜暗; 爬行速度快, 并可做短距离跳跃或飞行

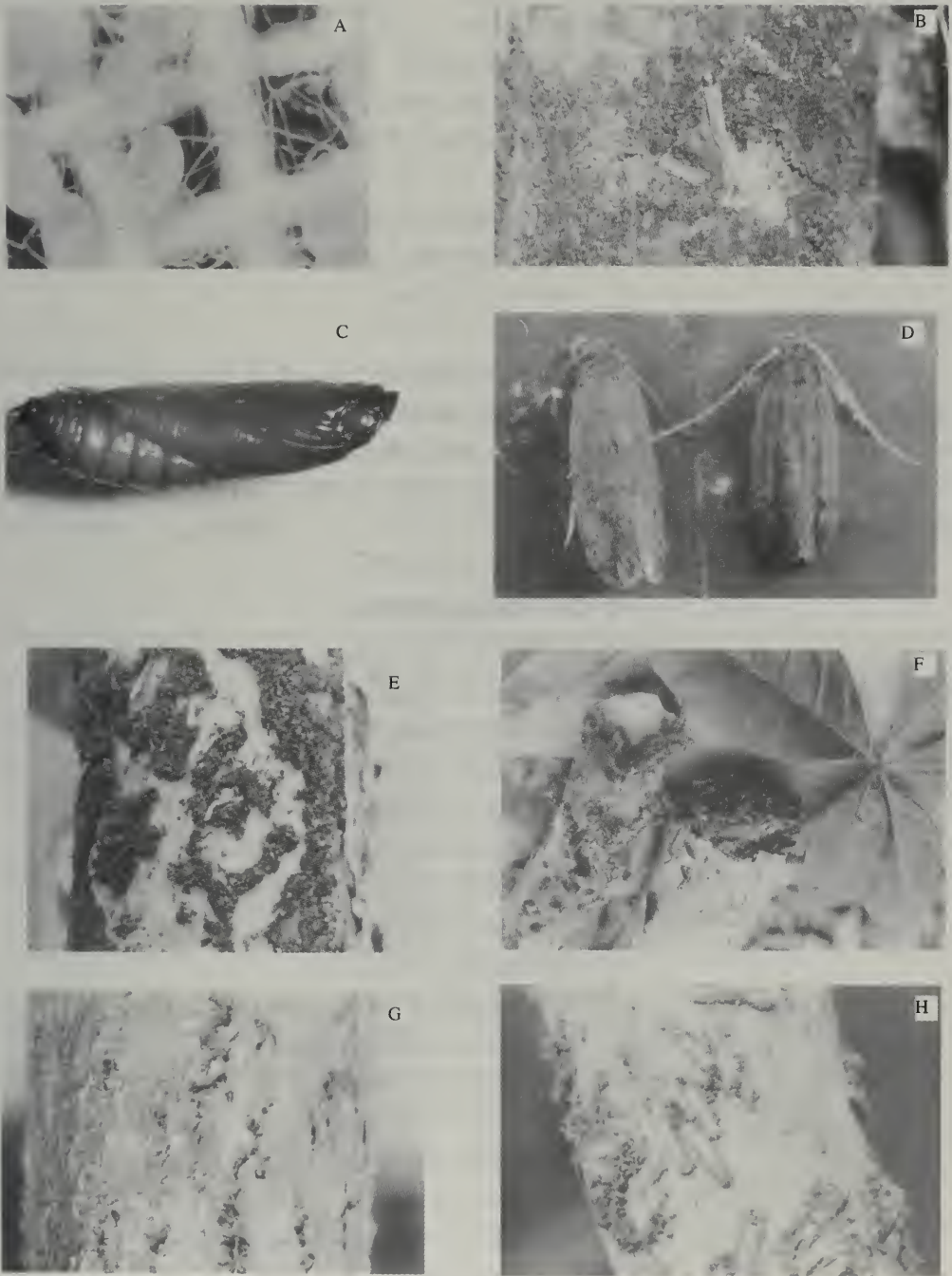


图 13-1 蔗扁蛾的不同发育阶段、寄主植物被害状及生物防治效果

A. 卵; B. 幼虫; C. 蛹; D. 成虫; E. 巴西木被害状; F. 发财树被害状; G. 巴西木树干上的茧; H. 施用线虫 72h 后死亡的幼虫

卵：淡黄色，椭圆形，长 0.5~0.7mm，直径 0.3~0.4mm；卵单粒散产，或成堆成片，数十粒甚至百粒以上。

幼虫：体白色，背面具多数成对的褐色斑点；老熟幼虫体长 20mm 左右，充分伸展可达 30mm 左右，粗约 3mm；头部宽约 2.5mm，红褐色。

茧：长 14~20mm，宽约 4 mm，有白色丝织成，外表粘以木屑碎片和粪粒等杂物。茧结在树皮下的蛀孔中，有时多个茧密集一处，羽化后的茧端均有半露的蛹壳；当幼虫在植株基部为害，或气候转凉而幼虫钻入土中时，茧则结在土中而表面黏附有许多粪粒和土等，颜色深暗。

蛹：长 9~12mm，宽 2~3.5mm。常为亮褐色，背面暗红褐色；头顶具有发达的额突，为粗壮宽三角形的坚硬突出物，为羽化时破茧和钻孔的重要工具。

二、寄主植物

自传入中国以来，蔗扁蛾的寄主范围在不断扩大之中。根据 Davis 和 Peña (1990) 以及我国近年来不同作者的调查结果(程桂芳和杨集昆, 1997a; 李健, 1998; 张古忍等, 2000a, 2000b; 田世堯等, 2000; 沈杰等, 2002; 商晗武等, 2002; 商晗武等, 2003; 杜予州等, 2003), 记录的寄主植物已由原来的 22 科 49 种增加到 29 科近 104 种(表 13-1), 新的寄主植物在不断发现中。

表 13-1 蔗扁蛾的寄主植物

科	种	
龙舌兰科 Agavaceae	龙舌兰 <i>Agave americana</i> L.	
	朱蕉 <i>Cordyline fruticosa</i> (L.) A. Chev.	
	马尾铁 <i>Cordyline</i> sp.	
	红叶剑朱蕉 <i>C. stricta</i> Endl.	
	铁树 <i>C. terminalis</i> (L.) Kunth	
	海南龙血树(山海带) <i>Dracaena camboiana</i> Merr. et Chun	
	异味龙血树(太阳神) <i>D. deremensis</i> cv. <i>Virens</i> Compacta	
	香龙血树(巴西木) <i>D. fragrans</i> (L.)	
	香龙血树金星变种 <i>D. fragrans</i> (L.) Ker-Gaus var. <i>massangeana</i>	
	五彩朱蕉 <i>D. marginata</i> cv. <i>Tricolor</i>	
	金边香龙血树 <i>D. marginata</i> Lam.	
	黄边竹蕉 <i>D. reflecta</i> cv. <i>Variegata</i>	
	反折香龙血树(百合竹) <i>D. reflexa</i> Lam.	
	酒瓶兰 <i>Nolina revurvata</i>	
	海南龙血树(山海带) <i>Pleome camboiana</i> Men. et Chun	
	荷兰铁柱 <i>Yucca aleifolia</i>	
	象脚丝兰(荷兰铁) <i>Y. elephantipes</i> Regel	
	丝兰 <i>Yucca</i> sp.	
	石蒜科 Amaryllidaceae	朱顶兰 <i>Amaryllis vittata</i> Ait
		朱顶红 <i>Hippeastrum vittatum</i>

科	种
天南星科 Araceae	海芋 <i>Alocasia macrorrhiza</i> (L.) Schott 芋 <i>Colocasia esculenta</i> Schott. 大叶发财树(绿巨人) <i>Dieffenbachia daguensis</i> 花叶万年青 <i>Dieffenbachia picta</i> 绿萝(黄金葛) <i>Epipremnum aureum</i> Schott 青苹果 <i>Philodendron eandena</i> 喜林芋(红宝石) <i>P. imbe</i> 喜林芋 <i>P. scandens</i> Lindl. 红柄喜林芋(绿宝石) <i>P. erubescens</i> cv. Green emerald 翼柄白鹤芋(银苞芋) <i>Spathiphyllum floribundum</i> Schott 白鹤芋 <i>S. floribundum</i> Clecelandii 合果芋 <i>Syngonium podophyllum</i> Schott
五加科 Araliaceae	八角金盘 <i>Fatsia japonica</i> (Thunb.) Decne et Planch 圆叶南洋森 <i>Polyscias baltouriana</i> Bail 印度南洋森(羽叶福禄桐) <i>P. fruticosa</i> (L.) Harms 南洋森 <i>P. fruticosa</i> Harms, "elegans" 鹅掌柴 <i>Schefflera arboicola</i> (Endl.) Harms
紫菀科 Asteraceae	大丽花 <i>Dahlia</i> sp.
木棉科 Bombacaceae	木棉 <i>Bombax malabaricum</i> DC 爪哇木棉 <i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn 马拉巴栗(发财树) <i>Pachira macrocarpa</i> (Cham et Schlecht) Wall
凤梨科 Bromeliaceae	美叶光萼荷(蜻蜓凤梨) <i>Aechmea fasciata</i> (Lindl.) Baker 美叶光萼荷 <i>A. fasciata</i> (Lindl.) Baker "Variegata" 垂蔓果子花 <i>Guzmania lingulata</i> var. \times <i>magnifica</i> (Hort.) 三色叶凤梨 <i>Nidularium tricolor</i>
番木瓜科 Caricaceae	番木瓜 <i>Caria papaya</i> L.
仙人掌科 Cactaceae	仙人掌 <i>Opuntia dillenii</i>
旋花科 Convolvulaceae	番薯 <i>Ipomoea batatas</i> Lam.
苏铁科 Cycadaceae	苏铁 <i>Cycas revaluta</i> Thunb.
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣 <i>Dioscorea</i> sp.
大戟科 Euphorbiaceae	一品红 <i>Euphorbia pulcherrima</i> Wild.
牻牛儿苗科 Geraniaceae	天竺葵 <i>Pelargonium hortorum</i> Bailey
苦苣苔科 Gesneriaceae	苣苔花 <i>Gloxinia</i> sp. 非洲紫苣苔 <i>Saintpaulia</i> sp.
鸢尾科 Iridaceae	唐菖蒲 <i>Gladiolus</i> sp.
豆科 Leguminodae	合欢 <i>Albizia julibrissin</i> Durazz.

科	种
	象耳豆 <i>Emerolobium</i> sp.
	杂色刺桐 <i>Erythrina variegata</i> L.
百合科 Liliaceae	虎皮兰 <i>Sansevieria laurantii</i> Wildem.
	金边虎皮兰 <i>S. trifasciata laurentii</i> Wildem.
锦葵科 Malvaceae	朱槿(扶桑) <i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L.
	木槿 <i>Hibiscus</i> sp.
竹芋科 Marantaceae	条纹竹芋 <i>Maranta leuconeura massangeana</i> Schum.
	<i>Stromanthe sanguinea</i> Sonder
桑科 Moraceae	花叶垂榕 <i>Ficus benjamina</i> Goldenprincess
	垂叶榕 <i>F. benjamina</i> L.
	印度榕(橡皮树) <i>F. elastica</i> (H. A. Siebrecht)
	小叶榕 <i>F. microcarpa</i> L. f.
	金叶榕 <i>F. microcarpa</i> L. f. cv. 'Golden Leaves'
	大叶榕 <i>F. virens</i> Alt. var. <i>sublanceolata</i> (Miq.) Corner
	无花果 <i>Moraceae carica</i>
芭蕉科 Musaceae	粉蕉 <i>Musa cavendishi</i> Paxt
	大蕉 <i>M. paradisiacal</i> L.
	香蕉 <i>M. sapientum</i> L.
	鹤望兰 <i>Strelitzia</i> sp.
紫茉莉科 Nyctaginaceae	叶子花(九重葛) <i>Bougainvillea belmoreana</i>
兰科 Orchidaceae	兰花 "Orchids"
棕榈科 Palmaceae	假槟榔 <i>Archontophoenix alexandrae</i> Windle. et Drude
	山葵(皇后葵) <i>Arecastrum</i> sp.
	刺棕棒 <i>Bactris</i> (= <i>Gulielma</i>) <i>gasipaes</i> HBK
	短穗鱼尾葵 <i>Caryota mitis</i> Lour.
	鱼尾葵 <i>C. ochlandra</i> Hance
	袖珍椰子 <i>Chamaedorea elegans</i> Mart.
	竹荃玲珑椰子(夏威夷椰子) <i>C. erumpens</i> H. E. Moore
	赛氏袖珍椰子 <i>C. seifrizii</i> Burret
	散尾葵 <i>Chrysalidocarpus lutescens</i> H.A. Wendl
	猩猩椰子(红槟榔) <i>Cyrtostachys lakka</i> Becc. SF.
	酒瓶椰子 <i>Hyophorbe lagenicaulis</i> H. E. Moore
	蒲葵 <i>Livistona chinensis</i> R. Br.
	槟榔竹(加拿列海枣) <i>Phoenix canariensis</i> Hort et Cheb.
	软叶刺葵(美丽针葵) <i>P. roebelentii</i> O'Brien
	国王椰子 <i>Ravenea rivularis</i> Jum et Perrier

科	种
	棕竹 <i>Rhapis excelsa</i> (Thb.) Henry
	王棕(大王椰子) <i>Roystonea regia</i> (Kunth)
	棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i> (hook. f.) H. Wendl
	狐尾椰子 <i>Wodyetia bifurcata</i> A. K. Irvine
禾本科 Poaceae	竹子 Bambusoideae
	甘蔗 <i>Saccharum officinarum</i> L.
	玉米 <i>Zea mays</i> L.
茄科 Solanaceae	辣椒 <i>Capsicum</i> sp.
	茄 <i>Solanum melongena</i> L. var. <i>esculenti</i> Nees
	马铃薯 <i>S. tuberosum</i> L.
旅人蕉科 Strelitziaceae	旅人蕉 <i>Ravenala madagascariensis</i> Adans
马鞭草科 Verbenaceae	常山 <i>Clerodendrum</i> sp.

第三节 传入途径与入侵成因

蔗扁蛾究竟何时何地通过什么途径传入我国还是一个谜, 目前已无从考证。作为国际性检疫害虫, 蔗扁蛾主要以人为传播为主, 发生为害也主要是由于远距离的人为传播。据杨集昆和程桂芳(1997)报道, 此虫此前并不存在于我国, 系我国新记录种。庞林(2001)认为, 蔗扁蛾的发生是花卉产业蓬勃发展的副产品。在花场的投建过程中, 大量引进外来物种, 如巴西木、发财树和马尾铁等虫源花木, 但又缺乏必要的检疫措施, 使得一些危险性的病虫害也就畅通无阻地进来了。因此, 一般认为, 该虫是 20 世纪 80 年代末、90 年代初随巴西木的大量进口而传入我国的(杜予州等, 2003)。该虫扩散蔓延之速, 实为罕见。分析其原因主要有以下几个方面(程桂芳等, 1997; 杜予州等, 2003)。

一、寄主植物的频繁调运

近年来, 我国大量进口了巴西木和发财树等优美的观赏植物。这些植物进口后, 先在广东、海南等热带和亚热带地区培育, 然后再销往全国各地。广东、海南湿热的气候条件与蔗扁蛾原产地发生条件的高度一致性, 导致了该虫能在广东、海南迅速定殖下来, 并迅速繁殖, 从而成为蔗扁蛾的虫源地。据杜予州等(2003)的调查结果, 凡是从广州调运至江苏地区的巴西木和发财树, 均已带虫, 有些当年已有明显的危害状, 有的当年无明显的危害状(受害初期), 但第二年均会出现明显的危害状。因此, 受害的巴西木和发财树的频繁调运是蔗扁蛾迅速扩散蔓延为害的主要原因。

二、很强的繁殖与适应能力

蔗扁蛾具有很强的繁殖力, 在适宜的环境条件下, 每雌平均产卵 250 粒左右(温瑞贞等, 2002), 卵的孵化率高达 80%以上(杜予州等, 2003)。同时, 由于其寄主范围广, 对

环境条件适应性强；加之其作为外来物种，缺乏有效的天敌制约，幼虫又生活隐蔽。因此，适宜的环境条件导致了虫口数量的迅速增加，为其蔓延扩散提供了足够的虫量。

三、适宜的环境条件

蔗扁蛾随巴西木和发财树传入中国后，广东、海南适宜的气候条件使得其能迅速定殖并建立种群。虽然蔗扁蛾在我国大部分地区的气候条件下不能越冬存活(杜予洲等，2003)，但从广东、海南运往全国各地的花木都是在温室大棚中，温室内环境条件非常适宜蔗扁蛾的定殖。因此，可以这样认为，全国各地都适合于蔗扁蛾的发生为害。事实也是如此，全国各地对该虫的报道已经证明了这一点(见本章第一节)。

四、认识不足与地方保护

欧洲与地中海地区植物保护组织(European and Mediterranean Plant Protection Organism, EPPO, 1993)、亚太地区植物保护组织(APPO)和北美地区植物保护组织(NAPPO)等都将蔗扁蛾列为检疫害虫。由于寄主植物在受害初期难以发现，给检疫工作带来了一定的困难。据花卉经营者反映，新购进的巴西木和发财树在第一年基本上没有问题，到第二年则出现严重危害。同时，加之一些部门的有关人员对该虫的认识不足，检疫不严，从而造成了该虫的扩散蔓延。

对某些花卉经营者来说，没有及时对新引进的巴西木和发财树进行熏蒸等有效的防范处理，即使发现危害，也没有意识到其严重性，对受害而未死亡的植株置之不理，对已枯萎死亡的植株只是弃之一旁，没有及时处理，成为蔗扁蛾的集散地。同时，部分花卉经营者出于自身经济利益的考虑，即使发现有危害症状，也采取秘而不宣的态度，对受害植株未加任何处理就销往其他地方，从而加速了该虫的扩散蔓延。

第四节 危害现状与生态经济影响

从蔗扁蛾在我国的迅速蔓延扩散，其扩散之迅速与危害之烈可见一斑。据庞林(2001)报道，在广西北海，自确定发现蔗扁蛾后7个月，巴西木和发财树两种市场行情看好的室内观赏植物遭遇灭顶之灾，有虫株率达50%~90%，单株虫口高达150头。自此之后，几乎所有的花卉场都停止引进或栽培发财树和巴西木。其他花木如苏铁、散尾葵、凤尾葵、马尾铁等不同程度相继受害。截止2000年10月底，北海市共有13种植物受害，其发生范围从生产场所到经营点，从道路、宾馆、花坛到家庭阳台盆花，纵向横向扩展速度令人震惊，经济损失愈200万元。

杜予洲等(2003)在江苏也做了类似的调查。他们发现，凡是有巴西木和发财树的地区均有蔗扁蛾危害，且危害程度无区域差异。2001年，扬州和苏州几个较大的花木公司，因蔗扁蛾造成的损失平均达几万元；在苏州某盆景开发中心调查时发现，发财树受害率达52.6%，巴西木27.8%，印度橡树46%。2002年，在苏州下辖的吴江、常熟、张家港、昆山、太仓、吴中等六市(区)，各花卉生产基地和苗圃的巴西木、发财树均不同程度受害，且寄主范围也在进一步扩大。在扬州，于2001年3月调查时，仅发现蔗扁蛾零星发

生, 但到同年 10 月份调查时, 巴西木的受害率达到 90%以上。而在泰州的一个苗圃, 几百株巴西木则全部被蛀食。盐城某公园除巴西木、发财树受害(危害率达 95%和 36.7%)以外, 散尾葵的受害率也已经达到 44.4%。

第五节 生物学特性

一、生活史

温瑞贞等(2002)详细报道了蔗扁蛾的生活史。蔗扁蛾完成一个世代需要 60~121d, 平均 90.5d, 这略长于 50~70d 的记录(Davis and Peña, 1990), 在广州地区全年可发生 4 代。

卵期 7d, 比较整齐, 这与 Davis 和 Peña(1990)在 24℃ 下的研究结果基本一致, 但比程桂芳和杨集昆(1997b)和王晓容等(1999)的研究结果要长。

幼虫期是该虫的为害期, 长达 37~75d, 按头壳的宽度, 可将幼虫期划分为 7 龄。一龄幼虫期很整齐, 为 4d; 二龄和三龄幼虫最长 5d, 最短 3d; 四龄幼虫最长为 7d, 最短 4d, 以 5~6d 为主; 五龄幼虫最长 12d, 最短 5d, 以 7~9d 为主; 六龄幼虫最长 20d, 最短 8d, 以 14~16d 为主; 七龄幼虫最长 20d, 最短 8d, 以 14~16d 为主。七龄幼虫在单头饲养条件下的化蛹率不高, 仅为 37.5%。

蛹期最长 24d, 最短 11d, 以 13~17d 为主, 羽化率 82.35%。蛹在羽化前, 头部露出茧外, 约 1d 后, 成虫羽化。羽化后的蛹壳有一大部分露出茧外。在野外受害的巴西铁和发财树等植物上, 常可见成群露出虫洞外的蛹壳, 这是成虫羽化后留下的。

雌、雄成虫的寿命有所差异, 其中雌性的寿命略短于雄性。雌性成虫最长 28d, 最短 3d, 平均 8.4d; 雄性成虫最长 29d, 最短 4d, 平均 11.5d。

二、幼虫龄期的划分

幼虫龄期的划分以头壳的宽度为标准。表 13-2 记录了 1 龄~7 龄幼虫的头壳宽度, 这与 Davis 和 Peña(1990)和王晓容等(1999)的研究结果基本一致。

初孵幼虫破卵后, 依靠口中的细丝从卵上落下。在群养条件下, 高密度的幼虫有相互残食的现象, 这能导致幼虫种群密度的显著下降。

表 13-2 各龄期幼虫的头壳宽度*

龄 期	头壳数	宽度范围/mm	头壳宽度	增加倍数
			Mean±SD/mm	
一龄	17	0.16~0.24	0.18±0.02	
二龄	15	0.32~0.40	0.35±0.03	1.94
三龄	21	0.53~0.67	0.61±0.05	1.74
四龄	22	0.80~1.01	0.93±0.06	1.52
五龄	24	1.12~1.44	1.25±0.10	1.34
六龄	13	1.57~2.08	1.71±0.02	1.37
七龄	28	1.60~2.40	2.01±0.22	1.17
平均				1.51

* 引自温瑞贞等(2002)。

三、温度对蔗扁蛾发育的影响

何国锋等(2001)研究了温度对蔗扁蛾发育的影响。温度显著影响蔗扁蛾各虫态的发育,在 15~28℃ 条件下,发育历期随温度的升高而缩短,30℃ 对发育已有延迟作用,33℃ 下幼虫不能完成发育。此外,15℃ 下,发育历期显著延长。卵、幼虫、蛹和世代的发育起点温度分别为 $11.2 \pm 3.5^\circ\text{C}$ 、 $8.8 \pm 1.4^\circ\text{C}$ 、 $11.0 \pm 1.4^\circ\text{C}$ 和 $11.1 \pm 1.8^\circ\text{C}$,这与鞠瑞亭等(2003)报道的幼虫不能在低温度的野外条件下越冬相一致。

温度变化明显影响蔗扁蛾的存活率。在 33℃ 条件下,一龄幼虫的存活率为 13%,到五龄仅 1% 存活,幼虫不能完成发育。成虫的寿命随温度升高而缩短,雌性的寿命长于雄性(何国锋等,2001)。

四、虫的生活习性与产卵量

成虫在羽化前,蛹的头部露出茧壳,约 1d 后成虫羽化。羽化后的成虫喜暗,常隐藏于树皮裂缝或叶片背面。成虫受惊后除作短距离跳动外,还可快速飞行,最远距离可达 10m 左右。寄主的转移以及对寄主的选择,与成虫的习性、成虫的分散转移有关。成虫羽化后,可从原寄主植物转移至另一种植物。蔗扁蛾的寄主转移速率可用世代数为单位来估算。

成虫的交配多在凌晨 2:00~3:00 时,也有在上午 8:00~10:00 时进行的,交配的时间长短不一,最长的持续近 1h,大多 0.5h 左右。成虫的交配需要一定空间,在大小不同的试管内,成虫都不交配也不产卵,而在各种型号的烧杯内,则不存在交配与产卵障碍。

成虫在羽化 4~7d 后产卵,少数在羽化后 1~2d 内就产卵。产卵量为 253.1 ± 65.2 粒 ($n=20$),最少 145 粒,最多 386 粒;经解剖未产卵雌性成虫的卵巢,卵巢内的成熟卵粒最长达 460 粒,最少 216 粒。产下的卵单粒或成团,淡黄色,孵化前变为黄褐色,双目镜下可见一龄幼虫的褐色头壳。

在 28℃、相对湿度 75% 条件下,羽化后的第 1~4d 的产卵量占总产卵量的 80.5%,第 3d 最多,占 27.6%,第 5d 起产卵量剧减。

五、幼虫的生活习性与为害症状

蔗扁蛾的食性十分复杂,有钻蛀性、腐食性和杂食性,可供其选择的食物非常广泛。钻蛀性是对寄主造成危害的主要方式。而杂食性则有助于该虫的幼虫能在食物匮乏的条件下生存和扩散。幼虫也能在各种湿润、含有纤维素或纤维素制品如滤纸的环境下生长发育。初孵幼虫能钻入其成虫的尸体内部取食,表现其腐食性的一面。因此,幼虫食性的复杂性,无疑有助其渡过食物短缺的不良环境和寄主转移。

蔗扁蛾对不同寄主植物的为害症状因不同寄主种而有所差异(Davis and Pena, 1990; 程桂芳和杨集昆, 1997a, 1997b; 张占忍等, 2000, 2002; 高晗武等, 2001a)。以香龙血树(巴西铁)和巨丝兰(荷兰铁)为例,前者的表皮有较大的裂纹,韧皮部较柔软,木质部坚硬,初孵的幼虫通过表皮的裂纹钻入韧皮部,随着幼虫的长大和食量的增加,幼虫不停地取食韧皮部,直到剩下一层薄薄的表皮;一般来说,木质部被取食的较少,但当韧皮

部被取食完毕后，幼虫同样能取食木质部而完成其发育。相反，巨丝兰(荷兰铁)的表皮较光滑，裂纹少，韧皮部薄而且硬，但木质部(髓部)较疏松，当其树干被锯成段而栽于盆中时，蔗扁蛾的初孵幼虫首先进入木质部取食而有害植物，其结果往往是将荷兰铁蛀得只剩下一层硬木壳，里面充满了虫粪。

马拉巴栗(发财树)是另一种被害严重的植物，其材质不同于上述的香龙血树和巨丝兰，木质部和韧皮部都比较疏松，表皮光滑。但该种植物在作为观赏盆栽植物时，往往是以3~5株植物像辫子一样扭在一起的。各植株之间扭在一起的缝隙为蔗扁蛾初孵幼虫提供了生存的空间。因这一缝隙之间湿度大，水分充足，又有一些夹在其中的有机质，所以初孵幼虫首先就生活在这一缝隙中。随着虫体的增大和取食量的增加，幼虫就从这里钻入植株体内。疏松的韧皮部和木质部成为蔗扁蛾理想的食物，较大的树莖内可能含有数条乃至几十条粗壮的幼虫，整个树莖则被该虫钻蛀成蜂窝状；较细小的树干经幼虫取食后，最后往往只剩下一层薄薄的表皮包裹着软软的虫粪，韧皮部和木质部已被取食干净。

棕榈科植物是另一类易被其寄生的植物。棕榈科植物都具有许多大的叶柄包裹着嫩叶和生长点，是蔗扁蛾成虫产卵和初孵幼虫生长的理想场所。同时，疏松的木质部又易为幼虫所钻蛀。被害的植物往往是生长点被取食后死亡。经解剖被害致死的鱼尾葵和散尾葵后发现，幼虫首先钻入顶端的幼嫩部分，然后往下取食，最后导致植株死亡。从该虫已经记录的寄主植物来看，棕榈科植物因易被寄生而成为其重要的一类寄主。美国夏威夷最先发现的蔗扁蛾就是在死亡的椰子树顶端找到的(Davis and Peña, 1990)。

当甘蔗和玉米受到为害时，幼虫往往将叶鞘或茎节上的嫩芽着生处作为突破口开始取食。小幼虫在叶鞘下取食，并逐渐穿入茎秆内取食。被害的茎秆被挖空并逐渐填上粪粒，老熟后在危害处的茎内织茧化蛹。玉米穗也是易受害的部位，幼虫最先蛀破苞叶，然后进入内部取食玉米粒。低龄幼虫进入玉米粒之间的缝隙取食，高龄幼虫则直接取食玉米粒。该虫在南美巴巴多斯(Barbados)广泛为害大田的甘蔗，其为害程度甚至超过了蔗螟 *Diatraea saccharalis* (F.) (Alam, 1984)。

对香蕉的危害，幼虫几乎为害除根和叶片外的所有部分(Oldham, 1928)。

腐食性是该虫能在食物匮乏的环境中生存并能广为传播的一个重要原因。在调查过的许多盆栽植物中，往往发现许多幼虫生活在土壤中，并能在土壤中结茧化蛹。其生活情景就如以腐殖质为食的蚯蚓。室内饲养更证明了该虫腐食性的存在。将初孵幼虫接入装有树下表土的烧杯内，幼虫能完成其生长发育过程并结茧化蛹。此外，在室内饲养该虫的过程中，需要将雌雄成虫饲养在一定大小的器皿中，以收集卵粒获取发育一致的幼虫。在某些情况下，死亡的成虫落在器皿的底部而来不及取出，一定时间后会发现许多的初孵幼虫已进入其母体腹部取食。幼虫还有取食卵的习性和相互残食的现象，但这种情况是比较罕见的。幼虫也能在各种湿润的、含有纤维素或纤维素制品如滤纸的环境下生长发育。

六、幼虫对不同寄主植物的嗜好性

蔗扁蛾对不同寄主的嗜好性，从网室中蔗扁蛾对多种寄主植物的选择试验表明，受

害最早、最重的是巴西木和发财树，其次也为害香蕉和甘蔗，而鹅掌柴、金叶榕受侵染较轻，表明其对寄主嗜好的不同。

第六节 预防、根除与控制

蔗扁蛾之所以被公认为国际性检疫害虫，很重要的一点就是它在韧皮部为害，防治相当困难(庞林, 2001)。从 1995 年首次在巴西木上发现蔗扁蛾至今，蔗扁蛾已对我国花卉业造成了一定的损失，尤其是华南地区；同时也对许多重要经济作物如甘蔗、香蕉等的安全生产构成了严重威胁。为有效解除蔗扁蛾对我国花卉业和农业所造成的潜在威胁，保护我国花卉业和农业生产，许多研究工作者对蔗扁蛾的综合治理进行了有益的探索。

一、加强虫情监测，严格检疫管理

准确的预测预报是有效开展植物保护的基础。迄今为止，虽然发现蔗扁蛾的寄主越来越多，但还是主要集中于巴西木和发财树等园艺植物上。因此，植物检疫和植保部门应加强对花卉市场和苗木基地的调查和监测，及时掌握虫情的发生发展情况，从而进行有效控制。目前，该虫的检验主要采用目测和手摸植株是否有受害状，如发现危害状，则剥查幼虫以作最后的确定；此外，也可以利用糖水诱集的方法进行成虫的监测(杜予州等, 2003)。

强化检疫管理是防止蔗扁蛾在我国进一步蔓延的重要措施(寻广新等, 2000)。因此，在蔗扁蛾发生区应重点抓好产地检疫和调运检疫工作，搞好蔗扁蛾的疫情监测，并采取严格的封锁和隔离措施，防止疫情的传出和扩散。在未发现蔗扁蛾的省份或地区应重点抓好防范工作，严格执行检疫，一旦发现虫情，及时进行扑灭。

二、化学防治

化学防治在害虫综合治理中具有重要的地位和作用。尽管对蔗扁蛾幼虫的化学防治有一定的难度，许多研究者还是对此进行了探索(程桂芳和杨集昆, 1997b; 田世尧等, 1999; 刘奎等, 2001; 高晗武等, 2001a; 杜予州等, 2003)，并积累了一定的防治经验。

程桂芳和杨集昆(1997b)认为蔗扁蛾幼虫入土越冬期是防治此虫的有利时机，用 40% 氧化乐果乳油 100 倍液灌茎段受害处，并用 90% 敌百虫粉剂 1:200 倍混土，撒在花盆表土内，每隔 15d 施 1 次，连续用 3 次可杀死越冬幼虫。在巴西木茎段局部受害时，可用 80% 敌敌畏乳油 1000 倍液喷洒，每隔 7~10d 喷 1 次，连续 2~3 次，药后用塑料薄膜包扎，可以收到很好效果。

当蔗扁蛾为害较为严重时，可以利用磷化铝片剂进行熏杀，用量在 $2\text{g}/\text{m}^3$ 时，幼虫的死亡率为 85% 以上；用量在 $5\text{g}/\text{m}^3$ 时，幼虫死亡率在 95% 以上，蛹死亡率达 100%；用量为 $10\text{g}/\text{m}^3$ 时，幼虫和蛹死亡率均达 100% (田世尧等, 1999)。但该方法容易使发财树嫩叶产生药害，而且用药量越高，药害越严重。此外，也可用 40% 氧化乐果乳油 1000 倍液喷洒，每周 1 次，连续 3 次。还可用 40% 氧化乐果乳油 1000 倍液与 90% 敌百虫 800 倍液混合后喷施。温室内，可挂敌敌畏布条熏蒸，每 30m^3 放 1 块，持续 3 个月。如要进

行彻底杀灭，除对被害植物进行彻底清除外，还需对土壤进行灭蛹和灭幼虫处理。夏季是虫口数量上升较快的时期，发现虫害应及时处理，可用二氯苯醚菊酯、甲基对硫磷、阿巴丁、乐果等农药喷雾，每周2次，持续4周，在产卵前将成虫杀灭(高晗武等，2001a)。

如果条件允许，可在密封的温室中对刚运回的巴西木、发财树用80%的敌敌畏乳油100倍液挂在室内熏蒸，3天1次，连续3次。盆栽时，用20%的速灭杀丁乳油2500倍液浸泡巴西木5min后再植入土中，对于已经植入的苗木，可用50%甲基对硫磷1500倍液或0.9%的爱福丁乳油2500倍液喷雾和从木桩顶部灌药。已经在温室内定殖的蔗扁蛾，可采用2.5%的溴氰菊酯乳油2500倍液喷雾4周，每周2~3次；也可以用50%的甲基对硫磷乳油1500倍液或20%的菊杀乳油2000倍液每周喷雾或灌药1次，连续3~5周(杜子州等，2003)。

三、生物防治

昆虫病原线虫能有效地防治蔗扁蛾的为害。Peña等(1990)的研究表明，在实验室和温室条件下，斯氏线虫 *Steinernema feltiae* Filipjev 和异小杆线虫 *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar, *H. heliothidis* (Kahn, Brooks and Hirschmann)能有效感染侵入土豆和竹子的蔗扁蛾幼虫，防治效果达到85%~100%。刘南欣等(1999)从昆虫病原线虫斯氏属 *Steinernema* 和异小杆属 *Heterorhabditis* 的3个品系中筛选出斯氏线虫 *S. carpocapsae* A₂₄ 是对蔗扁蛾幼虫敏感的线虫品系。结果表明，斯氏线虫 A₂₄ 在1:100条件下，48h后蔗扁蛾幼虫的死亡率为100%。

张古忍等(2000, 2002)利用昆虫病原斯氏线虫 A₂₄ 品系进行了大田试验。采用注射和喷雾两种方法，在处理72h后，注射法的平均死亡率为68.2%，喷施法的幼虫死亡率为71.5%，两者差异不显著；经96h后，两者的死亡率分别为98.1%和81.8%，差异显著($P < 0.05$)。从杀虫效果来说，注射法优于喷雾法，但注射法费时、费工，仅适用于少量寄主植物的处理，不适于大面积使用；而从平均死亡率和线虫作用的持效性来考虑，喷雾法能满足大面积防治的需要。喷雾的浓度以3000条/ml为宜，效果较好，成本较低，易被生产使用者所接受。姚彩媚和张彩霞(2000)也报道了类似的结果。

此外，田世尧等(1999)、程桂芳等(1998)也进行了利用昆虫病原线虫防治蔗扁蛾幼虫的研究，但仅限于室内或少量寄主植物的处理。

四、加强栽培措施管理

栽培措施管理是防止蔗扁蛾感染的有效措施。避免蔗扁蛾最嗜食的寄主植物如巴西木、发财树等在同一温室内种植，尽量避开寄主间的交叉危害。在巴西木的栽培过程中，一定要注意做好锯口的处理，封蜡要严实，封好后再刷一遍杀虫剂，防止成虫在此产卵。

第七节 应用与基础研究发展策略

现有文献资料主要集中在蔗扁蛾生物学和生态学方面的研究，特别是对寄主植物的调查报道。以下方面的内容则几乎没有报道：①蔗扁蛾自然天敌资源的调查以及天敌对

蔗扁蛾种群的调节作用；②各种环境因子对蔗扁蛾生长发育的综合影响及其对环境的适应；③蔗扁蛾的寄主选择机理、对不同寄主植物的嗜好性与适应性以及不同寄主植物对蔗扁蛾生长发育的影响；④蔗扁蛾外激素的鉴定及其应用研究等。这些方面的进一步研究将有助于了解蔗扁蛾的发生规律，以制定切实可行的防治策略。

对于蔗扁蛾的防治，以实施综合防治为宜。主要包括：①建议把蔗扁蛾列为检疫对象。对进口的花卉和观赏植物严格把关，重点检查进口的巴西木和发财树，凡有虫的要及时处理。对花场有虫的植物应清除后销售，避免进一步扩散。②处理有虫的遗弃花木。花农对有蔗扁蛾危害的巴西木、发财树、苏铁大批量地抛出场外，其中大量的幼虫，经蛹羽化为成虫后又飞回花场。其后果是，遗弃的花木成为新的虫源地。因此，遗弃的花木应及时集中烧毁。③处理有蔗扁蛾的花场，包括有虫的花卉和植物下的土壤。可以应用昆虫病原线虫或化学杀虫剂进行处理。

(张古忍 古德祥)

主要参考文献

- 陈品南, 何秀珍. 2002. 杭州发现蔗扁蛾危害观赏植物. 植物检疫, 16(2): 100 [Chen P N, He X Z. 2002. Banana moth found in Hangzhou. *Plant Quarantine*, 16(2): 100]
- 程桂芳, 杨集昆. 1997a. 北京发现的检疫性新害虫-蔗扁蛾初报. 植物检疫, 11(2): 95~105 [Cheng G F, Yang J K. 1997a. A primary report on banana moth, a newly recorded quarantine insect pest. *Plant Quarantine*, 11(2): 95~105]
- 程桂芳, 杨集昆. 1997b. 蔗扁蛾—巴西木上的一种新害虫. 植物保护, 23(1): 33~35 [Cheng G F, Yang C K. 1997b. The banana moth, a new insect pest on *Dracaena fragrans*. *Plant Protection*, 23(1): 33~35]
- 程桂芳, 杨集昆. 1997c. 蔗扁蛾在我国的发生情况. 植物保护, 23(6): 46 [Cheng G F, Yang C K. 1997c. The occurrence of banana moth in China. *Plant Protection*, 23(6): 46]
- 程桂芳, 鲁琦, 杨集昆. 1998. 蔗扁蛾严重发生的原因和防治对策. 植物检疫, 12(2): 95~97 [Cheng G F, Lu Q, Yang C K. 1998. The reason of occurrence of banana moth in China and its control strategies. *Plant Quarantine*, 12(2): 95~97]
- 丁清龙, 钟露霞, 李蔚明. 2002. 蔗扁蛾在赣南的发生与治理初报. 江西植保, 25(2): 52~53 [Ding Q L, Zhong L X, Li W M. 2002. Primary reports on the occurrence of the banana moth, *Opogona sacchari* in south Jiangxi and its control. *Plant Protection of Jiangxi*, 25(2): 52~53]
- 杜予州, 鞠瑞亭, 陆亚娟, 于淦军, 龚伟荣, 周福才. 2003. 江苏地区蔗扁蛾发生危害及防治. 江苏农业科学, (2): 38~40 [Du Y Z, Ju R T, Lu Y J, Yu G J, Gong W R, Zhou F C. 2003. The occurrence of banana moth in Jiangsu and its control. *Agricultural Science of Jiangsu*, (2): 38~40]
- 龚伟荣, 周国义, 段定仁. 1999. 南京发现蔗扁蛾危害. 植物检疫, 13(2): 102 [Gong W R, Zhou G Y, Duan D R. 1999. Banana moth found in Nanjing. *Plant Quarantine*, 13(2): 102]
- 古德祥, 张古忍, 张文庆. 2001. 新侵入害虫—蔗扁蛾. 昆虫知识, 38(5): 398~399 [Gu D X, Zhang G R, Zhang W Q. 2001. The invasive insect pest, *Opogona sacchari*. *Entomological Knowledge*, 38(5): 398~399, pls. 4]
- 何国锋, 温瑞贞, 张古忍, 古德祥, 李秋剑. 2001. 蔗扁蛾生物学及温度对发育的影响. 中山大学学报(自然科学版), 40(6): 63~66 [He G F, Wen R Z, Zhang G R, Gu D X, Li Q J. 2001. Biology of the banana moth, *Opogona sacchari* (Bojer) (Lepidoptera: Hieroxestidae) and the influence of temperature on its development. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 40(6): 63~66]
- 黄宏辉. 1998. 要加强对检疫性害虫蔗扁蛾的检疫. 植物检疫, 12(1): 10 [Huang H H. 1998. The banana moth should be quarantined during the transportation of ornamental plants. *Plant Quarantine*, 12(1): 10]
- 贾迎春. 1999. 危险性检疫害虫蔗扁蛾的生物学特性及防治. 甘肃农业科技, (9): 43~44 [Jia Y C. 1999. The biological characteristics and control of banana moth, a dangerous quarantine pest. *Agricultural Science and Technology of Gansu*, (9): 43~44]
- 鞠瑞亭, 杜予州, 于淦军, 龚伟荣. 2003. 蔗扁蛾生物学特性及幼虫耐寒性初步研究. 昆虫知识, 40(3): 255~258 [Ju R T, Du Y

- Z, Yu G J, Gong W R. 2003. Biological characteristics of the banana moth, *Opogona sacchari* and primary investigations on the cold tolerance of its larvae. *Entomological Knowledge*, 40(3): 255~258]
- 李健. 1998. 观叶花卉新害虫蔗扁蛾的发生及防治. 广东农业科学, (1): 45~46 [Li J, 1998. The occurrence and control of banana moth on ornamental plants. *Agricultural Science of Guangdong*, (1): 45~46]
- 李蔚明. 2002. 赣州市掌贡区花圃发现蔗扁蛾危害. 江西植保, 25(1): 19 [Li W M, 2002. The banana moth, *Opogona sacchari* found in the nurseries of Ganzhou. *Plant Protection of Jiangxi*, 25(1): 19]
- 刘发邦, 李占鹏, 钮效东, 刘杰, 王绍文, 孙明荣, 赵洪东, 李传礼. 2002. 蔗扁蛾生物学特性观察. 山东林业科技, (4): 18 [Liu F B, Li Z P, Niu X D, Liu J, Wang S W, Sun M R, Zhao H D, Li C L. 2002. Biology of the banana moth, *Opogona sacchari*. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, (4): 18]
- 刘奎, 符悦冠, 彭正强. 2001. 国内检疫性新害虫—蔗扁蛾的研究概况. 广西植保, 14(3): 19~22 [Liu K, Fu Y G, Peng Z Q. 2001. Review on studies on the quarantine insect pest, *Opogona sacchari* in China. *Plant Protection of Guangxi*, 14(3): 19~22]
- 刘南欣, 刘秀玲, 李秋剑, 古德祥, 张古忍, 张文庆. 1999. 昆虫病原线虫对蔗扁蛾敏感性试验初报. 昆虫天敌, 20(3): 143 [Liu N X, Liu X L, Li Q J, Gu D X, Zhang G R, Zhang W Q. 1999. A primary report on the susceptibility of entomopathogenic nematodes for controlling banana moth. *Natural Enemies of Insects*, 20(3): 143]
- 孟祥永, 张飞. 1999. 新疆发现检疫性新害虫—蔗扁蛾. 新疆林业, (4): 13 [Meng X Y, Zhang F. 1999. Banana moth, a quarantine insect pest, found in Xinjiang. *Xinjiang Forestry*, (4): 13]
- 庞联东, 庞万伟, 高飞, 曾伟琼. 2001a. 蔗扁蛾幼虫空间分布型及抽样技术研究. 植物检疫, 15(4): 208~210 [Pang L D, Pang W W, Gao F, Zeng W Q, 2001a. Investigation on the space distribution patterns and sample technology of banana moth larvae. *Plant Quarantine*, 15(4): 208~210]
- 庞联东, 庞万伟, 高飞, 曾伟琼. 2001b. 花卉蔗扁蛾幼虫空间分布型及抽样技术研究. 广西植保, 14(3): 1~2 [Pang L D, Pang W W, Gao F, Zeng W Q. 2001b. Investigation on the space distribution patterns and sample technology of banana moth larvae. *Plant Protection of Guangxi*, 14(3): 1~2]
- 庞林. 2001. 蔗扁蛾: 燃烧在北海. 广西林业, (1): 18~19 [Pang L. 2001. *Opogona sacchari*: burn in Beihai. *Guangxi Forestry*, (1): 18-19]
- 商晗武, 吴惠玲, 陈再寥, 周湾, 陈军昂. 2001a. 蔗扁蛾的为害特征及检疫防治技术. 浙江农业科学, (4): 205~207 [Shang H W, Wu H L, Chen Z L, Zhou W, Chen J A. 2001a. Destructive characteristics of banana moth and its quarantine technology. *Agricultural Science of Zhejiang*, (4): 205~207]
- 商晗武, 吴惠玲, 袁亦文, 吕子能, 姚淑英, 朱南中, 黄子洪, 周谷平, 周继芳, 蒋大双. 2001b. 浙江省观赏植物苗圃和花卉市场发现蔗扁蛾危害. 植物检疫, 15(5): 310~312 [Shang H W, Wu H L, Yuan Y W, Lue Z N, Yao S Y, Zhu N Z, Huang Z H, Zhou G P, Zhou J F, Jiang D S. 2001b. Banana moth found in the nurseries and markets of ornamental plants in Zhejiang. *Plant Quarantine*, 15(5): 310~312]
- 商晗武, 朱彩娥, 陈品南, 周湾, 何秀珍, 王荣洲, 沈火明, 沈幼莲. 2002. 蔗扁蛾寄主范围进一步扩大. 植保技术与推广, 22(2): 46 [Shang H W, Zhu C E, Chen P N, Zhou W, He X Z, Wang R Z, Shen H M, Shen Y L. 2002. More and more host plants of the banana moth, *Opogona sacchari* found. *Plant Protection Technology and Extension*, 22(2): 46]
- 商晗武, 祝荣增, 赵琳, 林云彪, 王荣洲, 周新昌. 2003. 外来害虫蔗扁蛾的寄主范围. 昆虫知识, 40(1): 55~59 [Shang H W, Zhu R Z, Zhao L, Lin Y B, Wang R Z, Zhou X C. 2003. Host plants of the invasive insect pest, *Opogona sacchari*. *Entomological Knowledge*, 40(1): 55~59]
- 商名清, 常兆芝, 华崇钊. 2002. 山东省发现检疫性害虫蔗扁蛾. 植物检疫, 16(4): 226~227 [Shang M Q, Chang Z Z, Hua C Z. 2002. *Opogona sacchari* found in Shandong province. *Plant Quarantine*, 16(4): 226~227]
- 沈杰, 张庆荣, 徐志宏. 2002. 浙江省花木危险性害虫—蔗扁蛾的检疫与防治. 浙江林业科技, 22(3): 38~42 [Shen J, Zhang Q R, Xu Z H. 2002. Quarantine and control of banana moth, *Opogona sacchari* in Zhejiang. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 22(3): 38~42]
- 田世尧, 王晓容, 叶向斌, 陈根洪, 郑志民. 1999. 蔗扁蛾的防治试验. 植物保护, 25(6): 26~27 [Tian S Y, Wang X R, Ye X B, Chen G H, Zhen Z M. 1999. Trials on controlling banana moth. *Plant Protection*, 25(6): 26~27]
- 田世尧, 叶向斌, 张志广, 王晓容, 曾扬, 吕德贤. 2000. 蔗扁蛾在广东省的危害范围调查. 植物检疫, 14(5): 272~273 [Tian S Y, Ye X B, Zhang Z G, Wang X R, Zeng Y, Lue D X. 2000. Investigation on the host plants of banana moth in Guangdong province. *Plant Quarantine*, 14(5): 272~273]
- 王晓容, 田世尧, 赖志勇, 江国涛, 杨森辉, 黄素青. 1999. 蔗扁蛾的发育观察. 植物检疫, 13(6): 338~340 [Wang X R, Tian S Y, Lai Z Y, Jiang G T, Yang S H, Huang S Q. 1999. Observation on the development of banana moth. *Plant Quarantine*, 13(6): 338~340]

- 魏国先, 王忠武, 经淑艳, 赵晓华. 1999. 吉林市发现蔗扁蛾危害巴西木. 植物保护, 25(6): 50 [Wei G X, Wang Z W, Jing S Y, Zhao X H. 1999. Banana moth found on *Dracaena fragrans* in Jilin city. *Plant Protection*, 25(6): 50]
- 温瑞贞, 张古忍, 何国锋, 古德祥, 李秋剑, 刘秀玲, 刘南欣. 2002. 新入侵害虫蔗扁蛾的生活史研究. 昆虫学报, 45(4): 556-558 [Wen R Z, Zhang G R, He G F, Gu D X, Li Q J, Liu X L, Liu N X. 2002. Life history of the banana moth, *Opogona sacchari* (Bojer) (Lepidoptera: Hieroxestidae) in China. *Acta Entomologica Sinica*, 45(4): 556-558]
- 吴志红. 2001. 广西蔗扁蛾发生情况初报. 广西植保, 14(4): 11-12 [Wu Z H. 2001. Primary report on the occurrence of banana moth in Guangxi. *Plant Protection of Guangxi*, 14(4): 11-12]
- 寻广新, 吴玉川, 明广增. 2000. 防止检疫性新害虫—蔗扁蛾在我国的蔓延. 植物检疫, 14(6): 351-352 [Xun X G, Wu Y C, Ming G Z. 2000. Prevent banana moth from dispersing in China. *Plant Quarantine*, 14(6): 351-352]
- 杨集昆, 程桂芳. 1997. 中国新记录的辉蛾科及蔗扁蛾的新结构(鳞翅目: 谷蛾总科). 武夷科学, 13: 24-30 [Yang J K, Cheng G F. 1997. The family Hieroxestidae new to China and some new structures of *Opogona sacchari* (Bojer) (Lep.: Tineoidea). *Wuyi Science Journal*, 13: 24-30]
- 姚彩媚, 张彩霞. 2000. 蔗扁蛾的发生和线虫防治试验. 植物检疫, 14(6): 347 [Yao C M, Zhang C X. 2000. The occurrence of banana moth and control using entomopathogenic nematodes. *Plant Quarantine*, 14(6): 347]
- 张古忍, 古德祥, 刘秀玲, 李秋剑, 刘南欣. 2000a. 新入侵害虫蔗扁蛾的寄主范围正在扩大. 植物保护学报, 27(3): 283-284 [Zhang G R, Gu D X, Li Q J, Liu X L, Liu N X. 2000. The known and newly found host plants of the banana moth, *Opogona sacchari* (Bojer). *Acta Phytolacica Sinica*, 27(3): 283-284]
- 张古忍, 古德祥, 温瑞贞, 何国锋, 李秋剑, 刘秀玲, 刘南欣. 2000b. 新害虫蔗扁蛾的形态、寄主、食性、生物学及其生物防治. 广西植保, 13(4): 6-9 [Zhang G R, Gu D X, Wen R Z, He G F, Li Q J, Liu X L, Liu N X. 2000b. Morphology, host plants, feeding habits, biology and biocontrol of the new insect pest, banana moth. *Plant Protection of Guangxi*, 13(4): 6-9]
- 张古忍, 李秋剑, 刘秀玲, 古德祥, 刘南欣. 2002a. 蔗扁蛾幼虫的生物防治. 植物保护学报, 28(2): 191-192 [Zhang G R, Li Q J, Liu X L, Gu D X, He G. 2002a. Control of the larvae of *Opogona sacchari* (Bojer) by entomopathogenic nematodes. *Acta Phytolacica Sinica*, 28(2): 191-192]
- 张古忍, 李秋剑, 温瑞贞, 刘秀玲, 古德祥, 何国锋. 2002b. 新害虫蔗扁蛾幼虫的食性及其生物防治研究. 中国生物防治, 18(增刊): 13-15 [Zhang G R, Li Q J, Wen R Z, Liu X L, Gu D X, He G F. 2002b. Feeding habits and biocontrol of the larvae of banana moth, *Opogona sacchari*. *Chinese Journal of Biological Control*, 18(suppl.): 13-15]
- 张古忍, 张文庆, 古德祥. 1998. 新入侵害虫蔗扁蛾的寄主范围调查初报. 昆虫天敌, 20(4): 187 [Zhang G R, Zhang W Q, Gu D X. 1998. A primary report on the host plants of the newly introduced banana moth. *Natural Enemies of Insects*, 20(4): 187]
- 朱广济, 侯继秋, 王培. 1998. 检疫性新害虫—蔗扁蛾随花木调运传入我区. 新疆农业科技, (6): 20-21 [Zhu G J, Hou J Q, Wang P. 1998. The banana moth, a quarantine insect pest, was introduced into Xinjiang with the transportation of ornamental plants. *Agricultural Science and Technology of Xinjiang*, (6): 20-21]
- Alam M M. 1984. New insect pests of sugarcane in Barbados. *Barbados Sugar Technologists' Association, Second Annual Conference*, 1-6
- Bojer W. 1856. Report of the committee on the "cane borer". 1-46, 5 pls. H. Plaidean Government Printer, Port Louis, Mauritius
- Davis D R & Peña J E. 1990. Biology and morphology of the banana moth, *Opogona sacchari* (Bojer), and its introduction into Florida (Lepidoptera: Tineidae). *Proceedings of Entomological Society, Washington*, 92(4): 593-618
- European and Mediterranean Plant Protection Organism. 1993. Quarantine procedure methyl bromide fumigation of dracaean and yucca cuttings against *Opogona sacchari*. *Bulletin OEPP*, 23(2): 209
- Oldham J N. 1928. *Hieroxestis subcervinella* Wlk., an enemy of the banana in the Canary Islands. *Bulletin of Entomological Research*, 19: 147-166
- Peña J E, Schroeder W J, Osborne L S. 1990. Use of entomogenous nematodes of the families Heterorhabditidae and Steinernematidae to control banana moth (*Opogona sacchari*). *Nematropica*, 20: 51-55

第十四章 苹果蠹蛾

第一节 起源与分布	365	第四节 危害现状与生态经济影响评估	369
第二节 识别特征与为害症状	366	第五节 生物学特性	370
第三节 传入途径与入侵成因	367	第六节 主要调控技术	372

摘要 苹果蠹蛾 *Laspeyresia pomonella* (L.) 属鳞翅目, 小卷蛾科 Eucosmidae, 俗称苹果小卷蛾, 苹果食心虫, 是世界性蛀果害虫之一, 也是各国重要的检疫对象, 常造成苹果、梨、桃等水果的毁灭性危害, 引起各国政府和相关部门的高度重视。苹果蠹蛾起源于欧亚大陆南部, 其原始寄主为野生的苹果树, 以后开始为害苹果栽培品种, 并随着苹果栽培品种的分布而扩大适生范围, 迄今为止, 苹果蠹蛾已分布于全世界 69 个国家和地区。在我国仅分布于新疆和甘肃的酒泉地区。苹果蠹蛾主要以幼虫为害果实, 寄主主要有苹果、梨、杏、桃、樱桃、野山楂、板栗属、无花果属等植物, 并常与其他常见蛀果鳞翅目害虫混合发生。

苹果蠹蛾主要由随带虫果而传播, 幼虫和蛹还可以随果品包装箱和填充物等作远距离传播, 甚至杏干也可以作为其传播载体。作为入侵生物, 苹果蠹蛾对环境有较强的适应能力。它能成功地入侵并造成危害, 不仅与寄主植物密切相关, 而且入侵地的生态气候条件(包括纬度、温度、湿度、降雨量以及光照等)也是重要的因素, 纬度和温度决定苹果蠹蛾的发生世代和各虫态的发育状况, 幼虫和蛹的死亡率与降雨量和降雨强度呈正相关, 苹果蠹蛾属短日照兼性滞育昆虫, 一般成熟幼虫的滞育率为 25%~30%。苹果蠹蛾能造成毁灭性危害, 在新疆, 苹果和沙果第 1 代幼虫的蛀果率达 50% 左右, 第 2 代幼虫蛀果率达 80% 以上; 香梨蛀果率达 44%, 严重时也达到 60% 以上, 而造成的落果数量, 更是难以统计。

苹果蠹蛾发生世代随分布的区域不同而不同, 各地每年发生 1~4 代不等, 但越冬场所较复杂, 如老树下, 粗枝裂缝中、果树枝干内、空心树干中、根际树洞内、脱落树皮下、根际周围 3~5mm 表土内、植株残体中、干枯蛀果内, 以及果品储藏处、包装物等。成虫羽化后, 需要补充营养和水。成虫产卵对寄主有选择性, 最喜欢在苹果和沙果, 同种果树以上层产卵最多。幼虫钻蛀果实, 有转果为害习性, 不同果树的果实蛀入和为害方式略有差异。

关于苹果蠹蛾的检疫处理与调控技术有许多研究和报道, 检疫处理技术主要有溴甲烷熏蒸处理、低氧空气或混合气体处理、高温低氧及低温冷藏处理等均取得了很好的效果。田间调控技术主要包括利用性诱剂、释放赤眼蜂、喷洒苹果蠹蛾颗粒病毒制剂等生物防治措施。此外, 配合清洁果园, 集中处理残渣落果, 适当使用化学农药进行防治等均能有效降低苹果蠹蛾对其寄主水果的危害, 减少经济损失。

关键词 苹果蠹蛾 分布 寄主 传播 生物学特性 调控技术

Chapter 14 Codling Moth *Laspeyresia pomonella* (L.)

Abstract: Codling moth, *Laspeyresia pomonella* (L.), is a cosmopolitan insect pest and one of the most important quarantine pests in many countries, and is receiving more attention from governments and plant quarantine agents. Codling moth originated from southern Eurasia. Although its original host was *Malus pumila*, with the development of apple varieties, the codling moth extended its host range to apple cultivars. So far, codling moth distributed in 69 countries and areas around the world, with apple, pear, peach, cherry, apricot as its principal hosts. In China, codling moth only distributed in Xinjiang province and Jiuquan district of Gansu province.

Codling moth is mainly transmitted through larvae-infested fresh fruit. Larvae and pupae may also be transmitted through packing bins and filling materials or even through dry apricot. Although the invasive codling moth has a strong adaptive ability to environment conditions, successful invasion and establishment of the pest depend not only on the availability of suitable host plants, but also on geographical and climatic conditions of the invaded areas. Number of generations and the development periods of various stages are related to latitude and temperature, whereas mortality of larvae and pupae is positively related to rainfall and rainfall intensity. Codling moth is a facultative diapausing insect induced by short sun period. 25%~30% of matured larvae enter diapausing in natural condition. In Xinjiang, the mean infestation of 1st and 2nd generation larvae on apple fruit is about 50% and more than 80%, respectively; the mean infestation on delicious pears reaches 44% or even 66%. Meanwhile, damage by the insect pest results in a large amount of fallen fruits.

The number of generations of codling moth varies in different areas from 1~4 per year. Overwintering sites of mature larvae mainly include old trees, tree branches, tree roots, tree barks, soil, plant residues, dry fruits, packing bins, and so on. After emergence, the adults need supplementary food and water for egg development. Female adults prefer to oviposit on apple and Chinese pear-leaved crabapple. And on the same fruit tree, they prefer to oviposit on the upper part of the tree. Larvae tunnel on the fruit and feed on more than 2 fruits.

Management and regulation of the codling moth consist of quarantine measures and field control techniques. Quarantine treatments, such as methyl bromide fumigation, low oxygen-controlled atmosphere or controlled atmospheres, high temperature/low oxygen pulse, are usually employed. Field control techniques, such as spraying a granulosis virus, releasing *Trichogramma*, usage of sex pheromone lure, are often applied.

Key words: *Laspeyresia pomonella*, distribution, host plant, control technique, invasive alien species

第一节 起源与分布

一、起源

苹果蠹蛾 *Laspeyresia pomonella* (L.) 属鳞翅目 Lepidoptera, 小卷蛾科 Eucosmidae, 俗称苹果小卷蛾, 苹果食心虫, 异名有 *Cydia pomonella* Linne., *Carpocapsa pomonella* (Linne.) 和 *Grapholitha pomonella* (Linne.), 是世界性蛀果害虫之一, 原始寄主为野生苹果。现在苹果属 *Malus* 植物共 25 种左右, 分布于欧亚和北美大陆, 而现代栽培品种的祖先仅 1 种, 即大苹果或洋苹果 *M. pumila*。大苹果起源于欧亚大陆南部, 该地区苹果蠹蛾发生与寄主关系十分密切, 而且只严重危害野生或栽培苹果中的两个品系, 即 *M. pumila* 和 *M. sylvestris*, 很少危害苹果的其他品系和其他水果。在南部欧洲和小亚细亚, 苹果蠹蛾几乎是上述品系的专食性害虫, 因此, 可以认为野生苹果是苹果蠹蛾的最原始寄主(林伟等, 1997; Shel'deshova, 1967)。由此推断, 苹果蠹蛾起源于欧亚大陆中南部地区, 即欧洲泰加林带南部、前苏联中亚地区和亚洲西南部地区(林伟等, 1997)。

二、分布

苹果蠹蛾主要随寄主植物的分布而扩散, 最初可能仅局限于欧洲泰加林带南部及小亚细亚地区, 自 19 世纪以后, 随着苹果种植面积扩大, 该虫传播全世界, 迄今为止, 已广泛分布于除东亚以外的所有苹果产地(图 14-1)(林伟等, 1997)。

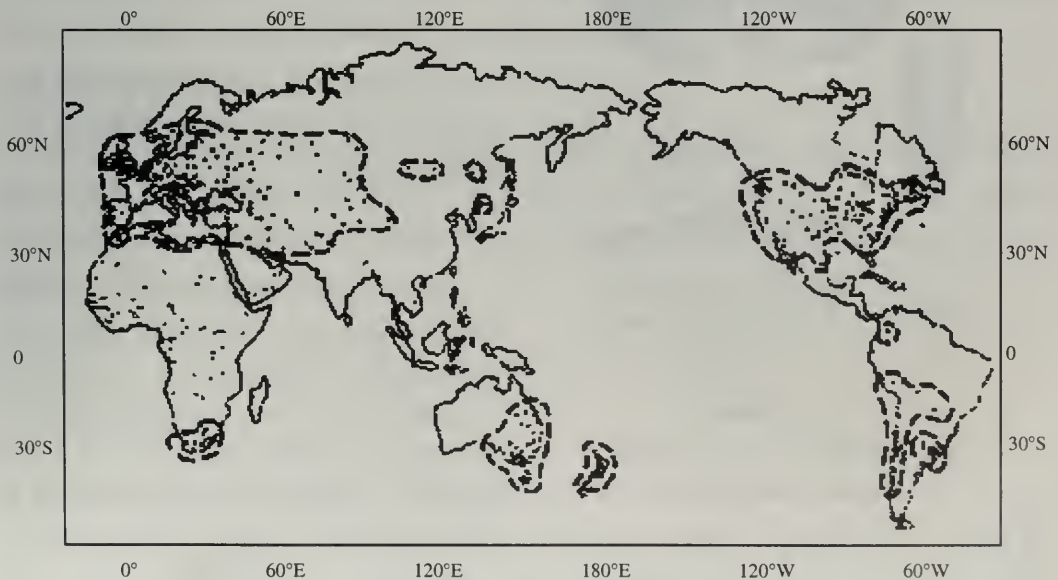


图 14-1 苹果蠹蛾世界分布图(由林伟绘制)

(一) 国外分布

苹果蠹蛾在国外的分布比较广泛,主要有奥地利、亚速尔群岛、比利时、英国、保加利亚、捷克、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、马耳他、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、撒丁、西西里、西班牙、瑞典、瑞士、南斯拉夫、马其顿、阿富汗、塞浦路斯、印度、伊朗、伊拉克、以色列、查漠和克什米尔、约旦、朝鲜、黎巴嫩、巴基斯坦、叙利亚、土耳其、俄罗斯、格鲁吉亚、乌克兰、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、阿塞拜疆、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、立陶宛、爱沙尼亚、拉托维亚、阿尔及利亚、加那利群岛、利比亚、马德拉群岛、毛里求斯、摩洛哥、南非、突尼斯、澳大利亚、新西兰、加拿大、美国、阿根廷、玻利维亚、巴西、秘鲁、乌拉圭等 69 个国家和地区(金瑞华, 1989; Masoodi *et al.*, 1987; 天津进出口检验检疫局, 2002)。

(二) 国内分布

我国 1953 年在新疆库尔勒最先发现苹果蠹蛾, 随后的调查发现, 该虫在南疆沿塔里木盆地边缘的轮台、库车、沙雅、新和、拜城、温宿、阿克苏、伽师、喀什、莎车、墨玉和和阗, 以及北疆的塔城、伊犁、乌鲁木齐、玛纳斯、吐鲁番及善善等地均有分布和危害(张学祖, 1957)。长期以来, 苹果蠹蛾一直仅在我国新疆有发生。1986 年传入甘肃省酒泉地区敦煌市, 在酒泉地区敦煌、酒泉、安西、玉门 4 县市 25 个乡镇、8 个农(林)场发生(林伟等, 1997; 甘肃省森林病虫害防治检疫站, 2000; 张耀荣和蒋银荃, 2001)。



图 14-2 苹果蠹蛾特征

1. 成虫; 2. 后翅脉; 3. 幼虫; 4. 幼虫体节;
5. 幼虫头部; 6. 蛹; 7. 雌蛹腹末

第二节 识别特征与为害症状

一、识别特征

苹果蠹蛾各虫态均大于苹果园中常见的梨小食心虫、桃白小食心虫和桃小食心虫(张学祖, 1957)。

(一) 成虫

体长约 8mm, 翅展 19~20mm。全体灰褐色并带紫色光泽, 雄虫色深, 雌虫色浅。复眼深棕褐色, 单眼周围黑色, 中间发黄色亮光。触角为简单丝状, 不到前翅前缘之半。前翅臀角处为深褐色、椭圆形纹, 有 3 条青铜色条纹, 其间显出 4~5 条褐色横纹(此为本种外形上的显著特征)

前缘具 5~6 组大小不等的深褐色斜纹。翅基部为褐色或淡褐色, 其外缘突出, 略成三角形。翅中部颜色最浅, 杂有波状纹。后翅黄褐色, 前缘成弧形突出, 不到前缘的一半处(张学祖, 1957; 刘友樵和白九维, 1985)。苹果蠹蛾与梨小卷蛾

(*L. pyrivora*)的成虫很相似，主要区别：梨小卷蛾前翅为石板灰色，横贯1条黑纹；基部黑褐色，有3条白纹；翅端部有1个眼状斑，呈铅色无光泽；雄虫前翅腹面无斑点，后翅腹面散布黑纹，基部无毛刷。

(二) 卵

扁平椭圆形，长1.1~1.2mm，宽0.9~1.0mm，中部略隆起，表面无明显花纹。初产时为半透明，随后发育成黄色和红色(张学祖，1957；刘友樵和白九维，1985)。

(三) 幼虫

成熟幼虫体长14~18mm，初孵幼虫为淡黄色，成长幼虫呈淡红色，背面颜色深而腹面颜色淡；头部黄褐色，侧单眼区深褐色，每侧有6个单眼，第1、第6单眼较大，呈椭圆形，第3、第4单眼较小；前胸气门最大，椭圆形，其次为第8节气门，其余大致相等，近乎圆形。腹足4对，趾钩为单序缺环(张学祖，1957；刘友樵和白九维，1985；金瑞华，1989)。苹果蠹蛾幼虫的近似种有苹小食心虫 *Grapholitha inopinata*、梨小食心虫 *G. Molesta*、李小食心虫 *G. funebrana*、桃白小卷蛾 *Spilonota albicana*、桃小食心虫 *Carposina niponensis*、梨大食心虫 *Nephopteryx pirivorella*、桃蛀螟 *Dichocrocis punctiferalis*，它们的末龄幼虫与苹果蠹蛾区别为苹小食心虫、李小食心虫、桃白小卷蛾和梨小食心虫的幼虫肛门处有臀栉，成熟幼虫体长在13mm以下；桃小食心虫、梨大食心虫、桃蛀螟的幼虫虽无臀栉，但幼虫的前胸K群为2根刚毛，也可以区别。

(四) 蛹

体长7~10mm，黄褐色，复眼黑色，喙不超过前足腿节。雌虫触角较短，不及中足末端；而雄虫触角较长，接近中足末端。中足基节显露，后足及翅均超过第3腹节而达第4腹节的前端。臀棘共10根(张学祖，1957；刘友樵和白九维，1985)。

二、为害症状

苹果蠹蛾以幼虫为害果实的果肉和种子(金瑞华，1989)。为害果实后所表现的症状随水果种类而异。苹果、沙果被蛀后，蛀孔外部逐渐有褐色虫粪排出，严重时，可堆积相当数量，以丝连缀成串，挂在蛀果之下；香梨被蛀后所排出的虫粪则为黑色(黄玉珍，2000)。

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

在我国，苹果蠹蛾在新疆为害苹果、梨的时间已久，何时传入已无从考证。至于传入地点，考虑我国新疆与原苏联的亚洲部分毗邻，该虫可能系早年由该地区传入新疆(张学祖，1957)。苹果蠹蛾主要随带虫果而传播，幼虫和蛹也可以随果品包装箱和填充物等远距离传播(金瑞华，1989；Hartsell *et al.*, 1992; Yokoyama *et al.*, 1994)。据马德成和马玉

玲(1997)报道,1984年,在果农未经防治、晾晒的杏干中,有3%~5%的杏干带有苹果蠹蛾老熟幼虫未脱果,其中在果内化蛹的不到1%。近年,在乌鲁木齐杏干市场也发现了杏干中有虫道、虫粪及活幼虫。因此,杏干也是传带苹果蠹蛾的重要载体。

二、入侵成因

苹果蠹蛾的广泛分布主要是靠人和运输工具传播的,但并不是所有传播都能成功地入侵和成灾危害,如受地理气候条件的影响,苹果蠹蛾在埃及、美国佛罗里达州、墨西哥中南部地区和加利福尼亚半岛等地就难以成功入侵(林伟等,1997)。苹果蠹蛾成功地入侵受许多条件的制约,其中苹果蠹蛾较强的环境适应性、寄主植物的广泛分布和生态气候条件是其主要的影响因素。

(一) 苹果品种是苹果蠹蛾入侵的基础

害虫成功入侵一个新的地区,固然与该地区的地理气候条件有关,但最重要的还要有适合害虫生长繁殖的寄主,苹果蠹蛾的起源和分布证明了这一点。在我国新疆,不仅有适合苹果蠹蛾生存和繁殖的野生苹果,而且一些引自原苏联的苹果品种,以及当地的沙果和香梨等均是其合适寄主。成虫产卵对树种和品种具有选择性,在甘肃酒泉地区,在一般苹果和沙果树产卵多于梨树;苹果树中以中秋里蒙、倭锦、黄元帅、黄太平等品种上产卵多,国光、祝光、红元帅、富士等品种上产卵较少;梨树中以酥梨最多,苹果梨、锦丰梨、乌酒香次之,鸭梨上产卵很少。产卵多的果树受害严重(张耀荣和蒋银荃,2001)。此外,有研究认为,被苹果蠹蛾为害的苹果能显著吸引苹果蠹蛾的初孵幼虫进一步为害,这种引诱物为(E, E)- α -farnesene (Landolt *et al.*, 2000)。

(二) 温度对苹果蠹蛾的影响

虽然苹果蠹蛾生长发育的适宜温度为15~30℃,且温度低于11℃或高于32℃时不利于其生长发育,但不同虫态或生理状态对低温的抗性不同,卵和非滞育性幼虫对低温较敏感(Newcomer, 1936),而滞育性幼虫则有较强的抗低温的能力,其过冷却点可达-27℃(Hagley, 1977),所以,只有当温度非常低(-20~-27℃)时,才能导致大量滞育幼虫死亡(Newcomer, 1920; Dean, 1989)。同样,苹果蠹蛾也有较强的抗高温能力,当温度达到33℃时,幼虫发育受影响,但只有当温度超过38℃时,才能造成大量幼虫死亡。所以,在一定时间内,一般苹果主产区的气温很难达到或超过苹果蠹蛾的致死高温。

(三) 湿度对苹果蠹蛾的影响

苹果蠹蛾生长发育的最适相对湿度为70%~80%,但田间相对湿度对成虫的交配和产卵影响较大,当相对湿度大于70%时,影响成虫的飞行,从而对成虫交配产卵不利,相对湿度小于70%时,成虫才产卵,即使相对湿度为35%~50%时,也不影响成虫的产卵(金瑞华,1989;林伟等,1997)。

(四) 降水对苹果蠹蛾的影响

降水与苹果蠹蛾幼虫和蛹的存活、幼虫化蛹和蛹的羽化、以及成虫的存活有密切的关系。降雨能明显降低田间卵量、幼虫存活率和蛀果率。浸水时间长短直接影响老熟幼虫和蛹存活与发育，浸水时间愈长，老熟幼虫和蛹的死亡率愈高，而越冬代老熟幼虫的化蛹率和蛹的羽化率愈低(图 14-3)(金瑞华等, 1996)。不同降雨强度能引起苹果蠹蛾幼虫和蛹的死亡率不同。随着降雨强度加大，老熟幼虫和蛹死亡率增加，而老熟幼虫的化蛹率和蛹的羽化率降低。此外，持续降水能显著影响成虫产卵(Hagley, 1976)，经常给苹果树浇水以及水中矿物含量差异均能影响成虫产卵和降低苹果的危害(Knight, 1998)。

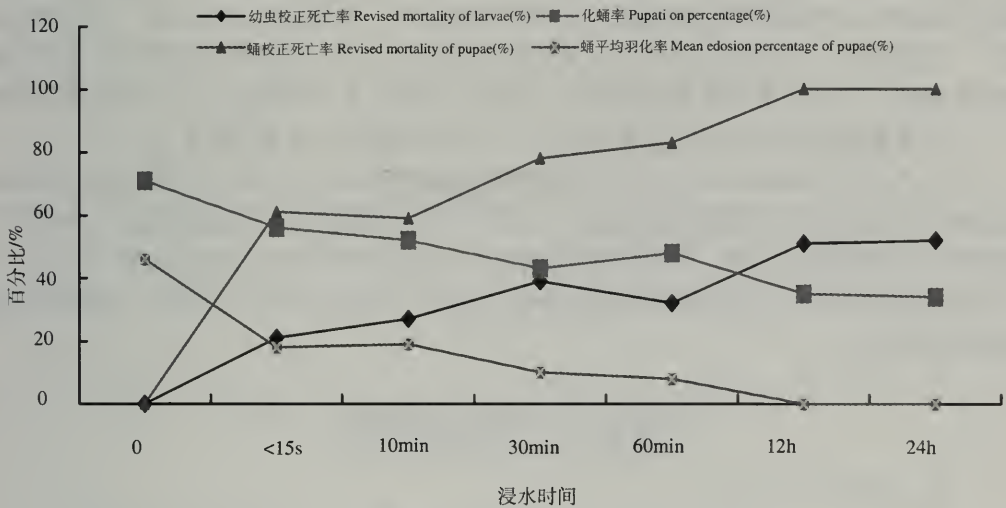


图 14-3 苹果蠹蛾老熟幼虫和蛹与浸水时间的关系
(据金瑞华等(1996)资料整理)

(五) 光周期对苹果蠹蛾的影响

苹果蠹蛾是短日照昆虫，光周期是直接引起成熟幼虫滞育的主要因素。由于光周期的影响，一般成熟幼虫的滞育率为 25%~30%。在北美苹果蠹蛾种群中，临界光周期与纬度密切相关，纬度每增加 10°，光周期增加 1.25h (在欧洲为 1.5h)(金瑞华, 1989; Riedl and Croft, 1978)。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

我国新疆自原苏联引进栽培苹果品种至今已有 100 多年的历史，苹果蠹蛾在新疆发生和为害也有近百年的历史。历年来，受害最严重的是苹果、沙果和库尔勒香梨，同时也为害桃、杏和榲桲。根据新疆苹果蠹蛾为害情况的调查，苹果和沙果第 1 代幼虫的蛀

果率达 50%左右,第 2 代幼虫蛀果率达 80%以上;香梨蛀果率达 44%,严重时也达到 60%以上,因苹果蠹蛾为害造成的落果数量,更是难以统计(张学祖等,1956,内部交流资料)。

苹果蠹蛾主要寄主有苹果、梨、杏、桃、野山楂、板栗属、无花果属等植物,这些寄主植物是我国北方大面积种植的水果,也是北方果农的主要经济来源。如果对苹果蠹蛾检疫和调控措施不当,按 50%的蛀果率计算,就意味着果农将造成巨大的经济损失,还有因落果而造成的经济损失更大。不仅如此,由于苹果蠹蛾是许多国家的重要检疫性害虫,其发生地区的水果失去了出口的机会,严重影响我国水果的外贸。曾经在英联邦农业局国际昆虫研究所(ABI)出版的苹果蠹蛾世界分布图上,将我国东部地区标为苹果蠹蛾分布区,致使我国近半个世纪闻名全球的库尔勒香梨和北方优质苹果不能出口创汇,经济损失巨大。从苹果蠹蛾目前的发展趋势来看,原来仅在我国新疆发生和为害,近几年,我国甘肃酒泉地区也有相当面积的分布和为害,大有东移的趋势。同时,随着国际贸易领域的扩展和国际旅行的增加,从 2000~2002 年,我国北京国际机场、上海浦东机场、广东南海局、塔城巴克图口岸以及台湾省等均从进口水果或旅客随带的洋水果中截获苹果蠹蛾,而且批次或数量不断增加。这给了我们一个严峻的警示,一旦检疫处理疏忽,让苹果蠹蛾扩展到我国北方苹果主产区,将会造成不可估量的损失。

此外,由于苹果蠹蛾对寄主植物果实的危害具有毁灭性,因此,长期以来在我国的新疆和甘肃酒泉地区苹果蠹蛾的防治中,仍然以化学农药为主。虽然果园有 5 种寄生苹果蠹蛾幼虫和蛹的寄生蜂,因种群增长慢和化学农药的使用难以控制其危害。同时,由于化学农药的使用,农药的残留问题也限制了苹果、梨等水果的出口创汇,影响经济效益和生态效益。

第五节 生物学特性

一、发生世代与越冬

苹果蠹蛾在北欧 1 年发生 1 代,南欧 3~4 代,中亚地区 4 代。我国新疆,北疆 1 年发生 2 代和一个不完全的第 3 代,南疆发生 3~4 代。在北疆,第 1 代为害期在 5 月下旬~7 月下旬,第 2 代为害期在 7 月中旬~9 月上旬,但第 1 代幼虫约有半数以上进入滞育。幼虫老熟后,常在老树下、粗枝裂缝中、果树枝干内、空心树干中、根际树洞内作茧化蛹,也可在脱落树皮、根际周围 3~5mm 表土内、植株残体中、干枯蛀果内,以及果品储藏处、包装物内作茧化蛹。一般随纬度增高,幼虫越冬场所由树干中部向下部转移,直到地下作茧越冬。此外,在新果园,常因树干光滑,多数幼虫在表土下作茧越冬(张学祖,1957;刘友樵和白九维,1985;金瑞华,1989;李保国和梅龙珠,1999)。

二、成虫习性

当春季日均气温高于 10℃时,苹果蠹蛾越冬幼虫开始化蛹,但持续时期较长(图 14-4)。当日均气温为 16~17℃时,越冬代成虫羽化进入高峰期。成虫羽化后,需要补充营养和水。雌蛾羽化后 2~3d 即可交尾,产卵前期多为 2~3d;卵散产,羽化后 6~12d 内为产卵高峰,每雌产卵 40 粒左右,最多可达 140 粒。雌蛾可再次交尾和产卵。成虫喜

产卵于光滑的表面。初产卵时，由于正值幼果期(表面多茸毛)，卵多产于叶上；随着果实长大，果面日趋光滑，雌蛾才将大量卵产于果实上。雌蛾产卵对寄主有选择性，最喜产卵于苹果、沙果(尤其喜产于中、晚熟品种)上，其次为梨(以苏梨最多，慈梨、巴梨次之，香梨再次之，鸭梨、白梨最少)。卵在树冠上的分布，以上层最多，中层次之，下层最少。从果园情况看，果树种植稀疏，树冠四周空旷，尤其在向阳面，着卵较多(张学祖，1957；金瑞华，1989)。

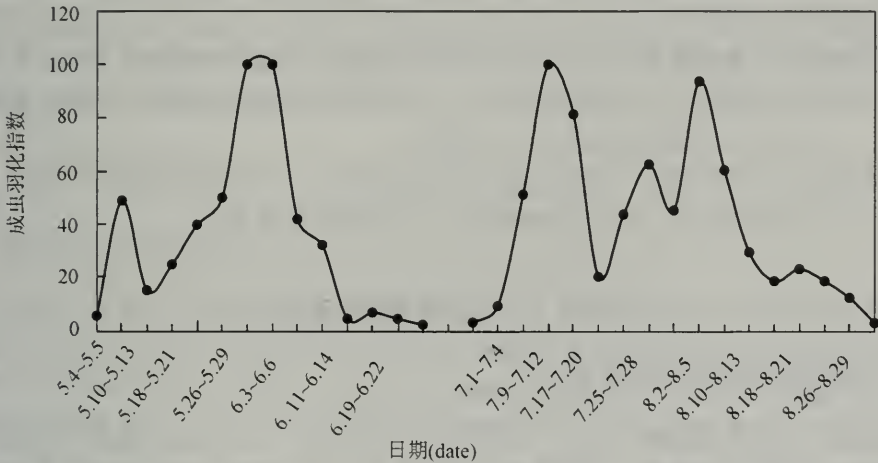


图 14-4 苹果蠹蛾在新疆南疆各代成虫羽化时间分布
根据张学祖等研究资料(内部交流资料)整理

三、幼虫发生规律

苹果蠹蛾幼虫为兼性滞育，即使在最有利的温度、光周期条件下，第1代幼虫总有一部分进入滞育，在2代区，第1代幼虫的滞育率一般为25%~30%，有时可达50%(金瑞华，1989)。在库尔勒和塔里木垦区，苹果蠹蛾第1代幼虫为害期在5月中上旬~6月上旬，第2代为害期为6月中下旬~7月下旬，第3代为害期为8月中旬~9月上旬，第4代为害期为9月中下旬(李保国和梅龙珠，1999)。

(一) 幼虫为害习性

幼虫孵化后，先在果面爬行几分钟至半小时后便可蛀入果内，若产在叶面上，幼虫往往要爬行数小时寻找果实。幼虫蛀入果实后的头2~3d，在果皮下取食，并做一小室，蜕皮其中。以后，幼虫继续向种子室的方向前进，形成弯曲的隧道。5~6d后在种子室附近蜕第2次皮进入3龄。3龄幼虫开始蛀入并取食种子。到第9~10d，蜕第3次皮。此后幼虫向外蛀食较直的隧道脱果，转而蛀食其他果实。虫果脱落后，幼虫多在第2d内从落果中爬出。

根据各地气候和寄主不同, 幼虫蛀食期为 20~40d(在新疆天山南北约为 30d)。几头幼虫可同时蛀食 1 个果实(金瑞华, 1989; 黄玉珍, 2000)。

(二) 幼虫为害不同果实习性

苹果蠹蛾幼虫为害沙果时, 初孵幼虫在果实上四处爬行, 寻找合适蛀食点, 开始蛀入时, 并不吞咽咬下的碎果肉, 而将碎果肉排放在蛀孔外。大多数幼虫从果实的胴部蛀入, 少数从萼洼蛀入。一头幼虫要蛀食 2 个以上果实, 果实被害极严重时, 造成“豆沙馅”, 同时在沙果上常常见一些伤疤。幼虫为害沙果和苹果时, 排出的粪便呈褐色, 常以虫丝状串挂在果实外。

苹果蠹蛾幼虫为害香梨时, 蛀入方式同为害沙果。但蛀入点较多在萼洼, 其次是胴部, 少数自果柄基部蛀入。多数幼虫蛀食 1 个香梨即可完成幼虫阶段, 因此, 香梨上的蛀孔较小。幼虫排出的粪便较沙果少, 呈黑色。

苹果蠹蛾幼虫为害杏时, 多数从梗洼蛀入杏果实, 1 个果实仅能见到 1 头幼虫, 幼虫蛀入后, 沿杏四周取食, 排出的粪便很少, 大多数留在果实内。

第六节 主要调控技术

一、加强植物检疫处理技术

在我国, 由于苹果蠹蛾仅发生于新疆和甘肃酒泉地区, 因此, 此虫为我国重要的内外检疫对象, 严禁从疫区输入新鲜苹果、梨、沙果、杏、樱桃、桃、梅和有壳胡桃等, 对从新疆等疫区输入保护区的水果及包装物和填充物, 必须严格检疫, 发现疫情立即采取措施。

(一) 熏蒸处理

溴甲烷是检疫口岸常用的检疫熏蒸处理剂, 处理效果比较理想。在 21℃ 条件下, 用溴甲烷 48g/m³ 处理带卵油桃 2h, 苹果蠹蛾 1 日龄卵死亡率达 100%。而且包装在运输容器中的油桃对溴甲烷的吸附低于直接熏果, 熏蒸后 48h, 果表残留无机溴为 20ppm, 在 2.5℃ 条件下贮藏 5d 后, 平均有机溴残留小于 0.001ppm, 符合检疫处理安全标准(Hartsell *et al.*, 1992; Yokoyama *et al.*, 1994)。带虫苹果在 2.2℃ 以下低温贮藏 55d 后, 在 10℃ 条件下用溴甲烷(56g·m⁻³)熏蒸 2h, 苹果蠹蛾的卵和幼虫均不能存活(Hansen *et al.*, 2000)。

(二) 低氧空气或混合气体处理

在空气中降低氧气的含量提高非氧气体的含量也是处理一些检疫性害虫的常用方法, 这种方法同样可以取得较好的处理效果。在 20℃ 条件下, 用含 0.4%O₂ 和 5%CO₂ 空气处理苹果蠹蛾不同龄期幼虫发现, 缩短了达到 99%死亡率 (LT₉₉) 的时间, 且不同龄期的敏感性为 5 龄幼虫 (包括滞育和非滞育幼虫) > 3 龄幼虫 > 1 龄幼虫(Whiting *et al.*, 1992)。

采用 CO₂、N₂ 和空气的混合气体处理苹果蠹蛾的卵、成熟幼虫、滞育幼虫、蛹和成

虫的结果表明, 苹果蠹蛾对含 CO₂ 较多的空气比缺乏 O₂ 的空气更敏感, 在 RH 为 60% 时的死亡率大于 RH 为 95% 的死亡率, 在 RH 为 60% 时, 苹果蠹蛾各虫态对富含 CO₂ 空气忍受能力递增顺序为成虫、卵、幼虫、蛹和滞育幼虫。此外, 用含 40% 或 60% CO₂ 的空气处理成虫, 其产卵量降低 (Soderstrom and Brandl, 1989)。

(三) 高温低氧与低温冷藏处理

在美国, 采用高温低氧低温冷处理一种梨, 能有效杀灭苹果蠹蛾各虫态。在 30℃ 和低氧(O₂ <1kPa) 条件下处理带有苹果蠹蛾各虫态的梨, 然后在 0℃ 冷藏 1 个月结果显示, 该处理方法能杀死所有的卵、幼虫和成虫, 只有 4% 的蛹能羽化, 蛹死亡率提高 38%。另外, 采用 30℃ 低氧处理 30h 后冷藏 1 个月, 可以 100% 杀死苹果蠹蛾的 5 龄幼虫, 而对梨不造成伤害(Chervin *et al.*, 1997)。

二、生物调控技术

(一) 利用性诱剂调节性比

在国外, 控制苹果蠹蛾的危害主要采用性诱剂, 能有效降低苹果和梨的损失。在美国华盛顿州 8 个点 18hm² 利用性诱剂防治苹果蠹蛾的研究结果表明, 在低密度种群时, 每公顷使用 1000 或 625 个诱芯, 能控制苹果蠹蛾, 损失率小于 0.1%。在损失较大, 单一化学农药不能控制的点, 每公顷使用 1625 或 2000 个诱芯, 可以得到较好的控制, 损失率小于 0.5%(Gut and Brunner, 1994)。在佛吉尼亚苹果园, 苹果开花后不久, 每公顷放置 1000 个诱芯, 几乎所有雄蛾都迷向, Daleville 果园苹果蠹蛾造成损失率为 0.8%~0.9%。Criglersville 果园(有机管理, 苹果蠹蛾高密度)的对比研究发现, 性诱剂处理、有机防治和粗放管理的地块苹果损失率分别为 16%~16.5%、34.5% 和 26.5% (Pfeiffer *et al.*, 1993)。

我国曾用苹果蠹蛾性诱剂在北京、河北、辽宁、山东和新疆等省市进行苹果蠹蛾的诱捕和监测, 并在新疆试用, 效果较好(陈宏等, 1995)。现在使用性诱剂防治新疆苹果蠹蛾已经形成一套适合新疆地区的规范技术(李保国和梅龙珠, 1999)。

(二) 苹果蠹蛾颗粒体病毒防治苹果蠹蛾

从苹果蠹蛾幼虫体内分离得到的一种颗粒体病毒也是一种很好的生物制剂。20 世纪 80 年代末在法国苹果园试用效果较好, 使用剂量为 1×10^{13} GTB/hm², 间隔 14d, 每年使用 3~7 次能较好控制苹果蠹蛾的危害。同样, 该病毒制剂在奥地利使用, 取得了与 Dimilin (diflubenzuron) 接近的效果(Audemard *et al.*, 1992; Mantinger *et al.*, 1992; Losel *et al.*, 2000; Biache *et al.*, 2000)。

(三) 利用赤眼蜂防治苹果蠹蛾

赤眼蜂是人们熟悉的一种鳞翅目害虫卵寄生蜂, 全世界使用赤眼蜂控制鳞翅目害虫的作物有玉米、甘蔗、水稻、大豆、棉花、甜菜、蔬菜和松树。1992 年, 德国使用赤眼蜂防治玉米螟的面积达到 6200hm²。1990 年, 开始使用一种赤眼蜂 *Trichogramma*

dendrolimi 防治苹果蠹蛾, 1992 年使用面积达到 15hm²(Hassan, 1993; Quarles, 2000)。在美国加州 1 个胡桃园和 2 个梨园释放一种商品化赤眼蜂 *T. platneri* 防治苹果蠹蛾研究显示, 胡桃园和 2 个梨园果实的损失率分别为 3.9%、7.1%和 5.0%, 大面积释放赤眼蜂能减少苹果蠹蛾的损失 60%, 控制效果比苹果园更好(Mills *et al.*, 2000)。

三、其他调控措施

在苹果蠹蛾发生和为害的果园, 采用综合防治措施, 可以大幅度降低水果的损失。水果下树后, 刮下老树皮或使用药剂涂抹树干; 及时清理落果和田间枯枝落叶, 并集中处理; 在落果树下撒施毒土等均可有效消灭准备越冬的幼虫。在苹果蠹蛾成虫产卵高峰或幼虫孵化高峰期, 喷施高效低毒的化学农药, 以减少果实的被害率。

(蔡青年 张青文)

主要参考文献

- 陈宏, 林伟, 薛光华等. 1995. 苹果蠹蛾性信息素及其应用. 植物检疫, 9(1): 15~16 [Chen H, Lin W, Xue G H, Wang Y Y, Yan J, Han C C. 1995. Sex pheromone of codling moth and its application. *Plant Quarantine*. 9(1): 15~16]
- 甘肃森林病虫害防治检疫站. 2000. <http://gssfz.nease.net/20023.htm> [Gansu Control and Quarantine Station of Forest Pest and Disease. 2000. <http://gssfz.nease.net/20023.htm>]
- 黄玉珍. 2000. 苹果蠹蛾的发生与防治. 植保技术与推广, 20(5): 20 [Huang Y Z. 2000. Occurrence and control of codling moth, *laspeyresia pomonella*. *Plant Protection Technology and Extension*, 20(5): 20]
- 金瑞华. 1989. 植物检疫学(中册). 北京: 北京农业大学出版社. 115~120 [Jin R H. 1989. *Plant Quarantine*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 115~120]
- 金瑞华, 张家炳, 白章红, 刘龙, 李冬明, 张遵雄, 姚文国, 张从仲, 耿秉晋, 张平, 蔺创业, 张积儒. 1996. 苹果蠹蛾分布与降雨关系研究初报. 植物检疫, 10(3): 129~136, 141 [Jin R H, Zhang J X, Bai Z H, Liu L, Li D M, Zhang Z X, Yao W G, Zhang C Z, Geng B J, Zhang P, Lin C Y, Zhang J R. 1996. The relationship between distribution of *Cydia pomonella* (L.) and rainfall. *Plant Quarantine*, 10(3): 129~136, 141]
- 李保国, 梅龙珠. 1999. 性信息素防治苹果蠹蛾技术. 新疆农垦科技, (6): 22~23 [Li B G, Mei L Z. 1999. Control technique of codling moth with sex pheromone. *Xinjiang Science and Technology of Agricultural Reclamation*, 6: 22~23]
- 林伟, 林长军, 庞金. 1997. 生态因子在苹果蠹蛾地理分布中的作用. 植物检疫, 10(1): 1~7 [Lin W, Lin C J, Pang J. 1997. Effect of ecological factors on the geographic distribution of codling moth, *Cydia Pomonella* (L.). *Plant Quarantine*, 10(1): 1~7]
- 刘友樵, 白九维. 1985. 中国经济昆虫志(第 11 册). 鳞翅目卷蛾科(一). 北京: 科学出版社. 39~40 [Liu Y Q, Bai J W. 1985. Economic insect fauna of China (Fasc. 11), Lepidoptera, Eucosmidae. Beijing: Science Press. 39~40]
- 马德成, 马玉玲. 1997. 杏仁也是传带苹果蠹蛾的载体. 植物检疫, 11(2): 117~118 [Ma D C, Ma Y L. 1997. Dry apricot fruit can also spread codling moth, *Cydia pomonella* (L.), as vector. *Plant Quarantine*, 11(2): 117~118]
- 天津进出口检验检疫局. 2002. 苹果蠹蛾. <http://tjciq.online.tj.cn/> [Tianjin entry-exit inspection and quarantine bureau. 2002. *Cydia pomonella* (L.). <http://tjciq.online.tj.cn/>]
- 张学祖. 1957. 苹果蠹蛾在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467~472 [Zhang X Z. 1957. New note of codling moth in China. *Acta Entomologica Sinica*, 7(4): 467~472]
- 张耀荣, 蒋银荃. 2001. 苹果蠹蛾生物学特性及综合防治. 中国森林病虫害, (1): 21~23 [Zhang Y R, Jiang Y Q. 2001. Bionomics and integrated control of *laspeyresia pomonella*. *Forest Pest and Disease*, (1): 21~23]
- Amard H, Burgerjon A, Baudry O, Bergere D, Breniaux D, Delay J C, Desvieux R, Formantin C, Gendrier J P, Tarbouriech M F. 1999. Evaluation of 100 trials of carposilvius, a granulosis virus preparation to control codling moth *Cydia pomonella* L. in apple orchards. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 27(1~4): 45~49
- Biache G, Guillon M, Waffelaert A M, Müller V, Polesny F, Verheyden C, Webster A D. 2000. Evidence of residual effects of CpGV in IPM programmes. *Acta Horticulturae*, 525: 277~283
- Chervin C, Kulkarni S, Kreidl S, Birrell F, Glenn D. 1997. A high temperature/low oxygen pulse improves cold storage

- disinfestation. *Postharvest Biology and Technology*, 10(3): 239~245
- Dean R W. 1989. Biology of the codling moth in Hudson Valley orchards. *Search: Agriculture*, 36: 28
- Gut L J, Brunner J F. 1994. Implementation of pheromone-based pest management programs in pear in Washington, USA. *Bulletin OILB SROP.*, 17(2): 67~75
- Hagley E A C. 1976. Effect of rainfall and temperature on codling moth oviposition. *Environ. Ent.*, 5(5): 967~969
- Hagley E A C. 1977. Effect of low temperature on mortality of hibernating codling moth larvae and fecundity of surviving adults. *Can. Ent.*, 109: 123~127
- Hansen J D, Drake S R, Moffitt H R, Robertson J L, Albano D J, Heidt M L. 2000. A two-component quarantine treatment for postharvest control of codling moth on apple cultivars intended for export to Japan and Korea. *HortTechnology*, 10(1): 186~194
- Hartsell P L, Harris C M, Vail P V, Tebbets J C, Harvey J M, Yokoyama V Y, Hinsch R T. 1992. Toxic effects and residues in six nectarine cultivars following methyl bromide quarantine treatment. *HortScience*, 27(12): 1286~1288
- Hassan S A. 1993. The mass rearing and utilization of *Trichogramma* to control lepidopterous pests: achievements and outlook. *Pesticide Science*, 37(4): 387~391
- Knight A L. 1998. Management of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in apple with overhead watering. *J. Econ. Entomol.*, 91(1): 209~216
- Landolt P J, Brumley J A, Smithhisler C L, Biddick L L, Hofstetter R W. 2000. Apple fruit infested with codling moth are more attractive to neonate codling moth larvae and possess increased amounts of (E, E)-alpha-farnesene. *Journal of Chemical Ecology*, 26(7):1685~1699
- Losel P M, Penners G, Potting R P J, Ebbinghaus D, Elbert A, Scherckenbeck J. 2000. Laboratory and field experiments towards the development of an attract and kill strategy for the control of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 95(1): 39~46
- Mantinger H, Boscheri S, Paoli N. 1992. Control of the codling moth with granulosus virus. *Obstbau Weinbau*, 29(9): 253~355
- Masoodi M A, Trali A R, Bhat A M, Tikoo R K, Nehru R K. 1987. Phenological studies on codling moth *Laspeyresia pomonella* in Ladakh. *Environment and Ecology*, 5(2): 253~256
- Mills N, Pickel C, Mansfield S, McDougall S, Buchner R, Caprile J, Edstrom J, Elkins R, Hasey J, Kelley K, Krueger B, Olson B, Stocker R. 2000. Mass releases of *Trichogramma* wasps can reduce damage from codling moth. *California Agriculture*, 54(6): 22~25
- Newcomer E J. 1920. Winter killing of codling moth larvae. *J. Econ. Entomol.*, 13(3): 441~442
- Newcomer E J. 1936. Effect of cold storage on eggs and young larvae of codling moth. *J. Econ. Entomol.*, 29(5): 1123~1125
- Pfeiffer D G, Kaakeh W, Killian J C, Lachance M W, Kirsch P. 1993. Mating disruption for control of damage by codling moth in Virginia apple orchards. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 67(1): 57~64
- Quarles W. 2000. Mating disruption success in codling moth IPM. *IPM Practitioner*, 22(5~6): 1~12
- Riedl H, Croft B A. 1978. effects of photoperiod and effective temperature on seasonal phenology of the codling moth. *Canadian Entomologist*, 110: 455~470
- Shel'deshova G G. 1967. Ecological factors determining the distribution of codling moth *Laspeyresia pomonella* L. in the northern and southern hemispheres. *Entomology Review*, 46:349~361
- Soderstrom E L, Brandl D G. 1991. Codling moth response to controlled atmospheres. In: Proceedings of the Fifth International Controlled Atmosphere Research Conference, Wenatchee, Washington, USA, 14 - 16 June, 1989. Vol. 1, Pullman, Washington: Washington State University, 215~219
- Whiting D C, Foster S P, Heuvel J van den, Maindonald J H, Van Den Heuvel J, Den Heuvel J van. 1992. Comparative mortality responses of four tortricid (Lepidoptera) species to a low oxygen-controlled atmosphere. *Journal of Economic Entomology*, 85(6): 2305~2309
- Yokoyama V Y, Miller G T, Hartsell P L. 1994. Methyl bromide efficacy and residues in large-scale quarantine tests to control codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) on nectarines in field bins and shipping containers for export to Japan. *Journal of Economic Entomology*, 87(3): 730~735

第十五章 椰 心 叶 甲

第一节 分布与起源	377	第四节 危害现状与生态经济影响评估	383
第二节 识别特征与早期诊断	377	第五节 生物学特性	385
第三节 传入途径与入侵成因	380	第六节 检疫与防治技术	386

摘要 椰心叶甲 *Brontispa longissima* (Gestro)是近年侵入我国的重要危险性害虫。目前已对中国南方椰子种植业和观赏棕榈业构成严重威胁。本文就该虫的分布与起源、识别特征与早期诊断、传入途径与入侵成因、危害现状与生态经济影响评估、生物学特性、检疫与防治技术等方面进行了分析与讨论。指出由于椰心叶甲的寄主种类较多, 适生范围较广, 一年多代, 且繁殖能力较强, 一旦传入, 很难根除, 而且我国南方地区气候条件、寄主植物等适合椰心叶甲定居、发生发展。提出应加强对椰心叶甲生态适应性、扩散机制、防治方法以及入侵后对棕榈林生态系统的影响等方面的研究。

关键词 椰心叶甲 入侵 危害 生物学 生态学

Chapter 15 Palm Leaf Beetle *Brontispa longissima* (Gestro)

Abstract: Palm leaf beetle *Brontispa longissima* (Gestro), origin from the Pacific islands, is a newly invasive pest in China. It is very dangerous and devastating for the palm plants in South China and has caused serious damage to *Cocos nucifera* in Hainan now. It mainly included the distribution and original region of *B. longissima* in the world, its morphology and diagnoses, invading ways and reasons, present damage and evaluation of its environmental and economic impacts, biology and ecology, quarantine and control methods, etc, in this chapter. It was very difficult to eradicate the pest after palm leaf beetle invaded a new region because of its high suitability to the environment such as many species of host plants, widely suitable region, several generations a year, high components of fecundity and so on. It was thought that the climate and the host plants in south China were suitable for the pest to locate and develop. Its ecological suitability to the environment, how it spreads, its control strategy and measures, and its effects on the palm ecosystem after its invasion should be focused in future.

Key words: *Brontispa longissima* (Gestro), invasion, damage, biology, ecology

第一节 分布与起源

椰心叶甲 *Brontispa longissima* (Gestro), 属鞘翅目 Coleoptera, 铁甲科 Hispidae, 潜甲亚科 Anisoderinae, Cryptonychini 族害虫。有多个异名, 分别为 *Oxycephala longipennis* Gestro、*B. froggatti* Sharp、*B. javsna* Weise 和 *B. reicherti* Uhm。其英文名为 coconut leaf beetle、coconut hispid、palm leaf beetle 或 palm heart leafminer。中文异名除椰心叶甲外, 还被称为椰棕扁叶甲、椰子刚毛叶甲和红胸叶虫。

椰心叶甲原仅发生在太平洋群岛, 后分布区逐渐扩大。国外现分布于印度尼西亚、马来西亚、澳大利亚、萨摩亚群岛、塔西提岛、巴布亚新几内亚、新喀里多尼亚、瓦努阿图、所罗门群岛、新赫布里底群岛、社会群岛、法属波利尼西亚、美属俾斯麦群岛和关岛、越南、瑙鲁和马尔代夫(Fenner, 1996)。国内已报道分布于台湾和香港, 现在广东省和海南省已发现为害(Lau, 1991)。

第二节 识别特征与早期诊断

一、椰心叶甲各虫态形态特征

关于椰心叶甲的形态特征(图 15-1~图 15-6)在《中国植物检疫对象手册》中有较详细的描述, 其他的一些报道也大致相似。

成虫(图 15-1, 图 15-2): 体狭长扁平, 长 6.0~9.5mm, 鞘翅宽 2.00~2.25mm; 触角粗线状, 棕褐色, 11 节, 顶端 4 节色深, 有绒毛, 柄节长 2 倍于宽。雌雄二性角间突长超过柄长的 1/2, 由基部向端不 5 渐尖, 不平截。沿角间突向后有浅褐色纵沟。前胸背板红黄色, 长宽相当, 明显宽于头部, 刻点粗而排列不规则。鞘翅狭长, 两侧略凹弧形, 末端缘平截; 基部(约 1mm 处)红黄色, 其余部分为蓝黑色(图 15-1)。在不同地区或同一地点的椰心叶甲成虫, 其鞘翅的红黑色区域变异很大: 红色区域可扩展到鞘翅的前半部甚至翅端; 或黑色区域可扩展到整个鞘翅, 甚至前胸背板也全为黑色; 刻点大多窄于横向间距, 刻点间区除两侧和末梢外较平。足短而粗壮, 跗节 4 节、5 节完全愈合, 红黄色。

卵: 卵长 1.5mm, 宽 1.0mm。椭圆形, 褐色, 上表皮有蜂窝状扁平凸起, 下表皮无此构造。常一粒或多粒纵列平行于叶中脉(图 15-3)。

幼虫(图 15-6): 幼虫 4~7 龄, 体扁平, 侧缘近于平行, 乳白色至白色, 头部隆起, 两侧圆。前胸和各腹节两侧有 1 对刺侧突。在华南农业大学实验室进行观察表明, 该虫 1 龄幼虫长 1.5~1.8mm, 头宽 0.5mm; 2 龄幼虫体长 2.5~3.2mm, 头宽 0.6mm; 3 龄幼虫体长 4.5~5.4mm, 头宽 0.9mm; 4 龄幼虫体长 5.8~6.6mm, 头宽 1.2mm; 5 龄幼虫体长 7.5~8.5mm, 头宽 1.3mm。

蛹(图 15-6): 蛹长 10.5mm, 宽 2.5mm; 和幼虫相似, 个体稍粗, 出现翅芽和足, 腹末仍保留 1 对卡钳状突起。



图 15-1 椰心叶甲成虫形态(曾玲 摄, 2000)

a.雌、雄成虫背面; b.雌成虫腹面



图 15-2 椰心叶甲雌、雄成虫交配状(陆永跃 摄, 2002)

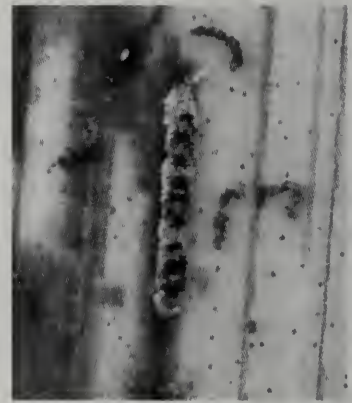


图 15-3 椰心叶甲卵(陆永跃 摄, 2002)

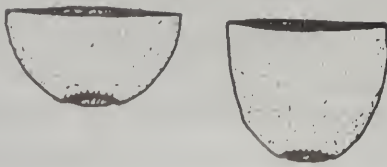


图 15-4 椰心叶甲雌、雄成虫腹部末节腹面
(仿张维球, 2002)

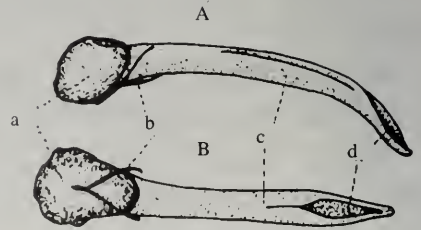


图 15-5 椰心叶甲雄虫外生殖器形态(仿张维球, 2002)

A.侧面; B.背面

a.基孔; b.阳基; c.阳茎; d.端口



图 15-6 椰心叶甲幼虫和蛹(曾玲 摄, 2000)

1.幼虫; 2.蛹腹面; 3.蛹背面

二、为害特征

如图 15-7~图 15-10 所示,成虫和幼虫主要为害未展开的棕榈科植物幼嫩心叶。在折叠的叶片内沿叶脉平行取食叶表皮,在叶上留下与叶脉平行、褐色至灰褐色的狭长条纹。随着叶片长大,窄条取食痕也扩大形成不规则大型条块,并且褐化、坏死。在比较严重的情况下,椰叶皱缩、枯萎、破烂,甚至大面积折落,留下部分叶脉架。叶两正面和背面均被取食为害。在椰林、园林或苗圃中,棕榈科植物——椰子、大王椰子、蒲葵等受害后,可见心叶枯黄,呈火烧状。



图 15-7 大王椰子心叶受椰心叶甲为害状
(曾玲 摄, 2000)



图 15-8 老人葵受椰心叶甲为害状
(曾玲 摄, 2000)



图 15-9 大王椰子叶片严重受椰心叶甲为害状
(曾玲 摄, 2002)



图 15-10 椰心叶甲群集于大王椰子心叶内
(曾玲 摄, 2002)

三、诊断方法

检查椰林、园林或苗圃中棕榈科植物苗木心叶中有无类似椰心叶甲为害状或各种虫态个体, 若有可疑虫卵、幼虫或蛹, 应饲养到成虫进行种类鉴定。椰心叶甲区别于本属其他种类在于其触角粗线状, 没有任何一节呈锯齿状, 头中间部宽过于长, 雌雄二性角间突长超过柄节的 $1/2$ 。前胸长宽相当, 刻点多超过 100, 侧角圆且略向外伸, 角内侧无小齿或细小突起, 鞘翅刻点大多数窄于横向间距, 刻点间区(除两侧和末梢外)平坦。

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

各虫态随苗木或其他载体进行远距离传播, 成虫也可飞行逐渐扩散(Dharmaraju and Laird, 1984)。从疫区调运棕榈科植物苗木, 若未经处理而进行远距离运输, 椰心叶甲的存活率较高。如在秋季, 采下大王椰子初展心叶 10d 后, 其中幼虫、蛹、成虫存活率仍在 60% 以上。椰心叶甲从国外或台湾传入我国大陆和海南是借助于棕榈植物种苗的运输(梁琼超等, 2002)。20 世纪 90 年代以后, 我国南方口岸多次在棕榈科植物苗木上检获椰心叶甲(梁琼超等, 1999; 黄法余等, 2000a; 龚秀泽和白志良, 2001; 龚秀泽和白志良, 2002)。估计有少量由非正式渠道未经检疫的苗木带虫, 经种植后继续为害扩散, 成为初入侵虫源。1999 年底深圳市一些苗木场发现有此虫发生, 2002 年 6 月海南省海口市在椰子树上发现椰心叶甲。

二、入侵成因

(一) 我国南方气候适宜椰心叶甲生长发育

椰心叶甲原产于印度西亚和巴布亚新几内亚,分布在太平洋岛区。这些地区跨越热带和亚热带,属于高温高湿地区。目前临近我国大陆的日本琉球群岛、印度尼西亚、马来西亚、越南、泰国、中国台湾地区和香港地区也有椰心叶甲发生。最北的日本琉球群岛大约在北纬 30°,我国在这条纬度线以南的省份有浙江、江西、湖北、湖南、四川、贵州、云南、广东、广西、福建,这说明在我国长江流域以南地区皆有潜在危险,都可能适宜椰心叶甲定居;台湾地区和香港地区与我国华南地区靠近,气候条件极其相似,特别是广东深圳与香港地区接壤,气候条件几乎与香港地区一样,因此,从气候相似性角度来说可以认为华南地区是很适宜椰心叶甲定居的场所。

根据作者在华南农业大学昆虫生态研究室所得的研究结果,椰心叶甲是偏喜温的昆虫,适宜生长发育温区为 20~30℃,低于 17℃时卵的孵化率明显降低,低龄幼虫存活率很低、存活时间很短;椰心叶甲世代发育起点温度为 14.5℃左右,有效积温约为 620DD。

(二) 寄主棕榈科植物种类丰富、数量巨大

椰心叶甲主要取食危害棕榈科经济或观赏植物,包括椰子 *Cocos nucifera*、西谷椰子 *Metroxylon sagu*、大王椰子 *Roystonea regia*、华盛顿椰子 *Washingtonia filifera*、槟榔 *Areca catechu*、棕榈 *Trachycarpus fortunei*、鱼尾葵 *Caryota ochlandra*、假槟榔 *Archontophoenix alexandrae*、山葵 *Arecastrum romanzoffianum*、刺葵 *Phoenix sp.*、蒲葵 *Livistona chinensis*、散尾葵 *Chrysalidocarpus lutescens*、省藤 *Calamus ritang* 等 (Maddison, 1983)。其中椰子是最主要的寄主。据作者 2003 年的调查结果显示椰心叶甲除为害上述寄主外在广东地区还在鱼尾葵 *Caryota ochlandra Hance*、金山葵 *Syagrus romenzoffianum (Cham.) Glassm.*、酒瓶椰 *Hyophorba lagenicaulis*、三角椰 *Dyopsis decaryi* 等植物上发生。

全世界有 3000 余种棕榈科植物,分布在北纬 50°至南纬 40°之间,多数属于热带和亚热带植物。棕榈科许多种类都可在我国长江流域以南地区栽培。我国各地区尤其是南方各省棕榈科植物资源丰富,许多种类是我国重要农业作物和园林绿化观赏植物。尤其是椰子,是我国热带地区的主要植物性食用油来源之一,还是重要的食品、天然饮料、纤维、填料等原料。海南省是我国椰子集中地。1986 年椰子的种植面积为 1.67 万公顷,目前增至 3 万多公顷。此外由于园林绿化迅速发展的需要,我国各地种苗绿化用棕榈科植物种类及数量越来越多,包括许多从国外引进的珍贵种类,仅深圳一地绿化用棕榈科植物近 50 万株。我国其他地方种苗绿化用棕榈科植物数量也较大,全国估计有几千万株棕榈观赏苗木。因此,我国南方尤其是海南、广东、福建、广西等地椰心叶甲有充足的寄主植物资源。

(三) 棕榈科植物食叶害虫生态位空缺

在中国南方,棕榈科植物害虫仅有二瘤犀甲 *Oryctes rhinoceros* 为害较严重,广泛分布于海南省及雷州半岛徐闻地区,主要钻蛀茎干。还有红棕象甲 *Rhynchophorus*

ferrugineus、椰圆蚧 *Aspidiotus destructor*、小蠹、蚜虫、粉虱、蝶蛾类、白蚁、蓟马、螨类等, 但均零星发生, 仅少数地区为害较重。根据彭正强等(2001a, 2001b, 2001c)资料可知世界上椰子害虫属昆虫纲共 14 目 106 科 449 属 831 种, 而分布于中国大陆的仅 26 种, 其中发生较重的仅 2 种(表 15-1)。食叶类害虫如蚧虫主要取食成熟老叶, 为害寄主心叶的害虫种类及数量均很少。

表 15-1 中国大陆椰子 *Cocos nucifera* 害虫名录(彭正强等, 2001a, 2001b, 2001c)

害虫种类	在中国大陆的分布区	为害部位	发生程度
橡副珠蜡蚧 <i>Parasaissetia nigra</i> (Nietmer)	海南、云南、广东、福建	不详	+
褐叶圆蚧 <i>Chrysomphalus aonidum</i> (L.)	海南、云南、广东、福建	叶	+
拟褐叶圆蚧 <i>Chrysomphalus bifasciculatus</i> Ferris	广东	不详	+
柑桔长蚧蚧 <i>L. gloverii</i> (Packard)	云南、广西、广东	叶	+
黑矩形盾蚧 <i>Parlatoria</i> sp.	海南、云南、广东、福建	不详	+
矢尖蚧 <i>Unaspis yanonensis</i>	海南、云南、广西、广东、福建	不详	+
黄吹绵蚧 <i>Icerya seychellarum</i> (Westwood)	海南、云南、广西	叶	+
长刺粉蚧 <i>Pseudococcus adonidum</i> (Geoffroy)	云南、广西、广东	叶	+
桔刺粉虱 <i>Aleurocanthus spiniferus</i> Quaintance	海南、云南、广西、广东、福建	花、果	+
茶树黑粉虱 <i>Aleurolobus marlatti</i> Quaint.	云南	不详	+
短额负蝗 <i>Atractomorpha sinensis</i> Bolivar	海南、云南、广西、广东	不详	+
线斑腿蝗 <i>C. splendens</i> (Thunberg)	海南、云南、广西	叶	+
棉蝗 <i>Chondracris rosea</i> (De Geer)	海南、云南、广西、广东	叶	+
小稻蝗 <i>Oxyahyla intricata</i> (Stal)	海南	不详	+
印度黄脊蝗 <i>Patanga succincta</i> (Johan.)	海南、云南、广西、广东	叶	+
东方行军蚁 <i>Doxrylus orientalis</i> Westwood	海南	茎、叶	+
蔗根土天牛 <i>Dorystenes granulosis</i> Thomson	海南、广西、广东	根	+
红棕象甲 <i>Rhynchophorus ferrugineus</i> F.	海南、云南、广东、广西	茎	++
二瘤犀甲 <i>Oryctes rhinoceros</i> L.	海南、云南、广东、广西	叶、佛焰苞	+++
橡胶木犀金龟 <i>X. gideoni</i> L.	海南、云南、广东、广西、福建	叶柄、茎、芽、果	+
香蕉冠网蝽 <i>Stephanitis typical</i> Distant	海南、广东、福建	叶	+
弄蝶 <i>Telicota palmarum</i>	海南	叶	+
刺蛾 <i>Darna trima</i> (Moore)	海南、广东、福建	叶	+
桔白蓑蛾 <i>Chalioides kondonis</i> Matsumura	海南、云南、广东、广西、福建	不详	+
咖啡蓑蛾 <i>Clania variegata</i> Snellen	云南、广西、福建	叶	+
椰红脉穗螟 <i>Tirathaba rufivena</i> Walker	海南、云南	叶、花	+

注: 发生程度分为+、++、+++三级, 分别表示一般、中等和严重。

因棕榈科植物食叶类害虫种类及数量均较少, 椰心叶甲在资源生态位上缺乏有力的竞争对手, 易于侵入, 而一旦传入, 即会占据并充分利用这个资源生态位(心叶), 进一步发展种群, 并定居、扩散。

(四) 棕榈林生态系统较简单, 抵抗生物入侵能力较弱

中国棕榈科经济或观赏植物除海南椰子常大面积种植外, 大部分分散分布于道路边、公园、住宅小区等地。近年由于观赏需要, 多种棕榈植物大量被引进我国。棕榈植物上动物群落物种多样性较低, 群落结构较简单, 尤其是人工种植的棕榈, 由于经常受到干扰, 物种间无法建立稳定密切的关系。由于新的生态环境中缺乏有效抑制椰心叶甲的生

物因子——天敌，因此椰心叶甲侵入后极有可能暴发成灾。目前椰心叶甲已侵入并发生多个世代，本地生物因子正在逐渐发挥作用，一些捕食性天敌如螳螂、螻蛄、蚂蚁、蜘蛛可以捕食该虫，在调查研究中还发现广东地区椰心叶甲常被一种虫生真菌寄生致死，但发病率较低。

(五) 稳定的微环境有利于椰心叶甲生存、定居和发展

椰心叶甲成虫和幼虫生活在棕榈科植物幼嫩心叶内。当寄主植物新抽出剑叶的羽片或裂片刚展开成细小缝隙时，椰心叶甲成虫即可侵入其内为害、繁殖。当羽片或裂片间张开到较大角度或被害严重时，椰心叶甲会在黄昏时飞离被害株，迁移到健株。棕榈植物剑叶的羽片或裂片结合较紧密，其内小环境很稳定，这对椰心叶甲各个虫态的存活和种群的发展很有利。笔者观察发现台风有助于椰心叶甲的扩散、传播。主要原因有两个：一是增大了椰心叶甲飞行距离。刮风初期时由于羽叶被吹动，椰心叶甲爬出羽片或裂片间，主动飞行后再借助风力会飞得更远，迁移距离更大；二是由于台风的摇动，棕榈植物原本紧密的剑叶羽片或裂片被吹开成缝隙。这有利于椰心叶甲的侵入。因此台风后往往会出现椰心叶甲为害率增加，发生加重的现象。应注意加强台风之后椰心叶甲的疫情监测工作，采取预防性措施防治该虫，避免疫情进一步扩散蔓延。

综上所述我国华南地区无论是气候，还是寄主植物、生态系统等均对椰心叶甲的入侵是有利的。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

一、危害现状

椰心叶甲以成虫和幼虫为害椰子等多种棕榈科植物寄主未展开心叶，待叶展后呈大型褐色坏死条斑。一片叶上常有数头至数十头虫。成年树受害常出现褐色树冠，削弱了树势，使之不耐干旱，易感病害，易遭受台风损害，严重时，整株死亡。

20世纪80年代该虫在西萨摩亚的乌波卢岛椰子产区大暴发，产量损失达50%~70%；该虫在新喀里多尼亚、巴布亚新几内亚、所罗门群岛等许多地区也造成了重大危害。澳大利亚达尔文地区于1979年首次发现该虫为害，尽管采取了种种措施，但未能限制和消灭该虫。

目前椰心叶甲的发生区正在不断扩大，除大洋洲和太平洋岛区外已蔓延到亚洲大陆。不断有国家和地区被椰心叶甲侵入。

近年来，椰心叶甲在越南暴发成灾。据越南官方估计，2001年越南南部有近100万棵受到椰心叶甲的侵染，椰心叶甲目前正迅速地向中部地区扩散，截止2002年8月，超过30个省份发现有其分布，约600万株受害。椰心叶甲在各省间为害程度不一，为害最严重的省份为BenTre省。

2001年4月瑙鲁发现了椰心叶甲严重为害当地的椰树。椰心叶甲在瑙鲁以前未曾发生，因此被认为是入侵种。2002年，马尔代夫发现有椰心叶甲的发生并为害椰子。

20世纪70年代初椰心叶甲随种苗传入中国台湾，1976年统计受害椰子苗约4000

株，而到 1978 年仅恒春受害植株已达 4 万株以上。1994 年资料显示在香港椰心叶甲对多种植物为害较重，尤其是华盛顿葵、椰子，危害率为 100% 和 62%，对王棕、日本葵、假槟榔、散尾葵和蒲葵的为害率较低，分别为 34%、27%、8% 和 1%。自 1999 年底在深圳市发现椰心叶甲以来，该虫的为害区域不断扩大，为害程度较严重。2003 年的调查结果表明该虫可为害蒲葵、假槟榔、散尾葵、鱼尾葵、针葵、金山葵、竹棕、酒瓶椰、海南椰子、老人葵、大王椰子、三角椰、鱼骨葵等。常规防治情况下寄主植物受害株率高的可达 37%。

目前，在海南省椰心叶甲已经蔓延到 12 个县市，受害椰树约 46 万株，约占全省椰树总量的 6.6%。

二、生态经济影响

椰心叶甲的寄主大部分是经济或观赏性棕榈科植物。椰心叶甲侵入内陆定殖，将对我国南方的椰子及棕榈苗木造成巨大威胁，对我国具有很大的潜在生态、经济危害性。

(一) 直接危害

近年由于城市绿化的需要，多种美观的棕榈科植物被大量种植或从国外引进。如心叶被椰心叶甲严重为害，轻者植株生长衰弱，若连续多片心叶被害，植株就可能死亡。部分珍稀种类棕榈植物价格昂贵，如广西南宁某广场栽种 10 株海枣，每株价格高达 29 万元。如被椰心叶甲为害死亡，将造成巨大的经济损失。

(二) 破坏景观

棕榈科植物形态上常具独特魅力，在景观布置、城市美化中被大量应用并起着重要作用。椰林、海滩是热带风光的标志。越来越多的中国南方城市把棕榈植物作为城市园林的重要内容。我国南方不少地方也建立了棕榈主题公园，或在公园内建立了棕榈植物区。这些地方常成为居民休闲、娱乐的重要场所。若其中棕榈植物被椰心叶甲为害，会明显破坏景观，降低景观价值。

(三) 严重影响椰子产业

椰子，是我国热带地区的主要植物性食用油来源之一，还是重要的食品、天然饮料、纤维、填料等原料。在越南、瑙鲁，椰子种植面积很大，也是十分重要的食物来源、经济来源。椰心叶甲对椰树造成的危害损失会导致严重的经济问题(Maddison, 1983)。

(四) 大量使用杀虫剂防治椰心叶甲存在潜在的环境毒害

由于椰心叶甲在越南暴发成灾，越南政府主要应用化学农药来控制 and 降低其扩散速度。2002 年，在 Mekong Delta 地区，政府已花费超过 20 万美元用来资助农户购买杀虫剂，农户用于防治该虫的费用很大。此外，椰子卖得价钱很低，在椰树上使用杀虫剂会引起健康问题，并且十分危险，因为椰树高，施药者必须爬到树冠施药。另外，他们工作的时候不穿防护服，杀虫剂容易通过皮肤和呼吸进入体内。并且，椰树一般都种在房

前屋后, 施药会对农户、鱼塘、花园和家畜等产生不利影响。

在马尔代夫主要使用化学农药如西维因防治椰心叶甲, 但到目前为止, 防治工作没有取得很好的效果。

在中国, 自发现椰心叶甲以来, 使用化学药剂成为防治椰心叶甲的主要手段。为根除新传入的害虫, 使用了多种广谱性剧毒农药如呋喃丹、甲胺磷等, 采用了喷雾、涂茎、根施等施药方式, 施药频繁。但对椰心叶甲发生和扩展的控制作用并不明显。

(五) 对入侵地生态系统的影响

由于椰心叶甲的侵入, 对新的生态系统的影响目前尚无研究结果, 但作为一种入侵生物对新的生物群落的物种及结构必定存在作用, 这需要进行深入探讨。

第五节 生物学特性

从 2001 年开始作者在华南农业大学昆虫生态研究室对椰心叶甲实验种群的生物学、生态学、风险分析及控制技术等一系列研究, 关于生物学特性的主要研究结果如下(周荣, 2003):

(1) 观察描述了椰心叶甲各虫态的形态特征, 测量了雌、雄成虫和各龄幼虫的体长、前胸背板宽度, 并对其生殖器进行了解剖。

(2) 对椰心叶甲的生活习性进行了观察。结果表明, 广州地区自然温度条件下, 椰心叶甲一年可发生 3 代以上, 世代重叠, 主要以成虫越冬。成虫平均寿命 156d, 最长达 235d; 雌雄虫一生均可交配多次。成虫产卵期长, 产卵不规则, 单雌平均产卵 119 粒, 最多可达 196 粒。飞行磨测定的初步结果表明, 雌虫飞行能力比雄虫强, 24h 未取食成虫最远飞行距离可达 400 多米; 成虫和幼虫均具有负趋光性、假死性。成虫 3~5d 不取食、高龄幼虫 7d 不取食仍存活。幼虫一般有 5 龄, 在温度或寄主不适宜条件下, 可进入 6~7 龄, 或提前化蛹, 从卵到成虫羽化需 36~61d。

(3) 寄主植物种类对椰心叶甲的发育历期、存活率、取食量和成虫寿命均有不同程度的影响。在海南椰子、大王椰子、散尾葵、鱼尾葵上椰心叶甲发育历期差异显著, 在海南椰子和散尾葵上, 幼虫共 5 龄; 在大王椰子和鱼尾葵上的幼虫有 6 龄, 平均幼虫历期为 46.7d 和 54.0d; 卵期在 25~30℃ 之间平均为 3.1d; 蛹期平均为 5.5~6.3d。

椰心叶甲在海南椰子、大王椰子、散尾葵、鱼尾葵上的存活率在 88%~97% 之间, 不同供试寄主植物对椰心叶甲各虫态的存活率影响差异不显著。

不同寄主上椰心叶甲在各龄幼虫的取食量差异显著, 随着幼虫龄期的增加取食量逐渐增加。其幼虫期总取食量以在海南椰子上的最多, 为 94cm², 以在散尾葵上的取食量最少, 为 76cm²。

此外取食海南椰子的成虫寿命可达 192d, 明显长于其他成虫, 而取食其他几种寄主的成虫的寿命差异不显著。

椰心叶甲成虫交配后需取食才产卵, 其产卵前期长短和产卵量多少与其取食的寄主有关。其中, 在散尾葵产卵前期最短为 6.3d, 平均产卵量为 113.7 粒; 在鱼尾葵上产卵

前期最长,为 13.0d,产卵量为 157.3 粒。

(4) 温度对椰心叶甲的生长发育历期、存活率、寿命、繁殖都有不同程度的影响。在 20℃、23℃、26℃、29℃、32℃ 温度条件下,椰心叶甲各虫态的发育历期随温度的升高而缩短,以 29℃ 时的历期最短,为 40.2d,在 32℃ 时,发育速度变缓,历期延长,表明过低过高温对椰心叶甲的发育都有抑制作用。在不同温度下,椰心叶甲各虫期的存活率差异显著。在 29℃ 时存活率最高为 93.6%;32℃ 时存活率最低为 72.0%。其发育最适的温度在 26~29℃。在供试温度范围内,建立了多个椰心叶甲各虫态的发育速率与温度关系的模型,得出椰心叶甲发育起点温度为 15.8℃,有效积温为 617.8DD,由此推测,在广州一年可能发生 4 代。

进一步的研究表明,椰心叶甲在 29℃ 时的取食量最多,寿命最长(118d),产卵前期最短(18.8d),产卵量最多(87.6 粒/♀)。种群趋势指数最大(58.75),而在 32℃ 时的各项结果则与此相反。由此可知,29℃ 是椰心叶甲最适宜的生长发育繁殖温度,32℃ 以上则对该虫有抑制作用。

第六节 检疫与防治技术

椰心叶甲各虫态均生活于寄主植物未展开和初展的心叶缝隙内。通过多种检疫处理措施可较为有效地防止该虫随苗木调运远距离传播。但由于椰心叶甲生活部位隐蔽,寄主植物种类较多,很多棕榈科植物如椰子、大王椰子植株高大,化学农药防治很难奏效,且成虫具短距离迁移能力,所以一旦传入发生,很难被根除。具体检疫、防除措施如下。

一、检疫措施

严格检疫审批制度,不予审批疫区寄主植物调入,限量审批疫区其他棕榈植物。

现场检疫:主要检查来自椰心叶甲疫区的棕榈植物,检查未展开和初展开心叶的叶面和叶背是否有椰心叶甲为害状及成虫和幼虫存在;同时检查装载容器如集装箱、纸箱等箱体有无此虫。对进口的成树应逐株实施检疫。现场未发现成虫和幼虫的,剪取带症叶回室内检查是否有卵(余道坚和陈志彝,2002)。

室内检验和鉴定:将截获的可疑成虫、幼虫和蛹带回室内进行鉴定;并在双目解剖镜下仔细检查从现场剪取的心叶是否带卵,一经发现,宜饲养为成虫后再作进一步鉴定。

二、检疫处理及防除技术

产地检疫:有条件可在原产地进口货物装运前进行检疫,并采取剪除寄主植物心叶结合药物处理的方法,效果显著。

隔离种植观察:对于来自疫区而检疫未发现椰心叶甲各虫态的苗木,可准予在网室内试种一段时间,并加强后续监管监测。试种期间尽量与其他棕榈植物隔离。

原柜退回或烧毁:口岸检疫时发现严重受害的,可考虑采取此措施。

三、化学防除

现场检疫发现有该虫的,可先不予种植,待经药物处理且检查不再带虫后才准予种植。田间发现发生时可选用西维因、乐斯本、敌百虫等农药,对未展开的心叶可采取灌心的方法,或先使折叠的心叶适当弯曲散开后喷药;对初展开的心叶可直接喷雾。喷灌心叶可选择傍晚进行(Bourke, 1986)。

四、生物防治

椰心叶甲一旦传入并大发生时,剪除心叶和化学防治难以奏效,可考虑引进或利用本地的生物因素进行防治。对椰心叶甲较有效的天敌有椰扁甲啮小蜂 *Tetrastichus brontispae* (Ferr)(Voegelé, 1989)、椰青红斑蛾赤眼蜂 *Trichogrammatoidea nana* (Zhut.)和绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* Metschu (Liu *et al.*, 1989)等。

(曾 玲 陆永跃 周 荣)

主要参考文献

- 龚秀泽, 白志良. 2001. 从越南入境的椰子树苗中截获椰心叶甲初报. 广西植保, 14(4): 29~30
- 龚秀泽, 白志良. 2002. 边贸入境越南树苗中截获检疫性害虫. 植物检疫, 16(1): 18
- 黄法余, 梁广勤, 梁琼超等. 2000a. 椰心叶甲的检疫及防除. 植物检疫, 14(3): 158~160
- 黄法余, 梁琼超, 赖天忠等. 2000b. 南海口岸多次截获椰心叶甲和红棕象甲. 植物检疫, 14(2): 69
- 梁琼超, 黄法余, 黄箭等. 2002. 从进境棕榈植物中截获的几种铁甲科害虫. 植物检疫, 16(1): 19~22
- 梁琼超, 黄法余, 黄箭等. 2002. 从进境棕榈植物中截获的几种铁甲科害虫. 植物检疫, 16(1): 19~22
- 梁琼超, 黄法余, 赖天忠. 1999. 南海局在全国口岸首次截获椰心叶甲. 中国检验检疫, 13(11): 33
- 彭正强, 张方平, 符悦冠. 2001a. 椰子有害动物名录. 热带农业科学, (2): 60~79
- 彭正强, 张方平, 符悦冠. 2001b. 椰子有害动物名录(续 1). 热带农业科学, (3): 60~78
- 彭正强, 张方平, 符悦冠. 2001c. 椰子有害动物名录(续 2). 热带农业科学, (4): 55~73
- 余道坚, 陈志彝. 2002. 澳大利亚椰心叶甲的发生与检疫控制. 世界农业, (4): 36~37
- 周荣. 2003. 椰心叶甲实验种群的生物学和生态学研究. 华南农业大学硕士学位论文
- Bourke T V. 1986. Systematic insecticide trunk injection trial against the coconut hispine beetle *Brontispa longissima* Gestro. *Alafua Agricultural Bulletin*, 11(3): 41~44
- Dharmaraju E, Laird M. 1984. Transport and the spread of crop pests in tropical Polynesia. *In: Commerce and the Spread of Pests and Disease Vectors*. 257~272
- Fenner T L. 1996. Palm leaf beetle. *Agnote Darwin*, 371
- Lau C S K. 1991. Occurrence of *Brontispa longissima* Gestro in Hong Kong. *Quarterly Newsletter Asia and Pacific Plant Protection Commission*, 34: 3~4, 10
- Liu S D, Lin S C, Shiao J F. 1989. Microbial control of coconut leaf beetle *Brontispa longissima* with green muscardine fungus, *Metarhizium anisopliae* var. *anisopliae*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 53(3): 307~314
- Maddison P A. 1983. Coconut hispine beetle. Advisory Leaflet South Pacific Commission. 17
- Voegelé J M. 1989. Biological control of *Brontispa longissima* in Western Samoa: an ecological and economic evaluation. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 27: 1~4, 315~329
- Wilco Liebrechts *et al.* 2002. Integrated Pest Management of Coconut Leaf Beetle (*Brontispa longissima* Gestro) in Viet Nam. FAO, TCP/VIE/2905(A)

第十六章 锈色棕榈象

第一节 分布与起源	389	第四节 危害现状与生态经济影响评估	394
第二节 识别特征与早期诊断	389	第五节 生物学特性	395
第三节 传入途径与入侵成因	392	第六节 检疫与防治技术	396

摘要 锈色棕榈象 *Rhynchophorus ferruginus* (Oliver) 是我国重要的入侵性害虫之一。目前已在中国南方部分省区发生危害, 对我国椰子种植业和观赏棕榈业构成严重威胁。本文就该虫的分布与起源、识别特征与早期诊断、传入途径与入侵成因、危害现状与生态经济影响评估、生物学特性、检疫与防治技术等方面进行了分析与讨论。指出由于我国华南地区适合锈色棕榈象危害的寄主植物种类较多, 且该虫为害隐蔽, 繁殖能力较强, 环境因素对该虫影响较小, 一旦传入, 很难根除。提出应加强锈色棕榈象的检疫监测, 深入研究其生物学、生态学、扩散规律和防治方法。

关键词 锈色棕榈象 入侵 检疫

Chapter 16 Red Palm Weevil *Rhynchophorus ferruginus* (Oliver)

Abstract: Red palm weevil *Rhynchophorus ferruginus* (Oliver), origin from Indian, is an invasive pest in China. It is dangerous and has caused serious damage to the palm plants in South China. It mainly included its distribution and original region in the world, morphology and diagnoses, ways and reasons to invade, present damage and evaluation of its impacts on the environment and economy, biology and ecology, quarantine and control methods, etc, in this chapter. It was pointed out that it was very difficult to erase the red palm weevil after it invaded a new region because of the species of host plants, widely suitable region, several generations a year, components of fecundity and so on. It was thought that the climate and the host plants in South China were suitable for the pest to locate and develop. The ecological suitability to the environment, how it spreads, its control strategy and measures, and its effects on the palm ecosystem after invasion should be focused in future.

Key words: *Rhynchophorus ferruginus* (Oliver), invasion, quarantine

第一节 分布与起源

锈色棕榈象 *Rhynchophorus ferrugineus* (Oliver), 属鞘翅目 Coleoptera, 象甲科 Curculionidae。其英文名为 red palm weevil、Asian palm weevil、Indian palm weevil。通常被称为红棕象甲。据报道 1891 年印度就有该虫发生为害, 1906 年第一次被描述为椰子的重要害虫, 1917 年严重为害该国旁遮普邦的棕榈林。20 世纪 80 年代中期锈色棕榈象扩散到阿拉伯湾地区多个国家, 但在中东地区成为一些棕榈植物的最具毁灭性的害虫。目前主要分布于中国(广东、广西、海南、云南、福建、香港、台湾)、印度、印度尼西亚、马来西亚、斯里兰卡、缅甸、菲律宾、日本、巴基斯坦、孟加拉国、老挝、柬埔寨、越南、泰国、澳大利亚、巴布亚新几内亚、所罗门群岛、新喀里多尼亚、阿拉伯联合酋长国、沙特阿拉伯、以色列、伊朗、伊拉克、埃及、科威特、巴林、阿曼、卡塔尔、西班牙等国(图 16-1)。

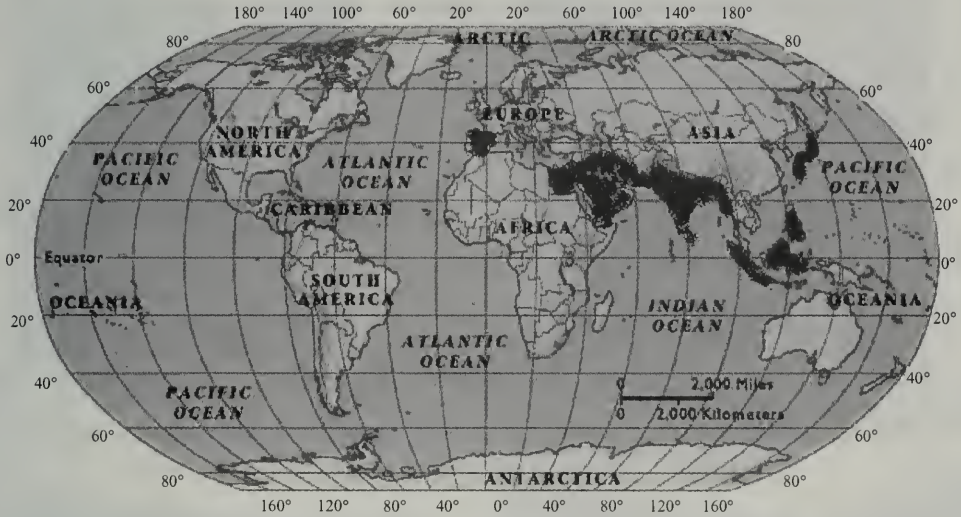


图 16-1 锈色棕榈象分布区域
(深色区域为发生分布区)

第二节 识别特征与早期诊断

一、锈色棕榈象各虫态形态特征

(一) 成虫

如图 16-2 所示。体长 19~32mm, 宽 6~12mm, 体红褐色, 光亮或暗。头部延伸成喙, 雄虫喙粗短且直, 喙背缘有一丛毛; 雌虫喙较细长而弯曲, 喙和头部的长度约为体长的 1/3。触角柄节和索节黑褐色, 棒节红褐色。前胸前缘小, 向后缘逐渐宽大, 略呈椭圆形。



图 16-2 锈色棕榈象不同类型成虫及腹面
(陆永跃 摄, 2002)

前胸背板上黑斑变化较大,一般具两排黑斑,前排3个或5个,中间一个较大,两侧的较小,后排3个较大,有的个体前胸背板上黑斑前排3个,后排2个,或仅有前排2个黑斑,或前排有3个黑斑,中间一个较大,两侧的较小,后排4个,中间2个略呈半圆形,且间距很小。鞘翅边缘(尤其是侧缘和基缘)和接缝黑色,有时鞘翅全部暗黑褐色。身体腹面黑红相间,各足基节和转节黑色,腿节末端和胫节末端黑色,跗节黑褐色。

鞘翅较腹部短,腹部端部外露,鞘翅表面具天鹅绒的光泽,上面有6条纵沟。

(二) 卵

平均长2.6mm,宽1.1mm,乳白色,长椭圆形,表面光滑,孵化前略膨大。

(三) 幼虫与蛹

如图16-3所示。老熟幼虫体长40~50mm,宽约20mm,无足,蛴螬形,初孵化时为白色,体渐大,头部黄褐色,胴部乳白色,体肥胖、纺锤形,微向腹面弯曲。

蛹:体长35mm左右,宽15mm左右,初化蛹时乳白色,后渐转为褐色,头部小,喙长达前足胫节,触角及复眼显著突出。

(四) 茧

如图16-4所示。长50~95mm,平均60mm,宽25~40mm,平均约30mm,呈长椭圆形,由树干纤维构成。



图 16-3 锈色棕榈象幼虫(陆永跃 摄, 2002)



图 16-4 锈色棕榈象蛹茧(陆永跃 摄, 2002)

二、危害特征

如图16-5~图16-8所示,锈色棕榈象成虫和幼虫都能为害,尤以幼虫所造成的损

失较大，幼虫钻进树杆内取食茎杆输导组织，致使树杆成空壳，树势渐衰弱，易受风折。为害生长点时，可使植株死亡。油棕、椰子成林时间较长，一旦死亡，损失甚大。

锈色棕榈象对 3~15 龄椰子树为害较严重，较少侵害 30~50 年的老树。成虫喜产卵于植株幼嫩组织伤口上。侵害幼树时，通常都是成虫在幼树树杆或位于地表的根部的受伤部位如伤痕、裂口或裂缝产卵，幼虫孵化后侵入树体。侵害老树时一般都是从树冠受伤部位侵入，而不会从树杆的受伤部位侵入。早期为害很难被察觉，后期被害树与健康树有明显差异。初为害时，新抽的叶片残缺不全，用耳朵或医用听诊器贴近受害树茎干，能听到幼虫在茎内“沙沙”的蛀食声；为害后期，中心叶片干枯，被害树的叶子减少，被害叶的基部枯死，倒披下来；移开枯死的叶柄，能看到象甲入侵的孔洞，蛀孔口处有纤维屑或褐色黏稠液体；近蛀入孔区域的叶子发生干枯。受害严重的植株，新叶凋萎，生长点死亡，只剩下数片老叶，此时植株难以挽救。有的树杆甚至被蛀食中空，只剩下空壳。如果锈色棕榈象从树冠部侵入，心叶将全部枯死。这种危害最大，因为生长点很快就会坏死。



图 16-5 叶柄中锈色棕榈象幼虫钻蛀的孔洞
(图片来自 <http://www.redpalmweevil.com/intoallRPW.htm>)



图 16-6 海枣被锈色棕榈象为害后心叶枯死
(图片来自 <http://www.redpalmweevil.com/intoallRPW.htm>)



图 16-7 棕榈叶被锈色棕榈象为害状
(图片来自 <http://www.redpalmweevil.com/intoallRPW.htm>)



图 16-8 海枣被锈色棕榈象为害后倒伏
(图片来自 <http://www.redpalmweevil.com/intoallRPW.htm>)

三、诊断方法

由于锈色棕榈象为害前期,危害状不明显,很难发现,易随苗木调运传入新的地区,所以应实行严格检疫。严禁从疫区各国进口寄主植物的实生苗、吸芽以及作包装用寄主材料。特殊需要引种时,必须经特殊审批,并进行严格检疫处理,隔离试种1年以上,证明无疫情,方可启用。当地疫情监测时应检查椰林、园林或苗圃中寄主植物植株、苗木有无相似危害状如根部、茎秆或叶柄有无孔洞,蛀孔口处是否有纤维屑或褐色黏稠液体;新抽的叶片是否残缺不全,是否有叶片基部枯死,倒披下来,心叶是否枯萎;或用耳朵或医用听诊器贴近受害树茎干,是否能听到茎内有“沙沙”声。若有以上情况,则应剖开植株,查找虫体,若有可疑虫卵、幼虫或蛹,应饲养到成虫进行种类鉴定。

还可以利用黑光灯、引诱材料、性激素等监测是否有锈色棕榈象发生。具体方法如下:①灯光诱集。利用该虫成虫的趋光性,在种植园内每隔50m设置一个2m高的黑光灯,灯下放置盛有杀虫剂药水的水盆,在黄昏时分开灯诱集成虫。②材料诱集。在种植园内,每隔20m放置一队诱杀材料一发酵时能发出酸性味道的材料(如菠萝、甘蔗、假槟榔、椰子嫩茎等),诱杀材料的切口应参差不齐,以引诱成虫前来交配产卵。③性激素诱集。在种植园内,每隔100m设置一水桶,水桶不加盖或在盖上留7~8个直径为3cm的洞孔(以便成虫容易进入),桶内放杀虫剂药水,在离水面2~3cm处固定放置该虫雌、雄性激素,引诱成虫前来交配,使其落入水中。

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

锈色棕榈象主要随寄主实生苗、吸芽、枝条及作包装用寄主材料进行远距离传播,成虫也可飞行逐渐扩散。从疫区调运棕榈科植物及相关材料,若未经处理而进行远距离运输,锈色棕榈象的存活率很高。该虫在世界上不同国家和地区间的传播扩散情况如下。

20世纪初锈色棕榈象已经是椰子和其他棕榈植物重要的经济害虫。有人认为锈色棕榈象起源于印度和美拉尼西亚(澳大利亚东北部群岛),也有报道称该虫起源于热带非洲。但关于锈色棕榈象最早的报道见于1891年印度,此后在1906年和1917年再次报道严重为害椰子和枣椰。1918年在伊拉克的美索不达米亚地区锈色棕榈象对枣椰造成严重危害,但无标本可供确认。1962年菲律宾、泰国、澳大利亚报道了该虫发生为害(Wygnier, 1962)。后来在斯里兰卡、印度尼西亚、巴基斯坦、缅甸该虫也相继发生(Lakshmanan *et al.*, 1972)。从20世纪80年代中期开始锈色棕榈象由南亚快速向西扩散。1985年到达了沙特阿拉伯东部,随后一些阿拉伯湾国家如巴林、阿曼、卡塔尔也相继发现该虫传入。

在伊朗 Sistan and Balouchestan 省 Saravan 地区枣椰传统种植区,1990年第一次报道锈色棕榈象发生危害。据估计这种害虫很可能是由于非法从巴基斯坦进口枣椰枝条而传入的。

1992年11月底在埃及的El-Hussinia、Sharquiya地区发现该虫成为棕榈植物重要害虫并导致严重经济危害。1993年西班牙在南部Granada省Municipal区Motril和Almunecar两地第一次监测到锈色棕榈象。虫源似乎来自于从Barcelona港进口的未经相应检查和检疫处理的棕榈植物。虽然很难弄清确切来源和时间,但引入棕榈植物的时间是在20世纪90年代初,有几批棕榈植物分别来自突尼斯、埃及、沙特阿拉伯。1999年在以色列、约旦、巴勒斯坦地区发现该虫。扩散速度如此快主要原因是人们从疫区调运感染害虫的枣椰树或枝条等到非疫区的缘故。

中国广东省中山市1997年在一个棕榈苗圃发现该虫,估计是由于从1994年开始从台湾运入海枣、台湾枣和银海枣等棕榈苗木而传入。2000年,在海南文昌椰子园发现该虫发生为害。

二、入侵成因

(一) 我国南方气候适宜锈色棕榈象生存

锈色棕榈象原产于印度和澳大利亚东北部群岛。这些国家和地区跨越热带和亚热带,属于高温高湿地区。临近我国的巴基斯坦、印度、孟加拉国、缅甸、泰国、老挝、柬埔寨、越南、菲律宾、马来西亚、印度尼西亚、日本等国均有锈色棕榈象发生。从目前的疫情调查结果来看香港、台湾已有锈色棕榈象发生,大陆的广东、广西、海南、云南、福建等地不断有疫情。因此,从气候相似性角度来说可以认为华南地区是很适宜锈色棕榈象定居的场所。

(二) 嗜食寄主植物种类丰富

锈色棕榈象主要取食为害棕榈科经济或观赏植物,包括椰子 *Cocos nucifera*、枣椰 *Phoenix dactylifera*、西谷椰子 *Metroxylon sagu*、假槟榔 *Archontophoenix alexandrae*、棕榈 *Arenga pinnata*、油棕 *Elaeis guineensis*、贝叶棕 *Corypha gebanga*、林刺葵 *Phoenix sylvestris*、糖棕 *Borassus flabelliformis*、鱼尾葵属 *Caryota maxoma*、*C. cumingii*、王棕 *Oreodoxa regia*、槟榔 *Areca catechu*、海枣 *Phoenix sp.*、甘蔗 *Saccharum sinensis*、台湾海枣、银海枣、龙舌兰等。其中椰子、枣椰、油棕是最主要的寄主。据笔者2003年的调查结果显示,锈色棕榈象除为害上述寄主外,在广东地区还在大王椰子 *Roystonea regia*、酒瓶椰 *Hyophorba lagenicaulis* 等植物上发生。

我国在长江流域以南地区棕榈科植物资源丰富,许多种类是我国重要农业作物和园林绿化观赏植物。海南省椰子种植面积大,目前正在进行百万亩椰林工程。此外由于园林绿化迅速发展的需要,我国各地种苗绿化用棕榈科植物种类及数量越来越多,包括许多从国外引进的珍贵种类。因此,在我国南方尤其是海南、广东、福建、广西等地,锈色棕榈象有充足的寄主植物资源。

(三) 棕榈科植物钻蛀性害虫生态位空缺

如表16-1所示。

表 16-1 中国大陆椰子 *Cocos nucifera* 钻蛀性害虫种类

害虫种类	在中国大陆的分布区	为害部位	发生程度
东方行军蚁 <i>Doxrylus orientalis</i> Westwood	海南	茎、叶	+
蔗根土天牛 <i>Dorysthenes granulosis</i> Thomson	海南、广西、广东	根	+
二瘤犀甲 <i>Oryctes rhinoceros</i> L.	海南、云南、广东、广西	叶、佛焰苞	+++
橡胶木犀金龟 <i>Xylotrupes gideon</i> L.	海南、云南、广东、广西、福建	叶柄、茎、芽、果	+

注：发生程度分为+、++、+++三级，分别表示一般、中等和严重。

在中国南方，椰子钻蛀性害虫仅有二瘤犀甲 *Oryctes rhinoceros* 为害较严重，广泛分布于海南省及雷州半岛徐闻地区，但以为害叶、佛焰苞为主。还有东方行军蚁 *Doxrylus orientalis* Westwood、蔗根土天牛 *Dorysthenes granulosis* Thomson、橡胶木犀金龟 *xylotrupes. gideon* L.等，但均发生较轻，仅部分地区为害较重。因棕榈科植物钻蛀性害虫种类及数量均较少，锈色棕榈象在资源生态位上缺乏有力的竞争者，而易于侵入，一旦传入，即会占据并充分利用这个资源生态位——茎及叶柄，继续繁衍发展种群，成为新侵入的虫源进一步扩散。

(四) 棕榈林生态环境适合锈色棕榈象入侵

锈色棕榈象的寄主植物大部分是经济或观赏棕榈植物，除海南的椰子常大面积连片种植外，其他一些当地或引进的棕榈植物常被人为地种植于道路、公园、住宅小区等地，用于城市绿化。人工种植的棕榈植物由于经常受到干扰，其上动物群落物种多样性较低，群落结构较简单，抵抗锈色棕榈象入侵的能力较弱。锈色棕榈象幼虫生活于植物茎干或叶柄内，待发育到成虫后再飞出寻找新的寄主植物产卵。树杆内小环境很稳定，受外界影响较小，锈色棕榈象幼虫蛀入后生存几率较高。另外由于新的生态环境中缺乏有效抑制的生物因子——天敌，锈色棕榈象侵入后易定居，发展。

综上所述我国华南地区无论是气候，还是寄主植物、生态系统等均适宜锈色棕榈象的入侵。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

一、危害现状

锈色棕榈象对 10 年以下树龄的幼年椰树的危害最大，主要以幼虫蛀食树干和树冠心叶为害，一旦钻入树干，通常在 6~8 个月内就能造成椰树死亡。

印度 20 世纪 50 年代每年有 20 万株椰子受害，在马拉尔海岸每年都有 5% 的 10 年树龄的幼椰树被害致死。在 50 年代，斯里兰卡由于红棕象甲为害，有 30%~40% 的椰子幼树死亡。

广东中山市 1997 年发现该虫时，为害率为 3.5%。2001 年，海南椰子主产区文昌、琼海、万宁、陵水、三亚、乐东等地，该虫对 3~15 龄椰子树的为害率达 7% 以上。

二、生态经济影响

如果锈色棕榈象侵入我国内陆定殖,将对我国棕榈植物造成巨大威胁,具有很大的潜在生态、经济危害性。

由于棕榈植物生长周期较长,观赏价值高,所以价格也较高。遭锈色棕榈象危害后,棕榈植株一般会迅速死亡,经济损失较大。除直接危害外,锈色棕榈象入侵后会明显破坏景观,降低景观价值,并威胁椰子产业。也可能造成在防治锈色棕榈象中滥用杀虫剂而引起潜在的环境和健康问题。

由于锈色棕榈象是一种新的入侵生物,对新的生态系统的影响目前研究较少,有必要进行进一步的深入探讨。

第五节 生物学特性

关于锈色棕榈象的生物学特性、发生规律及防治技术等方面研究较多。

一、生物学特性

早在 1906 年,就有关于锈色棕榈象的卵、老熟幼虫、蛹和成虫特征的简单描述;后来,印度、爪哇、马莱、菲律宾等国都对锈色棕榈象的生物学特性进行了较详细的研究。近年来,伊朗、西班牙也开展了相关的工作。

(一) 生活史和发育历期

锈色棕榈象 1 年大约发生 3 代,第 1 代时间最短,为 100.5d,第 3 代时间最长,为 127.8d,从卵到成虫的历期为 45.7d,雄虫平均为 54.8d,雌虫平均为 58.7d,雌虫的发育历期比雄虫长,但其差异并不显著。幼虫共 9 龄,成虫寿命变化较大,雌虫为 39~72d,平均为 59.5d,雄虫为 63~109d,平均为 83.6d,两者呈极显著差异。室温下各虫态平均历期见表 16-2。

表 16-2 锈色棕榈象各虫态平均历期(d)

性别	卵期	幼虫									预蛹期	蛹期	成虫
		1 龄	2 龄	3 龄	4 龄	5 龄	6 龄	7 龄	8 龄	9 龄			
雄虫	3.0	2.0	2.1	2.3	2.9	3.2	4.3	4.8	5.8	7.6	4.3	13.7	83.6
雌虫	3.0	2.0	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	1.9	7.3	8.9	5.4	14.3	59.5

(二) 生活习性

成虫:锈色棕榈象成虫白天不活跃,通常隐藏在叶腋下,只有取食和交配时才飞出。一般羽化后即可交尾,交尾发生多次,每次 15.3s。雌虫通常在幼年椰树上产卵,产卵时将长且锐利的产卵器深深插入植株组织中。有时也将卵产于叶柄的裂缝或组织暴露部位,还经常在由犀甲造成损伤的部位产卵。卵单产,单雌产卵量为 162~350 粒,平均为 221.4

粒。产卵期为 33~70d, 平均为 56.6d。

卵: 卵孵化率为 85.2%~93.9%, 平均为 89.6%。卵期的致死高温为 40℃。

幼虫: 初孵幼虫取食植株多汁部位, 并不断向深层部位取食, 在树体内形成纵横交错的隧道。

蛹: 老熟幼虫用吃剩的植株纤维结茧, 茧呈圆筒状, 结茧需要 2~4d, 然后就在茧中化蛹。

二、发生规律

在海南该虫一年发生 2~3 代, 世代重叠。成虫在一年中有两个明显出现的时期, 即 6 月和 11 月。红棕象甲成虫一般不直接为害, 主要是幼虫钻蛀为害。该虫能为害不同树龄的椰子树, 尤其对 3~15 龄椰子树为害较严重。据资料显示, 该虫对油棕、大王棕、假槟榔、海枣、糖棕等棕榈科植物为害也较严重, 能导致成片椰子林或棕榈科植物死亡, 而且有不间断蔓延的趋势。目前, 在海南文昌的文城、清澜、潭牛、东郊、重兴、会文、烟敦, 琼海的长坡, 万宁的兴隆, 陵水的椰林, 三亚的藤桥, 乐东的长茅等地均发现该虫危害, 造成 0.2%~0.3% 的椰子或棕榈植物死亡。一旦该虫对种植园发生为害, 如果不采取防治措施, 虫害将继续扩大、蔓延, 直至整个种植园毁灭。

第六节 检疫与防治技术

锈色棕榈象主要生活于寄主植物茎秆内, 较为隐蔽, 侵入初期很难发现。因此对调运种苗进行严格的检疫处理十分必要。

一、检疫措施

严禁从疫区各国进口寄主植物的实生苗、吸芽以及作包装用寄主材料。特殊需要引种时, 必须经特殊审批, 并进行严格检疫处理, 隔离试种 1 年以上, 证明无疫情, 方可启用。



图 16-9 向海枣树干内注射化学药剂

二、防治

(一) 栽培技术防治

防治锈色棕榈象的主要栽培技术有保持树冠清洁; 避免树杆和树冠受伤; 发现树杆受伤时, 可用沥青涂封伤口或用泥浆涂抹, 以防成虫产卵; 受害致死的树应及时砍成小段后集中烧毁; 及时清理掉落的树叶, 并集中烧毁。

(二) 化学防治

应用化学药剂主要使用注射药液进行防治。防治幼虫时可向树杆体内注射的药剂有 1% 除虫菊素+增效醚(Pyrocon-E)、1% 甲萘威溶液、丁硫克百威、久效磷(10mL/株)、久效磷(5mL/株)+敌敌畏(5mL/株)等注射树, 或用棉花蘸

敌敌畏原药塞入虫孔，并用塑料膜密封熏蒸一周，连续数次即有效(图 16-9)。或在植株叶腋处填放 5%的氯丹与沙子的拌合物，在伤口和裂缝处涂抹煤焦油或氯丹，在树杆上打孔，放入 1~2 片磷化铝等，均能有效控制红棕象甲为害。用久效磷加等量水稀释后，将受害椰树根浸入药液中，也可收到良好的防效。在成虫盛发期，可在叶腋间撒布辛硫磷及马拉硫磷等农药。

(三) 雄性不育技术的利用

利用 X 射线和 γ 射线辐射锈色棕榈象，产生不育的雄性个体，释放到田间，降低种群繁殖力。具体防治效果还需进一步评价。

(四) 聚集信息素诱杀防治

应用聚集信息素可以诱杀锈色棕榈象，防治效果较好。印度 Murallidharan 等利用聚集信息素诱集锈色棕榈象，从 1995~1997 年，种群数量最大值从每个诱捕器 29.6 头下降到 4.6 头，下降了 84.4%；聚集信息素加甘蔗的诱虫效果优于加其他诱饵的效果(图 16-10)。

(五) 生物防治

寄生于锈色棕榈象蛹和成虫的有一种外寄生螨类，对成虫生长无不利影响，但蛹被其寄生后则不能发育到成虫。除寄生性天敌外，还有一些致病病原物如质型多角体病毒、假单胞菌、酵母菌、斯氏线虫和异小杆线虫等(图 16-11)。经生物测试这些致病病原物对锈色棕榈象均有较好的致病力。



图 16-10 应用聚集信息素诱杀锈色棕榈象



图 16-11 向孔道内释放病原线虫

(陆永跃 曾玲)

主要参考文献

刘奎, 彭正强, 符悦冠. 2002. 红棕象甲研究进展. 热带农业科学, 22(2): 70~77

- 农业部农垦局热带作物处. 1989. 中国热带作物病虫害图谱. 北京:农业出版社. 30~34
- 覃伟权, 赵辉, 韩超文. 2002. 红棕象甲在海南发生为害规律及其防治. 云南热作科技, 25(4): 29~30
- 王永壮, 覃伟权. 2000. 海南椰子主要病虫害及其防治. 热带农业科学, (5): 59~62
- Abozuhairah R A, Vidyasagar P S, Abraham V A. 1996. Integrated management of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* in date palm plantations of the Kingdom of Saudi Arabia. In: Proceedings of the XX International Congress of Entomology. Firenze, Italy, August 1996. 541
- Abraham V A, Abdulla K M, Chandy K. 1975. Evaluation of seven insecticides for control of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* Fabr. *J. Plantation Crops*, 3:71~72
- Avand F A, Gharib A R. 1995. Study of biology and control of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* Oliv. in Saravan. In: Proceedings of the 12th Iranian Plant Protection Congress (Karadj, Iran)
- Avand F A. 1996. The biology of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* Oliv. in Saravan region (Sistan & Balouchestan province, Iran). *Applied Entomology and Phytopathology*, 63: 61~89
- Avand F A. 1997. Research on the control of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Oliv.), (Col.: Curculionidae) by synthetic attractants in Sistan & Balouchestan province (Iran). A thesis submitted in partial fulfilment for the degree of M. Sc. in Agricultural Entomology, University of Tehran, College of Agriculture, Department of Plant Protection
- Cox M L. 1993. Red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* in Egypt. *FAO Plant Protection Bulletin*. 41 (1): 30~31
- Faghih A A. 1996. The biology of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* Oliv. (Coleopter, Curculionidae) in Savaran region (Sistan province, Iran). *Applied Entomological Phytopathology*, 63:16~86
- FAO. 1995. Report of the expert consultation on date palm pest problems and their control in the Near East. 22~26
- Farazmand H. 2002. Investigation on the reasons of food preference of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* Oliv. *Journal of Applied Entomology and Phytopathology*, 70(1): 57~61
- Kehat M. 1999. Threat to Date Palms in Israel, Jordan and the Palestinian authority by the red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus*. *Phytoparasitica*, 27: 107~108
- Kloft W J, Kloft E S, Kanagaratnam P *et al.* 1986a. Studies on the use of radio isotopes for the control of the red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* F. by the sterile insect technique1. Preliminary investigations on the detection of radio labeled weevils. *Cocos*, 4:11~17
- Kloft W J, Koerner J, Wolfram E. 1986b. Studies on the use of radioisotopes for the control of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* F. by the sterile male insect techniques. *Cocos*, 4:19~22
- Rao P V, Subba T R, Subramanian *et al.* 1973. Control of red palm weevil on coconut. *J. Plantation Crops*, 1: 26~27
- Rochat D, Avand F A, Farazmand H *et al.* 2001. Effect of red palm weevil mass trapping with synthetic pheromone in traditional Iranian date palm groves, *Second Asia-Pacific Conference on Chemical Ecology*, 8(7-11): 50~51
- Shamseldean M M, Abd M M. 1994. Laboratory evaluation of six Egyptian isolates of heterorhabditid nematodes for control of the red palm weevil. *Egyptian Journal of Applied Science*, 9: 670~679
- Vidyasagar P V, Keshava B S. 1991. Pest management in coconut gardens. *Journal of Plantation Crops*, 19(2): 163~182

第十七章 褐纹甘蔗象

第一节 分布与起源	399	第四节 危害现状与生态经济影响评估	402
第二节 识别特征与早期诊断	400	第五节 生物学特性	403
第三节 传入途径与入侵成因	401	第六节 检疫与防治技术	403

摘要 褐纹甘蔗象 *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller) 是侵入我国的重要的棕榈植物和甘蔗害虫。本文就该虫的分布与起源、识别特征与早期诊断、传入途径与入侵成因、危害现状与生态经济影响评估、生物学特性、检疫与防治技术等方面进行了分析与讨论。指出由于褐纹甘蔗象的寄主种类较多, 适生范围较广, 危害隐蔽, 一旦传入, 很难根除。

关键词 褐纹甘蔗象 入侵 危害 生物学 生态学

Chapter 17 Asiatic Palm Weevil *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller)

Abstract: Morphological features and damage of Asiatic palm weevil *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller) (Coleoptera: Curculionidae), a dangerous insect pest, which had caused serious damage to the palm plants and sugarcane *Saccharum sinensis* in several other countries and districts, were described in brief in this paper. The distribution in China, damage to the host plants, economical value of host plants, spreading possibility and control of the Asiatic palm weevil were evaluated according to the method of pest risk analysis. The result showed that the weevil was dangerous and devastating for the palm plants and sugarcane in China.

Key words: *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller), invasion, damage, biology, ecology

第一节 分布与起源

褐纹甘蔗象 *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller), 属鞘翅目 Coleoptera、象虫科 Curculionidae。英文名为 Asiatic palm weevil。该虫原分布区域狭小, 仅在菲律宾等地, 后传入日本冲绳(仲盛广明等, 1993)、中国台湾, 现在广东省一些棕榈苗木场已发现为害(张润志等, 2002)。

第二节 识别特征与早期诊断

一、褐纹甘蔗象各虫态形态特征

如图 17-1~图 17-5 所示。



图 17-1 褐纹甘蔗象卵(曾玲 摄, 2002)



图 17-2 褐纹甘蔗象幼虫(曾玲 摄, 2002)



图 17-3 褐纹甘蔗象蛹(曾玲 摄, 2002)



图 17-4 褐纹甘蔗象成虫(曾玲 摄, 2002)

褐纹甘蔗象各虫态形态特征描述如下：

成虫：体长 15mm，宽 5mm。身体赭红色，具黑褐色和黄褐色纵文。触角索节 6 节；棒不扁平，端部 1/3 密布细绒毛。前胸背板基部略呈圆形，背面略平，具 1 条明显的黑色中央纵纹，该纵纹在基部 1/2 扩宽，中间具有一明显的黄褐色纵纹。小盾片黑色，长舌状。鞘翅赭红色，行间 2、3 基部 1/3、4、6 近基部、2~6 的端部 1/3 处以及行间 8、9 的端部 1/2 和 10 的基部 1/2 均具明显黑褐色纵纹。臀板外露，具明显深刻点，端部中间刚毛组成脊状。足细长，附节 4 退化，隐藏于附节 3 中，附节 3 二叶状，显著宽于其他各节。

幼虫：体长 15~20mm 无足，略呈纺锤形，腹部中央突出；头部呈红棕色，椭圆形，上颚红棕色；前胸背板呈淡黄褐色；胴部为乳白色。

蛹：长约 13mm，宽 6mm，体色呈土黄色略带白色，具赭红色瘤突；腿节末端外部

有突刺，较体色略暗。

二、危害特征

如图 17-6~图 17-8 所示。以幼虫钻蛀椰子等多种棕榈科寄主植物和甘蔗的叶鞘和茎干，造成大量纵横交错的孔洞及虫道。在椰子苗期，低龄幼虫会在椰子苗基部叶鞘包围着的幼嫩茎表钻蛀形成不规则的取食痕，高龄幼虫钻入茎干内为害，椰子茎干受害后表面常出现流胶。褐纹甘蔗象也为害大株椰子，幼虫钻入椰子树茎干后表面有孔洞；椰子受害茎表为害孔愈合后常留有为害痕。老熟幼虫在叶鞘与茎干间，以为害后的纤维包裹作茧化蛹。棕榈科植物受害较重时出现枯黄化叶，严重时死亡。甘蔗茎干被蛀后常枯死，田间常见枯死植株。



图 17-5 褐纹甘蔗象蛹茧
(曾玲 摄, 2002)

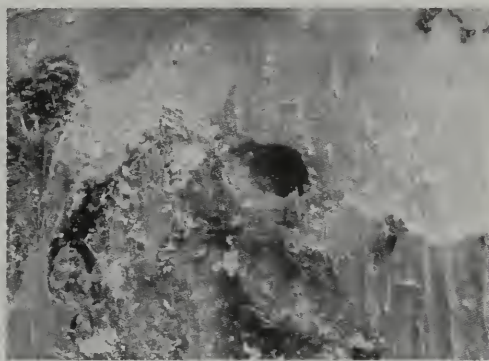


图 17-6 褐纹甘蔗象在椰子茎表面的蛀孔
(曾玲 摄, 2002)

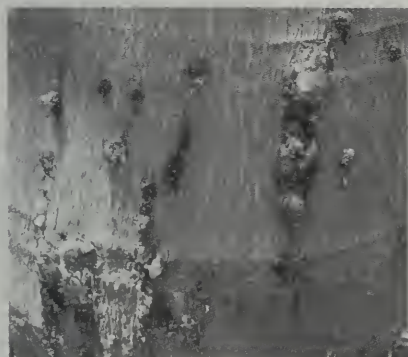


图 17-7 大王椰子受褐纹甘蔗象为害后茎表面的流胶
(曾玲 摄, 2002)

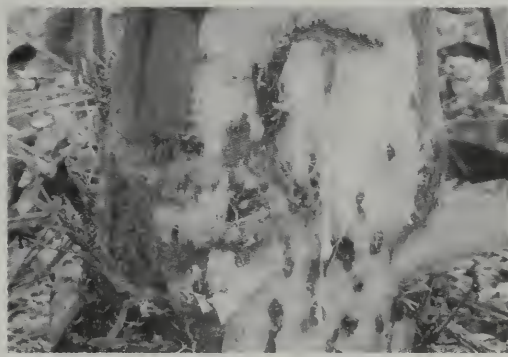


图 17-8 大王椰子茎基部受褐纹甘蔗象为害状
(曾玲 摄, 2002)

三、诊断方法

检查调运的棕榈植物及甘蔗有无孔洞、虫道等为害状，有无各虫态存在。在未见分布区对棕榈科植物和甘蔗田进行虫情监测，可用引诱物如发酵的甘蔗茎秆，置于塑料盆内诱捕成虫。

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

褐纹甘蔗象以卵、幼虫、蛹和成虫随棕榈苗木和甘蔗种苗远距离传播。由于该虫生活于寄主植物茎干内,从疫区调运棕榈科植物带虫的苗木和甘蔗种苗,若未经处理而进行远距离运输,则褐纹甘蔗象的存活率较高。发生地区内成虫可作短距离飞行扩散。

二、入侵成因

褐纹甘蔗象是钻蛀性害虫,其一生大部分时间都在树干里钻蛀为害,受外界干扰较少。从与发生地气候条件相似性、寄主植物种类较多、种群数量、新区域适生生态位、生态系统结构、生活微环境等方面分析,中国华南地区均适宜褐纹甘蔗象的入侵。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

一、危害现状

褐纹甘蔗象可为害多种棕榈科植物和甘蔗。椰子苗期受害后生长变缓,甚至枯死,成年椰子受害后树势变弱,不耐干旱,易感病害,易遭受台风损害,严重降低了产量和观赏质量。甘蔗茎秆被蛀后常枯死,损失较大。1976年褐纹甘蔗象传入日本冲绳岛,1993年成为甘蔗的主要害虫。1997年10月台湾省发现该虫,目前已经扩散到台北和彰化等地,主要为害棕榈科的黄椰子 *Mascarena verschaffeltii*、散尾葵 *Chrysalidocarpus lutescens*(廖君达和陈庆忠,1997)。

二、生态经济影响

褐纹甘蔗象的寄主植物包括多种棕榈科经济或观赏植物。作者的调查资料显示椰子 *Cocos nucifera*、西谷椰子 *Metroxylon sagu*、大王椰子 *Roystonea regia*、华盛顿椰子 *Washingtonia filifera*、槟榔 *Areca catechu*、假槟榔 *Archontophoenix alexandrae*、海枣 (*Phoenix* sp.)、刺葵 (*Phoenix* sp.)、散尾葵、蒲葵 *Livistona chinensis*、黄椰子皆是可为害的植物,尚未在大田作物甘蔗 *Saccharum sinensis* 中发现发生为害。

褐纹甘蔗象如侵入内陆定殖,将对我国南方的椰子及棕榈苗木、制糖业造成严重威胁,具有很大的潜在生态、经济危害性。和锈色棕榈象、椰心叶甲一样,褐纹甘蔗象为害后,棕榈植株一般会迅速死亡,破坏景观,降低景观价值,在防治中也可能造成滥用杀虫剂而引起潜在的环境和健康问题。由于褐纹甘蔗象是一种新的入侵生物,对新的生态系统的影响目前研究较少,有必要进行进一步的深入探讨。

除威胁棕榈科植物外,褐纹甘蔗象的另一种主要寄主甘蔗在我国数量极大,且经济价值很高。甘蔗分布于中国17个省(市、区),以广西、广东、云南、海南、福建和台湾等省(区)为主,目前甘蔗种植面积约100万公顷,华南蔗区(台湾除外)甘蔗种植面积及产量分别占全国的85%和90%左右。仅广西1996和1997年榨季甘蔗糖产量就达235万吨。

因此，褐纹甘蔗象一旦侵入大田甘蔗，所造成的损失将极为严重。

第五节 生物学特性

该虫成虫具明显的负趋光性，多躲藏于叶鞘内或幼虫蛀道内，产卵于椰子或甘蔗茎秆内或叶鞘内，有时也产卵于叶脉间，茎秆或叶鞘表面留有变色小孔；以幼虫钻蛀椰子等多种棕榈科植物寄主和甘蔗的叶鞘和茎秆，老熟幼虫在叶鞘与茎秆间，以为害后的纤维包裹作茧化蛹。

褐纹甘蔗象在日本冲绳 1 年发生 1 代(岩永节子, 1996)。成虫寿命为 $208 \pm 44.9d$ ，从羽化至第 208d 的成虫存活率为 78.6%，产卵期为 179d，平均产卵量 73.4 ± 22.4 粒。在 $25^{\circ}C$ 下，卵期为 $4.8 \pm 0.4d$ ，幼虫期为 $43.7 \pm 11.3d$ ，蛹期 $9.2 \pm 0.9d$ ；从卵至羽化需 48~87d；在 $28^{\circ}C$ 下；卵期、幼虫期、前蛹及蛹期分别为 $4.8 \pm 0.4d$ 、 $29.4 \pm 8.9d$ 、 $19.0 \pm 5.7d$ 和 $9.2 \pm 0.9d$ 。

第六节 检疫与防治技术

通过多种检疫处理措施可较为有效地防止该虫传播。

一、检疫措施

加强检疫，防止害虫传入。从褐纹甘蔗象传入日本和台湾的情况看，该虫主要以引入椰子苗木和甘蔗传带，因此要对我国从海外引入的棕榈科植物苗木和甘蔗进行严格检疫，特别是对来自菲律宾、台湾和日本冲绳的相关材料。

二、疫情监测与防除技术

在华南各省区开展棕榈科植物和甘蔗的疫情普查，引诱物可以使用发酵的甘蔗茎秆，置于塑料盆内诱捕成虫。如发现已传入可采取化学防除技术予以根除。可选用多种有机磷类农药，采取涂毒泥、注射、喷雾等施药方法处理危害植株。

(陆永跃 曾 玲)

主要参考文献

- 廖君达, 陈庆忠. 1997. 台中农业改良场研究汇报. 57: 43~48
岩永节子. 1996. 冲绳县农业试验场平成 8 年试验研究成果摘要. 23
张润志, 任立, 曾玲. 2002. 警惕外来危险性害虫入侵. 昆虫知识, 39(6): 471~472
仲盛广明, 左渡山安常, 金城常雄. 1993. 冲绳县农业试验场平成 6 年试验研究成果摘要. 29~30

第十八章 大 瓶 螺

第一节	起源与分布	405	第五节	生物学特性	409
第二节	鉴别特征与早期诊断	406	第六节	生态学特性	410
第三节	传入途径与入侵成因	406	第七节	风险分析与早期预警系统	412
第四节	危害现状与生态经济影响的 评估	407	第八节	预防、控制与根除	413
			第九节	应用与基础研究发展策略	416

摘要 大瓶螺作为入侵生物,已在农业生产、环境和寄生虫病传播等方面产生了一系列严重的问题。目前在亚洲、北美和南美洲都有大瓶螺为害的规模暴发。我国的大瓶螺最早是作为养殖对象引入的,其后在短时间内大瓶螺的分布范围迅速增加,并向北推进。目前大瓶螺在我国分布的北限在北纬 30°附近。而由于该螺对环境的适应能力很强,能通过各种调节方式渡过逆境,所以最后的分布区可能还会有所增加。目前世界各个发生大瓶螺为害的国家都致力于对它的防治研究,但迄今还未得到能被普遍运用的防治策略。本章节简要地分类介绍了近年来有关大瓶螺的各类研究,多数为有关其生物学特性、生态学特点、地方性防治的方法以及与未来制定综合性的防治策略有关的诸方面问题。

关键词 大瓶螺 水稻生产 水生生物 多样性 寄生虫病 防治策略

Chapter 18 Golden Apple Snail *Pomacea canaliculata* (Lamarck)

Abstract: The golden apple snails (GAS) *Pomacea canaliculata*, an invasive freshwater gastropod, causing a series of problems of the production of rice, environment and parasitic disease dispersion, has been successfully introduced to and then colonizing in the Asia, North America, and some South American countries except for Argentina as the origin. In China, since it was firstly introduced to Guangdong as a bred object for obtaining protein in the 1980s, the distribution range of GAS has expanded in short period until northerly limited by the boundary near north latitude 30°. This limitation might not be regarded as unchangeable due to the striking adaptability of GAS to various environments, which can be tolerated by GAS in means of making higher survival rate by digging deeper for hibernation, modulating the diet range to much more local plants, and so on. So, great efforts from diminishing the population size to eradicating the species have been made in the infested countries. However,

till today there is not a commonly accepted controlling strategy can be employed in the GAS control practice. Here we briefly introduced the GAS research achievements in recent years, mostly on its biological features and ecological characteristics, local control strategy, and other aspects possibly leading to the potential establishment of a more comprehensive strategy.

Key words: *Pomacea canaliculata*, rice cultivation, aquatic community, biodiversity, parasitic disease, control strategy

第一节 起源与分布

大瓶螺 *Pomacea canaliculata* (Lamarck)(=*Ampullarius insularus* D'orbigny, *Ampullaria gigas* Spix, *Ampullaria canalicuat* Lamark, *Ampullarum crossean*), 属软体动物门腹足纲 Gastropoda, 前鳃亚纲 Prosobranchia, 中腹足目, Mesogastropoda, 瓶螺科 Pilidae, 瓶螺属 *Pomacea*。瓶螺科的物种自然分布于中美洲、南美洲、非洲、南亚和一些加勒比海岛屿上, 只有 1 种在美国的佛罗里达州。而大瓶螺原产于南美洲亚马逊河流域。在我国, 大瓶螺又被称作福寿螺、苹果螺、金宝螺、洋螺、鬼仔螺。

由于瓶螺属的物种具有多变的贝壳形态, 在其分类上和生物学研究时名实不符的情况一直存在着 (Cazzaniga, 2002)。

大瓶螺属于热带和亚热带种。在南美洲, 大瓶螺分布于阿根廷、玻利维亚、巴西、巴拉圭、苏里南和乌拉圭 (Ponce de Leon and Carpo, 1994); 在亚洲分布于中国、印度尼西亚、日本、韩国、老挝、马来西亚、巴布亚新几内亚、菲律宾群岛、泰国和越南 (Halwart, 1994); 在北美洲, 分布于美国数个州; 在欧洲是否分布尚不清楚; 在非洲有可能分布于埃及。

该螺作为一种食物在 20 世纪 70 年代末被引入东南亚许多国家和地区, 包括菲律宾、越南、泰国, 在 1980 年被引入中国台湾 (Barker, 2002), 1981 年被引入中国大陆地区 (吕利华等, 2000)。目前大瓶螺已经成为上述国家或地区水稻 *Oryza sativa* 生产中危害最严重的有害物之一。1981 年大瓶螺被引入印度尼西亚, 1985~1987 年间大瓶螺顺利地在当地建立了种群, 成为一种常见物种 (Suharto, 2003)。亚洲其他部分如缅甸、孟加拉国和印度的水稻生产也遭受到大瓶螺的威胁 (Halwart, 1994; 俞晓平等, 2001)。在美国, 与褐云玛瑙螺的传播方式一样, 它作为宠物而被引入, 并且还在通过互联网进行的宠物交易继续传播 (Smith, 2002)。在夏威夷, 大瓶螺最初被有意放入芋 *Colocasia esculenta* 田, 以期望通过作为食品原料的大瓶螺获得收益 (Lach and Cowie, 1999)。大瓶螺已入侵美国本土并威胁着水稻的生产, 并且这种情况在德克萨斯州和加利福尼亚州较为严重 (Smith, 2002), 在得克萨斯州、路易斯安那州和夏威夷, 因其影响水稻和芋头等作物的生产而被宣布为农业有害生物 (Florida Department of Agriculture and Consumer Services, 2000), 目前在佛罗里达州和卡罗林纳州也有分布。目前大瓶螺已成为世界性的农业生产的重要有害生物, 在各地的引入和传播都对粮食生产和农业产值造成了严重的影响 (Stuart Chapin III et al., 2000)。

第二节 鉴别特征与早期诊断

成螺贝壳(见彩插 18-1): 大瓶螺贝壳较薄, 卵圆形; 淡绿橄榄色至黄褐色, 光滑。壳顶尖, 具 5~6 个增长迅速的螺层。螺旋部短圆锥形, 体螺层占壳高的 5/6。缝合线深。壳口阔且连续, 高度占壳高的 2/3; 脐部薄, 蓝灰色。脐孔大而深。厣角质, 卵圆形, 具同心圆的生长线。厣核近内唇轴缘。壳高 8 cm 以上; 壳径 7cm 以上, 最大壳径可达 15cm (吴岷, 2002)。

卵(见彩插 18-2): 卵块产于距离水面 10~30cm 的岸壁、植物茎秆等处; 卵块橙红色, 随着孵化颜色逐渐变浅, 卵块的长径为 2.0~5.0cm, 短径平均为 1.2cm, 长径垂直水面; 每个卵块含卵 200~500 粒, 卵块最长可达 8.5cm, 重 2.7g 左右。空卵壳为白色。

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

大瓶螺在我国的传入从 1981 年开始。该年中山市沙溪镇将大瓶螺引入广东省, 然后各地先后引种饲养, 以作为一种期望推广的水产养殖品种 (吕利华等, 2000)。但是, 由于人们对该螺的生物学特性、营养价值、市场前景, 以及该螺对生物群落的危害性认识的极度缺乏, 加之盲目引进和完全缺乏科学管理和监测, 导致在随意抛弃等失控状态下该螺流入包括农田、池塘、河沟以及各类淡水水域中。大瓶螺耐逆力强、繁殖力高、食性杂且成螺食量大, 所以其在国内局部地区迅速蔓延并成为水稻、水生经济作物等水田农业的有害螺类 (吕利华等, 2000; 俞晓平等, 2001)。根据目前已知的情况, 大瓶螺传播途径包括了人为传播和自然灾害导致的扩散 (蓝继新等, 2002) 等主要方面。前者包括以人工养殖为目的或以防治杂草为目的的引种等; 后者包括洪水等自然原因引起的大瓶螺被动扩散, 以及农田及由于自然环境的变化而导致的大瓶螺适生环境的扩大, 从而引起大瓶螺的自然种群居住地的扩大。由于大瓶螺偏好在河道、水渠中的浮生植物如水浮莲和水葫芦以及各种挺水植物上栖息和产卵, 因此大瓶螺通过河水流动或植物传布而传播的速度较快, 如在浙江温州, 大瓶螺以每年 8000~10 000m 的速度向北扩展 (俞晓平等, 2001)。

二、入侵成因

与其他入侵生物一样, 大瓶螺在我国各类适生的生境中缺乏有效的竞争物种和天敌, 加上其食性广泛、一年可多代繁殖、繁殖量巨大, 故大瓶螺能迅速改变生物环境的面貌, 造成其他水生生物种群的迅速崩溃。此外, 大瓶螺适应环境的能力强, 各种植物均能被其取食, 在环境恶化时能通过蛰伏度过严苛的条件。我国幅员广阔, 适合大瓶螺生存的环境十分丰富, 当发生人为引种、人为改变环境或环境发生各类变化时, 大瓶螺能迅速扩散、在各类适生环境中成功建立种群。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

一、危害程度

在东南亚,稻田中大瓶螺密度达到 1 头/m²时,水稻产量将减少 20%,而当密度达到 8 头/m²时,水稻产量将减少 90%以上(Lach and Cowie, 1999)。在广东,通过小区实验和大田实验,发现当在稻田中仅发现 2~3 只/m²时,水稻损失率即为 5.18%~7.54%,而实际发生的数量则远远不止这些(陈玉托等, 1996)。

二、为害面积的迅速增加

世界范围内大瓶螺的为害在不断加剧。大瓶螺在 1987 年被引入到印度尼西亚爪哇, 1995 年在爪哇西部有 12 个水稻产区遭受螺害,到 1999 年,该数量升至 16 个,而新受害的 4 个位于爪哇西北部低地,为有很好的排灌系统的水稻产区,所遭受螺害的程度尤为严重;而这 3 年中大瓶螺为害面积增加了 5~170 倍 (Suharto, 2003)。在夏威夷,芋头田中的大瓶螺密度已超过 130 头/m² (Lach and Cowie, 1999)。约在 1981 年,当大瓶螺从台湾传入日本的长崎、九州地方和和歌山县后,迅速向北扩散。至 1986 年,大瓶螺已在 47 个县中的 34 个建立了种群(Halwart, 1994)。

在我国,以北纬 30°为界,南方许多省份均有大瓶螺的发生报道。大瓶螺对农作物生产和生态环境均有严重的危害,并成为卫生害虫。目前大瓶螺已在我国台湾省、海南省、广东省、福建省、广西壮族自治区、云南省、四川省、浙江省蔓延,且均已形成大面积的灾害。浙江省在东南部稻区发生的螺害较严重,包括温州和台州地区,近年来在宁波地区也有大瓶螺为害的报道(陈建明等, 2003);四川省的泸州、宜宾、攀枝花、纳溪、隆昌、眉山、富顺、犍为县螺害猖獗(吴志平等, 1995);在福建省福鼎市、宁德,大瓶螺引起的农业为害也十分严重(阮少江, 2002);在广西鹿寨县,1993 年受害面积达 1533.3hm²,害螺密度高达 17.0 万个/hm²;在浙江温州,大瓶螺以每年 8000~10 000m 的速率向北扩展(据俞晓平等, 2001)。

三、为害植物种类的增加

据不完全统计,目前广东省不同程度遭受螺害的范围已达 37 个县(区),发生面积 13 万公顷。大瓶螺除为害水稻外,还为害水生蔬菜、芡实 *Euryale ferox* Salisb (张宝棣等, 1997)、慈菇、紫云英和甘薯,当地的每年 4~6 月、8~10 月是产卵和孵化高峰期,也是成螺和高龄幼螺为害农作物的高发期。大瓶螺对当地水稻的为害为早晚稻插秧后到露晒田以前,主要是咬断秧苗及有效分蘖(陈玉托等, 1996),造成苗少株稀,须多次补苗。秧田和分蘖期稻田一般受害 7%~15%,高的可达 64%。当水稻露晒田后,田间螺量逐渐减少,为害减轻。大瓶螺对蔬菜、慈菇、紫云英等的危害率一般为 4%~5%,高的达 10%~15%,局部田块可达 30%以上(肖汉祥, 2000)。

在为害芡实时,大瓶螺从叶背或叶缘啃食叶片,造成叶片穿孔或缺刻,严重时叶片大部分被啃食,植株不能进行充分的光合作用,致使芡实果实发育受阻,籽粒瘪缩而导

致减产。大瓶螺除为害叶片外，也为害芡实的花。据测定，该螺为害一般可使芡实减产20%~25%。该螺适应性强，繁殖快，生长迅速，当地有的芡实田中害螺密度极大，当芡实收获时大量螺体随植株被捞起，害螺的重量竟相当于或超过所收的芡实果苞的湿重(张宝棣等, 1997)。大瓶螺是20世纪80年代初由人工引进而传入广西融水县的。在其饲养过程中由于管理不善以及生产过剩时的随意抛弃，致使大瓶螺流散到农田、沟渠、水塘中。经过十多年的种群繁育，目前已经成为该县农田生态系统中一种新的危险性有害生物，严重威胁当地农业生产发展。该县1994年1.02万公顷水稻因此而遭受很大损失，之后经过全县长达3年的统一联合防治，在1997年统计时，危害程度较1994年已降低约90%。之后由于治理工作有所放松，在2001年重新调查中，发现危害面积恢复至0.7万公顷；更严重的是，螺害发生区域已在1997年后的4年间，从山外的平原区农田向山区乡镇的农田扩散，而且为害作物的种类也有所增加(蓝继新等, 2002)。

值得关注的是，在我国引入大瓶螺的20余年间，它们为害植物的种类数量大大增加。这表明大瓶螺具有极强的环境适应性和具有宽泛的食物范围。在20世纪80年代至90年代初，大瓶螺为害的作物主要是水稻，其次是田边、沟边的蓉草(节节草)和一些水生植物，如水葫芦、绿萍等。但近年观察发现，由于种植作物结构的变化，该螺为害农作物及水生植物种类增多。如红薯、莲 *Nelumbo nucifera* Gaertn、慈姑、菱角、甘薯(俞晓平等, 2001)、蔬菜中的白菜、菠菜、蕹菜 *Ipomoea aquatica*、豆角叶，甚至杂草中的水花生等都能成为其较为适口的食物(Halwart, 1994; 张宝棣等, 1996; 蓝继新等, 2002)。在美国夏威夷，大瓶螺的这种食性广泛的特点被初步尝试用来防止野牡丹科杂草 *Tibouchina herbacea*，尽管在那里该螺同时也是严重为害芋头的有害生物(Lach and Cowie, 1999)。

四、传播寄生虫

虽然大瓶螺主要摄食植物，但也喜食岸边活动的鼠类等小型哺乳动物的粪便，所以像褐云玛瑙螺 *Achatina fulica* 一样，大瓶螺也极易感染广州管圆线虫 *Angiostrongylus cantonensis*。由于大瓶螺经常活动于水线上下，所以也被鼠类捕食。这导致广州管圆线虫在大瓶螺和鼠之间不断循环。广州管圆线虫是人兽共患寄生虫，能引起嗜曙红细胞脑膜脑炎(eosinophilic meningoencephalitis)。全球已报道病例超过3000例，病例主要来自我国、一些东南亚国家和几个太平洋岛屿。在我国已报道300余例嗜曙红细胞脑膜脑炎病例，主要发生在台湾省。1996年前，我国大陆仅发现3例，但之后短短6年，已猛增至73例，主要是食用未充分煮熟的大瓶螺所致(杨发柱等, 1999; 林金祥等, 2003)。1993年对广州管圆线虫中间宿主的调查表明，南中国沿海地区除福建的福州外，福建厦门、广东和广西3省(区)等10个县和海南、云南等地均有广州管圆线虫的分布。1997年以来，福建的莆田、厦门和福州等地均发现广州管圆线虫，浙江的温州也有广州管圆线虫的存在，而其中间宿主为大瓶螺(杨发柱等, 1999)。这表明在广州管圆线虫从南向北的传播过程中，大瓶螺起着重要的作用。

五、影响入侵地水生生物多样性

鲜为人知的是大瓶螺在自然环境中对当地淡水生物物种多样性的影响,而且,这种影响所造成的经济损失也是最难以估量的、通常被认为是超出一般经济损失的最严重的损失。由于大瓶螺食性广泛,繁殖快速,抗逆能力强而扩散能力强,能迅速建立种群,它的出现能在短时间内改变淡水水体生物群落的动力学特征,因而有报道称其能导致土著淡水腹足类种群下降(Lach and Cowie, 1999)。尽管还未进行相关土著生物群落多样性方面的调查,以判断多样性是否因大瓶螺种群的建立和发展而有所下降,但大瓶螺入侵自然水体的速度之快、建立种群之大,使人怀疑它们很可能已对当地水生生物多样性造成了一定的破坏。在夏威夷,大瓶螺从芋田向外蔓延,在自然水体(溪流等)中已经建立庞大的种群(Lach and Cowie, 1999)。在西双版纳,大瓶螺未经事先论证就被引入。有报道称在该地区的局部地方,土著的田螺科(Viviparidae)淡水贝类已开始因此而绝迹(温元凯, 2001)。

第五节 生物学特性

一、休眠

大瓶螺具有休眠现象,产生于它作为热带螺种对临时性干旱环境形成的适应性。在入侵地,由于气候的限制,大瓶螺在冬季深深钻入泥土,关闭壳口,以休眠方式越冬。在室内实验中,大瓶螺在室内无水、气温 2~17℃ 的环境里,壳口关闭,停止摄食,进入休眠状态。秋冬季连续休眠 120d 后,仍有 51.8% 的成螺和 58.3% 的中螺存活,且能正常活动。仔螺和螺苗也有一定的休眠能力,但休眠大约 2 个月后全部死亡(尹绍武等, 2000)。在日本南部对在稻田越冬的大瓶螺连续 7 年的室内外观察研究表明,壳径大于 6mm 的螺比体型较小的螺有更高的越冬成活率,但冬季温度是决定大瓶螺越冬成活率的主要因素(Syobu *et al.*, 2001)。

二、繁殖

大瓶螺雌雄异体,在最适宜的条件下,雌螺 60~85d 达到性成熟,隔周产一次卵,常年均可产卵(Halwart, 1994)。在我国长沙地区,大瓶螺 3 月龄达性成熟,成熟的雌雄贝壳形态具有差异,雄螺螺厩中央凸起,厩边缘向内,雌螺则不同(尹绍武等, 2000; Chiu *et al.*, 2002);雌雄性比♀:♂ > 1,即雌螺多于雄螺。在菲律宾,性比为♀:♂ = 2.1:1(Halwart, 1994)。水温 25~28℃ 为交配和产卵的适宜温度;体内受精,交配时间 4~5h;产卵常在夜间进行,产卵时爬出水面,在离水面 10~34cm 的岸壁、挺水植物茎叶、或其他露出水面的物体上产下红色的卵,排卵时间 1~2h;亲螺随着排卵同时分泌黏液,使卵粒紧密黏连形成卵块;卵块大小依雌螺螺体大小而不同,每块卵的长径平均为 2.0~5.0cm,短径平均为 1.2cm,长径与水面垂直;每个卵块含卵 200~500 粒,卵块最长可达 8.5cm,重 2.7g。大瓶螺的卵只能在空气中孵化,黏液能使卵块保持一定的湿度;大瓶螺刚产出的卵为鲜艳的橙红色,以后渐变为粉红色、灰淡红色。空卵壳为白色,孵化后整个卵块呈蜂窝状。

孵化时间与孵化温度有关。当温度在 20~24℃ 范围内, 卵块孵化时间为 18~25d; 气温在 28~32℃ 范围内, 孵化时间为 8~15d。自然状态下, 在菲律宾, 大瓶螺孵化时间为 10~15d; 而在日本, 孵化期历时 3 周, 同时孵化率为 7%~90%, 变动范围很大 (Halwart, 1994)。

大瓶螺年繁殖能力: 在湖南人工条件下, 全年产卵期历时 185d, 一对亲螺繁殖量年平均为 10 000 只左右的后代; 雌螺个体较小时, 其繁殖量反而增大(据尹绍武等, 2000)。不同气候条件下, 大瓶螺繁殖量差异极大。在广州地区 1 只雌螺经 1 年 2 代共能繁殖幼螺 325 万余只 (李承龄, 1995; 摘要中的 32.5 万据正文应为 325 万), 体现出很高的繁殖能力。

三、幼螺

幼螺指未达到性成熟的大瓶螺。当孵化后, 幼螺迅速从卵块附着物上滑落到水中, 并很快开始游动。初孵螺体高为 2.0~2.4mm, 淡褐色, 从胚螺层到脐部一带为点状红色。初孵幼螺以藻类和有机碎屑食饵。同一水体中, 幼螺的密度与成螺的密度呈负相关 (Tanaka *et al.*, 1999)。当螺壳高达 1.5 cm 左右时, 幼螺开始取食植物。

四、食物的选择性

大瓶螺通常选择取食较柔嫩的植物或植物组织, 食谱广泛, 国外文献中记录的有莎草 *Cyperus monophyllus*、凤眼蓝(*Eichornia sp.*)、灯心草 *Juncus decipiens*、浮萍(*Lemna sp.*)、莲 (*Nelumbo nucifera*)、水芹 *Oenanthe stolonifera*、水稻 *Oryza sativa*、大藻(水浮莲 *Pistia sp.*)、蔗草 *Scirpus californicus*、菱 *Trapa bicornis*、苦草(*Vallisneria sp.*)、菰 *Zizania latifolia*、蕹菜 *Ipomoea aquatica* 等 (Purchon, 1977; Halwart, 1994 等)。虽然食性广泛, 但对不同的植物的摄食也具有一定的选择性。实验表明, 在以莴笋 *Lactuca sativa*、商陆 *Phytolacca acinosa*、苕麻 *Boehmeria nivea*、水稻秧苗、浮萍 *Lemna minor*、白菜 *Brassica chinensis*、狗尾草 *Setaria viridis*、水花生 *Alternanthera philoxeroides* 为候选食物的筛选实验中, 大瓶螺最喜欢的 3 种植物性饵料依次是浮萍、苕麻、白菜。中螺、成螺在无饵料可食的情况下才摄食水稻秧苗, 与浮萍、苕麻叶、白菜相比, 水稻秧苗并不是大瓶螺喜爱的饵料。大瓶螺只能摄食浮于水面或浸入水中的饵料, 对水面以上的饵料不能摄食 (尹绍武等, 2000)。此外, 在食物上没有因个体发育差异造成的选择性不同。在数种水草 (*Myriophyllum elatinoides*、焯草 *Rorippa nasturtium-aquaticum*、眼子菜 *Potamogeton striatus* 等) 中, 大瓶螺最嗜食角果藻 *Zannichellia palustris* L., 且单位时间内饲养在长有角果藻容器中的螺达到了最大体重 (Estebenet, 1995)。

第六节 生态学特性

一、习性及栖息地特点

大瓶螺具有避光性。在夜间和阴天活跃。

栖息地通常为低洼的水沟、浅水塘、鱼塘和稻田等各类静水或水体水流缓慢、一般具泥质底的淡水自然水体。根据目前已知信息判断, 大瓶螺在间或干旱的溪流、微咸水

水体、水流湍急的水体中不能正常生存 (Lach and Cowie, 1999), 但水流有助于大瓶螺的传播 (Halwart, 1994)。

二、耐污性

氨氮对大瓶螺的影响: 试验结果表明, 在 pH 8.5~9.0 之间, 水温 23~25℃ 的条件下, 氨氮对大瓶螺的安全浓度为 2.684mg/L。大瓶螺喜欢在洁净的水中生活, 但具有较强的耐污力。据观察, 在水已变色变味的情况下, 测定氨氮为 6.7mg/L, 幼螺仍能正常生活 (冯伟明, 1994)。在夏威夷, 常可在污水的漂浮垃圾上见到大瓶螺及所产的卵 (Lach and Cowie, 1999)。

三、溶解氧对大瓶螺的影响

大瓶螺的呼吸器官是鳃, 但当水中溶氧不足时也可爬到水面利用进水管呼吸空气中的氧气, 因此, 在自然水域中能忍受很低的溶氧, 一般不会因缺氧而死亡。在水温 25℃, 水溶解氧在 1.0~2.0mg/L 以下时, 大瓶螺表现出呼吸困难, 身体努力向壳外伸展以增加呼吸面积, 进水管外伸; 当溶氧为 0.45~0.23mg/L 时, 螺关闭厣, 停止活动; 当溶氧为 0.080~0.096mg/L 时, 可导致 80% 的螺死亡 (尹绍武等, 2000)。

四、pH 对大瓶螺的影响

大瓶螺比一般养殖鱼类有较强的耐碱能力, 大瓶螺具有角质厣, 环境不利它可以通过闭厣分泌黏液来适应不良的条件。大瓶螺偏好略偏碱性的水环境。pH 7.0~8.5 时, 大瓶螺正常生活; 当 pH 10~11.5 时, 48h 后仅有 5% 能正常生活, 96h 后全部死亡。当 pH > 10.0 时, 螺保持闭厣状态, 无黏液或仅有少量黏液分泌, 一直到最终死亡 (尹绍武等, 2000)。

五、耐旱能力

当由于干旱导致水体面积缩小时, 大瓶螺能随着降低的水线移动。当水线低于其贝壳高度时, 螺将停止取食和交配。在水体彻底干涸前, 它们能深钻入泥中, 关闭厣甲, 度过数月的干旱阶段。在水体重新蓄水后, 再重新活跃起来 (Halwart, 1994)。

成螺离水后, 在 22~27℃, RH82%~85% 时, 40d 后成螺生存率为 100%, 50~90d 后成螺生存率为 95%~90%。离水后 10~40d 的雌螺, 回水后 48h 内仍可产卵 1~3 块, 而离水 50d 后的雌螺则不能产卵 (冯伟明, 1994)。

卵块的发育需要一定阶段的干燥条件。在广东佛山的实验表明, 初产卵块在 7d 内受水浸泡后, 将影响正常孵化; 初产卵块在第 9d 受水浸泡后, 卵粒孵化率为 72%。而自然状况下, 卵历期 12d 后便能正常孵化, 孵化率在 94% 以上 (冯伟明, 1994)。

六、温度和年发生代数

大瓶螺不耐低温, 其最适宜生长的温度为 27.7~30.6℃ (李承龄, 1995), 在水温 12℃ 以下时活动能力显著减弱, 8℃ 以下进入冬眠, 6℃ 以下的低温能导致死亡 (尹绍武等, 2000), 故在我国的大部分地区, 大瓶螺不能自然越冬。试验表明, 冬季暴露在空气中的

大瓶螺对 1~2℃ 及其以下的低温十分敏感, 持续 1d 的如此低温可导致 100% 的死亡; 而 3~5℃ 的温度处理 30d, 没有发现死亡。而在土壤中的大瓶螺经过 1~2℃ 的低温持续处理 1 周, 仍有 50%~75% 的个体存活 (陈建明等, 2003)。而在琉球群岛北部的实验表明, 在温带地区, 低于 0℃ 的低温对大瓶螺的越冬影响最大; 在当地 4 月份进行的调查表明, 在灌水的稻田中大瓶螺的越冬成活率为 20%, 而在排干的水渠中大瓶螺的成活率仅为 5%。此外, 壳高 2~3cm 的幼螺较壳高 >3cm 的成螺对低温的耐受率高得多 (Oya *et al.*, 1987)。

在我国大瓶螺的各个分布地区, 由于年有效积温的差异和越冬温度的限制, 大瓶螺年发生代数也有所不同 (吴志平等, 1999)。有研究表明, 大瓶螺在长沙地区的自然生态条件下不能越冬, 冬季死亡率高达 100% (尹绍武等, 2000b)。在浙江省, 大瓶螺的发生仅为不完全二代, 包括越冬代和第 1 代, 有世代重叠现象 (陈建明等, 2003)。在广州地区, 大瓶螺 1 年可发生 3 代。在福建省福鼎市, 大瓶螺 1 年可发生 3~4 代。

大瓶螺在活跃期内通常有相对集中的交配和产卵现象, 但如果水温较低, 能延迟并使大瓶螺交配行为变得不活跃, 而日照时间的长短则对其没有影响 (Albrecht *et al.*, 1999)。此外, 大瓶螺卵期的长短与温度呈负相关, 孵化率与温度正相关 (李承龄, 1995)。

七、天敌

有研究表明在菲律宾稻田田埂壁上, 火蚁 *Solenopsis geminata* (Fabricius) 能破坏 38%~50% 大瓶螺卵块 (Yusa, 2001)。国内研究表明, 未知名的蚂蚁对大瓶螺卵块构成威胁 (冯伟明, 1994)。除利用家鸭来减少害螺种群, 鲤鱼 *Cyprinus carpio* 的幼鱼也可以大量吞食幼螺。尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* 等鱼类尽管能摄食大瓶螺, 但捕食强度不如鲤鱼 (Suharto, 2003)。在菲律宾有室内实验表明, 淡水白鲮 *Piaractus brachypomus* 对大瓶螺的捕食能力较鲤鱼更强 (Cagauan, 2002)。在日本, 有 46 种淡水动物被试验证实对大瓶螺有取食能力。许多动物包括鸭子、水龟、鱼、昆虫、甲壳纲和水蛭等至少能取食幼螺。鼠 *Rattus norvegicus*、鸭子 *Anas platyrhynchos*、水龟 *Geoclemys reevesii* 和鲤鱼 *Cyprinus carpio* 被证实是取食成螺最有效的天敌。

第七节 风险分析与早期预警系统

由于大瓶螺扩散和危害的严重发生, 目前多数有关大瓶螺的研究局限于防治方面, 有关大瓶螺风险分析与早期预警方面的研究几乎是空白。

周卫川等 (2003) 测定大瓶螺的适温范围为 8~38℃, 致死温度为低于 0℃ 或高于 40℃。确定大瓶螺成螺的发育零点和有效积温分别为 11.4199℃ 和 1309.2250DD, 卵的发育零点和有效积温分别为 14.0321℃ 和 94.8752DD (室内实验), 全世代的发育零点和有效积温分别为 11.6721℃ 和 1404.1002DD。结合全国 670 个气象站点的 30 年逐旬平均气温数据, 对大瓶螺的适生区和在各地发生年代数进行了预测。结果表明, 在我国, 大瓶螺 2 年不能完成 1 代的地区占 14.18%, 2 年发生 1 代的地区占 23.88%, 1 年发生 1 代的地区占

46.87, 1年2代的占12.84%, 1年3代的占2.24%。这为今后大瓶螺的早期预警及检疫策略的制定提供了一定的依据。

第八节 预防、控制与根除

一、大瓶螺的防治策略

对大瓶螺应采取预防为主、综合防治的防治策略。首先严格控制扩散蔓延, 落实植物检疫法规, 加强检疫。未发生区禁止人为引入、饲养; 发生区要防止大瓶螺向外扩散。在防治实施前, 必须了解当地现时及既往的螺害情况, 以便确定防治的最佳时机和制定因地制宜的防治措施。在已发生大瓶螺危害的地区, 有研究认为当在稻田中发现2~3只/m² (或为害损失率为5.18%~7.54%) 时, 即可开展防治 (陈玉托等, 1996)。但必须注意这是在危险发生在农区并预计将产生直接经济损失时的防治界限的一个个案。综合防治的方法包括调整耕作制度和技术、进行化学防治和结合农业生产的手工作业 (表18-1和表18-2)。

表 18-1 中国农民防治大瓶螺的方法(俞晓平等, 2001)

治理方法	治理时间	具体措施	效果
农业防治	越冬防治	清沟除淤泥和水草	冬季降低成活率
		采集和消灭沟河和稻田中成螺	降低密度
	发生期防治	春秋产卵高峰期摘除卵块	阻止种群建立
		翻耕时消灭成螺	降低密度
生物防治		稻田在大瓶螺卵盛孵期排水	提高死亡率
		避免田水串灌, 或者在稻田进水口设置拦截网	阻止侵入稻田
化学防治	发生期	秋季水稻收割后在稻田和沟渠中放鸭群, 一只0.6 kg的鸭可取食35~40只成螺	降低下一代螺密度
		70%贝螺杀 1 mg/kg	杀螺率 96.1%
		98%的巴丹原粉 11~21 mg/kg	杀螺率 98.0%
		65%的五氯酚钠 5 mg/kg	杀螺率 97.9%
		40%的百螺敌 50 g/667m ²	杀螺率 92.07%
		98%硫酸铜 13 mg/kg	杀螺率 85.9%
		6%的蜗克星 500 g/667m ²	杀螺率 80.31%
6%的密达 500 g/667m ²	杀螺率 80.24%		

表 18-2 日本农民防治大瓶螺的方法(俞晓平等, 2001)

季 节	方 法	效 果
水稻移栽期	保持浅水或排水	大瓶螺移动不方便
	移栽更老的秧苗	降低大瓶螺取食
	杀螺剂	降低密度
	拒避剂	降低密度
	提前移栽	大瓶螺活动减少
水稻生长季节 (包括水稻移栽期)	在稻田入水口设置网纱	阻止大瓶螺侵入稻田
	建立高田埂	阻止大瓶螺侵入稻田
	用手清除大瓶螺	降低密度
	清除卵块	阻止种群建立
	释放天敌(尤其在河中)	降低密度
非水稻生长季节	耕作	降低密度
	氰氨化钙	降低密度
	冬天清除稻草	在冬季降低成活率
	排水(尤其在小河中)	在冬季降低成活率

二、日常田间管理

首先应控制大瓶螺越冬种群的密度,以期有效压低第二年害螺发生量。大瓶螺在河道、水渠和低洼积水处过冬,所以冬季防治采取清除水体淤泥、挖除水草、铲除田基杂草等措施,以破坏大瓶螺的产卵场所为主。在螺害发生期或作物非生长季节,可结合农业栽种计划通过翻耕土地直接而有效地通过廉价机械方式杀死成螺;在春秋季产卵高峰期,手工摘除大瓶螺卵块,可有效控制害螺的种群密度;在水田中也可通过放水漫灌,使卵块在孵化期内淹没在水面下,以降低卵的孵化率;在卵的孵化高峰期田水外排,以降低初孵幼螺的成活率;要注意防止田水串灌,并在水渠等水网交界处设置拦截网,并加高田埂以防止大瓶螺灾情的蔓延;在幼螺孵化高峰及秋收后在稻田中放入鸭群,也可大量消灭幼螺和成螺;在印度尼西亚的一些地区,农民收集大瓶螺提供给鸭和鲶鱼的养殖户,从而在局部地区一定程度上降低了大瓶螺的种群数量(Suharto, 2003);平时可结合杂草管理,手工捡拾、消灭成螺。这些日常田间管理被证明是控制螺害的最积极、也较为有效的方法(肖汉祥, 2000; 据俞晓平等, 2001)。在印度尼西亚水稻生产中,当大瓶螺开始为害水稻时,农民用捡拾的方法来消灭蜗牛,在稻秧移栽 2d 后开始手工灭螺,一般螺情时每公顷需要 4~8 人日的工作量,在害情严重时,需 30~80 人日的工作量。在更严重的螺情发生时,通过手工灭螺已不能控制灾情了(Suharto, 2003)。

三、化学防治

在近 20 年的防治研究中,大瓶螺综合防治体系逐渐建立起来,除上述通过加强田间管理来控制 and 消灭大瓶螺的措施外,目前主要防治措施仍是喷施化学农药。通过合理使用低毒、低残留的化学农药,可以高效地控制大瓶螺的种群密度。通常,防治水稻害虫的常用化学药剂对大瓶螺防治效果不大(吴志平等,1995)。田间实验表明,施用 3%甲基异柳磷颗粒剂、3%呋喃丹颗粒剂、10%益舒宝颗粒剂等化学药剂对大瓶螺的防治没有效果。五氯酚钠、贝杀螺等化学制剂虽然有灭螺作用(陈秉瑶,1994;王小艺等,1998;肖汉祥,2000;俞晓平等,2001;李人柯等,2002;邱良妙等,2002),但由于其对人体、环境或种植物的毒副作用强烈,并不适用于实际的灭螺工作。例如,五氯酚钠由于对皮肤的强烈刺激性、对幼苗生长的抑制性,并具有一定的残留致畸致癌毒性,国家已于 1997 年禁止生产和使用;贝杀螺(Bayluscide,德国拜尔公司)对人体黏膜有刺激作用,并对鱼类有强烈的毒杀作用,会造成对当地生物多样性的灾害;硫酸铜在插秧后施用会产生药害;具杀螺作用的苦茶粕和三苯醋锡药剂被台湾有关部门禁止进口,因为这 2 种农药能产生对生态环境的难以弥补的破坏,尤其苦茶粕会杀死田里其他水生动物等。

在目前的国内外防螺实践中,人们发现一些传统农药具有良好的灭螺效果,同时也有针对性地研究和生产了一些杀螺剂。在广西鹿寨县的晚稻大瓶螺药物防治筛选试验中,除证实了上述一些农药的灭螺效果外,还发现施用石灰(施用量 $25\text{kg}/667\text{m}^2$)、98%巴丹原粉(施用量 $650\text{g}/667\text{m}^2$)、碳酸氢铵(施用量 $25\text{kg}/667\text{m}^2$),均有良好的效果。用 6%四聚乙醛(metaldehyde)颗粒剂, $8.5\sim 10\text{kg}/\text{hm}^2$,防效在 93%以上(占志雄等,1996)。50%螺敌可湿性粉剂(Niclosamide 50%WP)是一种最新的杀螺剂,在广州地区,用该药剂对水稻大瓶螺进行的室内毒力测定和田间药效试验表明,该药剂表现对大瓶螺的幼螺和成螺均具有强烈快速的毒杀作用、对植物安全等特点(李人柯等,2002)。5%梅塔小颗粒剂能迅速压低稻田大瓶螺密度,保护水稻秧苗免受大瓶螺的为害。水泥池杀螺效果为 90%以上、保苗效果为 75%左右、田间杀螺效果为 70%左右、保苗效果 85%以上。在稻田大瓶螺达 $10\text{头}/\text{m}^2$ 时,5%梅塔小颗粒剂(Metarex)推荐使用量为 $300\sim 400\text{g}/667\text{m}^2$,螺密度低于 $10\text{头}/\text{m}^2$ 时,用量可降低到 $250\text{g}/667\text{m}^2$ 左右。这种新开发的 5%梅塔小颗粒剂,杀螺效果与目前推广的 5%梅塔大颗粒剂及 6%密达颗粒剂(Meta,瑞士龙沙公司)相当,能迅速压低稻田大瓶螺密度,而且获得同等防效所需药量少,因此防治成本降低(吕利华等,2000)。梅塔对鱼、水生生物及有益生物无害,是目前较为理想的杀螺药剂(肖汉祥,2000)。但总的来说,进口杀螺剂的价格偏高,目前在我国广大螺害地区推广还存在一定的困难。这需要我国农药科研单位开发、研制出高效、低毒、低残留和更经济的杀螺剂以及因地制宜的农药施用技术。在菲律宾,有关部门推荐使用的杀螺剂为四聚乙醛和螺敌可,虽然前者往往不被农民使用,但实验表明,在使用螺敌可(250EC)作为杀卵剂后,每公顷稻田中四聚乙醛的施用量减少了 80%;如果同时结合手工作业,则螺害可在控制区内得到令人满意的控制效果(Joshi *et al.*, 2002)。

一定浓度的植物提取物对控制大瓶螺可能有效果,这方面的研究值得进一步开展。

从鱼藤 *Derris elliptica* 根部提取的鱼藤酮对大瓶螺毒性很大。鱼藤酮使用于控制大瓶螺时,半致死浓度为 400ppm,毒性较四聚乙醛低,但该浓度的鱼藤酮对大瓶螺卵块的杀卵作用效果不明显。烟草 *Nicotiana tabacum* 在室内实验中显示出对大瓶螺的毒性,但在田间实验时效果不明显。而无患子 *Sapindus rerak* 的果实和槟榔 *Areca catechu* Linn 的种子,在室内和田间实验中均显示出具有一定效果。用来控制鱼、虾池中野杂鱼的皂角素,在室内实验中也显示一定的控制螺害效果 (Suharto, 2003)。

四、天敌防治

目前在实际农业生产的操作中,仅限于在部分地区利用鸭群进行小规模防治。

第九节 应用与基础研究发展策略

1997 年开始了一个全国性的项目,主要内容是直播稻田中大瓶螺的综合防治。项目的目的是最小限度地依靠化学农药,充分利用常规技术如吸引剂、性激素、激素等。通过项目研究,得到了许多有意义的结果。例如,在播种后马上排水证明对避免大瓶螺的为害是非常有效的。随着有效除草剂的推出,在更长的期限里排水已成为可能,稻田排水 3 周对水稻苗的生长没有影响,等等。

排水、移栽较老的秧苗和使用杀螺剂及拒避剂是控制大瓶螺最有效的方法。利用这些防治方法在 90% 以上受为害的稻田中能有效地避免大瓶螺的侵害。然而,在淹水稻田中还没有找到有效的治理策略。此外,也缺乏应用于直播稻、小河及其他水生生态系统中的治理方法(俞晓平等, 2001)。

对涉及大瓶螺基础生物学和生态学的研究,如取食和交配行为、涉及取食行为的化学物质、性激素与生殖有关的激素、原产地和入侵地区自然天敌、稻田中的种群动态等,以及电控制方法、直播稻田的农业和化学防治、机械防治方法以及综合防治策略的研究,要予以充分重视,它们都可能为大瓶螺的防治和根除提供新途径和方法(俞晓平等, 2001)。在基础研究中,应尝试运用分子系统学技术,区分大瓶螺可能存在的种组问题或区分不同的生态型,探明其中有害的种类或谱系的起源问题。

(吴 岷)

主要参考文献

- 陈秉璠. 1994. 几种药剂防治稻田福寿螺试验. 广西植保, (2): 24~25 [Chen B Y. 1994. Test of several chemicals for controlling the golden apple snails in the paddy farm. *Guangxi Plant Protection*, 1994 (2): 24~25]
- 陈建明, 俞晓平, 郑青松, 徐红星, 吕仲贤, 张钰锋. 2003. 茭白田福寿螺的生物学特性和无害化治理技术. 浙江农业学报, 15(3): 154~160 [Chen J M, Yu X P, Zheng X S, Xu H X, Lu Z X, Zhang Y F. 2003. Biological characteristics of golden apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck) in *Zizania caduciflora* field and its integrated managements strategies. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 15(3): 154~160]
- 陈玉托, 杨永雄, 蔡汉雄. 1996. 福寿螺对水稻为害损失的调查与研究. 植保技术与推广, 16(4): 16~17 [Chen Y T, Yang Y X, Cai H X. 1996. Investigation and study on the harmfulness caused by golden apple snails. *Plant Protection Technology and Extension*, 16(4): 16~17]
- 冯伟明. 1994. 福寿螺的生物学特性及防治措施. 广东农业科学, (6): 41~42 [Feng W M. 1994. The biological features and

- controlling strategy to the golden apple snails. *Guangdong Agricultural Sciences*, (6): 41~42]
- 蓝继新, 冼东源, 覃金绪. 2002. 融水县农田福寿螺回升原因及治理对策. 植保技术与推广, 22(9): 10~12 [Lan J X, Xian D Y, Qin J X. 2002. The again-rising of GAS in Rongshui and its controlling strategy. *Plant Protection Technology and Extension*, 22(9): 10~12]
- 李承龄. 1995. 福寿螺的生长速度和繁殖力试验. 植物保护, 21(4): 12~14 [Li C L. 1995. Trails on the growth speed and breeding potential of *Amullaria gigas* Spix. *Plant Protection*, 21(4): 12~14]
- 李人柯, 曾志雄, 黄长安, 古方芳, 程玉莲. 2002. 螺敌防治水稻福寿螺药效试验. 广东农业科学, (3): 37~38 [Li R K, Zeng Z X, Huang C A, Gu F F, Chen Y L. 2002. Effect of Niclosamide for controlling the golden apple snails harmful to rice farming. *Guangdong Agricultural Sciences*, (3): 37~38]
- 林金祥, 李友松, 朱凯, 陈宝建, 程由注, 林金财, 曹仪, 陈日中. 2003. 长乐市广州管圆线虫集体感染的流行病学研究. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志, 21(2): 110~112 [Lin J X, Li Y S, Zhu K, Chen B J, Cheng Y Z, Lin J C, Cao Y, Chen R Z. 2003. Epidemiological study on group infection of *Angiostrongylus cantonensis* in Changle City. *Chin. J. Parasit. Dis.*, 21(2): 110~112]
- 吕利华, 肖汉祥, 黄炳超, 张杨. 2000. 5%梅塔小颗粒剂防治稻田福寿螺试验. 广东农业科学, (4): 43~45 [Lu L H, Xiao H X, Huang B C, Zhang Y. 2000. A test of controlling golden apple snails by 5% Meta molluscicide. *Guangdong Agricultural Sciences*, (4): 43~45]
- 邱良妙, 占志雄, 傅建伟, 游泳. 2002. 50%螺敌可湿性粉剂防治福寿螺药效试验. 福建农业科技, (6): 25 [Qiu L M, Zhan Z X, Fu J W, You Y. 2002. Effect of Niclosamide 50%WP for controlling golden apple snails. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, (6): 25]
- 阮少江. 2002. 闽东外来生物入侵的初步研究. 宁德师专学报(自然科学版), 14(3): 196~198 [Ruan S J. 2002. Initial study of exotic biological invasion into East Fujian. *Journal of Ningde Teachers College (Natural Science Edition)*, 14(3): 196~198]
- 王小艺, 黄炳球. 1998. 茶皂素(TS)对福寿螺的药效试验. 广东农业科学, (3): 32~34 [Wang X Y, Huang B Q. 1998. Effect of TS to the golden apple snails. *Guangdong Agricultural Sciences*, (3): 32~34]
- 温元凯. 2001. 从福寿螺的引进和危害谈西双版纳的生态入侵. 云南科技管理, (2): 46 [Wen Y K. 2001. On the bioinvasion to Xishuangbanna, with an example of the introduced golden apple snails. *Yunnan Keji Guanli*, (2): 46]
- 吴岷. 2002. 大瓶螺. 见: 李振宇. 解焱主编. 《中国外来入侵种》北京: 中国林业出版社. 60 [Wu M. 2002. *Pomacea canaliculata*. In: Li Z Y, Xie Y eds. *Invasive Alien Species in China*. Beijing: China Forestry Press. 60]
- 吴志平, 程开禄, 卿雨文, 张志东, 张华彬, 李沛霖. 1995. 四川福寿螺的发生及防除初步研究. 植物检疫, 9(5): 266~269 [Wu Z P, Chen K L, Qing Y W, Zhang Z D, Zhang H B, Li P L. 1995. Study on the outbreak and eradication of *Ampullaria canalicuat* Lamarck in Sichuan. *Plant Quarantine*, 9(5): 266~269]
- 肖汉祥. 2000. 福寿螺的危害及其防治技术. 植物医生, 13(4): 33 [Xiao H X. 2000. Harmfulness and controlling technique for the golden apple snails. *Plant Doctor*, 13(4): 33]
- 杨发柱, 张莹珍, 黄晓红, 屠昭平, 郑国斌, 何水荣. 1999. 福建广州管圆线虫形态及实验感染的观察. 实用寄生虫病杂志, 7(4): 145~148 [Yang F Z, Zhang Y Z, Huang X H, Tu Z P, Zheng G B, He S R. 1999. Morphology and experimental infection of *Angiostrongylus cantonensis* in Fujian Province. *Journal of Practical Parasitic Diseases*, 7(4): 145~148]
- 尹绍武, 颜亨梅, 王洪全, 许芳. 2000. 福寿螺的生物学研究. 湖南师范大学自然科学学报, 23(2): 76~82. [Yin S W, Yan H M, Wang H Q, Xu F. 2000a. Study on the Biology of *Ampullaria gigas*. *Acta Sci. Nat. Univ. Norm. Hunan*, 23(2): 76~82]
- 尹绍武, 颜亨梅, 王洪全, 宋利俭, 肖栋. 2000. 福寿螺对饵料的选择性研究. 生命科学研究, 4(2) (专辑): 120~124 [Yin S W, Yan H M, Wang H Q, Song L J, Xiao D. 2000b. Study on selection of *Ampullaria gigas* to diets. *Life Sciences Research*, 4(2) (Suppl.): 120~124]
- 尹绍武, 颜亨梅, 王洪全, 陈嘉勤, 许芳. 2000. 饵料种类对福寿螺生长发育的影响. 中国农学通报, 16(2): 5~7 [Yin S W, Yan H M, Wang H Q, Chen J Q, Xu F. 2000c. Effects of diet sorts on growth and development of the snail *Ampullaria gigas*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 16 (2): 5~7]
- 俞晓平, 和田节, 李中方, 吕仲贤, 孙乐平, 朱亚红, 陈建明, 郑许松, 徐红星. 2001. 稻田福寿螺的发生和治理. 浙江农业学报, 13(5): 247~252 [Yu X P, He T J, Li Z F, Lu Z X, Sun L P, Zhu Y H, Chen J M, Zheng X S, Xu H X. 2001. Occurrence of golden apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck), in paddy fields and its management. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 13(5): 247~252]
- 占志雄, 王青松, 陈福如, 陈皓, 陈一安. 1996. 四聚乙醛防除水稻田福寿螺试验. 福建农业科技, (2): 47 [Zhan Z X, Wang Q S, Chen F R, Chen H, Chen Y A. 1996. Test of using metaldehyde to control the GAS in the paddy farm. *Fujian Journal of Agricultural Science*, (2): 47]
- 张宝棣, 陈革新, 梁耀坤. 1996. 广东省莲藕病虫害初步调查. 广东农业科学, (1): 31~33 [Zhang B D, Chen G X, Liang Y K.

1996. A preliminary survey on the pest to cultivated lotus in Guangdong. *Guangdong Agriculture Science*, (1): 31~33]
- 张宝棣, 陈革新, 梁耀坤. 1997. 广东灾实病虫螺鼠害初步调查. *广东农业科学*, (1): 32~33 [Zhang B D, Chen G X, Liang Y K.
1997. A preliminary survey on the pest to *Euryale ferox* in Guangdong. *Guangdong Agriculture Sciences*, (1): 32~33]
- 周卫川, 吴宇芬, 杨佳琪. 2003. 福寿螺在中国的适生性研究. *福建农业学报*, 18(1): 25~28 [Zhou W C, Wu Y F, Yang J Q. 2003.
- Viability of the ampullaria snail in China. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 18(1): 25~28]
- Albrecht E A, Carreño N B, Castro -Vazquez A. 1999. A quantitative study of environmental factors influencing the seasonal onset of reproductive behaviour in the south american Apple-snail *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae). *J. Moll. Stud.*, 65: 241~250
- Barker G M. 2002. Molluscs as crop pests. Wallingford, UK: CABI Publishing
- Caçauan A G. 2002. Predation of freshwater fish on golden apple snail, *Pomacea canaliculata* Lam., under screenhouse conditions. *Pest Science and Management*, 2002: 24~26
- Cazzaniga N J. 2002. Old species and new concepts in the taxonomy of *Pomacea* (Gastropoda: Ampullariidae). *Biocell*, 26(1): 71~81
- Chiu Y W, Chen H C, Lee S C, Chen C A. 2002. Morphometric analysis of shell and operculum variations in the Viviparid snail, *Cipangopaludina chinensis* (Mollusca: Gastropoda), in Taiwan. *Zoological Studies*, 41(3): 321~331
- Estebenet A L. 1995. Food and feeding in *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae). *The Veliger*, 38 (4): 277~283
- Florida Department of Agriculture and Consumer Services. 2000. *Pomacea caniculata*: an agricultural pest member of the apple snail family. *Florida aquaculture*, 17: 4
- Halwart M. 1994. The golden apple snail *Pomacea canaliculata* in Asian rice-farming systems: present impact and future threat. *International Journal of Pest Management*, 40 (2):199~206
- Joshi R C, de la Cruz M S, Duca A V. 2002. Ovicidal effect of a molluscicide on golden apple snail in the Philippines. *Pest Science and Management*, 2002: 26~28
- Lach L, Cowie R H. 1999. The spread of the introduced freshwater apple snail *Pomacea canaliculata* (Lamarck) (Gastropoda: Ampullariidae) on O'ahu, Hawaii. *Bishop Museum Occasional Papers*, 58: 66~71
- Oya S, Hirai Y, Miyahara Y. 1987. Overwintering of the apple snail, *Pomacea canaliculata* Lamarck, in north Kyushu, Japan. *Japanese J. Applied Entomology and Zoology*, 31 (3):206~212
- Ponce de Leon E, Carpo M. 1994. Evaluation of pesticides against golden kuhol, *Pomacea canaliculata*. *Philippines Journal of Crop Science*, 19:24
- Purchon R. 1977. The Biology of the Mollusca. New York: Pergamon Press
- Stuart Chapin III F, Zavaleta E S, Eviner V T, Naylor R L, Vitousek P M, Reynolds H L, Hooper D U, Lavore S, Sala O E, Hobbie S E, Mack M C, Diaz S. 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405 (11): 234~242
- Suharto H. 2003. Golden apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck) in Indonesia. Report from Research Institute for Rice, *Indonesia*. 1~6
- Syobu S, Mikuriya H, Yamaguchi J, Matsuzaki M, Zen S, Wada T. 2001. Estimating the overwintering mortality of the apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck) (Gastropoda: Ampullariidae) in a paddy field of southern Japan using temperature data. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 45 (4): 203~207
- Tanaka K, Watanabe T, Higuchi H, Miyamoto K, Yusa Y, Kiyonaga T, Kiyota H, Suzuki Y, Wada T. 1999. Density-dependent growth and reproduction of the apple snail, *Pomacea canaliculata*: a density manipulation experiment in a paddy field. *Researches on Population Ecology*, 41 (3): 253~262
- Yusa Y. 2001. Predation on eggs of the apple snail *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae) by the fire ant *Solenopsis geminata*. *Journal of Molluscan Studies*, 67: 275~279

第十九章 小麦矮腥黑穗病

第一节 起源与分布	420	第六节 病害发生特点和流行规律	427
第二节 识别特征与早期诊断	420	第七节 风险分析与早期预警系统	428
第三节 传入途径与入侵成因	423	第八节 预防、根除与控制措施	432
第四节 危害现状与生态经济影响评估	424	第九节 应用与基础研究发展策略	434
第五节 病原菌形态学及生物学特性	425	附 节 小麦矮腥黑穗病常规研究技术	435

摘要 小麦矮腥黑穗病(TCK)是重要的国际检疫性病害,对小麦生产具有毁灭性危害。该病起源于北美洲和欧洲,目前遍及欧洲、西亚、北非和北美等 32 个国家和地区,国际上已有 14 个国家对小麦矮腥黑穗病实施检疫性限制。病菌系统侵染小麦使植株矮化多分蘖,病穗上的子粒被黑粉取代,形成菌瘿,通常发病率约等于产量损失率,病害一般流行年份可减产小麦 20%~50%,严重时可高达 75%以上。病菌主要靠土壤传播,冬孢子在土壤中可存活 3~7 年,甚至可长达 10 年以上。但混杂在小麦中的病粒(菌瘿)或病菌冬孢子是病害远距离传播的主要形式。冬季长期稳定积雪可提供稳定的低温和高湿度环境,有利于病害的发生和流行。本文就小麦矮腥黑粉菌的形态学、生物学和生理学特点、病害诊断识别和监测预警技术、病害发生条件和流行规律以及预防和控制措施等进行了系统的综述。介绍了有关小麦矮腥黑穗病的常规研究技术,列举了近年来国际上在小麦矮腥黑穗病风险分析与早期预警研究方面的进展和发展趋势,展望了进一步加强病害应用研究和基础研究的发展策略和前景。

关键词 小麦 矮腥黑穗病 矮腥黑粉菌 病害流行 病原生物学 控制策略 研究技术

Chapter 19 Wheat Dwarf Bunt *Tilletia controversa* Kuhn

Abstract: Dwarf bunt of wheat caused by *Tilletia controversa* Kuhn (TCK) is a quarantine disease of worldwide importance with the devastating damage to wheat production. It was firstly observed in North America and Europe in the early of 1930s and is known to occur in thirty-two countries or regions of Europe, West Asia, North Africa and North America at present. There are fourteen countries which have restricted the importation of wheat contaminated with the teliospores of *Tilletia controversa* Kuhn in the world. Infected

wheat plants produce an abnormally high number of tillers that are dwarfed. Mature sori (bunt ball) consist almost entirely of teliospores and are covered by the thin, modified ovary wall. Dwarf bunt reduces yield about the same as the percentage of infection of spikes, usually can cause the yield losses of 20%~50% and even more than 75% in the year of severe disease epidemics. Inoculum of dwarf bunt are mainly spread as teliospores by the soilborne, but teliospores in unbroken bunt ball or adhering to the grains can be long-distance transportation by the seedborne. They can be viable for three to seven years, even more than ten years in soil under natural field conditions. A prolonged period of persistent snow cover in winter, providing the stable low temperature and high humidity, is favorable to the disease occurrence and epidemics. Morphological, biological and physiological characteristics of dwarf bunt fungi, techniques for diagnosis and monitor of disease, and its occurrence, epidemics and control measures etc were systematically reviewed. Conventional techniques for the studies of dwarf bunt was introduced. And recent advances in the risk assessment and early forecast of disease in the world were enumerated. The strategies and prospects for the basic and applied studies on wheat dwarf bunt were also put forward in the paper.

Key words: wheat, *Tilletia controversa* Kuhn(TCK), dwarf bunt fungi, invasive alien species

第一节 起源与分布

小麦矮腥黑穗病由小麦矮腥黑粉菌 *Tilletia controversa* Kuhn, 简称 TCK 引起, 是重要的国际检疫性病害, 对小麦生产具有毁灭性危害。该病可能起源于北美洲和欧洲, 植物标本提供了矮腥黑穗病菌 1847 年出现在欧洲、1860 年出现在北美和 1915 年出现在南美的证据。早期人们没有意识到矮腥黑穗病与普通腥黑穗病是两种不同的病害, 曾经被误认为是普通腥黑粉菌 *Tilletia tritici* 的生理小种。首次正式确认矮腥黑穗病不同于普通腥黑穗病是在 20 世纪 30 年代(Goates, 1996; Mathre, 1976), 并称之为“矮黑穗病”、“矮化腥黑穗病”、“留茬黑穗病”、“矮化黑穗病”或“矮腥黑穗病”。50 年代初, 矮腥黑粉菌被定命为一个独立的种。目前, 小麦矮腥黑穗病的分布已遍及欧洲、西亚、北非和北美等地, 在土耳其、前苏联、丹麦、瑞典、波兰、捷克、斯洛伐克、匈牙利、德国、奥地利、瑞士、比利时、法国、西班牙、意大利、前南斯拉夫、罗马尼亚、保加利亚、阿尔巴尼亚、希腊、阿尔及尼亚、加拿大、美国、阿根廷、乌拉圭、伊朗、伊拉克、阿富汗、巴基斯坦、叙利亚、日本、澳大利亚等 32 个国家或地区已有发生和为害的报道, 特别是美国西北部的爱达荷、犹他、俄勒冈、华盛顿、蒙大拿、科罗拉多、怀俄明等 7 个州以及大湖区的密执安、印第安那、纽约等 3 个州是小麦矮腥黑穗病的常发区。

第二节 识别特征与早期诊断

病菌系统侵染使植株矮化多分蘖, 病穗上的子粒被黑粉取代, 通常发病率约等于产

量损失率(Goates, 1996)。受害植株表现为如下典型症状。

一、苗期症状

分蘖增多。受感染的植株通常产生大量的矮化分蘖，病株分蘖一般比健株多一倍以上。健株分蘖 2~4 个，病株 4~10 个，甚至可多达 20~40 个分蘖(图 19-1)。在早春生长后期，叶片上有时可看到病害初始症状，表现为微小、不清晰的黄斑和/或条纹(图 19-2)。这种褪绿斑纹的有无及矮化多蘖症状依寄主和病原菌基因型、侵染严重程度和环境条件不同而有所不同。



图 19-1 小麦矮腥黑穗病苗期症状(Blair J Goates, 1996)

左：病株；右：健株

二、抽穗、扬花期症状

病株矮化，小花增多。病株高度仅为健株的 1/4~2/3，因此，在重病田常可见到健穗在上面病穗在下面，形成“二层楼”现象(图 19-3)。健穗每小穗的小花一般为 3~5 个，病穗小花增至 5~7 个，甚至 11 个，导致病穗宽大、紧密。被感染小花的花药不能散粉，花粉没有活力，因而不能受精。未成熟子房呈深绿色而健康子房为浅绿色，这种深绿色症状在肉眼可见孢子形成之前通常很明显。病害一般仅在病株的某些分蘖中发生，通常一个单穗所有的小花都受感染(图 19-4)，但在一些抗病品种上穗被部分感染亦较普遍。



图 19-2 小麦矮腥黑穗病苗期病叶上的褪绿斑纹症状(Blair J Goates, 1996)



图 19-3 小麦成株期由矮腥黑穗病引起的矮化多分蘖病株
(示“二层楼现象”)(陈万权, 未发表资料)

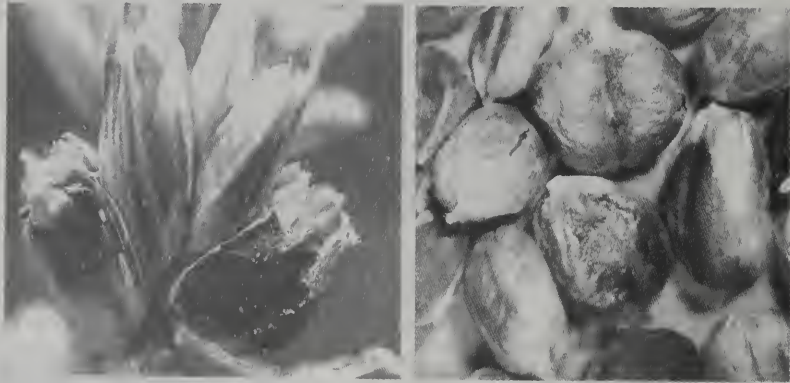


图 19-4 小麦矮腥黑穗病受感染小花及菌瘿(Blair J Goates, 1996)
左: 受感染小花; 右: 菌瘿

三、成熟期症状

发育完全的孢子团一般呈籽粒状, 但比正常籽粒圆大, 使内外稃张开, 有芒品种芒外张, 形成病穗的典型特征(图 19-5)。成熟孢子团(菌瘿)几乎全部由冬孢子组成并被薄而修饰过的子房壁所包被。矮腥黑穗病孢子团比普通腥黑穗病的更圆。孢子团散发出由三甲胺引起的强烈鱼腥气味, 因而俗称臭黑穗病(stinking smut)。成熟病粒近球型, 坚硬不易压碎, 破碎后成块状。在小麦生长后期, 若雨水多病粒可胀破, 孢子外溢, 干燥后形成不规则的硬块(图 19-6)。小麦收割时, 其病菌可形成孢子云(图 19-7)。



图 19-5 小麦矮腥黑穗病病穗与健穗比较
(陈万权, 未发表资料)

左: 病穗(深绿色, 颖壳外胀); 右: 健穗(淡绿色, 颖壳正常)



图 19-6 小麦矮腥黑穗病成株期病粒胀破、冬孢子外溢症状(陈万权, 未发表资料)



图 19-7 小麦收割时黑粉病菌形成的孢子云(摄自美国科罗拉多州立大学)

第三节 传入途径与入侵成因

土壤传播是 TCK 的主要传播途径, 收割时特别是采用大型收割机作业时, 病株上的菌瘿和冬孢子会大量落入本田或相邻田块的土壤中, 从而成为下季小麦的初侵染源。另外其他一些农事操作或通过风的力量, 也可使冬孢子传到较远的地块。由于 TCK 冬孢子抗逆性极强, 其冬孢子在土壤中可存活 3~7 年, 甚至可长达 10 年以上, 故病菌可在土壤中不断累积, 所以土壤带菌在 TCK 的侵染循环中的作用尤为重要。种子传播是 TCK 远距离传播的重要途径, 混杂在小麦中的病粒(菌瘿)或病菌冬孢子是病害远距离传播的主要形式, 据报道, TCK 由美国传入加拿大和瑞典就是通过引种造成的。粪肥(农家肥)是 TCK 的另一传播途径, 造成粪肥传播的原因主要是用带菌的麦麸、下脚料、麦秸等喂饲

禽畜以及沤制农家肥引起的。研究证明 TCK 经牲畜消化后仍具有侵染能力,并可长期存活于粪肥中。因此,通过使用带菌的农家肥,也可使病原菌在土壤中累积而导致发病。对我国来说,进口带菌商品小麦特别是来自美国疫区的小麦是 TCK 传入我国的一个重要渠道。这是由于 1999 年《中美农业合作协议》签署后,我国对美国疫区小麦的输华禁令完全解除,中国同意自美国全境进口各种类型小麦,任何港口均可接受每 50g 样本不超过 3 万个 TCK 孢子的美国小麦,对等于或低于此允许量的小麦不能采取任何特殊措施(包括影响及时卸货和改变目的地的措施),且我国承诺小麦关税配额数量为每年 800 多万吨以上,据统计 2000~2001 年已从美国共进口的 27 批次 32 万吨小麦中,有 11 批次 12.6 万吨小麦带有 TCK 孢子。所以随着 TCK 疫区输华小麦不断增加,TCK 冬孢子会大量传入我国,这些进口的疫麦不但在运输和装卸的过程中会污染运输工具、仓库、港口等,引发二次污染,更为严重的是在面粉厂加工过程中,极可能传入农田。这是因为我国大多数大中型面粉加工厂多设于城郊,毗邻农田,疫麦在加工面粉过程中,大多数 TCK 孢子会累积在洗麦水和粉尘中,其中洗麦水一般会排到附近的农田,且粉尘也会容易飞散面粉厂外的农田中,加之疫麦加工产生的带有一定量 TCK 孢子的麦麸等下脚料一般都被做为家畜的饲料,最终也会通过粪肥进入农田污染土壤,这些都会成为潜在侵染源,当 TCK 冬孢子在病害适合发生区累积到一定量后,即可导致发病。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

小麦矮腥黑穗病是麦类黑穗病中危害最大、防治最难的一种病害。该病主要为害小麦,病菌侵染小麦后,每 1%的麦穗侵染率可减少大约 0.8%小麦产量(Goates, 1996)。病害流行年份一般减产小麦 20%~50%,严重时可高达 75%以上,甚至造成绝产(Hoffmann, 1982)。据报道,1962 年美国西北部蒙大拿州部分麦区因病减产 68.7%;1972 年美国西北部 7 个州发病面积达 24 万公顷,平均减产 17%,损失小麦 1.2 亿公斤,严重地块发病率高达 90%;奥地利海拔 400~500m 的冬麦区有因矮腥病损失小麦 50%的记录;德国的巴伐利亚州黑森林地区发病率可达 10%~25%;土耳其东北高地小麦因病损失率竟高达 80%;原苏联也有因病减产 54%的记录。除了产量损失以外,被侵染的籽粒常因其产品适口性而使价格下降。

该病除侵染危害小麦外,也能侵染大麦、黑麦等禾本科 18 个属的植物,包括山羊草属 *Aegilops*、冰草属 *Agropyron*、翦股颖属 *Agrostus*、看麦娘属 *Alopecurus*、燕麦草属 *Arrhenatherum*、草属 *Beckmannia*、雀麦属 *Bromus*、鸭茅属 *Dactylis*、野麦草属 *Elymus*、羊毛属 *Festuca*、绒毛草属 *Holcus*、大麦属 *Hordeum*、草属 *Koeleria*、黑麦草属 *Lolium*、早熟禾属 *Poa*、黑麦属 *Secale*、三毛草属 *Trisetum* 和小麦属 *Triticum* 等属的多种植物(王圆, 1997; Goates, 1996),对生态系统造成一定程度的破坏。许多禾本科植物是经人工接种之后才被确定为寄主的,且大多数的发病率很低。栽培冬大麦 *Hordeum vulgare* L.被认为是一种寄主,但极少大麦基因型易被感病,即使是侵染能力最强的小种对之也表现为弱致病性。

小麦矮腥黑穗病也是影响国际农产品贸易,特别是中美小麦贸易的重要因素。目前国际上已有 14 个国家对小麦矮腥黑穗病实施检疫性限制。我国自 20 世纪 60 年代以来,

一直将该病害列为对外一类检疫对象。在中美小麦贸易中 TCK 是争论的焦点问题。70 年代初,我国重开与西方的贸易,其中最主要的贸易项目便是小麦,到 1973 年我国已成为美国小麦的主要购买方。1972 年上海、大连、广州等动植物检疫所从 4 船美国进口小麦中检出 TCK,从而引发了一系列贸易争端。多年来我国一直禁止美国西北部 7 个州和大湖区 3 个州及其他 TCK 疫区小麦进入中国。

第五节 病原菌形态学及生物学特性

一、分类学地位

小麦矮腥黑粉菌属担子菌纲 *Heterobasidiomycetes*, 黑粉菌目 *Ustilaginales*, 腥黑粉菌科 *Tilletiaceae*。矮腥黑粉菌与普通腥黑粉菌的种间杂交可产生稀有但不明显的中间型自然杂交种。

病菌冬孢子形态特征。冬孢子黄褐色到红褐色,球形或近球形,嵌在透明的厚度为 $1.5\sim 5.5\mu\text{m}$ 的胶质鞘中,直径连鞘在内为 $19\sim 24\mu\text{m}$,有时为 $16.8\sim 31.0\mu\text{m}$ 。外壁通常具有规则的多边形网状花纹(偶尔呈脑纹状),网脊高 $1.5\sim 3\mu\text{m}$,网隙直径 $3\sim 5\mu\text{m}$ 。不育孢子球形、透明,壁薄光滑,直径 $9\sim 22\mu\text{m}$,偶有胶质鞘包围(图 19-8, 图 19-9)。

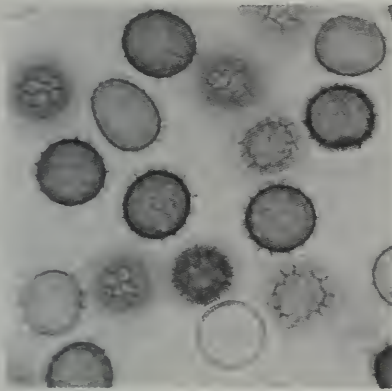


图 19-8 小麦矮腥黑粉菌冬孢子和不育孢子
(Blair J Goates, 1996)



图 19-9 小麦矮腥黑粉菌冬孢子外部形态
(Blair J Goates, 1996)

二、冬孢子萌发特性

冬孢子萌发出先菌丝(担子),穿过孢子壁的水解区域,其长度因环境条件之不同而有所不同。在琼脂糖培养基上,先菌丝有时在产生初生担孢子前大量生长,但在土壤表面通常非常短。先菌丝偶尔产生分枝,但这在矮腥黑粉菌中比普通腥黑粉菌中更常见。先菌丝顶端轮生 $14\sim 30$ 个线形初生担孢子(basidiospores)。冬孢子的细胞质通过先菌丝进入到初生担孢子,先菌丝在胞质迁移之后形成隔膜。借助轻微的触动,成熟担孢子就能离开先菌丝。初生担孢子可成对进行 H 形结合,产生纤细的侵染丝、营养菌丝或腊肠状、

丝状次生担孢子(secondary basidiospores)。腊肠状次生担孢子在担孢子梗上形成并被强力释放。在一个成熟担孢子束内通常有两种交配型,可用 a(+)或 a(-)来随机命名。同一担孢子束中具相反交配型的初生担孢子配对融合,配对时通常在近中部通过短的接合钉进行。由初生担孢子融合而形成的结构叫 H 体。在一个担孢子束中偶尔只产生一个交配型,担孢子的融合即不发生。初生担孢子通常成对融合,但业已观察到在 3 个以上的担孢子之间的融合。

冬孢子萌发需要长期低温和光照。萌发的基本温度是: -2°C (最低), $3\sim 8^{\circ}\text{C}$ (最适)和 $<15^{\circ}\text{C}$ (最高)(Hoffmann, 1982)。在最适宜的 5°C 光照条件下,冬孢子至少 3 周才开始萌发,最高萌发率出现在 6~8 周。室内培养温度一般为 5°C ,冬孢子若先在 5°C 下培养 3~4 周,再移至 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$,在短时间内便可大量萌发。 19°C 以上的萌发是区别普通腥黑粉菌和矮腥黑粉菌的快速方法。孢子萌发不需要游离水,在土壤最大持水量为 35%~88%时均可萌发。弱光照会刺激病菌冬孢子的萌发,波长在 400~600nm 之间的辐射刺激孢子萌发最为有效。在室内培养一般可采用 2 盏 40W 的白色冷光荧光灯泡作为光源。矮腥黑粉菌冬孢子在中性到酸性条件下的萌发率较高,当 pH 在 7.8~8.2 时萌发减少。

矮腥黑粉菌有鱼腥味的化学物质三甲胺可抑制其萌发。其他未知的冬孢子内源化合物也能抑制萌发(Trione and Krygier, 1977)。可能由于高浓度的自我抑制化合物而使存留在孢子堆中的冬孢子不萌发。

三、病菌侵染特性

落入土壤表层的冬孢子在冬麦播种后陆续萌发侵染麦苗,侵染期可延续 3~4 个月,美国太平洋西北岸从 12 月~次年 4 月都能发生侵染,但大部分侵染发生在 12 月下旬~次年 2 月。在积雪覆盖下 $-2\sim 2^{\circ}\text{C}$ 范围内冬孢子能继续萌发侵染,温度不利时萌发自暂停或延缓。萌发的冬孢子若遇干燥条件,30d 能保持侵染力。担孢子在 $-5\sim 5^{\circ}\text{C}$ 可存活 8~12 周。

冬孢子萌发产生的双核菌丝穿透幼苗进行系统侵染。一般认为侵染丝通过分蘖原细胞穿过寄主,菌丝在细胞间生长,于小麦拔节前到达生长点。小麦节间伸长期菌丝在细胞间随着顶端分生组织移动,并遍及顶端组织,不干扰寄主正常生理。寄主子房组织分化时,病菌从缓慢营养生长转为快速生殖生长,使小麦组织完全被冬孢子所取代(Trione *et al.*, 1989)。人工接种叶鞘,菌丝也可从叶原基发展到叶基部,然后通过叶节到达顶端分生组织(Fernandez *et al.*, 1978)。虽然在一些抗性品种中检测到了菌丝,但它们不知为何没有到达顶端分生组织。

四、病菌致病专化性

矮腥黑粉菌存在生理分化现象,根据病菌分离菌株在鉴别寄主(或鉴别基因品系)上的反应,可划分为不同的生理小种。目前美国已鉴定出 17 个生理小种和几个致病类型,小种名称及其对 10 个鉴别基因的毒性谱列于表 19-1。

矮腥黑粉菌和普通腥黑粉菌的毒性受小麦中同种抗性基因所调控(Hoffmann and Metzger 1976; Metzger and Hoffmann, 1978)。抗普通腥黑粉菌小种的品种也同时抵抗含相同或较少毒性基因的矮腥黑粉菌小种。因此,在进行小麦抗病育种时可以先用普通腥黑粉菌小种进行抗性筛选

表 19-1 小麦矮腥黑粉菌生理小种名称及其对鉴别基因的毒性谱
(引自 Hoffmann and Metzger, 1976; Hoffmann, 1982)

小种	寄主抗性基因(<i>Bt</i> 基因)									
	<i>Bt1</i>	<i>Bt2</i>	<i>Bt3</i>	<i>Bt4</i>	<i>Bt5</i>	<i>Bt6</i>	<i>Bt7</i>	<i>Bt8</i>	<i>Bt9</i>	<i>Bt10</i>
D-1					×*		×			×
D-2				×	×*	×	×			
D-3	×	×	×	×		×	×			
D-4	×	×			×*		×			
D-5	×			×	×*	×	×			
D-6	×	×		×	×*	×	×			
D-7		×	×	×		×	×			
D-8	×	×	×				×			
D-9	×	×	×	×	×*	×	×			
D-10		×	×		×*		×			
D-11				×	×*	×	×			×
D-12	×			×	×*	×	×			×
D-13	×	×		×	×*	×	×			×
D-14		×	×	×		×	×			×
D-15	×	×	×	×	×*	×	×			×
D-16	×	×	×				×		×	
D-17		×	×		×*		×		×	

×表示高于 10% 的侵染水平。*表示对 Elgin/Hohenheimer 杂交后代的毒性，后来确定 *Bt5* 在这一选择中没有完全表达，且对 Hohenheimer 完全表达的 *Bt5* 基因的毒性很小。

五、病菌核周期

病原菌的休眠冬孢子通常含有一个二倍体核，萌发前通过减数分裂形成单倍体核。萌发后，单倍体核连同细胞质进入先菌丝，随后单个进入初生担孢子，并在此进行有丝分裂形成双核，其中一个单倍体核回到先菌丝。留在先菌丝中的细胞核进入无核的初生担孢子中或者退化(Goates and Hoffmann, 1987)。这样，初生担孢子为单倍体。初生担孢子融合形成 H 体，H 体产生的菌丝或次生担孢子通常为双核，但亦可能含数目不定的细胞核(Goates and Hoffmann, 1979)。病菌侵入到寄主体内一直保持双核状态，直到冬孢子形成期间才进行核配。

第六节 病害发生特点和流行规律

病菌主要靠土壤传播，但混杂在小麦中的病粒和病菌冬孢子是病害远距离传播的主要形式。病害初侵染源来自前茬带病作物落入土中或被风从邻近地区吹落在土表的冬孢

子。近年来的研究证明,由于引种使 TCK 由美国传入加拿大和瑞典。该病菌抗逆性极强,病粒及其碎块中的冬孢子在土中可存活 3~7 年,甚至可长达 10 年以上(Tyler and Jensen, 1958),伴随小麦种子异地传播的 TCK,一旦进入田地,即可通过土壤传播危害。保存在实验室干燥空气里的冬孢子可以存活 20 多年。病菌冬孢子经家畜消化道后仍能萌发。病粒中的冬孢子经 120℃ 干热处理 30min 仍有萌发力,但 80℃ 湿热处理 20min 能杀死冬孢子。

关于小麦矮腥黑穗病的发生规律还存在众多争议。国外学者研究表明,矮腥病菌侵入小麦幼苗时期很长,可持续 3~4 个月。在美国西北部由 12 月开始到翌年 4 月上旬病菌都能侵入。在此期间若有长期稳定的积雪,有利于矮腥的发生,甚至是矮腥发生的必要条件。疫区的调查表明,稳定积雪 60d 及积雪厚度 10cm 以上,适于矮腥的发生。低温和积雪天数增多,积雪厚度增大,发病加重。然而,我国科研人员认为,积雪并非矮腥发生的必需条件,用燕麦秸秆、塑料薄膜或刨花覆盖接种后的冬小麦,保持低温和适宜的湿度,人工接种也可以得到较高的发病率。例如,章正等(1995)、王圆和俞小霞(1996)认为秋冬季日均温 0~10℃ 的持续期不少于 45d,湿度适宜,即使无积雪覆盖,亦可发病。澄清这一问题甚为重要,若积雪是必需条件,则我国广大冬麦主产区,就不需实行严格的检疫;反之,若病害在无积雪条件下能正常发生,则我国广大麦区就处在病害的威胁之中,必须实行严格的矮腥检疫。要澄清上述争议,尚需进行严密的多年多点试验。

病害侵染阈值即引起侵染发病所需的最低菌量是确定病害流行程度和分布地区,以及评估种子带菌危险性所必需的参数。在美国农业部提出的“中华人民共和国进口美国磨粉用小麦含有矮腥孢子的风险分析”中,认为美国小麦虽然带菌但不能传病,其基本论据就是种子带菌量远低于引起侵染所需最低菌量。他们所用的参数是在蒙大拿州和犹他州 1993~1996 年 3 年度田间试验所取得的。中美科学家于 2000~2001 年度在美国犹他州就此问题进行合作研究,结果发现每平方米 0.88 个孢子的接种量获得 0.21% 的发病率,比美方原试验结果最低接种量每平方米 8.8 个孢子降低了 10 倍(彭金火等, 2002)。由此也充分说明,最低菌量不是常量,而是变量,随环境、寄主和孢子本身诸多因素的影响而变动,一时一地的结果不能无条件地外延。为澄清这一问题需要继续进行多年多点试验或析因试验,建立 ID-DI 模型,求出侵染阈值或侵染概率。

虽然土壤类型不是病害发生的关键因素,但土壤板结时,如拖拉机和条播机轮子压痕处矮腥黑穗病的发生率很高。

冬小麦播种早晚与病害发生有一定关系,早播利于发病,晚播病轻,春小麦不发病。小麦不同生育期感病性存在差异,苗期易遭病菌侵染,分蘖始期是最感病的时期。

第七节 风险分析与早期预警系统

一、病害发生和定殖风险分析

基于中美小麦贸易和检疫的需要,对小麦矮腥黑穗病传入我国及其定殖风险研究近年来成为两国科学家研究的热点。我国科学家章正等(1995)就对 TCK 入境潜在可能性进行了分析,提出以下 5 个影响入境可能性的重要因素:①TCK 的主要为害寄主及其入境

途径；②TCK 的主要寄主的入境数量及入境频率；③TCK 的截获频率；④TCK 经小麦储存运输后的存活性；⑤出口国对 TCK 带菌原粮是否进行了有效的灭菌处理，并把各因素按 0~4 级 5 个级别来划分衡量。通过对这 5 个因素分析的结果表明，每个因素的评估值均达到最高级。因此，章正等认为 TCK 通过贸易性小麦传入中国的潜在可能性极高。在 TCK 入境潜在性分析的基础上，魏淑秋等(1995)应用生物气候相似距模型，分析了矮腥在我国定殖的可能性。根据 TCK 对气候环境条件的要求及各地气候条件可以满足的程度来表达 TCK 定殖可能性的大小。TCK 所要求的环境气候条件是基于章正等(1995)对 TCK 定殖条件的研究结果，即在我国非积雪地区 TCK 要完成侵染和发病，需符合 3 个必要条件：①小麦越冬期间土表的持续低温(不少于 45d)；②此期间适宜的土壤含水量(相对土壤湿度 60%~80%)；③越冬时期感病的寄主小麦处于分蘖始期。由于上述 3 个条件中涉及气候条件的 2 个因素(地表温度和土壤含水量)属于小气候状况，一般很难获得，又因自然条件下的小气候状况与大气候都有密切的关系，所以此研究采用生物地理指标进行了生物相似距计算，即以 TCK 流行严重地区之一美国华盛顿州的斯波坎为代表点，小麦从幼嫩分蘖到返青阶段(当年 9 月~翌年 4 月)的月温度与降水综合因素作为衡量 TCK 定殖可能性的地理指标，采用周年分布滑移计算了代表点斯波坎与世界各地(包括中国)的相似距，通过对计算所得的 TCK 相似距大小进行排序，并结合章正等对 TCK 定殖的研究和大连试验结果以及已发生地区的资料作为参考，把我国 TCK 可能发生地区划分为极高危险区、高危险区、局部发生区、偶发区和低危险区 5 个区域。①TCK 极高危险区(相似距值 ≤ 0.459)：西北高原麦区，包括新疆、青海、青藏高原、部分黄土高原(陕甘宁)和内蒙古麦区。这些地区兼种春麦与晚熟冬麦，冬麦区土表持续低温较长，通常有积雪，有利于保持土表的适宜低温及湿度，TCK 易于发生，冬前如有早期积雪，可导致 TCK 的流行。②TCK 高危险区(相似距值 0.460~0.740)：黄河中下游麦区和长江中下游、淮河流域平原及丘陵麦区。其中黄河中下游麦区包括华北大部、华东北部及东北南部麦区。此区为我国主要冬麦区之一，冬季通常缺少长期积雪，但冬前及初冬(11~12 月)，气温大都居于 0℃以上，地表尚未封冻，如有秋雨或早雪，土壤湿度适宜，有利于 TCK 发生。长江中下游、淮河流域平原及丘陵麦区是中国早熟冬麦的主要产区，虽无持续积雪或很少降雪，但冬季土表温度多在 0℃以上，全期土表不封冻，如冬季降水量适宜，有可能导致 TCK 的发生。③TCK 局部发生区(相似距值 0.741~0.999)：长江下游、中南及西南高海拔麦区，包括山区和丘陵地区，这些地区山脉纵横，地形复杂，气候多样化，存在多处散发 TCK 的可能性。④TCK 偶发区(相似距值 1.000~1.199)：包括台湾及两广高海拔麦区，在气候适宜的年份偶尔可能发生。⑤TCK 低危险区(相似距值 ≥ 1.200)：海南省，此区地理上有琼州海峡与大陆相隔，全年气候较高，冬季最低平均气温在 10℃以上，全区属热带气候，且具有天然屏障的优势，TCK 难于发生、蔓延和扩散。

美国农业部农业研究局组织了一个多国工作组，根据 FAO 制定的国际性标准，历时 5 年，于 1998 年完成了“中华人民共和国进口美国含有矮腥孢子的磨粉用小麦的风险分析”(USDA-ARS, 1998)。该工作组成员由来自美国、瑞典、加拿大、德国和墨西哥政府机构、大学以及产业界的专家组成。主要目的是评估中国从美国进口加工小麦而传入小麦矮腥黑穗病的潜在风险以及对我国小麦生产的不利影响。他们利用的依据有：①矮腥生物学和流行病学文献、调查总结和研究报告；②气象学、流行病学、植物生长模型专家的

咨询意见；③小麦加工专家的咨询意见；④政府和国际行业组织的统计资料和内部报告；⑤FAO 制定的 PRA 准则等。评估过程包括确定方案、建立模型、收集数据、估计参数以及利用蒙特卡罗法(Monte Carlo method)进行分析等步骤。风险评估的模型由 3 个部分组成。第一部分主要确定冬孢子通过小麦装卸、运输、磨粉、麦麸处理、施肥等可能的传播途径，这些途径的孢子损失率采用了已发表的工业处理和运输中小麦的损失估计方法，以及根据美国农业部农业研究局对感染小麦在磨粉过程中冬孢子流向量化研究的结果进行量化；每年由美国出口到中国的小麦吨位数是采用 1982~1996 年美国出口到中国小麦的历史数据模拟产生的。模型的第二部分是利用地理植物病理学模型来确定对病害传入和产量损失有利的面积。采用来自联合国世界气象组织关于中国和美国的 15 年的气象资料，作物环境资源综合模型(CERES)、小麦生长模型(MODWHT3)，以及已发表的 TCK 的最低环境要求，建立了 2 个地理植物病理学模型。设计了“传入模型”用于对潜在病害传入有利但未有雪覆要求的气候条件下，即当有 42d 或更长时间非连续降雨且冬小麦分蘖期间土表温度稳定；“产量损失模型”用于在冬小麦分蘖期 60d 或更长时间的持续雪覆情况下。模型的第三部分主要确定诱发病害所需的冬孢子浓度。此参数是根据美方在重病区蒙大拿州和犹他州 1993~1996 年 3 年度田间试验所获得的数据，即田间每平方厘米 8.8 个孢子的接种量即可导致发病，为了保险起见，模型采用了低于上述孢子阈值 10 倍的数据。该风险评估研究了 5 个不同的方案，即基本方案和 4 个衍生方案。第一方案(基本方案)，主要是评估通过美国进口小麦加工而引入 TCK 冬孢子的可能性及冬孢子被传入潜在有利的环境中去的可能性。第二方案，把地理植物病理学模型参数修改成需要 60d 或更长时间的连续雪覆。第三方案，评估所有小麦出口均来自于 PNW 港口的影响，因这些港口出口的小麦历来比海湾出口的小麦带有更高水平的冬孢子。第四方案，调查年出口吨位增加至 3000 万吨的后果。第五方案，调查在 10 年中孢子生物累积的影响。通过对以上 5 个方案的分析，美方提出“仅 3.8% 的中国冬麦区可能发病(仅贵州、湖南、甘肃、四川、陕西和新疆的少数地区)，1.3% 冬麦区会导致减产(新疆、甘肃和陕西的少数地区)，因此认为由于美国小麦带菌水平很低，且中国适于发病的地域很小，所以中国从美国进口带菌小麦传入矮腥的风险是不存在的”。

由于中方科学家对美方的风险分析在气象参数的使用、病菌孢子传入后的流向及空间分布等方面存在异议，且认为美方在生物学和流行病学方面的依据尚有不足之处，因此 2000~2001 年度由国家动植物检疫实验所牵头，组织了全国 8 个单位的科研人员对 TCK 在我国的定殖风险也进行了分析(陈克等，2002)。此研究是严格按照 FAO 制定的“有害生物风险分析准则”，特别是关于估计某种有害生物定殖可能性的有关规定，在收集整理 TCK 生物学研究结果和中国冬小麦种植区与 TCK 有关气象数据(18 年约 600 个站点)的基础上，并参照了美方的做法，利用地理植物病理学理论和方法，对 TCK 在中国定殖的可能性进行了评估。尽管中方在评估中也采用了地理植物病理学的研究方法，但在组建模型时对温、湿度参数做了重大改进。①温度：在美方所组建的地理植物病理学模型中 TCK 孢子的萌发温度阈值是限定某天平均温度必须在 $-2\sim 10^{\circ}\text{C}$ 范围内，中方认为此计算方法忽略了有些时期一天之中温度处于 $-2\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的若干小时对 TCK 孢子萌发的作用，因此中方在研究中采用了用正弦函数曲线来模拟一天 24h 每一时刻的温度，再利用 Schrodter 真菌生长温度当量公式计算每日的温度当量，从而获得 TCK 萌发所需的有效

积温来替代美方模型中简单的温度阈值判断。②湿度：在美方建立的模型中用当日降雨量在 0.2mm 以上，作为土壤表层相对含水量 60%~80%的代表值；而中方是先依据实际已经测定的 0~5cm 土壤的相对持水量数据和蒸散量、农田需水量计算不同土壤类型、不同层次的土壤持水量，获得这些基础数据后，再由专家参考各旬的降雨量和雨日积的累加值对具体站点的数据做出土表下 2cm 出相对持水量的估算值，估算时同时也考虑了一次降雨对几天土壤湿度的影响。中方科学家用改进的地理植物病理学模型对全国 18 年约 600 站点的计算，得到了我国积雪地区和非积雪地区 TCK 可能发生年份的年次表，并结合 TCK 的一些重要的生物学和流行病学特性把全国划分为高风险区、中风险区、低风险区和基本不发生区 4 个不同的区域，其中病害高、中风险区约占冬麦区总面积的 19.3%，这些地区涉及的省份有新疆、陕西中南部、甘肃南部、山东、河南、江苏、安徽、浙江、湖北、贵州、湖南北部、江西北部地区和四川部分地区等。显然，此结论与美方提出的“仅 3.8%的中国冬麦区可能发病”的结论有很大差异。

二、病菌检验检疫与鉴定方法

小麦矮腥黑粉菌的形态与小麦普通腥黑粉菌等多种腥黑粉菌非常相似，难以区分。各国对矮腥黑粉菌的检验方法和鉴定标准进行了多方面的长期探讨，但结果多不理想。我国植病学者通过与美方专家合作研究，提出了包括过筛检验、洗涤检验、孢子形态鉴定、荧光检测和萌发试验在内的一套检验和鉴定方法(王圆, 1997)，基本能满足进境原粮检疫的技术需求。

(1) 过筛检验。样品经长孔筛(1.75mm×20mm)或圆孔筛(1.5mm、2.5mm)过筛，仔细检查有无病粒及其碎片，对可疑物进行镜检。

(2) 洗涤检验。取 50g 样品放入三角瓶内，加 100ml 灭菌水振荡 5min，将悬浮液倒入离心管，以 1000r/min 离心 5min 弃上清液，加入数滴席尔氏液(shear)，制片镜检。洗涤时加入 1~2 滴吐温 20 则效果更好；制片时须用席而氏液为浮载剂，以避免孢子的胶质鞘变形；测量孢子时最好用油镜(1000×)可减少误差。每个样品检查 25~30 个孢子，记录孢子的网脊高度、胶质鞘厚度、网目和孢子大小。梁再群等(1982)根据统计分析冬孢子形态特性区分小麦矮腥黑穗病和网腥黑穗病，结果表明，矮腥黑粉菌 70%以上的孢子网脊高度集中在 1.5~2.5 μm 之间，胶质鞘厚度集中在 2~3 μm 之间，而网腥黑粉菌孢子网脊高度多在 1.2 μm 以内，胶质鞘厚度集中在 1.5 μm 以内。

(3) 冬孢子自发荧光鉴定。发现病粒或碎片时，以灭菌水制成孢子悬浮液滴至载玻片上，自然干燥后以无荧光浸没油为浮载剂制片。在落射荧光显微镜(激发滤片 485nm，屏障滤片 520nm)下观测 200 个冬孢子的自发荧光。一般矮腥黑粉菌孢子的网纹立即发出澄黄至黄绿色荧光，而网腥黑粉菌孢子的网纹无荧光或荧光率很低。

(4) 冬孢子萌发试验检查。当冬孢子的形态测量结果交叉重叠不易区分矮腥黑粉菌和网腥黑粉菌，而孢子量又充足时，可进一步用孢子萌芽方法来鉴别。将孢子悬浮液接种到 3%水琼脂平板上，分别放置在 5 $^{\circ}\text{C}$ 光照和 17 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗下培养。小麦矮腥黑粉菌冬孢子在 17 $^{\circ}\text{C}$ 无光照条件下不萌发，在 5 $^{\circ}\text{C}$ 光照条件下至少 3 周才开始萌发，而网腥黑粉菌冬孢子在 17 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗及 5 $^{\circ}\text{C}$ 光照条件下，1 周左右便可萌发。

(5) 生物化学鉴定。病菌孢子用不同酶进行水解反应来降低孢子壁的组成，依据处

理后孢子壁水解程度不同也可以较清楚的区分小麦矮腥黑粉菌冬孢子与其他腥黑粉菌冬孢子。使用凝集素在干净的冬孢子样品中进行凝集反应,也可以粗略的区分开不同的病原菌。一般建议不明病原菌在 4mol/L 的 NaCl 或在 0.06mol/L 的 MgCl₂ 中,凝集反应为 ++++ 或 +++ 者被认为是矮腥黑穗病菌,没有凝集反应的为网腥黑穗病菌,而凝集反应为 + 或 ++ 将不能作为鉴别冬孢子的依据(Trione and Krygier, 1977)。经过试验,高碘酸的氧化反应是一个敏感而又有选择性的反应。应用下列高碘酸反应也可以区别开小麦矮腥黑粉菌与小麦普通腥黑粉菌和雀麦草腥黑粉菌的冬孢子。应用的最适方法为:0.16mol/L 高碘酸加入 0.1mol/L 乙酸缓冲液至 pH4.5,在 57℃ 反应 3.0h 时到 3.25h 时。这种条件下,大约 95% 的雀麦草腥黑粉菌和 75%~90% 的小麦普通腥黑粉菌孢子失去网脊而变得光滑,可小麦矮腥黑粉菌只有 20%~25% 会变得光滑。在显微镜下,能清楚看到小麦普通腥黑粉菌的网脊低而圆滑,小麦矮腥黑粉菌的网脊高而呈钉状(Trione and Krygier, 1977)。作者在实验中发现许多黑粉菌冬孢子在无水有机溶剂如甲醇、乙醇、丙三醇、冰醋酸等中会产生非球状变形、扭曲或皱缩现象。小麦普通腥黑粉菌和雀麦草腥黑粉菌在用有机溶剂处理后失水,有 30%~90% 的冬孢子会变成非球形和扭曲状,而在同样的处理条件下,小麦矮腥黑粉菌仅有少于 5% 的冬孢子会变成非球形。

(6) 病菌分子检测技术研究。病菌孢子形态学鉴定、生物化学鉴定等方法,基本上能满足进境原粮检疫的技术需求,但还存在着方法繁复、难度较大、时间较长、准确度不高等不足。随着分子生物学的发展,许多病原物已经有了精度很高、简便易行的分子检测方法。例如,美国农业部农业研究局发明了小麦印度腥黑粉病菌的 PCR 检测方法,其专化性引物是根据该病菌线粒体 DNA 片段序列分析的结果而设计的,并申请了发明专利(Smith *et al.*, 1996; Ferreira *et al.*, 1996)。有关小麦矮腥黑粉菌分子检测技术目前仍在探索中,尚无成功报道。Zerucha 等(1999)通过对核糖体 RNA 转录间隔区(*ITS*)序列进行研究,以期开发出小麦矮腥黑粉菌的特异性分子标记,结果发现小麦矮腥黑粉菌和其他腥黑粉菌没有明显差异。Bakkeren 等(2002)用 AFLP 方法对不同的小麦黑粉菌进行 DNA 多态性分析,并同核糖体 RNA 转录间隔区(*ITS*)标记进行比较,认为 AFLP 方法具有更丰富的多态性片段,更适合于小麦腥黑粉菌整个基因组的分子标记。我国目前已经具备开展小麦矮腥黑粉菌分子生物学研究的条件,可以加强这方面的工作,以期开发出准确、实用的小麦矮腥黑穗病分子检测技术。

第八节 预防、根除与控制措施

一、加强植物检疫,避免病菌传入

小麦种子带菌是病害远距离传播的主要途径。必须严格进行种子检验,禁止从疫区进口原种和种植带菌的小麦种子。对于进口小麦原粮,实施生态处理。首先是限制进境港口,福州以南口岸地区小麦种植面积小、无发病温湿条件,疫麦应尽可能从这些港口进口,在当地制成面粉后自给或运往内地,麦麸与下脚料进行灭菌处理后加工成饲料;温州以北港口地区,可选择几个小麦进口量大的口岸,设立专用粮食码头,建立圆筒仓及面粉、饲料加工厂,就地将疫麦加工成面粉和饲料,然后再运往内地,禁止将疫麦直接送内地加工。目前国内外已开发出一些带菌原粮的处理方法,如环氧乙烷熏蒸、Co⁶⁰γ

射线或电子束辐照以及麦麸湿热处理技术等,可供选用。值得指出的是,清华大学研发成功的无公害电子束辐照处理技术,有望在近年内应用于港口大规模疫麦处理加工,5kGy 的剂量可使小麦矮腥黑粉菌冬孢子丧失萌发力而失去活力(王圆等,2000)。

二、选育和利用抗病品种,控制病害发生流行

培育和种植抗矮腥黑穗病品种是控制病害最经济有效的方法。在美国,抗病品种已经成功地控制了矮腥黑穗病,特别是在南爱达荷州和北犹他州某些干旱地区,由于大面积推广种植抗病品种,小麦矮腥黑穗病已被降低到极低水平,对产量和品质影响甚小。然而,小麦品种的抗性可以被病菌毒性小种的选择性增加或病菌群体中产生的毒性基因新组合所克服。这就需要不断的搜集新抗源并转移到品种中去。美国农业部国家小粒作物保存中心从数以千计的品系中筛选、鉴定出几个高抗或多抗性普通小麦 *Triticum aestivum* 和硬粒小麦 *T. durum* 品系。例如,从土耳其引进的优良抗源 PI178383(具有抗病基因 *Bt9*、*Bt10* 和另外的未知基因),在美国已作为矮腥黑穗病的主要抗源进行小麦遗传改良,培育出了大量的抗矮腥黑穗病的硬红冬麦和软白冬麦,在生产上广泛种植。来自 PI178383 的抗性在美国保持稳定抗病性已达 20 年,主要是因为北美菌株缺乏对 *Bt8* 的毒性。然而,一个对 PI178383 抗性基因具有高毒性的矮腥黑穗病菌小种已在欧洲发现(Hoffmann, 1982)。

小麦对矮腥黑穗病和普通腥黑穗病的抗性受同样的基因所控制。到目前为止,业已发现和命名了 *Bt1* 至 *Bt15* 等 15 个抗腥黑穗病基因(Hoffmann and Metzger, 1976),其基因名称及载体品系列于表 19-2,可供开发利用。通过单体分析和连锁分析,部分基因已被

表 19-2 小麦抗矮腥黑穗病基因(*Bt* 基因)名称、来源及其遗传特点

抗性基因	载体品系或组合	CI 或 PI 编号	遗传特点
<i>Bt0</i>	Heines VII	PI 209794	
<i>Bt1</i>	Sel 2092	PI 554101	显性
<i>Bt2</i>	Sel 1102	PI 554097	部分显性
<i>Bt3</i>	Ridit	CI 6703	隐性
<i>Bt4</i>	CI 1558	CI 1558	部分显性
<i>Bt5</i>	Hohenheimer	CI 11458	显性
<i>Bt6</i>	Rio	CI 10061	部分显性
<i>Bt7</i>	Sel 50077	PI 554100	部分显性
<i>Bt8</i>	PI 173438/Elgin	PI 554120	显性
<i>Bt9</i>	Elgin/ PI 178383	PI 554099	显性
<i>Bt10</i>	PI 178383/ Elgin	PI 554118	显性
<i>Bt11</i>	Elgin/ PI 166910	PI 554119	
<i>Bt12</i>	PI 119333	PI 119333	
<i>Bt13</i>	Thule III	PI 181463	
<i>Bt14</i>	Doubbi	CI 13711	
<i>Bt15</i>	Carleton	CI 12064	

定位在小麦特定染色体上(Sears *et al.*, 1960; Schmidts *et al.*, 1969; Metzger, 1970; Waud and Metzger, 1970, Metzger *et al.*, 1979)。这些基因在小麦中以单独或组合的形式存在, 携带已知 *Bt* 基因的小麦单基因品系已被用作鉴别基因对病原菌小种进行鉴定。Laroche 等(2000)采用 RAPD 方法, 研究开发出两个与抗腥黑穗病基因 *Bt10* 紧密连锁的分子标记, 分子标记与抗病基因 *Bt10* 的遗传距离分别为 1.1cm 和 6.5cm, 这为抗病基因的鉴定提供了快速、有效的方法。来自中间偃麦草 *Agropyron intermedium* 的一个主效抗病基因 *BtZ*, 在原苏联防治普通腥黑穗病中一直非常有用(Singovets, 1974; Mozgovoi *et al.*, 1987)。此外, 业已鉴定出一些可遗传的微效 *Bt* 基因, 可对寄主抗性起修饰和调节作用。

三、化学防治

化学防治是控制矮腥黑穗病发生和流行的应急措施。通过广泛试验后, 目前已筛选出一些对矮腥黑穗病具有较高防效的内吸性杀菌剂品种, 如三唑醇、苄氯三唑醇、涕必灵和乙环唑等(Goates, 1996)。但这些杀菌剂均存在各自的缺点。苄氯三唑醇和涕必灵的防效受环境条件影响较大, 仅在某些年份和地区防治效果好, 而且当矮腥黑穗病发病率低时会降低产量。乙环唑和三唑醇在有效浓度范围内对小麦有毒害作用。瑞士 Syngenta 公司研制成功的新型广谱、系统杀菌剂敌萎丹(Dividend)种衣剂, 对矮腥黑穗病有特效。试验结果表明, 利用该药剂按小麦种子重量的 0.012%~0.024%(有效成分)进行包衣, 可有效地控制矮腥黑穗病的流行危害(Goates, 1992; Sitton *et al.*, 1993)。目前, 美国中西部麦区, 通过种植抗病品种, 结合杀菌剂种子处理, 已基本控制了矮腥黑穗病的流行成灾。

四、栽培措施

通过深播、早播或晚播, 以避免小麦植株最易感病的时期, 可以降低矮腥黑穗病发病率。然而, 这些措施防病效果不理想, 且可能降低产量或引起其他病害加重, 只可作为小麦矮腥黑穗病综合治理体系中的配套措施, 因地制宜应用。栽培时间和方法、免耕和燃烧残茬对矮腥黑穗病的防效有待进一步明确。

第九节 应用与基础研究发展策略

随着经济全球化, 国际贸易、旅游和交通的迅速发展, 特别是中美小麦贸易的日益频繁, 小麦矮腥黑穗病入侵我国的危险性逐渐增大。为了避免 TCK 的传入以及传入后可能造成严重危害的局面, 我国有关部门除制定一些相应的政策和法规外, 对 TCK 的检疫监测措施、生物学、流行病学以及防治技术等进行深入研究, 变得愈来愈迫切。其基本途径是: 贯彻“预防为主, 综合防治”的植保方针, 以加强基础研究、开发应用高新技术为前提, 以革新关键防除技术、提高综合防病减灾能力为目标, 全面开展病害早期预警和应急扑灭技术体系研究。其重点发展方向如下。

一、研究病害早期诊断和快速检测技术, 建立病害早期预警技术体系

围绕矮腥黑粉菌的基因组结构和功能, 利用现代分子生物学技术和方法, 寻找病原

生物种、生理小种或致病类型的特异性分子遗传标记,构建病原菌的分子遗传图谱或物理图谱,分离、克隆重要的功能基因(致病性基因),揭示其机理,开发病害快速、准确的分子检测技术,建立病害快速诊断和检测技术体系。主要内容包括:①病原菌有性世代诱导体系的建立;②病原菌的特异性分子遗传标记研究;③病原菌遗传图谱或物理图谱的构建;④病原菌遗传转化体系的建立;⑤病原菌重要功能基因的分离。

二、加强病害基础生物学和流行病学研究,建立病害风险评估技术体系

围绕 TCK 在新环境中成功定殖的可能性,探讨灾害生物成功定居的共同特征和环境条件,分析入侵环境的生态阻力和病原菌的定居潜力,明确病原物对关键因子的耐性限度,确定它们在不同环境梯度下的存活与繁殖概率,构建病害风险综合评估模型及其软件平台,建立更加准确、可靠的病害风险评估技术体系,为病害早期预警、检测、预防策略提供科学基础。主要研究内容包括:①TCK 的生物学、流行病学数据库研制;②病害入侵环境生态阻力及其指标评价;③病原物入侵定居潜力及其指标评价;④病害入侵风险综合评估模型及其软件平台研制;⑤病害入侵风险图生成系统研究。

三、研究开发病害应急扑灭和处理技术,建立病害综合防治技术体系

我国由于尚未发生小麦矮腥黑穗病,因此,对病害防治和处理技术研究甚少。多年来,仅由植物检疫机构结合自身业务范围,开展了一些有限的研究工作,重点是进口原粮灭菌处理技术,包括环氧乙烷熏蒸处理、辐射处理,以及疫麦加工副产品的高温处理技术等。但是环氧乙烷已被列入 PIC 公约控制名单,世界上许多国家已禁用环氧乙烷。麦麸和下脚料干热处理法(温度应不低于 130℃,处理 30min)和湿热处理法(100℃,30min)成本太高,且不适于大量处理。对于田间病害防治技术研究尚属空白。因此,研究开发小麦矮腥黑穗病应急扑灭技术和无公害处理技术已是当务之急。主要研究内容包括:①进口疫麦及疫麦加工副产品大规模无公害处理技术;②高抗矮腥黑穗病小麦品种的培育和利用技术;③病害生态调控技术;④高效安全的内吸杀菌剂的开发和使用技术;⑤建立病害隔离试验场和以矮腥黑穗病为主的小麦病害综合防治技术体系。

附节 小麦矮腥黑穗病常规研究技术

一、Shear 固定液

病菌冬孢子封固在 Shear 固定液里,用光学显微镜观察冬孢子形态特征。固定液由 30ml 2%的醋酸钾(溶在 pH 为 8 的 0.2M 磷酸盐缓冲液中)、12ml 甘油和 18ml 95%的乙醇组成(Graham, 1959)。封存后,在酒精灯上加热载玻片直到开始沸腾,这使得网状孢子外壁和覆套膨胀,方便形态检测。

二、萌发培养基

2%水琼脂培养基:把 Difco 琼脂 20g 悬浮于 1L 蒸馏水或去离子水中,注入一个 2L 的三角瓶,高压灭菌。

2%的土壤浸提液培养基：将 500ml 沸水滤过 75g 土，并加入清水使滤液体积达到 1L，倒入 2L 三角瓶内，加 20g Difco 琼脂并高压灭菌。供矮腥黑粉菌萌发之用的平面培养基皿深度要适当(大约 9cm 的培养皿倒入 20ml 培养基)，以免干燥。

土壤平面：将细腻的土壤与水混合形成黏稠的泥浆，然后倒入培养皿中。培养皿敞口直至多余的水分从土壤中蒸发掉，然后将冬孢子水悬液均匀喷雾到土表。为防止土壤在长期培养中干燥，可在培养皿中央直插一短塑料管供加水用。

三、生长培养基

冬孢子萌发后的培养需要用马铃薯蔗糖琼脂或 T-19 培养基，以保障病菌生长所需的固体或液体营养基质。一般矮腥黑粉菌的培养主要包括菌丝体，通常在液体培养基中病菌产生丝状次生担孢子，而在固体培养基中以腊肠形次生担孢子居多。培养温度通常在 15~20℃ 范围内。

马铃薯蔗糖琼脂培养基：在 500ml 蒸馏水或脱离子水中加入 200g 土豆片高压灭菌，经二层纱布过滤到一个 2L 的三角瓶中，加入 20g 蔗糖和 20g Difco 琼脂，加入适量水使体积达到 1L 并高压灭菌。采用同样方式可以制作马铃薯蔗糖液体培养基，但不加琼脂。

T-19 培养基：使用该培养基来长期培养腥黑穗菌使其完成整个生活史(Trione, 1964)。若制作 1L 培养基，将下列药品加到 2L 烧瓶中，调整 pH 到 6.0，并将溶液高压灭菌。对于固体培养基则在高压灭菌前加入 20g Difco 琼脂。这种培养基的改进配方还有加入氨基酸、维生素和核酸碱基(Mills and Churchill, 1988)。

表 19-3 T-19 培养基化学成分及其数量

化学成分	数量/mg
KH_2PO_4	613
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246
$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	114
CaCl_2	55.5
螯合 Fe	20
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.52
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.38
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.031
$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.025
氯化硫胺素	5
维生素 B ₁	3
维生素 B ₆	20

四、平皿培养冬孢子

冬孢子能从孢子球(或冬孢子球)中不受污染地分离出来，但冬孢子通常在平皿

培养前表现不育。用玻棒将孢子团碾碎，加水配成孢子悬浮液，用纱布过滤去掉碎片，离心去上清。冬孢子沉淀移入 0.25%次氯酸钠水溶液中，在室温下放置 1min，然后立即在无菌水中洗两遍，用离心方法去除消毒剂和清水。为减少或消除其他真菌孢子污染，可在冬孢子表面消毒之前，将孢子水悬浮液在室温下放置 24h，大多数真菌孢子污染物将在水中萌发，并被消毒剂杀死。将干净的冬孢子悬浮在无菌水中调整成需要的浓度(0.25~0.50ml/9cm 培养皿)，并用灭菌的玻棒均匀涂抹在琼脂表面，在 5℃下连续光照培养。

五、病菌接种技术

田间接种矮腥黑粉菌：为了造成田间苗圃充分、均一发病，将种子用配有加重镇压机轮的深沟条播机种于 8~10cm 深的沟底部，种子深 2cm。调整播种日期确保植株在晚秋休眠时为感病的 2~3 叶期。小麦播种或出苗后，采用向土表喷雾冬孢子水悬浮液方法进行接种。接种体浓度一般为 15~25g 孢子/L，按行喷雾至土表，每 1.5m 行长大约 25ml 接种液。当覆雪不足时，可在植株上覆盖一层蛭石或麦秆模拟雪，早春立即揭去，以防植株腐烂。

实验室接种矮腥黑穗病：为了进行致病小种研究或繁殖矮腥黑穗病菌，需要进行实验室内接种，以防菌种污染。用萌发的冬孢子接种种子有效但工作量大。其方法是冬孢子放在 9cm 培养皿中的土壤浸提液琼脂上，覆盖培养基大约 10%的表面。当约 70%的冬孢子萌发时，在培养基中放 4~5g 种子和 5ml 冷水(约 5℃)，用消过毒的手指或玻棒混合，直到种子湿润并均匀覆盖了病菌。接种后的种子播于盛有蛭石的直径 12cm 塑料盒中，深度约 5cm，用铝箔或塑料覆盖，10℃下培养，直到幼苗出土良好。将幼苗从每盆中分成 4 组，分别移栽到盛土的钵盆中，置于冷凉的室温(10~15℃)中培养，直到植株成熟或转移至田间。如果用的是冬小麦，移栽后的休眠植株需在 5℃下春化 7~8 星期。计算好接种过程的时间，使向大田的移栽正好在早春。幼苗接种方法是将萌发中的担孢子用少量水从培养皿中洗下，并喷到 1~2 叶期的幼苗上。立刻将塑料袋套在植株上以保持高湿度，并在 10~15℃下培养 5d。尽管这种方法比种子接种技术工作量小，但它通常产生的侵染较少。皮下注射接种法是将萌发中的冬孢子悬浮液注射较老植株的表皮，可迅速产生新的冬孢子。将悬浮液注射进正在发育穗子的最上一个茎节上方 2.5cm 处的叶鞘，此时约为旗叶刚刚生出的第 37 生长阶段，然后在温室内种植至成熟。这种方法在 4~5 周后可产生非系统侵染及部分病穗和病粒，但不适宜用作寄主抗性鉴定和评价。类似的方法还有在小麦第 37~39 生长阶段，在植株每个茎节上方 2~3mm 处注射接种，可诱导矮腥黑穗病的不定枝。

六、小种检测和菌种繁殖

矮腥黑穗病菌的小种检测通常在田间病圃中采用人工接种方法进行。鉴别寄主品种(系)条播于田间，每行长 1.5m，接种方法如前所述。当通用感病对照品系 Heiness VII(*BtO*)的侵染率在 70%以上时，鉴别寄主(或基因)品系的病穗率低于 10%表明无毒性，超过 10%时表明有毒性。小麦成熟后，从最能区别小种的鉴别品种上收获病穗。

针对某一特定抗病基因鉴定时，保存具高活性无污染的致病小种是基础。繁殖病菌

小种时使用单基因鉴别寄主可为适当的毒性基因的存在提供保证。此外,为避免普通腥黑穗菌孢子污染,麦种需浸在甲醛溶液(37%福尔马林 1000 倍液)中消毒 10min,然后用自来水冲洗 30min,在室温下晾干后播种。麦种亦可用 45℃的 5%洗衣用漂白粉水溶液(0.25%次氯酸钠)消毒 6min,然后在自来水下彻底冲洗并干燥。由于矮腥黑粉菌冬孢子在自然条件下寿命很长,以及多个小种相邻检测时潜在的交叉污染,通常使用种子或幼苗接种技术。

七、接种体保存

对于一般的病害筛选,接种体由某一地区出现的代表小种组成。小麦成熟时,从感病和抗病品种上采集矮腥黑穗病穗,以维持混合的生活力。病穗保存在实验室冷凉干燥地方,冬孢子一般可保持 5~10 年的活力或更长。保存前可将麦穗碾碎并筛去植物碎片而不影响冬孢子的生活力或寿命。

八、田间病害调查

病害发生率一般用一行中的病穗百分率表示。在某些研究中也有用受侵染植株的百分率来表示侵染水平,但这对日常的病害筛选不大实用。尽管矮腥黑穗病增加分蘖总数,但病穗百分率仍然是反映基因型的一个良好的指标。

(陈万权 周益林)

主要参考文献

- 陈克,姚文国,章正,肖悦岩,严进,徐岩,白章红,陈小帆,包黎明. 2002. 小麦矮腥黑穗病在中国定殖风险分析及区划研究. 植物病理学报, 32(4): 312~318 [Chen K, Yao W G, Zhang Z, Xiao Y Y, Yan J, Xu Y, Bai Z H, Chen X F, Bao L M. 2002. Establishment risk analysis and division of TCK in China. *Acta Phytopathologica Sinica*, 32(4): 312~318]
- 梁再群,郭翼奋,朱颖初,宋彦堤. 1982. 根据统计分析冬孢子形态特性区分小麦矮腥黑穗病和网腥黑穗病的方法. 植物保护学报, 9(4): 243~250 [Liang Z Q, Guo Y F, Zhu Y C, Song Y T. 1982. Statistic analysis based on the teliospores morphological characters in differentiating dwarf smut from stinking smut. *Acta Phytophylacica Sinica*, 9(4): 243~250]
- 彭金火,周国梁,张大凯,杨翠英,郑斌斌,郑建中,章桂明. 2002. 小麦矮化腥黑穗病菌侵染能力的研究. 植物检疫, 16: 129~133 [Peng J H, Zhou G L, Zhang D K, Yang C Y, Zheng B B, Zheng J Z, Zhang G M. 2002. The infection capacity of the teliospores of *Tilletia controversa* Kuhn. *Plant Quarantine*, 16(3): 129~133]
- 王圆. 1997. 小麦矮腥黑穗病菌. 见: 姚文国等主编. 中国进境植物检疫有害生物选编, 北京: 中国农业出版社. 95~98 [Wang Y. 1997. *Tilletia controversa* Kuhn. In: Yao W G et al eds. Selected Pests of Plant Quarantine Significance to China. Beijing: China Agricultural Press. 95~98]
- 王圆,吴品珊,陈克. 2000. 电子辐照灭活小麦矮腥黑穗菌. 植物检疫, 14(2): 73~75 [Wang Y, Wu P S, Chen K. 2000. Electron beam irradiation effects on viability of teliospores of *Tilletia controversa*. *Plant Quarantine*, 14(2): 73~75]
- 王圆,俞小霞. 1996. 小麦矮腥黑穗病在无积雪条件下发病的研究. 植物检疫, 10(3): 139~141 [Wang Y, Yu X X. 1996. Study on the incidence of wheat dwarf bunt without the persistent snow cover. *Plant Quarantine*, 10(3): 139~141]
- 魏淑秋,章正,郑耀东. 1995. 不同生物气候相似距对小麦矮腥黑穗病在我国定殖可能性的研究. 北京农业大学学报, 21(2): 127~131 [Wei S Q, Zhang Z, Zheng Y S. 1995. Evaluation on the establishment potential of wheat dwarf bunt with bio-climatic analogical distance model. *Acta Agronomica Universitatis Pekinensis*, 21(2): 127~131]
- 章正,王圆,姚文国,曲能南,王德明,吴品珊,彭金火,周国梁. 1995. 中美小麦矮腥黑穗病菌鉴定合作研究 I. 自发荧光显微学特性研究. 植物病理学报, 25(5): 195~206 [Zhang Z, Wang Y, Yao W G, Qu N Z, Zhang C R, Wu X Y, Peng J H, Zhou J L. 1995. China-U.S. joint research on identification of *Tilletia controversa* Kuhn I. Studies on auto-fluorescence microscopy

- method. *Acta Phytopathologica Sinica*, 25(3): 199~206]
- Bakkeren G, Kronstad J W, Levesque C A. 2002. Comparison of AFLP fingerprints and ITS sequences as a phylogenetic markers in Ustilaginomycetes. *Mycologia*, 92: 510~521
- Fernandez J R, Duran R, Schafer J E. 1978. Histological aspects of dwarf bunt resistance in wheat. *Phytopath.*, 68: 1417~1421
- Ferreira M A S V, Tooley P W, Hatziloukas E, Castro C, Schaad N W. 1996. Isolation of a species-specific mitochondrial DNA sequence for identification of *Tilletia indica*, the karnal bunt of wheat fungus. *Appl. Environ. Microbiol.*, 62: 87~93 (US Patent 5811240, 1998)
- Goates B J. 1992. Control of dwarf bunt by seed treatment with Dividend 3FS. *Fungic. Nematic.Tests*, 47: 264
- Goates B J. 1996. Common bunt and dwarf bunt. In: Bunt and Smut Diseases of Wheat: Concepts and Methods of Disease Management, Wilcoxson RD and EE Saari eds. *Mexico, D.F.:CIMMYT*, 12~25
- Goates B J, Hoffmann J A. 1979. Somatic nuclear division in *Tilletia* species pathogenic on wheat. *Phytopath.*, 69: 592~598
- Goates B J, Hoffmann J A. 1987. Nuclear behavior during teliospore germination and sporidial development in *Tilletia caries*, *T. foetida* and *T. controversa*. *Can. J. Bot.*, 65: 512~517
- Graham S O. 1959. The effects of various reagents, mounting media and dyes on the teliospores walls of *Tilletia controversa* Kuhn. *Mycologia*, 51: 477~491
- Hoffmann J A. 1982. Bunt of Wheat. *Plant Disease*, 66: 979~987
- Hoffmann J A, Metzger R J. 1976. Current status of virulence genes and pathogenic races of the wheat bunt fungi in the northwestern USA. *Phytopath.*, 66: 657~660
- Laroche A, Demeke T, Gaudet D A, Puchalski B, Frick M, McKenzie R. 2000. Development of a PCR marker for rapid identification of the Bt-10 gene for common bunt resistance in wheat. *Genome*, 43: 217~223
- Mathre D E. 1976. Dwarf bunt: politics, identification and biology. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 34: 67~85
- Metzger R J. 1970. Wheat genetics. *Wheat Newsl.*, 17: 122~125
- Metzger R J, Hoffmann J A. 1978. New races of common bunt useful to determine resistance of wheat cultivars to dwarf bunt. *Crop Sci.*, 18: 49~51
- Metzger R J, Schaller C W, Rhode C R. 1979. Inheritance of resistance to common bunt in wheat, CI 7090. *Crop Sci.*, 19: 309~312
- Mills D, Churchill A C L. 1988. *Tilletia* spp., bunt fungi of the Gramineae. In: Sidhue GS ed. *Advances in Plant Pathology Vol.6*, London: Academic Press. 401~414
- Mozgovoi A F, Saakyan I Y, Novikova M V. 1987. Gene pool of sources and donors for breeding winter bread wheat for immunity to bunt. *Vavilova*, 176: 11~15
- Sears E R, Schaller C W, Briggs F N. 1960. Identification of the chromosome carrying the Martin gene for resistance of wheat to bunt. *Can. J. Genet. Cytol.*, 2: 262~267
- Schmidt J W, Morris R, Johnson V A. 1969. Monosomic analysis for bunt resistance in derivatives of Turkey and Oro wheats. *Crop Sci.*, 9: 286~288
- Singovets M E. 1974. Inheritance of resistance to bunt in wheat Agropyron hybrids. *Genetika (USSR)*, 10: 25~31
- Sitton J W, Line R F, Waldher J T, Goates B J. 1993. Difenoconazole seed treatment for control of dwarf bunt of winter wheat. *Plant Disease*, 77: 1148~1151
- Smith O P, Peterson G L, Beck R J, Bonde M, Schaad N. 1996. Development of a PCR-based method for identification of *Tilletia indica*, causal agent of karnal bunt of wheat. *Phytopath.*, 86: 115~122 (US Patent 5776686, 1998)
- Trione E J. 1964. Isolation and in vitro culture of the wheat bunt fungi *Tilletia caries* and *T. controversa*. *Phytopath.*, 54: 592~586
- Trione E J, Krygier B B. 1977. New tests to distinguish *Tilletia controversa*, the dwarf bunt fungus, from spores of other *Tilletia* species. *Phytopath.*, 67: 1167~1172
- Trione E J, Hess W M, Stockwell V O. 1989. Growth and sporulation of the dikaryons of the dwarf bunt fungus in wheat plants and in culture. *Can. J. Bot.*, 67: 1671~1680
- Tyler L J, Jensen N F. 1958. Some factors that influence development of dwarf bunt in winter wheat. *Phytopath.*, 48:565~571
- USDA-ARS. 1998. Risk assessment for the importation of U. S. milling wheat containing teliospores of *Tilletia controversa* (TCK) into the People's Republic of China. *Washington, D. C: USDA*, 1~46
- Waud J L, Metzger R J. 1970. Inheritance of a new factor (*Bt8*) for resistance to common bunt in wheat. *Crop Sci.*, 10: 703~704

第二十章 大豆疫霉病

第一节	起源、分布与危害	441	第八节	大豆品种对大豆疫霉菌的寄主抗病性	450
第二节	识别特征与早期诊断	441	第九节	非寄主植物对大豆疫霉的抗病性	451
第三节	传入途径与入侵成因	443	第十节	大豆疫霉的分子生物学	452
第四节	大豆疫霉菌的分类地位及其变迁	444	第十一节	生态与流行病学特性	452
第五节	大豆疫霉菌的生物学特性	445	第十二节	预防与控制	453
第六节	大豆疫霉菌的致病性	446	第十三节	应用与基础研究发展策略	454
第七节	大豆疫霉菌的致病性分化及其遗传	447			

摘要 大豆疫霉 *Phytophthora sojae* Kaufmann and Gerdemann 侵染大豆引起的疫霉根腐病是大豆生产上的毁灭性病害之一，也是我国的 A1 类对外检疫对象。该病最早发生在美国，现已广泛分布亚、非、欧、南北美洲的近 20 个国家的大豆主要产区。目前在我国的东北等局部地区也分离到该病原菌。大豆疫霉可以卵孢子在土壤中存活多年，病原菌的卵孢子主要通过粘附在种子表面以及混杂在种子中的土壤颗粒和病残体进行传播，亦可通过带病种子传播。由于我国每年大豆的进口量很大，而且国内大豆的种植品种普遍感病，因此大豆疫霉随时威胁着我国大豆的生产。加强对我国进口大豆中大豆疫霉菌的检测、了解我国大豆种质中抗疫病基因的组成、研究大豆疫霉入侵与定殖的生态学机制将是控制该病在我国发生与成灾的重要保障。

关键词 大豆疫霉 大豆疫霉根腐病 检疫对象

Chapter 20 *Phytophthora* Root Rot *Phytophthora sojae* Kaufmann and Gerdemann

Abstract: *Phytophthora* root rot, caused by *Phytophthora sojae* Kaufmann and Gerdemann, is one of the most destructive disease in soybean and also the quarantine pathogens for P. R. China. *Phytophthora sojae* was first isolated in USA in 1948. However, it dispersed to about twenty soybean producing countries in Asia, Africa, Europe and American. It was also isolated in the northwest of P. R. China. *Phytophthora sojae* persists in soils as oospores, which can survive for many years in soil after residues decompose. *Phytophthora*

sojae could be spread as oospores carried in soybean seed, as well as oospores existed in soil and disease soybean residues. Since more and more soybean is being imported into China, and most native soybean cultivars are sensitive to *P. sojae*, the root rot caused by *P. sojae* is being a serve threat to the soybean production in P.R.China. The development of rapid pathogen detection technique from the imported soybean, analyzing the disease resistance genes in native soybean germplasm, and research about the mechanism evolved in pathogen invasion and localization will be very important for the control of *Phytophthora* root rot on soybean in P.R.China.

Key words: *Phytophthora sojae*, soybean *phytophthora* root rot, quarantine pathogen

第一节 起源、分布与危害

由大豆疫霉菌 *Phytophthora sojae* Kaufmann and Gerdemann 侵染大豆引起的疫霉根腐病(Soybean *Phytophthora* Root Rot)是大豆生产上的毁灭性病害之一。该病于 1948 年在美国印第安那州被首次发现。此后,加拿大、巴西、阿根廷、日本、澳大利亚、英国、匈牙利、尼日利亚、印度、埃及、以色列、南非、德国、瑞士、新西兰等国家相继报道了该病害的发生。目前大豆疫霉根腐病在我国的局部地区也有发生,在黑龙江省的 29 个县(市)和 4 个国营农场都有疫霉根腐病的发生报道(苏彦纯和沈崇尧, 1993),此外,安徽、北京等地也陆续分离到该病原菌。大豆疫霉已经成为我国大豆生产主要的威胁之一。

在美国,大豆疫霉根腐病是仅次于大豆胞囊线虫病的重要病害,长期以来一直是美国大豆生产的主要病害之一,造成大豆生产的极大损失。在美国大豆主产区的中北部 12 个州,1989~1991 年由于大豆疫霉根腐病造成年平均损失 1.88 亿美元,在美国南部 16 个州,该病害造成的损失仍列大豆病害第 3 位(Doupnik, 1993)。目前全世界每年因为大豆疫霉造成的经济损失大约为 10 亿美元(Wrathier *et al.*, 2001)。

第二节 识别特征与早期诊断

大豆疫霉菌可在大豆的所有生育期侵染大豆。在大豆出苗前可以引起种子腐烂、出苗前腐烂(图 20-1A),出苗后可以引起植株枯萎。一般苗期是大豆最易感病的时期,感病植株表现为出苗差、近地表茎部出现水浸状病斑、叶片变黄萎蔫,严重时植株猝倒死亡(图 20-2)。成株期植株受侵染后症状首先表现为下部叶片变黄,随后上部叶片逐渐变黄并很快萎蔫;近地表茎部病斑褐色(图 20-1B),并可向上扩展至第 10~11 节位,茎皮层及髓变褐,中空,易折断;根腐烂,根系发育不良;未死亡病株的荚数明显减少,空荚、瘪荚较多,籽粒皱缩。由于在潮湿条件下,根部侵染的病菌可以产生大量游动孢子,孢子随雨水飞溅,危害茎部和叶片,甚至出现病荚,其症状为绿色豆荚基部出现水浸状斑,病斑逐渐变褐并从荚柄蔓延至荚尖,最后整个豆荚呈黄褐色干枯,种子失水干瘪;受侵染的叶片也会表现出水渍状病斑。受侵染的植株种皮、胚和子叶均可带菌,而土壤病残体中的卵孢子是病菌在土壤中长期存活的主要形式和初侵染源,游动孢子则是在作物生长

季节中病害的主要传播方式。在潮湿或浸水条件下，游动孢子几天就可以产生一代，因此条件适宜时病害一般成块发病，很少单株发病。

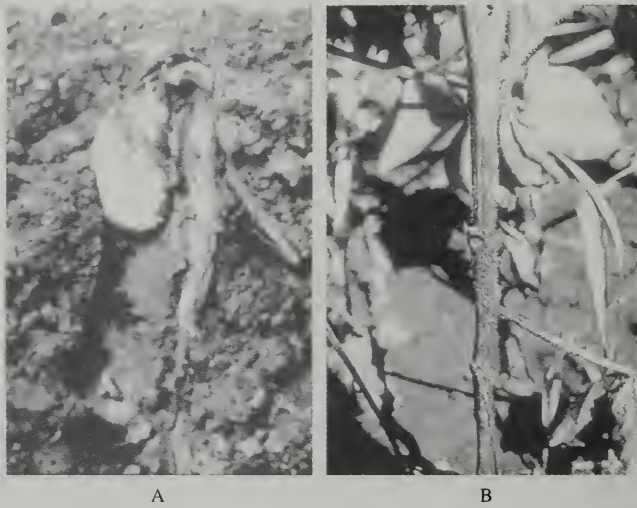


图 20-1 大豆疫霉引起的出苗前腐烂(A)和茎基部腐烂(B)

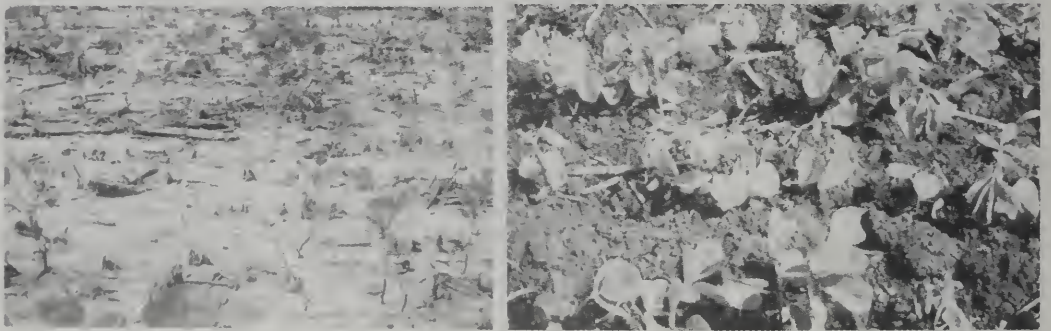


图 20-2 大豆疫霉危害的大田症状

大豆疫霉侵染大豆引起的根腐症状往往难以与 *Pythium*、*Fusarium* 和 *Rhizoctonia* 引起的根腐症状相区别，*Phytophthora* 引起的茎腐症状容易和茎溃疡症状相混淆，所以单凭症状鉴别大豆疫霉根腐病是不可靠的。从病株或根际土壤中分离病原菌是最有效的鉴定方法

从病组织中分离大豆疫霉菌一般需要利用选择性培养基。常用的选择性培养基有 PVP、PARP 和 PBNIC。分离大豆疫霉的选择性培养基一般用稀释 V₈ 汁琼脂培养基、胡萝卜汁琼脂培养基、利马豆琼脂培养基或芸豆琼脂培养基作为基础培养基，再加入真菌和细菌抑制药物。在每 1000ml 基础培养基中，PVP 选择性培养基含 0.01g Pimaricin(匹马霉素)、0.2g Vancomycin(万古霉素)和 0.1g PCNB(五氯硝基苯)；PARP 选择性培养基含 0.01g Pimaricin(匹马霉素)、0.25g Ampicillin(氨苄青霉素)、0.01g Rifampicin(利福平)和 0.1g PCNB(五氯硝基苯)；PBNIC 选择性培养基含 0.01g Benlate(苯菌灵)、0.054g PCNB(五

氯硝基苯)、0.04g Rovral(异菌脲)、0.1g Neomycin sulfate(硫酸新霉素)、0.01g Chloramphenicol(氯霉素)。由于 PBNIC 组成成分的性质比较稳定,应用时可直接灭菌,因此 PBNIC 是分离大豆疫霉菌的实用培养基。如果分离时还不能有效地控制细菌的生长,可以采取翻转培养基的方法在普通培养基上分离大豆疫霉菌(Schmitthenner and Bhat, 1994; 王晓鸣等, 1998)。

除了直接从发病组织上分离病原菌之外,直接从大豆根际土壤中检测病原菌,也可以帮助诊断或预测该病的发生。比较有效的大豆疫霉菌的土壤诱捕分离方法主要有大豆叶碟诱钓法、大豆幼苗生物测定法。其中大豆叶碟诱钓法最经济有效(Schmitthenner, 1994)。具体的方法为将采集的病土预先风干后,将其湿润至 -0.3bar (土壤表面有裂缝)装在密闭的塑料袋中, 25°C 下孵育 4~14d 诱导卵孢子萌发产生游动孢子囊。取 5~20g 土壤样品放入小烧杯,加蒸馏水高过土面 1~2cm(不要搅拌土壤与水),去掉形成的表面膜或漂浮的有机物残渣。用打孔器将生长 10~15d 平展的高度感病大豆品种幼苗的单叶打成直径 0.5cm 的叶碟,每烧杯水面放叶碟 20~30 片。孵育 2h 后用消毒镊子将叶碟取出并用无菌吸水纸吸水数秒,叶碟放入疫霉菌选择性培养基中,然后在 25°C 黑暗条件下孵育 3d。大豆疫霉菌的菌丝从侵染(水浸状)叶碟边缘长出 0.5~3mm,很容易鉴别。

从土壤中诱捕分离大豆疫霉菌的另外一个有效的方法是大豆幼苗生物测定法:水淹土壤 1h,排水、风干至土壤水势为 -0.3bar 后,将土壤容器放入塑料袋中防止进一步干燥,在室温下孵育两周(从水淹开始计算),此阶段卵孢子萌发形成游动孢子囊。接着将处理土样放入直径 10cm 的容器中并播种 15 粒高度感病大豆品种,浇适量的水或覆盖湿蛭石并放入塑料袋中保湿,以保证种子萌发。播种 3d 后,当根大约 5cm 时水淹 24h,排水后在温室孵育 10d,此期间豆苗出土并发生猝倒,大豆疫霉菌很容易从发病溃烂的胚轴上分离。

近年,一种在叶碟诱钓法基础上改进的分离方法进一步提高了从土壤中分离大豆疫霉菌的效率(朱振东等, 2003)。该方法将游动孢子诱钓叶碟首先接种于不含抗病基因的大豆品种幼苗创伤下胚轴。通过大豆的选择作用,将来自土壤的腐霉菌排除,产生大豆疫霉菌致病植株,然后再对病株组织进行选择或非选择性分离,即可获得大豆疫霉菌。采用该方法进行大豆疫霉菌土壤分离时,可获得较常规分离方法高的目标菌,有效地排除了腐霉菌和细菌对分离的干扰。

第三节 传入途径与入侵成因

由于大豆疫霉是同宗配合的疫霉菌种,有性生殖能力非常强,发病植株的病组织上,病原菌能够产生大量卵孢子,而且卵孢子抗逆性很强,可以在病残体或土壤中存活数年,因此,卵孢子是大豆疫霉的主要传播方式。据 Schmitthenner 报道,休闲 4 年的发病田仍有这种病原菌存活。

我国大豆疫霉的来源存在两种可能性,一种可能是我国的大豆疫霉起源于本土,由于我国有着悠久的大豆栽培历史,而且许多大豆种植区的气候条件适合大豆疫霉的发生和危害,因此,大豆疫霉也可能有较长的历史。王化波等(2003)比较了中国不同地区大豆疫霉菌株和美国大豆疫霉菌株的遗传多样性,发现中国菌株的遗传多样性比美国菌株

的更复杂,因此,认为中国的大豆疫霉可能起源于本土;另一种可能性是随进口大豆输入我国。目前我国每年从美国等大豆疫霉病区进口大豆数量很大,其总量已经超过了国产大豆,这些进境大豆中经常夹带一定量的土壤和病残体。近年来,我国进出境检疫系统已经多次从美国进口大豆中检测到大豆疫霉。随着全球贸易一体化的发展,国内外大豆的频繁贸易增加了大豆疫病传播扩散的风险,来自疫区的土壤和病残体经常携带有活性的卵孢子。这些卵孢子如果不经过严格的灭菌处理,散落土壤中,在潮湿多雨的季节,就可能萌发,产生大量的游动孢子,如果有合适的感病寄主植物存在,病菌就会侵染植物,对当地大豆生产带来毁灭性的危害。吴浩等(2002)对从海关截获的大豆疫霉在国内的适生性进行了研究,发现来自美国的大豆疫霉的卵孢子在江苏大豆田中存活一年后仍然可以保持侵染力,而且对所测定的36个国内主栽大豆品种大都有很强的致病性。

第四节 大豆疫霉菌的分类地位及其变迁

大豆疫霉属假菌界 Chromista, 卵菌门 Oomycota, 霜霉目 Peronosporales, 腐霉科 Pythiaceae, 疫霉属 *Phytophthora*。

大豆疫霉根腐病最早在1948年发现于美国印第安那州,最初被认为是由 *Fusarium* 或 *Diaporthe*(荚和茎枯萎病菌)引起的大豆根腐病。1955年首次将该病与 *Phytophthora* 联系起来。同年,报道了一种与 *Phytophthora cactorum* 相近的疫霉引起的大豆根腐病。1957年 *P. cactorum* 被鉴定为大豆疫霉根腐病病原菌。1958年 Kaufmann 和 Gerdemann (1958) 对大豆疫霉根腐病首次进行综合研究,其研究结果表明该病原菌在形态、致病性、生长速度等方面与另两个非常相近的疫霉种 *P. cactorum* 和 *P. megasperma* 不同,因而将其确定为 *P. sojae*。一年后,根据对引起大豆根腐病的疫霉菌分离物的系统研究结果,人们认为引起大豆根腐病的疫霉菌应划归大雄疫霉 *P. megasperma*,但由于该菌对大豆具有高度的致病专化性,建议作为大雄疫霉的一个变种,即大雄疫霉大豆变种 *P. megasperma* var. *sojae*。对来自于不同寄主的大雄疫霉分离物的比较研究表明,发现不同寄主分离物的卵孢子形态没有明显差异,藏卵器的大小为单一连续变化的群体,因此他们认为基于藏卵器大小在大雄疫霉种内划分变种是不适宜的;由于 *P. megasperma* 的大豆分离物和苜蓿分离物分别仅对其分离寄主具有致病性,建议将它们划分为两个专化型:大雄疫霉大豆专化型 *P. megasperma* f. sp. *glycinea* 和大雄疫霉苜蓿专化型 *P. megasperma* f. sp. *medicaginis*,以区别于从其他寄主上分离的大雄疫霉分离物。Hansen 和 Maxwell (1991) 综合前人对来自于不同寄主的大雄疫霉分离物的形态特征、同工酶模式、蛋白质电泳模式、染色体数目、核DNA相对含量、线粒体DNA限制性片段长度多态性(RFLPs)、致病性和生长速率等方面的研究结果,将大雄疫霉复合群体划分为4个种,即大豆疫霉 *P. sojae*、苜蓿疫霉 *P. medicaginis*、三叶草疫霉 *P. trifolii* 和大雄疫霉 *P. megasperma*。至此,经过30多年的研究,引起大豆根腐病的疫霉菌的分类地位最终回到了由 Kaufmann 和 Gerdemann 在1958年提出的种,即大豆疫霉菌 *P. sojae* Kauf. and Gerd.

第五节 大豆疫霉菌的生物学特性

与大多数疫霉属卵菌一样，大豆疫霉喜欢生活在潮湿凉爽的环境中，多数大豆疫霉菌株的菌丝生长最适温度为 25~28℃，最高为 32~35℃，最低为 5℃。其无性繁殖产生游动孢子的最适温度为 20℃，最低温度为 5℃，在潮湿有水膜存在时，孢子囊产生大量的游动孢子，游动孢子游动一段时间后休眠形成休止孢，遇到合适寄主组织，休止孢萌发产生芽管侵入寄主表皮。孢子囊释放游动孢子的最适温度为 14℃；当孢子囊成熟后，如果遇到干燥的条件，孢子囊将直接萌发产生芽管，最适温度为 25℃，卵孢子形成的最适温度为 18~23℃。卵孢子萌发以 27℃ 最快。通常卵孢子形成到成熟需要一个月的时间。

大豆疫霉的营养体为无隔菌丝体，菌丝宽 3~9μm，易卷曲；菌丝体珊瑚状，分枝近直角，在分枝基部稍缢缩，老熟后产生隔膜；菌丝可形成菌丝膨大体和厚垣孢子。不同分离物的培养特征和形态变化较大。孢囊梗简单，很少分枝，顶生游动孢子囊。游动孢子囊倒梨形、椭圆形或长筒形，无乳突，大小为 42~65μm×32~53μm。游动孢子在孢子囊内形成，成熟时将游动孢子释放到薄壁泡囊中，泡囊迅速膨大并破裂；有时游动孢子滞留在游动孢子囊内并萌发，产生芽管穿透游动孢子囊壁。游动孢子囊也可直接萌发，其作用类似于分生孢子。游动孢子囊不具脱落性，内层出。游动孢子卵圆形，一端或两端钝圆，侧面平滑，有两根鞭毛，尾鞭长度是茸鞭的 4~5 倍；游动孢子的运动期可持续几天，在休止孢形成之前，运动变得缓慢和颠簸；休止孢以芽管方式直接萌发，芽管在

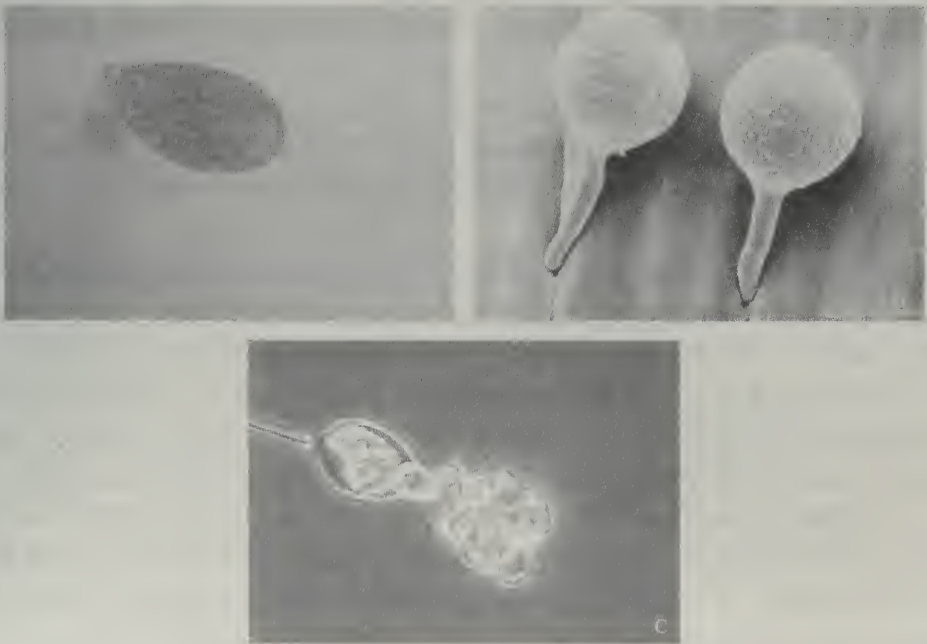


图 20-3 大豆疫霉的孢子囊和游动孢子(未标记)

A. 孢子囊; B. 游动孢子; C. 游动孢子正在释放

接触固体表面时常常膨大形成附着胞，但很快附着胞恢复菌丝的正常生长；有时休止孢萌发产生次生游动孢子；偶尔，芽管的顶端形成小型游动孢子囊。大豆疫霉菌有性生殖为同宗配合。藏卵器球形或亚球形，直径 29~58 μm ，壁薄。雄器多为长形，侧生，偶围生。藏卵器受精后发育成卵孢子。卵孢子萌发产生芽管，芽管随后形成菌丝或产生游动孢子囊(图 20-3)。

大豆疫霉菌在 PDA 培养基上生长缓慢，菌落均匀，白色，边缘不整齐；气生菌丝致密，呈棉絮状。在利马豆、玉米粉、V_s 汁等培养基上生长较快，菌落均匀，边缘整齐。

第六节 大豆疫霉菌的致病性

大豆疫霉菌释放出游动孢子后，可以被大豆根部组织分泌的异黄酮吸引，亦有报道根部电位可以吸引游动孢子。大豆疫霉菌的游动孢子被吸引到达根表和其他部位(胚轴)后，鞭毛收缩形成休止孢，30~60min 后萌发并开始侵染。病原菌侵染组织后主要在寄主细胞壁间或内生长，也可穿透细胞壁形成吸器和跨胞菌丝。在非亲合反应中，接种后 2~3h 胚轴受侵染的细胞大部分死亡，被穿透细胞几乎不可避免地全部死亡。但毒力小种(亲合小种)接种后 7h 很少有侵染细胞死亡，被穿透的细胞仍然存活，吸器和跨胞菌丝包围在健康寄主细胞质中，之后也许由于侵染组织的离解，寄主细胞开始普遍死亡。有关大豆疫霉菌的致病机制目前还不清楚。大豆疫霉菌侵入完整的组织，其必定具有降解角质层(表皮)的酶，例如果胶酶和纤维素酶，但至今还没有相关的报道。从大豆疫霉菌 1 号小种中分离到一种能抑制亲合品种内诱导大豆素激发子的积累的胞外转化酶，随后这种抑制子被发现存在于大豆疫霉菌的细胞壁内，但抑制寄主防卫反应作为病原菌毒力的基础的可能性还有待研究。

大豆疫霉菌为土传真菌，但病菌寄生性强，不能在土壤中竞争生长和定殖。大豆疫霉菌能够以休眠体的卵孢子在植株病残体和土壤中存活多年，但菌丝、游动孢子囊和游动孢子在低温下(3 $^{\circ}\text{C}$ 以下)不能存活。病菌也能以卵孢子和菌丝体方式存活于大豆种子的种皮、胚和子叶内。

水对大豆疫霉菌游动孢子的产生、扩散及其对大豆根系的侵染是必须的，若土壤不受水淹和根系表面没有水膜，大豆疫霉菌的致病力将显著降低。因此，影响土壤湿度的因子如土壤类型、田间排水条件、土壤疏松度等对病原菌的致病力表达至关重要。

在保证湿度的条件下，大豆疫霉菌的致病性受温度的影响极大。当温度高于 30 $^{\circ}\text{C}$ 时，大豆疫霉菌的致病性增强或在一些小种与品种组合中病原菌从非毒性变为毒性。温度诱导感病性可能是特定组合中寄主和病原菌之间识别机制的激活/抑制受到温度调控。

大豆疫霉菌对胚轴的致病性受光照的影响，生长在黑暗中的未受伤感病胚轴当暴露在光照下时抗性显著提高。病斑与抗性品种胚轴上的相似，但受伤感病品种胚轴暴露在光照下时依然感病。有人认为感病品种胚轴的表面在光照条件下迅速发展，类似于抗病胚轴的抗性基因启动如抗病基因的反应系统。这种抗性的快速发展可以解释为什么最具破坏性的猝倒病发生在播种之前。大豆疫霉菌的致病性也受大豆植株生育期和发育状况的影响，幼龄植株比老龄植株容易感病，成熟植株和组织不易发病。

第七节 大豆疫霉菌的致病性分化及其遗传

一、生理小种的多样性及鉴定方法

大豆对大豆疫霉存在抗性分化，不同大豆疫霉菌分离物致病性存在一定的差异。Morgan(1965)首次报道了大豆疫霉菌的生理专化性，描述了1号和2号小种。1963年育成了含有单抗性基因 *RPS-1* 的大豆商业品种，此后的十年间抗病品种在美国北部地区广泛推广应用，大豆疫霉根腐病得到了基本控制。但正是由于这些抗病品种的广泛应用，对病原菌造成相对高的选择压力，加速了大豆疫霉菌的毒力分化。1972年在美国北部地区发现对当时推广的带有抗病基因的品种 Harosoy63 具有毒力的分离物并定名为3号小种，随后4~9号小种也相继在北部地区和加拿大被鉴定。此后，在抗病品种-小种互作过程中新的大豆疫霉菌生理小种便不断产生，其变异速度远远高于从1号、2号小种到3号小种的变异(表20-1)。至1998年，已鉴别出53个大豆疫霉菌生理小种。有研究认为，在土壤中还可能存在更为丰富的生理小种多样性。由于田间种植品种的同质性较高，存在于土壤中的许多小种尚不能通过田间发病植株分离来进行检测，事实上，一些研究者已直接从土壤中分离鉴别出许多新生理小种。大豆疫霉菌分离物在实验室条件下，经过长时间的保存，也会在致病性上发生变异产生新生理小种。

表 20-1 大豆疫霉菌 *P. sojae* 的生理小种

小种	时间	地点	毒力公式
1	1955		7(2,3a,7) ^A
2	1965	Mississippi	1b,7
3	1972	Ohio	1a,7
4	1974	Kansas	1a,1c,7(1a,1c,5,7)
5	1976	Ontario	1a,1c,6,7
6	1976	Ontario	1a,1d,3a,4,5,6,7 (1a,2,3a,3c,4,5,6,7)
7	1977	Indiana	1a,3a,3c, 4,5,6,7
8	1977	Indiana	1a,1d,2,4,6,7
9	1977	Indiana	1a,3c,4,6,7 (1a,2,3b,3c,4,5,6,7)
10	1979	Mississippi	1b,3a,5,7 (1b,3a,3b,3c,5,7)
11	1979	Mississippi	1b,4,6,7 (1b,7)
12	1979	Mississippi	1a,1b,1c,1d,1k,3a (1a,1b,1c,1d,1k,5)
13	1979	Mississippi	6,7 (4,6,7)
14	1979	Mississippi	1c,7(1c,2,5,7)
15	1979	Mississippi	3a,7(1a,1b,1c,1k,7)
16	1979	Mississippi	1b,1c,1k,5 (1a,2,3a,3c,4,6,7)

小种	时间	地点	毒力公式
17	1982	Mississippi	1b,1d,3a,6,7 (1b,1d,2,3a,3b,3c,4,6,7)
18	1982	Mississippi	1c(1a,1c,5)
19	1982	Mississippi	1a,1b,1c,1d,1k,3a,5 (1a,1b,1c,1d,1k,3a,2,5)
20	1982	Mississippi	1a,1b,1c,1k,3a,7 (1a,1b,1c,1d,1k,3b,3c,5,7)
21	1983	Indiana	1a,3a,5,7 (1a,2,3a,3c,5,7)
22	1983	Indiana	1a,1c,3a,4,5,6,7
23	1983	Nebraska	1a,1b,6,7
24	1984	Mississippi	1b,3a,4,5,6,7
25	1986	Indiana	1a,1b,1c,1k,7
26	?	Mississippi	1b,1d,2,3a,3b,3c,4,5,6,7
27	1992	Illinois	1b,1c,1k,3,6,7
28	1994	Ohio	1a,1b,1k,5,7(1a,1b,1k,2,3c,5,7)
29	1994	Ohio	1a,1b,1k,4,6,7 (1a,1b,1k,2,3b,3c,4,5,6,7)
30	1994	Ohio	1a,1b,1k,3a,4,5,6,7 (1a,1b,1k,2,3a,3c,4,5,6,7)
31	1994	Ohio	1b,1c,1d,1k,2,4,6,7
32	1994	Ohio	1b,1k,2,4,6,7
33	1994	Indiana	1a,1b,1c,1d,1k,5,7
34 ^B	1994	Indiana	1a,1k,7
35	1994	Ohio	1a,1b,1c,1d,1k, 2,3b,5
36	1994	Japan	3a,4,5,6
37	1994	Japan	1a,1c,3a,3b,3c,4,5,6,7
38 ^B	1995	Arkansas	1a,1b,1c,1d,1k,3a,6,7
39 ^B	1995	Arkansas	1a,1b,1c,1k,3a,6,7
40 ^B	1996	Iowa	1a,1c,1d,1k,7
41 ^B	1997	Indiana	1a,1b,1d, 1k,7
42 ^B	1997	Indiana	1a,1d,3a,7
43 ^B	1997	Indiana	1a,1c,1d,7
44 ^B	1997	Indiana	1a,1d,7
45 ^B	1997	Indiana	1a,1b,1c,1k,6,7
46 ^C	1998	Australia	1a,1c,3a,6,7
47 ^D	1998	Australia	1a,1b,1c,7
48 ^C	1998	Australia	6,7
49 ^C	1998	Australia	1a,1c,4,6,7

续表

小种	时间	地点	毒力公式
50 ^E	1998	Australia	4,6,7
51 ^E	1998	Australia	1c,5,6,7
52 ^E	1998	Australia	3b,5,7
53 ^E	1998	Australia	1a,1b,1c,3a,5,7
54	2000	Illinois	1d,7
55	2000	Illinois	1d,3a,3c,4,5,6,7
56	2000	Ohio	1a,1b,1c,1k,3b,5,6,7
CNR-2 ^B	2000	Heilongjiang	1d,7
CNR-3 ^B	2000	Heilongjiang	1d
CNR-4 ^B	2000	Heilongjiang	6,7
CNR-5 ^B	2000	Heilongjiang	3a,7
Undersign	2000	Heilongjiang	3a,3c,3b,5
Undersign	2000	Heilongjiang	3b
Undersign	2000	Heilongjiang	1a,1d,3c,5,7

注: A: 对 1~21, 25, 26, 28~32 和 35 号小种进行了 13 个等位基因的重复鉴定时, () 内为毒力不一致的结果;

B: 对 1a, 1b, 1c, 1d, 1k, 3a, 6 和 7 等 8 个抗性基因的结果;

C: 对 1a, 1b, 1c, 1d, 1k, 3a, 4, 5, 6 和 7 等 10 个抗性基因的结果;

D: 对 1a, 1b, 1c, 1d, 1k, 3a, 5, 6 和 7 等 9 个抗性基因的结果;

E: 对 1a, 1b, 1c, 1d, 1k, 3a, 3b, 4, 5, 6 和 7 等 11 个抗性基因的鉴定结果。

鉴定大豆疫霉菌生理小种和鉴定品种抗性的接种方法有游动孢子下胚轴注射法, 菌层接种法, 斜面板法, 菌丝下胚轴伤口接种法(Schmitthenner, 1985)。鉴定大豆疫霉菌生理小种的常用方法为菌丝胚轴伤口接种生理小种鉴别品种(品系)。标准的鉴别寄主由分别含有 *Rps1a*、*Rps1b*、*Rps1c*、*Rps1d*、*Rps1k*、*Rps3*、*Rps6* 和 *Rps7* 抗性基因的 8 个品种或品系组成。将培养 7~8d 的菌丝块接种在苗龄 10d 的植株下胚轴创伤口, 接种后保湿 48h(18~25℃)。接种 4~5d 后评价鉴别品种的群体反应类型, 一个鉴别品种如果有 70% 以上的植株死亡则为感病, 如果少于 30% 的植株死亡则为抗病。植株死亡率在 30%~70% 之间的反应为中间类型。产生中间类型反应的所有分离物需进行重复鉴定, 中间类型反应是连续的分离物被认为不可分类。

二、大豆疫霉菌致病性的遗传

通过原生质融合、营养缺陷性菌株的混合培养和抗药性突变体的混合培养已经证明大豆疫霉菌存在异核现象。由于存在异核株系, 从田间分离的 1 号和 4 号大豆疫霉菌生理小种单卵孢子分离物的自交一代(S_1)产生多个小种, 其中, 在 1 号小种的 S_1 代中 1 号小种和非毒力基因型的分离表现为 3:1 的孟德尔单基因杂种分离。另外, 研究已经证明在混合培养的同宗株系中可以发生低频率但能探测到的异型杂交。杂种系可以利用双倍

抑制剂培养基从带有不同抗药性突变体的亲本中筛选和利用分子标记进行鉴定。用获得的杂交 F₁ 代产生 F₂ 群体进行遗传分析, 发现非毒力基因和分子标记按孟德尔规律分离, 与 7 个抗性基因 *Rps1a*、*1b*、*1c*、*1d*、*1k*、*3a* 和 5 相对的非毒力基因 *Avr1a*、*1b*、*1c*、*1d*、*1k*、*3a*、5 为显性, 与 *Rps3b*、*3c*、4、6 相对的 *Avr3b*、*3c*、4、6 为半显性, 其中 *Avr4* 和 *Avr6*、*Avr1b* 和 *Avr1k* 完全连锁, *Avr3a* 和 *Avr5* 的距离为 4.5cM。

第八节 大豆品种对大豆疫霉菌的寄主抗病性

一、控制大豆抗病性与耐病性的基因

大豆与大豆疫霉菌之间的相互作用符合“基因对基因”的互作模式, 即“对于每一个寄主的抗病基因, 病原菌都存在一个特异的与之对应的致病或无毒基因”(Flor, 1955)。目前已从大豆中确定的显性抗病基因有 14 个。其中在 *Rps1* 位点发现 5 个等位基因, *Rps3* 位点发现了 3 个等位基因, 在 *Rps2*、*4*、*5*、*6*、*7* 和 *Rps8* 位点仅发现了 1 个抗性基因(表 20-2)。Lohnes 等(1996)和 Kyle 等(1998)利用多个菌株对来自中国的大豆材料进行抗性鉴定, 发现中国存在丰富的大豆抗疫霉病资源。对 PI567.496 进行抗性遗传分析, 认为其可能有新的单抗性基因。同时, 已发现的感病基因有 *rps1*、*rps2*、*rps3*、*rps4*、*rps5*、*rps6* 等, 它们均为隐性基因。

表 20-2 携带单一抗大豆疫霉菌基因的大豆材料

基因名称	品种或品系名称
<i>Rps1-a</i>	Mukden, Asgrow1937, BSR101, Harlon, L75-6164
<i>Rps1-b</i>	Sanga, P18463, D60-9647, Harosoy13, Harosoy13xx, L77-1863
<i>Rps1-c</i>	PI54615, Arksoy,Mack, L75-3735, Wells II, Williams79, Beeson80, Vickery
<i>Rps1-d</i>	PI103.091, Haro16
<i>Rps1-k</i>	Kingwa, Williams82, Pella86
<i>Rps2</i>	CNS, L76-1988
<i>Rps3a</i>	PI171442, PI86972-1, Chapman, Harosoy32, L83-570
<i>Rps3b</i>	PI172901, PRX146-47
<i>Rps3c</i>	PI340046, PRX146-48
<i>Rps4</i>	PI186050, L85-2352
<i>Rps5</i>	PI91160, T240, L85-3059
<i>Rps6</i>	Altona, Harosoy62xx, L62-904, L89-1581, Rockford
<i>Rps7</i>	PI82312N, Harosoy
<i>Rps8</i>	PI399073

关于大豆品种耐病性方面的研究目前还较少。所谓耐病性, 是指大豆受大豆疫霉侵染以后对病原菌的抵抗能力表现为发病症状不明显或产量损失较低。耐病性一般没有小种特异性, 又称为田间抗性。大豆耐病机制还不清楚, 但据报道在耐病品种中未观察到与抗病性相关的大豆素(glyceolins)的积累。与单显性抗病基因控制的抗性相对, 耐病性

是由多基因控制的。抗病性的鉴定方法一般采用田间测定法、接种体层法和斜面板法。

二、抗性基因的分子标记

对大豆疫霉根腐病抗性的传统评价方法存在着许多弊端，如抗性基因的表达经常受环境的影响，同一品系存在多个抗性基因时由于表现型一致，往往需要很多的生理小种进行接种将各抗性基因区别开来，工作量巨大。分子标记的方法是一种直接评价方法，它不受环境条件和表现型的影响，因此得到了广泛的重视。目前研究者采用 RFLP 标记和 RAPD 标记对 *Rps1*、*Rps2*、*Rps3*、*Rps4* 和 *Rps5* 等抗病基因进行了标记，获得了与这几个位点紧密连锁的分子标记；此外还鉴定出了与 *Rps1*、*Rps2*、*Rps3*、*Rps4* 和 *Rps6* 基因位点紧密连锁的 SSR 标记；鉴定了与 *Rps1a* 和 *Rps7* 紧密连锁的 SSR 标记。最近，Burnham 等(2003)鉴定了一个抗大豆疫霉根腐病的新基因 *Rps8*，该基因通过作图定位到大豆的 MLGA2 连锁群，与 SSR 标记 Sat-040 的连锁距离为 10.0~12.2cm。这些标记为抗大豆疫霉根腐病基因的鉴定、抗病育种的标记辅助选择和抗病基因的克隆奠定了基础。

应用与抗大豆疫霉根腐病基因连锁的 RFLP 标记对从中国引进的 18 份抗病大豆种质进行抗病基因鉴定，发现 1 份种质可能含有 *Rps1a*，5 份种质可能含有 *Rps2*，7 份种质可能含有 *Rps3*，4 份种质可能含有 *Rps4*，其中有 8 份种质可能含有多基因组合，有 7 份种质可能含有新的抗病基因。由此可见，利用分子标记技术鉴定大豆资源的抗病性是可行的，用它可以快速有效地筛选抗病材料，指导传统常规育种，具有广阔的应用前景。

第九节 非寄主植物对大豆疫霉的抗病性

某种植物的所有个体对病原菌一个特定种的抗病性称为非寄主抗病性，因此非寄主抗病性是植物最主要的抗病类型，这种抗病性不是由植物单个专化性抗病基因控制的，因此不易随着病原菌的变异而丧失，具有进化稳定、持久的特点。目前的研究认为植物对卵菌的非寄主抗病性是一种诱导型主动抗病性。

欧芹和大豆疫霉菌的相互作用系统是研究植物对卵菌非寄主抗性的最深入的研究系统之一。*P. sojae* 与其非寄主欧芹非亲和互作时，植物体内同时发生一系列复杂的形态和生化防卫反应，其细胞最终表现出过敏性死亡。*P. sojae* 分泌的 42kDa 胞外糖蛋白激发子或来自此蛋白的 13 个氨基酸的寡肽可诱导欧芹细胞发生一系列反应，如膜透性改变、氧化迸发(oxidative burst)、防卫基因的诱导表达和防卫物质的积累等。最近有报道 42kDa 糖蛋白激发子具有依赖于钙离子的谷胱氨酰转移酶活性，且该激发子在 *Phytophthora* 中高度保守。此外，对一些突变体分析表明氨基酸残基对激发子和酶活性是必需的，认为该糖蛋白激发子基因的突变可能导致病原菌适生性和该糖蛋白酶活性的改变。因此，欧芹对大豆疫霉菌的非寄主抗性可能是由疫霉菌产生的激发子调控的。除了 42kDa 糖蛋白激发子之外，*P. sojae* 还能够产生分子质量为 10kDa 的蛋白激发子和 24kDa 蛋白激发子，激发子在大豆疫霉菌与不同寄主植物的相互作用中参与了不同植物对大豆疫霉的分子识别。

第十节 大豆疫霉的分子生物学

一、大豆疫霉的群体遗传研究

为了解大豆疫霉的起源,许多研究者就不同地区大豆疫霉的遗传结构进行了大量的研究。通过对来自澳大利亚和北美地区的大豆疫霉菌菌株间的遗传关系比较。发现澳大利亚和北美地区的大豆疫霉菌菌株间的遗传距离较小,认为两地的菌株演化来自共同的祖先。Forster 等(1994)利用 RFLP 分析研究了大豆疫霉菌生理小种的产生机理,认为在种植含有 *Rps* 抗性基因大豆品种田内,少量 1 号小种株系的专化性非毒力基因发生突变,这些株系具有选择优势,从而产生一些与 1 号小种分离物具有相同或几乎相同的核 RFLPs 模式但毒力基因不同的新小种。利用 RFLP 技术对澳大利亚大豆疫霉菌的 5 个生理小种的进化进行研究,发现所有小种产生相同 RFLP 模式,认为新小种是从一个共同遗传背景株系通过突变而产生。利用 RAPD 技术对来自美国不同地区的 55 个大豆疫霉菌土壤和植株分离物进行分析,发现同一小种内的不同分离物存在明显的差异。这些研究结果表明,在大豆抗性基因选择压力下产生突变(无性繁殖进化)是大豆疫霉菌产生新生理小种的重要机制。此外,Forster 等(1994)的研究结果还表明一些相同生理小种分离物之间具有很大的遗传变异,认为除了无性繁殖进化外,偶尔的异型间杂交也是大豆疫霉菌新小种产生的重要机制。

二、大豆疫霉菌的基因组研究

由于大豆疫霉的经济重要性,大豆疫霉已经成为卵菌分子生物学的模式材料之一。目前的研究主要包括大豆疫霉菌不同生长发育阶段以及侵入大豆后的基因组和功能基因组研究。Outob 等(2002)测定了分别从大豆疫霉的游动孢子、离体生长的菌丝体和侵染植物 48h 的大豆组织 cDNA 文库中的 3035 个大豆疫霉的 *EST* 序列。2000 年,美国科学基金会、农业部和能源部出资 400 万美元,开展了大豆疫霉的基因组研究,目前 Virginia 生物信息研究所的已测定了大豆疫霉产生游动孢子和侵入大豆过程中的 8292 个 *EST*,这些数据已可共享。这些基础数据的积累为采用生物信息学方法研究大豆疫霉菌生长发育和致病过程的分子机理奠定了非常好的基础。

第十一节 生态与流行病学特性

大豆疫霉菌卵孢子可以在土壤中存活多年。把土壤浇湿,在 25℃ 放置一周,然后放入大量水存放 1~2h,把大豆叶片浮于水表面一段时间,而后就可从大豆叶片上得到大豆疫霉菌。这可能是把土壤潮湿放置时,卵孢子就萌发产生孢子囊。当加入大量水时,孢子囊就释放游动孢子,游动孢子附着于大豆叶片上,便可以从叶片上得到大豆疫霉。生产田中自然发病的可能过程为,作物残茬上的卵孢子在温度适宜、土壤湿润时产生孢子囊,当下大雨或灌溉土壤水分饱和后,孢子囊释放大游动孢子,游动孢子附着于种子或幼苗根上,进而萌发侵染。所以,水分饱和的土壤是侵染的必要条件。在美国俄亥俄的灌溉实验结果表明,无论在刚播种后或植株较大时灌溉,都会加重大豆疫霉根腐病的

发生。

病菌在感病、耐病和抗病大豆品种的染病组织和器官都会产生卵孢子，但感病和耐病品种上的卵孢子远多于抗病品种。尽管在抗病品种形成卵孢子，但对其影响很小，其根部很少死亡、变色或不死亡、不变色。带病土壤飞溅引起的叶部侵染会导致比根部侵染严重得多的叶部病症，如果天气多云潮湿，叶子会严重受害，并向叶柄和茎发展。

黏重、紧实、易涝土壤大豆疫霉根腐病最易发生。耕作方式也影响该病的发生严重程度，一般免耕地比其他地块发病重，这可能是由于免耕地块土壤含水量较高所致。因为大豆是该病菌的唯一寄主，连作大豆病害较重。此外，还有很多因素影响大豆的发病严重程度。总的来说，品种效应最大，其次是土壤水分，再次是耕作方法、轮作方式、土壤肥力、所用除草剂等。

由于直接从土壤中分离 *P. sojae* 比较困难，并且发病受天气影响较大，所以很难对大豆疫霉根腐病流行进行预测，目前尚无有效方法。

第十二节 预防与控制

一、大豆疫霉菌的检测

作为一种正在入侵且在局部为害的外来危险生物，通过加强对进口大豆中病原菌的检测，预防病原菌的扩散，对控制大豆疫霉的危害非常重要。目前我国海关检疫中的国家标准是采用大豆叶碟诱钓法。具体的方法为取 5~20g 土壤样品放入小烧杯，加蒸馏水高过土面 1~2cm(不要搅拌土壤与水)，去掉形成的表面膜或漂浮的有机物残渣。用打孔器将生长 10~15d 平展的高度感病大豆品种幼苗的单叶打成直径 0.5cm 的叶碟，每烧杯水面上放叶碟 20~30 片。孵育 2h 后用消毒镊子将叶碟取出并用无菌吸水纸吸水数秒，叶碟放入疫霉菌选择性培养基中，然后在 25℃ 黑暗条件下孵育 3d。大豆疫霉菌的菌丝从侵染(水浸状)叶碟边缘长出 0.5~3mm，很容易鉴别。目前血清学技术是检测大豆疫霉菌最有效的方法。在美国已开发出检测病组织中大豆疫霉菌的单克隆抗体检测试剂盒，操作程序简单，仅需要 10min 就可完成检测。美国也发展了检测和定量土壤中疫霉菌的免疫检测方法，该方法从土壤中提取卵孢子，匀浆卵孢子然后进行 ELISA 检测，疫霉菌的数量可以通过与实验室制备的标准卵孢子梯度(200、100、35、0 个卵孢子)比较进行估计。周肇蕙等(1995)研究证实卵孢子只产生于带菌种子的种皮，检测大豆种皮存在卵孢子与否可以作为大豆种子带菌检测方法之一。而郑小波等研制的分子检测试剂盒可以在一个工作日内从每克土样平均带菌量只有 0.2 个活的卵孢子的土壤残渣中检测出大豆疫霉菌，极大的提高了检测的灵敏度和特异性，将为海关进出境大豆中大豆疫霉菌的检测提供了有效的方法。

二、大豆疫霉菌根腐病的控制

(一) 抗病品种防治

目前，对大豆疫霉根腐病的防治主要依靠种植抗、耐病品种。20 世纪 50 年代以来，美国主要通过选择种植抗病品种进行大豆疫霉根腐病的防治。但随着新生理小种的不断

出现,要求育种家培育出新的抗病品种。一个新品种的生产应用往往只有 6~8 年的时间,在寄主抗性的选择作用下,病菌毒力发生变化。新生理小种具有更强、更广的毒力,使能够同时可以抵御多个生理小种的抗病新品种的选育更为艰难。

为减缓病原菌的变异,可以采用种植耐病品种的策略。耐病品种虽然在抗病能力方面较抗病品种略低,但其表现为对不同的生理小种都有一定的抵御能力,保证较稳定的产量,同时使田间病菌的毒力结构处于较稳定状态。因此,种植耐病品种是防治大豆疫霉根腐病的一个有效措施。

(二) 杀菌剂防治技术

由于大豆疫霉菌在与环境(生物和非生物因素)的互作中极易发生遗传变异,因此其控制毒力的基因具有较高的变异频率。毒力基因的变异常常导致抗病品种抗性的丧失。在品种抗性降低的情况下或对无抗病品种可选用时,通过药剂防治措施也可以减轻田间病害损失。有研究表明,甲霜灵对大豆疫霉根腐病具有一定的防治效果,特别是种植耐病品种时辅以施用甲霜灵,具有明显的防病效果。

朱振东等(1999)通过对 8 种杀卵菌药剂的筛选,证明甲霜灵、甲霜灵锰锌、安克锰锌、杀毒矾、霜脲锰锌、克露和加瑞农对大豆疫霉菌生长有抑制作用。甲霜灵和甲霜灵锰锌通过种子包衣处理,能够在播种后的较长时间于植株体内形成强杀菌活力,完全抑制病原菌对感病大豆品种的入侵,其防病效果较其他药剂显著,在生产中具有应用价值。

许多研究表明,甲霜灵为高抗药性风险药剂,许多疫霉菌已产生对甲霜灵的抗药性,在大豆疫霉菌中也存在高耐甲霜灵的菌株。在美国,由于甲霜灵的普遍使用,大豆疫霉菌已对甲霜灵产生耐药性,但在我国尚未发现耐药菌株。为降低大豆疫霉菌抗甲霜灵菌株的出现频率,可以选择甲霜灵锰锌进行病害防治。

(三) 农业栽培措施

由于大豆疫霉根腐病的发生、传播与土壤水分密切相关,因此,凡是能够控制土壤水分的措施对于病害预防都是有效的。例如,平整土地以减少低洼地在降雨后形成积水;建立良好的田间排水系统,及时排出积水;采用垄作;减少连作等。

(四) 生物防治

生物防治是解决大豆疫霉根腐病的可能途径之一,它比化防对环境更好、更安全。但这方面进展较慢,目前还不能在生产上应用。*Gladiolium virens* 和 *Trichoderma harzianum* 对 *Pythium* 和 *Phytophthora* 有一定生防潜力,它们对防治核桃的 *P. cambivora* 有一定效果,有些真菌对 *P. drechsleri* 也有一定抑制作用。但是生防的真正应用还需要更多的深入研究。

第十三节 应用与基础研究发展策略

由于我国大豆进口量非常大,因此,建立一套快速灵敏的检测技术对控制外来大豆

疫霉的输入、防止该病在我国大流行非常重要。此外，鉴于我国已在多个省份，特别是大豆主产区，发现大豆疫霉根腐病，但没有进一步开展研究工作，目前应首先建立有效的病原菌分离鉴定方法，研究各地病害流行规律，探索病害流行的预测预报技术。其次，要建立生理小种鉴别体系，弄清各地小种分布情况，为筛选专化抗性种质创造前提条件。在生理小种体系尚未建立之前，可先进行田间抗性和耐病性的研究工作，选育具有耐病性或田间抗性的品种。中美 *P. sojae* 关系的研究对我们利用美国大量的抗 *P. sojae* 改进种质是必要的。由于抗性品种选育花费时间较长，通过耕作、栽培措施或化学防治减轻大豆疫霉病的发生、流行和损失也应是当前的研究课题。总之，应尽快开展对大豆疫霉根腐病的广泛研究，防止该病在我国大流行，这种严峻的形势要求尽快建立一套快速灵敏的检测方法。

(郑小波 王晓鸣 王源超)

主要参考文献

- 苏彦纯, 沈崇尧. 1993. 大豆疫霉菌在中国的发现及其生物学特性的研究. 植物病理学报, 23(4): 341~347 [Su Y C, Shen C R. 1993. The discovery and biological characteristics studies of *Phytophthora megasperma* f. sp. *glycinea* on soybean in China. *Acta Phytopathologica Sinica*, 23(4): 341~347]
- 王化波, 王晓鸣, 朱振东. 2003. 中国大豆疫霉菌遗传多样性的 RAPD 分析. 菌物系统, 22(2): 219~227 [Wang H B, Wang X M, Zhu Z D. 2003. Analysis of genetic diversity of *Phytophthora sojae* isolates in China using RAPD. *Mycosystema*, 22(2): 219~227]
- 王晓鸣, 朱振东, 马淑梅. 1998. 大豆疫霉选择性分离技术研究. 植物病理学报, 28(1): 78 [Wang X M, Zhu Z D, Ma S M, Li B Y. 1998. A selective isolating technique for *Phytophthora sojae*. *Acta Phytopathologica Sinica*, 28(1): 78]
- 吴浩, 王良华, 吴新华, 郑小波. 2002. 大豆疫霉在江苏省适生性的初步研究. 南京农业大学学报, 25(1): 39~42 [Wu H, Wang L H, Wu X H, Zheng X B. 2002. A preliminary study on the fitness of *Phytophthora sojae* to the environment in Jiangsu province, China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 25(1): 39~42]
- 周肇蕙, 严进, 苏彦纯, 沈崇尧, 杨立群, 于恒纯. 1995. 大豆疫病的检疫研究—病原菌的分离鉴定. 植物检疫, 9(5): 257~261
- 朱振东, 王化波, 王晓鸣. 2003. 一种土壤中大豆疫霉菌分离新方法. 菌物系统, 22(1): 142~147 [Zhu Z D, Wang H B, Wang X M. 2003. A new method of isolating *Phytophthora sojae* from soil. *Mycosystema*, 22(1): 142~147]
- 朱振东, 王晓鸣, 常汝镇. 2000. 黑龙江省大豆疫霉菌生理小种鉴定及大豆种质的抗性评价. 中国农业科学, 33(1): 62~67 [Zhu Z D, Wang X M, Chang R Z, Ma S M, Wu X F, Tian Y L. 2000. Identification of race of *Phytophthora sojae* and reaction of soybean germplasm resources in Heilongjiang province. *Scientia Agricultura Sinica*, 33(1): 62~67]
- 朱振东, 王晓鸣, 田玉兰, 武小菲. 1999. 防治大豆疫霉根腐病的药剂筛选. 农药学学报, 1(3): 39~44 [Zhu Z D, Wang X M, Tian Y L, Wu X F. 1999. Screening of fungicides for controlling *Phytophthora* root rot of soybean. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 1(3): 39~44]
- Burnham K D, Dorrance A E, Francis D M, Fioritto R J, St Martin S K. 2003. Rps8, a new locus in soybean for resistance to *Phytophthora sojae*. *Crop Sci.*, 43: 101~105
- Doupnik B J. 1993. Soybean production and disease loss estimates for north central United States from 1989 to 1991. *Plant Dis.*, 77: 1170~1171
- Drenth A, Whisson S C, MacLean D J. 1996. The evolution of races of *Phytophthora sojae* in Australia. *Phytopathology*, 86(2): 163~169
- Flor H H. 1955. Host parasite interaction in flax rust—its genetics and other implications. *Phytopathology*, 45: 680~685
- Forster H, Tyler B M, Coffey M D. 1994. *Phytophthora sojae* races have arisen by clonal evaluation and by rare outcrosses. *Mol. Plant-Microbe Interact.*, 7: 780~791
- Hansen E M, Maxwell D P. 1991. Species of the *Phytophthora megasperma* complex. *Mycologia*, 83: 376~381
- Kaufmann M J, Gerdemann J W. 1958. Root and stem rot of soybean caused by *Phytophthora sojae* n. sp. *Phytopathology*, 48:

- Kyle D E, Nickell C D, Nelson R L, Pedersen W L. 1998. Response of soybean accessions from provinces in southern China to *Phytophthora sojae*. *Plant Disease*, 82: 555-559
- Lohnes D G, Nickell C D, Schmitthenner A F. 1996. Origin of soybean alleles for *Phytophthora* resistance in China. *Crop Sci.*, 36: 1689-1692
- Morgan F L. 1965. New physiologic race of *Phytophthora megasperma* var. *sojae*. *Phytopathology*, 55: 1277-1279
- Qutob D, Hrabec P, Sobral B, Gijzen M. 2000. Comparative analysis of expressed sequences in *Phytophthora sojae*. *Plant Physiol.*, 123: 243-253
- Schmitthenner A F. 1985. Problems and progress in control of *Phytophthora* root rot of soybean. *Plant Disease*, 69 (4): 362-368
- Schmitthenner A F, Bhat R G. 1994. Useful methods for studying *Phytophthora* in the laboratory. OARDC special circular. 143
- Weng C, Yu K, Anderson T R, Poysa V. 2001. Mapping genes conferring resistance to *Phytophthora* root rot of soybean, Rps1a and Rps7. *J. Hered.*, 92: 442-446
- Wrather J A, Stienstra W C, Koenning S R. 2001. Soybean disease loss estimates for the United States from 1996 to 1998. *Can. J. Plant Pathol.*, 23: 122-131

第二十一章 玉米霜霉病

第一节 起源与分布	457	第六节 生态学特性	470
第二节 识别特征与早期诊断	459	第七节 风险分析与早期预警系统	470
第三节 传入途径与入侵成因	461	第八节 预防与控制	471
第四节 危害现状与生态经济影响的 评估	462	第九节 应用与基础研究发展策略	472
第五节 病菌的生物学特性	463	附 节 玉米霜霉病种子带菌检验方法	473

摘要 本文对玉米霜霉病在全世界的分布与起源、危害现状进行了概述；描述了病害识别与诊断特征，病原菌形态、生物学特性及生态学特性；分析了该病害的侵染途径及其在我国潜在风险；并对病害检验和预防控制措施等方面提出了建议。

关键词 玉米 霜霉病菌 症状 检疫

Chapter 21 Downy Mildew of Maize

Abstract: The paper summarized the downy mildew of maize update on its distribution, loss of yield, morphology and biology of causing pathogens, detection and inspection methods, transmission, disease cycle, diagnosis, phytosanitary risk, disease control and phytosanitary measures.

Key words: maize, *Peronosclerospora*, symptom, quarantine

第一节 起源与分布

一、地理分布

在自然界中侵染玉米的霜霉病菌包括指霜霉菌、指疫霉菌和指梗霉菌 3 属 9 个种 (Shurtleff, 1980; 王圆等, 1988)。

由蜀黍指霜霉 *Peronosclerospora sorghi* (Weston and Uppal) Shaw 引起的霜霉病 (sorghum downy mildew of sorghum and maize) 在境外分布情况如下：印度、巴基斯坦、孟加拉、以色列、伊朗、阿拉伯也门共和国、菲律宾、泰国、尼泊尔、日本、意大利、博茨瓦那、埃及、埃塞俄比亚、加纳、肯尼亚、马拉维、尼日利亚、索马里、赞比亚、津巴布韦、南非、刚果、苏丹、坦桑尼亚、乌干达、扎伊尔、墨西哥、危地马拉、萨尔瓦

多、洪都拉斯、巴拿马、委内瑞拉、孟加拉、南也门、博茨瓦纳、秘鲁、巴西、玻利维亚、阿根廷、乌拉圭、美国(16个州)、俄罗斯、澳大利亚。高粱霜霉病在我国仅河南内乡 1939 年有记载,喻璋 1983 年在河南宜阳再次采集到蜀黍指霜霉标本(张中义和沈言章, 1998), 可见有零星偶发现象, 但尚缺乏深入的调查研究。

由甘蔗指霜霉 *Peronosclerospora sacchari* (Miyake) Shirai and Hara 引起的霜霉病 (sugarcane downy mildew of sugarcane and maize)在境外分布情况如下: 印度、尼泊尔、印度尼西亚、菲律宾、泰国、日本、越南、澳大利亚、尼日利亚、斐济、巴布亚新几内亚等国。在我国分布在台湾省台南(潘崇仪和吕理焱, 1982), 江西、四川也曾有记录发生在甘蔗、玉米和茂盛假蜀黍上(戴芳澜, 1979; 张中义等, 1985)。王圆等(1994)曾对 *P. sacchari* 在广西、云南发生情况作了进一步的调查研究。

由菲律宾指霜霉 *Peronosclerospora philippinensis* (Weston) Shaw 引起的霜霉病 (Philippine downy mildew of maize)境外分布在: 亚洲的印度、菲律宾、尼泊尔、印度尼西亚、泰国、日本、巴基斯坦; 非洲的毛里求斯、南非; 美洲的美国及欧洲(全国农业技术推广服务中心, 2001)。我国在玉米上曾于 1958 年在广西龙津水口和 1978 年在云南开远分别有记录(张中义等, 1998), 但王圆等(1991)的调查结果则与此不一致。

由玉蜀黍指霜霉 *Peronosclerospora maydis* (Racib.) Shaw 引起的爪哇霜霉病 (Java downy mildew of maize)境外分布在: 印度尼西亚、尼泊尔、印度、泰国、菲律宾、日本、以色列、阿根廷、牙买加、委内瑞拉、澳大利亚、扎伊尔、刚果、中非、索马里、俄罗斯。在国内主要分布在广西田阳、百色和云南开远、文山、蒙自、曲靖、屏边、个旧(中国科学院华南热带资源考察队植病真菌专业, 1959; 张中义等, 1985; 王圆等, 1991; 张中义和沈言章, 1998), 为害玉米及甜根子草 *Saccharum spontaneum*。在印度尼西亚玉米受爪哇霜霉病为害最重。

由大孢指疫霉玉蜀黍变种 *Sclerophthora macrospora* (Sacc.) Thirum., Shaw et Naras var. *maydis* 引起的疯顶病 (crazy top downy mildew)境外分布在: 美国、加拿大、墨西哥、南美洲、欧洲东部与南部、非洲、亚洲。该病早年在我国主要为害水稻和小麦, 自 1974 年以来, 陆续有侵染玉米的记载(王圆等, 1995)。国内目前分布在 11 个省区(王圆等, 1995): 江苏东台, 四川成都、重庆, 云南文山, 湖北长阳, 山东肥城、泰安、莱芜, 辽宁瓦房店, 河北涿鹿, 甘肃安西, 新疆和田、泽普、莎车, 宁夏银川、惠农、平罗、陶乐、贺兰、永宁、灵武、吴忠、青铜峡、中宁、中卫, 台湾。

二、起源

高粱霜霉病(SDM)最早在印度发现。1907 年 Butler 报道了印度南部高粱霜霉病发生情况, 损失达 30%~70%。美国 1961 年首先在德州发现, 目前 SDM 在北美、中美洲、南美洲、非洲、亚洲都有发生, 并不时给当地高粱、玉米生产造成威胁。1967 年至 20 世纪 70 年代早期, SDM 在美国高粱上暴发流行, 损失惨重。1975~1976 年, SDM 在委内瑞拉玉米上暴发流行, 1/3 玉米被毁。现在埃及尼罗河下游河谷地区, SDM 仍然是高粱、玉米的主要病害。亚洲有 SDM 玉米致病型, 如印度北部玉米致病型和泰国玉米致病型侵染玉米, 但不侵染高粱或很少侵染高粱。

甘蔗指霜霉菌在我国台湾省最早观察到为害甘蔗是在 1909 年引种澳大利亚甘蔗的

田块(Miyake, 1912)。

第二节 识别特征与早期诊断

各种霜霉病菌在玉米上均引起系统症状(图 21-1)，共同特点是，病叶淡绿至淡黄色或苍白色，紫色条纹和条斑，湿度高时在叶背面形成灰白色霉状物，即病菌的无性繁殖体游动孢子囊梗和游动孢子囊。以后条纹和条斑颜色逐渐加深变褐，组织坏死。幼苗染病后生长缓慢，节间缩短，植株矮化，重病株不能正常抽穗或抽出的果穗雄花畸形。各种霜霉病症状有时因病菌种类和环境条件变化而有所不同。

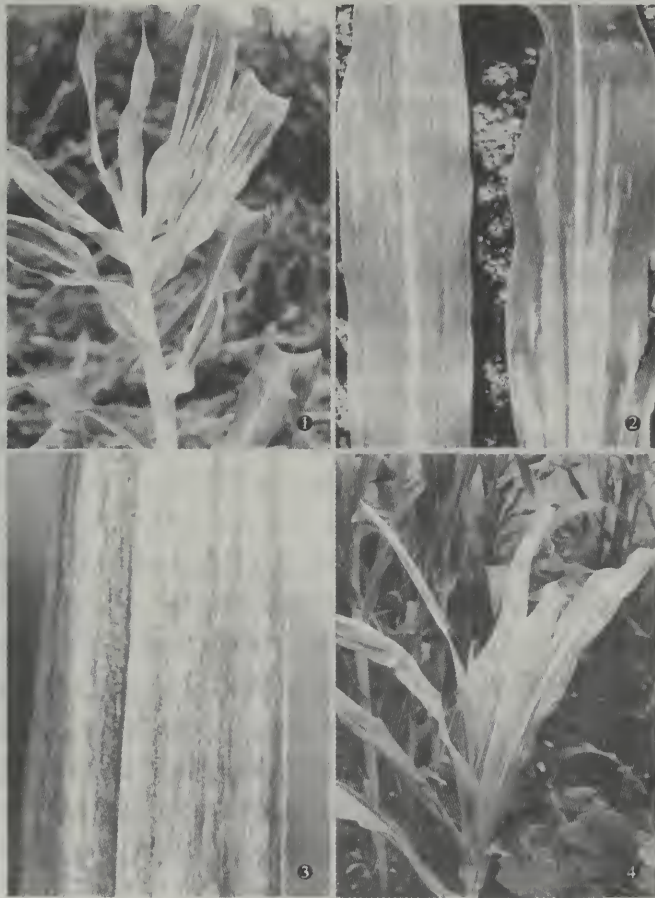


图 21-1 玉米霜霉病

1. 玉米霜霉病植株表现的系统症状；
2. 感病叶片上形成的淡绿色至苍白色条纹斑；
3. 叶背面形成的白色霉层；
4. 幼苗感病后表现为节间缩短，植株矮化

由蜀黍指霜霉 *P. sorghi* 引起的霜霉病：玉米植株被系统侵染后褪绿，有时矮化，偶见叶上呈白色条纹和畸形果穗。病叶较健叶窄而直立，病叶两面生白色霜霉层。有的病株雄花呈叶状。在抗病品种上虽属系统侵染，但可正常产生种子，而感病植株则不结实，

果穗柄变长。卵孢子多形成于果穗苞叶和产生条纹的病叶组织中。玉米经人工接种后，苗期第3片叶先出现失绿，此后失绿向上扩展。系统侵染的心叶可能死亡，致使幼苗在4周内死亡。系统侵染植株矮化，叶片较窄，后期坏死，但不皱裂，也不形成卵孢子。系统侵染的穗变叶片状，不育。

在人工接种条件下，高粱幼苗第1~2片叶先表现失绿，失绿从叶片基部开始，向上扩展至整片叶。高粱霜霉病有两种症状：系统症状和局部症状。病菌侵染并在生长点定殖引起系统侵染症状，表现为叶片失绿，植株矮化，并可在10~20d内死亡。受侵染叶片在空气潮湿时，叶片背面会出现白色霉层，这些是病菌孢子囊和孢子囊梗。失绿叶片逐渐出现白色纵向条斑，随后变为褐色条斑，卵孢子大量形成。褐色条斑坏死，叶片皱裂、并释放卵孢子。系统侵染植株不产生或很少产生种子。

单个孢子囊再侵染后引起局部侵染，叶片上出现斑点状坏死病斑。如空气湿润，局部病斑也出现白色霉层。但局部侵染不能形成卵孢子。

由甘蔗指霜霉 *P. sacchari* 引起的霜霉病在叶上可形成小圆形褪绿斑点和宽窄不等的褪绿条纹或条斑两种症状。小圆形斑点一般为早期局部侵染所致，侵染后2~4d表现这种症状，多发生于植株的下部叶片上。条纹或条斑一般是系统侵染引起的症状，多发生于植株的上部叶片。条纹或条斑宽而长，几乎与叶片同长，呈黄白色或白色，与叶脉平行，宽1~3mm，在感病品种上可宽达1cm。在有些品种上或老叶上的条斑变窄细和间断。再侵染时叶上最初形成短而窄的条斑或条纹，苍白色或淡黄色，后期这些短条斑也可连接形成不规则的长条斑，初呈黄白色后变黄褐色干枯。在晚期侵染或轻度发病的植株，当植株接近成熟时，叶片上的条斑可消失。一般叶片即使发病严重也很少撕裂，但条斑区常皱缩。在叶片的两面和叶鞘及苞叶表面产生白色霉状物，即孢囊梗和孢子囊。在适温(25℃)下有露水的夜间易产生孢子囊。病株抽出数个变形的、小而不结粒的果穗和不正常的雄穗(张中义等, 1985; Shurtleff, 1980)。

由菲律宾指霜霉 *P. philippinensis* 引起的霜霉病从苗期到抽雄吐丝期都可发病，但以出苗到3~4周龄期为高感期，幼苗感染可造成系统性侵染。第一片真叶被侵染后的系统症状呈褪绿或褪绿条斑，而局部症状多出现于二叶至三叶阶段及抽雄吐丝期。植株早期被害表现为生长迟缓、矮化，叶片上出现黄绿色条纹，变狭发硬，叶背生有灰白色霉层。晚期被害，病株与健株高度相近，但病株下部叶片往往自基部向叶尖逐渐产生黄色条纹，甚至叶鞘上也产生黄白色条纹。发病轻时植株可不正常地提前成熟，发病重时病株节间缩短，不抽穗或抽出的果穗也大部分不结实，茎秆弯曲，叶片卷旋，雄穗变形，不产生花粉(张中义等, 1985; Shurtleff, 1980)。

由玉蜀黍指霜霉 *P. maydis* 引起的爪哇霜霉病(白苗病)在玉米苗期侵染后全株变淡绿色、黄白色或白色，群众称白苗病或白包谷，后渐枯死。成株发病时多自植株中部叶片的基部开始表现症状，逐渐向上蔓延，呈淡绿色、淡黄色，偶有红褐色的长条纹，以后互相汇合使叶片下半部或全叶枯死。系统侵染的病株表现矮化，不育或偶有雄穗，一般不结果穗，易早枯。在潮湿环境下病叶正反面条纹上形成白色霉状物。通常较老植株比4周龄的幼苗抗病(张中义等, 1985; Shurtleff, 1980)。

由大孢指疫霉玉米变种(*Sclerophthora macrospora* var. *maydis*)引起的疯顶病病株呈龙头状，病苗变褐色，分蘖增多，6~10株簇生，病株矮化，节间缩短，多不育侧枝。病

叶和心叶扭曲卷缩，叶片狭窄粗糙，黄白色，淡绿色条纹。雄花部分或全部呈层生现象，畸形变成小叶状，即为一堆叶状结构，呈刺猬状。果穗也变成一簇叶状厚叶或不结实(张中义等, 1990; 周凯南, 1987)。

第三节 传入途径与入侵成因

玉米霜霉病菌为专性寄生菌，以种子内潜伏的菌丝体、杂草寄主上的孢子囊和病株残体及土壤中的卵孢子越冬，成为生长期玉米发病的初侵染来源。

有证据表明玉米霜霉病株的种子内部有病菌菌丝，种植病株的种子能长出病苗。但是，关于种子的成熟度、含水量、种植前存放的时间等对种传的影响均没有充分研究，也没排除种植时外部感染的可能性。一般认为种植病株的成熟干燥种子，不会长出病苗。

国内外试验表明，种植从玉米、高粱霜霉病病株采收的种子，均能长出病苗。菌丝主要潜伏在种子的小盾片、果皮、果梗、胚、胚乳等部位，但菌丝不耐干燥，在种子收获与贮藏过程中可能死亡。因此，带病种子可能不仅是病区，而且是远距离传播的重要途径。但在“苗木”中，如在甘蔗插条中，菌丝可以存活传病。但王圆等 (1994)检验广西、云南省玉米霜霉病的病种子果皮内有病菌菌丝，胚中无菌，种植带菌种子不发病。

病菌的卵孢子是远距离传播的重要方式。试验证明，散落在土壤中的卵孢子经过两个生长期仍不丧失致病力，在干燥地方能保持发芽力达 14 年之久，可见在病区不仅病株残体中和遗落田土中的卵孢子是重要初侵染来源，而且卵孢子也可随玉米材料包装物远距离传播。在热带和亚热带，一些杂草寄主，如约翰逊草、假约翰逊草、假高粱 *Sorghum halepense* 等周年存活，在这些寄主上发病产生的孢子囊也是不容忽视的重要初侵染来源。

蜀黍指霜霉 *P. sorghi* 的卵孢子可黏附在种子外面，也可随种子夹带的病残物传带，但由此产生的病株很少。卵孢子能在高粱 *Sorghum vulgare* 种子的颖壳及果皮中产生，卵孢子在种子干燥、贮存后仍可存活并长出病苗，有种传的实际危险。*P. sacchari* 的菌丝在玉米种子中容易失去活力，难于传播，而带菌的甘蔗插条是传病的重要方式，所以可能是由甘蔗插条将病害从澳大利亚传入我国台湾省的。其寄主植物包括玉米 *Zea mays*、高粱、须芒草属 *Andropogon*、双花草属 *Dichanthium*、假蜀黍属 *Euchlaena*、黄茅属 *Heteropogon*、黍属 *Panicum*、狼尾草属 *Pennisetum*、高粱属 *Sorghum*、玉蜀黍属 *Zea*、菅草属 *Themeda*。由蜀黍指霜霉菌引起的霜霉病是分布最广的玉米霜霉病，分为 3 种类型：①泰国玉米类型：发生在泰国，病菌侵染玉米 *Zea mays*，很少侵染高粱，不侵染黄茅 *Heteropogon contortus*。不产生卵孢子，不能随种子传播。②印度北部玉米类型：发生在印度北部，侵染玉米、黄茅、不侵染高粱。黄茅为玉米提供初侵染来源，病菌只在黄茅上产生卵孢子，玉米种子不传病。③高粱类型：发生在亚洲、非洲、美洲许多国家，除为害玉米、高粱外，还侵染牧草和多年生杂草，如苏丹草 *S. sudanense*、假高粱、假约翰逊草等，这些寄主为玉米、高粱提供初侵染来源。病菌在玉米上很少产生卵孢子，玉米果穗的苞叶保护籽粒不与病残体接触，在玉米种子中未检出过卵孢子的污染，玉米种子一般不能传病。病菌在高粱叶片中产生大量卵孢子，可粘附在种子表面或随病残体夹带在种子中，但种传率低。在高粱种子的颖壳中发现卵孢子，种植后可长出病苗。

甘蔗指霜霉除为害玉米外,甘蔗 *Saccharum officinarum* 是流行学上唯一重要的寄主,甘蔗为玉米提供初侵染来源,甘蔗插条可远距离传带病菌。有报道病菌在甘蔗上可产生卵孢子,但是卵孢子在自然条件下作用不明。病菌在玉米上不产生卵孢子,玉米种子不能传病。其寄主植物包括玉米、甘蔗、须芒草属、假蜀黍属、高粱属、孔颖草属 *Bothriochloa*、稗属 *Echinochloa*、棒头草属 *Polypogon*、蟋蟀草属 *Eleusine*、金茅属 *Eulalia*、芒属 *Miscanthus*、黍属、甘蔗属、狗尾草属 *Setaria*、摩擦禾属 *Tripsacum*、裂稃草属 *Schizachyrium*。

菲律宾指霜霉 *P. philippinensis*, 多年生甜根子草 *Saccharrum spontaneum* 上的病菌是印度玉米霜霉病的初侵染主要来源。在菲律宾,甘蔗、甜根子草、拟高粱 *S. propinquum* 上的病菌是玉米初侵染的主要来源。病菌不产生卵孢子,玉米种子不能传病。但在甘蔗受感染地区,病菌可能随甘蔗插条远距离传播。其寄主植物包括玉米、燕麦 *Avana sativa*、须芒草属、孔颖草属、假蜀黍属、金茅属、芒属、甘蔗属、裂稃草属、高粱属、摩擦禾属。

玉蜀黍指霜霉 *P. maydis* 是印尼玉米唯一的自然发病寄主,该菌可以孢子囊从旱季玉米延续到雨季玉米上。在澳大利亚,多年生羽高粱 *S. plumosum* 是野生寄主,为玉米提供初侵染源。病菌不产生卵孢子,玉米种子也不能传病。国内报道,发病的甜根子草为玉米提供初侵染源。其寄主植物包括玉米、羽高粱、墨西哥假高粱 *Euchlaena mexicana*、狼尾草属 *Pennisetum*、摩擦禾属。

综上所述,蜀黍指霜霉高粱类型可随高粱种子,尤其是带颖壳的种子远距离传播,而菲律宾指霜霉与甘蔗指霜霉,特别是甘蔗指霜霉可随甘蔗插条远距离传播。

病菌一般以孢子囊萌发形成的芽管或以菌丝从气孔侵入玉米叶片,侵入后在叶肉细胞间扩展,靠吸器从细胞内吸收养分。然后经过叶鞘进入茎秆,并在茎端寄生,再发展到嫩叶上。生长季病株上产生的孢子囊借气流或雨水飞溅传播蔓延,进行多次再侵染。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

在自然界中,热带和亚热带地区玉米受害严重,在东南亚、印度、澳大利亚和非洲等地发病率达 20%~90%,减产 50%以上,严重流行为害时减产可达 80%,甚至绝收。

由蜀黍指霜霉菌引起的霜霉病 1961 年在美国得克萨斯州流行,使玉米、高粱的产量损失达 250 万美元(Frederiksen *et al.*, 1969);阿根廷在主要粒用高粱产区曾造成 15%~20% 的产量损失(Frederiksen and Renfro, 1977);该病害在印度危害高粱,发病率达 30%~70%,损失约 10 万吨产量(Payak, 1974);此病 1974 年在泰国玉米上发生 10 万公顷,减产 10%~100%。在以色列危害甜玉米和饲用高粱,损失亦很严重(Kenneth, 1975, 1981)。

由甘蔗指霜霉菌引起的霜霉病发生于热带和亚热带地区,在我国台湾玉米上曾严重发生,减产 30%~60%,1964 年在台湾流行,使 2/3 的杂交种玉米田发病,发病率高达 90%~95%。此病 20 世纪 50~60 年代在我国广西百色和南宁地区发生,重病田发病率高达 95%,甚至因病而改种其他作物,危害严重。60 年代在云南省文山和红河州也遭受玉米霜霉病为害,致使不少玉米田毁种(王园等,1994)。此外还有江西、四川等省也因此病造成很大经济损失。但张中义等(1982)曾前往当地考察发现,发病田改种其他作物后未获得新鲜标本(张中义和沈言章,1998)。

由菲律宾指霜霉菌引起的霜霉病是菲律宾玉米上为害最严重的病害，产量损失达15%~40%。1974~1975年使菲律宾玉米减产约8%，价值2260万美元。我国云南省开远县个别晚熟田发病率达90%。因此，美国动植物检疫局在2002年将菲律宾指霜霉菌引起的霜霉病列为危险性生物而加以防范。

由玉蜀黍指霜霉菌引起的爪哇霜霉病在印度尼西亚为害较重，减产达40%(Semangoen, 1970)，1964年爪哇Tjianajur地区平均发病率90%，全部失收。在我国广西百色、南宁及云南红河和文山州等地发生普遍，重病田发病10%~30%，在云南严重地块发病率高达61%。据张中义等调查，在滇南低海拔1060~1475m的州县发病普遍，但在中海拔的1540m地区还未见有发病(张中义等, 1985, 1988)，说明该病害在亚热带湿热地区易于发生。

近年在新疆莎车、和田及宁夏自治区，辽宁省瓦房店市相继发生由大孢指疫霉菌引起的玉米霜霉病(疯顶病)，在新疆发病率达20%~60%，在辽宁发病率达10%以上(新疆自治区植保站, 1994; 罗占忠等, 1994)。

第五节 病菌的生物学特性

一、病菌生物学特性

引起玉米霜霉病的病原菌分属于霜霉科 *Peronosporaceae* 中 3 个属：指霜霉属 *Peronosclerospora*、指疫霉属 *Sclerophthora* 和指梗霉属 *Sclerospora*。

指霜霉属 *Peronosclerospora* 系 Shirai 和 Hara 1927 年将指梗霉属 *Sclerospora* 指霜霉亚属(Subgenus *Peronosclerospora*)提升为属的等级, Shaw(1978)再度确认和描述了该属，其与指梗霉属的区分特点是无性世代产生分生孢子，即孢子囊萌发只产生芽管，目前已经得到承认。菌丝体无色无隔多核，细胞间生。吸器多为小球状。孢囊梗二叉状分枝 2~5 次，小梗圆锥形至钻形，梗上部较粗大，基部有足细胞，通常 2 枝或 3~4 枝丛生，由气孔伸出。孢子囊椭圆形、圆筒形、卵形、近球形，壁膜等厚，无囊盖、无孔状结构，萌发产生芽管。藏卵器近球形至不规则形，雄器侧生。卵孢子球形或近球形，卵孢子壁几乎全与藏卵器壁融合，卵孢子三层壁，孢子外壁栗色至红褐色，脊不规则，孢子中壁极薄，无色透明，孢子内壁无色等厚，卵孢子亦以芽管萌发。

属内按孢子囊的大小分两个组：小孢子组孢子囊较小，球形至卵形，包括 *P. sorghi*、*P. heteropogoni*、*P. maydis*；长孢子组孢子囊较长，椭圆至圆筒形，包括 *P. sacchari*、*P. miscanthi*、*P. philippinensis*、*P. spontanea*。

孢子囊的形态特征是分种的重要依据，但这些特征易随环境条件而变化。温度可以影响孢子囊的大小，如在 14~28℃ 范围内，*P. maydis* 的孢子囊的长与宽不受温度影响，长宽比为 1.02~1.07，而 *P. sorghi* 的孢子囊随温度升高而变大，但长宽比为 1.43~1.51，*P. philippinensis* 的孢子囊随温度升高而变长，但宽度不变，长宽比为 2.09~3.07。*P. sacchari* 的孢子囊也随温度升高而变长，宽度不变。因此，无法区别高温下的 *P. sacchari* 与低温下的 *P. philippinensis*，也无法区别低温下的 *P. sacchari* 与 *P. sorghi*。最近在比较研究中，已无法测出我国台湾省的 *P. sacchari* 与菲律宾的 *P. philippinensis* 在形态学、寄主范围和症状上的重要差别。迄今分类上所用数据都是在不同自然条件下观察的结果，

这样势必使得病原菌的分类鉴定存在不少问题。

蜀黍指霜霉菌 *P. sorghi*, 异名 *Sclerospora sorghi*; *S. graminicola* var. *andropogonis-sorghi*; *S. sorghi-vulgaris*; *S. andropogonis-sorghi*。种内有致病性变异, 分为 3 种致病型:

(1) 高粱致病型: 在亚洲限于印度, 广泛发生在美洲、非洲。侵染玉米、高粱。在玉米上很少产生卵孢子, 在高粱上产生大量卵孢子。

(2) 泰国玉米致病型: 发生在泰国。侵染玉米, 不侵染黄茅, 很少侵染高粱。在玉米上不产生卵孢子。

(3) 印度北部玉米致病型: 发生在印度北部拉贾斯坦(Rajasthan)。侵染玉米、黄茅, 但不侵染高粱。在玉米上不产生卵孢子, 在黄茅上产生卵孢子。Kenneth (1975)认为, *P. sorghi* 的拉贾斯坦和泰国致病型可能与印度尼西亚的 *P. maydis* 相同, 但是 Siradhana 等 (1980)根据卵孢子、分生孢子的形态及生理特性, 将拉贾斯坦的玉米致病型确定为 *P. heteropogoni*。

蜀黍指霜霉菌菌丝细胞间生, 吸器伸入寄主细胞。孢囊梗单根或 2~3 根从叶片背面有时从正面的气孔伸出, 直立、疏展、纤细、无色, 基部常与梗等粗, 有基细胞, $103\sim 308\mu\text{m}\times 10\sim 17\mu\text{m}$, 平均 $189.9\mu\text{m}\times 13.6\mu\text{m}$; 顶端二叉状分枝 2~5 次, 分枝粗短, 常排列成半球形, 小梗尖, 长 $10.3\mu\text{m}\times 7.1\mu\text{m}$, 顶生一个孢子囊。孢子囊近球形、卵圆形, 无色, 壁薄, 顶端圆, 无乳突, $10\sim 18\mu\text{m}\times 13\sim 18\mu\text{m}$ 。藏卵器埋生于叶肉细胞里维管束之间, 球形、不规则形, 直径 $40\sim 55\mu\text{m}$ 。卵孢子无色, 球形, 直径 $25\sim 42.9\mu\text{m}$ (平均 $36\mu\text{m}$), 具淡黄色壁(图 21-2)(张中义, 1988; Shurtleff, 1980)。

在 17°C 和 29°C (最适温度 $24\sim 26^{\circ}\text{C}$) 下产生孢子囊。饱和湿度和 $21\sim 25^{\circ}\text{C}$ (有的报道 15°C) 的温度适于孢子囊萌发伸出芽管。孢子囊寿命很短, 经 3~4 h 后失去生活力。在 11°C 和 32°C 之间, 经 4h 或更长时间的湿润期, 孢子囊侵入后可引起系统侵染。卵孢子在土壤中可存活几个生长季节, 孢子囊可能是初侵染菌源。卵孢子萌发产生芽管, 侵染玉米幼苗地下部位引起系统侵染。土温较低时, 卵孢子不能感染幼苗。叶上产生的孢子囊可借风雨传播进行再侵染, 在出土后至 4 周龄的幼苗上也能引起系统侵染。卵孢子只在系统侵染发病的植株上产生, 且在玉米上产生的卵孢子少于高粱。在印度该菌有生理分化, 可区分为玉米和高粱致病型。病菌除侵染玉米外, 尚能侵染高粱、约翰逊草、大乌草 *Euchlaena mexicana*、苏丹草等 (Shurtleff, 1980)。

李德福(2001)对高粱指霜霉菌的孢子囊、孢子囊梗和卵孢子等形态上的检测方法进行了研究, 并探讨应用 PCR 技术检测蜀黍指霜霉和玉蜀黍指霜霉引起的病害。发现芽管直接从气孔中侵入叶肉细胞, 或先在叶片表面形成附着胞, 再侵入细胞间。孢子囊从萌发到侵入叶片细胞, 需 1~2h, 因此从孢子囊形成到侵入叶片细胞只需 3~4h 就可完成。用玉米病叶保湿培养观察孢子囊及其孢子囊梗形成过程, 和上述描述相似。但是玉米病叶形成的孢子囊梗数量少, 肉眼可见的霉层稀少。

用 PCR 技术从高粱指霜霉和玉米指霜霉感染的叶片组织中检测到大小分别为 1 kb 和 200bp 的特异性条带, 证明其 PCR 所用引物特异性强, 检测玉米霜霉病灵敏性高, 只要从寄主中提取到 DNA, 就可利用 PCR 来检测是否含有病菌 DNA(李德福, 2001)。

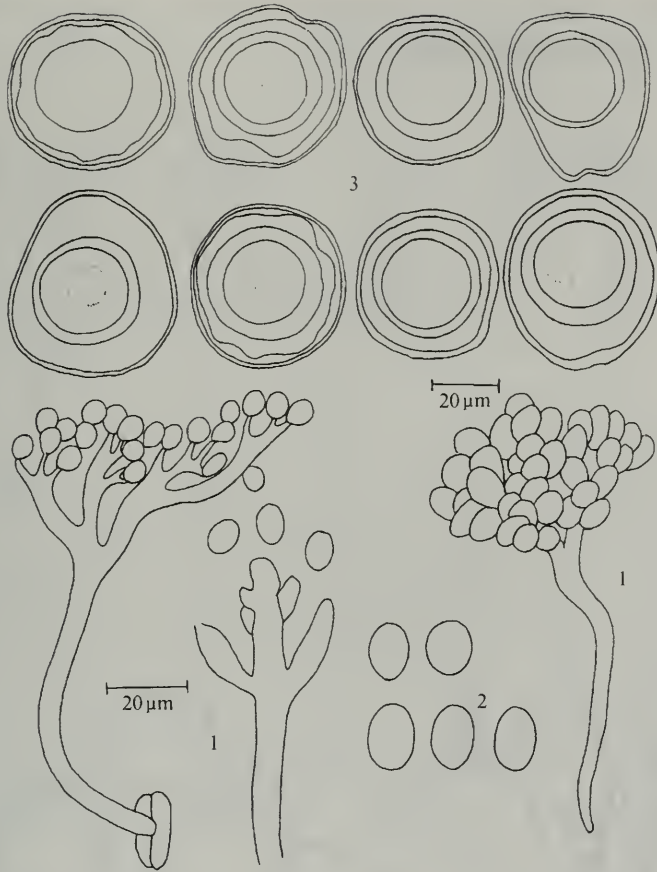


图 21-2 蜀黍指霜霉菌 *Peronosclerospora sorghi* (Weston and Uppal) Shaw

1. 孢子囊梗; 2. 孢子囊; 3. 藏卵器与卵孢子

甘蔗指霜霉菌 *P. sacchari*, 异名 *Sclerospora sacchari* (Miyake) Shirai and Hara, 菌丝纤细, 在寄主细胞间生长, 产生瘤状吸器, 伸入寄主细胞内吸收养分。孢囊梗直立, 自气孔伸出, 单根或 2 根, 极少 3 根成束, 具基细胞, 基部较细, 孢囊梗长 160~170 μm , 宽 10~15 μm , 顶部肥大, 并作 2~3 次 (有时 4 次) 二叉状分枝。小梗长圆锥形, 弯曲, 顶生孢子囊。孢子囊椭圆形至卵圆形, 顶端略圆, 基部稍尖, 无色, 25~54 μm ×15~23 μm (多数 24~36 μm ×12~18 μm), 壁薄, 萌发产生芽管。藏卵器红褐色, 不规则椭圆形, 55~73 μm ×49~58 μm , 壁不等厚。卵孢子球形或略带多角形, 黄色, 直径 40~50 μm , 壁厚 3.8~5 μm (图 21-3)。孢子囊和卵孢子萌发产生无色、纤细的无隔膜芽管, 宽 3.8 μm (Shurtleff, 1980; 张中义等, 1988)。

在玉米上, 甘蔗指霜霉菌于 12~23 $^{\circ}\text{C}$ 时产孢量最高, 26 $^{\circ}\text{C}$ 以上孢囊梗出现变形, 产孢量减少。在 15~30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下有利于孢子囊萌发, 8~35 $^{\circ}\text{C}$ 经 5h 萌发率达 58%~80%, 在 26 $^{\circ}\text{C}$ 孢子囊经 2h 萌发出最长的芽管, 平均达 315 μm 。在温室 18~32 $^{\circ}\text{C}$ 条件下最有利于侵染和发病, 侵染率可达 63%~80%。在 8 $^{\circ}\text{C}$ 条件下仅有 6% 的植株表现为系统侵染 (Bonde and Melching, 1979)。最适于孢子囊的形成、萌发和侵染的温度条件为 20~25 $^{\circ}\text{C}$, 并有自由

水滴存在。夜间适于产孢，随着光线强度增强产孢量下降，说明光照可以抑制产孢。孢子囊形成后几小时便丧失生活力(Shurtleff, 1980)。

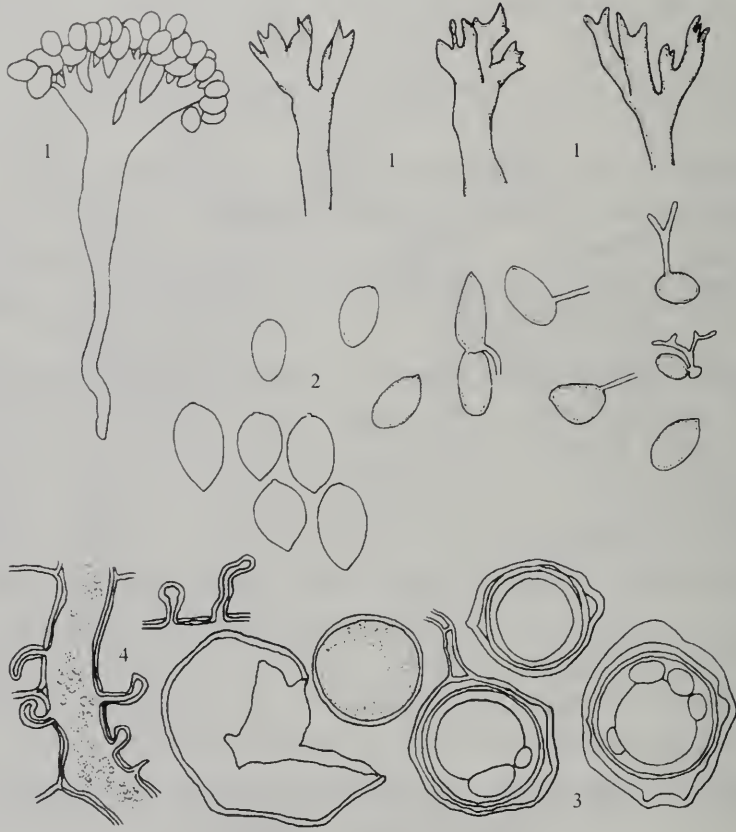


图 21-3 甘蔗指霜霉菌 *Peronosclerospora sacchari* (Miyake) Shirai and Hara

1. 孢子囊梗；2. 孢子囊；3. 藏卵器与卵孢子；4. 吸器

该病菌除侵染甘蔗、玉米外，尚能侵染大刍草、扫帚高粱、种用高粱和茂盛假蜀黍。

菲律宾指霜霉菌 *P. philippinensis*, 异名 *Sclerospora philippinensis* Weston; *Sclerospora maydis* Reinking; *Sclerospora indica* Bulter。菌丝体细胞间生，具分枝，纤细，直径 $8\mu\text{m}$ 左右，但有不规则皱缩和膨大。吸器小而单生，泡囊状或近指状，大小 $2\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ 。孢囊梗自气孔伸出，无色透明细长，正直，长 $150\sim 400\mu\text{m}$ ，宽 $15\sim 26\mu\text{m}$ ，有基细胞，顶端有 $2\sim 4$ 次二叉状分枝，分枝肥壮，小梗圆锥形至突锥状，略弯曲，长 $10\mu\text{m}$ 。孢子囊形状多样，椭圆形、长卵球形或圆柱形，无色透明，膜薄，内有微小的颗粒状物，顶端稍圆，基部微尖， $34\sim 48\mu\text{m} \times 18\sim 20\mu\text{m}$ ，平均 $40.3\mu\text{m} \times 18.0\mu\text{m}$ 。藏卵器壁光滑， $22.9\mu\text{m}$ ，常附有藏卵器的柄和雄器的残留物。卵孢子圆球形，直径 $135.3\sim 22.6\mu\text{m}$ ，埋生于坏死的叶组织里(图 21-4)。

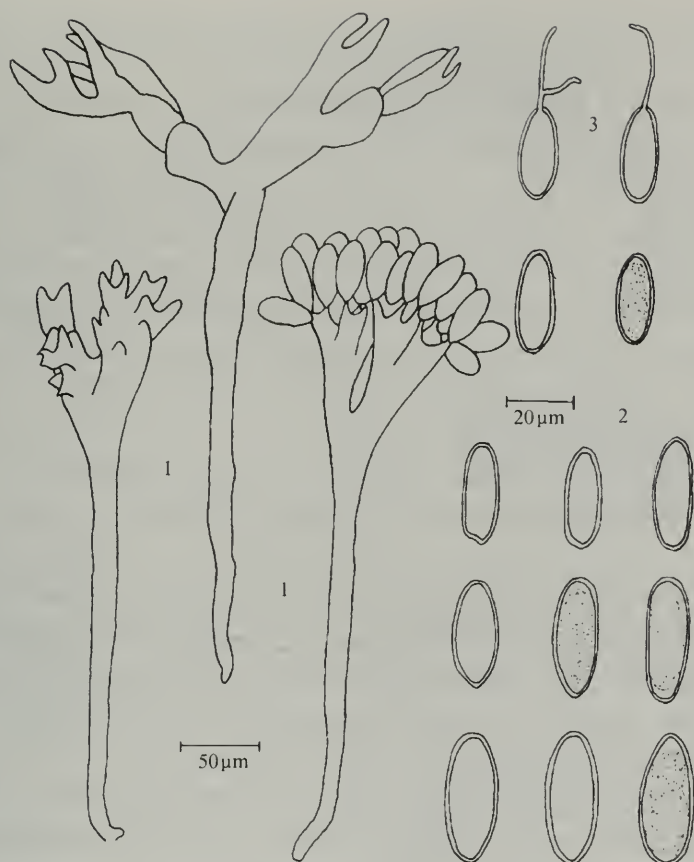


图 21-4 菲律宾指霜霉菌 *Peronosclerospora philippinensis* (Weston) Shaw

1. 孢子囊梗; 2. 孢子囊; 3. 藏卵器与卵孢子

夜间温度在 21~26℃ 和有自由水时有利于孢子囊的产生、萌发和侵染。孢子囊萌发最适温度为 19~20℃，以芽管从玉米叶片的气孔侵入，菌丝在叶肉细胞间扩展，经叶鞘进入嫩梢顶部，在其基部叶片上出现褪绿条纹，以后上部幼叶也出现条纹症状。病菌不侵染根部。以种子带菌和局部叶斑引起系统侵染。在叶片和叶鞘的褪绿斑上产生的孢囊梗和孢子囊，可借风和雨水飞溅传播引起再侵染。不同龄期的植株感病性有很大差异，一般 4 周龄以上的植株表现抗病。该病菌主要侵染玉米，也可侵染燕麦 *Avana sativa*、大乌草、大乌草×玉米杂交种、甘蔗、甜根子草、蜀黍属 *Sorghum* 的一些种，如二色高粱、约翰逊草和假高粱等 (Shurtleff, 1980; 张中义等, 1988)。

玉蜀黍指霜霉菌 *P. maydis*, 异名 *Sclerospora maydis* (Racib.) Butler; *S. javanica* Palm; *Peronospora maydis* Racib.。菌丝有两种，一种较直，偶有分枝；另一种具裂片，不规则分枝成簇。孢囊梗自气孔伸出，基部具基细胞，有一个隔膜，上部肥大，2~4 次二叉状分枝。孢囊梗长 266.6~305.9µm (平均 256.1µm)。小梗近圆锥形，弯曲，顶生一个孢子囊。孢子囊长椭圆形、近球形或长卵形，顶端稍圆，基部较尖，23~38µm×15~22µm (平均 32.3~17.2µm)(图 21-5)。未见卵孢子(张中义等, 1988; Shurtleff, 1980)。

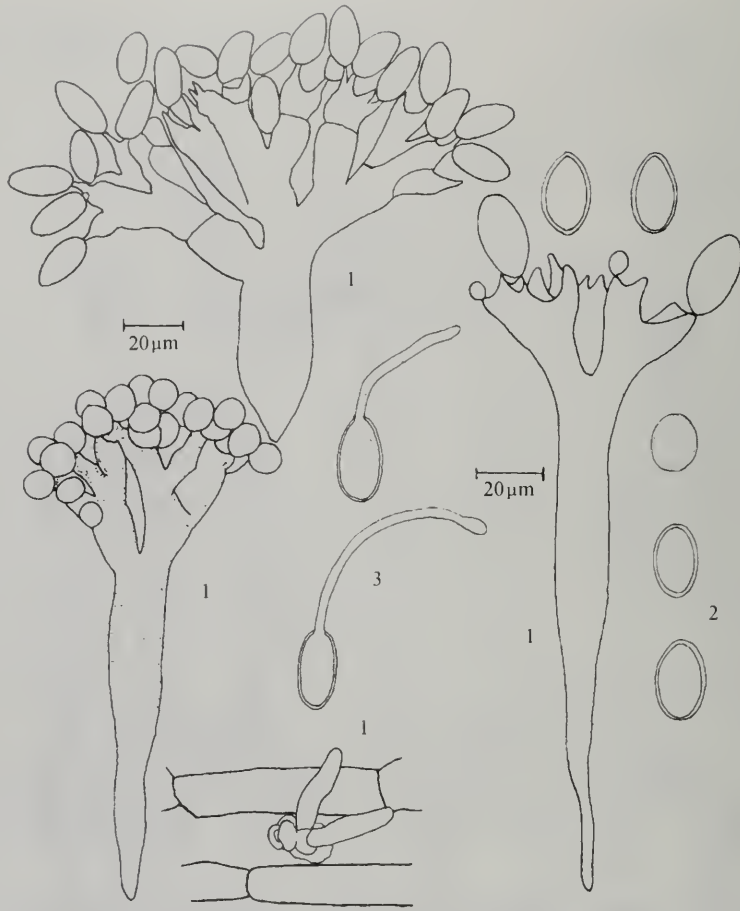


图 21-5 玉蜀黍指霜霉菌 *Peronosclerospora maydis* (Racib.) Shaw

1. 孢子囊梗; 2. 孢子囊; 3. 孢子囊萌发

在 24℃ 以下黑暗和有自由水条件下易形成孢子囊萌发产生芽管。病菌可以菌丝体在种子里越冬，成为次要的初侵染菌源，而生长在干旱季节里的发病玉米植株为主要的初侵染菌源。孢子囊从幼小植株的气孔侵入形成局部病斑，之后再向植株的分生组织扩展，引起系统侵染。如果初侵染菌源来自种子，则子叶常被侵染发病，而初侵染菌源来自卵孢子时，则子叶不易被侵染发病 (Shurtleff, 1980)。

大孢指疫霉玉蜀黍变种 *Sclerophthora macrospora* (Sacc.) Thirum., Shaw et Naras. var. *maydis* Liu et Zhang, 菌丝细胞间生，孢囊梗和游动孢子囊未见。藏卵器近球形至椭圆形，褐色，壁不等厚， $65\sim 95\mu\text{m} \times 63.8\sim 77.5\mu\text{m}$ (平均 $72.85\mu\text{m} \times 69.45\mu\text{m}$)。雄器 1~4 个，侧生，淡黄色， $4.5\sim 75\mu\text{m} \times 7.5\sim 10\mu\text{m}$ (平均 $56.3\mu\text{m} \times 9.4\mu\text{m}$)。卵孢子球形，光滑，黄褐色，直径 $51.3\sim 75\mu\text{m}$ (平均 $61.25\mu\text{m} \times 58.23\mu\text{m}$) (张中义等, 1990)。

过去文献记载侵染玉米引起指疫霉病的病原菌是大孢指疫霉菌 *Sclerophthora macrospora*。因该菌寄主范围很广，已超过 140 种禾本科植物，张中义等 (1990) 对我国发生于水稻、小麦和玉米上的大孢指疫霉菌，根据其病菌形态、症状及其致病性的不同，

区分为 3 个变种，即大孢指疫霉玉蜀黍变种 *S. macrospora* var. *maydis*、大孢指疫霉水稻变种 *S. macrospora* var. *oryzae*、大孢指疫霉小麦变种 *S. macrospora* var. *tritici*。玉蜀黍变种的卵孢子显著大于后两者变种，游动孢子囊以柠檬形为主，也是 3 个变种中形态最大的。水稻变种以椭圆形为主，形态是最小的；小麦变种以近球形居多，体积中等，容易区分。在自然条件下各变种不能交互侵染。

此外，玉米上尚报道有玉米指疫霉菌玉米变种 *Sclerophthora rayssiae* Kenneth, Kaltin et Wahl var. *zeae* Payak et Renfro，除侵染玉米外，尚能侵染马唐 *Digitaria sanguinalis* 等杂草 (Shurtleff, 1980)，引起严重的条纹霜霉病，美国等国将其列为检疫对象。甜根草指霜霉菌 *Peronosclerospora spontanea* (Weston) Shaw，异名 *Sclerospora spontanea* Weston，除侵染玉米外，尚侵染甘蔗、大刍草和五节芒 *Miscanthus floridulus*。芒指霜霉菌 *P. miscanthi* (Miyake) Shaw，异名 *Sclerospora miscanthi* Miyake 除侵染玉米外，尚能侵染五节芒和甘蔗。禾生指梗霉菌 *Sclerospora graminicola* (Sacc.) Schreot 除侵染玉米外，尚能侵染蜀黍属、狗尾草属、假蜀黍属、稗属、绒毛草属、黍属、狼尾草属、甘蔗属等禾本科植物 (Shurtleff, 1980)。

据王圆等(1994)报道，发生于我国广西的玉米霜霉菌，其游动孢子囊为长椭圆形，在 13~28℃产孢温度范围内，随温度升高游动孢子囊长度增加而宽度基本不变。以 4 种 *Peronosclerospora* 的 DNA 及广西和云南的病菌 DNA 与探针 pCLY83 杂交的 RFLP 图谱进一步证实，我国广西和云南玉米霜霉菌学名应是 *P. sacchari*。同时证实我国 *P. philippinensis* 是 *P. sacchari* 的同种异名。此外，在广西和云南的玉米霜霉病发生区，多年观察发现玉米发病严重，而毗邻的甘蔗却无一株发病。这与在菲律宾和印度的报道一致，而在台湾却能侵染玉米和甘蔗。王圆等认为，在 *P. sacchari* 种内，可分为甘蔗和玉米两个专业化型。Bonde(1984)采用同工酶分析上述两个菌，其结果也支持两菌为同一种的说法。

二、侵染循环

由种子携带的卵孢子或土壤中的卵孢子，以及邻近作物或杂草上的孢子囊引起田间作物的初侵染，初侵染病株上产生的孢子囊使病害在田间进一步扩展，而病株产生的卵孢子污染土壤与种子，引起以后生长季节的再侵染。卵孢子、孢子囊及交替寄主的相对重要性因病菌不同而异；对同一病菌而言，在寄主、土壤、气候条件不同的地区，其相对重要性亦有变化。如 *P. sorghi* 在印度南部通过卵孢子而存活，而在美洲，它侵染多年生的约翰逊草、假约翰逊草及一些野生高粱。病菌在这些寄主上周年存活，产生卵孢子与孢子囊，在早春成为玉米和高粱的初侵染源，并在生长季节中不断产生繁殖体，为再侵染提供大量菌源。*P. philippinensis* 侵染甜根子草、甘蔗、约翰逊草、拟高粱等杂草寄主，产生的孢子囊又成为玉米霜霉病的初侵染源。甘蔗是 *P. sacchari* 在流行病学上唯一有重要作用的寄主，在台湾成为玉米的初侵染源。国外报道玉米是 *P. maydis* 唯一的自然发病寄主，在印尼病菌以分生孢子从旱季玉米延续到雨季玉米上。国内报道发病的甜根子草为玉米提供初侵染来源。

第六节 生态学特性

一、卵孢子

只有 *P. sorghi* (高粱致病型) 在高粱上产生大量卵孢子 (每克病组织产生 15×10^4 个卵孢子)。卵孢子抗逆性强, 经家畜消化道后仍能存活。在土壤中存活一年后感染力增加。卵孢子在自然条件下保存 1~3 年, 对幼苗的感染力从 90% 降为 20%。卵孢子在土壤中受根系分泌物的刺激而萌发, 无论是抗病、感病的寄主植物, 甚至非寄主植物的根都可刺激其萌发。试验证明, 在以色列, 土温 24~29℃ 最适于卵孢子的萌发侵染, 20℃ 以下则不能侵染。而在美国, 早春土温达 10~13℃ 卵孢子即可萌发。在印度, 土壤有效含水量为 44%~47% 时利于卵孢子萌发, 而土壤有效含水量为 76%~79% 则抑制卵孢子萌发。

二、孢子囊

孢子囊的形成取决于光合产物的供应、温度和湿度。自然产孢一般发生在凌晨 2:00~4:00 时, 这使得对光照和干燥高度敏感的孢子囊在日出前能完成其萌发侵染过程。孢子囊的形成和萌发对温度要求不严格, 孢子囊形成要求的温度范围因菌种和地区不同而有差异, 一般以 20~25℃ 较为适宜。孢子囊萌发适宜的温度范围较宽, 甚至温度在 6.5℃ 时也可萌发, 但来自不同地区的病菌, 其萌发适温差异较大。同是 *P. sorghi* 高粱致病型分离物, 来自美国得克萨斯州的孢子囊萌发适温为 10~19℃, 在 19℃ 以上萌发很少; 而来自印度南部的萌发适温为 21~25℃, 说明病菌可能存在不同的生物型, 应进一步研究不同地区的更多分离物, 以了解在特定地理区域, 病菌对温度反应的变异范围。

较高的相对湿度, 特别是降雨和结露是影响该病发生的决定性环境因素。相对湿度在 85% 以上或夜间结露均有利于孢子形成, 如 *P. sorghi* 在 1cm^2 的高粱叶片上最多能产生 12 000 个孢子囊。寄主植物种植密度过大, 通风透光不良, 株间湿度高, 发病重; 反之发病轻。

该病发生轻重还与播种期有关, 广西龙津县群众反映, 当地的春玉米, 在惊蛰前播种的发病少, 如延至清明后播种则发病多; 秋玉米如立秋前播种发病少, 立秋后播种发病多, 这些现象主要与当地雨季有关。植株年龄与感病性关系密切, 一般随着龄期的增长, 感病性逐渐下降。该病发生轻重与玉米品种也有关系, 硬粒种和马齿种比较感病, 发病较重。

第七节 风险分析与早期预警系统

一、气候条件

玉米霜霉病为热带、亚热带地区重要病害。国外研究表明病菌产生分生孢子以 20~24℃ 最适, 要求游离水和 85% 以上的相对湿度。玉米、高粱出苗后一个月内对侵染敏感, 此期间温湿度适宜可能发病。因国外对卵孢子的研究很少, 仅以分生孢子进行发病条件的分析。

玉米霜霉病在各种植区发生的可能性: 长城以北春播区不发生; 黄淮平原特别是灌

溉夏播区可能零星发生；长江以南湿热地区发生可能性大，尤其是热带、亚热带地方适宜发病。

二、寄主条件

卢庆善(1989)研究了我国高粱、玉米对美国 *P. sorghi* 病菌的反应，结果 19 个高粱品种平均感病率为 98.7%，19 个高粱恢复系平均感病率为 96.3%，12 个玉米自交系全部为高感类型。这表明上述高粱、玉米品系中没有抗 *P. sorghi* 基因，所以此病一旦在我国发生，很容易扩展蔓延。

野生寄主：病菌在杂草上大量繁殖有利于病害蔓延。假高粱已随大宗进口粮食传入我国，在云南、贵州、四川、江苏、辽宁等省及北京、天津、上海等市的公路、铁路旁，面粉厂周围零星发生。而另一种对 *P. sorghi* 更敏感且感病期更长的苏丹草近年作为牧草引入，在湖南、西北等地试种。这些多年生高感病寄主在我国可能发病区的生存繁殖，为病菌周年存活提供了有利条件，有助于病害的发生扩展。*P. sacchari* 与 *P. philippinensis* 也可能发生。

此外，我国甘蔗栽培历史悠久，主要集中在热带、亚热带，在我国已发生及可能发生 *P. sorghi* 的地区，*P. sacchari* 与 *P. philippinensis* 也可能发生。江西南康和四川简阳曾有在甘蔗上发生 *P. sacchari* 的记录，而在台湾 *P. sacchari* 侵染甘蔗、玉米，曾两度暴发流行，损失巨大。因此，*P. sacchari* 与 *P. philippinensis* 对我国甘蔗、玉米生产也具有潜在威胁。

总之，从病害发生的三要素—环境、寄主和病原物分析，我国地域辽阔，存在发病的气候条件，又有感病寄主，病菌若传入则有可能存活繁衍，对这种潜在的威胁应引起足够的重视。

第八节 预防与控制

由于玉米霜霉病是热带、亚热带地区的毁灭性病害，美国早在 1916 年就对玉米霜霉病有了检疫规定，禁止从东方进口玉米。一些非洲国家、澳大利亚等国也先后制定了类似的检疫法规。我国在 1986 年和 1995 年均将指霜霉菌(*Peronosclerospora* spp.)引起的玉米霜霉病列为一类进口植物检疫对象。在我国，玉米指霜霉菌、甘蔗指霜霉菌和菲律宾指霜霉菌引起的玉米霜霉病均有报道(张中义等, 1985)。此外，由指疫霉菌引起的霜霉病(疯顶病)在新疆、宁夏和辽宁瓦房店已有发生，因此应采取以加强检疫为主的综合防治措施。

一、加强检疫

该病在东南亚地区，特别是印度、印度尼西亚、菲律宾、泰国、巴基斯坦、日本等邻邦国家已经广泛流行。我国广西、台湾和山东、宁夏、辽宁等省区也已有发生，必须严格执行检疫制度，禁止从东南亚国家进口玉米种子，国内要严格控制在疫区种子外流。生长季节注意田间调查，以便及时发现和采取根绝措施。

严格控制种子含水量是减少初侵染源，预防新区发病的重要措施。据 Mikoshiba(1979)

报道,在爪哇玉米种子含水量控制在18%以下时,则不发生霜霉病,而播种未经干燥的种子时发病严重,为此,印度尼西亚玉米种子法规定含水量不得超过13%。

为杜绝种苗传病,要对种苗传带的各种霜霉病菌卵孢子及菌丝失活情况进行准确测定。

二、利用和选育抗病品种

据报道,东南亚地区已经选育出17个抗霜霉病的玉米品种并应用于生产;印度在应用抗病品种方面也取得了显著成效;我国台湾省培育的台南8号杂交玉米高抗霜霉病。我国今后应加强抗病育种和遗传规律研究,做到防患于未然。

三、加强栽培管理

注意轮作倒茬、深耕灭残、适期播种、合理密植、科学施肥、及时除草等对该病都有一定控制作用。

四、药剂防治

用瑞毒霉35%拌种剂(阿普隆355D)按种子重量的0.3%拌种,或用其25%可湿性粉剂按种子重量的0.4%拌种都有较好的防效;用其25%可湿性粉剂800倍液,在发病初期喷药防治效果也较好。

第九节 应用与基础研究发展策略

综上所述,人们对玉米霜霉病菌及所致病害已有一定了解,但仍存在很多问题。为了控制玉米霜霉病在现有病区的危害,阻止其传入新区,尚需进行深入的研究,以澄清在分类与寄主范围方面的混乱,查明病害的地理分布与来源,搞清病菌生物学特性及病害流行条件,进行更有效的防治工作。

指霜霉属内种的描述,部分依据其无性世代的形态学和寄主范围,但在同一环境里比较这些专性寄生菌是很难的。迄今分类上使用的数据都是在不同自然条件下的观察结果,使得病原菌的分类鉴定存在很多疑问。这样,很难评价不同地方的研究与防治工作,也使植检工作混乱,不能准确鉴别新发现的霜霉病。为此,在1979年召开的禾谷类霜霉病国际会议上,与会者强调使用统一的标准程序与方法,检查每个种及致病型的许多分离物,测定寄主、环境对分生孢子形态的影响。除形态学的研究外,还要进行细胞学、血清学及电泳等研究,以澄清分类上的混乱,发展出一种对真菌分类学家与植物病理学家都有意义的分类方法。近年,Bonde等(1984)对几种玉米霜霉病菌进行同工酶分析,有助于区分种间差异,并阐明其系统发育的关系。从20世纪60年代至今,美国Texas A and M大学对高粱霜霉病病理学、流行病学、遗传学、分子生物学和遗传育种等方面进行深入研究;同时,也对玉米霜霉病其他种如*P. maydis*, *P. sacchari*, *P. philippinensis*等进行比较研究(See *et al.*, 1993; Frederiksen, 1998; Williams, 1984; Yao *et al.*, 1990, 1991, 1992; Frederiksen *et al.*, 1997)。

引起玉米霜霉病的4种有经济重要性的病菌在我国均有记载,但目前除在滇桂湿热

地区仍可见 *P. maydis* 的为害外, 对其他病菌的发生尚需进一步调查。我们从检疫角度出发, 重点进行病株种子的带菌检验与发病试验, 对能种传的病菌, 进一步研究种子处理措施, 并开展在我国的适生性分析。

附节 玉米霜霉病种子带菌检验方法

系统发病的玉米霜霉病病株的成熟种子内部含有菌丝, 采用下述方法可以确定是否被病菌感染。

一、检查种子组织中是否存在菌丝和卵孢子

①浸泡和染色。取样品种子 400 粒, 在室温下浸入 11.5% 氢氧化钠和 0.015% 棉蓝乳酚油溶液中 24h。②提取。浸泡后的种子在自来水中冲洗搅动, 然后用 5mm、4mm、3mm 分样筛分离种子各个部分, 胚收集在最底部的分样筛上, 胚乳部分溶解到碱液中而无法收集。另外, 用手分开各部分时要特别小心。③脱水。把胚乳和种皮放在直径为 9cm 的染色缸中, 分别用精馏酒精脱水 2min。④分离。经脱水后的胚转入带有胶皮管的漏斗中, 加入 20ml 的乳酸甘油混合液(乳酸:甘油:水=1:2:1), 胚乳浮在表层, 其他碎片沉在底部, 然后通过胶皮管把其他碎片放掉。这样反复洗涤 5~6 次, 直至把碎片洗掉为止, 再用刷子和镊子分离种皮。⑤透明。把胚和种皮分别转入装有乳酸甘油(乳酸:甘油=1:2)的 250ml 烧杯中, 加热煮沸后冷却。⑥检查。在实体显微镜下检查乳酸甘油混合液中的胚和种皮, 并在显微镜下检查卵孢子和菌丝, 卵孢子被染成蓝色, 菌丝通常无隔多核、粗壮、有分支。

二、洗涤检验卵孢子

为确定种子表面是否带有卵孢子, 取样品种子 100 粒, 浸入 5ml 蒸馏水中(加入 1 滴吐温), 振荡 10min 后将洗涤液离心 10min(25 000rpm), 然后弃上清液, 沉淀物用蒸馏水悬浮后, 显微镜下检查有无卵孢子。至少应检查 8~10 滴悬浮液。

上述方法发现感病种子后, 继而可以通过种植试验来确诊病害, 同时也可以用电泳和血清学、分子生物学等方法进行病原菌种类鉴定。

(黄丽丽 康振生)

主要参考文献

- 戴芳澜. 1979. 中国真菌总汇. 北京: 科学出版社 [Dai F L. 1979. Accumulation of Chinese Fungi. Beijing: Science Press]
- 李德福. 2001. 高粱霜霉病. 植物检疫, 15(2): 90~93 [Li D F. 2001. Downy mildew of sorghum. *Plant Quarantine*, 15(2): 90~93]
- 卢庆善. 1989. 中国高粱抗高粱霜霉病鉴定研究. 辽宁农业科学, (6): 17~21 [Lu Q S. 1989. Evaluation of Chinese sorghum for the resistance to downy mildew. *Liaoning Agricultural Sciences*, (6): 17~21]
- 罗占忠. 1997. 玉米疯顶病传播途径的试验及调查. 植物保护, (12): 10~11 [Luo Z Z. 1997. Tests and investigations of the dissemination way of *Sclerophthora macrospora* (Sacc.) Thirum. Shaw & Naras. *Plant Protection*, (12): 10~11]
- 潘崇仪, 吕理焱. 1982. 台湾甘蔗霜霉病的病害地理研究. 日本植物病理学会报, 48(2): 153~168 [Pan C Y, Lu L Y. 1982.

- Pathogeographic studies of sugarcane downy mildew in Taiwan I. Historical analysis, regional pathogeographic classification and some considerations of disease attributes of the epidemics. *Annals of the phytopathological society of Japan*, 48(2): 153~168
- 全国农业技术推广服务中心编著. 2001. 植物检疫性有害生物图鉴. 北京: 中国农业出版社. 38~42 [National center of agricultural technology extension in China. 2001. Handbook of Pests and Weeds in Plant Quarantine. Beijing: Chinese Agricultural Press. 38~42]
- 王圆, 吴品珊. 1994. 玉米霜霉病对我国农业生产的潜在威胁及检疫对策. 植物检疫, 8(3): 129~134 [Wang Y, Wu P S. 1994. Potential threat of maize downy mildew against the agricultural production of China and its quarantine policies. *Plant Quarantine*, 8(3): 129~134]
- 王圆, 吴品珊, 陈克, 徐文忠, 董文怡. 1995. 指疫霉属所引致的玉米霜霉病. 植物检疫, 9(5): 285~288 [Wang Y, Wu P S, Chen K, Xu W Z, Dong W Y. 1995. The genus *Sclerophthora* and the downy mildew of maize. *Plant Quarantine*, 9(5): 285~288]
- 王圆, 吴品珊, 姚成林. 1994. 广西、云南玉米霜霉病的种子检验与传病试验. 植物保护, 20(5): 18~20 [Wang Y, Wu P S, Yao C L. 1994. Maize seed inspection and infection test infected by maize downy mildew in Guangxi and Yunnan provinces. *Plant Protection*, 20(5): 18~20]
- 王圆, 吴品珊, 姚成林, 周淑媛, 杨桂珍. 1991. 我国玉米霜霉病分布的调查. 植物检疫, 5(5): 321~323 [Wang Y, Wu P S, Yao C L, Zhou S Y, Yang G Z. 1991. Investigation of distributing of the maize downy mildew in China. *Plant Quarantine*, 5(5): 321~323]
- 王圆, 姚成林, 吴品珊. 1988. 玉米霜霉病的发生与研究现状. 植物检疫, 2(3): 174~178 [Wang Y, Yao C L, Wu P S. 1988. Status of the occurrence and study of the maize downy mildew. *Plant Quarantine*, 2(3): 174~178]
- 张中义, 段永嘉, 王英祥, 刘云龙. 1985. 云南主要经济作物病害名录. 西农科技. 46(4): 34~41
- 张中义, 沈言章, 刘云龙, 王英祥. 1988. 中国指霜霉属 *Peronosclerospora* 分类研究. 云南农业大学学报, 3(1): 1~10 [Zhang Z Y, Shen Y Z, Liu Y L, Wang Y X. 1988. A taxonomic study on the genus *Peronosclerospora* of China. *Journal of YunNan Agricultural University*, 3(1): 1~10]
- 张中义, 刘云龙, 王英祥. 1990. 大孢指疫霉三个新变种的研究. 云南农业大学学报, 5(2): 79~85 [Zhang Z Y, Liu Y L, Wang Y X. 1990. Taxonomic studies on 3 new varieties of *Sclerospora macrospora*. *Journal of Yun Nan Agricultural University*, 5(2): 79~85]
- 张中义, 沈言章. 1998. 指霜霉属. 见: 余永年主编. 中国真菌志(第六卷)霜霉目. 北京: 科学出版社. 236~247 [Zhang Z Y, Shen Y Z. 1998. Genus *Peronosclerospora*. In: Yu Y N ed. *Flora Fungorum Sinicorum Vol. 6 Peronosporales*. Beijing: Science Press 236~247]
- 周凯南. 新疆自治区植保站. 1994. 新疆莎车、和田等县发生玉米霜霉病. 植物保护, 20(1): 51 [Zhou K N. Plant protection station in Xijing. 1994. Maize crazy top in Shache, Hetian, Xingjiang. *Plant Protection*, 20(1): 51]
- Bonde M R, Melching J S. 1979. Effects of dew-period temperature on sporulation, germination of conidia and systemic infection of maize by *Peronosclerospora saccharis*. *Phytopathology*, 69: 1084~1086
- Bonde M R, Peterson G L, Dowler W M, May B. 1984. Isozyme analysis to differentiate species of peronosclerospora causing downy mildews of maize. *Phytopathology*, 74(11): 1278~1283
- Frederiksen R A. 1998. Sorghum downy mildew in United States: overview and outlook. *Plant Disease*, 64(10): 903~908
- Frederiksen R A, Amador J, Jones B L, Reyes L. 1969. Distribution, symptoms and economic loss from downy mildew caused by *Sclerospora sorghi* in grain sorghum in Texas. *Plant Disease Report*. 53: 995~998
- Frederiksen R A, Renfro B L. 1977. Global status of maize downy mildew. *Annu. Rev. Phytopath.*, 15: 249~275
- Fu B, Tang W H, Wang C S, Wang W T. 1998. The primary diseases and integrated control of maize in Dalian. *Agronomy Abroad: Maize Sorghum Potato and Millet*, 18(6): 41~42
- Kenneth R G. 1975. Problems with graminicolous downy mildews in Israel to date. *Trop. Agr. Res. Ser. Tokyo*, 8: 35~38
- Kenneth R G. 1981. Downy mildews of graminaceous crops. In: Spencer D M ed. *The Downy Mildews*. London, New York: Academic Press
- Miyake I. 1912. Studies in Chinese fungi. *Bot. Mag. Tokyo.*, 26: 51~66
- Sec S B, Milgroom M G, Taylor J W. 1993. A rapid, high yield mini-prep method for isolation of total genomic DNA from fungi. *Sorghum RFLP Laboratory, Texas A & M University*
- Shaw C G. 1978. *Peronosclerospora* spp. and other downy mildew of the Gramineae. *Mycologia*, 70: 594~604
- Shurtleff M C. 1980. Compendium of Corn Diseases. The Amer. Phytopath. Soc., St. Paul, MN
- Williams R J. 1984. Downey mildews of tropical cereals. *Advance in Plant Pathology*, 1(2): 1~104
- Yao C L, Magill C W, Frederiksen R A. 1991. Detection and identification of *Peronosclerospom sacchari* in maize by DNA

hybridization. *Phytopathology*, 81(8): 901-905

Yao C L, Frederiksen R A, Magill C W. 1990. Seed transmission of sorghum downy mildew: detection by DNA hybridization. *Seed Sci. Tech.*, 18(2): 201-207

Yao C L, Frederiksen R A, Magill C W. 1992. Length heterogeneity in ITS2 and methylation status of CCGG and GCGC sites in the rRNA genes in the genus *Peronosclerospora*. *Current Genetics*, 22: 415-420

第二十二章 苜蓿黄萎病

第一节 起源与分布	476	第六节 生态学特征	481
第二节 识别特征与早期诊断	477	第七节 风险分析与早期预警系统	482
第三节 传入途径与入侵成因	478	第八节 预防、根除与控制	482
第四节 危害现状与生态经济影响的 评估	478	第九节 应用与基础研究发展策略	483
第五节 生物学特征	479	附 节 黄萎病检验方法	483

摘要 本文对苜蓿黄萎病在全世界的分布与起源、危害现状进行了概述；描述了病害识别与诊断特征，病菌形态、生物学特性及生态学特性；分析了该病害在我国的侵染途径及其潜在风险；并对病害检验和预防控制措施等方面提出了建议。

关键词 苜蓿 黑白轮枝孢真菌 症状 检疫

Chapter 22 *Verticillium* Wilt of Alfalfa *Verticillium albo-atrum* Reinke and Berthold

Abstract: The paper summarized the *Verticillium* wilt of alfalfa updatly on its distribution, loss of yield, symptoms, morphology and biology of causing pathogens, detection and inspection methods, transmission, disease cycle, diagnosis, phytosanitary risk, disease control and phytosanitary measures.

Key words: alfalfa, *Verticillium albo-atrum*, symptom, quarantine

第一节 起源与分布

由黑白轮枝孢 *Verticillium albo-atrum* Reinke and Berthold 引起的苜蓿黄萎病是苜蓿的一种毁灭性病害，该病最早于 1918 年发现于瑞典(Hedlund, 1923)，1938 年在德国的苜蓿和红豆草(驴喜豆)上发现该病，英国于 1950 年在苜蓿上发现，1957 年在英格兰及威尔士等苜蓿主要种植区暴发。1962 年报道在加拿大魁北克省罗曼蒂尔和大不列颠哥伦比亚省温哥华农业研究站实验地发现该病，由于扑灭及时，当时病原未能定殖。1976 年突然在美国华盛顿州哥伦比亚河流域发现大量苜蓿黄萎病病株(Graham *et al.*, 1977)，翌年加

拿大大不列颠哥伦比亚省也发现多处病田。此后该病在北美迅速蔓延，广泛发生。1980年该病被传入日本北海道。

该病害目前分布在日本、欧洲各国、加拿大(不列颠哥伦比亚、阿尔伯特、萨斯喀彻温、安大略、新斯科舍、爱德华王子岛、新布瑞斯威克等省)、美国(华盛顿、俄勒冈、爱达荷、蒙大拿、威斯康星、明尼苏达、宾夕法尼亚、纽约、怀俄明等州)(Army and Grau, 1985; Heale, 1985)、墨西哥、新西兰。

第二节 识别特征与早期诊断

病害发展早期，病株上部叶片在温度较高时表现暂时性萎蔫，继而中下部叶片失绿变黄。叶片由叶尖和叶缘开始变黄或略显紫色，常由叶尖向下形成V字形褪绿斑，植株上部叶片往往沿中脉向上对折，然后整个叶片逐渐黄化或呈紫红色，严重时叶片变枯白色，表现整株萎蔫症状(图 22-1)。病株叶片枯死后而茎常保持绿色。病害发展后期，植株因生育停滞而严重矮化。根部不产生外部症状，内部维管束组织变成淡褐色到暗褐色。在完全萎蔫的植株中，变色常可从小的侧根通过主根进入茎、叶柄和花梗。表现上述症状的根、茎、叶柄、花梗的横切面均可见维管束变褐(图 22-2)。

苜蓿黄萎病的主要鉴别特点有：①小叶顶端出现V型黄变坏死斑块，严重时病叶卷缩扭曲；②病株叶片枯萎但在较长时间内茎仍保持绿色；③在潮湿条件下枯死茎表面为病菌轮枝



图 22-1 苜蓿黄萎病在田间的症状
叶片逐渐黄化或呈紫红色，严重时叶片
变枯白色，表现整株萎蔫症状



图 22-2 比较病、健株茎的横切面，可见病株茎的横切面维管束变褐

状分生孢子梗覆盖，呈灰色。据上述特点可与细菌性枯萎病和镰刀菌枯萎病等类似病害区分。

第三节 传入途径与入侵成因

苜蓿黄萎病菌传播途径较多，种子带菌是黄萎病菌远距离传播、特别是传入无病地区的主要途径。病区种子普遍带菌，带菌方式除前人报道的种子表面带菌和混杂于种子中的病株残片外，美国和加拿大学者都证实种子内部带菌。据 Christen(1982a)测定，变色小种子内部带菌率高达 25%，大小正常的种子带菌率甚低，带菌部位为种皮外珠被的骨状石细胞。种子间夹杂的病株茎秆、花梗和荚的碎片均带菌。此外，病田收割的苜蓿干草和加工制成的脱水苜蓿粉也都带菌，干燥处理后病菌仍能存活，有可能进行中、远距离的传播。

苜蓿黄萎病是典型的土传病害，农业机械、工具和人畜携带病田土壤和病株残体是最有效的田块间传播途径。病原菌通过羊的消化道后仍能存活，因而饲喂病草后得到的畜粪也可传病。田间病株周围土壤带菌，邻近健株根系与病株根系或带菌土壤直接接触后可被病菌侵染使田间病株不断增多。

苜蓿黄萎病菌还可通过风、灌溉水和昆虫传播。田间上一季遗留的病株残茬和当季被侵染但已坏死的苜蓿叶片、叶柄和茎秆在温湿度条件适宜时都能产生分生孢子梗和分生孢子，由气流或灌溉水传播引起再侵染。Huang 等(1986)首先发现昆虫可传播分生孢子，豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum*、苜蓿象甲 *Hypeta postica*、切叶蜂 *Megachile rotundata* 以及其他多种昆虫都是有效的传病介体(Howard, 1985; Huang *et al.*, 1986)。试验发现约有 30% 的苜蓿切叶蜂在腹部表皮凹陷处、口器周围、体表其他部位可携带黄萎病菌的分生孢子或苜蓿花粉粒，因而在采蜜、切叶筑巢的同时传播病害(Huang *et al.*, 1986)。

苜蓿黄萎病菌在入侵过程中，首先由寄主根部的根尖组织侵入并迅速进入木质部和维管束组织，然后向上扩展到达侧枝、叶柄、花梗及种子等部位。病菌在导管中还可产生分生孢子，传输扩展到整个茎部，造成系统发病。Huang 和 Kokko(1985)证明，由根部人工接种的植株，种子带菌率为 0%~5%；而花期柱头接种时未检测到带菌种子，但病菌潜伏于成熟荚果上残留的花柱中；并且证明病菌还可侵入花粉粒，通过授粉过程传播和感染种子。在当季收割后的残茬上和病株已坏死的茎、叶上都能产生分生孢子，分生孢子经风、雨、流水和昆虫传播后进行再侵染。分生孢子落在没有伤口的叶片表面，不能引起系统侵染和发病。人工接种试验表明，叶片伤口接种，可以引起系统侵染，表现出典型症状。植株系统发病后，病原菌可由维管束进入荚和种皮，造成种子内部带菌。另外，苜蓿切叶蜂等授粉昆虫，可将病原菌分生孢子传给花器，病原菌入侵柱头和花柱顶部后在其中潜伏下来，当荚变黄时，才由残留花柱组织侵染荚和种皮，也可能造成种子内部带菌。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

黄萎病是苜蓿的一种毁灭性病害，播种当年多数植株就表现症状，第二年产草量减

低 15%~50%，第二年后期至第三年病株大批枯死，使草地失去利用价值。Amy 和 Grau (1985)报道，第三年苜蓿黄萎病感病品种的死亡率高达 58%~73%，抗病品种的死亡率为 38%~54%。

苜蓿黄萎病传入北美后，给美国和加拿大苜蓿产业带来了毁灭性破坏，并造成很大的经济损失(Amy and Grau, 1985; Heale, 1985)：一是导致严重的苜蓿产量损失。二是大大缩短了苜蓿草地的使用寿命。正常苜蓿草地建植后可以使用寿命 6~10 年以上，但感染黄萎病的苜蓿草地 3~5 年后即衰败而失去经济价值。三是因为检疫问题影响苜蓿干草及种子出口。

在美国西部地区：继华盛顿州之后，20 世纪 70 年代末俄勒冈州发现苜蓿黄萎病危害，发病面积超过 607hm²。与此同时，蒙大拿州至少发现 10 个县受到该病侵害，一些草场受害相当严重；中部地区：1980 年威斯康星州发现苜蓿黄萎病危害，1984 年即蔓延至 41 个县，1981 年怀俄明州发现该病，1987 年病害蔓延至 9 个县，重病区 65%的苜蓿地受到侵害；东部地区：20 世纪 80 年代初，俄亥俄州、纽约和宾夕法尼亚州相继发现苜蓿黄萎病侵害，其中俄亥俄州发病达 9 个县，纽约州发病达 21 个县，1987 年马里兰州也发现该病侵害；南部地区：1985 年首先在堪萨斯州北纬 40°以南的格雷县(Gray)和芬尼县(Finney)发现苜蓿黄萎病，尤其值得注意的是，以前认为苜蓿黄萎病只能在温度较低的地区发生，但 1985~1987 年，加州北纬 36°以下更温暖的地区也发现该病侵害。这一地区夏季气温可达 45℃，说明苜蓿黄萎病能随环境改变出现适应性变异，其危害性更强。

1977 年在加拿大西部地区大不列颠哥伦比亚省发现苜蓿黄萎病定殖后，1980 年开始进行系统的疫情普查和监测，结果在艾伯塔省南部最集中的苜蓿产区发现 10.1%的苜蓿地受到该病侵害，发病最重的是布鲁克斯和莱斯布里奇地区，以灌溉苜蓿地居多，发病率较高(25%左右)，且以生产苜蓿干草、青贮饲料和直接作牧场用的苜蓿田块为主，种子生产田发病较少。与此同时，在萨斯克彻温省奥特鲁克(Outlook)和邻近艾伯塔省的萨斯克彻温河沿岸灌溉区发现了苜蓿黄萎病株，经翻耕轮作后病害得到初步控制，但 1983 年后又在邻近艾伯塔省的里德县(Leader)北部灌溉区发现该病侵害；加拿大东部地区魁北克省 1986 年发现 10 个不同程度的发病区，大多分布在靠近美国纽约州的南部地区，种植年限越长发病越重，有些地区发病率高达 100%。1988 年新不伦瑞克省很多 3 年以上的苜蓿地受到苜蓿黄萎病危害，重病地块发病率达 50%以上(王春林等, 2003)。

第五节 生物学特征

苜蓿黄萎病菌学名为黑白轮枝孢 *Verticillium albo-atrum* Reinke and Berthold 苜蓿专化型，异名为 *V. albo-atrum* var. *coespitosum* Wollenweber; *V. albo-atrum* var. *coespitosum* f. *pallens* Wollenweber; *V. albo-atrum* var. *tuberosum* Rudoph.。属于半知菌亚门 Deuteromycotina，丝孢纲 Hyphomycetes，丝孢目 Hyphomycetales，淡色孢科 Moniliaceae，轮枝孢属 *Verticillium*。

苜蓿黄萎病菌在 PDA(马铃薯葡萄糖琼脂培养基)和 MA(麦芽浸汁琼脂培养基)平板上，菌落白色至浅灰色绒毛状，后因形成黑色休眠菌丝，菌落中部变黑褐色(图 22-3)。

在 PDA 培养基平板上产生大量气生菌丝, 1 周后菌丝体变为乳白色, 2~3 周后转为褐色, 并有少量黑色休眠菌丝产生。分生孢子梗直立, 有隔, 无色至淡色, 但在植物基质上产生的分生孢子梗基部膨大, 呈暗色(图 22-4)。梗的每节轮生 2~4 个小梗, 可有 1~3 轮。小梗 20~30(~50) μm \times 1.4~3.2 μm , 分枝末端及主枝顶端为瓶状产孢细胞, 产孢细胞下不膨大, 向上渐细。有时小梗发生二次分枝。其端部(产孢瓶体)可连续产生分生孢子, 聚集成无色或淡色易散的头状孢子球。分生孢子椭圆形、圆筒形, 无色单胞, 但少数孢子有 1 隔膜, 大小为 3.5~10.5(~12.5) μm \times 2~4 μm 。休眠结构为暗褐色至黑色厚壁的休眠菌丝(图 22-5), 直径 3~7 μm , 分隔规则, 隔膜间膨大, 呈念珠状, 有时集集成菌丝结或瘤状菌丝体, 不产生厚垣孢子和微菌核。



图 22-3 苜蓿黄萎病菌 *Verticillium albo-atrum* 在 PDA (马铃薯葡萄糖琼脂培养基) 平板上, 菌落白色至浅灰色绒毛状, 后期菌落变黑褐色

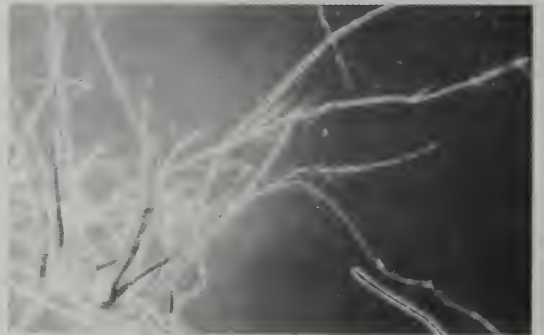


图 22-4 苜蓿黄萎病菌菌丝及分生孢子梗

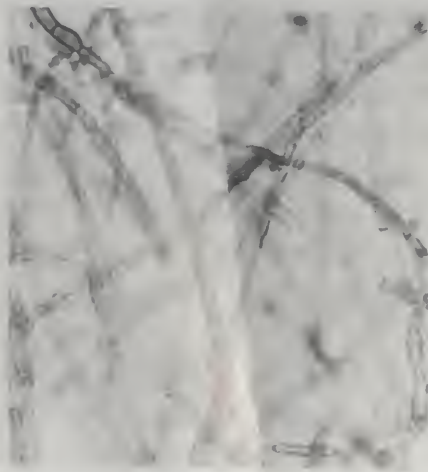


图 22-5 苜蓿黄萎病菌形成的休眠菌丝

黑白轮枝孢在琼脂培养基平板上的生长适温为 22.5 $^{\circ}\text{C}$, 在 30 $^{\circ}\text{C}$ 时不能生长。但是, 苜蓿分离菌系的生长适温较高, 为 25 $^{\circ}\text{C}$, 在 20~25 $^{\circ}\text{C}$ 范围内生长良好, 在 15 $^{\circ}\text{C}$ 和 27 $^{\circ}\text{C}$ 生长较差, 在 5 $^{\circ}\text{C}$ 和 33 $^{\circ}\text{C}$ 时停止生长。在 PLYA(梅干煎汁酵母琼脂培养基) 平板上培养(Talboys, 1960), 温度为 20~27 $^{\circ}\text{C}$, 培养 20d 后生成暗色菌丝体, 培养温度为 10 $^{\circ}\text{C}$ 或 15 $^{\circ}\text{C}$ 时, 延迟数周后方能形成。

此外, 大丽轮枝孢 *V. dahliae* Klebahn 也可侵染苜蓿, 但只引起轻微症状。大丽轮枝孢产生特殊的休眠结构——微菌核。微菌核由单根和数根菌丝芽殖形成, 近圆形至长形, 15~50(~100) μm 。

黑白轮枝孢广泛分布于我国, 危害棉花、茄子、红豆草等的大丽轮枝孢、变黑轮枝孢的主要区别见表(表 22-1)。

表 22-1 黑白轮枝孢与大丽轮枝孢、变黑轮枝孢的主要特征比较

特征	黑白轮枝孢	大丽轮枝孢	变黑轮枝孢
休眠结构	暗色菌丝	黑褐色较致密的微菌核	暗色厚垣孢子
分生孢子梗	较粗壮,基部可暗色膨大	较短,无色	短而纤细,无色
30℃下生长情况	不能生长	生长良好	生长良好

可用常规组织分离方法由病株分离病原菌,即由病部切取小块组织,表面消毒后置于 PDA 或 MA 培养基平板上,在 20~25℃ 下培养 2~3 周。若在菌落中央产生暗色休眠菌丝体则为黑白轮枝孢,而大丽轮枝孢则生成黑色微菌核。

分离和鉴定轮枝孢属真菌还常采用 PLYA 培养基。黑白轮枝孢用该培养基在 25℃ 培养 15d 左右,可由培养皿背面清晰观察到暗色休眠菌丝形成的辐射状结构,而大丽轮枝孢则生成多数微菌核,呈小瘤状和颗粒状。

从传播病害的介体昆虫分离病菌时,不宜进行表面消毒,并可采用 Christen(1982b)的选择性培养基分离,该培养基由牛胆汁(oxgall)0.5g、乙二胺四乙酸二钠(Fe-Na-EDTA)0.01g、山梨糖(L-sorbose)2.0g、硫酸镁(MgSO₄·7H₂O)0.5g、天门冬素(L-asparagine)2.0g、磷酸氢二钾(K₂HPO₄)1g、氯化钾(KCl)0.5g、琼脂 18g、四硼酸钠(NaB₄O₇·10H₂O)1.0g、链霉素(streptomycin sulphate)0.3g、五氯硝基苯(pentachloronitrobenzene 75% a.i.)0.5g 和蒸馏水 1000ml 组成,灭菌前用 10%磷酸将 pH 调至 5.3~5.4,灭菌后当培养基温度降至 50℃ 左右时,再按次序加入四硼酸钠、链霉素和五氯硝基苯,此时培养基的 pH 升至 5.7~5.8,达到使用要求。该培养基有利于苜蓿黄萎病菌的生长,并可抑制杂菌生长,发现疑似菌落后及时转移到 PLYA 或 PDA 培养基上扩大培养(黄习军,1994)。

第六节 生态学特征

黑白轮枝孢的寄主植物多达几百种,但苜蓿分离菌株寄主范围相对狭窄,主要侵染苜蓿 *Medicago sativa*,具有较强的寄主专化性(Isaac and Lloyd, 1959; Heale and Isaac, 1963)。已发现黑白轮枝孢苜蓿分离菌株还能侵染马铃薯 *Solanum tuberosum*、蚕豆 *Vicia faba*、草莓 *Fragaria ananassa*、冠状岩黄芪 *Hedysarum cononarum*,表现轻重不同的症状,并对红花菜豆 *Phaseolus multiflorus* 的生长有明显的不良影响。羽扇豆 *Lupinus luteus*、豌豆 *Pisum sativum*、红三叶草 *Trifolium pretense*、大豆 *Glycine max*、驴喜豆(红豆草 *Onobrychis viciifolia*)、白三叶草 *Trifolium repens*、草木樨 *Melilotus suaveolens*、罗马甜瓜 *Cucumis melo var. cantalupensis*、茄子 *Solanum melongena*、啤酒花 *Humulus lupulus*、西瓜 *Citrullus vulgaris* 等植物带菌但不表现症状(Yorston, 1982)。但 Busch 和 Smith(1982)人工接种苜蓿菌系,结果表明大豆 *Glycine max*、花生 *Arachis hypogaea* 和茄子等都表现严重症状。

· 种植感病品种、土壤带菌量大、田间郁蔽、灌溉增多、田间积水、天气凉爽多湿等因素都有利于苜蓿黄萎病严重发生。

第七节 风险分析与早期预警系统

苜蓿是全世界最重要的豆科牧草,我国的种植面积目前居世界第六位,居我国各种牧草之首,达 $1.33 \times 10^6 \text{hm}^2$ 。近年来,我国从美国、加拿大等国引种苜蓿种子量呈逐年增加的趋势。由于苜蓿种子及混杂于其中的植物残体是苜蓿黄萎病传播的重要载体,来自加拿大、美国等黄萎病发生区的苜蓿种子传带苜蓿黄萎病的风险很大。

我国苜蓿主要种植区(西北、东北、华北等)绝大部分地处北纬 30° 以上,恰好与美国、加拿大苜蓿黄萎病的发生分布区域相吻合,因而完全适合于苜蓿黄萎病的发生和危害。而病原菌本身的变异和适应潜力更加剧了传入和发生的风险。苜蓿黄萎病在美国定殖于南加州高温地区即是一个例证,它打破了该病主要分布于北纬 40° 以北的欧洲、北美洲和南半球南部新西兰等冷凉地区的分布界线,反映出病原菌受高温的限制是相对可变异的,其在我国发生危害的地理区域可能会更为广泛。

另外,据国家质检总局报道,2002年上半年,新疆检验检疫局从来自加拿大的苜蓿种子中检出苜蓿黄萎病,由于尚无有效处理办法,已进行退货处理。因此,国家质检总局于当年9月发布了关于苜蓿黄萎病的风险警示通报,这说明我国已充分认识到该病害的危险性和危害性,也说明了加强对该病害检疫的必要性。

我国当前苜蓿生产主栽品种多为感病品种,一旦苜蓿黄萎病蔓延开来,对苜蓿生产将造成毁灭性破坏。1999年加拿大农业部莱斯布里奇研究中心与中国农业科学院草原研究所专家共同测定了我国26个主要苜蓿品种对北美苜蓿黄萎病的抗病性,结果证明其中25个均为感病品种,而且目前国内对苜蓿黄萎病的研究薄弱,抗病育种方面几乎为空白,因此,迫切需要对其早期预警系统进行研究。

第八节 预防、根除与控制

黄萎病是难以防治的病害,现尚缺乏有效的化学防治方法,为避免因该病传入、传播、蔓延造成的巨大经济损失,我国应采取以下检疫性对策。

一、严格执行有关检疫规定,从无病区引种

因该病属我国公布的《中华人民共和国进境植物检疫危险性病、虫杂草名录》中规定的一类危险性病害,所以,应严格限制引进来自疫区的苜蓿种子,限制输入来自疫区的苜蓿饲草和草制品。

二、建立非疫产地与非疫生产点

如因国内生产需要,确需从美国等苜蓿黄萎病发生区引种时,应要求国外供种方建立非疫产地和非疫生产点,选择无苜蓿黄萎病的地块生产种子,并附有输出国检疫部门出具的产地检疫证明。由发病地区引进苜蓿切叶蜂(巢)时,应严格限制引进数量,并经入境口岸检查,发现带菌者,指定使用地点,进行检疫监督,防止传入病原菌。

欧、美国家曾长期应用福美双拌种,防止商品种子传播黄萎病菌,福美双处理只对

种子表面传带的病原菌有效，不能防止种子内部带菌传病，现在尚缺乏有效的种子消毒方法。

三、抗病育种

欧洲品种多抗黄萎病，但不抗细菌性枯萎病，美国品种抵抗后者，但仅有少数耐黄萎病，我们应选育和使用兼抗两种病害的品种。

四、农业防病措施

在无病地区或无病田块选留种子。清扫田间病株残茬和病残体，减少菌源。农业器械在病田作业后及时清洁消毒。合理施肥灌水，避免病田花期灌溉，降低田间湿度。无病地区发现病株后，立即拔除烧毁，挖走病株附近土壤深埋处理。

五、彻底铲除新发生区的首蓆黄萎病病原

田间发现首蓆黄萎病株后，及时进行深翻耕，并采取与非寄主作物如小麦、大麦、玉米和禾本科牧草等轮作 3~5 年的方法，使病原菌不能定殖。或立即焚烧所有植株，并用溴甲烷和氯化苦对病田土壤进行两次熏蒸，可铲除病害。

第九节 应用与基础研究发展策略

广泛开展首蓆黄萎病发病机理和控制方法研究，进行首蓆黄萎病的研究与相关技术推广工作，研究内容应包括病原菌传播方式，如种传、土传、虫媒传等的机理和概率，病原菌在土壤、首蓆干草、牲畜粪便中的存活期限及越冬机理等基础研究；抗病育种、种子药剂处理等防治技术开发，为有效控制该病打下坚实的科学基础。

附节 黄萎病检验方法

首蓆种子表面和种子内部都可能传带黄萎病菌。大部分带菌种子是外部带菌，主要是在田间和加工过程中污染造成的，但也确有少数种子在生长期被侵染造成种皮内部带菌。另外，混杂在种子间的病株残体也是重要传病介体。对于原产地不详，原产地发病情况不明或认为有可能带菌的商品种子，应实行种子带菌检验。

一、种子带菌检验

现有的首蓆黄萎病种子带菌检验方法，主要是为了研究其种传性质和种传规律而设计的，检验种子表面带菌可将种子样品放入定时灭菌水内，震荡洗涤 15min 后，取定量洗涤液(或稀释的洗涤液)滴在培养皿内 Czapek 琼脂培养基平板表面并充分展开，在 22℃ 下培养 7d 后选取菌落，挑取分生孢子在 PDA 或 PLYA 培养基平板上划线，菌落长成后根据病菌形态鉴定。为防止细菌污染，所用培养基中均可加入抗菌素(100 ppm 硫酸链霉素，50 ppm 四环素)。

检验种子内部带菌，需先用有效氯 2% 的次氯酸钠液或其他表面消毒剂进行。种子

表面消毒后用无菌水充分洗涤,置于 PLYA 培养基或 Cristen 选择性培养基平板上,保持 22℃,培养 14d 左右,根据菌落特点和分离菌形态,检出带菌种子。检查时由培养皿底部观察,带菌种子周围的菌落有暗色休眠菌丝体形成的辐射状结构。必要时可挑取病原菌镜检鉴定。

商鸿生(1990)提出种传轮枝孢的“两步检验法”适用于大量苜蓿种子的检验。该法首先用 2, 4-D 吸水纸检验,排除大量不带菌种子样品,剩余少数可疑带菌种子用 PLYA 培养基作进一步鉴定。2, 4-D 吸水纸培养检验的具体方法是将吸水纸(滤纸)在 0.2% 2, 4-D 钠盐溶液中浸透,铺于直径 9cm 的塑料培养皿底部,每皿铺 3 层吸水纸做成培养床。苜蓿种子不经表面消毒直接置床,每皿等距植入 25 粒种子。植床后,将培养皿置 20~25℃ 条件下培养,每昼夜用黑光灯(或日光灯)照明 12 h。7~10 d 后取出培养皿,用实体显微镜(25~50 倍)观察种子上的菌落,检出可能带有轮枝孢的种子。主要鉴别特征是分生孢子梗和分生孢子的形状色泽及着生特点。由于菌体微小,在实体显微镜下易与类似真菌混淆,其中常见的有枝顶孢菌 *Acremonium link* = *Cephalosporium corda* 和串珠镰刀菌 *Fusarium moniliforme* Sheldon。

种子上枝顶孢的菌落白色,分生孢子梗简单、直立、无色,在菌丝上互生或对生,产孢瓶体细长,分生孢子无色,单孢椭圆形或短棒状,常在产孢瓶体顶端集成黏质孢子球。在实体显微镜下可见枝顶孢的孢子梗着生夹角较大,近直角,孢子梗互生或对生,彼此距离较大,而轮枝孢小梗着生的夹角较小,小梗轮生,彼此靠近,据此可将两者区分开来。

串珠镰刀菌(含变种)产生小分生孢子的瓶状小梗在菌丝上侧生,在其前端分生孢子亦可聚成孢子球。但仔细观察可见其小梗不轮生,孢子头不在小梗顶端前右,而偏在一侧。

另外,种子上轮枝孢的菌落近于无色至白色,较清淡,而枝顶孢和串珠镰刀菌菌落呈浊重的乳白色。串珠镰刀菌菌落有时呈粉红色,有粉质感。

梅干煎汁培养基(PLYA)检验:由吸水纸培养检验可检出具轮枝结构的带菌种子,只有这些种子才可能带有黑白轮枝孢,从而排除大多数不带黄萎病菌的种子样品。为确定检出的轮枝状结构是否为黄萎病菌,需由可疑种子的菌落中挑取分生孢子梗和分生孢子转移至 PLYA(梅干煎汁酵母琼脂培养基(Talboys, 1960),梅干煎汁 100ml,乳糖 5g,酵母浸膏 1g,琼脂 30g,蒸馏水 900ml)。制取梅干煎汁需将 50g 梅干切成小片,在 100ml 水中煮沸 30min,梅干渣滓榨出汁液后弃去,煎汁调节 pH 至 5.8~6.0 备用,按前述方法培养,检查有无暗色休眠菌丝。苜蓿种子可被多种轮枝孢菌污染,它们在吸水纸培养检验中都能产生轮枝状分生孢子梗,但在 PLYA 培养基上不产生暗色休眠菌丝,而产生其他休眠结构,易与黑白轮枝孢区分,例如 *V. nigrescens* 产生厚垣孢子;*V. nubilum* 产生厚垣孢子,*V. tricorpus* 产生微菌核和厚垣孢子,*V. dahliae* 产生微菌核等。另外,苜蓿种子还可能带有粉红黏帚霉 *Gliocladium roseum* Bainier,这是一种腐生菌,也可产生轮枝状分生孢子梗和分生孢子头。虽然在吸水纸培养中难以区分,但根据 PLYA 培养基上的菌落形态很好鉴别。

苜蓿种子可能被其他寄主来源的黑白轮枝孢菌系所污染,这些菌系不一定对苜蓿有较强的致病力,因而在检疫检验中有时尚需做接种鉴定。最常用的接种方法是浸根法。

该法由培养两周的病菌培养基上刮下分生孢子配制孢子悬浮液。取在无病条件下栽培的4周龄苜蓿幼苗,清洗掉根部土壤后在孢子悬浮液中浸根45min,然后栽入花盆中。在22℃和充足光照下,2周后开始表现症状,3周后即可鉴定。

二、病株带菌检验

鉴定大量标本时最好采用湿皿培养法(McKeen and Thorpe, 1971)。该法简单、经济而实用,可避免使用上述琼脂培养基常遇到的杂菌污染问题。该法是在直径9cm的玻璃培养皿底部铺2~3层吸水纸(滤纸)作成培养床,高压灭菌后备用。使用前每皿滴加30ml无菌水,浸湿吸水纸。取新鲜病株茎或叶柄切成1cm长的小段,用自来水冲洗掉表面的泥土杂物后,用含2%~3%有效氯的次氯酸钠液表面消毒1~2min,无菌水冲洗3次后,用灭菌解剖刀横切成厚度1~4mm的小片,并放置在湿皿内滤纸上,每皿5~10片,湿皿封闭在塑料袋中培养。黄萎病菌的菌丝可由病组织蔓延到吸水纸上并形成分生孢子梗、分生孢子和休眠结构。用实体显微镜观察可清晰地看到分生孢子梗的暗色基部。另外,在吸水纸与皿底玻璃之间可形成轮枝孢的休眠结构,因无气生菌丝和分生孢子梗的干扰更便于观察。

三、带茧蜂体及蜂巢的带菌检验

首先用灭菌刀剪将带茧蜂体和巢叶包被分离,然后分别经0.3%的链霉素预处理(可抑制细菌的污染和刺激病原休眠菌丝的萌发)之后,移至Christen培养基上培养(Christen, 1982b)。

四、带茧蜂体与蜂巢混合组织及浸液的带菌检验

如果检疫量大,可取100~200头内含带茧蜂体的蜂巢为一个检疫小样,每小样加入适量(50~100ml)灭菌水,用菌质搅拌器充分粉碎、混合均匀,再加入0.3%的链霉素静止预处理一昼夜。而后将带茧蜂体与蜂巢混合组织的碎片移到Christen培养基上。另外用移液管吸取上述混合组织的浸液至Christen培养基表面,每皿吸入约0.2ml即用灭菌弯头玻棒均匀涂布。置于22~23℃培养,10d后挑取菌落镜检鉴定。

(黄丽丽 康振生)

主要参考文献

- 黄习军. 1994. 苜蓿黄萎病传播媒介的检疫. 植物检疫, 1(8): 51~52 [Huang X J. 1994. The quarantine of alfalfa *Verticillium* wilt pathogen in insect vector. *Plant quarantine*, 1(8): 51~52]
- 王春林, 吴立峰, 王雪薇, 金佩玲. 2003. 加拿大、美国苜蓿黄萎病发生控制情况及我国对策. 植物检疫, 17(1): 57~59 [Wang C L, Wu L F, Wang X W, Jin P L. 2003. Occurrence and control of *Verticillium* wilt of alfalfa in America and Canada and countermeasures of China. *Plant quarantine*, 17(1): 57~59]
- Arny D C, Grau C R. 1985. Importance of *Verticillium* wilt of alfalfa in North America. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 7(2): 187~190
- Busch L V, Smith E A. 1982. Reaction of a number of cultivated plants and weed species to an alfalfa isolate of *Verticillium albo-atrum*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 4: 266~268

- Christen A A. 1982a. Demonstration of *Verticillium albo-atrum* within alfalfa seed. *Phytopathology*, 72: 412~414
- Christen A A. 1982b. A selective medium for isolating *Verticillium albo-atrum* from soil. *Phytopathology*, 72: 47~49
- Graham J H, Peaden R N, Evans D W. 1977. *Verticillium* wilt of alfalfa found in the United States. *Plant Disease Report*. 61: 337~340
- Heale J B. 1985. *Verticillium* wilt of alfalfa, background and current research. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 7(2): 191~198
- Heale J B, Isaac I. 1963. Wilt of lucerne caused by species of *Verticillium*. IV. Pathogenicity of *V. albo-atrum* and *V. dahliae* to lucerne and other crops; spread and survival of *V. albo-atrum* in soil and in weeds; effects upon lucerne production. *Ann. Appl. Biol.*, 52: 439~451
- Hedlund T. 1923. Om Nagra Sjukdomar och skador pa vara lantbruksvaxter 1922. Sver. *Allmanna Jordbruksridskrift* 5:167~168. (Cited by Lundin P and Jonsson AA. 1975. *Agric. Hortique Genetica*, 33: 17~32
- Howard R J. 1985. Local and long distance spread of *Verticillium* species causing wilt of alfalfa. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 7(2): 199~202
- Huang H C, Kokko E G. 1985. Infection of alfalfa pollen by *Verticillium albo-atrum*. *Phytopathology*, 75: 859~865
- Huang H C, Richards K W, Kokko E G. 1986. Role of the leafcutter bee in dissemination of *Verticillium albo-atrum* in alfalfa. *Phytopathology*, 76: 75~80
- Isaac I, Lloyd A T E. 1959. Wilt of Lucerne caused by species of *Verticillium*. II. Seasonal cycle of disease; range of pathogenicity; host parasite relations; effects of seed dressings. *Ann. Appl. Biol.*, 47: 673~684
- McKeen C D, Thorpe H J. 1971. An adaption of a moist-chamber method for isolating and identifying *Verticillium*. *Canadian Journal of Microbiology*, 17: 1139~1141
- Talboys P W. 1960. A culture medium aiding the identification of *Verticillium albo-atrum* and *V. dahliae*. *Plant Pathol.*, 9: 57~58

第二十三章 小麦印度腥黑穗病

第一节 起源与分布	488	第六节 病害发生特点和流行规律	492
第二节 识别特征与早期诊断	488	第七节 风险分析与早期预警系统	493
第三节 传入途径与入侵成因	489	第八节 预防、根除与控制	495
第四节 危害现状及生态经济影响的 评估	489	第九节 应用与基础研究发展策略	497
第五节 病原菌形态学及生物学特性	490	附 节 小麦印度腥黑穗病常规研究 技术	497

摘要 小麦印度腥黑穗病(KB)起源于印度,目前主要分布在印度、巴基斯坦、伊朗、伊拉克、尼泊尔、阿富汗、巴西、墨西哥、美国和南非等 10 个国家,我国目前尚未发生。病菌在花期侵染小麦,受侵染植株穗子缩短,小穗数减少,颖片张开,病粒外露,发出一种类似于由三甲胺引起的鱼腥味。病害流行年份可减产小麦 20%左右。病菌冬孢子可在土中存活 27~45 个月,并通过种子、病土和气流传播。本文就小麦印度腥黑粉菌的形态学、生物学和生理学特点、病害诊断识别方法、侵染特点、流行规律以及预防和控制措施等方面进行了系统的综述。介绍了近年来国际上对小麦印度腥黑粉菌的检验检疫技术特别是分子检测技术方面的最新研究进展,收录了有关小麦印度腥黑穗病的常规研究技术,展望了进一步加强病害应用研究和基础研究的发展策略和前景。

关键词 小麦 印度腥黑穗病 印度腥黑粉菌 病原生物学 检测技术 侵染特点 控制策略

Chapter 23 Karnal Bunt of Wheat *Tilletia indica* Mitra

Abstract: Karnal bunt (KB) of wheat caused by *Tilletia indica* Mitra was first reported in 1931 in India and is known to occur in India, Pakistan, Iran, Iraq, Nepal, Afghanistan, Braizil, Mexico, United States and South African. It has not been found in the wheat growing areas in China up till now. Usually inoculum of the pathogen infects wheat during anthesis. The spikes of infected plants generally are reduced in length and in number of spikelets, and the glumes may be flared to expose bunted kernels, which reek of an odor similar to rotten fish caused by trimethylamine. It may cause wheat yield losses of 20% in the disease epidemic years. Teliospores of the pathogen can be viable in field soil for 27~45 months and can be spread by seedborne, soilborne and windborne. In this paper morphological, biological and physiological

characteristics of Karnal bunt fungi, techniques for disease diagnosis, and occurrence, epidemics and control measures of the disease etc were systematically reviewed. Conventional techniques for the studies of wheat karnal bunt were collected. And recent advances in the inspection and quarantine methods of pathogen fungi with the emphases on the development of molecular detection assays in the world were introduced. The strategies and prospects for the basic and applied studies on wheat karnal bunt were also put forward.

Key words: wheat, karnal bunt (KB), *Tilletia indica* Mitra, biology of pathogen, molecular detection, infection characteristics, control strategies

第一节 起源与分布

小麦印度腥黑穗病(Karnal bunt of wheat, KB), 由 *Tilletia indica* Mitra[异名 *Neovossia indica* (Mitra) Mundkur]引起, 亦称部分腥黑穗病(partial bunt)。1930年在印度西北部卡纳尔(Karnal)植物实验站首次发现(Mitra, 1931), 此后许多年只在印度及巴基斯坦的平原地区发生危害。1974年后, 印度北部许多地区均发现有这种病害。目前, 该病害主要分布在印度、巴基斯坦、伊朗、伊拉克、尼泊尔、阿富汗、巴西、墨西哥、美国和南非等地(易建平等, 2002a)。

第二节 识别特征与早期诊断

印度腥黑粉菌在花期侵染小麦, 这与其他小麦腥黑穗病有所不同。受侵染植株的穗子通常缩短, 小穗数减少, 颖片张开, 病粒外露, 发出一种类似于由三甲胺引起的鱼腥味。受侵染麦粒黑粉化, 形成菌瘿。通常一个植株上仅部分穗子被侵染, 形成局部性病瘿, 分布无一定规律。此外, 受感染的籽粒从部分感染至整粒病瘿不等。但通常都是局



图 23-1 小麦印度腥黑穗病病穗和病粒(Fuentes-Davila, 1996)

左: 病穗 右: 病粒和健粒

部性的，整粒被感染的情况很少。感病轻微时，在籽粒接近胚部呈现黑点，其外观类似小麦根腐病所形成的黑斑，病菌一般不侵染种胚，而多沿着腹沟在果皮皮下形成黑粉。有时轻微感染后，腹沟症状不明显，但在籽粒表面形成孢斑，此时感染仅在表层，种子仍可发芽，感染严重时，病粒大部或全部形成黑粉腔(图 23-1)，外表有菌体化表皮包被，种子不发芽或虽发芽但形成畸形、扭曲的弱苗(Fuentes-Davila, 1996)。

第三节 传入途径与入侵成因

一、种子传病

病粒及附着在健康种子上的冬孢子是病害远距离传播的主要途径，由于病原体局部感染的特性，在收获期间混杂于健康种子中的病粒，很难被有效地清除，因而病粒可随同商业性或科研性引种，甚至贸易性进出口粮食而远距离传播。

二、病土传病

由于病原体的特殊侵染方式，迄今尚未发现病原体可以侵染幼苗。在小麦收获和贮藏期间落入田间的病粒，可在土表和土表下 7.6~15.2cm 处保持相当长的存活期，其寿命分别为 45 个月、39 个月及 27 个月(Bansal *et al.*, 1983)。Munjil (1971)报告，在印度新德里病菌可在土壤中存活 4 年。喂食含菌食料的牲畜，粪便中仍有相当数量的存活冬孢子，已知病原可在麦秆、粪肥土中至少存活 2 年以上。章正(1986)试验证明，土中病粒内的冬孢子，能在接近饱和的土壤湿度条件和冬季雨雪连绵交替的自然条件下越冬，也能在连续多次的冰冻(-5℃)与解冻(5℃)相互剧烈变化的实验室条件下保持萌发，病粒经 -18℃ 低温处理，1 周后冬孢子萌发仍可达 44%，6 周后的萌发率下降至 12.2%，直至 12 周才停止萌发。由此可见，存在于土壤中的病菌有极强的抗逆性。

三、气流传病

目前尚未证明病穗中的成熟病菌在田间可以通过气流在当年形成第 2 次侵染，但存在于土壤表层的病原冬孢子，当土表温度适宜，而且土壤含水量充足，甚至因降雨或灌溉存在流动水时，冬孢子萌发后形成的先菌丝，可伸出土表。其上簇生的众多小孢子，一旦遇有微气流，或溅落的雨水，便脱离先菌丝而随着微风或雨滴降落到处于孕穗至扬花期的麦株上，遇到适宜的气候条件，便可侵染发病。

第四节 危害现状及生态经济影响的评估

小麦印度腥黑穗病在印度哈瑞亚那邦的卡纳尔地区的某些感病小麦品种上，其损失可达 20%(McRae, 1934)。1969~1970 年间，印度的德里、旁遮普、哈瑞亚那、拉加斯坦和乌塔帕拉达什地区的墨西哥小麦品种上普遍发生印度腥黑穗病，发病率达 7.5%。1974~1975 年间，此病在印度北部麦区多数地方严重发生，尤其是喜马拉雅山麓及塔瑞地区，在乌塔帕拉达什的汉帕，其发病率竟高达 15%~23%。1975 年以来，印度对此病进行的定期调查表明，病害的发生率与年剧增，1978~1979 年病害曾严重流行，在旁遮

普和克生米尔等地区发病率竟分别高达 78%和 89%，造成严重损失。至 1981 年后，该病已广泛发生于印度麦区。在墨西哥的西北部，由于印度腥黑穗病造成的损失估计每年约为 700 万美元。损失包括：产量和品质的下降，种子和粮食出口市场的丧失以及防治费用(Brennan *et al.*, 1990)。

印度腥黑穗病的危害除导致小麦产量损失外，还会降低面粉质量，影响小麦的商业价值。病粒中的黑粉含有大量三甲基胺，因而具有强烈的鱼腥臭味，一般认为当籽粒受害率达 3%以上时，面粉的使用质量及色泽均受严重影响而完全不符合消费要求。当有 5%的籽粒被感染时，面粉质量显著下降(Sekhon *et al.*, 1980; Hussain *et al.*, 1988)。同时麸皮也受损，面粉和面筋组分中的化学成分变化导致揉捏强度差(Gopal and Sekhon, 1988)。在墨西哥的西北部，麦粮中若感染的籽粒超过 3%则会被加工工业拒之门外，但可做饲料用。

印度腥黑粉菌除能自然侵染普通面包小麦 *Triticum aestivum*、硬粒小麦 *T. turgidum* 和小黑麦 *Triticale hexaploide* 外(Mitra, 1931; Agarwal *et al.*, 1977)，也能自然侵染 *Triticum sharonensis*, *T. variabilis*, *T. ovatum* 和 *T. scerrit* (Aujla *et al.*, 1985)。人工接种证明印度腥黑粉菌可侵染下列小麦近缘种属植物：*Oryzopsis miliacea*，耐酸草 *Bromus ciliatus*，旱雀麦 *B. tectorum*，多花黑麦草 *Lolium multiflorum*，黑麦草 *L. perenne*，单粒小麦 *Triticum monococum*，提莫非维小麦 *T. timopheevi*，节节麦 *T. tauschii* 以及 *Aegilops tiuncialis*, *A. mutica*, *A. columnaris*, *A. caudata*, *A. sharonensis*, *A. cylindrica*, *A. bicornis*, *A. comosa*, *A. searsii*, *A. tauschii*, *A. triaristata* 等 11 种山羊草 (Royer and Rytter, 1988)，可引起生态环境的破坏。

小麦印度腥黑穗病在 20 世纪 30 年代发现之处仅是一个危害轻微的地方性病害，目前已发展成为威胁世界小麦生产和贸易的危险性真菌病害，有 40 多个国家将之列为检疫性有害生物。

第五节 病原菌形态学及生物学特性

一、分类地位

小麦印度腥黑粉菌属担子菌亚门 Basidiomycotina，冬孢菌纲 Teliomycetes，黑粉菌目 Ustilaginales，腥黑粉菌科 Tilletiaceae。

二、病菌冬孢子形态特征

如图 23-2，病原菌的冬孢子成熟时为褐色至深褐色，球形、近球形或椭圆形，直径 $22\sim 42\mu\text{m} \times 25\sim 40\mu\text{m}$ ，平均 $35.5\mu\text{m}$ ，有的可达 $55\mu\text{m}$ 。在冬孢子中偶尔会发现尾丝 (Roberson and Lutrell, 1987)、乳突(Mitra, 1931)或者附有菌丝残体(Duran and Fischer, 1961)的情况。在光学显微镜下，孢壁结构大致由 3 个部分组成，最外层的胞鞘，其结构在电子显微镜下观察为由纤维状物质组成，胞鞘具有易于吸水膨胀，失水后易于破裂的特性，通常包裹于有饰纹的外胞壁之外，外包壁具有疣状突起形成的饰纹。疣突多有色素沉积而成深褐色，在扫描电镜下，疣状突起由基部至顶部形成多层次的同心轮纹，层叠的疣状突起的边缘，在光学显微镜下呈现有淡褐色鳞片组成的波纹状周边，内壁为较薄的胞

质膜。未成熟的冬孢子不育、量大、黄色、半透明，球形、角状或泪珠状，直径 10~28 μm ，最长直径达 48 μm ，胞壁薄，轮纹状，厚 7 μm ，内含物颗粒状(Mitra, 1931; Duran and Fischer, 1961)。

三、冬孢子萌发特性

冬孢子萌发时，在顶部通常只产生一根或几根先菌丝(担子)(Mitra, 1931; Krishna and Singh, 1981; Warham, 1988)，其长度有很大变化，有时短于冬孢子直径，有时其长度可达冬孢子直径的数倍至数十倍，通常不分枝，在顶端密集地簇生 32~128 个或更多个互不交接的初生小孢子(担孢子)(Mitra, 1931; Holton, 1949)，如图 23-3。初生小孢子丝状，长 64.4~78.8 μm ，宽 1.6~1.8 μm (Peterson *et al.*, 1984)。初生小孢子萌发后在末端或侧间产生菌丝或小梗，其上着生长 11.9~13 μm 、宽 2~2.03 μm 的次生镰刀状小孢子，猛烈释放(Peterson *et al.*, 1984)。镰刀状次生小孢子又可产生菌丝或其他孢子，如此反复。由初生或次生孢子产生的菌丝能产

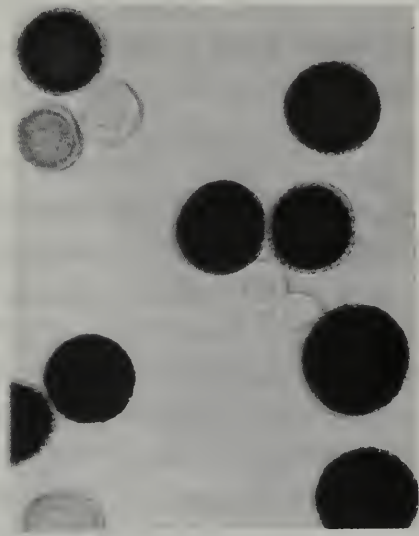


图 23-2 小麦印度腥黑粉菌冬孢子和不育孢子(Fuentes-Davila, 1996)

生大量次生、单核的镰刀状孢子和少数次生的丝状孢子。小麦印度腥黑粉菌一般不产生 H 状孢子(Mitra, 1931)，先菌丝形成后 6~44h 开始产生初生孢子，而次生孢子的产生可能还需 128h (Warham, 1988)。



图 23-3 小麦印度腥黑粉菌冬孢子萌发产生先菌丝和初生担孢子 (Fuentes-Davila, 1996)

Bedi 等(1981)认为冬孢子须经 6~8 个月的休眠期后才能萌发，McRae (1934)认为新鲜病瘿中的冬孢子通常不萌发，或萌发率很低。在 5~30 $^{\circ}\text{C}$ 下冬孢子可萌发，其萌发最适温度为 15~25 $^{\circ}\text{C}$ (Mitra, 1935; Fuentes-Davila, 1996)，但也有报道，冬孢子在 -18 $^{\circ}\text{C}$ 下 10 周或 -30 $^{\circ}\text{C}$ 下 4~12 周亦可萌发 (Zhang *et al.*, 1984)。交替光照比无光照或近紫外光照萌发效果好(Krishna and Singh, 1982a; Zhang *et al.*, 1984)，但在连续光照条件下孢子也能萌发 (Smilanick *et al.*, 1985)。

冬孢子在 pH 为 4~11 时可以萌发，最适合的 pH 为 6~9.5 (Krishna and Singh, 1982a; Smilanick *et al.*, 1985)，在有不同的渗透压和不同的准许压力下，冬孢子推迟萌发 (Dupler *et al.*, 1987)。而且萌发率随着水势的增加而减少。在试验的最高压力 -1.4ba 时孢子的萌发百分率最高。不同浓度的各种化合物，例如醛类及脂肪酸类、氨基酸类、醇类及有机溶剂类、不同的无机盐类、醌类对促进孢子萌发，均有一定的作用，而某些植物天然提取液，尤其是麦粒煎汁和畜粪提取液也有一定作用。

四、冬孢子的活力

在实验室条件下冬孢子放置 5~7 年仍具活力。冬孢子处于完整的孢子堆状态，并埋藏在土里 0.91~1.83m，或放在土表面，可存活 27~45 个月(Fuentes-Davila, 1996)。

五、病菌致病专化性

Mitra(1935)报道了小麦印度腥黑粉菌的两种生理类型，它们的孢子大小不同。但是从印度的 5 个州收集到的病菌看，其冬孢子大小并没有明显的差异(Bansal *et al.*, 1984)。在 Punjab 发现了在毒性上有明显差异的 3 种致病类型。Aujla 等人(1987)报道了从不同地区征集到的 21 份标样中存在 K1、K2、K3 和 K4 四种致病类型。这些致病类型是根据单粒内的单孢菌系对寄主不同遗传类型(*T. aestivum*, *T. durum*, *X. Triticosecale*, *Secale cereale*)的致病力差异而划分的。这些类型形态相似，并且都对实验用到的小麦品种有毒力。致病的单孢培养物配对试验发现，如果这种配对培养物来自不同类型的病原冬孢子，则比来自同一类型的冬孢子要侵染更多的穗子。来源于印度的单孢子菌系间的杂交要比来自墨西哥与印度菌系间杂交导致更多的病瘰和病穗(Royer and Rytter, 1985)。

六、病菌核周期

根据 Fuentes-Davila(1984)对病原菌生物学及病菌在寄生期及腐生期的细胞核状态，染色体倍数变化及其与致病性和异宗配合关系的研究证明，当冬孢子萌发时，孢子内的双倍体细胞核首先进行减数分裂，之后迅速进行有丝分裂，形成数量众多的单倍体胞核。这些胞核在先菌丝内移动，最后分别进入位于先菌丝顶部众多的小孢子中，通常每个小孢子有一个细胞核，小孢子丝状，不进行交接，成熟后脱离先菌丝，经过 1~2 次有丝分裂后，大多数小孢子产生隔膜，进而形成 2~4 个单核细胞，小孢子直接萌发或间接地在侧面或顶端形成单核、腊肠型的次生小孢子，次生小孢子或很快萌发或重复繁殖，萌发的次生小孢子可侵入寄主。人工接种试验证明，用相互亲和的单胞系小孢子混合接种后，在寄主内形成双核菌丝，双核菌丝在寄主细胞间扩大繁殖，最后再产孢菌丝顶端形成双核冬孢子，如用不亲和单胞系或直接用任何单胞系接种，则均不能发病。在人工培养基上，病菌可完成发育循环。Duran 等(1977)经实验证明，病原菌是异宗配合，由同一位点上的多位基因控制病菌的异宗配合和致病性，由于迄今同一担子产生的担孢子只能产生两个交配型，因而他们认为病原菌具有一个两极不育系，这个结论进一步由 Fuentes-Davila 等(1986)对病原细胞学的研究而证实。

第六节 病害发生特点和流行规律

病菌在感病寄主处于孕穗至扬花期侵入寄主穗原组织或花器，随同幼穗发育而形成病瘰。落入田地中的病粒，当土壤表层具备适宜温湿度条件，冬孢子开始萌发，此时小孢子如遇处于初期发育阶段的小麦，就可能发生侵染。虽然早期曾认为病菌可能形成系统侵染，但迄今尚无试验证明。

小麦孕穗及扬花期如遇多雾寡照、细雨多雾的高湿低温天气，即相对湿度在

54%~89%之间, 土温 17~21℃, 气温 10~26℃之间, 有利于病害发生, 尤其在此阶段如加施灌溉水, 则更有利于发病。施用氮肥过多以及大量施用农家肥, 都可能会增加发病率(Aujla *et al.*, 1981; Fuentes-Davila, 1996)。在印度, 晚播(11月25日~12月15日)的品种比早播品种(10月25日~11月24日)发病率高(Singh and Prasad, 1978; Aujla *et al.*, 1981)。

Munjaj 等(1971)研究认为, 病菌由表皮细胞侵入颖片、外颖及内颖, 并横向扩展, 经表皮细胞侵入子房。但 Goates 用扫描电镜结合光学显微镜对人工接种后, 从病菌侵入寄主组织直到形成病穗的系统发育过程进行了病理组织解剖学的研究证明, 存在于颖片上的萌发的许多次生小孢子产生的芽管或菌丝, 虽然有少数出现了菌丝联结或次生小孢子间的融合现象, 但大多数菌丝互相平行的生长而未见菌丝细胞间的联结, 次生小孢子萌发所产生的芽管在颖片表面通常朝向气孔伸长, 芽管或直接进入气孔或与气孔平行, 而生出垂直分枝进入气孔。侵入后的系列切片证明, 菌丝始终未能穿透保卫细胞, 而只能沿着保卫细胞中的间隙进入气孔腔。对寄主病穗组织所进行的大量组织病理学切片的观察证明, 病菌以同样方式从气孔侵入外颖及内颖, 在内颖下部紧靠子房基部的气孔中, 可见菌丝的侵入, 在芒基的许多气孔中, 可见菌丝的普遍穿入, 没有证据说明菌丝可直接自颖片表皮穿入或因菌丝存在出现任何局部自熔点而进入寄主, 唯一的途径是菌丝经由气孔保卫细胞间隙而进入寄主组织。

侵入寄主后, 菌丝在颖片、外颖及内颖的薄壁组织及绿色组织间扩展, 至接种第 9d 后, 除花药和雄蕊外, 菌丝侵入所有花器组织, 病组织切片显示, 菌丝由下子房组织(即穗轴及合点之间的组织)经珠柄进入子房及果皮。接种第 13d 后, 可见产孢之初始期, 此时由于种皮的木质化结构, 菌丝扩展始终限于果皮中, 而未能进入胚及胚乳, 但 Joshi 等(1966)认为胚乳及盾片均受破坏, 有的试验曾报告侵染菌丝可直接穿透子房的表皮组织, 但 Goates(1988)在全部接种病穗的观察中, 包括直接接种花期和子房后的系列切片, 只见大量菌丝在子房表面生长, 但始终未见菌丝穿透子房表皮组织和雌蕊。菌丝进入子房后, 子房受害的程度取决于侵入菌丝的密集程度及温湿度条件, 只有在严重感病的情况下, 病菌才能全部取代种粒, 形成整粒病瘪, 而通常只形成局部性病瘪。迄今认为, 即使菌丝侵入胚部, 但其传病作用不明, 感病种子常能萌发, 根据种子受害程度, 形成外观正常或细弱的幼苗。

综合上述, 通过带病种子远地传播的病原菌, 一旦因播种、贮运、撒落、加工后的下脚料, 或喂食带病麦麸后的牲畜粪便而进入大田, 病菌冬孢子可长期存活于不同深度的土层中而积累至足够的侵染接种量, 当气候条件适宜, 孢子开始萌发, 遇有处于孕穗至扬花期的感病寄主, 病菌从气孔侵入后在颖片、外颖及内颖形成胞间菌丝, 可能由穗梗进入下子房组织, 由此经珠柄侵入子房, 最后形成病粒, 这是迄今经多数实验证实了的病菌侵染循环。

第七节 风险分析与早期预警系统

一、病害发生与定殖风险分析

美国于 1996 年首次检测和报道了小麦印度腥黑穗病, 并认为该病害很有可能是在美国西南部地区首先发生, 然后向包括太平洋西北部在内的其他地区传播。Smiley (1997)

利用已发表的有关印度腥黑穗病侵染的环境条件及过去 40 年的气象资料,分析了美国太平洋西北部地区麦田发生该病害的环境风险。在爱达荷、俄勒冈和华盛顿州灌溉麦区每年均适合病害发生,在非灌溉地区 13 个地点中有 2 个地点(俄勒冈州的 Corvallis 和华盛顿州的 Spokane)每 3 年中有 1 年适合病害侵染。由此得出结论,病害一旦传入太平洋西北部地区,便可成功定殖。

二、病菌检验检疫与鉴定方法

(一) 病粒症状检查

检查籽粒胚部有无黑色斑点,注意与小麦根腐病的区别。小麦印度腥黑穗病初期斑点多位于胚的腹面,向基部靠近腹沟,并沿腹沟发展成灰黑色带状斑,有时出现轻度疱疹。当麦粒表皮(即颖果果皮)破裂后,有黑粉出现。这与小麦根腐病引起的症状有所不同,小麦根腐病的暗褐斑多首先出现于胚端和胚的向顶部,并不限于胚腹面,也不沿着腹沟形成带状斑,如果皮破裂,没有黑粉出现。

(二) 孢子形态鉴定

小麦样品通过洗涤、离心和席尔氏液处理过夜后(>12h),在光学显微镜下观察测量病菌冬孢子形态特征。由于小麦种子上可能存在数种黑粉菌,在检查时应注意与小麦其他黑粉菌及印度腥黑粉菌的近似种相区别。印度腥黑粉菌的特点是冬孢子个体大,通常不小于 28 μm ,外胞壁具有疣状饰纹,由此可与具有光滑胞壁的小麦光腥黑穗病菌和小麦散黑穗病相区别。除了孢子大小的差别外,在外胞壁饰纹上,小麦网腥与矮腥病菌均为网眼结构,孢子周边是网眼脊棱所形成短钝的或削尖的刺状突起,突起间因网眼的大小而形成空隙,矮腥病菌的胶鞘成无色半透明,不孕细胞球形,胞径通常小于病菌孢径,为淡绿色半透明状,网腥如有胶鞘,虽其饱满发达通常不如矮腥病菌,但形态上大致相同,不孕细胞也很近似,而印度腥黑粉菌的外胞壁为粗糙的多层疣状突起所构成,因而孢子周边是由突起顶端形成的密集鳞片状外围,突起互相重叠,中间无空隙,其胶鞘略带浅褐色,不孕细胞形体大,变化多样,常成泪珠状。因此,小麦印度腥黑粉菌与小麦光腥、网腥、矮腥虽系同属,但从病菌冬孢子形态特征上便不难区别。而小麦秆黑粉菌的冬孢子完全由周边细胞所包裹,形成具有特征性的孢子球,比较容易区别。

小麦印度腥黑粉菌与水稻腥黑粉菌 *Tilletia horrida* 或 *T. barclayana* 和黑麦草腥黑粉菌 *T. walkeri* 等主要近似种的冬孢子形态非常相似,且均可能出现在进口小麦洗涤液中,检疫鉴定非常困难,如美国 1996 年发现印腥后在相当长的一段时间内将黑麦草腥黑粉菌误诊为印度腥黑粉菌。1999 年北美植物保护组织(NAPPO)在官方网站上发布了印度腥黑粉菌鉴定标准(<http://www.nappo.org>)。该标准主要根据孢子大小、颜色、形状、刺状突起,并结合寄主区分小麦印度腥黑粉菌、水稻腥黑粉菌和黑麦草腥黑粉菌。

(三) 病菌同工酶及血清学鉴定

在检验中,如发现少量孢子,或产地不明,需作进一步鉴定时,则可挑取病菌冬孢子在 2% 琼脂培养基上,于 20℃ 有光照条件下做单孢萌发。然后再移入马铃薯葡萄糖斜

面做单株菌系培养，长成后再移入马铃薯液汁中摇床培养，待长成后，提取培养物进行同工酶鉴定以进一步区别印度腥黑粉菌与稻腥病原菌(Bonde, 1989)。Luster(1998)还发明了小麦印度腥黑粉菌的血清学鉴定方法，但实用性均不高。

(四) 病菌分子检测技术

Ferreira等(1996)通过对印度腥黑粉菌线粒体DNA的一个2.3kb EcoR I片段进行克隆和部分序列测定，设计出引物 Ti 1/Ti 4，能来自印度、巴基斯坦和墨西哥的 17 个印度腥黑粉菌菌株总 DNA 中扩增出一个 2.3kb 片段，而其他包括小麦矮腥黑粉菌、光腥黑粉菌、网腥黑粉菌和水稻腥黑粉菌等在内的 25 个腥黑穗病菌的 DNA 扩增后无产物。第二次扩增中使用单嵌套式引物可提高灵敏度，能检测 1pg 的病菌菌丝。Smith等(1996)通过对印度腥黑粉菌线粒体 DNA 的 DraI 片段进行克隆和序列分析后，制备了两对特异性寡核苷酸引物，即引物 TI17M1(5'-TCCCCCTTGGATCAGAACGTA-3')/TI17M2(5'-AGAAGTCTAACTCCCCCCTCT-3')和引物 TI57M1(5'-TTTTCCCTCTCTCCTTTTTTCA-3')/TI17M2(5'-AGCAAAGACAAGTAGGCTTCC-3')，能在印度腥黑粉菌 78 个菌株中扩增出大小分别为 825bp 和 118bp 的特异性产物，而在水稻腥黑粉菌等其他 5 个黑粉菌种 79 个菌株中无此扩增产物。利用受侵麦粒洗涤液中萌发的冬孢子，能检测出 50g 小麦样品中的 5 个冬孢子。该项技术获得了美国的发明专利，并在美国对外检疫和印度腥黑粉菌调查中采用。我国上海、南京和深圳等检疫部门亦在进口原粮检疫中应用这一技术，多次从面粉中检出小麦印度腥黑粉菌。Frederick等(1998, 2000)利用定量 PCR 技术鉴定和区分小麦印度腥黑粉菌和黑麦草腥黑粉菌获得成功。根据种的特异性引物和 6 羧基荧光素标记的寡核苷酸标记建立了 TaqMan 系统，以检测和区分上述两种病菌。该技术检测样品量大，检测时间短，可在 2.5h 内完成整个检测工作。Frederick等(2000)报道了 5 对小麦印度腥黑粉菌的特异性引物，选取其中的 2 对引物(T3/T6 和 T3/T4)作为病菌冬孢子检测的引物，采用套式 PCR 技术直接检测小麦印度腥黑粉菌冬孢子，检测灵敏度可达到 1 个冬孢子，检测时间缩短为 1d。

以 PCR 为基础的小麦印度腥黑粉菌分子检测技术的不断发展和完善，很好地解决了病菌快速诊断和检测问题，缩短了检测时间，提高了检测的灵敏度和准确性。

第八节 预防、根除与控制

一、加强植物检疫

为了预防小麦印度腥黑穗病的传入和危害，我国于 1986 年公布小麦印度腥黑穗病为对外检疫对象，1992 年 10 月公布该病为一类检疫性病害。小麦种子带菌是病害远距离传播的主要途径。必须严格进行种子检验，禁止从疫区进口原种和种植带菌的小麦种子。当前除应对从印度及墨西哥国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)引进的植物种质资源实施严格检疫外，也要加强对进口粮食的口岸检疫，包括加强船舱抽样管理和试验室检验，室内检验应扩大到包括对禾本科有关印度腥黑穗病易感寄主的种子检验，如山羊草属、黑麦草属、雀麦属等，同样应加强对邮寄及旅客携带物的检疫，采取各种有效措施防止

传入该病。

二、选育和利用抗病品种

培育和种植抗印度腥黑穗病品种是公认的控制病害最经济有效的方法。国际玉米小麦改良中心经过 5 年的试验,已鉴定筛选出 98 个抗病的面包小麦品种(系); Punjab 农业大学已鉴定出 68 个抗病品系,这些抗病品系的抗源大都来源于中国、印度和巴西。1992 年墨西哥国家项目育成抗印度腥黑穗病的面包小麦品系 Arivechi,作为商业化品种在墨西哥西北部推广。但目前尚未育成理想的高抗或免疫品种。通过对面包小麦抗印度腥黑穗病基因的遗传方式及等位关系研究表明,抗病性受 2 对部分隐性基因和 4 对部分显性基因控制,抗病基因分布在染色体 1D、2A、3B、3D、5D 和 7A 上 (Gill *et al.*, 1993)。

三、化学防治

早在 1933 年已开始研究杀菌剂处理种子控制印度腥黑穗病(Mitra, 1935),虽然经试验表明许多杀菌剂是有效的,但结果并不理想。Smilanick 等(1987)用 7 种内吸杀菌剂(多菌灵 benomyl, 苄氯三唑醇 bitertanol, campogran, trimidol, 丙环唑 propiconazole, 涕必灵 thiabendazole LSP, 粉锈宁 triadimefon)处理种子,播种后在一些分蘖的穗上进行接种,结果发现,无论是人工接种还是自然发病没有一种杀菌剂能控制印度腥黑穗病的发生。实验室试验表明,有一些杀菌剂能抑制冬孢子萌发,例如,用五氯硝基苯(pentachloronitro-benzene)液体或可湿性粉剂处理小麦种子,能抑制冬孢子萌发长达 2 个月(Fuentes *et al.*, 1983);百菌清(chlorothalonil)浓乳剂和可湿性粉剂处理病穗,能使冬孢子在 8 个月内不萌发。三苯酚(triphenyltin hydroxide)、甲氧基-乙醛-乙酸(Methoxyethylmercury acetate)和氟化乙汞(ethylmercury chloride)能抑制冬孢子萌长达 18 个月(Warham and Prescott, 1989)。百菌清(chlorothalonil)、代森锰锌(mancozeb)和多菌灵+代森锰锌(carbendazim + mancozeb)处理受侵染的种子 10 个月,结果 97%的冬孢子萌发被抑制。氟化乙汞(ethylmercury chloride)、羧基化合物(oxy-carboxin)、4-丁基-1、2、4-三唑、百菌清(chlorothalonil)、三唑醇(propiconazole)、代森锰锌(mancozeb)、粉锈宁、萎锈灵(carboxin)等杀菌剂对冬孢子的抑制效果差或无效果亦有试验报道。有试验表明,在湿润的土壤中,当冬孢子埋藏于土壤中深 10cm 时,用溴甲烷(methyl bromide)进行土壤熏蒸能抑制 98%的冬孢子萌发。在干燥的土壤中,当冬孢子埋藏在土中 10cm 处时,Vapam 能抑制 57%~99%的冬孢子萌发。20 世纪 70 年代末以来,开展了许多有关杀菌剂的叶面应用试验,筛选出了一些有效杀菌剂,如三唑醇、萎锈灵、粉锈宁、苄氯三唑醇等。1985~1987 年期间,在印度用 Brassicol (pentachloro-nitrobenzene)处理土壤,用多菌灵(carbendazim)处理种子,用三唑醇喷施叶片,对印度腥黑穗病的综合防效为 50%~80%。叶面喷施与种子处理或与土壤熏蒸相结合,可有效地降低印度腥黑穗病的发病率(Gill *et al.*, 1993)。

四、农业防治

许多栽培措施对防治印度腥黑穗病的作用大都是基于田间观察的结果,缺乏精密实验研究。主要包括以下措施:实行两年以上的轮作可有效地降低土壤内冬孢子存活率,

从而减少发病率。调整小麦播种期,使小麦的生育期气候条件不适于孢子萌发,但在连续阴雨季节的地区很难实现。减少氮肥的使用量,可减轻病害发生率。此外,防止使用带菌粪肥,调整田间灌溉时间、次数和流向,平播改沟播等亦可减轻发病率。

第九节 应用与基础研究发展策略

一、完善和建立病害早期诊断和快速检测技术体系,提高口岸检疫的时效性和准确率

国内外对印度腥黑粉菌已开展了大量的分子生物学基础研究工作,发展了比较成熟的分子检测技术,在此基础上进行补充完善和组装配套,研究建立快速、准确的分子检测技术体系,提高病害检验检疫的时效性和准确率。

二、加强病害基础生物学和流行病学研究,建立病害风险评估技术体系

围绕印度腥黑穗病在我国成功定殖的可能性,探讨灾害生物成功定居的共同特征和环境条件,分析入侵环境的生态阻力和病原菌的定居潜力,明确病原物对关键因子的耐性限度,确定它们在不同环境梯度下的存活与繁殖概率,构建病害风险评估模型及其软件平台,建立印度腥黑穗病风险评估技术体系,为病害早期预警、检测、预防策略提供科学基础。

三、研究开发病害应急扑灭和处理技术,建立病害综合防治技术体系

我国由于尚未发生小麦印度腥黑穗病,对该病害防治和处理技术缺乏研究。因此,研究开发小麦印度腥黑穗病应急扑灭技术和无公害处理技术亦是当务之急。重点研究内容包括:①进口疫麦及疫麦加工副产品大规模无公害处理技术;②小麦抗印度腥黑穗病品种的培育和利用技术;③高效安全的内吸杀菌剂开发和使用技术。

附节 小麦印度腥黑穗病常规研究技术

一、病菌培养技术

在完整的孢子堆上扎一个洞,然后把孢子洒落在有液体培养基的培养皿中,可分离获得印度腥黑粉菌的冬孢子。另外,把孢子堆放在有表面活性剂的水中振荡,可得到冬孢子悬浮液,然后过滤,去掉残渣、离心,得到冬孢子沉淀物,把孢子再悬浮于亚氯酸钠溶液中(浓度为0.5%)离心;用无菌水冲洗后再离心(重复此步骤2~3次,以去除消毒剂)。冬孢子放在1.5%的琼脂培养基上,在室温(20~22℃)及光照条件下培养,7~10 d后开始萌发。在这个时期,显微操作可进行单孢分离,若要获得大量的孢子,可分离单个冬孢子得到,也可把带菌的培养基块转移到马铃薯葡萄糖培养基的斜面或平板上。4~6 d后,加无菌水并把培养物刮到另外的PDA试管或培养皿中。

二、病害接种技术

(1) 滴液方法: 在花期把小花剥开, 用一带眼的滴管滴进一滴小孢子悬浮液, 用这种方法可使发病率达 18%~45%(Chona *et al.*, 1961)。

(2) 注射技术: 在孕穗期芒刚显露时, 用一皮下注射器把接种物注射到孕穗里, 此法可获得较高的侵染率(Fuentes-Davila, 1996)。也可用剪刀剪掉一朵花的中间小花, 然后用注射器将 1~2 滴接种物注射到剩下的小花中。

(3) Goates 接种法: 在培养皿内对穗子进行接种。长有植株的花盆侧放, 使穗子置于盛有新鲜琼脂培养基的塑料培养皿中, 在培养皿一侧划一裂口以容纳主茎, 然后在穗子上扣上一个盛有菌落的培养皿, 孢子将从培养皿中溅到穗子上。在持续光照和 20℃ 条件下, 保持接种 24~48 h。用这种方法鉴定形态抗性, 要比接种孕穗更适宜, 且得到的发病率也比后者高(Goates, 1988)。

三、抗病性评价

小麦品种(系)对印度腥黑穗病的抗性通常用每穗受感染籽粒的百分数或侵染系数来测定(Fuentes-Davila and Rajaram, 1994; Aujla, 1989)。试验中一般对 10 个穗子进行接种鉴定, 一个品种或品系在接种及自然条件下经过几轮试验后, 若平均发病率小于或等于 5%, 则认为是抗病品种(Gill, 1990; Fuentes-Davila and Rajaram, 1994)。目前仍有使用以籽粒病斑大小、病粒数和总粒数为基础的分级评价方法(Aujla *et al.*, 1989)。

(陈万权 刘天国)

主要参考文献

- 易建平, 彭金火, 陶庭典, 沈禹飞. 2002. 小麦印度腥黑穗病菌鉴定方法的新进展. *植物检疫*, 16(2): 95~98 [Yi J P, Peng J H, Tao T D, Shen Y F. 2002. New development of identification methods of *Tilletia indica* Mitra. *Plant Quarantine*, 16(2): 95~98]
- 章正. 1986. 小麦印度腥黑穗病. *植物检疫*, (1): 43~46 [Zhang Z. 1986. Wheat karnal bunt. *Plant Quarantine*, (1): 43~46]
- Agarwal V K, Singh A, Khetarpal R K. 1977. Occurrence of partial bunt on triticale. *Plant Prot. Bull.*, 25: 210~211
- Aujla S S, Gill K S, Sharma I, Singh D, Nanda G S. 1981. Effect of date of sowing and level of nitrogen on the incidence of karnal bunt of wheat. *Indian J. Ecol.*, 8: 175~179
- Aujla S S, Sharma I, Gill K S, Kour V. 1985. *Neovossia indica* on wild species of wheat. *Indian Phytopath.*, 38: 191
- Aujla S S, Sharma I, Singh B B. 1987. Physiological specialization of karnal bunt of wheat. *Indian Phytopath.*, 40: 333~336
- Aujla S S, Sharma I, Singh B B. 1989. Rating scale for identifying wheat varieties resistant to *Neovossia indica*. *Indian Phytopath.*, 42: 161~162
- Bansal R, Singh D V, Joshi L M. 1983. Germination of teliospores of Karnal bunt wheat. *Seed Res.*, 11: 258~261
- Bansal R, Singh D V, Joshi L M. 1984. Comparative morphological studies in teliospores of *Neovossia indica*. *Indian Phytopath.*, 37: 355~357
- Bedi P S, Meeta M, Dhiman JS. 1981. Effect of Karnal bunt of wheat on weight and quality of the grains. *Indian Phytopath.*, 34: 330~333
- Bonde M R. 1989. The use of isozyme to identify teliospore of *Tilletia indica*. *Phytopath.*, 79: 596~599
- Brennan J P, Warner J, Hernandez J, Byerlee D, Coronel F. 1990. Economic losses from karnal bunt of wheat in Mexico. *CIMMYT Economic Working Paper*, (2)
- Chona B L, Munjal R L, Adhikari K L. 1961. A method for screening plants for resistance to *Neovossia indica*. *Indian Phytopath.*,

- Dupler M, Smilanick J L, Hoffmann J A. 1987. Effect of matric and osmotic potential on teliospore germination of *Tilletia indica*. *Phytopath.*, 77: 594-598
- Duran R, Fischer G W. 1961. The genus *Tilletia*. Washington State University Press. 138
- Duran R, Cromarty R. 1977. *Tilletia indica*: a heterothallic wheat bunt fungus with multiple alleles controlling incompatibility. *Phytopath.*, 76: 812-815
- Ferreira M A, Tooley P W, Hatziloukas E, Castro C, Schaad N W. 1996. Isolation of a species-specific mitochondrial DNA sequence for identification of *Tilletia indica*, the karnal bunt of wheat fungus. *Appl. Environ. Microbiol.*, 62: 87-93 (US Patent 5811240, 1998)
- Frederick R D, Snyder K E, Tooley P W, Berthier-Schaad Y, Peterson G L, Bonde M R, Schaad N W, Knorr D A. 1998. An improvement PCR method utilizing Taqman for the detection and differentiation of *Tilletia indica*, the causal organism of karnal bunt of wheat, and a related ryegrass smut. *Phytopath.*, 88: S29
- Frederick R D, Snyder K E, Tooley P W, Berthier-Schaad Y, Peterson G L, Bonde M R, Schaad N W, Knorr D A. 2000. Identification and differentiation of *Tilletia indica* and *T. walkeri* using the polymerase chain reaction. *Phytopath.*, 90: 951-960
- Fuentes S, James W C, Torres E, Garcia C, Delgados S, Elias-Caues A. 1983. Karnal bunt of wheat: risk appraisal and evaluation of the efficacy of seed dressing to control soilborne inoculum. CIMMYT Report. 49
- Fuentes-Davila G, Duran R. 1986. *Tilletia indica*: cytology and teliospore formation in vitro and immature kernels. *Can. J. Bot.*, 64: 1712-1719
- Fuentes-Davila G, Rajaram S. 1994. Sources of resistance to *Tilletia indica* in wheat (*Triticum aestivum*). *Crop Prot.*, 13: 20-24
- Fuentes-Davila G. 1984. Biology of *Tilletia indica* (Mitra) Mundkur . Msc. Thesis. Department of Plant Pathology, Wash. State Univ. 66
- Fuentes-Davila G. 1996. Karnal bunt. In: Bunt and Smut Diseases of Wheat: Concepts and Methods of Disease Management, Wilcoxson RD and EE Saari eds. Mexico, D. F.: CIMMYT. 26-32
- Gill K S. 1990. Genetic evaluation and utilization of wheat germplasm for breeding varieties resistant to karnal bunt, third annual research report. Department of Plant Breeding, Junjab Agricultural University, Ludhiana, Punjab, India. 1990
- Gill K S, Sharma I and Aujla S S. 1993. karnal bunt and wheat production. Punjab Agricultural University. 1993, 153
- Goates B J. 1988. Histology of infection of wheat by *Tilletia indica*, the Karnal bunt pathogen. *Phytopath.*, 78. 1434-1441
- Gopal S, Sekhon K S. 1988. Effect of karnal bunt disease on the milling, rheological, and nutritional properties of wheat: effect on the quality and rheological properties of wheat. *J. food Sci.*, 53: 1558-1559
- Holton C S. 1949. Observation on *Neovossia indica*. *Indian Phytopath.*, 2: 1-5
- Hussain M, Sharif M, Ullah M, Sarwar M. 1988. Studies on the feasible use of Karnal bunt infected wheat for bread and "chapati" making. Proc. 1st Nat. Food Proc. Workshop, Lahore, India
- Joshi L M, Singh D V, Srivastava K D, Wilcoxson R D. 1966. Karnal bunt, a minor disease that is now a threat to wheat. *The Botanical Review*, 49(4): 309-330
- Krishna A, Singh R A. 1981. Aberrations in the teliospore germination of *Neovossia indica*. *Indian Phytopath.*, 34: 260-262
- Krishna A, Singh R A. 1982. Effect of physical factors and chemicals on the teliospore germination of *Neovossia indica*. *Indian Phytopath.*, 35: 448-455
- Luster D G. 1998. Antigenic glycoprotein in the teliospore wall of *Tilletia indica*. *Mycologia*, 90: 180-188
- McRae W. 1934. Report of the Imperial Mycologist. Scientific reports of the Imperial Institute of Agricultural Research, Pusa, India 1932-1933
- Mitra M. 1931. A new bunt of wheat in India. *Annals of Applied Biology*, 18:178-179
- Mitra M. 1935. Stinking smut (bunt) of wheat with a special reference to *Tilletia indica* Mitra. *Indian J. Agric. Sci.*, 5: 1-24
- Munjal R L. 1971. Epidemiology and control of karnal bunt of wheat. Proc. Symp. Epidemiology, forecasting and control of plant diseases. Indian National Science Academy. 37B: 464
- Peterson G L, Bonde M R, Dowler W M, Royer M H. 1984. Morphological comparisons of *Tilletia indica* Mitra from India and Mexico. *Phytopath.*, 74: 757(abstr.)
- Roberson R W, Luttrell E S. 1987. Ultrastructure of teliospore ontogeny in *Tilletia indica*. *Mycologia*, 79: 753-763
- Royer M H, Rytter J. 1985. Artificial inoculation of wheat with *Tilletia indica* from Mexico and India. *Plant Dis.*, 69: 317-319
- Royer M H, Rytter J. 1988. Comparison of host ranges of *Tilletia indica* and *T. barclayana*. *Plant Dis.*, 72:133-136
- Sekhon K S, Saxena A K, Randhawa S K, Gill K S. 1980. Effect of karnal bunt disease on quality characteristics of wheat. *Bull.*

- Grain Tech.*, 18: 208~212
- Singh A, Prasad R. 1978. Date of sowing and meteorological factors in relation to occurrence of karnal bunt of wheat in U. P. Tarai. *Indian J. Mycol. Plant Path.*, 8: 2(abstr.)
- Smilanick J L, Hoffmann J A, Royer M H. 1985. Effect of temperature, pH, light and desiccation on teliospore germination of *Tilletia indica*. *Phytopath.*, 75: 1428~1431
- Smilanick J L, Hoffmann J A, Cashion N L, Prescott J M. 1987. Evaluation of seed and foliar fungicides for control of karnal bunt of wheat. *Plant Dis.*, 71: 94~96
- Smiley R W. 1997. Risk assessment for karnal bunt occurrence in the Pacific Northwest. *Plant Dis.*, 81(6): 689~692
- Smith O P, Peterson G L, Beck R J, Bonde M, Schaad N. 1996. Development of a PCR-based method for identification of *Tilletia indica*, causal agent of karnal bunt of wheat. *Phytopathology*, 86: 115~122 (US Patent 5776686, 1998)
- Warham E J. 1988. Teliospore germination patterns in *Tilletia indica*. *Trans. Bret. Mycol. Soc.*, 90: 318~321
- Warham E J, Prescott J M. 1989. Effectiveness of chemical seed treatments in controlling karnal bunt disease of wheat. *Plant Dis.*, 73: 585~588
- Zhang Z, Lange L, Mathur S B. 1984. Teliospores survival and plant quarantine significance of *Tilletia indica* (causal agent of Karnal bunt) particularly in relation to China. *Europ. Plant Prot. Bull.*, 14(2): 119~128

第二十四章 梨火疫病

第一节 梨火疫病简史及生物学	501	第四节 梨火疫病的控制和铲除	509
第二节 梨火疫病的传播	505	第五节 其他与梨火疫病相关的病害	515
第三节 梨火疫病菌的风险分析	507	第六节 梨火疫病的检测和鉴定技术	518

摘要 梨火疫病菌是我国规定的禁止进境的一类检疫性有害生物, 该病是梨、苹果及其他蔷薇科植物上最具毁灭性的细菌病害, 其随果实和苗木传入我国的风险很大。本章系统介绍了梨火疫病的危害、传播、分布、生物学以及对该病菌的检测、风险评估、控制和铲除技术。

关键词 梨火疫病 生物学 分布 传播 检测 风险评估 病害治理

Chapter 24 Fire blight of pear *Erwinia amylovora* (Burrill) Winslon *et al.*

Abstract: Fire blight is the most destructive disease on pear, apple and other rosaceae plants and is an important quarantine pest of China. This disease has high risk to enter China with fruits and seedlings of pear and apple. In this chapter, the damage, spread, distribution, biology, disease detection, risk assessment and disease management of fire blight of pear were discussed.

Key words: fire blight of pear, biology, distribution, spread, detection, risk assessment, disease management

第一节 梨火疫病简史及生物学

梨、苹果及其他蔷薇科植物的火疫病, 由 *Erwinia amylovora* 引起, 是梨、苹果、榲桲、山楂、火棘、枸子等植物上最具毁灭性的细菌病害, 蔷薇科的几种核果类植物也比较感病。该病可侵染 40 余属的 220 余种植物, 严重感染的树和灌木外形通常被毁, 有些甚至会被该病致死。受伤害的花、枝条和叶片变黑, 像被火烧过一样, 火疫病因此而得名。

梨火疫病最早于 1780 年发生于美国纽约州, 由于当时认知的限制, 对该病的病因有多种观点, 认为是雷电、热灼伤、冻伤、昆虫甚至是由于人类疾病造成的(van der Zwet *et*

al., 1996)。一个世纪过后，伊利诺伊大学的 Burrill 首先宣布该病是由一种细菌引起的 (Burrill, 1880)，1884 年，通过分离与再接种试验，该推断首次得到了证明 (Arthur, 1885)，使得该病害成为世界上最早发现的植物细菌病害。19 世纪和 20 世纪，该病害迅速传播，给生产带来了严重的危害。

一、病害症状

病害在早春表现症状，被侵染的花序首先变成水浸状，然后萎蔫，最后变褐，该症状一般叫做花腐。火疫病的花腐症状在不同的寄主植物上发病程度不同。果实可以直接通过果皮和枝条被病菌侵染，未成熟的果实初始水浸状，随着病程的发展变成黑褐色，最后变成僵果，挂在树上可以保持几个月。花序被侵染后不久死亡，在同一枝条上的苹果叶片开始变褐，而梨和其他寄主的叶片则变黑。病叶的叶脉通常也变黑。当病害发展到枝腐和叶腐阶段，叶片死亡，向下反卷并挂在病枝上。幼嫩枝条容易感病，枝条顶部下垂，形成典型的“牧羊鞭”状(图 24-1)。通过自然孔口和伤口，病菌可以从叶片侵入。



图 24-1 梨火疫为害症状

溃疡通常在病枝或芽的基部形成，溃疡部周围的树皮首先呈水浸状，然后干缩下陷。溃疡部树皮表面通常光滑，有时呈紫色。溃疡斑下的木质部通常有红褐色条纹，溃疡部常可见琥珀色汁液流出。

二、病原菌形态及生物学

学名：*Erwinia amylovora* (Burrill) Winslow *et al.* 解淀粉欧文氏菌

异名：*Micrococcus amylovorus* (Burrill, 1882; Trevisan, 1889)

Bacterium amylovorus (Burrill) (Chester, 1897)

Erwinia amylovora (Burrill) Winslow *et al.* f. sp. *rubi* Starr *et al.*

病原 *Erwinia amylovora* (Burrill) Winslow *et al.* 属原核生物界 Prokaryotae、薄壁菌门 Gracilicutes、肠杆菌科 Enterobacteriaceae，为革兰氏阴性、好氧短杆菌，菌体尺度 $0.8\mu\text{m} \times 1.0\sim 3.0\mu\text{m}$ ，以单菌体、成对或短链状存在。具荚膜，鞭毛 1~8 根周生，具游动性(见图 24-2)。生长温度 $6\sim 30^\circ\text{C}$ ，最适温度 $25\sim 27.5^\circ\text{C}$ ，致死温度 $45\sim 50^\circ\text{C}$ 10min。在含 5% 蔗糖的营养琼脂培养基上菌落高度隆起，黏质，半球形，72h 菌落直径 3~4mm。烟酸是所有菌株的必须物质，厌气条件下微弱生长。好气条件下利用葡萄糖产酸，不产气，厌氧条件产酸缓慢。由阿拉伯糖、果糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖、蔗糖、海藻糖、甘油、甘露醇和山梨醇产酸很快，但由纤维二糖、柳醇和肌醇产酸很慢。不能由山梨糖、乳糖、棉子糖、肝糖、



图 24-2 梨火疫病病菌菌体

菊糖、糊精、淀粉、 α -甲基-D-葡萄糖苷或卫矛醇产酸；由木糖、鼠李糖和麦芽糖产酸不定。产生 3-羟基丁酮很弱，不产生吡嗪，不水解淀粉、酪素、吐温-80、卵磷脂、三丁酸甘油酯、果胶、尿素和精氨酸，不还原硝酸盐，亚硝酸盐分解阴性。接触酶阳性，不利用丙二酸盐。葡萄糖酸盐氧化和七叶苷水解不稳定。氯化钠浓度高于 2% 以上时生长延缓，至 6%~7% 时则完全抑制。抗青霉素，对氯霉素、链霉素和土霉素敏感。

三、危害情况

梨火疫病主要为害花、叶和嫩梢，同时也为害果实、枝条和树干。病害从病梢可很快扩展到枝条和树干，直至根部。有时可使栽培多年的梨和苹果树在几周内死亡。在伊利诺伊州，1914 年为害梨和苹果，造成大约 150 万美元的损失；1901 年传入加利福尼亚州，至 1908 年毁坏了约 2/3 的巴黎树，尤其是圣华金河谷南部的 4 个县，95% 的梨树遭到了毁坏。从 1901 年至 1910 年间，加利福尼亚州的梨树由于梨火疫病的为害而减少了 28%。1921~1925 年间，密执安州由于该病的发生和流行，平均每年损失 4.6% 的苹果。1936 年美国梨减产 23 000t，价值 400 万美元。1951~1960 年间，平均每年因该病损失 150 万美元的梨和 250 万美元的苹果，目前该病遍布美国(van der Zwet and Keil, 1979)。1957 年传入欧洲，1966 年英国就有 12 000 棵树发病。该病害 1966 年首次在荷兰发生，其后 10 年间，摧毁了 200 万株栒子，13 000 株火棘，8700 株红果树，4500 株花楸。1968 年在丹麦首次发现，1977 年几乎遍及全国。1971 年传入德国，侵袭了 18 000 棵梨树，造成 350 000 马克的损失，第 2 年联邦政府为铲除该病害花费约 420 000 马克，但并没有阻止病区的扩大(中国动植物检疫局, 1997)。由此可见梨火疫病的危害之严重及控制之困难。

四、病害循环

病菌在病株的溃疡斑边缘活组织、幼嫩枝条的维管束、病果上越冬，在暖冬条件下，

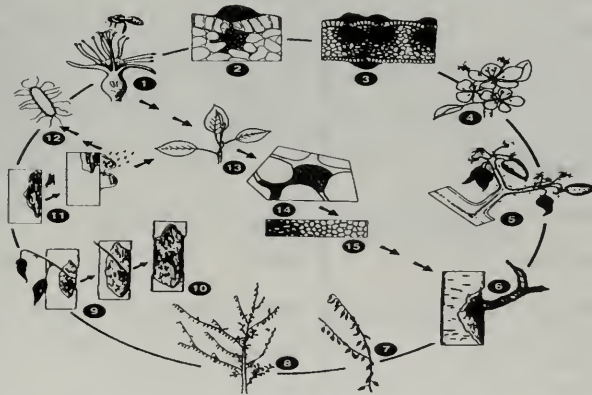


图 24-3 梨火疫病病害循环图(仿 van der Zwet *et al.*, 1995)

1. 蜜蜂在花间传播病菌；2. 病菌通过伤口或气孔感染花；3. 细菌在细胞间繁殖和扩散；
4. 花朵萎蔫或死亡；5. 再感染；6. 形成新的溃疡；7. 罹病枝条；8. 罹病幼树；9. 病菌在溃疡斑边缘越冬；10. 溃疡环绕枝干并产生菌脓；11. 昆虫和风雨传播细菌；12. 病菌形态；13. 直接感染幼枝；14. 病菌在树皮组织间繁殖扩散；15. 树皮组织崩解

还可以在病株树皮上越冬。近期的研究证明，病树老化的维管束中的病原菌不能够引起病害。第2年春天，病菌在病灶处大量繁殖，在高湿条件下，从病部渗出大量乳白色菌脓，为当年的初侵染源，通过风雨、昆虫、鸟类及田间操作将病菌传至健康枝条或植株造成初次侵染和再次侵染(病害循环见图 24-3)。

五、梨火疫病菌的寄主范围

梨火疫病菌的寄主范围主要限于蔷薇科，人工接种结果表明，梨火疫病菌可侵染 40 余属 220 多种植物(van der Zwet and Keil, 1979)，其中最感病的是梨、苹果、山楂、栒子、榲桲等属植物，其寄主(属)范围见表 24-1。

表 24-1 梨火疫病菌的寄主范围 (van der Zwet *et al.*, 1979)

学名	中文名	学名	中文名
<i>Amelanchier</i>	唐棣属	<i>Kageneckia</i>	待定
<i>Aronia</i>	腺肋花楸属	<i>Kerria</i>	棣棠花属
<i>Arracacia</i>	待定	<i>Malus</i>	苹果属
<i>Aruncus</i>	假升麻属	<i>Mespilus</i>	欧查属
<i>Chaenomeles</i>	木瓜属	<i>Osteomeles</i>	小石积属
<i>Cotoneaster</i>	栒子属	<i>Peraphyllum</i>	酸果木属
<i>Cowania</i>	待定	<i>Photinia</i>	石楠属
<i>Crataegomespilus</i>	待定	<i>Physocarpus</i>	风箱果属
<i>Crataegus</i>	山楂属	<i>Potentilla</i>	委陵菜属
<i>Cydonia</i>	榲桲属	<i>Prinsepia</i>	扁核木属
<i>Dichotomanthus</i>	牛条筋属	<i>Prunus</i>	李属
<i>Diospyros</i>	柿树属	<i>Pyracantha</i>	火棘属
<i>Docynia</i>	柃依属	<i>Pyrus</i>	梨属
<i>Dryas</i>	仙女木属	<i>Raphiolepis</i>	石斑木属
<i>Eriobotrya</i>	枇杷属	<i>Rhodotypos</i>	鸡麻属
<i>Exochorda</i>	白鹃梅属	<i>Rosa</i>	蔷薇属
<i>Fragaria</i>	草莓属	<i>Rubus</i>	悬钩子属
<i>Geum</i>	路边青属	<i>Sorbaria</i>	珍珠梅属
<i>Heteromeles</i>	待定	<i>Sorbus</i>	花楸属
<i>Holodiscus</i>	待定	<i>Spiraea</i>	绣线菊属
<i>Juglans</i>	胡桃属	<i>Stranvaesia</i>	红果树属

六、梨火疫病的地理分布

(1) 世界分布 梨火疫病最早发生于美国东北部，至 20 世纪初，随着世界性贸易日

益增长而人为地向各国传播，目前已在世界 40 多个国家和地区有分布(AQIS, 1998, Kim *et al.*, 1996, van der Zwet, 1994)，分别是：亚洲的亚美尼亚、伊朗、以色列、约旦、黎巴嫩、土耳其、日本和韩国，非洲的埃及，美洲的美国、加拿大、哥伦比亚、墨西哥、百慕大、危地马拉，欧洲的阿尔巴尼亚、爱尔兰、奥地利、比利时、保加利亚、丹麦、德国、法国、荷兰、瑞典、乌克兰、西班牙、希腊、匈牙利、塞浦路斯、意大利、马其顿、挪威、波兰、捷克、罗马尼亚、瑞士、英国、摩尔达维亚和南斯拉夫，大洋州的澳大利亚和新西兰(见表 24-2)。

表 24-2 世界范围内梨火疫病的发生和分布

发生年份	国家或地区	发生年份	国家或地区
1900	美国、加拿大	1986	瑞典、挪威、希腊、爱尔兰、马其顿
1919	新西兰	1987	捷克
1938	百慕大	1988	黎巴嫩
1943	墨西哥	1989	瑞士
1957	英国	1990	亚美尼亚、保加利亚、约旦、南斯拉夫、意大利
1964	埃及	1991	罗马尼亚
1966~1970	荷兰、波兰、丹麦、危地马拉	1993	奥地利、哥伦比亚
1971~1981	比利时、法国、德国、日本*	1994	摩尔达维亚、伊朗
1982	卢森堡	1995	乌克兰、西班牙、韩国*
1984	塞浦路斯	1996	匈牙利
1985	以色列、土耳其	1997	澳大利亚

*日本与韩国发生的梨火疫病病原与其他各地的病原有差异，仍存在争论，目前将这 2 个国家梨树上的病害称做“亚洲梨火疫病”。

(2) 国内情况 我国在 20 世纪 40 年代曾经有该病发生的记录 (戴芳澜等,1958; 王鸣歧, 1950)，经资料考证，这些报道均源于王鸣歧等在 40 年代根据症状判断的报道，没有任何试验证据，迄今也未有发生的报道。在为期 3 年的全国检疫性病害普查中，也未发现梨火疫病，因此可以认定以前的记录是错误的，中国目前没有梨火疫病的分布。

第二节 梨火疫病的传播

梨火疫病菌的传播途径和介体很多，传病的有效距离因介体而异。最主要的远距离传播途径是籍果树苗木和候鸟进行传播，同时带菌果实和被污染的包装材料亦是较重要的传播途径。同一地区内蜜蜂等昆虫、鸟类和风雨都是重要的传播途径。梨火疫病的自然扩散距离为每年 16km，超过 100km 的传播都是通过繁殖或包装材料及候鸟造成的。新西兰(1919)和埃及(1962)发生火疫病是由于使用了美国有病的接穗；英国(1957)的发病则是美国水果包装箱上带菌所致；西北欧各国相继发生则主要是由候鸟和风雨传播引起的。历史上的几次长距离传播见表 24-3。

表 24-3 梨火疫病的远距离传播

年份	传播路线	传播方式	品种	文献
1919	美国→新西兰	接穗	Bartlett	
1957	美国→英国	梨果包装箱	Bartlett	
1962	美国→埃及	接穗	Le Conte	
1965	美国加州→夏威夷	果实	Bartlett	van der Zwet, 1994a
1965-1970	美国→西北欧	候鸟		
1970-1985	西北欧→中欧	气流		
1985-1987	埃及、塞浦路斯→土耳其、希腊、以色列、保加利亚、南斯拉夫	气流		

一、带菌植物材料传病可能性

早已明确梨和苹果的接穗和砧木均能传带梨火疫病菌。Crepel 等(1996)研究了梨火疫病菌在休眠枝条内的潜伏存活情况,研究表明在人工接种的条件下,去除接种发病的枝条后,有 29%~33%越冬的无症状枝条上仍带有活的病原菌,病原菌浓度可达 $10^3\sim 10^7$ CFU/ml (组织浸提液),而且从抗病品种的无症状枝条的回收率要高于感病品种。边缘模糊的溃疡斑比边界明显的溃疡斑在生长季节可引起更严重的病害。Ge and van der Zwet(1996)研究表明,接种 10 个月后,6%的无症状侧枝可以回收到梨火疫病菌。在无症状的未开放的花芽和侧芽中均可分离到活的病菌。在枝条顶端接种 2 个月后,从溃疡斑下方可生出侧枝。直径 6mm 的发病枝条在储存 2 年后仍可回收到活菌(Pierstoff and Lamb, 1934)。梨火疫病菌可在导管和筛管内向上和向下传导(Lewis and Godman, 1965; Gowda and Godman, 1970)。由此可以看出,在发病的苗圃中,无症状植株的接穗和砧木也有可能携带梨火疫病菌。苗木传带病菌并引起发病的可能性最大。事实上,对无症状的苗木进行检测也较为困难。

关于果实传带梨火疫病菌的可能性目前尚有争论,有人认为无症状成熟果实传带病菌的可能性极小(Roberts *et al.*, 1998),但更多的证据表明采自发病果园的表观健康的成熟果实能够传带病菌并且引起病害。van der Zwet(1990)发现从表观健康的感病品种树上采收的果实在储藏期间仍发现了由梨火疫病菌引起的腐烂,表明这些果实在储藏之前就带有病菌。McManus 等(1995)的研究表明,在严重发病的果园中,75%的成熟果实的花萼处存在梨火疫病菌。

梨火疫病菌在温暖、干燥和光照条件下存活时间很短,果实表面带菌通常不会引起病害,目前进口的果品表面都经过了浸蜡处理,所以果实表面带菌可以忽略。但在花萼处的病菌受到了一定程度的保护,可以存活较长时间。梨火疫病菌在储藏期间造成果腐也说明了该菌在储藏条件下可以长期存活。苍蝇和蜂类等几十种昆虫(AAPGA, 1996)在带菌的果核上取食后再飞临感病的寄主,就很有可能将病菌接种到寄主上。资料表明,1~5 个细菌在合适的条件下就可以引起成功的侵染(van der Zwet, 1994b; AAPGA, 1996)。

二、包装物等材料传病情况

梨火疫病除了可借带菌种苗、果实传播外，被污染的包装材料亦是其远距离传播的途径之一，梨火疫病就是借带菌的包装箱传入英国并引起发病的。人工污染山毛榉、杨、云杉和塑料材料，分别放在培养皿中于 4℃ 和 26℃ 保存，3 个月后仍然回收到了火疫病菌，证明了被污染包装材料传播火疫病的可能性(Keck *et al.*, 1996)。

第三节 梨火疫病菌的风险分析

一、有害生物风险分析起因及发展

对于植物检疫来说，很重要的一点是知道一种有害生物在哪儿能适生，在哪儿不能适生；在适生地，该有害生物将具有多大的经济重要性，将引起多大的作物损失。只有具备这些知识，植物检疫和保护组织才能有生物学和经济方面的证据，使所采取的以防止检疫性有害生物扩散的植物检疫措施合理科学。这就需要进行有害生物的风险分析，以确定检疫性有害生物及应采取的检疫措施。

二、有害生物风险分析的必要性和重要性

随着国际贸易的发展和自由化程度的提高，植物及其产品的国际间调运越来越频繁。为了保护农业生产的安全，各国实行的动植物检疫对贸易的影响亦越来越突出，特别是有些国家为了保护本国农畜产品的市场，利用非关税壁垒措施来阻止国外农畜产品的输入，而动植物检疫就是其中一种具有隐蔽性的技术壁垒措施。为了在国际贸易中达到公平合理竞争的目的，防止各国任意利用植物检疫名义设置进境障碍，世界贸易组织(WTO)和联合国粮农组织(FAO)均要求各国在采取植物检疫措施时增加透明度，符合一致的国际标准，在 WTO 有关贸易中要遵守“动植物检疫与卫生措施的协议(简称 SPS 协议)”，在联合国粮农组织中应按“国际植物检疫措施标准(ISPM)”的规定执行。

有害生物在一个地区是否存在，可以通过调查证实，或利用已有资料来获得。而经济重要性的获得相对较难，因为目前还没有一个可接受的全球性的尺度来比较和测定经济重要性。然而，经济重要性可主要根据有害生物引起作物产量损失的数量或质量的受损程度来确定，其次是这些有害生物对农业生产系统的影响。作为有害生物对农业生产系统的不利影响主要表现在两个方面：一是直接导致作物产量下降和质量降低，如作物损失等，这是有害生物的生物学影响；二是市场的损失，即由于有害生物在出口农产品地区的存在，贸易伙伴对出口贸易施加的限制，以及农产品市场价格的降低。

一种有害生物对农业生产是否有害，其危险性多大，属检疫性有害生物，还是属限定的非检疫性有害生物，在国际贸易交往中是否有必要采取检疫措施以及实施检疫措施的后果等，都应予以分析。只有经过充分严格的分析论证，确认其风险大小后，才能确定是否有必要采取相应的检疫措施。所以，进行有害生物风险分析无论是从保护农业生产方面或促进国际贸易方面考虑都是十分必要的。

在保护本国农业生产安全的同时，也应尽量扩大国际贸易，减少因动植物检疫而造成的限制。各国对贸易中的动植物检疫问题一向十分敏感，它既是保护本国农业所必须

设置的壁垒，往往又是各国根据政治经济需要而设置的技术性保障。在关贸总协定最后协议中明确指出，“检疫方面的限制必须有充分的科学依据来支持，原来设定的零允许量与现行的贸易是不相容的，某一生物的危险性应通过风险分析来决定，这一分析还应该是透明的，应阐明国家间的差异”。因此随着新的世界贸易体制的运行，开展“有害生物风险分析”(PRA)工作既是遵守 SPS 协议及其透明度原则的具体体现，又强化了植物检疫对贸易的促进作用，增强本国农产品的市场准入机会，从而可坚持检疫正当技术壁垒作用，充分发挥检疫的保护功能。另一方面，PRA 不仅使检疫决策建立在科学的基础上，而且是检疫决策的重要支持工具，使检疫管理工作符合科学化、国际化的要求。

三、风险分析的模式

由 FAO 颁布的有害生物风险分析指南(Guidelines for Pest Risk Analysis)是植物检疫措施国际标准(ISPMs)第一部分进口法规下的一个标准，亦是整个国际标准框架下最主要的标准之一，该标准描述了植物有害生物的风险分析过程，提供了风险分析的模板，其目的是为国家植物保护组织制定植物检疫法规、确定检疫性有害生物及为采取必要的检疫措施提供科学依据。

标准将有害生物风险分析分成三个阶段，即有害生物风险分析开始阶段、风险评估阶段和风险管理阶段。有害生物风险分析的开始阶段确定需要进行风险分析的有害生物或传播途径有关的有害生物是否是检疫性有害生物，并鉴定其传入、定殖和扩散可能性及经济重要性；有害生物风险分析仅对 PRA 地区有意义，所谓的 PRA 地区是指与进行 PRA 有关的地区，通常是一个国家、一个国家内的一个地区或多个国家的全部或部分地区。

四、有害生物风险分析体系

目前许多国家和组织如美国、澳大利亚、新西兰、欧洲和地中海植保组织(EPPO)、加拿大等，均参照国际植物检疫措施标准构建了风险分析体系，包括以传播途径和有害生物为起点的风险分析体系，均包含了 PRA 的三个阶段，有些还有其他阶段。我国也是按照 ISPM，对部分有害生物或传播途径进行了 PRA，但不同专家应用的方法有差异，未见有统一的 PRA 体系，有可能导致 PRA 结果的差异。

从目前已经完成的 PRA 来看，主要有定性和定量两种形式。定性的 PRA 是利用现有资料，针对有害生物特性，文字性描述有害生物的风险(如澳大利亚)或对风险相关因子简单赋值，根据评估方案，最后得出有害生物定性的风险值(如美国、EPPO 等)。定量的 PRA 是利用建立的各种数学模型，根据现有资料，利用计算机计算气候适合度、侵入和定殖的概率、经济损失等。澳大利亚针对进口大米中谷壳传病的风险分析，就是利用数学公式，计算出谷壳传病的风险，最终提出了可以接受的风险水平(每千克大米中携带的谷粒不得超过 5 粒)。美国对进口阿根廷柑橘的风险分析，根据进口情况，口岸截获率、携带有害生物种类、有害生物处理前和处理后的存活率等数据，利用计算机模型统计出各种有害生物的定殖概率，最后提出了风险管理措施。在目前的条件下，定性 PRA 被各国普遍采用，也能够被大多数国家接受。定量 PRA 在目前只能对少数几种研究较透彻的有害生物进行，需计算机和强大数据库的支持，耗时长，投资大，只有少数几个国家对

部分有害生物进行了分析。目前普遍实施还有一定的距离，是将来的发展方向。

五、梨火疫病的风险分析

梨火疫病菌是目前国际上的争论焦点，该病害随繁殖材料(接穗、苗木等)进行远距离传播的风险很大，这一点是公认的事实。争论的焦点是该病害随梨、苹果等果实的传播而引起病害的风险到底具有多大。在 20 世纪 80 年代末，许多欧美学者都认为该病害随果实传播的可能性很大(van der Zwet, 1990)，但到了 90 年代后期，欧美和新西兰学者又认为梨火疫病随果实传播的风险几乎为零(Roberts *et al.*, 1998)。通过资料和形势分析，这些转变可以认为是发达国家因为梨火疫病而影响了其果品的出口，这些国家就尽量减低果实传病的风险。事实上，梨火疫病通过果实传病有一定的可能性。毕竟历史上有通过果实和包装材料传病的事实。许多学者和组织也认为梨火疫病菌通过果实贸易而传病的风险不能忽视。澳大利亚曾经 2 次因认为果实传病的风险很大，而拒绝进口新西兰的苹果。胡白石等(2001)通过分析国内的寄主分布、对梨火疫病菌的感病性、国内梨和苹果种植情况，认为梨火疫病随果实传入我国的风险很大。Roberts 等(1998)经过分析认为，梨火疫病菌随苹果贸易，每 38 462 年才可以引起 1 次侵染；从一个轻微发病的果园中进口苹果，每 35 971 年才可以引起 1 次侵染；从多个发病果园进口苹果，每 11 364 年才可以引起 1 次侵染。Yamamura 等(2001)经过分析，认为以日本现有的进口水平，不考虑变异因素，每 334 年就可以引起 1 次侵染，但如果利用最大概率统计，每 34 年就可以引起 1 次侵染。

第四节 梨火疫病的控制和铲除

梨火疫病的控制包括植物检疫、修剪和铲除罹病植物、药剂防治、抗病品种、生物防治及利用基因工程治理病害等措施。对于没有梨火疫病分布的国家，植物检疫是一项十分必要的防治措施。

虽然目前我国还没有梨火疫病的发生，但梨火疫病的人为和自然传播对我国构成了潜在威胁，尤其是相邻的日本国已经有梨火疫病的分布(Kim *et al.*, 1996)。我国已经并继续将从日本引进梨的优良品种，这样梨火疫病传入我国的风险就会很大。韩国以前曾有梨火疫病的报道，目前报道了一种病害，尽管病原学显示该病菌不是梨火疫病菌，但症状和危害几乎与梨火疫病相同。我国已经从韩国引进大量梨树苗木，在天津和山东等地种植(张乐，私人交流)，还没有注意到该病害，是一件很危险的事情，应立即加强对该病害的检疫控制，同时要做好准备，一旦发现梨火疫病及其类似病害的传入，要及时控制和扑灭。现简要叙述梨火疫病的控制和铲除研究进展。

一、传统的防治技术

1974 年，Schroth 等人在植物病理学年评上发表了一篇关于梨火疫病流行病学和防治的综述性文章，总结了至 20 世纪 70 年代梨火疫病防治的研究进展，文章指出，尽管做了大量的研究工作，该病害仍没有被很好地控制，持续在欧洲大陆爆发和流行，仍然是大多数梨和苹果种植国主要关注的问题。由此可以看出，梨火疫病的防治十分困难，需

要进一步研究。至上个世纪末,这一状态仍没有多大改变。从1974年起,梨火疫病又在20多个国家发生,主要是欧洲和中东国家(van der Zwet, 1996)。至目前,用于防治梨火疫病的药剂与1974年相比没有发生变化,但病菌对防治该病害的最有效的药剂——链霉素,在登记使用的地区却产生了抗性(McManus and Jone, 1994; Loper *et al.*, 1991; Moller *et al.*, 1981),给梨火疫病的防治又带来了新问题。该病害难以控制的又一原因是,由于市场需求的影响,种植的品种大多为感病品种(如富士和嘎拉)及目前广泛使用的为高感矮化砧木(如M9和M26)(Thomas and Jones, 1992)。目前经常有砧木受危害的报道,病状通常发生在早期表现花腐和枝枯的病树嫁接部位,形成溃疡并环绕枝干。尽管从20世纪70年代至今,防治状况改变不大,实际上仍有重大进展。首先对该病菌在花器表面的生态学和侵染生物学的研究取得了进展,为病害的防治提供了科学依据;建立了有效的病害发生预警模型,根据环境条件和寄主状况,预测病害发生时期和程度,指导适时施药,提高了药剂的防效。同时随着植物病原生物分子生物学研究飞速发展,新的防治策略的研究亦取得了一定的进展;最令人注目的是该病害的生物防治,已经应用于实际生产,用于防治梨火疫病的关键时期—花腐阶段的防治。

世界各地梨和苹果的商业化生产越来越集中于种植少数中度和高度感病品种。梨和苹果存在抗火疫病的种质(Tomas and Jones, 1992),由于园艺学性状(口味、储存期和品质等)很难与高水平的抗病性结合(Bell *et al.*, 1997),这些抗源没有被广泛应用,这样梨和苹果的生产就要受限于梨火疫病。防治措施就主要依靠田间卫生,包括去除正在扩展和休眠的溃疡斑,控制施肥以减轻病菌在感病组织中的扩展,以及在花期抑制病害的发展。

阻止花序被侵染是控制梨火疫病的关键,因为从溃疡斑和罹病花序上产生的菌脓是主要的初侵染源和再侵染源(Schroth *et al.*, 1974)。花期的侵染也同样对花序本身有极大危害,同时具有摧毁果树甚至是整个果园的潜力。通过卫生措施及早除去或毁掉越冬接种体可以减少对花序的侵染。这些接种体可以来自前一年生长季病枝形成的病斑,或从相邻果园或另外的寄主上,通过昆虫或/和风雨传播而来。尽管田园卫生是防治梨火疫病的重要措施,但有两个弱点使其不能完全阻止花腐的发生和流行。一是从经济学和生物学方面考虑,不能完全发现和除去上一生长季形成的溃疡;二是在侵染发生前,梨火疫病病菌可以在花器表面附生,迅速增加种群数量(可增加10亿倍)。在这一阶段,病原的最终数量受到温度的影响(Thomson, 1982),温度主要影响病菌的繁殖代数和被病原定殖的花的数量,被定殖花的数量因传粉昆虫活动和风雨的增加而增加(Johnson *et al.*, 1993; Kiett and Ivanovv, 1941; McManus and Jone, 1994; Pierstorff and Lame, 1934; Vanneste, 1995)。因此,花期温暖的天气($>15^{\circ}\text{C}$)和传粉昆虫的活动强度是促进梨火疫病病菌在花器表面定殖和生长的风险因子。在温暖季节末的降雨和重度结露是促进侵染的第3个因子(Billing, 1976; Smith, 1996; Steiner, 1990; Thomson *et al.*, 1975)。对于梨树来讲,花腐的程度还与二次开花习性有关。二次开花一般发生于仲春与早夏,通常认为比初次开花更有利于梨火疫病的侵染(Schroth *et al.*, 1974)。造成这种感病性差异的原因还不是很清楚,可能是由于在二次开花时组织的生理感病性、较高的温度、昆虫的活动性提高和/或接种体密度较高造成的。

讨论梨火疫病的花期侵染无可避免地聚焦于梨火疫病病菌在花器包括柱头、花药、蜜腺和花萼上的附生生长。柱头已经证明是梨火疫病病菌附生定殖的最初场所(Hatting *et*

al., 1986; Thomson, 1986; Wilson *et al.*, 1989, 1992, 1993)。花药也是梨火疫病菌的附生场所，由于其上的病菌种群密度与柱头相比要低得多，因此不是很重要，病菌偶尔才会沿花丝向下引起侵染(Wilson *et al.*, 1989)。病菌在花药上附生长主要是污染花粉粒，增加病菌在花间的传播。近期的大多数研究支持这样的假说：梨火疫病菌造成的花腐是由于病菌首先在柱头表面定殖，然后进入(主要借助水)蜜腺进行侵染(Thomson, 1986; Vanneste, 1995; Wilson *et al.*, 1990)。在蜜腺中，梨火疫病菌从蜜腺表面的分泌细胞侵入组织(Wilson *et al.*, 1990)。蜜腺细胞分泌高浓度的糖类(包括蔗糖、葡萄糖和果糖)，具有吸引传粉昆虫的作用，同时也是细菌附生生长的营养物质(Campbell *et al.*, 1991; Ivanoff and Kiett, 1941)。病菌在蜜腺中的附生长依据花蜜产生的时间、糖的浓度、环境条件和花期不同而变化很大。花蜜中糖的总浓度可高达 60%(Campbell *et al.*, 1991)，经雨水稀释后可降低至 2%(Kiett and Ivanoff, 1941)。早期的研究(Kiett and Ivanoff, 1941)认为降雨是侵染所必需的，因为雨水可稀释花蜜，将渗透压降至不抑制病菌生长的浓度。雨水也是将病菌从柱头传播至蜜腺的重要因子(Thomson, 1986)。将被侵染的花分别保存在湿润和干燥条件下比较发现，干燥条件下，暴露在蜜腺表面的梨火疫病菌大部分死亡，而在湿润条件下，病菌沿蜜腺细胞持续生长，保湿比干燥条件下花的侵染率要高得多。

蔷薇科植物中，柱头的形态差异很大，但几乎都具有“湿柱头”的特征，表面具柱状乳突(Hatting *et al.*, 1986; Slant, 1974; Uwate and Lin, 1981)，这种柱状乳突被有角质层，分泌的黏液可以黏附捕捉花粉，同时黏液可以提供营养和调节渗透压使花粉萌发生长。柱头也为梨火疫病菌提供了一个富营养、湿润的保护性环境。显微图片表明病菌在这种具分泌功能的乳突的胞外空间生长极快(Hatting *et al.*, 1986; Wilson *et al.*, 1989)。柱头表面附生的梨火疫病菌的密度可达 $10^6 \sim 10^7$ CFU/柱头，单柱头的重量为 0.15mg，因此每克柱头的携菌量可达 $10^9 \sim 10^{10}$ CFU。在开花 12h 内，很少能从柱头和蜜腺中分离到病菌，随着时间的推移，包括梨火疫病菌在内的附生菌开始在暴露的柱头上定殖。通过对梨火疫病菌和其他几种附生细菌的遗传物质交换可能性研究，发现两个抗链霉素的可移动基因的核酸序列在梨火疫病菌菌株间和其他从苹果上分离的几个属的附生菌是同源的(Chiou and Jones, 1993)。与此相关的是，在田间存在抗链霉素菌株时，施用链霉素却增加花腐的严重度(Smith, 1996)，尽管缺乏数据，但可以作如下解释：链霉素降低了整个附生细菌的种群数量，从而降低了这些种群和抗性梨火疫病菌株的竞争互作。

梨火疫病的流行与花期温暖的天气是相关的，使得通过气象资料对花腐发生的概率模型得以建立。一般来说，这些模型用于分析梨火疫病菌附生长周期以及在发生前在花中的传播，因此这些模型广泛被园主用来辅助决策及指导适时施药。梨火疫病的预测模型已经发展了 50 年。Mills(1955)记录了 1918~1954 年纽约西部梨火疫病的发生情况，指出梨火疫病季节性花腐发生的严重度与大于 18.3℃ 的天数有关。Billing (1976)根据该病菌在液体培养条件下温度与生长率关系，建立了一个模型，根据果园的温度资料来预测梨火疫病菌种群倍增时间。潜在的种群倍增天数总和与表现症状的时间相关。Schroth 等(1974)将病原在花器表面的附生阶段与以温度为基础的预测预报联系起来，并于 1982 年发表论文(Thomson, 1982)，认为只有日均温超过 15℃ 时，才能在梨树的花上检测到梨火疫病菌。Zoller and Sisevich(1979)的研究表明，梨火疫病菌附生种群数量的检测概率与 >18.3℃ 的积温成正相关。20 世纪 90 年代早期，依据积温与梨火疫病菌附生种群密度的

关系,建立了两个预测模型。基于计算机的 MARYBLYT 系统(Steiner and Lightner, 1992),计算从梨树粉红阶段开始累计 $>18.3^{\circ}\text{C}$ 的时间(h),以 110h 为标准来决定相对附生潜能是否足以引起花腐。第二个系统是 Smith(1996)建立的 COUGABLIGHT,该系统以 4 天为一单位,将其中 $>15.5^{\circ}\text{C}$ 的时间(h)相加,当该值超过一定数值,就被认为花腐发生的概率极高。这两个模型都考虑了降雨或温暖季节的湿度,以使花腐发生的时间和可能性更加精确,在利用降雨和湿度时,要因地地区不同而有所区别。(Billing, 1992; Mills, 1955; Smith, 1996; Steiner, 1990)。

以积温单位为基础的预测系统可以精确地预测花腐的高危时期。由于所有的资料仅仅依赖气象资料,没有考虑病菌的接种体密度,所以会经常发生假阳性(预测发病而实际未发病)。如在干旱和半干旱地区,由于梨火疫病只是零星发病,这种预测就会违反常规。为避免这个问题,Smith(1996)让种植者根据果园发病的历史资料来选择一个域值。如在一个果园发现有溃疡病斑,那么它的引起病害的温度域值就可以取超过两年内没有发病果园域值的 1/3。尽管目前对于特定地点的域值还非常缺乏,但将来针对接种体的变化而精确修订温度域值是十分可能的,这将进一步提高化学防治的效果。

在 20 世纪 70 年代以前,因为没有发现腐生细菌能够与梨火疫病菌互作抑制其种群,梨火疫病的生物防治被认为是“纯理论”的(Schroth *et al.*, 1974)。随着梨火疫病菌侵染生态学研究进展,尤其是发现柱头作为梨火疫病菌附生阶段最初也是最主要的定殖场所后,许多研究者对梨火疫病的生物防治进行了研究,发表了许多关于田间拮抗细菌抑制梨火疫病的报道文章(Johnson *et al.*, 1993; Lindow *et al.*, 1996; Stockwell *et al.*, 1996; Thomson *et al.*, 1975; Vanneste, 1996; Vanneste and Yu, 1996)。目前已经有商业化的生防菌制剂,如 *Pseudomonas fluorescens* 的 A506 菌株,已经用于梨火疫病田间生物防治。PfA506 同时可以通过抑制冰核活性细菌和产生激动素细菌的种群来减轻冻害和果实变色(Lindow *et al.*, 1996)。另一拮抗菌 *Erwinia herbicola*(现为 *Pantoea agglomerans*) C9-1 菌株,已经通过了美国环保局许可进行试验。这些拮抗菌可以抑制梨火疫病菌在柱头上的定殖和生长(Johnson *et al.*, 1993; Wilson *et al.*, 1992; 1993),以减少花的侵染和病菌在花间的传播。为使生物防治达到好的效果,拮抗菌必需在大多数花的柱头表面定殖(Johnson *et al.*, 1993; Lindow *et al.*, 1996),并且柱头上的拮抗菌的种群数量必须接近组织的携菌能力($10^5\sim 10^6\text{CFU/花}$)。从这一点考虑,拮抗菌抑制病原菌的主要机制为竞争排斥作用(位点竞争)。例如,在接种梨火疫病菌前 72h 接种 PfA506 可以抑制梨火疫病菌在柱头上的生长,但同时接种却不能抑制病菌生长(Wilson *et al.*, 1993)。这说明 PfA506 在柱头定殖和生长利用了梨火疫病菌生长的重要物质。不排除 PfA506 通过其他机制抑制梨火疫病菌的生长,但至目前还没有从 PfA506 的培养液中发现抑制梨火疫病菌生长的物质。通过观察发现,施用 PfA506 的梨花变红,因此有人推测可能是由于 PfA506 代谢产生的 β -葡萄糖苷酶与梨组织代谢产物反应,生成了抑制梨火疫病菌生长的物质(Wilson *et al.*, 1993)。在生长箱中观察到, PfA506 可以诱导花的蜜腺停止分泌花蜜,降低渗透压而限制病菌生长。

与 PfA506 不同的是, EhC9-1 抑制病菌生长的主要因子是产生拮抗物质(Ishimaru *et al.* 1998; Kearns and Hale, 1996; Vanneste, 1996; Vanneste *et al.*, 1996; Wright and Beer, 1996), EhC9-1 产生两种抑制梨火疫病菌生长的拮抗物质: herbicilin O 和 herbicilin (Ishimaru *et al.*, 1998)。位点竞争和生长限制营养物质的竞争也可能是 EhC9-1 抑制梨火

疫病菌生长的机制(Vanneste, 1996)。利用蜜蜂为介体帮助梨火疫病菌的拮抗菌在梨和苹果的柱头表面定殖已经成为该病害生物防治的一项补充措施(Thomson *et al.*, 1992; Vanneste, 1996)。蜜蜂从蜂房中出来时,通过一个叫花粉插入器的装置,内有干燥的细菌细胞,携带拮抗菌的蜜蜂在采集花粉时可将拮抗菌传播至花的柱头上。通过这种方式, Pfa506、EhC9-1 和梨火疫病菌均已成功定殖在花的柱头(Johnson *et al.*, 1993; Thomson *et al.*, 1992)。但利用蜜蜂作为介体使拮抗菌在花上最初的定殖率比喷雾要低(Johnson *et al.*, 1993),同时蜜蜂的传播效率除受季节变化影响和花的开放率影响外,天气条件也会影响蜜蜂的活动,其他植物花的开放会使携带拮抗菌的蜜蜂飞到果园以外;还要经常检查花粉插入器,以保证外出的蜜蜂携带足够的拮抗菌。由于梨火疫病的生物防治需要拮抗菌抢先在柱头上定殖,因此以蜜蜂为介体的生物防治的效率变异较大。尽管利用蜜蜂进行梨火疫病菌的生物防治不是最好的方法,但对拮抗菌从定殖的花上向未定殖的花上的转移是很重要的(Nucló *et al.*, 1997)。拮抗菌的二次移动可以抑制梨火疫病菌的附生生长和降低花腐率。与蜜蜂传播拮抗菌相比,喷雾能使拮抗菌在相对大量的花上进行快速初始定殖。这样,通过喷雾使拮抗菌在花上高水平定殖,再通过蜜蜂传播,可以最大限度地缩短拮抗菌的二次定殖时间。不同花期施用拮抗菌的防治效果有差异,在早花期施用的保护效果明显要好于晚花期,目前推荐多次施用拮抗菌,至少在开花 25%~90%期间施用两次。生物防治和化学相结合,可以显著提高防治效果。Pfa506 还可以显著降低花的霜害,与杀菌剂结合施用效果更明显(Lindow *et al.*, 1996)。

二、基于生物技术的防治技术

生物技术的发展为植物病害的防治提供了新的途径。通过遗传工程,有多种策略可提高植物对病害的抗病性。利用生物技术,通过遗传工程提高植物抗病性也是目前研究的热点。与常规育种不同的是,遗传工程可以修饰感病品种或将一个或几个抗病因子导入感病品种。植物与病原分子水平的互作研究的巨大进展为通过转基因途径对作物实施保护打下了基础。抗病基因的克隆以及系统获得抗性(system acquired resistance, SAR)和过敏反应信号传导成分的剖析为转基因抗病提供了更大的选择空间。通过这些新的途径发现了许多抗菌肽、抗病相关蛋白和抗菌物质。这些抗病策略互相结合,有望用于田间对病害实施有效而持续的控制。转基因途径与传统抗病育种相结合为植物病原的非化学防治和环境相容提供了可能。

梨和苹果的抗火疫病遗传工程也是当前研究的热点,许多科学家试图通过多种途径,利用遗传工程,培育抗梨火疫病的梨和苹果苗木。Mourges 等(1998)比较了几种不同来源的抗菌肽对 *E. amylovora* 的抗菌活性,结果表明 Cecropins 的抗菌活性最高, T₄ 溶菌酶次之。同时证明 Cecropins 和卵清溶菌酶具有协同作用。在抗菌浓度下, Cecropins 对梨悬浮培养细胞没有表现毒性。与梨胞外汁液共同孵育, Cecropins 会被降解并失去部分抗菌活性,因此推断转 *Cecropins* 基因的梨树只有在侵染点持续向胞间分泌该物质以弥补被降解的部分,维持抗菌浓度时,转 *Cecropins* 基因才能够发挥效能。从大蚕蛾种分离的 *Attacin E* 的基因在一个组成表达的启动子 *CaMV35S* 控制下,用转化的方法导入几个梨树品种中,在一个品种的 11 个转基因系中,有 6 个表现了显著抗病性;该基因已经成功导入苹果中,在田间接种条件下,使梨火疫病的症状减轻 50%(Norelli *et al.*, 1996)。

Kisung (2000)利用从大蚕蛾上分离的 *attE* 的一个 cDNA 克隆分别构建的 3 个载体, 其中一个含有花椰菜花叶病毒复制的上游 B 基元的 35S 启动子(p35SAtt), 一个含有 35S 启动子和 AMV 的非编码前端序列(p35Satt), 第三个含有 35S 启动子和 AMV 病程相关蛋白的信号肽(SP)(p35SAMVSPAtt), 这含有 *attE* 的 3 个质粒由马铃薯蛋白酶抑制剂 II(Pin2)启动子控制, 利用土壤杆菌介导转化苹果接穗和砧木, 检测发现含有 *attacin* 和 AMV 的转基因系苹果中 *attacin* 的平均含量是不含 AMV 转基因系的 3 倍; 转 *attacin* 和 SP 的苹果中的 *attacin* 含量比不含 SP 的要低。体外分析显示, *attacin* 在苹果叶胞间液被部分降解。但含有 SP 转基因的苹果比不含 SP 转基因苹果在田间发病显著降低。结果显示, 胞间分泌的 *attacin* 抗梨火疫病病菌比胞外固定的 *attacin* 更有效。

三、梨火疫病的铲除

外来有害生物的入侵会对本地的生物多样性、生态系统的功能、动植物的健康以及人类的经济造成威胁。最佳的解决方案是阻止这些物种的入侵。但是外来有害生物一旦侵入, 在一定阶段, 铲除是可能的。有害生物的铲除是指利用各种手段, 除去一种生物任何可繁殖的个体或使该种生物种群减少至可持续水平之下(Myers *et al.*, 2000)。在植物检疫中的定义是(ISPMS, No.9): 应用植物检疫措施, 在某个地区消灭某种有害生物。决定对一种有害生物是否采取铲除行动, 首先要进行该有害生物的风险评估, 同时考虑该项目成功的可能性和花费与收益比率。由于生物的侵入所造成的危害是持续的, 尤其是检疫性有害生物, 对农业生态系统的直接危害通常是严重的, 一旦侵入, 往往造成巨大损失。与直接造成的损失相比, 相对损失尤其是对农产品国际贸易市场的损失就更为巨大。因此, 一旦发现检疫性有害生物的入侵, 就必须进行铲除, 发现得越及时, 铲除成功的概率就越高。

有害生物的铲除行动应当由国家植物保护组织实施(ISPM, No.9)。铲除措施包括:

- (1) 阻止近期入侵的有害生物的进一步定殖和/或传播的紧急措施(非疫区的再建立);
- (2) 对已经定殖的有害生物进行铲除。

大多数情况下, 铲除方案中计划铲除的有害生物是指新近侵入需实施铲除行动或可能需要实施紧急铲除措施地区的有害生物。但铲除方案也可在限定的地区对已定殖的外来或本土的有害生物进行铲除。对有害生物在入侵地的检测或发生数据进行初步调查后, 需要对该有害生物的危害程度、生物学信息和潜在经济影响进行评估, 考虑现有的铲除技术和可利用的资源, 同时应当进行投入和收益分析, 以决定是否应当实施铲除方案。尽可能收集该有害生物的地理分布、起源和再次进入途径的相关信息。有害生物风险分析为正确决策提供依据。通过以上研究, 决策者应当提出 1 种或多种选择。但在紧急情况下, 通过紧急行动阻止有害生物传播的收效要高于精心组织的措施所获得的收效。为了在时间和技术上占据主动, 最好在有害生物在一个地方发现以前就制定好应急方案。这些方案主要针对具有很高侵入概率的特定的有害生物或有害生物群的, 也是保证铲除方案的可行性及成功实施所必需的。经过研究和评估, 精心设计铲除计划可使铲除方案快速、有效地实施。对于具体实施的方案, 在实施前要对合作方详细说明并征得同意, 应急方案就显得更为必要。借鉴已获成功的铲除方案, 对设计应急方案和考虑铲除计划

成功的可能性是非常重要的。对于保证紧急铲除措施的快速实施, 应急方案尤为重要。在铲除方案实施前, 要对种植者、居民和地方政府做好宣传工作, 以提高人们的认识水平和对铲除方案的理解, 以利于方案的实施。

铲除过程主要包括 3 个部分: 监测、抑制以及处理和/或控制措施。当铲除方案实施完成后, 有害生物的消灭必须得到证实。证实所用标准应当与项目开始时定值的标准一致, 而且应当有足够的项目实施活动和结果的资料支持。证实阶段对于完整的铲除项目是必需的, 并且如果贸易伙伴要求再确定, 应当对铲除效果进行独立的分析(ISPM, No.9)。铲除行动成功的结果应当由国家植保组织发表声名宣布; 如果铲除行动未获成功, 应当对项目各方面进行评价, 其中应当包括该有害生物的生物信息, 以决定是否可获得新的资料。还应当对项目的投入和收益进行评价。

梨火疫病是梨和苹果上的一种毁灭性病害, 许多国家将其列为检疫性病害。随着贸易全球化的影响、国内外市场和品种改良的需要, 梨和苹果及其他一些蔷薇科植物的果实和苗木相继进入我国。如我国已经从日本和韩国进口了大量的苹果和梨苗木, 而日本已经确定是梨火疫病的疫区(Kim *et al.*, 1996), 韩国也有一种类似梨火疫病的病害的发生, 这势必加大了梨火疫病传入我国的风险, 因此应当做好准备, 一旦发现该病害的传入, 要立即采取紧急行动, 尽最大努力进行铲除。只要发现及时和措施得当, 梨火疫病是可以根除的。

澳大利亚于 1997 年分别在墨尔本皇家植物园和爱德莱德植物园的蔷薇科观赏植物(栒子属)上发现了类似梨火疫病的病害, 经新西兰专家鉴定, 确定为梨火疫病。澳大利亚政府立即组织了一个专门的工作组, 对梨火疫病进行控制和铲除。对可疑植株进行销毁, 在对这两处进行铲除的同时, 在全国范围内对梨、苹果园、苗圃及市区进行调查和监测。由于发现及时, 采取措施得当, 很快根除了该病害, 监测结果表明, 全国其他地方没有发现梨火疫病。由于梨火疫病在澳大利亚只在观赏植物上发生, 加之扑灭迅速, 几乎没有对果品贸易产生影响。铲除行动费用 813 758 美元, 1998 年建立非疫区的经费为 150 万美元(<http://www.affa.gov.au>)。可以肯定澳大利亚对梨火疫病的铲除是成功的。

梨火疫病 1986 年在挪威首次爆发, 挪威政府立即组织并实施了铲除行动, 首先在梨火疫病发生区周围建立了疫区, 面积约为 700km²。对疫区采取了严格的控制措施, 除了销毁病株外, 在疫区内铲除了两种感病的栒子属植物, 同时全面禁止了疫区内的果实和苗木贸易, 有效地控制了该病害传向挪威的其他地区。在传入初期, 病害传播很快, 但从 1990 年起, 发病率开始降低, 梨火疫病被限制在两种主要寄主上, 至 1992 年只在一种寄主上监测到发生, 1993 年没有检测到病害发生。1998 年, 挪威政府宣布梨火疫病在挪威被根除。但至 2000 年, 挪威又发现了梨火疫病, 目前正在根除中(EPPO, 2000)。

第五节 其他与梨火疫病相关的病害

除梨火疫病外, 还有几种病原细菌侵染梨和苹果, 有些病害所致症状与梨火疫病很相似, 有些病害在病原和病害名称上有待商榷或存在很大争议, 现简述之。

一、梨细菌性枝枯病

该病害是目前争议的热点,自本世纪处开始,就有文献报道日本有梨火疫病,但日本政府 1974 年声称以前的报道均是由于对病原菌的错误鉴定而引起的,日本从未发生过梨火疫病(Anonymous, 1974)。虽然有文献将日本列为梨火疫病发生的可疑地区,多数国家仍将日本视为无梨火疫病的国家。直至 1992 年,梨火疫病在日本存在的问题又被提出,原因是后藤正夫著的一本英文版的教科书(Goto, 1992)中描述了一种类似于梨火疫病的细菌病害,称之为“梨细菌性枝枯病”(bacterial shoot blight of pear, BSBP)。

该病 1971 年在日本北海道地区的梨树 *Pyrus ussuriensis* 上发生,经鉴定和致病性试验后,将病原定名为 *Erwinia amylovora* pv. *pyri*, 将所致病害命名为“梨细菌性枝枯病”,经调查,该病先后在岩见沢市美流渡、旭川市东旭川和神居及增毛町署寒沢梨园的“身不知”和“巴特利特”梨品种上发生。据称该病只侵染东方梨中的少数品种,不侵染苹果。

美国资深梨火疫病专家 Beer 等 1996 年与日本科学家 Tanii 合作,将来自北海道的 8 个 BSBP 菌株(其中 1 个菌株为 Tanii 1977 年分离保留,7 个为近年分离)与 76 个来自世界各地的 *E. amylovora* 代表菌株进行了比较,研究包括微生物学、血清学、分子遗传学和寄主专化性,结果如下:利用 BIOLOG™ 系统测定碳源利用情况和用克隆的 *E. amylovora* 的 *hrp* 基因簇与 BSBP 菌株的基因组 DNA 杂交显示,日本的“梨细菌性枝枯病”病原是 *E. amylovora* (Kim *et al.*, 1996),与 Tanii 等(Tanii *et al.*, 1981)的研究结果一致。

二、梨枝条黑腐病

该病仅发生于韩国,分布于汉河以北的 5 个地区:KaPyong、PoCheon、YangPyong、WhaChron 和 YangKu。为害梨树(*Pyrus pyrifolia*, 品种为 Shingo 和 Mansamgi),病原为新近发表的一个新种 *Erwinia pyrifoliae* sp. nov(Kim *et al.*, 1999)。症状与梨火疫病相似,主要为害梨树,也能够侵染苹果,但症状较轻。侵染枝条、树干、花序、幼果和叶片。在叶片中脉引起黑至褐色条斑,在叶片上产生褐色至黑色叶斑,病斑可扩散至整个枝条。在黑褐色溃疡斑的表皮下,树皮组织仍然呈绿色,与溃疡斑表皮下树皮组织呈红褐色的梨火疫病症状不同。在大范围内的梨树表现此症状,一个果园中的大多数梨树能够被侵染。该病害可以造成严重减产。病害最早于 1995 年被发现,在 1996~1998 年,连续发病流行。该病害以前在韩国没有描述,被认为是一种新病害,其流行病学资料需要进一步研究。从亚洲梨树病枝上分离的致病菌在营养琼脂培养基上产生白色黏性菌落,在 MM₂Cu 培养基(Bereswill *et al.*, 1998)上菌落浅黄色,在未成熟的梨果切片上产生明显的菌脓,在烟草上引起过敏反应。所有分离物均和梨火疫病菌专化抗血清产生明显的凝集反应,同时参试的梨火疫病菌也能够和该病菌的抗血清发生凝集反应;用免疫荧光技术也得到同样结果。用传统的选择分离、血清学检验、生理生化性状、致病性测定等技术,该病原菌应当被鉴定为 *Erwinia amylovora*;按照 DNA G+C 含量差异(2%),该病菌应当和梨火疫病菌为一个种。DNA 杂交数据表明该菌与梨火疫病菌有一定的差异,但仅根据与 3 个梨火疫病菌株 DNA 同源值的差异是否足以将其划分为独立的种,还是值得商榷。该病菌的分类地位及与典型的 *Erwinia amylovora* 种和“梨细菌性枝枯病菌”的关系正在继续

研究之中(Rhim *et al.*, 1999, Beer, 私人通信), 相信最终会有一个科学界定的。

三、梨褐色叶斑病

病原: 梨肠杆菌 *Enterobacter pyrinus*, 1979 年首次在韩国发现, 随后造成流行, 显著影响梨的产量(Hong *et al.*, 1985), 分布于 Yusong 地区。侵染梨树(*Pyrus pyrifolia*, 品种为 Shingo 和 Mansamgi)。经研究鉴定, 该病害由革兰氏阴性细菌引起, 最初定名为 *Erwinia pirina*(Chung *et al.*, 1990), 但没有被承认。由于 *Erwinia* 属分类的变动, 属内的一些种被移至 *Enterobacter* 属内, 该病菌经研究后以一个新种移入 *Enterobacter* 内(Chung *et al.*, 1993)。该病为害梨树叶片, 病害侵染规律及流行病学有待进一步研究。

梨枝条黑腐病菌、梨火疫病病菌和梨褐色叶斑病菌的培养性状、生理生化性状见表 24-4。

表 24-4 *Erwinia pyrifoliae*, *Erwinia amylovora* 和 *Enterobacter pyrinus* 的培养性状及生理生化性状的比较(引自 Rhim *et al.*, 1999)

项目	<i>Erwinia pyrifoliae</i>	<i>Erwinia amylovora</i>	<i>Enterobacter pyrinus</i>
游动性	+	+	+
利用葡萄糖发酵	+	+	+
葡萄糖氧化	+	+	+
产气	-	-	+
氧化酶	-	-	-
过氧化氢酶	+	+	+
精氨酸脱二氢酶	-	-	
β-半乳糖苷酶	-	-	
赖氨酸脱羧酶	-	-	
鸟氨酸脱羧酶	-	-	
色氨酸脱氨酶	-	-	
产硫化氢	-	-	+
脲酶	-	-	+
柠檬酸利用	-	-	+
产吲哚	-	-	-
产 3-羟基丙酮	+	+	+
硝酸还原	-	-	+
5%NaCl 生长	v	v	+
36℃ 生长	-	-	+
利用下列物质产酸:			
熊果苷	-	+	
七叶苷	-	(+)	+
纤维二糖	-	+	+

注: +表示阳性; -表示阴性; 空格表示未测; v 表示变化; (+)表示弱阳性。

梨和苹果是我国主要的水果品种，也是重要的出口创汇农产品之一。为了提高果品的品质，满足国内外市场的需要，国内曾多次从韩国和日本等地引进大量梨和苹果的苗木。目前日本已经被证明有梨火疫病分布(日本政府称之为“梨细菌性枝枯病”)。韩国新近发生的这两种病害，对梨能够造成严重危害，同时也能够危害苹果。因此我国从日本和韩国引进梨和苹果苗木的风险就很大，应当引起政府的重视。虽然目前关于韩国新近发生的这两种病害资料很不充足，根据SPS协议第五条第7款规定，可以采取临时植物检疫措施。按照风险评估的一般原理，可以借鉴和参照近似种的风险相关数据，因此建议政府参照梨火疫病的风险对梨枝条黑腐病实施检疫措施，暂列为一类检疫性有害生物，对梨褐色叶斑病也可以暂列为一类检疫性有害生物，待资料充足时，经过风险分析后再确定。

第六节 梨火疫病的检测和鉴定技术

一、植物病原的检测、鉴定及病害的诊断

植物病原的检测、鉴定以及病害的诊断是相互联系但又有明显区别的。检测是指在样品中确认是否存在特定的目标病原。病原鉴定是指通过各种手段，将未知的病原归属至已知的分类单元中。病害的诊断则是指对一个病害问题，通过观察症状、鉴定病因或检测有无特定病原等手段以了解该病害问题的实质、确定病因的过程。不考虑概念上的区别，病害的诊断和病原的鉴定均需要考虑专化性、灵敏度和速度。专化性是指得到或发现特定病原的能力，即在无特定病原存在的情况下不能产生假阳性，在有目标病原的前提下不能有假阴性。在选择性分离过程中，专化性主要受所用选择性培养基的影响；血清学方法中受抗血清质量和所使用技术的影响；在PCR扩增技术中主要受所选择引物和扩增条件控制。植物病害的诊断对专化性的要求比灵敏度要高得多，通常来说病害的诊断首先依靠病害的症状特点，然后考虑符合症状的少数病原，并且一般情况下，病组织中病原体密度很高。在大多数情况下，首先用选择性培养基分离培养，然后只挑选可疑菌落进行鉴定，鉴定结果的获得就表示诊断完成。种子、种块和植物种苗在调运时，为防止检疫性病害的传播和扩散，其检疫要求通常是零或接近于零带菌率。在植物样品中，通常由于病原菌含量很低，并且检测结果会影响随后采取的措施。因此，对于检测来说，灵敏度和专化性同等重要。

植物病原细菌的鉴定和分类技术发展至今，已经有许多微生物学的表型特征用于病原细菌的分类和鉴定，如基于专化抗原的血清学分析技术(ELISA等)、碳源利用的生化性状(BIOLOG)、脂肪酸组成(FAME)、多位点酶指标(MLEE)等。但有时表型特征难以得到确定的重复性，并且可能并不反映细菌间的遗传关系。与之相反，分子生物学方法是精确揭示遗传关系较为稳定的方法，在植物病原检测和鉴定中应用最多也是最重要的是专化性引物PCR技术。

二、梨火疫病的检验与检测

检测无症状植物材料上是否有火疫病菌是世界范围内蔷薇科种苗贸易中的极为重要的课题，如有对该菌灵敏、准确的检测方法就可能将传入机率降到最低。通常用半选择

性培养基分离病菌,根据梨火疫病病菌在不同培养基上菌落形态特征和对幼梨及嫩枝的致病性,或用 FITC 标记的多克隆抗体进行免疫荧光测定以判定是否是梨火疫病病菌。近期的核酸分析检测技术(核酸探针、PCR 技术等)使对梨火疫病病菌实行灵敏、快速的鉴定成为可能。

(一) 产地检疫检验

产地检验是一项最基本的检验措施,利用检测、鉴定和病害诊断技术来判断某特定地区或地点有无特定的病害发生。重点是在应检病虫害的发生盛期或危害高峰期到田间检查与观察,必要时须采集可疑标本在室内进行检测和鉴定。如日本对进口新西兰苹果的检疫措施就要求每年在苹果花期、果实生长期和收获期 3 次到新西兰的苹果出口基地进行产地检疫检验(Hale *et al.*, 1996),以保证进口的苹果不带火疫病病菌。

(二) 利用半选择性培养基分离病菌

利用半选择性培养基来分离和初步鉴别梨火疫病病菌是一项基本的工作,可以根据梨火疫病病菌在不同培养基上的菌落特征、颜色进行快速鉴定。直接分离的灵敏度大约为 $10^3\sim 10^5$ CFU/ml,目前已报道多种半选择性培养基用以分离和鉴定梨火疫病病菌。常见的几种如下。

MS 培养基: 由 Miller and Schroth(1972)发表,专门用于选择分离和培养梨火疫病病菌。*Erwinia amylovora* 在该培养基上菌落为橙红色,边缘光滑透明。少数假单胞菌和其他细菌的菌落为蓝色或绿色,培养基背景为蓝色,易与梨火疫病病菌区分。但 *Erwinia herbicola* 的菌落与梨火疫病病菌相似,不易区分,将其中的甘露醇用山梨醇代替,可抑制 *E. herbicola* 的生长。此培养基可用于梨火疫病病菌附生种群的分析,该培养基配方复杂,不易久贮。

CG 培养基: 由 Cross and Goodman(1973)设计研制,成分简单,梨火疫病病菌在该培养基上 29℃ 培养 48~72h 后,菌落上可形成许多火山口的特征,在带有斜射光的体视镜下清晰可见,但有少数菌株不产生火山口的特征或虽然产生但存在时间很短。只有熟悉梨火疫病病菌老龄菌落,才能正确识别。

TTN 培养基: 由 Ritchie and Klos(1978)设计,梨火疫病病菌在 22~23℃ 培养 36~48h,菌落直径 2.0~3.0mm,白垩色,中间略突,边缘整齐,有光泽,有独特的环状特征。*E. herbicola* 生长较快,菌落黄色,黏液状,无环。

TTC 培养基: 由 Weise(1981)设计发表,该培养基含红四氮唑和美福联,梨火疫病病菌在 27℃ 培养 2~3d,形成独特的红色肉瘤状菌落,易于与其他细菌区别。

CCT 培养基: 由 Ishimaru 等(1984)报道。梨火疫病病菌 27℃ 培养 3d,菌落直径 4.0~7.0mm,光滑、中凸、边缘整齐,菌落淡蓝色透明,从中心向外有蓝色辐射条纹。*E. herbicola* 在培养 2d 后,产生黄色带蓝色边缘或完全蓝色的菌落,直径 3.0~4.0mm。该培养基能够区分出混于 10^4 CFU/ml *E. herbicola* 中的一个梨火疫病病菌。已成功应用于检测无症状的苹果花、芽和溃疡斑上的梨火疫病病菌的检测和分离。

Zeller 改良培养基(NSA): Zeller(1982)设计改良,配方简单,含有颜料和 5% 的蔗糖,培养基的底色为墨绿色。梨火疫病病菌此培养基上 27℃ 培养 2~3d 后,菌落直径 3~7mm,橙红色,高度隆起半球状,中心色深,有蛋黄状中心环,光滑,边缘整齐。在该培养基

上 *Pseudomonas syringae* 菌落易与梨火疫病病菌混淆,可在金氏 B 培养基上进行鉴定,梨火疫病病菌不产生荧光。

MM₂Cu 培养基:由 Bereswill 等(1998)发表,在研究梨火疫病病菌与铜离子互作过程中,发现梨火疫病病菌的菌落能够被铜离子特异染成亮黄色,而其他的白色细菌没有该特点,在 MM₂ 培养基中加入 2mM 的 CuSO₄,作为梨火疫病病菌的鉴定培养基。

目前已经发表的关于梨火疫病病菌的选择性分离或鉴定培养基有许多种,每种培养基均有各自的优缺点,目前通常将两种或多种选择性培养基结合使用,取长补短,同时辅以其他方法验证,以达到最佳检测和鉴定目的。

(三) 致病性测定及过敏性反应

致病性测定是柯赫氏法则中最重要的一环,检测分离得到梨火疫病病菌后通常要进行致病性测定。一般利用幼梨或苹果和梨的幼苗来测定分离物的致病性,如果产生明显的特征性菌脓,就认为是梨火疫病病菌。一种快速、可靠的致病性测定方法是用针刺接种苹果实生苗,72h 后苗萎蔫、坏死并产生大量菌脓。利用梨的幼果测定梨火疫病病菌的致病性是最经典的方法,目前仍在广泛使用。用离体巴梨枝条测定梨火疫病病菌的致病性也很有效,接种的枝条在保湿条件下 28℃ 培养,如果是梨火疫病病菌,60h 后可从接种孔流出白色菌脓,如果不是梨火疫病病菌则无菌脓,接种孔干燥(张乐和石秀丽,1993)。

对梨火疫病病菌的致病性做生物分析仍是检测和鉴定梨火疫病病菌简单而有效的方法,但较费时。由于梨火疫病病菌存在无毒力和弱毒力菌株,用接种方法作生物测定并不一定都表现典型症状而造成漏检。较为快捷的是接种在烟草和蕃茄上观察过敏性反应特征。石楠(*Photinia serrulata*)是一种新的对梨火疫病病菌产生过敏性坏死反应的寄主,接种 24h 后,石楠叶片上出现明显的过敏性坏死现象(谢洪芳等,1998)。豇豆也可以作为测定梨火疫病病菌过敏性反应的材料(Lai and Hass, 1973)。

(四) 噬菌体检测

在植物病原细菌学中,可利用噬菌体检测和鉴定细菌。Katznelson(1950)首次利用噬菌体检测菜豆晕疫病。噬菌体技术已广泛应用于植物病原细菌的快速检测,该技术还可应用于植物病原细菌的鉴定、株系鉴别和病害预测预报及防治。Baldwin(1963)用噬菌体标记法测定苹果中火疫病病菌的传播,利用专化性寄主证明,除溃疡斑外,表观健康的芽是梨火疫病越冬的另一场所。Erskine(1973)研究了梨火疫病病菌的噬菌体在病害流行中的可能作用。庞道标(1993)利用从英国引进的噬菌体对噬菌体的专化性和对梨火疫病病菌的鉴定作用进行了研究,结果表明,该噬菌体专化性很好,可用来鉴定梨火疫病病菌。

噬菌体技术具有简单和快速的优点,但受到寄主专化性的影响,有些菌株具有抗性或耐受性,有时会出现假阴性。有些噬菌体寄主范围较宽,有可能造成假阳性。但总的来说,噬菌体技术作为一种细菌鉴定的辅助手段还是有较大的实用价值的。

(五) 免疫学检测方法

自 1918 年血清学技术首次应用于植物病原细菌(Anderson, 1961)研究以来,已经成为植物病原细菌检测和鉴定的重要方法,发展至今,该技术十分成熟,应用愈来愈广泛。

目前主要应用于植物病原细菌的技术主要有：酶联免疫分析技术、免疫荧光技术(包括免疫荧光细胞染色、荧光菌落染色)、奥氏双扩散(ODD)技术、玻片凝集技术(包括协同凝集技术)、免疫分离(包括磁免疫吸附分离)等技术(表 24-5)。这些技术自发明以来，基本都有改进或革新，愈来愈适应快速、准确及处理大量样品的要求。血清学技术最主要的缺点是受抗血清质量和专化性的限制。多克隆抗体制备简单，但通常和近缘细菌有交叉反应，饱和吸附虽然可以消除部分交叉反应，但常以降低效价为代价；单克隆抗体虽然专化性很好，但一般只能检测一个或几个血清型的细菌，并且制备复杂，技术和设备要求较高。通常要将几种单抗混合使用，以加大“检测谱”。

表 24-5 几种检测植物病原细菌技术的比较

方法	灵敏度 (CFU/ml)	专化性	优点	缺点
选择分离	10~10 ³	高	结果极可靠	S/P 比率高时，不易分离到，费时
免疫荧光	10 ² ~10 ³	取决于抗血清质量	快速，一般不需要纯培养	可能发生假阳性，不区分死活细胞
ELISA	10 ⁴ ~10 ⁶	取决于抗血清质量	快速，可处理大量样品	可能发生假阳性，不区分死活细胞
ODD	10 ⁸ ~10 ⁹	高度	结果可靠	需高浓度纯培养
凝集反应	10 ⁶ ~10 ⁷	中等	快速，适于检测大量样品	可能发生假阳性
免疫分离	50~100	较高	减低 S/P 比率，加大目标菌分离概率	所需时间较长

血清学技术是目前检测梨火疫病菌的主要方法之一(Lin *et al.*, 1987; Kbosel, 1986; Miller, 1983)。早期的许多学者的研究证明梨火疫病菌的菌株是一个同质的组(Billing *et al.*, 1961)。以前的研究显示，不同地区、寄主和不同时间分离的菌株之间没有典型的差异(Vanneste, 1995)。Morrill(1970)利用血清学技术鉴定从同一寄主上分离的越冬的致病和非致病菌株，认为致病性是种的区分特性，而非菌系特性。玻片凝集反应也广泛应用于试验鉴定梨火疫病菌(Arsenijevic *et al.*, 1994; Mazzucchi *et al.*, 1980)。玻片凝集反应经改进后已经直接用于检测样品(Mraz *et al.*, 1999)。欧洲和地中海植保组织(EPPO)制定的梨火疫病菌检疫程序中也利用玻片凝集反应对分离的病菌进行进一步鉴定(EPPO, 1992)。Gorris 等(1996a)利用梨火疫病菌的两个免疫原组分(EPS 和无荚膜的无毒突变体菌体)为免疫原，获得 8 个单克隆抗体，利用 48 株梨火疫病菌，45 株其他病原菌和 258 株蔷薇科植物附生细菌，用双抗夹心 ELISA 对这些单抗进行了评价，发现所有梨火疫病菌均能和这些单抗反应，2 株苹果附生细菌与 3 株单抗有交叉反应，将抗原煮沸 10min 后，交叉反应均消失。同时对这些抗体在其他血清学技术中的应用进行了评价，认为这些抗体混合或单独使用，可适用于免疫荧光、间接 ELISA、双抗夹心 ELISA、免疫印记等检测技术，能够对梨火疫病菌进行专化和灵敏的检测。ELISA 技术可在短期内检测大量样品，适于现场调查和流行病学研究(Vaerenbergh *et al.*, 1983)，在检测技术标准化和自动化方面

有独特优势。当使用多克隆抗体时,专化性较低但灵敏度较高。利用梨火疫病病菌代谢物作免疫原,通过间接 ELISA 方法检测梨火疫病病菌,具有很高的专化性,灵敏度可达 $10^2\sim 10^3$ CFU/ml(Laroche *et al.*, 1987)。而以全菌体作为免疫原制备的抗血清的间接 ELISA 和双抗夹心 ELISA 的检测灵敏度为 $10^5\sim 10^6$ CFU/ml(Hutschemacker, 1987)。ELISA 技术目前经改进后,灵敏度和专化性大大增强。Gorris 等(1996b)用浸提缓冲液处理样品,然后加入相应的培养液,培养 36h 后加热处理,利用抗胞外多糖和全菌体的单克隆抗体混合进行双抗夹心 ELISA,成功地对梨火疫病样品进行了检测,灵敏度可达 10~100 个细菌,与作为比较的 PCP 技术(Bereswill *et al.*, 1992)的灵敏度相当而高于分离培养技术。免疫荧光技术以其快速、灵敏和直观等特点,广泛应用于对梨火疫病病菌的检测和鉴定(Miller, 1983; Calzolar, 1982)。Robert(1980)对利用间接免疫荧光技术检测梨火疫病病菌中存在的问题进行了较为详细的研究,认为样品经离心浓缩后能增加检测结果的阳性率;与 *Erwinia herbicola* subsp. *anas*、*E. stewartii*、*E. rhapontici* 以及两株附生的 *Pseudomonas fluorescens* 有交叉反应;玻片凝集反应只与 *E. herbicola* subsp. *herbicola*、*P. fluorescens* 有交叉反应;饱和吸附后,在玻片凝集反应中可完全消除交叉反应,但在免疫荧光中只能部分消除交叉反应;认为免疫荧光技术与传统的分离培养技术相比,灵敏度高而专化性差。Ehrig 等(1984)利用间接免疫电镜技术对梨火疫病病菌进行了鉴定。van Laere(1985)利用免疫金银法对梨火疫病病菌进行检测,认为该方法优于直接免疫荧光法。Zutra(1986)应用斑点免疫分析(DIA)成功对梨火疫病样品进行了检测。免疫吸附分离法是近年发展起来的新技术,采用半选择性培养基与常规免疫学方法相结合,提高了对目标菌的有效选择,可排除对抗血清产生假阳性反应微生物的干扰,检测灵敏度可达 10~100cell/ml(谢洪芳等, 1998)。胡白石和许志刚(1998)建立了膜上免疫分离技术,成功地对梨火疫病病菌进行了检测并提高了免疫分离的可操作性。

(六) 核酸探针杂交技术及多聚酶链式反应(PCR)技术

核酸探针技术是利用带有适当标记物的核酸片段,体外通过碱基配对与特定的靶序列结合形成双链复合物,通过放射自显影或化学显色成为可见信号。目前应用较多的是 ^{32}P 标记的总 DNA 制成的探针,专化性很好,不与其他细菌发生交叉反应,可检测灵敏度约 $10^2\sim 10^5$ 个菌体。用地高辛标记 pEA29 质粒上 0.5kb 的 *salI* 片段制成的非放射性探针,与放射性探针相比专化性增强但灵敏度稍低(Steinbrenner *et al.*, 1990),处理大量样品非常费时,已被灵敏度及专化性更高的 PCR 取代。

(七) 利用 PCR 技术检测植物病原细菌的策略

PCR 检测技术是利用相应的引物,在 DNA 聚合酶催化下对目标 DNA 进行体外扩增,根据预期 DNA 条带的有无来判断检测的结果。该技术已经在各领域内广泛用于对各种微生物进行专化和灵敏的检测。由于检测是对目标 DNA 实行扩增,因此 PCR 技术不能区分活细菌细胞和 DNA 未降解的死亡细菌细胞。

通常有下列专化性基因和 DNA 序列供设计 PCR 引物用于检测和鉴定病原菌。

1. 利用病原菌的致病基因

在许多文章中都报道了利用病原的专化性致病基因来设计 PCR 引物,以检测和鉴定病原菌(Darrasse *et al.*, 1994; Dreier *et al.*, 1995; Gillings *et al.*, 1993; Verdier *et al.*, 1998)。例如, *Agrobacterium* 的菌株由于存在不同的质粒而引起不同的症状,所有的致病性菌株都含有毒性基因(*vir*),该基因介导细菌 DNA 进入寄主细胞。根据对该细菌致病的深入了解,许多学者根据致病基因设计了多条引物。Haas 等(1995)利用 *virD2* 基因高度保守的编码核酸内切酶的部分设计引物,对农杆菌(*Agrobacterium*)的致病性菌株进行了特异性检测。Darrasse 等(1994)针对 *Erwinia carotovora* 的果胶裂解酶基因设计引物,扩增该基因的一段 434bp 的片段,能够鉴定所有的产果胶裂解酶的亚种,包括 *atroseptica*, *carotovora*, *odorifera* 和 *wasabiae*。van der Wolf 等(1995)利用果胶裂解酶基因(*pel*)(Nassar *et al.*, 1996)设计引物,用于鉴定 *Erwinia chrysanthemi* 的菌株。针对形成坏死基因(*nec1*)(链霉菌致病性可靠的指示基因),Bukhalid 等(1997)设计的引物结合从土壤中快速提取 DNA 的方法,可以专化性检测土壤中的链霉菌。根据病原菌的毒性因子,如乙烯形成基因(*efe*)(Sato *et al.*, 1997),环 lipodepsinonapeptide 生物合成基因(*syrB* 和 *syrD*, Sorensen *et al.*, 1998)和冠瘿碱生物合成基因(Bereswill *et al.*, 1994)等,设计引物进行扩增,虽然这些引物并不是为专门检测和鉴定进行设计的,但仍可用于此目的。Takahashi 等(1996)设计引物专化检测 *Pseudomonas syringae* pv. *atropurpurea* 与致病性和产冠瘿碱相关的 pCOR1 质粒,对纯培养的检测灵敏度可达 0.1~1.0CFU/ml,也可用于直接检测植物组织中的细菌。不同的毒性小种含有不同的毒性基因,为在种群中快速专化鉴定特定毒性小种提供了可能途径。

2. 扩增未知的 DNA 片段

未知功能的 DNA 片段序列已经被用来设计专化性 PCR 引物。通常在特定的种中能够鉴定出独特的 DNA 片段,这些片段序列可以设计确定专化性引物以研制灵敏和专化的病害检测和诊断方法。可利用的片段有克隆的 RAPD 片段以及未知位点的探针(van der Wolf *et al.*, 1996)。这些目标片段对于长期的检测并不是很理想,因为对这些未知片段的序列的变异性或稳定性并不清楚。

3. 扩增质粒 DNA

已经有几种病原细菌的质粒作为检测或鉴定的 PCR 模板。前面所述的致病基因和未知功能片段也包括质粒 DNA。基于该策略的 PCR 技术最关心的应当是质粒基因必须编码重要的致病相关物质和质粒的稳定性。在有些情况下,针对质粒的专化性引物并不能扩增所有具有致病性的菌株。如基于质粒的引物 X4c 和 X4e(Toth *et al.*, 1998)并不能全面检测菜豆普通疫病的黄单胞菌(Audy *et al.*, 1994);扩增 *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* 质粒的引物只能检测 75%的菌株(Dreier *et al.*, 1995)。从 pCS1 质粒的类似于启动子序列设计的引物能够专化检测 *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*,但不含质粒的菌株就不能被检测到(Schneider *et al.*, 1993)。与之相反,另一从质粒序列设计的专化性引物能够检测所有的测试菌株,其中包括一株用其他引物(Schneider *et al.*, 1993)检测不到的被认为缺少一种质粒的菌株(Rademaker *et al.*, 1994)。用于扩增质粒的专化性

引物也同样在检测柑橘溃疡病菌中得以应用, 来检测引起柑橘溃疡的 *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri* 的 A 致病型(联邦检疫性病害)(Hartung *et al.*, 1993, 1996)。Verdier 等(1998)设计了专化扩增 *Xanthomonas axonopodis* pv. *manihotis* 致病性菌株质粒的引物, 可以专化性扩增该病原的致病性菌株, 而 *X. axonopodis* pv. *manihotis* 的非致病性菌株和木薯相关的附生菌没有扩增信号。

质粒 DNA 可以作为检测病原细菌和鉴定病原的可靠的靶标, 与植物病原细菌的致病相关基因一样, 对质粒 DNA 的本质的研究有助于长久利用扩增质粒的 PCR 技术和增加检测的可信度。

4. 以核糖体 DNA 为基础的 PCR 分析技术

细菌核糖体 DNA 的操纵子由 3 个保守的功能和进化基因组成, 它们是 16S rDNA、23S rDNA 和 5S rDNA, 由可变异的转录间隔区(ITS)分隔(Schmidt, 1994)。根据核糖体的特性有多种策略可以应用。扩增 DNA 保守区域的引物通常称做通用引物, 已经在广泛的系统进化变异细菌中应用, 来扩增核糖体基因片段。通过核糖体基因库(Maidak *et al.*, 1999, <http://www.cme.msu.edu/RDP/>)和核糖体基因扩增产物的序列分析, 选择病菌专化序列, 设计专化引物, 可以用来专化检测病原细菌。

植物病原细菌中属的专化核糖体序列已经研究得比较透彻(DeParis and Roth, 1990)。对于假单胞菌、黄单胞菌, 特别是植原体, 都已经设计出了属的专化引物。最近有一篇综述较为系统地介绍了植原体的 PCR 检测和鉴定方法(Lee *et al.*, 1998)。Widmer 等(1998)利用高度选择性的引物扩增了假单胞属的 16S rRNA 基因, 这些 PCR 引物甚至可以从土壤中纯化的 DNA 中扩增出靶标片段。Maes(1993)设计了黄单胞菌专化引物, 能够对小麦浸提液中的黄单胞菌实行检测。Seal 等(1993)等设计的引物扩增 *Ralstonia solanacearum* 的 16S rDNA 片段, 灵敏度达 1~10CFU/ml。该引物能够扩增 *R. solanacearum* 的已知小种或生化型, 但与马铃薯相关的其他细菌发生交叉反应(Wullings *et al.*, 1998)。

由于 23S rDNA 的碱基数目多于 16S rDNA, 其碱基序列变异概率也大于 16S rDNA, 因此通常认为以 23S rDNA 序列设计引物, 容易找到专化性位点, 特异扩增的效率要高于从 16S rDNA 序列设计的引物。如以梨火疫病病菌 23S rDNA 序列设计的专化性引物, 对该病菌实行了专化性扩增(Maes *et al.*, 1996)。

5. 转录间隔区(ITS)PCR

ITS 指 16S rDNA 和 23S rDNA 间的核酸序列, 通常包括几个 *tRNA* 基因和非编码区(Schmidt, 1994)。通常认为该区域受到的选择压力较小, 因此变异程度较 16S 和 23S rDNA 大。当使用通用引物时, 可以根据 PCR 产物的数量和长度来鉴定细菌(Jensen *et al.*, 1993)。为增加专化性, 可以对 ITS 的 PCR 产物进行限制酶分析(REA)或进行 DNA 测序。可以根据 ITS 序列内的专化序列设计引物, 对病原细菌进行专化性检测和鉴定。实施这一策略的通常程序是, 首先利用通用引物对目标菌和仔细选择的近缘细菌的 ITS 进行扩增, 在测序的基础上进行序列比较, 利用非同源片段设计专化引物(Maes *et al.*, 1996)。

6. 扩增的核糖体 DNA 限制性分析(ARDAR)

扩增的核糖体 DNA 限制性分析是指利用通用引物对靶标细菌的核糖体基因进行扩增,然后用常用的限制性内切酶对 PCR 产物进行消化,根据消化产物的多态性在属或种的水平来对细菌菌株进行鉴定或分类(Bereswill *et al.*, 1995)。

7. 16S rDNA 的 PCR 扩增和序列分析

病害相关的未知细菌,无论是否可以培养,都可用 PCR 技术进行 16S rDNA 的扩增,并且对部分序列进行序列分析。目前已经超过 6200 个菌株的 16S rDNA 序列发表在 RDP 数据库中,可通过互连网利用计算机程序与这些菌株的序列进行比较。这样就可以对未知细菌进行初步鉴定,至少可以将其置于一个系统发育的分类单元内。对于后者来说,可以根据其亲缘关系最近的“近亲”来推断未知病原的生物学和生态学,并且可以洞察该未知细菌所致病害的风险。随着 RDP 数据库的扩充与发展,*rRNA* 基因的序列分析将在不需要常规实验手段的条件下越来越有助于鉴定新的或未知病原菌以及植物病害相关的微生物。例如,新近在美国发生的未知病因的甜瓜叶脉黄化病,利用显微镜对被侵染的韧皮部分分析,发现该病害与一种类似于细菌的微生物有关(Bruton *et al.*, 1998),利用分离、血清学、传病试验和 DNA-DNA 杂交技术均不能确定病因(Bruton *et al.*, 1998),利用 16S rDNA 的 PCR 扩增结合序列分析,将病因鉴定为一种原始细菌(proteobacterium)(Avila *et al.*, 1998)。

(八) 革新的 PCR 技术

PCR 技术发展至今,无论从理论和实际应用方面都有长足的发展。在植物病害诊断和病原检测与鉴定中,在传统的应用基础上,又有了创新。随着方法学的发展和进步,PCR 技术与其他技术结合,产生了更加灵敏和专化的检测技术。PCR-ELISA 技术是 PCR 技术与免疫学技术的结合,该技术利用免疫检测技术代替了电泳,目前已应用于植物病原细菌的检测,灵敏度可达单个 CFU/反应样品。与免疫学技术结合的免疫捕捉 PCR (immuno-capture-PCR) 技术,利用包被特异抗血清的磁珠,富集靶标细菌,同时可除去样品中 PCR 反应的抑制因子,增加了 PCR 扩增的灵敏度,已应用于梨火疫病菌的检测(Guiford *et al.*, 1996);在柑橘溃疡病菌的检测中,经过免疫捕捉后再进行 PCR 反应,可以检测到单个菌体(Hartung *et al.*, 1996)。

在有些情况下,遗传学差异很大的细菌在同一寄主上可引起相似的症状,这对病害的诊断带来了困难。如菜豆上的两种病原细菌 *Xanthomonas axonopodis* pv. *phaseoli* 和 *X. axonopodis* pv. *phaseoli* var. *fuscans*, 尽管这两种细菌的 DNA-DNA 同源率只有 64%,将 *X. axonopodis* pv. *phaseoli* var. *fuscans* 的专化性引物与 *X. axonopodis* pv. *phaseoli* 的专化引物(Audy *et al.*, 1994, 1996)相结合,可以同时检测并区分这两种病原细菌。这种利用多对引物同时扩增不同靶标 DNA 的 PCR 技术称做多重 PCR(multiplex-PCR)。与免疫学结合而衍生的 multiplex-PCR-ELISA 技术已经用于马铃薯环腐病菌的检测,能对单个菌体进行扩增(Mills and Russes, 1998)。多重 PCR 技术可以同时检测同一植物材料上的不同病原或经一次扩增就可区分由不同病原引起的相似症状。该技术可以将多次扩增鉴定或

检测简化为一次扩增,灵敏度和专化性均会大大增强,是将来植物病害检测或鉴定的分子检测技术的发展方向。如对稻种上的黄单胞的检测,可以将白叶枯病菌(*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*)和条斑病菌(*X. oryzae* pv. *oryzicola*)的专化性引物结合,同时对检测稻种进行扩增,根据特异性扩增条带的单独或同时出现,就可以经一次扩增来检测稻种是否带有白叶枯病菌或条斑病菌或同时带有这两种病菌。又如,针对目前梨树上新发生的类似于梨火疫病的梨枝条黑腐病 *Erwinia pyrifoliae*(Rhim *et al.*, 1999),可以利用多重 PCR 技术,将这两种病原细菌的专化性引物组合,一次扩增就可以鉴定是哪一种病原。但多重 PCR 技术要求较高,选用的引物要求有相近的退火和延伸温度,靶标片段要有足够的大小差异,才能在电泳时加以区分。利用多重 PCR 技术已经对菜豆种子上的黄单胞和菜豆晕疫病菌进行同时检测(Audy *et al.*, 1996)。

PCR 技术具有其他检测技术无可比拟的优点,但该技术也有许多缺点。首先 PCR 反应的操作程序应当严格控制,稍有不慎就可能造成假阳性。不能区分菌的死活。实验条件的改变,如使用不同的 PCR 仪就有可能影响检测的专化性(Hyman *et al.*, 1997)。因此要严格遵守已经发表的操作程序,如果没有现成的操作程序,必须反复调试和检查,直至得到最优结果。PCR 技术的最大缺点是不适宜大规模处理样品,利用电泳或 Southern 杂交来显示结果,通常费时并且不适宜大量样品。虽然 PCR 技术理论上可以检测单个菌体,这都是在利用纯菌、在没有反应抑制因子存在的前提下得到的结果。直接对样品进行扩增,由于植物组织中含有大量酚类物质、碳水化合物等,这些物质能够严重影响 PCR 反应。因此直接对样品进行检测的灵敏度通常要低得多。灵敏度低的又一原因是加入 PCR 反应体系中的样品体积非常小,通常为 1~5 μ l,如果用 cell/ml 表示,该数字将会很大。如利用 PCR 技术检测马铃薯块浸提液中的 *E. carotovora* subsp. *atroseptica* 的实际灵敏度大约为 10⁶cell/ml,与 ELISA 技术的灵敏度相仿(van der Wolf *et al.*, 1996)。

(九) 检测梨火疫病菌的 PCR 技术

Bereswill 等(1992)利用梨火疫病菌的 pEA29 质粒上 0.9kb 的 *psfI* 片段,该质粒被认为是在梨火疫病菌的自然种群中稳定存在的,经部分测序,合成了两条 17-mer 的寡核苷酸引物,特异性扩增梨火疫病菌,检测灵敏度可达 50 个菌体细胞,并在 6h 内可得结果。所有梨火疫病菌的菌株经测试都有该目标 DNA 存在(Bereswill *et al.*, 1992)。尽管有文献报道 pEA29 质粒上根本不存在这两条引物序列,但并不影响对梨火疫病菌的检测(McManus and Jones., 1995)。近期的研究表明,该质粒的扩增片段中的重复序列数目并不稳定,用该片段的酶解图谱来鉴定菌株不是很可靠(Schnabel and Jones., 1998)。蔷薇科植物上的一些附生菌用这两条引物亦扩增出相似片段,但可以减少退火或延伸时间来避免假阳性。Bereswill 等人(1995)利用梨火疫病菌的 *ams* 基因设计了一对引物,对梨火疫病菌实行特异性扩增,专化性极好,由于 *ams* 基因的拷贝数很低,因此灵敏度只有扩增 pEA29 质粒 PCR 技术的 1/10(500 细胞)。同时利用扩增细菌 16S rDNA 的通用引物,扩增梨火疫病菌的 16S rDNA,经 *Hae* III 消化后,梨火疫病菌得到了特异性谱带。利用 AP-PCR 也能够特异性扩增梨火疫病菌(Bereswill *et al.*, 1995)。16S rDNA-PCR+*Hae*III 消化和 AP-PCR 通常只能用来鉴定梨火疫病菌,而不适用于检测。Guiford 等(1996),利用核酸探针技术,寻找到一个与梨火疫病菌 DNA 特异杂交的片段,经克隆、测序后,设计

两个 30-mer 的引物，不与其他相关细菌发生反应；由于组织样品中有抑制 PCR 反应的因子存在，因此只有当除去抑制因子并且细菌密度达到 10^6 CFU/ml 时才能检测到梨火疫病病菌；利用富集培养技术，可以检测到组织液中 10^2 CFU/ml 的目标菌；利用免疫磁珠分离纯化后，检测水平可达 10 CFU/ml 组织液。McManus and Jones(1995)利用套式 PCR 技术检测梨火疫病病菌，灵敏度可达检测单个菌体以下且特异性更强，采用的 PCR-斑点印迹(PCR-Dot-Blot)和反印迹杂交(Reverse-Blot-Hybridization)检测水平为 20 个菌体，而作为对照的单轮 PCR 技术的检测水平为 200 个菌体。Maes 等(1996)利用梨火疫病病菌的 23S rRNA 核酸序列，设计了一对引物，能够对梨火疫病病菌进行特异性扩增，但同时能够扩增 *Escherichia coli*，不和其他腐生细菌发生反应，可以用于对无症状样品进行检测。Merighi 等(2000)利用 PCR-ELISA 技术对梨火疫病进行了检测，检测人工接种的梨枝条，灵敏度达 4×10^2 CFU/g。扩增梨火疫病病菌的引物序列及扩增靶标见表 24-6。

表 24-6 用于扩增梨火疫病病菌的引物序列及扩增靶标

引物序列(5'-3')	引物名称	靶标 DNA	参考文献
GCTACCAGCAGGGTGAG	AMSbL	<i>Ams</i> 基因	Bereswill <i>et al.</i> , 1995
TCATCACGATGGTGATG	AMSbR		
AGAGTTTGATCATGGCTCAG	rD2	16S rDNA	
ACGGTTACCTTGTTACGACTT	rP1		
ATTCCGAATGGGGIAACCC	C1	23S rDNA	Maes <i>et al.</i> , 1996
GTGAGCT(G/A)TTACGC	C2		
TGTCTCACGACGTTTAAACCCAGCTC	C3		
GCGCAGTAAAGGGTGACAGCCCCGTACACAAAAAAGGCCT	EaF	23S rDNA	Maes <i>et al.</i> , 1996
CCCTAGCCGAAACAGTGCTCTACCCCCGG	EaR		
CGGTTTTTAACGCTGGG	A	pEA29 DNA	Bereswill <i>et al.</i> , 1992
GGGCAAATACTCGGATT	B		
CGTATTCACGGCTTCGCAGAT	AJ75	Plasmid	McManus <i>et al.</i> , 1995a
ACCCGCCAGGATAGTCGCATA	AJ76	DNA	
TTGTACACACCCCGGTAC	16S	ITS	McManus <i>et al.</i> , 1995b
GGTACCTTAGATGTTTCAGTTC	23S		

(十) 其他检测方法

除了上述检测和鉴定梨火疫病病菌的方法外，还有一些检测方法，如传统的生理生化反应测试、菌体脂肪酸分析以及国内外自动或半自动的专家鉴定系统等。Biolog 细菌自动鉴定系统是一种快速并具有较高自动化程度的鉴定系统，通过分析细菌的代谢过程，根据“代谢指纹图谱”对待测菌株快速检测。由于不同菌株的生理代谢不尽相同，数据库中的标准菌株也不多，常造成误判，故鉴定结果还不十分理想。

(胡白石 刘凤权)

主要参考文献

- 戴芳澜, 相望年, 郑儒永. 1958. 中国经济植物病原目录. 北京: 科学出版社[Dai F L, Xiang W N, Zheng R Y 1958. List of Pathogens of Economic Plants in China. Beijing: Science Press]
- 胡白石, 许志刚. 1998. 膜上免疫分离法的建立及在种传细菌检疫中的应用. 中国农业大学学报, 3(5): 106~110 [Hu B S, Xu Z G. 1998. Establishment of immuno-isolation on membrane and the application in seed-borne bacteria detection. *Journal of China Agricultural University*, 3(Supplement): 106~110]
- 胡白石, 许志刚, 周国梁等. 2001. 梨火疫病的进境风险分析. 植物保护学报, 4: 303~308 [Hu B S, Xu Z G, Zhou G L *et al.* 2001. Import risk analysis of fire blight to China. *Acta Phytophylacica Sinica*, 28(4): 303~308]
- 庞道标. 1993. 梨火疫病菌一株噬菌体部分性状的测定. 植物检疫, 7(4): 287 [Pang D B. 1993. Character test of a phage of *Erwinia amylovora*. *Plant Quarantine*, 7(4): 287]
- 王鸣歧. 1950. 河南植物病害名录. 华北农业科学研究所研究专刊, 2: 1~23 [Wang M Q. 1950. List of plant disease in Henan. *Journal of North China Agricultural Institute*, 2: 1~23]
- 谢洪芳, 沈秀萍, 许志刚. 1998. 梨火疫病菌的免疫检测. 农业生物技术学报, 6(4): 342 [Xie H F, Shen X P, Xu Z G, 1998. immuno-detection of *Erwinia amylovora*. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 6(4): 342]
- 张乐, 石秀丽. 1993. 用离体巴黎枝条测定梨火疫病菌的致病性. 植物检疫, 7(2): 104~105 [Zhang L, Shi X L, 1993. *In vitro* pathogenicity test of *Erwinia amylovora* by using of shoot of Bartlett pear. *Plant Quarantine*, 7(2): 104~105]
- 中国动植物检疫局, 中国农业部. 1997. 中国进境植物检疫有害生物选编. 北京: 中国农业出版社 [China Animal and Plant Quarantine Service, China Ministry of Agriculture. 1997. Selected Pests of Plant Quarantine Significance to China. Beijing: China Agricultural Press]
- AAPGA. 1996. Technical review of factors relating to import of apples from countries with fire blight. Submission by the Australian Apple and Pear Growers Association
- Anderson A. 1961. Testing seeds for seedborne organisms. In: Streffcrud A ed. Seeds. The yearbook of agriculture. 453~457
- Anonymous. 1974. Report Eur & Mediterranean Plant Pro. Org. reporting service Ref. 74/3~380 SRE
- AQIS. 1998. Final import risk analysis of the New Zealand request for the access of apples into Australia
- Arsenijevic M. 1994. Serological identification of *Erwinia amylovora* bacterium, a pome tree pathogen. *Zastita Bilja*, 45(4): 273~278
- Arthur J. 1885. Proof that bacteria are the direct cause of the disease in trees know as pear blight. *American Association for the Advancement of Science Proceedings*, 34: 295~298
- Audy P, Laroche A, Saindon G *et al.* 1994. Detection of the bean common blight bacteria, *Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli* and *X. c. phaseoli* var *fuscans*, using the polymerase chain-reaction. *Phytopathology*, 84: 1185~1192
- Avila F J, Bruton B D, Fltcher J *et al.* 1998. Polymerase chain reaction detection and phylogenetic characterization of an agent associated with yellow vine disease of cucurbits. *Phytopathology*, 88: 428~436
- Baldwin C H. 1963. Prevalence of *Erwinia amylovora* in apple buds as detected by phage typing. *Phytopathology*, 53: 1299~1303
- Bell R L, Janick J, Zimmerman R H, Van der Zwet T. 1997. Estimation of heritability and combining ability for fire blight resistance in pear. *J. Am. Soc. Hortic. sci.*, 102: 3799~3738
- Bereswill S, Bugert P, Bruchmuller I *et al.* 1995. Identification of the fire blight pathogen, *Erwinia amylovora*, by PCR assays with chromosomal DNA. *Appl. Environ. Microbiol.*, 61: 2636~2642
- Bereswill S, Bugert P, Volksch B *et al.* 1994. Identification and relatedness of coronatine-producing *Pseudomonas syringae* pathovars by PCR analysis and sequence determination of the amplification products. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60: 2924~2930
- Bereswill S, Pahl A, Bellemann P *et al.* 1992. Sensitive and species-specific detection of *Erwinia amylovora* by polymerase chain-reaction analysis. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58: 3522~3526
- Bereswill S, lock S, Bellmann P *et al.* 1998. Identification of *Erwinia amylovora* by growth in the presence of copper sulfate and by capsule staining with lectin. *Plant Disease*, 82:158~164
- Billing E. 1992. Billing's revised system (BRS) for fire blight risk assessment. *EPPO Bull.*, 22(1): 1~102
- Billing E. 1976. Weather and fire blight in English. *Am. Appl. Soil*, 82:259~266
- Billing E, Baker LAE, Crosse J E *et al.* 1961. Characteristics of English isolates of *Erwinia amylovora* (Burrill)Winslow *et al.* *Journal of Applied Bacteriol.*, 24: 105~211

- Bruton B D, Fletcher J, Pair S D *et al.* 1998. Association of a phloem-limited bacterium with yellow vine disease in cucurbits. *Plant Dis.*, 82: 512~520
- Bukhalid R A, Loria R. 1997. Cloning and expression of a gene from *Streptomyces scabies* encoding a putative pathogenicity factor. *J. Bacteriol.*, 179: 7776~7783
- Burrill T J. 1880. Anthrax of fruit trees or the so-called fire blight of pear, and twig blight of apple trees. *American Association for the Advancement of Science Proceedings.*, 29: 583~597
- Calzolar A. 1982. Crossing-reactions between *Erwinia amylovora* and other bacteria in immunofluorescence staining using different antisera. *Phytopathologia Mediterranea*, 21(2/3): 110~112
- Campbell R J, Fell R D, Marini R P. 1991. Canopy position, defoliation, and girdling influence apple nectar production. *Hort Science*, 26: 531~532
- Chiou C S, Jones A L. 1993. Nucleotide sequence analysis of a transposon (Tn5393) carrying streptomycin resistance gene in *Erwinia amylovora* and other gram negative bacteria. *J. Bacteriol.*, 175: 732~740
- Chung Y R, Brenner D J, Steigerwalt A G *et al.* 1993. *Enterobacter pyrinus* sp. nov., an organism associated with brown leaf spot disease of pear trees. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 43(1): 157~161
- Chung Y R, Kim B S, Kim H T *et al.* 1990. *Erwinia pirina* sp. nov., a causal organism of brown leaf spot of pear. *Korean J. Plant Pathology*, 6: 311
- Crepel C, Geenen J, Maes M. 1996. The latent survival of *Erwinia amylovora* in hibernating shoots. *Acta Horticulturae*, 411: 21~26
- Darrasse A, Kotoujansky A, Bertheau Y. 1994. Isolation by genomic subtraction of DNA probes specific for *Erwinia carotovora* subsp *atroseptica*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60: 298~306
- Deparasis J, Roth D A. 1990. Nucleic-acid probes for identification of phytopathogenic bacteria—identification of genus-specific 16S ribosomal-RNA sequences. *Phytopathology*, 80: 618~621
- Dreier J, Bempohl A, Eichenlaub R. 1995. Southern hybridization and PCR for specific detection of phytopathogenic *Clavibacter michiganensis* subsp *michiganensis*. *Phytopathology*, 85: 462~468
- Eastwell K C, Willis L G, Cavaleer T D. 1995. A rapid and sensitive method to detect *Agrobacterium vitis* in grapevine cuttings using the polymerase chain-reaction. *Plant Dis.*, 79: 822~827
- Ehrig F, Zielcke R, Siebert V. 1984. Use of the colloidal gold technique for the immune electron microscopic identification of phytopathogenic bacteria. *Archiv fur Phytopathologic und Pflanzenschutz*
- EPPO. *Erwinia amylovora* found again in Norway. EPPO Reporting Service 2000/135
- Erskine J M. 1973. Characteristic of *Erwinia amylovora* bacteria phage and its possible role in the epidemiology of fire blight. *Canadian Journal of Microbiology*, 19(7): 837~845
- Ge Q, van der Zwet T. 1996. Persistence and recovery of endophytic *Erwinia amylovora* in apparently healthy apple tissues. *Acta Horticulturae*, 411: 29~34
- Gillings M, Fahy P, Davies C. 1993. Restriction analysis of an amplified polygalacturonase gene fragment differentiates strains of the phytopathogenic bacterium *Pseudomonas solanacearum*. *Lett. Appl. Microbiol.*, 17: 44~48
- Gorris M T, Camarasa E, López M M *et al.* 1996a. Production and characterization of monoclonal antibodies specific for *Erwinia amylovora* and their use in different serological techniques. *Acta Horticulturae*, 411: 58~61
- Gorris M T, Cambra M, Llop P *et al.* 1996b. A sensitive and specific detection of *Erwinia amylovora* based on the elisa-dasi enrichment method with monoclonal antibodies. *Acta Horticulturae*, 411: 63~65
- Goto M. 1992. *Fundamental of bacterial plant pathology*. Academic Press. 342pp.
- Gowda S S, Goodman R N. 1970. Movement and persistence of *Erwinia amylovora* in shoot, stem and root of apple. *Plant Dis. Repr.*, 54: 576~580
- Guiford P J, Taylor R K, Clark R G *et al.* 1996. PCR-based techniques for the detection of *Erwinia amylovora*. *Acta Horticulturae*, 411: 53~56
- Haas J H, Moore L W, Ream W *et al.* 1995. Universal PCR primers for detection of phytopathogenic *Agrobacterium* strains. *Appl. Environ. Microbiol.*, 61: 2879~2884
- Hale C N. 1996. Quarantine and market access. *Acta Horticulturae*, 411: 63~65
- Hartung J S, Daniel J F, Pruvost O P. 1993. Detection of *Xanthomonas campestris* pv. *citri* by the polymerase chain reaction method. *Appl. Environ. Microbiol.*, 59: 1143~1148
- Hartung J S, Pruvost O P, Villemot I *et al.* 1996. Rapid and sensitive colorimetric detection of *Xanthomonas axonopodis* pv *citri* by immunocapture and a nested-polymerase chain reaction assay. *Phytopathology*, 86:95~101

- Hatting M J, Beer S V, Lawson E W . 1986 . Scanning electron microscopy of apple blossoms colonized by *Erwinia amylovora* and *E. herbicola*. *Phytopathology*, 76: 900-904
- Hong K H, Kim Y S, Kim W C *et al.* 1985. Studies on the abnormal spot disease of pear leaves. *Res. Rep. Rural. Dev. Admin. (Hortic)(Suwon)*, 27: 46-55
- Hutschemacker J. 1987. Production of rat monoclonal antibodies specific to *Erwinia amylovora*. *Acta Horticulturae*, 217: 71-76
- Hyman L J, Dewasmcs V, Toth I K *et al.* 1997. Improved PCR detection sensitivity of *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica* in potato tuber peel extract by prior enrichment on a selective medium. *Lett. Appl. Microbiol.*, 25: 143-147
- Ishimaru C A, Klos E J, Brubaker R R. 1998. Multiple antibiotic production by *Erwinia herbicola*. *Phytopathology*, 78: 746-750
- Ivanoff S S, Keitt G W. 1941. Relations of nectar concentration to growth of *Erwinia amylovora* and fire blight infection of apple and pear blossoms. *J. Agric. Res.*, 62: 733-743
- Jensen M A, Webster J A, Straus N. 1993. Rapid identification of bacteria on the basis of polymerase chain reaction-amplified ribosomal DNA spacer polymorphisms. *Appl. Environ. Microbiol.*, 59: 945-952
- Johnson K B, Stockwell V O, Burgett D M *et al.* 1993. Dispersal of *Erwinia amylovora* and *Pseudomonas fluorescens* by honey bees from hives to apple and pear blossoms. *Phytopathology*, 83:479-484
- Katznelson P I I. 1950. The detection of internally-borne bacteria pathogens of beans by a rapid phage plaque count technique. *Science*, 112: 645-647
- Kbosel D. 1986. Direct detection of the fireblight pathogen *Erwinia amylovora* by the pear test using membrane filtration. *Nachrichtenblatt des DeutSchen. Pflanzenschutzdienstes*, 38(6): 81-83
- Kearns L P, Hale C N. 1996. Partil characterization of an inhibitory strain of *Erwinia herbicola* with potential as a biocontrol agent for *Erwinia amylovora*. The life blight pathogen. *J. Appl. Bacteriol.*, 81: 369-374
- Keck M, Reich H, Chartier R *et al.* 1996. First report of fire blight (*Erwinia amylovora*) in Astria-Preliminary experiments on the survival on fruit boxes. *Acta Horticulturae*, 411: 9-12
- Kiett G W, Ivanovv S S. 1941. Transmission of fire blight by bees and its relation to nectar concentration of apple and pear blossoms. *J. Agric. Res.*, 62: 745-753
- Kim J H, Beer S V, Zumoff C N. 1996. Characterization of *Erwinia amylovora* strains from different hosts and different gcographical areas. *Acta Horticulturae*, 411: 183-185
- Kim W S, Gargan L, Rhim S L *et al.* 1999. *Erwinia pyrifloriae* sp. nov. a novel pathogen that affects Asian pear trees (*Pyrus pyrifloria* Nakai). *International Journal of Systematic Bacteriology*, 49: 899-906
- Kisung K O. 2000. Effect of untranslated leader sequence of AMV RNA4 and signal peptide of pathogenesis-related protein 1b on attacin gene express, and resistance to fire blight in transgenic apple. *Biotechnology Letters*, 22(5): 373-381
- Lai M, Hass B. 1973. Reaction of cowpea seedlings to phytopathogenic bacteria. *Phytopathology*, 63(9): 1099-1103
- Laroche M *et al.* 1987 . Use of the ELISA method to identify *Erwinia amylovora* by means of its metabolites. *EPPO Bulletin*, 17(2): 205-210
- Lee I M, Gundersen-Rindal D E, Bertaccini A. 1998. Phytoplasma: ecology and genomic diversity. *Phytopathology*, 88: 1359-1366
- Lewis S, Goodman R N. 1965. Mode of penetration and movement of fire blight bacteria in apple leaf and stem tissue. *Phytopathology*, 55: 719-723
- Lin C P, Chen T A, Well J M *et al.* 1987. Identification and detection of *Erwinia amylovora* with monoclonal antibodies. *Phytopathology*, 77: 376-380
- Lindow S E, McGourty G, Elkins R. 1996. Interactions of antibiotics with *Pseudomonas fluorescens* A. 506 in the control of fire blight and frost injury of pear. *Phytopathology*, 86: 841-848
- Loper J E, Henkets M D, Roberts R G *et al.* 1991. Evaluation of streptomycin, Oxytetracycline, and copper resistance of *Erwinia amylovora* isolated from pear orchards in Washington statc. *Phm. Dis.*, 75: 287-290
- Maes M, Garbeva P, Kamoen O. 1996. Recognition and detection in seed of the *Xanthomonas* pathogens that cause cereal leaf streak using rDNA spacer sequences and polymerase chain reaction. *Phytopathology*, 86: 63-69
- Maes M. 1993. Fast classification of plant-associated bacteria in the *Xanthomonas* genus. *FEMS Microbiol. Lett.*, 113: 161-166
- Maidak B L, Cole J R, Parker C T *et al.* 1999 A new version of the RDP (Ribosomal Database Project). *Nucleic Acids Res.*, 27: 171-173
- Mazzucchi U. 1980. Bacterial fire-blight examination of infected material and identification of the pathogen. *Informatore Fitopatologico*, 30(9): 3-20
- McManus P S, Jones A L. 1995. Detection of *Erwinia amylovora* by nested PCR and PCR-dot-blot and reverse-blot hybridizations.

- Phytopathology*, 85: 618-623
- McManus P S, Jones A L. 1995. Genetic fingerprinting of *Erwinia amylovora* strains isolated from tree-fruit crops and *Rubus* spp. *Phytopathology*, 85: 1547-1553
- McManus P S, Jones. 1994. Epidemiology and genetic analysis of streptomycin resistant *Erwinia amylovora* from Michigan and evaluation of oxytetracycline for control. *Phytopathology*, 84: 627-633
- Merighi M, Sandrini A, Landini S *et al.* 2000. Chemiluminescent and colorimetric detection of *Erwinia amylovora* by immunoenzymatic determination of PCR amplicons from plasmid pEA29. *Plant Disease*, 84(1): 49-54
- Miller T D, Schroth M N. 1972. Monitoring the epiphytic population of *Erwinia amylovora* in pears with a selective medium. *Phytopathology*, 62: 1175-1182
- Miller H J. 1983. Some factors influencing immunofluorescence microscopy as applied in diagnostic phytobacteriology with regard to *Erwinia amylovora*. *Phytopathologische Zeitschrift*, 108(3/8): 235-241
- Mills D, Russell B W. 1998. Multiplex PCR ELISA detection of *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*. *Phytopathology*, 88: S63
- Mills W D. 1955. Fire blight development on apple in western New York. *Plant Dis. Report*, 39: 206-245
- Moller W J, Sehroth M N, Thomson S V. 1981. The scenario of fire blight and streptomycin resistance. *Plant Dis.*, 65: 563-568
- Morrill G D. 1970. Overwintering of the fire blight pathogen inside living host tissue in cache valley. Utah, Proceeding of the Utah. *Academy of Sciences Arts and Letters*, 47(1): 247-254
- Mourges F, Brisset Marie-Noelle, Chevreau Elisabeth. 1998. Activity of different antibacterial peptides on *Erwinia amylovora* growth and evaluation of the phytotoxicity and stability of ceropins. *Plant Science (Shaannon)*, 139(1): 83-91
- Mraz I, Pankoxa I, Petrzik K *et al.* 1999. *Erwinia* and *Pseudomonas* bacteria can be reliably screened by an improved serological agglutination test. *Journal of Phytopathology (Berlin)*, 147(7-8): 429-431
- Myers J H, Simberloff D, Kuris A M *et al.* 2000. Eradication revisited: dealing with exotic species. *TREE*, 15(8): 316-320
- Nassar A, Darrasse A, Lematre M *et al.* 1996. Characterization of *Erwinia chrysanthemi* by pectinolytic isozyme polymorphism and restriction fragment length polymorphism analysis of PCR amplified fragments of *pel* genes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 62: 2228-2235
- Norelli J L *et al.* 1996. Increasing the resistance of apple rootstocks to fire blight by denetic engineering: a progress report. *Acta Hortic.*, 411-407
- Nucló R L, Johnson K B, Stockwell V O *et al.* 1997. Secondary colonization of pear blossoms by two bacterial antagonists of the fire blight pathogen. *Plant Dis*, 82: 661-668
- Pierstorff A L, Lamb H. 1934. The honey bee in relation to the overwintering and primary spread of the fire blight organism. *Phytopathology*, 24: 1347-1357
- Rhim S L, Volksch B, Gardan L. 1999. *Erwinia pyriforliae*, an *Erwinia* species different from *Erwinia amylovora*, causes a necrotic disease of Asian pear trees. *Plant Pathology*, 48: 514-520
- Roberts R G, Hale C N, Van der Zwet T. 1998. The potential for spread of *Erwinia amylovora* and fire blight via commercial apple fruit: a critical review and risk assessment. *Crop Protection*, 17: 17-28
- Roberts P. 1980. Problems encountered during immunofluorescent diagnosis of fireblight. *Plant Pathology*, 29: 93-97
- Sato M, Watanabe K, Yazawa M *et al.* 1997. Detection of new ethylene-producing bacteria, *Pseudomonas syringae* pvs. *cannabina* and *sesami*, by PCR amplification of genes for the ethylene-forming enzyme. *Phytopathology*, 87: 1192-1196
- Schmidt T. 1994. Fingerprinting bacterial genomes using ribosomal RNA genes and operons. *Methods Mol. Cell Biol.*, 5: 3-12
- Schnabel E L, Jones A L. 1998. Instability of a pEA29 marker in *Erwinia amylovora* previously used for strain classification. *Plant Dis.*, 82: 1334-1336
- Schneider B J, Zhao J L, Orser C S. 1993. Detection of *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* by DNA amplification. *FEMS Microbiol. Lett.*, 109: 207-212
- Schroth M N, Thomson S V, Hildebrand D C *et al.* 1974. Epidemiology and control of fire blight. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 12: 389-412
- Seal S E, Jackson L A, Young J P W *et al.* 1993. Differentiation of *Pseudomonas solanacearum*, *Pseudomonas syzygii*, *Pseudomonas pickettii* and the blood-disease bacterium by partial 16S-ribosomal-RNA sequencing. Construction of oligonucleotide primers for sensitive detection by polymerase chain reaction. *J. Gen. Microbiol.*, 139: 1587-1594
- Slant M Y. 1974. Stigma investigations in malus. *Micron*, 12: 179-180
- Smith T J. 1996. Arise assessment model for fire blight of apple and pear. *Acta Hortic.*, 411: 97-104

- Steinbrenner B, Zeller W, Bellemann P *et al.* 1990. DNA-Hybridization a specific method for the diagnosis of fire blight. *Acta Horticulturae*, 273: 91-93
- Steiner P W. 1990. Predicting apple blossom infections by *Erwinia amylovora* using the MARYBLYT model. *Acta Horticulturae*, 273: 139-148
- Steiner P W, Lightner G. 1992. Maryblyt: a predictive program for forecasting fire blight disease in apples and pears. University of Maryland
- Stockwell V O, Johnson K B, Loper J E. 1996. Compatibility of bacterial antagonists of *Erwinia amylovora* with antibiotics used for fire blight control. *Phytopathology*, 86: 834-840
- Tanii A, Tamura O, Ozaki M. 1981. The casual agent of a fire blight like disease of pear *Ann. Phytopath. Soc. Japan*, 47: 102
- Thomas T M, Jones A L. 1992. Severity of fire blight on apple cultivars and strains in Michigan. *Plant Dis.*, 76: 1049-1052
- Thomson S V, Schroth M N, Moller W J *et al.* 1975. Occurrence of fire blight of pears in relation to weather and epiphytic populations of *Erwinia amylovora*. *Phytopathology*, 65: 353-358
- Thomson S V. 1986. The role of the stigma in fire blight infections. *Phytopathology*, 76: 476-482
- Thomson S V. 1982. A forecasting model for fire blight on pear. *Plant Dis.*, 65: 576-579
- Toth I K, Hyman L J, Taylor R *et al.* 1998. PCR-based detection of *Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli* var. *fuscans* in plant material and its differentiation from *X. c.* pv. *phaseoli*. *J. Appl. Microbiol.*, 85: 327-336
- Uwate W J, Lin J. 1981. Development of the stigmatic surface of *Prunus avium*. *Sweet cherry*. *Am. J. Bot.*, 68: 1165-1176
- Vaerenbergh, Van J, Geenen J. 1983. Fireblight: epidemiology and detection. *Parasitica*, 39(2): 65-68
- van der Wolf J M, Van Beckhoven J R, De Vries P M *et al.* 1995. Polymerase chain reaction for verification of fluorescent colonies of *Erwinia chrysanthemi* and *Pseudomonas putida* WCS358 in immunofluorescence colony staining. *J. Appl. Bacteriol.*, 79: 569-577
- van der Wolf J M, Hyman L J, Jones D A C *et al.* 1996. Immunological separation of *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica* from potato peel extracts to improve detection sensitivity on crystal violet pectate medium or by PCR. *Journal of Applied Bacteriology*, 80: 487-495
- van der Zwet T, Keil H L. 1979. Fire blight-bacterial disease of rosaceous plants. V. S. Pep. Agric. Handb. 510
- van der Zwet T. 1990. Population of *Erwinia amylovora* on external and internal apple fruit tissues. *Plant Dis.*, 74: 711-716
- van der Zwet T. 1996. Present worldwide distribution of fire blight. *Acta Horticulturae*, 411: 7-8
- van der Zwet T. 1994a. The various means of dissemination of the fire blight bacterium *Erwinia amylovora*. *Bulletin OEPP/EPPPO Bulletin*, 24: 209-214
- van der Zwet T. 1994b. Present distribution of fire blight and its mode of dissemination-a review. *Acta Horticulturae*, 367: 391-341
- van Laere O *et al.* 1985. Immunogold staining and immunogold silver staining for the identification of the plant pathogenic bacterium *Erwinia amylovora*. *Histochem.*, 83(5): 397-399
- Vanneste J L. 1995. *Erwinia amylovora*. In: Pathogenesis and Host-Parasite Specificity in Plant Diseases: Histopathological. Biochemicl. Genetic and Molecular Bases. Vol. 1. Prokaryotes. Ed. US Singh RP Singh, K Khomoto. 21-46 Oxford. Pergamou
- Vanneste J L. 1996. Honey bees and epiphytic bacteria to control fire blight, a bacterial disease of apple and pears. *Biocontrol News Inform.*, 17-67N-78
- Vanneste J L, Yu J. 1996. Biological control of fire blight using *Erwinia herbicola* Eh252 and *Pseudomonas fluorescens* A506 separately or in combination. *Acta Hortic.*, 411: 351-353
- Verdier V, Mosquera G, Assigbetse K. 1998. Detection of the cassava bacterial blight pathogen, *Xanthomonas axonopodis* pv. *manihoti*, by polymerase chain reaction. *Plant Dis.*, 82: 79-83
- Weise H. 1981. Wich-Vige Bacteriosen in Obstban filler brand undbackterion brand: Ingenierarbeit in Pflanzenschutz
- Widmer F, Seidler R J, Gillevet P M *et al.* 1998. A highly selective PCR protocol for detecting 16S rRNA genes of the genus *Pseudomonas* (sensu stricto) in environmental samples. *Appl. Environ. Microbiol.*, 64: 2545-2553
- Wilson M, Epton H A S, Sigeo D C. 1992. Interactions between *Erwinia herbicola* and *E. amylovora* on the stigma of hawthorn blossoms. *Phytopathology*, 82: 914-918
- Wilson M, Sigeo D C, Epton H A S. 1990. *Erwinia amylovora* infection of hawthorn blossom: III The nectar. *J. Phytopathol.*, 128: 62-74
- Wilson M, Sigeo D C, Epton H A S. 1990. *Erwinia amylovora* infection of hawthorn blossom: II The stigma. *J. Phytopathol.*, 127: 15-28
- Wilson M, Lindow S E. 1993. Interactions between the biological control agent *Pseudomonas fluorescens* strain A506 and *Erwinia*

- amylovora* in pear blossoms. *Phytopathology*, 83: 117-123
- Wright S A L, Beer S V. 1996. The role of antibiotics in biological control of fire blight by *Erwinia herbicola* strain Eh318. *Acta Hort.*, 411: 309-311
- Wullings B A, Van Beuningen A R, Janse J D *et al.* 1998. Detection of *Ralstonia solanacearum*, which causes brown rot of potato, by fluorescent in situ hybridization with 23S rRNA-targeted probes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 64: 4546-4554
- Yamamura K, Katsumata H, Watanabe T. 2001. Estimating invasion probabilities: a case study of fire blight disease and the importation of apple fruits. *Biological Invasions*, 3: 373-378
- Zoller B G, Sisevich J. 1979. Blossom populations of *Erwinia amylovora* in pear orchards vs accumulated degree hours over 18. 3 Celcius. *Phytopathology*, 69: 1050
- Zutra D. 1986. Fire blight on pear: a new disease in Israel. *Plant Dis.*, 70: 1071-1073

第二十五章 玉米细菌性枯萎病

第一节 起源与分布	535	第六节 检疫方法	539
第二节 识别特征与早期诊断	535	第七节 玉米细菌性枯萎病的分子生物学	541
第三节 传播途径与入侵成因	537	第八节 预防与控制	542
第四节 危害现状	538	第九节 应用与基础研究发展策略	543
第五节 病菌形态及生物学特性	538		

摘要 玉米细菌性枯萎病 *Erwinia stewartii* 是我国禁止入境的检疫性病害,是为害玉米的重要细菌性病害,在我国尚未发现,属我国 A1 类对外检疫对象。该病 1897 年最早发生在美国,现已广泛分布在亚、非、欧、南北美洲的许多国家。玉米细菌性枯萎病主要通过种子和昆虫进行传播。由于我国加入 WTO 后,该病随种子传入我国的风险很大,加之国内种植的品种普遍感病,因此,玉米细菌性枯萎病随时威胁着我国玉米的生产。

本章系统地介绍了玉米细菌性枯萎病的起源、分布、传播、危害、生物学、检测以及预防控制措施等,展望了进一步加强病害应用研究和基础研究的发展策略和前景。

关键词 玉米细菌性枯萎病 生物学 分布 传播 检测 病害治理

Chapter 25 Stewart's Bacterial Wilt of Corn *Erwinia stewartii* (Smith) Dye

Abstract: Stewart's bacterial wilt caused by *Erwinia stewartii* (Smith) Dye is one of the most serious diseases on maize. It has not been found in China up till now, but it is an important quarantine pest for P. R. China. *E. stewartii* was first isolated in USA in 1897, however, it was dispersed to many countries in Asia, Africa, Europe and America. *E. stewartii* could be spread by seedborne as well as insectborne. Since China has entered the World Trade Organization, this disease has high risk to invade into China by seedborne via import action the of corn. Since most native corn cultivars are sensitive to *E. stewartii*, the bacterial wilt caused by *E. stewartii* is being a serve threat to the corn production in P. R. China. In this chapter, the origin, distribution, spread, damage, biology, detection and technology of disease management of Stewart's bacterial wilt were discussed. The strategies and prospects for the basic and applied studies on Stewart's bacterial wilt of corn were also put forward.

Key words: stewart's bacterial wilt of corn, biology, distribution, spread, detection, disease management

第一节 起源与分布

玉米细菌性枯萎病由斯氏欧文氏菌 *Erwinia stewartii* (Smith) Dye 引起。1897 年在美国首先发现此病, 其病原菌最初定名为 *Pseudomonas stewartii*。之后的 50 多年又曾被命名为 *Bacterium stewartii*, 1914; *Aplanobacter stewartii*, 1918; *Bacillus stewartii*, 1920; *Phytomonas stewartii*, 1923; *Xanthomonas stewartii*, 1939; *Pseudobacterium stewartii*, 1949; 直至 1963 年正式定名为 *Erwinia stewartii*。

玉米细菌性枯萎病菌起源于美国, 目前已随种子传播到世界许多国家和地区, 主要有欧洲的意大利、原苏联、波兰、瑞士、瑞典、南斯拉夫、罗马尼亚、希腊; 北美洲的全部, 尤其是西部和中部地区; 中美洲和加勒比海地区的哥斯达黎加、墨西哥、波多黎各; 南美洲的圭亚那、秘鲁、巴西; 亚洲的泰国、越南、马来西亚。我国尚未发现, 因此被列为 A1 类对外检疫对象(CABI/EPPO, 1997; 张乐, 1997)。

第二节 识别特征与早期诊断

一、玉米细菌性枯萎病菌的寄主范围

玉米细菌性枯萎病菌主要侵染玉米 *Zea mays* L., 特别是甜玉米 *Z. mays* var. *rugos*, 同时也侵染马齿玉米、粉质玉米、硬粒玉米和爆裂玉米。在北美洲该病菌也能侵染其他一些禾本科作物, 许多禾本科杂草是病菌的无症状携带者(CABI/EPPO, 1997)。

在自然状态下它的主要寄主是玉米、甜玉米、假蜀黍 *Euchlaena mexicana* Schrad 和鸭茅状摩擦禾 *Tripsacum dactyloides* L.。

在人工接种条件下还可侵染薏苡 *Coxi lachrymajobi* L.、宿根类蜀黍 *Euchlaena perennis* Hitch.、金色狗尾草 *Setaria lutescens* (Weigel) F. T. Hubb.、高粱 *Sorghum vulgare* Pers.、苏丹草 *Sorghum vulgare* var. *sudanense* (Piper) Hitch.、小米 *Setaria italica* (L.) Beauv.、黍 *Panicum miliaceum* L.、燕麦 *Avena sativa* L.、*Schlerachne punctata* 等。除此外, 在有些寄主上可以分离到该细菌, 但植株并不表现症状, 如草地早熟禾 *Poa pratensis* L.、鸭茅 *Dactylis glomerata* L.、小糠草 *Agrostis alba* L.、马唐 *Digitaria* sp.、毛线稷 *Panicum capillare* L.、洋野黍 *Panicum dichotomiflorum* Michx.、小麦 *Triticum* sp.等(张乐, 1997)。

二、识别特征与早期诊断

玉米的各个生长阶段均可受到玉米细菌性枯萎病菌的侵染, 典型的症状是矮缩和枯萎。病株在苗期可导致枯萎死亡, 若在植株生长后期被侵染, 植株仍可长到正常大小。玉米细菌性枯萎病是一种维管束病害, 导管里充满亮黄色细菌黏液, 病株茎的横切面上可以看到渗出的黏液(图 25-1, 图 25-2)。



图 25-1 玉米细菌性枯萎病田间症状



图 25-2 玉米细菌性枯萎病病秆横切面

(一) 甜玉米

在甜玉米上，感病的杂交种很快造成枯萎，在叶片上形成淡绿色到黄色、具有不规则的或波状边缘的条斑，与叶脉平行，有的条斑可以延长到整个叶片的长度，病斑干枯后变成褐色。雄蕊过早抽出并变成白色，在植株停止生长以前枯萎死亡。雌穗大多不孕。重病株在接近土壤表层附近的茎秆的髓部可以形成空腔，在苞叶里外可出现小的、不规则的水浸状斑点，然后变干变黑。切开苞叶的维管束可以看到从切口处渗出的细菌液滴，感病较轻的植株能正常结出果穗，但病菌可从维管束中通过果穗而到达籽粒内部，有的果穗的苞叶也能表现出明显的病斑，苞叶上的病菌可黏附到籽粒上。籽粒感染病菌后，通常表现为表皮皱缩和色泽加深。

(二) 马齿玉米

杂交种一般抗枯萎病，但对叶疫病敏感。在抽雄后的叶片上，病斑大多从玉米跳甲 *Chaetocnema pulicaria* 啮食处开始，向上、下扩展而形成由短到长、不规则的、淡绿色到黄色条斑，然后逐渐变为褐色。形成条斑的区域，有时甚至是整个叶片都变成黄色。

(三) 与其他玉米病害的区别

玉米细菌性枯萎病的症状容易与其他玉米病害混淆，主要从出现的症状细节加以区分。如玉米细菌性叶疫病菌 *Pseudomonas avenae* 为害所表现的症状是形成具有红褐色边缘的、窄长的条斑和斑点，尤其是在风雨过后，条斑严重的叶片容易撕裂成碎条，上部叶片和基部老叶很快受侵，在茎秆上出现腐烂。玉米细菌性条纹病菌 *Pseudomonas andropogonis* 为害后将产生窄长、平行的、橄榄绿到黄褐色水渍状病斑，严重时雌穗下大部分叶片死亡，上部叶片几乎全部变成浅黄至白色条纹，若上部叶片的条纹继续发展与下部条纹融合在一起，最后将导致上部的全部叶片变白，因此，顶部变白是细菌性条纹病的典型症状。由玉米细菌性萎蔫病菌 *Clavibacter michiganensis* subsp. *nebraskensis* 引起的症状是在叶片上产生与中脉平行的、分散的水渍状条纹。病菌可侵染茎或直接侵染

叶片。早期侵染可引起苗枯；较晚侵染则通常表现为不同程度的叶枯，具有明亮的或者红色的条纹，严重时导致全叶干枯。系统侵染导致植株维管束变色，根或茎部呈水渍状，并分泌出黏液，外观似湿腐状。

玉米大斑病亦称北方叶枯病 *Setosphaeria turcica*，表现的症状是出现大的梭形(或卵圆形)的病斑，颜色从灰绿色到棕黄色，边缘明显。严重时病斑与病斑之间连成一片，多数叶片到后期会死亡，像火烧一样。

玉米小斑病亦称南方叶枯病 *Cochliobolus heterostrophus*，和玉米圆斑病菌 *C. carbonus* 通常引起小的、界限明显的、棕黄色到褐色病斑，侵染严重时叶片像火烧状(张乐, 1997)。

第三节 传播途径与入侵成因

玉米细菌性枯萎病的传播以玉米种子带菌和昆虫带菌为主。昆虫介体携带病菌只作局部性的传播和扩散，病菌国际间传播的主要途径是带病种子的传播。

一、传播途径

(一) 种子带菌

带菌的种子是造成病害远距离传播的主要原因，是传入无病区的主要初侵染源，也是老病区的最初侵染源之一。种子的带菌方式有两种，一是苞叶上的病菌黏附在种子表面，二是从维管束中通过果穗输导到种子内部。病原细菌多存在于种子合点的维管束组织蛋白质层以及胚乳的细胞间，但是胚部没有细菌。带菌种子播种后，通常只有 2% 能发展成病株。

(二) 昆虫传播

在疫区，玉米细菌性枯萎病除了由带菌的种子传播以外，另一种传播途径是靠带菌的昆虫传播。从越冬的昆虫体内分离到的病菌可以证明，病菌通常可以在成虫体内越冬，第二年春季通过昆虫在植株上啮食而传播。在疫区的主要传病昆虫有玉米跳甲、玉米啮叶甲 *C. denticulate*、北方玉米根甲 *Diabrotica longicornis*、西部玉米根甲 *D. vergifera*、黄瓜十二点叶甲(亦称南方玉米根甲) *D. undecimpunctata*、五月金龟子 *Phyllophaga* sp.、玉米种蝇 *Hylemya cilicrura* 的幼虫和小麦金针虫 *Agriotes mancus* 等。

在所有传播玉米细菌性枯萎病菌的昆虫中，以玉米跳甲为主。体内带菌的玉米跳甲越冬后在第二年春天通过取食为害玉米，同时将病菌接种到玉米上，当不带细菌的玉米跳甲在受侵的植株上取食时，使体内也带上了细菌，再传到取食的其他植株上。随着玉米跳甲的不断孵化和数量的增加，病害的发生及危害就愈加普遍。研究发现玉米跳甲还能够被气流带到相当远的地方，并对这一地块造成新的侵害。玉米跳甲的带菌时间与它的存活期限一样长，虽然经过越冬的跳甲只有 10% ~ 20% 带有细菌，但到了夏季，在玉米上取食的跳甲有 75% 是带菌的。

二、病菌越冬及病害初侵染源

虽然试验证明带菌的种子只有 2% 长成病株，但带菌的种子仍是病菌远距离传播的主要途径。带菌种子在细菌越冬方面也许并不占主要地位，但它可能为昆虫传播提供侵染来源。迄今为止，未见有病菌在土壤中以及在植株残体中越冬的报道。病原菌虫媒是一个潜在的越冬场所。带菌玉米跳甲以成虫越冬，越冬后在玉米幼株上取食，传播病害，成为病害的初侵染源之一。将 4 月份在田间采集的玉米跳甲进行表面消毒捣碎后分离培养，获得大量的玉米枯萎菌，以此接种到玉米上，出现了典型的枯萎症状，经检测有 75% 的玉米跳甲带菌。研究证明，玉米跳甲是重要的带菌越冬昆虫，它对病菌越冬和传播具有重要作用。

三、发病和流行条件

国外研究证明，玉米细菌性枯萎病的发病和流行与否主要取决于冬季气温的高低。寒冷的冬季气温很低，可使虫媒大批死亡，病害的传播和流行受到明显的抑制。在疫区，如果冬季 3 个月(12 月至次年 2 月)的平均气温总和在 37~38℃ 以上，有利于虫媒越冬，预示着越冬虫源的存活率很高，次年夏季病害极有可能大发生或流行；若低于 32℃，由于越冬昆虫大量死亡，虫媒的越冬存活率很低，不具备造成病害大发生的虫源基数，夏季病害就会很少流行或不发生(张乐, 1997)。

第四节 危害现状

玉米细菌性枯萎病在玉米的各个生育期都可发生，是一种典型的维管束病害。在甜玉米上可造成严重危害，对产量影响很大。在病害流行年份，甜玉米的损失相当严重。感染了玉米细菌性枯萎病菌的植株对茎腐病的抵抗力大大降低，使得对玉米产量的影响更大。马齿玉米和爆裂玉米虽然也是玉米细菌性枯萎病菌的自然寄主，但经多年观察发现，感染此病的植株对产量的影响较小，产量损失比甜玉米要轻。通常早熟矮化品种要比晚熟高秆品种感病。产量损失以美国为例，1897 年美国长岛甜玉米由于玉米细菌性枯萎病的为害损失 20%~40%；1932~1933 年此病在多个州流行，平均损失 6%~13%；1976 年仅 6 个州就损失了 20 万吨玉米；1988 年纽约州玉米细菌性枯萎病又爆发成灾，损失相当严重，估计达 30 多万美元。

第五节 病菌形态及生物学特性

一、形态特征

玉米细菌性枯萎病菌是一种黄色的、无鞭毛、无内生孢子、革兰氏阴性、兼性厌氧杆状菌，大小为 $0.5\sim 0.7\mu\text{m}\times 1\sim 2\mu\text{m}$ ，以单个或短链形式存在。

二、培养性状

在营养琼脂培养基上形成黄色、表面平滑的圆形小菌落，生长缓慢。划线培养时菌

苔的变化从薄、黄色、湿润、滑落到薄、干燥、橙黄色、不滑落。在肉汤培养液中生长微弱，形成灰色环和黄色沉淀物。

在明胶上生长缓慢，但不液化明胶。除强毒株以外，不还原硝酸盐，不产生硫化氢，产生很少的吡啶或不产生。在石蕊牛奶中轻微产酸和脱色，不凝乳和胨化。

三、生理生化反应

可使蔗糖、葡萄糖、半乳糖、果糖、木糖、阿拉伯糖、乳糖、甘露糖、甘露醇和甘油产酸，但不产气；不能使麦芽糖、鼠李糖和半乳糖醇产酸和气。据报道，在兼性厌氧条件下生长时，可使葡萄糖、乳糖和蔗糖产酸不产气，使氧化肌醇产酸，不能利用水杨苷。水解淀粉阴性，无解脂能力。可耐受 5%~7%的 NaCl。在 0.3%的牛胆酸钠存在的条件下生长良好。

四、温度范围

病菌的最适生长温度为 30℃，最低生长温度 7~9℃，最高生长温度 39℃。致死温度为 53℃，10min。

第六节 检疫方法

玉米细菌性枯萎病的检查和诊断，包括在田间实地观察植株的发病症状、分离培养、免疫学检测和鉴定、病原菌生理生化鉴定和致病性测定等。

一、检验和检疫方法

根据玉米细菌性枯萎病的症状特点，在田间进行调查，横切病株的茎或叶片，典型症状是渗出黄色细菌黏液。在载玻片上加一滴水，将切开的病斑放在水中，用显微镜检查视野中的细菌。

二、分离培养

(一) 从种子中分离

从玉米种子中分离培养玉米细菌性枯萎病菌是加强海关检疫，杜绝此病传入我国的重要环节。通常将种子用 95%的乙醇清洗，再用无菌水冲洗几遍，将种子破碎后，加入适量的 0.01mol/L PBS 缓冲液(NaCl 8g, Na₂HPO₄·12H₂O 2.7g, NaH₂PO₄·2H₂O 0.4g, 蒸馏水 1000ml, pH7.2)，4℃浸泡过夜。浸泡液经纱布过滤，并离心浓缩，在以下其中一种培养基上做稀释平板分离。

改良 W 氏培养基：

蔗糖	10g	
蛋白胨	5g	
抗坏血酸	1g	
K ₂ HPO ₄	0.5g	pH 7.2~7.4

MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.25g
琼脂粉	18g
蒸馏水	1000ml

523 培养基:

蔗糖	10g	
蛋白胨	8g	
酵母粉	4g	
K ₂ HPO ₄	2g	pH 7.0~7.1
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.3g	
琼脂粉	18g	
蒸馏水	1000ml	

将接种好的培养皿放在 28℃ 温箱中培养 3 天后,根据玉米细菌性枯萎病菌的菌落特征挑取生长缓慢、黄色的、扁平到凸起、半透明的奶油状或流态的具有完全边缘的小菌落。

(二) 从病植株中分离

在新鲜病斑边缘切取部分组织,用常规方法分离病原细菌。

(三) 从土壤、病残组织和昆虫体内分离

从土壤、病残组织和昆虫体内分离病原细菌时,由于杂菌污染的可能性较大,通常采用伊凡诺夫选择性培养基,以常规方法加以分离。伊凡诺夫选择性培养基(pH7.0)的配方如下:

甘油	30ml	硫酸钠	2.5g
柠檬酸铁铵	10g	硫酸镁	0.1g
牛胆酸钠	3g	琼脂粉	17g
氯化钠	15g	蒸馏水	1000ml

三、菌种鉴定

(1) 首先将分离培养得到的待测细菌进行纯化,然后做革兰氏染色和鞭毛染色,并进行免疫学鉴定和噬菌体测定。

(2) 将革兰氏检测为阴性、无鞭毛的、免疫学和噬菌体检测为阳性的菌株再做进一步生化测定,根据欧文氏菌属中各种间的生理生化区别进行鉴定(表 25-1)。

表 25-1 欧文氏菌属中各种间的生理生化区别(张乐, 1997)

结果 项目	菌种														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
纤维二糖	-	-	d	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+
H ₂ S 产生	-	+	-	+	+	+	+	d	+	+	+	+	+	-	-
吡啉的产生	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+
硝酸盐还原	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	+
肌醇	-	-	-	-	-	+	-	+	+	d	d	+	+	-	+
棉子糖	-	-	-	-	-	+	d	+	+	+	+	-	+	+	+
麦芽糖	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-	+
L-阿拉伯糖	d	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
甘露糖	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
乳糖	-	-	-	-	-	-	d	+	+	+	d	-	-	+	+
七叶苷	-	-	-	-	+	+	d	d	+	+	+	+	+	-	d
阿东糖醇	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
丙二酸盐	-	-	-	-	-	-	d	-	+	-	+	d	-	-	-
α-甲基葡萄糖苷	-	-	-	+	+	-	-	-	d	-	-	-	-	-	-
苯丙氨酸解氨酶	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-

注: +表示 80%以上菌株阳性; -表示 20%以下菌株阳性; d 表示 21%~79%的菌株阳性。

1. *Erwinia amylovora*; 2. *E. tracheiphila*; 3. *E. mallotivora*; 4. *E. rubrifaciens*; 5. *E. quercina*; 6. *E. salicis*; 7. *E. herbicola*; 8. *E. ananas*; 9. *E. rhapontici*; 10. *E. carotovora*; 11. *E. chrysanthemi*; 12. *E. cyripedii*; 13. *E. nigrifluens*; 14. *E. stewartii*; 15. *E. uredovora*.

四、致病性测定

分离培养获得的完全符合玉米细菌性枯萎病菌特征与特性的菌株, 还需要经过致病性测定来加以证实。具体接种方法是: 取 3~4 叶期的甜玉米幼苗, 将待测菌配成 $10^7 \sim 10^8$ cfu/ml 的菌悬液, 用注射器注射接种于茎基部, 直到喇叭口处出现菌液为止, 并保湿培养。若出现玉米细菌性枯萎病菌, 则几天后可以看到典型症状。

第七节 玉米细菌性枯萎病的分子生物学

一、分子检测技术的研究

在玉米细菌性枯萎病菌分子检测技术的研究中, 采用连接酶链式反应(ligase chain reaction, LCR)方法将玉米细菌性枯萎病菌与其他欧文氏菌属的植物病原细菌加以区分。这种新技术可以在种的水平鉴别出 *E. stewartii* 菌 16S rRNA 中单个碱基的差异。以 16S

rRNA 特异序列设计的引物,对 *Erwinia* 属中的 24 个种和菌株进行分析,只有玉米细菌性枯萎病菌能够出现阳性反应。另外,利用 LCR 方法还可以区分出病株和健株,即便在玉米叶片上存在大量腐生菌的情况下也不影响检测的灵敏性,在病害诊断上具有潜在的应用价值(Wilson *et al.*, 1994)。

2002 年 Waleron 等根据已发表的 *E. carotovora* 病原菌的 *recA* 基因设计 PCR 引物,对所扩增出的产物进行限制性内切核酸酶长度多态性(*recA* PCR-RFLP)分析,在测试的 *Erwinia* 属中的 19 个不同种中均能扩增出 730bp 的片段。再用 4 种内切酶 *Alu* I、*Hinf* I、*Tas* I 和 *Tru* II 对所扩增出 DNA 片段进行消化分析,大多数 *Erwinia* 种产生了具有特征的 RFLP 图谱。因此, *recA* 基因的 PCR-RFLP 分析是鉴别 *Erwinia* 属中种和不同亚种的有用工具。

二、毒性基因分子克隆研究

1986 年 Coplin 等利用构建在黏粒载体 pVK100 上的 *E. stewartii* DNA 文库,根据互补原理,筛选能够使无毒力的突变体库中某些与致病力有关的基因功能恢复的基因片段, pES4507 质粒所携带的基因片段可以恢复孢外多糖(extracellular polysaccharide, EPS)的合成功能。

第八节 预防与控制

一、加强检疫

加强海关检疫,严禁从疫区调运种子等带菌材料,建立无病留种田,留用无病种子。

二、种子处理

带菌种子可用 0.1%氯化汞浸泡 20min 消毒,此方法可以杀死种子表面的细菌,但不能杀死种子内的细菌。其他的种子处理方法还有:将种子放在 60~70℃ 的干燥条件下干热消毒 1h,可以达到杀死种子内外细菌的目的,并且不影响种子的发芽。

三、选育抗病品种

不同玉米品种间的抗病能力差别很大,以马齿玉米的抗病力最强,爆裂玉米次之,而甜玉米最感病;早熟品种比晚熟品种的抗病力弱。因此,选育抗病品种是控制玉米细菌性枯萎病为害的有效方法。

四、治虫防病

在疫区对玉米跳甲等虫媒害虫用狄氏剂等杀虫剂进行早期防治,可以有效地控制病害的传播与流行。治虫工作应从苗期开始,直至玉米成熟,通过连续不断的防治才能收到理想的效果。

第九节 应用与基础研究发展策略

目前玉米细菌性枯萎病在我国尚未发现,但随着中国加入 WTO 后,国际贸易的增加,迫切需要建立一套完善的、适合口岸快速、灵敏检测该病菌的技术体系,对控制外来玉米细菌性枯萎病的输入、防止该病在我国大流行至关重要。

一、完善和建立病害早期诊断和快速检测技术体系

目前国外对玉米细菌性枯萎病分子生物学基础研究工作已取得了一定的进展,如连接酶链反应等(Coplin *et al.*, 1981, 1986; Cui *et al.*, 2001; Fu *et al.*, 1998; Ma *et al.*, 2001; Kwon *et al.*, 1997; Waleron *et al.*, 2002), 这些技术为快速灵敏的检测玉米细菌性枯萎病奠定了基础。在此基础上进行补充完善和组装配套,研究建立快速、准确的分子检测技术体系,提高口岸病害检验检疫的时效性和准确率。

二、建立病害风险评估技术体系

根据玉米细菌性枯萎病的流行和成灾特点,分析该病菌可能造成流行的气候条件及我国目前推广种植的玉米品种的抗性水平,分析入侵环境的生态阻力和病原菌的定殖潜力。构建病害风险评估模型及其软件平台,建立玉米细菌性枯萎病风险评估技术体系,为病害早期预警、检测、预防策略提供科学基础。

三、研究开发病害应急扑灭和处理技术,建立病害综合防治技术体系

我国由于尚未发生玉米细菌性枯萎病,对该病害防治和处理技术应结合我国实际情况,参照其他国家的做法,建立一套玉米细菌性枯萎病应急扑灭技术和无公害处理技术。重点研究内容包括:①大规模疫区带菌玉米处理技术,如熏蒸处理技术等;②玉米抗细菌性枯萎病品种的培育和利用技术。

(冯 洁)

主要参考文献

- CABI, EPPO. 1997. 欧洲检疫性有害生物. 北京: 中国农业出版社 [CABI, EPPO. 1997. Quarantine Pests for Europe. Beijing: China Agricultural Press]
- 涅姆利延科. 1959. 玉米病害. 北京: 中国农业出版社 [Немленко. 1959. Corn Diseases. Beijing: China Agricultural Press]
- 张乐. 1997. 玉米细菌性枯萎病菌. 见: 姚文国等主编. 中国进境植物检疫有害生物选编. 北京: 中国农业出版社. 121~127 [Zhang L. 1997. Stewart's bacterial wilt of corn. In: Yao W G *et al.* eds. Selected Pests of Plant Quarantine Significance to China. Beijing: Chinese Agricultural Press. 121~127]
- Coplin D L, Rowan R G, Chisholm D A *et al.* 1981. Characterization of plasmids in *Erwinia stewartii*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 42(4): 599~604
- Coplin D L, Frederick R D, Majerczak D R *et al.* 1986. Molecular cloning of virulence genes from *Erwinia stewartii*. *J. Bacteriol.*, 168(2): 619~623

- Cui Y, Chatterjee A, Chatterjee A K. 2001. Effects of the two-component system comprising GacA and GacS of *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora* on the production of global regulatory rsmB RNA, extracellular enzymes, and harpin Ecc. *Mol. Plant Microbe Interact.*, 14(4): 516-526
- Fu J F, Hu J M, Chang Y S *et al.* 1998. Isolation and characterization of plasmid pSW200 from *Erwinia stewartii*. *Plasmid*, 40(2): 100-112
- Ma W, Cui Y, Liu Y *et al.* 2001. Molecular characterization of global regulatory RNA species that control pathogenicity factors in *Erwinia amylovora* and *Erwinia herbicola* pv. *gypsophylae*. *J. Bacteriol.*, 183(6): 1870-1880
- Kwon S W, Go S J, Kang H W *et al.* 1997. Phylogenetic analysis of *Erwinia* species based on 16S rRNA gene sequences. *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 47(4): 1061-1067
- Waleron M, Waleron K, Podhajska A J *et al.* 2002. Genotyping of bacteria belonging to the former *Erwinia* genus by PCR-RFLP analysis of a *recA* gene fragment. *Microbiology*, 148(Pt 2): 583-595
- Wilson W J, Wiedmann M, Dillard H R *et al.* 1994. Identification of *Erwinia stewartii* by a ligase chain reaction assay. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60(1): 278-284

第二十六章 番茄细菌性斑点病

第一节	病害的起源与分布	547	第六节	番茄抗病性及番茄与病菌相互作用	552
第二节	危害现状	547	第七节	早期诊断技术	556
第三节	病害症状诊断	548	第八节	病害控制	557
第四节	病原菌生物学特征	548	第九节	应用与基础研究发展策略	558
第五节	病害生态学特征与传入途径	552			

摘要 本章对番茄细菌性斑点病的研究进展进行了综述,介绍了该病害的起源与分布、危害现状、病害症状(识别特征)与症状诊断、病原菌生物学特征、病害生态学特征与传入途径、番茄抗病性、番茄与病菌互作、病害的早期诊断技术、病害控制等内容。

番茄细菌性斑点病是由丁香假单胞菌番茄致病变种引起的番茄细菌病害。该病在美国、原苏联、中国、澳大利亚、加拿大等 20 多个国家有发生报道。寄主有番茄和辣椒。番茄细菌性斑点病侵染番茄的叶片、果实和茎秆,形成大小和形状不同的黑褐色至黑色的病斑,病斑周围有黄色晕圈。病斑多集中在边缘,引起边缘坏死,果实上的病斑稍突起且小,直径最大 3mm,病斑浅,很少多于一个细胞深度。病菌在土壤、病残体和种子上存活。冷凉潮湿气候有利于侵染。病菌通过雨水和喷灌传播。热天气病害发展停止。侵染严重时,植株矮小,导致产量降低。春天可推迟播种来避免有利于发病的冷凉潮湿的条件;当病害发生时,喷灌改为沟灌。使用抗病品种、避免在发病的田块种植番茄、喷铜制剂等均可防治此病。

番茄细菌性斑点病菌有两个生理小种:小种 1 和小种 2。病菌产生褪绿毒素—冠毒素。介绍了病菌的生理生化特性。

番茄细菌性斑点病种子带菌检测是十分重要的,新技术已经被应用于检测该病种子带菌情况,这些技术包括血清学技术、DNA 技术(PCR、时实-PCR、生物-PCR)以及这两种技术的结合技术。番茄中的 *Pto* 基因对细菌性斑点病病原物产生基因对基因的抗病性。大约在 60 年前 *Pto* 从番茄野生品种渐渗到番茄栽培品种,现在被广泛地用来控制斑点病。*Pto* 基因编码一个细胞质内的丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶。该植物与病原互作系统基因对基因识别的分子基础是 *Pto* 激酶直接与丁香假单胞菌的 *AvrPto* 物理互作。在对 *Pto* 基因的进化、*Pto* 激酶与 *AvrPto* 互作的具体细节、*Pto* 下游信号传导、由 *Pto* 激活的抗病反应等研究方面取得了一些进展。

关键词 番茄细菌性斑点病 分布和起源 症状 特性 互作 诊断 防治

Chapter 26 Bacterial Speck of Tomato

Pseudomonas syringae pv. *tomato* (Okabe) Young, Dye & Wilkie

Abstract: The advances of studies on bacterial speck of tomato were summarized in this chapter. Origin and distribution of the disease, disease damaging, disease symptom, disease diagnoses, characteristics of pathogen, characteristics of disease ecologies, spread of disease, resistance of tomato, interaction between the bacteria and tomato, diagnoses of disease, and disease control were introduced. Bacterial speck of tomato is caused by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. It has occurred in America, Canada, Russia, Australia and China and other comitries. The hosts of the bacteria included tomato and pepper. Bacterial speck appears as dark brown to black lesions of various sizes and shapes on leaves, fruit, and stems. Tissue adjacent to the lesions is initially yellow. Leaf lesions are frequently concentrated near margins, causing extensive marginal necrosis (tissue death). Fruit lesions are slightly raised and small, varying in size from tiny flecks to 3mm in diameter. Fruit lesions are superficial, seldom penetrating more than a few cells deep. The bacteria survive in soil, in debris from diseased plants, and on seeds. Infection is favored by cool moist weather. The pathogen is spread by splashing rain or sprinkler irrigation. Disease progress is stopped during hot weather. In severe cases, infected plants are stunted, which may result in a delay in fruit maturity and yield reduction. Delay planting in spring could avoid exposing tomatoes to cool and wet conditions that favor disease development. When the disease appears, it is better to change irrigation from overhead to furrow. It is suggested to use resistant varieties, which are effective against most isolates. Do not plant tomatoes in a field previously planted tomatoes that developed the disease. Copper sprays are effective to control the disease.

P. syringae pv. *tomato* has two races, namely, race 1 and race 2. The bacteria produces the chlorosis-inducing phytotoxin coronatine. Its physiological and biochemical traits were introduced.

Seed health testing for detection of seedborne pathogens has become an important issue in reducing the occurrence of economically important speck diseases of tomatoes. New technologies have been developed which may assist in the detection and identification of seedborne bacterial diseases. These technologies include the use of antibody-based assays, DNA based assays (PCR, real-time PCR, BIO-PCR) and a combination of the two (IMS-PCR).

The *Pto* gene in tomato confers gene-for-gene resistance to *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*, the pathogen of bacterial speck disease. *Pto* was first introgressed from a wild species of tomato into cultivated tomato varieties over 60 years ago and is now widely used to control

bacterial speck disease of tomato. The resistance is conditioned by a single dominant gene. Cloning of the *Pto* gene revealed that it encodes a serine-threonine protein kinase. The molecular basis of gene-for-gene recognition in this pathosystem is the direct physical interaction of the *Pto* kinase with *Pseudomonas* effector protein, *AvrPto*. Up recognition of *AvrPto*, the *Pto* kinase acts in concert with *Prf*, a leucine-rich repeat-containing protein, to activate multiple signal transduction pathways. There has been much progress in understanding the evolutionary origin of the *Pto* gene, structural details about how the *Pto* kinase interacts with *AvrPto*, signaling steps downstream of *Pto*, and defense responses activated by the *Pto* pathway.

Key words: *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*, speck, origin and distribution, assay, *pto*, traits, symptom, interaction, control

第一节 病害的起源与分布

番茄细菌性斑点病 *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Okabe) Young, Dye & Wilkie 亦称番茄细菌性叶斑病或细菌性斑疹病，是一种严重影响番茄产量和品质的重要细菌性病害。自 1933 年首次报道以来，已成为世界性病害，在摩洛哥、南非、印度、澳大利亚、新西兰、奥地利、保加利亚、捷克和斯洛伐克、法国、匈牙利、意大利、比利时、罗马尼亚、瑞士、英国、原苏联、南斯拉夫、波兰、巴西、约旦、希腊、土耳其、委内瑞拉、葡萄牙、美国、以色列、加拿大、智利等国家均有发生报道。

第二节 危害现状

番茄细菌性斑点病可造成 5%~75% 的产量损失 (Yunis, 1980)。1978 年番茄细菌性斑点病造成美国佐治亚州 160hm² 的番茄欠收。1979 年加拿大安大略省栽培当地番茄的 26 个农场发病占 61.5%，发病率为 38%，严重度为 0.38；引进番茄苗的 65 个农场发病占 36.9%，发病率为 19%，严重度为 0.23。澳大利亚 1980 年和 1983 年该病严重发生，1985 年再度流行。1995~1996 年番茄细菌性斑点病在意大利的西西里爆发流行。番茄细菌性斑点病在我国的台湾省有记载。1998~1999 年我们在吉林省长春郊区的番茄大棚内发现番茄细菌性斑点病，经调查，1998 年长春郊区宏明乡种植的佳粉 15 号发病率为 85%；1999 年长春郊区齐家乡种植的吉粉 2 号发病率为 15%~56%，L409 发病率为 58%~95%，利生 7 号发病率为 91%，908 发病率为 58%。1999 年在黑龙江省哈尔滨市、辽宁省盘锦市，2000 年在辽宁省新民市的番茄上也发现番茄细菌性斑点病。在盘锦市 20% 农户的番茄发病，发病株率为 50%~100%，有些大棚已经毁种。近两年在甘肃、山西等省有发生报道。从采集的 40 份病样中分离获得了病原细菌并测定了致病性，接种发病症状与田间自然发病症状完全一致，接种发病后又分离到病原细菌，进行了病原菌鉴定。

第三节 病害症状诊断

番茄细菌性斑点病主要为害番茄叶、茎、花、叶柄和果实。叶片感染，产生深褐色至黑色斑点，斑点周围有黄色晕圈；茎和叶柄感染，产生黑色斑点，周围无黄色晕圈。幼嫩果实初期的小斑点稍隆起，果实近成熟时病斑周围仍保持较长时间的绿色。细菌性斑点病症状与番茄细菌性疮痂病 *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* (Doidge) 的症状相似，应注意区分。番茄细菌性斑点病在果实和叶片上的症状见图 26-1 和图 26-2。

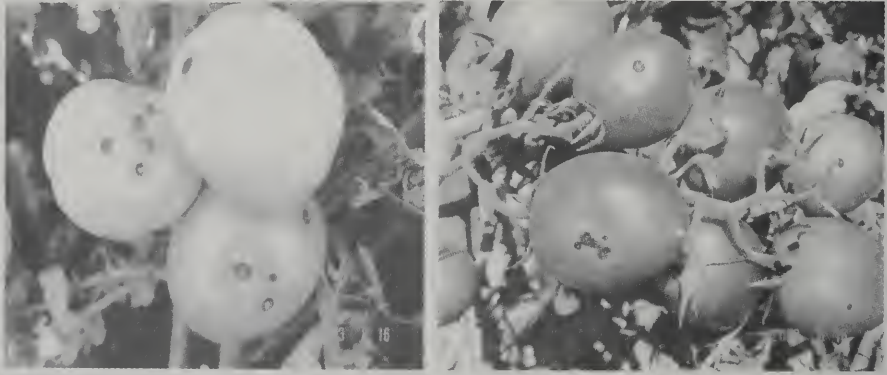


图 26-1 番茄果实受害症状(赵廷昌 等, 2000)

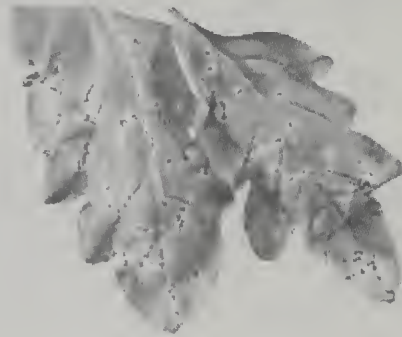


图 26-2 番茄叶片上的症状

第四节 病原菌生物学特征

番茄细菌性斑点病的病原菌为丁香假单胞菌番茄致病变种 *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Okabe) Young, Dye & Wilkie, 异名有: *Bacterium tomato* Okabe; *Phytomonas tomato* (Okabe) Magrou; *Pseudomonas tomato* (Okabe) Alstatt; *Bacterium punctulans* Bryan; *Phytomonas punctulans* (Bryan) Magrou; *Pseudomonas punctulans* (Bryan) Savulescu。菌体

短杆状，直或稍弯，单细胞，大小为 $0.1\sim 1\mu\text{m}\times 1.5\sim 4\mu\text{m}$ ，革兰氏阴性，无芽孢，无荚膜，菌体极生鞭毛 1~4 根。在 YDC 培养基上菌落白色，接触酶阳性，对葡萄糖能氧化不能发酵；在 KB 培养基上产生绿色荧光色素。PHB 阴性，不能利用 D-阿拉伯糖；LOPAT 试验，蔗糖形成果聚糖，氧化酶反应；马铃薯软腐试验，精氨酸双水解酶和烟草过敏反应的结果为 +, -, -, -, +；不能利用纤维二糖、海藻糖、L-鼠李糖、蔗糖和苯甲酸；能利用甘露醇和山梨醇；葡萄糖酸氧化呈阴性反应；超过 41℃ 不能生长。*P. syringae* 的 DNA 的 G+Cmol% 为 59~61。病菌的生理生化特性测定结果见表 26-1。

表 26-1 番茄细菌性斑点病病原细菌生理生化性状试验结果

测定项目	供试菌株	对照菌株 (ICMP2844—87)
KB 培养基产荧光	+	+
产生果聚糖	+	+
氧化酶	-	-
马铃薯腐败	-	-
烟草过敏实验	HR	HR
精氨酸双水解	-	-
耐盐性实验	5%	5%
3%的 KOH 实验	+	+
YDC 培养基上黄色	-	-
PHB 颗粒	-	-
冰核活性	-	-
41℃ 生长	-	-
与氧的关系	+	+
生长因素要求性测定	-	-
牛乳培养实验	+	+
葡萄糖氧化发酵试验	+	+
3-酮基乳糖产生	-	-
蔗糖还原物质产生	+	+
乙酰甲基甲醇测定	-	-
甲基红测定	-	-
葡萄糖酸氧化	-	-
配糖体的分解	+	+
天门冬酰胺的利用	+	+
硝酸盐的还原	-	-
脱氮反应	-	-

续表

测定项目	供试菌株	对照菌株 (ICMP2844—87)
明胶液化	+	+
酪蛋白消化	-	-
淀粉水解	-	-
吐温 80 的分解	+	+
果胶的溶解	-	-
硫化氢的产生	-	-
脲酶测定	+	+
氨基酸脱羧测定	-	-
酪氨酸酶测定	-	-
苯丙氨酸脱氨酶	-	-
卵磷脂酶测定	-	-
过氧化氢酶	+	+
DNA 分解实验	+	+
吲哚的产生	-	-
氨的产生	+	+
碳源利用		
D-木糖	+	+
D-葡萄糖	+	+
D-阿拉伯糖	-	-
蔗糖	-	-
乳糖	-	-
麦芽糖	-	-
海藻糖	-	-
纤维二糖	-	-
鼠李糖	-	-
丙二醇	+	+
山梨醇	+	+
肌醇	+	+
甘露醇	+	+
赤藓醇	-	-
乳酸	+	+
甜菜碱	+	+
奎尼酸	+	+

测定项目	供试菌株	对照菌株 (ICMP2844—87)
α -酮戊二酸	+	+
乙酸	+	+
邻氨基苯甲酸	-	-
丙酸	+/-	+
苯甲酸	-	-
L-酒石酸	-	-
葫芦巴碱	+	+
抗坏血酸	-	-
酪氨酸	+	+
高丝氨酸	-	-
组氨酸	-	-
L-苹果酸	+	+

注：“+”表示阳性；“-”表示阴性。

病菌有 2 个生理小种，即 0 号和 1 号小种(Lawton, 1984)，RAPD 和 AFLP 技术不能区分 *P. syringae* pv. *tomato* 的两个小种。病菌分血清学 I 和血清学 II 菌系。菌株的致病性、碳水化合物利用、噬菌体敏感性和质粒情况具多样性(Denny, 1988)，菌株的总可溶性蛋白电泳图谱也存在很大差异(Serfontein and Hattingh, 1990)。有些病菌还含有质粒(Cooksey, 1988)，并且质粒控制病菌的抗铜性，PT23 菌株是最抗铜的，已经克隆到抗铜基因，并且测定了抗铜基因序列(Mellano and Cooksey, 1988)。对病菌的无毒基因研究方面也有很大进展，克隆了 *P. syringae* pv. *tomato* 的 *avrPto* 基因(Ronald *et al.*, 1992)，分析了 *avrD* 的分子特性(Kobayashi *et al.*, 1990)和 *avrD* 启动子的特性(Shen and Keen, 1993)。

致病机理：扫描电镜和光镜观察证明叶片的气孔和叶毛基部是最初侵染点，病菌侵染果实的部位是表皮上的膨大区，类似毛状体的基部(Getz *et al.*, 1983)。病菌能够产生诱导褪绿毒素(coronatine) (Mitchell *et al.*, 1983)和类似菜豆丁香假单胞菌毒素的物质(Bagdache, *et al.*, 1990)。褪绿毒素是菌株 DC3000 在接种条件下侵染拟南芥所必需的，通过抑制防御相关基因的活性在侵染的初期起关键作用(Mittal and Davis, 1995)。褪绿毒素和甲基茉莉酸(methyl jasmonate)处理番茄叶片后，组织结构发生变化，褪绿毒素引起细胞壁加厚和叶绿体皱缩等，产生褪绿毒素的病菌接种产生的症状与褪绿毒素处理后叶组织的症状相似(Palmer *et al.*, 1995)。病菌在感病品种的危害发展初期也可产生几丁质酶和果胶酶(Bashan *et al.*, 1985)。研究也证实病菌产生的氨能引起番茄叶片产生枯斑(Bashan *et al.* 1980)。菌株 DC3000(小种 1 号)产生的 Hrp 菌毛在过敏性反应和致病性方面也起一定作用(Roine *et al.*, 1997)。Jackson 等(1992)克隆了 *P. syringae* pv. *tomato* 的 3.8kb *EcoRI* 的 DNA 片段，是病菌在番茄上生长所必需的。Morris 等(1995)分离并测定了编码 DPG-independeng-PGM 的基因，证明了 PGM 活性是病菌生长和其在寄主上的致病性所

必需的。

第五节 病害生态学特征与传入途径

病菌在种子、病残体、土壤和杂草上(不显症)越冬,可在黑麦 *Secale cereale* 的根、鹅肠草 *Stellaria media*、拟南芥菜 *Arabidopsis thaliana*、接骨草 *Lamium amplexicaule* 的叶和根上存活(Jones *et al.*, 1981)。番茄田的稗子 *Echinochloa crusgalli*、马齿苋 *Portulaca oleracea*、反枝苋 *Amaranthus retroflexus*、狗牙根 *Cynodon dactylon* 和偃麦草 *Agropyron repens* 等植物上可以分离到 *P. syringae* pv. *tomato*(Bogatsevska, 1988)。病菌在干燥的种子可存活 20 年(Bashan *et al.*, 1982),可随种子远距离传播。播种带菌种子,幼苗可发病。幼苗发病后传入大田,并通过雨水、农事操作如修剪、移栽传播。25℃ 以下的温度和相对湿度 80% 以上的条件有利发病,高于 30℃ 发病轻(Yunis *et al.*, 1980)。从开花到直径 3cm 的幼果时期番茄的果实最感病(Getz *et al.*, 1983)。我国 1998 年发现该病,估计是从疫区引进番茄种子带进的病原。

第六节 番茄抗病性及番茄与病菌相互作用

一、抗病性

国外研究者测定了大量的品种,表现抗病的品种见表 26-2。

表 26-2 番茄抗细菌性斑点病的品种

品种	参考文献
<i>Lycopersicum pimpinellifolium</i> P1126430	
<i>L. Peruvianum</i> P1128643, 128650, P1126946, P1128652	Pilowsky and Zutra, 1982
<i>L. hirsutum</i> f. <i>glabratum</i> P1134417, 134418	
<i>Lycopersicum esculentum</i>	
<i>L. glandulosum</i>	
<i>L. hirsutum</i>	Lawson and Summes, 1984
<i>L. peruvianum</i>	
<i>L. pimpinellifolium</i>	
<i>Lycopersicum peruvianum</i>	
<i>L. esculentum</i> subsp. <i>galentii</i>	
<i>L. glandulosum</i>	Sotirova, 1988
<i>L. pimpinellifolium</i>	
<i>L. hirsutum</i> f. <i>glabratum</i>	
<i>Lycopersicum peruvianum</i> var <i>humifusum</i> LA2151	
<i>L. hirsutum</i>	
<i>L. hirsutum</i> f. sp. <i>glaberrimum</i> LA-111	
<i>L. chilense</i> LA456	Sotirova and Bogatsevska, 1990
<i>L. Pimpinellifolium</i> P1126947	
<i>L. pimpinellifolium</i> P1126444	
<i>L. esculentum</i> subsp. <i>galentii</i>	

品种	参考文献
<i>Lycopersicon pimpinellifolium</i> PI126925	Sotirova <i>et al.</i> , 1992
<i>L. peruvianum</i> var. <i>dentatum</i> PI251315 和 var. <i>humifusum</i> PI127829	
Zelandia	Pajewska, 1979
Rehovot13	Iunes <i>et al.</i> , 1979
PI112215, PI129157	Lawson <i>et al.</i> , 1982
<i>Lycopersicon pimpinellifolium</i> (PI126430)	
<i>L. peruvianum</i>	Pilowsky <i>et al.</i> , 1982
<i>L. hirsutum</i> f. sp. <i>glabratum</i>	
<i>Lycopersicon pimpinellifolium</i> PI126927	Fallik <i>et al.</i> , 1983
Macedonia, ACE55FV, BOG-AT69	Panagopoulos <i>et al.</i> , 1988
PI001, PI009, PI018, PI025, PI026, PI027, PI032, PI033	赵廷昌等, 2000

中国农业科学院植物保护研究所收集了 76 份来自中国农业科学院蔬菜花卉研究所、吉林省长春蔬菜所、辽宁省农业科学院蔬菜所、内蒙古包头市农科所和中国农业科学院植保所的番茄品种。经鉴定,表现高抗的品种有 8 份,占鉴定品种的 11%。这些抗性品种的保存号为:PI001、PI009、PI018、PI025、PI026、PI027、PI032、PI033。抗病品种又重新进行了接种鉴定,结果相同。其中,PI001、PI009、PI033 两次接种都无症状反应,属于免疫品种。中国农业科学院植物保护研究所和蔬菜花卉研究所品种资源室合作,对 106 份番茄材料进行了苗期抗病性鉴定,结果获得了 7 份免疫品种。鉴定发现了抗病和免疫的品种资源,但目前还不知道这些品种资源的抗性是由相同的还是不同的基因决定的。国外报道的抗性品种 pI126430、Ontario7710 和 Rehovot13 抗病基因不同,但抗性都是由单基因决定的。鉴定的大果番茄主栽品种几乎都不抗病,抗病的特别是免疫的都是小果番茄。这与 Pilowsky and Zutra(1986)对野生番茄品种抗病鉴定结果一致。筛选所获得的抗病品种为进一步研究抗性遗传、克隆抗病基因和进行抗病育种提供了材料。

二、抗性遗传

研究表明,番茄抗细菌性斑点病为单基因显性遗传(Lawson, 1984; Fallik *et al.*, 1983)。如 PI126430、*L. pimpinellifolium*(PI126444)、*Lycopersicon esculentum* subsp. *galenii* 的抗病性是由单个基因控制的。商用品种 Ontario7710(显性单基因抗性)抗性基因通过 Farthest North 来自 *L. pimpinellifolium* (Pitblado *et al.*, 1984; Fallik *et al.*, 1983)。我们利用细菌性斑点病的抗病番茄品种(红珍珠和美味樱桃)和感病品种(中蔬四号、美国大红樱桃和 MR),通过常规田间抗感杂交、回交,接种病原菌鉴定子代的抗病性分离情况,统计分析的结果表明,杂交 F₁ 代全部抗病, F₂ 代和 BC₁ 代的抗感分离比分别符合 3:1 和 1:1 的理论分离比,说明红珍珠和美味樱桃品种对番茄细菌性斑点病的抗病性为单基因显性遗传。

三、抗病机理

叶片形态与病菌侵入的关系研究表明,抗感性与叶片形态关系不大(Bashan *et al.*,

1985)。Ontario7710 的抗性也不是结构抗性的结果,接种 15 天后叶细胞无变化(Varvaro *et al.*, 1993)。Bashan 等(1987)研究了过氧化物酶、多酚氧化酶及酚与植株抗病的关系,认为抗性是氧化酚系统的贡献。Pautot 等(1991)研究了病菌侵染和受伤期间番茄蛋白酶抑制剂 I 和 II 基因表达的差异,测试品系蛋白酶抑制剂 II 的 mRNAs 比 I 的 mRNAs 积累的多,并且蛋白酶抑制剂 II 的 mRNAs 在抗病品系中比感病品系中积累的快。亮氨酸氨肽酶是 *Lycopersicon esculentum* 的防御反应(对 *P. syringae* pv. *tomato*)的诱导组分(Pautot *et al.*, 1993)。从番茄种子中获得了一种抗细菌(*P. syringae* pv. *tomato* 和 *P. syringae* pv. *glycinea*)活性蛋白(Ersek and Karr, 1986)。

四、抗病基因

Pitblado 等(1984)确定了 *pto* 的染色体定位及 *pto* 的连锁关系。Martin 等(1991)利用随机引物和近等基因系快速标定与 *pto* 基因的连锁标记,1993 年根据图谱克隆了 *pto* 基因,该基因编码丝氨酸/苏氨酸激酶,识别病菌的信号或 fenthion 分子。1994 年克隆了 *pto* 基因家族中的两个成员:抗性基因和倍硫磷敏感基因。番茄 *pto* 位点为半显性,并且与倍硫磷的敏感性共分离(Carland and Staskawicz, 1993)。1995 年把 *pto* 基因成功地转移到烟草 *Nicotiana benthamiana* 中并抗性功能得到了表达(Rommens *et al.*, 1995),在烟草中表达增强了烟草对 *P. syringae* pv. *tabaci*(avrPto)的抗病性(Thilmony *et al.*, 1995)。Jia YuLin 等(1997)报道在感斑点病和对倍硫磷不敏感的番茄品种 *L. esculentum* 中存在 *pto* 和 *fen* 的等位基因,等位基因得到分离和特性测定,它编码活性蛋白激酶。*fen* 是 *pto* 基因家族的成员,控制对 fenthion 敏感性的基因。1994 年报道了与 *pto* 紧密连锁的 *prf* 位点,抗病并且对倍硫磷敏感,在对病菌激发子的反应中起信号作用。Salmeron 等(1996)报道 *prf* 位于 *pto* 基因簇内,24kb 来自 *pto* 基因,500bp 来自 *fen* 基因,*prf* 编码的蛋白质具有亮氨酸拉链、核苷酸结合结构和富亮氨酸重复基元。番茄的抗性基因除了 *pto* 外,还有一些其他抗病基因。Pilowsky(1986)研究认为 PI126430 的抗性基因与 *pto* 不同,基因符号定为 *pto2*。Stockinger and Walling(1994)报道了 *L. hirsutum* var. *glabratum* 的抗性基因 *pto3*(抗小种 0 号)和 *pto4*(抗小种 1 号)。Zhou 等(1995)报道番茄的 *pti1* 基因,编码丝氨酸/苏氨酸激酶,被 Pto 磷酸化,与过敏性反应有关。Tobias(1996)报道 *pti1* 基因与 *pto* 结合,作用于 *pto* 下游,引起过敏性反应。Zhou 等(1997)确定了 *pti4*, *pti5*, *pti6* 基因,编码蛋白与 Pto 激酶互作。我们根据已报道 *Pto* 基因的序列特征设计引物,通过 PCR 扩增,从 10 个抗病番茄品种中获得了 10 个克隆(见图 26-3)。序列比较证明其中两个克隆(XX 和 BJX)的序列和报道基因完全一致,表明我们已经获得了该抗病基因的克隆。其余 8 个克隆与报道基因的同源性在 91%以上,为其同源序列。构建了该基因的原核表达载体并在大肠杆菌 BL21(DE3)pLys 中实现了特异性表达,产生了表观分子质量为 31kDa 的蛋白质产物。根据已报道的番茄抗细菌性斑点病基因(*Pto*)的序列特征设计引物,从三个感病番茄品种中分离到三个克隆(图 26-4)。序列比较发现其中两个克隆序列和报道基因完全一致,另外一个克隆和报道基因的序列同源性为 99%,表明在感病番茄品种中也带有抗病基因的同源序列。根据已报道番茄 *Prf* 基因的完全编码阅读框设计引物,通过 PCR 扩增从 8 个抗病番茄品种中获得 8 个克隆。所得的克隆与报道 *Prf* 基因序列的同源性在 98%以上,因而为 *Prf* 基因同源序列。

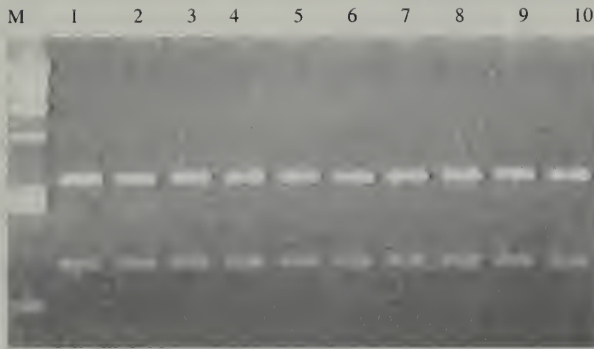


图 26-3 重组质粒的双酶切鉴定

M. λ DNA/Hind III; 1. XX/EcoR I+Hind III; 2. BJX/EcoR I+Hind III;
3. FI/EcoR I+Hind; 4. HTY/EcoR I+Hind III; 5. HZZ/EcoR I+Hind III;
6. ME/EcoR I+Hind III; 7. MW/EcoR I+Hind III; 8. WNS/EcoR I+Hind III;
9. ZZ/EcoR I+Hind III; 10. ZZCC/EcoR I+Hind III

五、抗病基因与无毒基因互作

Ronald 等(1992)克隆了 *P. syringae* pv. *tomato* race 0 的 *avrPto* 基因, 它与植物番茄的 *pto* 基因互作。Kobayashi 等(1990)分析了 *avrD* 的分子特性。Shen and Keen(1993)研究了 *avrD* 启动子的特性。*avrD* 诱发子分子在 *avrD-Rpg4*(大豆抗 *P. syringae* pv. *tomato* 的基因)互作中是诱发过敏性反应的信号(Keen and Buzzell, 1991)。Kobayashi 等(1990)从 *P. syringae* pv. *glycinea* 中获得一克隆与 *avrD* 具同源性, 但该克隆没有无毒表型。研究认为 *avrE* (*P. syringae* pv. *tomato* 的克隆使 *P. syringae* pv. *glycinea* 在大豆上表现为过敏性反应)与 *hrp* 基因相连, 有 2 个转录单位。*P. syringae* pv. *tomato* 的 *avrE* 与 *Erwinia amylovora* 的 *dspEF*(与 *hrp* 基因连锁的致病位点)具有同源性且功能相似(Bogdanove *et al.*, 1998)。*avrRpt2* 的转录需要病菌的 *hrpSR* 的致病功能(Salmeron *et al.*, 1993)。

Whalen 等(1991)报道拟南芥生态型 Co-1 抗带有 *avrRpt2* 的病菌。拟南芥的抗病位点 RPS2 专化识别 *P. syringae* pv. *tomato* 的 *avrRpt2*(Kunkel *et al.*, 1993)。利用病菌(含 *avrRpt2*)接种拟南芥后, 诱导了 SAR, 植株能够抗毒性病菌菌株和 *P. syringae* pv. *maculicola* (Cameron *et al.*, 1994)。用 2, 6-dichloroisonicotinic acid 处理拟南芥, 拟南芥获得了对于 *P. syringae* pv. *tomato* 的抗性(Uknes *et al.*, 1992)。Bisgrove 等(1994)证明了拟南芥的抗性位点 *Rps3*(对应 *P. syringae* pv. *tomato* 的 *avrB*)和 *Rpm1*(对应 *P. syringae* pv. *tomato* 的 *avrRpm1*)是同一基因。利用拟南芥和 *P. syringae* pv. *tomato* 研究了无毒基因在转基因植

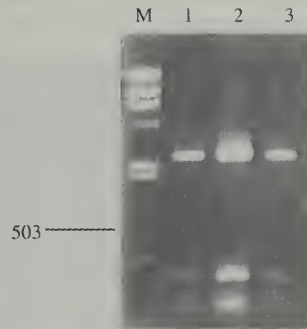


图 26-4 插入外源 DNA 片段的重组质粒双酶切鉴定

M. λ DNA/Hind III; 1. HZZ/EcoR I+Hind III; 2. HYT/EcoR I+Hind III.
3. MW/EcoR I+Hind III

物中的表达(McNellis *et al.*, 1998)。

当把 *avrPto* 基因克隆转到 PST 的 1 号小种菌株中, 与带有 *Pto1* 基因的番茄互作产生非亲和反应, 然而从小种 1 号菌株中删除 *avrPto* 基因并没有改变它们的非亲和性互作(Ronald *et al.*, 1992)。这些结果表明番茄与 PST 的互作可能是复杂的互作而不是简单的基因对基因的互作。

番茄-病菌系统已经发展成为研究病原识别和病害抗性表达分子基础最好的模型系统(Tobias *et al.*, 1997)。Tang 等(1996)研究了番茄抗细菌性斑点病的信号识别和转导, 提出了 Pto/Fen 介导信号途径模型。Giacomin 等(1996)利用 *P. syringae* pv. *tomato* 侵染拟南芥, 研究了 PLA1 启动子荧光素酶基因融合的表达。Lawton 等(1994)利用 *P. syringae* pv. *tomato* 侵染拟南芥确定了水杨酸而不是乙烯是拟南芥的获得性抗性所必需的。Century 等(1997)确定了拟南芥的抗 *P. syringae* pv. *tomato* 的 NDR1 位点。Lawton 等(1996)报道 Benzothiadiazole 诱导的拟南芥的抗病性依靠 SAR 信号传导途径的激活。

第七节 早期诊断技术

病菌检验包括接种检验、血清学检验、培养检验和 DNA 探针检验等技术。真空浸透接种方法可检验到每克土壤中或每毫升测试悬浮液中含有的 10 个 CFU(Jones *et al.*, 1981)。应用病原型指示噬菌体可快速检测番茄叶和果部病斑上的病菌。Saygili 等(1987)获得了专化噬菌体。在含有蔗糖、赤藓醇及 DL-乳酸盐作单一碳源的 Misaghi 与 Grogen 的缺铁培养基上不同发荧光能力而易于把 *P. syringae* pv. *tomato*、*P. syringae* pv. *syringae*、*P. viridiflava* 区分开, *P. syringae* pv. *syringae* 在含有蔗糖、赤藓醇及 DL-乳酸盐的培养基上发荧光, *P. syringae* pv. *tomato* 仅在含蔗糖的培养基上发荧光, *P. viridiflava* 仅在含赤藓醇及 DL-乳酸盐的培养基上发荧光(Jones *et al.*, 1986)。Cuppels 等(1990)利用构建的控制 coronatine 产生的染色体上 5.3kb *XhoI* 片段的探针, 确定番茄上的 *P. syringae* pv. *tomato*。

我们制备了病菌的抗血清, 间接 ELISA 测定待测菌悬液浓度, 菌悬液浓度 3×10^6 CFU/ml 可作为检测用浓度。抗 87 血清反应较抗 18 血清强。抗全菌体血清的效价比较低, 比另外两种抗血清低大概一倍, 分析其原因有: ①抗 87 血清和抗 18 血清的抗原为蛋白溶液, 抗原决定簇浓度大, 抗原性好; ②佐剂的加入使免疫应答增强; ④足部多点注射方式比耳静脉注射方式效果好。抗全菌体血清的假阳性反应菌有 9 种, 抗 87 血清假阳性菌有 10 种, 抗 18 血清假阳性菌 8 种, 其中 3023、2189、3113、2814、3935、Psl-1、Psl-2、ISL4 为三种血清共同的交叉菌, 并且除 ISL4 以外的 7 种菌都是丁香假单胞杆菌, 说明其原因为共同抗原的存在。间接 ELISA 检测抗体专一性: 三种抗体对所有供试 Pst 菌都呈阳性反应。

我们以引物 p1(+), p2(-)进行扩增, 可以在番茄细菌性斑点病菌和其他三个丁香假单胞杆菌中的近缘种: 大豆斑病变种、大白菜叶斑病、黑斑病菌中扩增出一条大小约为 655bp 的片断(见图 26-5)。因此, 这一对引物对于检测 Pst 来说并不是最特异的。以 p3(+), p4(-)为引物进行扩增, 在全部的 Pst 菌中, 都可以得到一条大小在 1476bp 左右的 DNA 片段, 而且只有这一条带。以引物 p3(+), p4(-)进行扩增, 除 2814 以外对于全部非 Pst

菌扩增不出 1476bp 的条带，而 2814 除 1476bp 带以外还有一条 560bp 左右的条带(见图 26-6)。因此这对引物是对病菌特异的引物，可以用于检测，而 p1(+)、p2(-)可以用来作辅助检测。

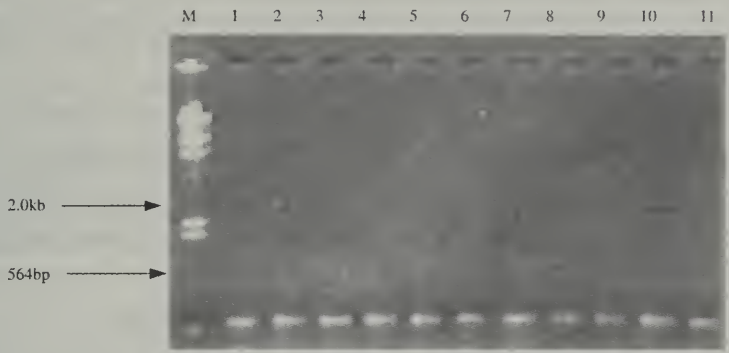


图 26-5 PST 655bp 冠毒素基因 PCR 扩增

M. λDNA/Hand III; 1. PST2844-87; 2. PST18; 3. PST3; 4. PST15; 5. PST27;
6. PST31; 7. PST35; 8. PST42; 9. 2189; 10. 3935; 11. B-1

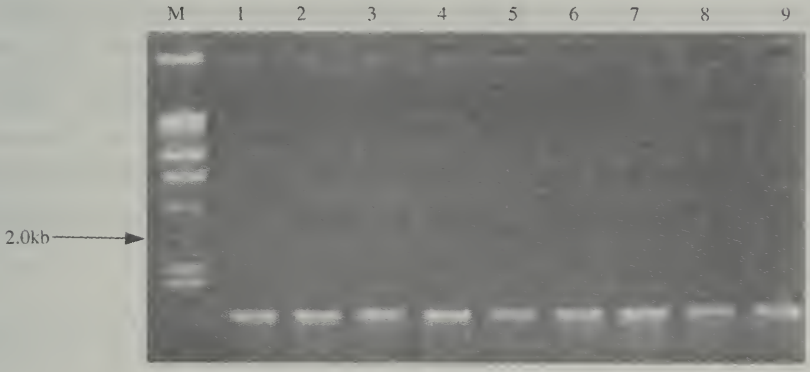


图 26-6 PST1476bp 冠毒素基因 PCR 扩增

M. λDNA/Hand III; 1. PST2844-87; 2. PST18; 3. PST11; 4. PST12; 5. PST29;
6. PST3; 7. PST31; 8. PST41; 9. PST47

第八节 病害控制

对番茄细菌性斑点病的防治，主要采取的方法有：加强检疫，防止带菌种子传入非疫区；选用抗病品种；建立无病种子田，采用无病种子；种子处理，温汤浸种 56℃，30min(Jurchak *et al.*, 1983)；3 年以上的轮作；注意病田的农事操作，以免病害的传播；药剂防治等。

对番茄细菌性斑点病的化学防治进行了大量研究，建立了化学防治时间模型： $BP = 0.98 + 0.72(R) - 0.11(T) + 0.01(H) + 0.51(P)$ (R =总雨量与 $0.5 \times$ 前 6 天雨量之和的平方根； T =平均温度； H =前些天平平均相对湿度的 arcsin 平方根； P =样品上的群体(Jardine *et al.*,

1987)。可选用以下药剂进行喷雾防治：①77%可杀得可湿性粉剂 400~500 倍液。②14%络氨铜水剂 300 倍液。③0.3%~0.5%的氢氧化铜(Yunis *et al.*, 1980)。④200ppm 链霉素(Pyke *et al.*, 1984)。⑤0.05%Cryptonal [chinosol] 和 0.5% Miceram (copper oxychloride + zineb), 10 天喷一次, 共喷 1 次或 2 次。⑥Spritz-Cupral45(0.5% at 600L/hm²)。⑦Zn ion maneb+复合 Cu(Jurchak *et al.*, 1983)。⑧3.62mmol/L 的水杨酸。⑨Cuzin15(15%氢氧化铜+0.8%zinc) 在 0.5%~1%使用浓度(Severin *et al.*, 1990)。

Colin 等(1988)报道荧光假单胞菌可用于番茄细菌性斑点病的生物防治, 生防与化防效果相当, 研究了荧光假单胞菌的一些特性。Vega 等(1996)报道生物碱对 *P. syringae* pv. *tomato* 的杀灭作用, 白羽扇豆碱的杀灭浓度为 5~10mmol/L。Cooksey(1988)用 *P. syringae* pv. *tomato* 的 Tn5 无致病性抗铜突变株和含铜杀细菌剂一起应用降低了病菌的侵染。

第九节 应用与基础研究发展策略

番茄为我国人们喜食的蔬菜, 每年种植 57 万公顷左右, 占商业蔬菜面积的 6%~7%, 设施农业中, 番茄也占很大比重。番茄生产的好坏, 将直接影响我国的菜篮子工程。近年来, 在东北三省和甘肃省的番茄上发现番茄细菌性斑点病, 经调查此病发生有上升趋势, 对我国的番茄生产构成了严重威胁, 急需研究解决这一病害的防治问题。种子带菌是此病害田间主要初侵染源之一, 也是病害远距离传播的唯一途径。研究快速检测种子带菌情况的方法是降低田间初侵染源量和防止病害远距离传播的关键。制定切实可行、快速、高效检测番茄细菌性斑点病种子带菌情况的实验方案。

随着育种工作的不断发展, 国际间品种资源交流频繁, 尤其近年来我国引进新品种的数量逐年增加, 与此同时有一些病害在不经意中被引进。立项研究快速的种子带菌检测技术和抗病基因的利用工作非常重要。

(赵廷昌 孙福在于 莉 时 涛 回文广)

主要参考文献

- 赵廷昌、孙福在, 冯凌云等. 2000. 番茄品种对番茄细菌性斑点病的抗性鉴定. 植物保护, 26(4): 49~50 [Zhao T C, Sun F Z, Feng L Y *et al.* 2000. Identification of varieties resistance to bacterial speck of tomato. *Plant Protection*, 26(4): 49~50]
- Bagdache M, Volksch B, Fritsche W. 1990. The production of different phytotoxins by strains of *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Zentralblatt für Mikrobiologie*, 145(2): 111~119
- Bashan Y, Okon Y, Henis Y. 1987. Peroxidase, polyphenoloxidase, and phenols in relation to resistance against *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* in tomato plants. *Canadian Journal of Botany*, 65(2): 366~372
- Bashan Y, Okon Y, Henis Y. 1985. Morphology of leaf surfaces of tomato cultivars in relation to possible invasion into the leaf by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Annals of Botany*, 55(6): 803~809
- Bashan Y, Okon Y, Henis Y. 1985. Detection of cutinases and pectic enzymes during infection of tomato by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Phytopathology*, 75(8): 940~945
- Bashan Y, Okon Y, Henis Y. 1980. Ammonia causes necrosis in tomato leaves infected with *Pseudomonas tomato* (Okabe) Alstatt. *Physiological Plant Pathology*, 17(1): 111~119
- Bashan Y, Okon Y, Henis Y. 1982. A note on a new defined medium for '*Pseudomonas tomato*'. *Journal of Applied Bacteriology*, 52(2): 297~298

- Bigrove S R, Simonich M T, Smith N M *et al.* 1994. A disease resistance gene in *Arabidopsis* with specificity for two different pathogen avirulence genes. *Plant Cell*, 6(7): 927-933
- Bogatsevska N. 1988. Sources of infection and species composition of the epiphytic population of *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Rasteniev'dni-Nauki*, 25(8): 65-70
- Bogdanove A J, Kim J F, Wei Z M *et al.* 1998. Homology and functional similarity of an *hrp*-linked pathogenicity locus, *dspEF*, of *Erwinia amylovora* and the avirulence locus *avrE* of *Pseudomonas syringae* pathovar *tomato*. *PNAS*, 95: 1325-1330
- Carland F M, Staskawicz B J. 1993. Genetic characterization of the *Pto* locus of tomato: semi-dominance and cosegregation of resistance to *Pseudomonas syringae* pathovar *tomato* and sensitivity to the insecticide fenthion. *Molecular and General Genetics*, 239(1-2): 17-27
- Century K S, Shapiro A D, Repetti P P *et al.* 1997. NDR1, a pathogen-induced component required for *Arabidopsis* disease resistance. *Science*, 1278(5345): 1963-1965
- Colin J E. 1988. Antagonism between fluorescent *Pseudomonas* species and several pathogens of *Pseudomonas syringae* application as a method of controlling bacterial fleck of tomato. *Bulletin OEPP*, 18(1): 47-54
- Cooksey D A. 1988. Reduction of infection by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* using a nonpathogenic, copper-resistant strain combined with a copper bactericide. *Phytopathology*, 78(5): 601-603
- Cuppels D A, Moore R A, Morris V L. 1990. Construction and use of a nonradioactive DNA hybridization probe for detection of *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* on tomato plants. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6): 1743-1749
- Denny T P. 1988. Phenotypic diversity in *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Journal of General Microbiology*, 134(7): 1939-1948
- Ersek T, Karr A L. 1986. Goodman, R. N., Antibacterial activity of a protein(s) from tomato. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 21(3-4): 193-201
- Fallik E, Bashan Y, Okon Y *et al.* 1983. Inheritance and sources of resistance to bacterial speck of tomato caused by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Annals of Applied Biology*, 102(2): 365-371
- Getz S, Stephens C T, Fulbright D W. 1983. Influence of developmental stage on susceptibility of tomato fruit to *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Phytopathology*, 73(1): 36-38
- Giacomin L T, Szalay A A. 1996. Expression of a FAL1 promoter luciferase gene fusion in *Arabidopsis thaliana* in response to infection by phytopathogenic bacteria. *Plant Science*, 116(1): 59-72
- Goode M J, Sasser M. 1980. Prevention the key to controlling bacterial spot and bacterial speck of tomato. *Plant Disease*, 64(9): 831-834
- Iunes H, Bashan Y, Okon Y *et al.* 1979. Rehovot 13, a tomato cultivar resistant to bacterial speck (*Pseudomonas tomato*). *Hassadeh*, 59(12): 2483-2487
- Jackson D P, Gray D A, Morris V L *et al.* 1992. Identification of a DNA region required for growth of *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* on tomato plants. *Canadian Journal of Microbiology*, 38(9): 883-890
- Jardine D J, Stephens C T. 1987. A predictive system for timing chemical applications to control *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*, causal agent of bacterial speck. *Phytopathology*, 77(6): 823-827
- Jia-YuLin, Loh-YingTsu, Zhou-JianMin *et al.* 1997. Alleles of *Pto* and *Fen* occur in bacterial speck-susceptible and fenthion-insensitive tomato cultivars and encode active protein kinases. *Plant Cell*, 9(1): 61-73
- Jones J B, Gitaitis R D, McCarter S M. 1986. Fluorescence on single-carbon sources for separation of *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*, *P. syringae* pv. *tomato*, and *P. viridiflava* on tomato transplants. *Plant Disease*, 70(2): 151-153
- Jones J B, McCarter S M, Smitley D R. 1981. A vacuum infiltration inoculation technique for detecting *Pseudomonas tomato* in soil and plant tissue. *Phytopathology*, 71(11): 1187-1190
- Jurchak T B, MacNab A A, Lukezic F L. 1983. A speck is not trifling but action solves problem. *Science in Agriculture*, 30(2): 10
- Keen N T, Buzzell R I. 1991. New disease resistance genes in soybean against *Pseudomonas syringae* pv. *glycinea*: evidence that one of them interacts with a bacterial elicitor. *Theor. Appl. Genet.*, 81: 133-138
- Kobayashi D Y, Tamaki S J, Keen N T. 1990. Molecular characterization of avirulence gene D from *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Molecular Plant Microbe Interactions*, 3(2): 94-102
- Kunkel B N, Bent A F, Dahlbeck D *et al.* 1993. RPS2, an *Arabidopsis* disease resistance locus specifying recognition of *Pseudomonas syringae* strains expressing the avirulence gene *avrRpt2*. *Plant Cell*, 5(8): 865-875
- Lawson V F, Summers W L. 1982. Screening wild *Lycopersicon* for resistance against *Pseudomonas tomato* and *Xanthomonas vesicatoria*. *HortScience*, 17(3, II): 503
- Lawson V F, Summers W L. 1984. Resistance to *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* in wild *Lycopersicon* species. *Plant Disease*,

- Lawton K A, Potter S L, Uknes, S *et al.* 1994. Acquired resistance signal transduction in Arabidopsis is ethylene independent. *Plant Cell*, 6: 581-588
- Lawton K A, Friedrich L, Hunt M *et al.* 1996. Benzothiadiazole induces disease resistance in Arabidopsis by activation of the systemic acquired resistance signal transduction pathway. *Plant Journal*, 10: 71-82
- McNellis T, Mudgett M B, Li K *et al.* 1998. Glucocorticoid-inducible expression of a bacterial avirulence gene in transgenic Arabidopsis induces hypersensitive cell death. *The Plant Journal*, 14 (2): 247-257
- Mellano M A, Cooksey D A. 1988. Nucleotide sequence and organization of copper resistance genes from *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Journal of Bacteriology*, 170(6):2879-2883
- Mitchell R E, Hale C N, Shanks J C. 1983. Production of different pathogenic symptoms and different toxins by strains of *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* not distinguishable by gel-immunodiffusion assay. *Physiological Plant Pathology*, 23(3): 315-322
- Mittal S, Davis K R. 1995. Role of the phytotoxin coronatine in the infection of Arabidopsis thaliana by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Molecular Plant Microbe Interactions*, 8(1): 165-171
- Morris V L, Jackson D P, Grattan M, Ainsworth T, Cuppels D A. 1995. Isolation and sequence analysis of the *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* gene encoding a 2, 3-diphosphoglycerate-independent phosphoglyceromutase. *Journal of Bacteriology*, 177(7): 1727-1733
- Pajewska M. 1979. Investigation of the susceptibility of tomato varieties to infection by *Pseudomonas tomato* (Okabe) Alstatt. *Roczniki-Nauk-Rolniczych -E*, publ. 9(2): 35-40
- Palmer D A, Bender C L. 1995. Ultrastructure of tomato leaf tissue treated with the pseudomonad phytotoxin coronatine and comparison with methyl jasmonate. *Molecular Plant Microbe Interactions*, 8(5): 683-692
- Panagopoulos C G. 1988. The present status on bacterial diseases of tomatoes in Greece. Progress on pest management in field vegetables. In: *Proceedings of the CEC/OBC Experts' group meeting, Rennes, 20-22 November 1985*. Cavalloro R, Pelereys C ed. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema. 221-222, 2 ref
- Pautot V, Holzer F M, Reisch B *et al.* 1993. Leucine aminopeptidase: an inducible component of the defense response in *Lycopersicon esculentum* (tomato). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 90(21): 9906-9910
- Pilowsky M, Zutra D. 1986. Reaction of different tomato genotypes to the bacterial speck pathogen (*Pseudomonas syringae* pv. *tomato*). *Phytoparasitica*, 14(1): 39-42
- Pilowsky M, Zutra D. 1982. Screening wild tomatoes for resistance to bacterial speck pathogen (*Pseudomonas tomato*). *Plant Disease*, 66(1): 46-47
- Pitblado R E, MacNeill B H, Kerr E A. 1984. Chromosomal identity and linkage relationships of *Pto*, a gene for resistance to *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* in tomato. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 6(1): 48-53
- Roine E, Wei WenSheng, Yuan Jing *et al.* 1997. Hrp pilus: an hrp-dependent bacterial surface appendage produced by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(7): 3459-3464
- Rommens C M T, Salmeron J M, Oldroyd G E D *et al.* 1995. Intergeneric transfer and functional expression of the tomato disease resistance gene *Pto*. *Plant Cell*, 7(10): 1537-1544
- Ronald P C, Salmeron J M, Carland F M *et al.* 1992. The cloned avirulence gene *avrPto* induces disease resistance in tomato cultivars containing the *Pto* resistance gene. *Journal of Bacteriology*, 174(5): 1604-1611
- Salmeron J M, Oldroyd G E D, Rommens C M T *et al.* 1996. Tomato *Prf* is a member of the leucine-rich repeat class of plant disease resistance genes and lies embedded within the *Pto* kinase gene cluster. *Cell Cambridge*, 86(1): 123-133
- Salmeron J M, Staskawicz B J. 1993. Molecular characterization and hrp dependence of the avirulence gene *avrPto* from *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Mol. Gen. Genet.*, 239(1-2): 6-16
- Saygili H, Erkan S. 1987. Studies on the isolation of bacteriophages of bacterial pathogens of tomato and their use for detection. *Doga, Turk Tarim ve Ormancilik Dergisi*, 11(2): 396-412
- Serfontein J J, Hattling M J. 1990. Characterization of *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* by numerical analysis of phenotypic features and total soluble proteins. *Journal of Phytopathology*, 128(3): 220-234
- Severin V, Stancescu C, Zurini L *et al.* 1990. Gazon 15-an indigenous pesticide with wide spectrum in plant protection. *Analele Institutului de Cercetari pentru Protectia Plantelor, Academia de Stiinte Agricole si Silvice*, 23: 255-261

- Shen H, Keen N T. 1993. Characterization of the promoter of avirulence gene D from *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Journal of Bacteriology*, 175(18): 5916-5924
- Sotirova V, Stoimenova E, Rodeva R. 1992. Sources of combined resistance to diseases in wild species of *Lycopersicon* Mill. *Genetika-i-Seleksiya*, 25(1): 38-44
- Sotirova V G, Bogatsevska N. 1990. Reaction of wild species and varieties of the *Lycopersicon* genus to race 0 and race 1 of *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Okabe) Young et al. *Ompies Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 43(2): 89-91
- Sotirova V G, Bogatsevska N. 1988. New sources of resistance to *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Okabe) Young et al. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 41(11): 135-137
- Stockinger E J, Walling L L. 1994. Pto3 and Pto4: novel genes from *Lycopersicon hirsutum* var. *glabratum* that confer resistance to *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Theoretical and Applied Genetics*, 89(7-8): 879-884
- Tang X, Frederick R, Halterman D et al. 1996. Initiation of plant disease resistance by physical interaction of AvrPto with Pto kinase. *Science*, 274: 2060-2063
- Thilmoney R L, Chen ZuTang, Bressan R A et al. 1995. Expression of the tomato Pto gene in tobacco enhances resistance to *Pseudomonas syringae* pv. *tabaci* expressing avrPto. *Plant Cell*, 7(10): 1529-1536
- Tobias C M. 1996. A kinase suicide squad in tomato. *Trends in Plant Science*, 1(5): 133-134
- Tobias C, Salmeron J, Oldroyd G et al. 1997. Genetic interactions specifying disease resistance in the bacterial speck disease of tomato. In: Stacey G, Mullin B, Gresshoff P M eds. *Biology of Plant-Microbe Interactions, Volume 1*. Published by the International Society for Molecular Plant-Microbe Interactions
- Varvaro L, Fanigliulo R, Babelegoto N M. 1993. Transmission electron microscopy of susceptible and resistant tomato leaves following infection with *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. *Journal of Phytopathology*, 138(4): 265-273
- Vega R-de-la, Gutierrez M P, Sanz C et al. 1996. Bactericide-like effect of Lupinus alkaloids. *Industrial Crops and Products*, 5(2): 141-148
- Whalen M C, Innes R W, Bent A F et al. 1991. Identification of *Pseudomonas syringae* pathogens of Arabidopsis and a bacterial locus determining avirulence on both Arabidopsis and soybean. *Plant Cell*, 3(1): 49-59
- Yuan Jing, He ShengYang, Yuan J et al. 1996. The *Pseudomonas syringae* hrp regulation and secretion system controls the production and secretion of multiple extracellular proteins. *Journal of Bacteriology*, 178(21): 6399-6402
- Yunis H, Bashan Y, Okon Y et al. 1980. Chemical control of bacterial speck of tomato and its effect on tomato yield. *Hassadeh*, 60(5): 1004-1007
- Zhou J M, Loh Y T, Bressan R A et al. 1995. The tomato gene Pti1 encodes a serine/threonine kinase that is phosphorylated by Pto and is involved in the hypersensitive response. *Cell Cambridge*, 83(6): 925-935
- Zhou J M, Tang X Y and Martin G. 1997. The Pto kinase conferring resistance to tomato bacterial speck disease interacts with proteins that bind a cis-element of pathogenesis-related genes. *EMBO Journal*, 16: 3207-3218

第二十七章 李属坏死环斑病毒

第一节 地理分布和经济影响	562	第五节 生态学特性	567
第二节 识别特征与早期诊断	564	第六节 检测与诊断	568
第三节 传播和流行	564	第七节 风险分析	568
第四节 生物学特性	565	第八节 预防与控制	569

摘要 李属坏死环斑病毒(*Prunus necrotic ringspot virus*, PNRSV), 属于雀麦花叶病毒科 Bromoviridae, 等轴不稳环斑病毒属 *Ilarvirus* 的正单链 RNA 病毒, 是我国公布的《中华人民共和国进境植物检疫危险性病、虫、杂草名录》中的二类危险性有害生物。该病毒世界性分布, 可侵染多种果树、花卉及经济作物, 寄主范围达 21 科之多。本章从地理分布与经济影响、识别特征与早期诊断、生物学和生态学特性、检测与诊断、风险分析、预防与控制策略等多个方面对李属坏死环斑病毒进行了介绍。

关键词 李属坏死环斑病毒

Chapter 27 Prunus Necrotic Ringspot Virus

Abstract: *Prunus necrotic ringspot virus* (PNRSV), single-stranded RNA, is a member of the family Bromoviridae, genus *Ilarvirus*. PNRSV is a high risk disease on the list of Quarantine Pest, Insects and Weeds for Plants Imported into P. R. China. PNRSV occurs worldwide and has a wide range of hosts of 21 families. PNRSV causes various ringspot diseases in stone fruit, horticultures and economically important crops. This chapter gave introduction of PNRSV in various aspects, such as geographical distribution, economic impacts, characters for primary monitoring, biological and ecological properties, inspection and identification, risk analysis, strategies for prevention and control.

Key words: *Prunus necrotic ringspot virus*

第一节 地理分布和经济影响

李属坏死环斑病毒学名为 *Prunus necrotic ringspot virus*, 简称 PNRSV。环斑病毒的

初次报道是在李子和桃上(Valleau, 1932),后来是甜樱桃(Thomas and Rawlins, 1939)和酸樱桃上(Moore and Keitt, 1944)。在桃上的报道是 1941 年(Cochran and Hutchins, 1941)。此后,又有几种线斑和坏死症状被相继报道,包括杏椭圆斑、杏线斑、樱桃坏死、樱桃多皱花叶、李属环斑、李子线斑、樱桃 Stecklenberge 病毒、核果类环斑、酸樱桃坏死环斑和桃及樱桃的烂叶。这些都是由李属坏死环斑病毒(PNRSV)的不同株系引起的。

李属坏死环斑病毒分布广泛,主要分布在以下各国(图 27-1)。



图 27-1 李属坏死环斑病毒(*Prunus necrotic ringspot virus*)世界分布图
(引自 *Distribution Maps of Plant Diseases*. Map No.875.Oct.2002.)

欧洲: 阿尔巴尼亚、奥地利、比利时、保加利亚、塞浦路斯、捷克、丹麦、法国、德国、希腊、匈牙利、意大利、马耳他、荷兰、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、斯洛伐克、西班牙、瑞典、英国、南斯拉夫。

亚洲: 印度、伊朗、以色列、日本、约旦、黎巴嫩、叙利亚、土耳其。

非洲: 埃及、摩洛哥、南非、突尼斯。

北美: 加拿大、美国。

南美: 阿根廷、巴西、智利、乌拉圭。

大洋洲: 澳大利亚、斐济、新西兰。

PNRSV 是核果类生产中经济影响最为严重的一类病害。受到李属坏死环斑病毒侵染的树木表现为矮化、生长迟缓、树体衰弱并大量减产。受害的程度因李子品种的感病性、环斑病毒的株系和有无混合感染[常与李矮化病毒(*Prunus dwarf virus*)和苹果褪绿叶斑病毒(*apple chlorotic leaf spot virus*)发生混合感染]而异。该病分布广,造成果树产量损失大,桃,特别是甜樱桃和酸樱桃,损失尤为严重。Németh(1972)对 2~3 年树龄的酸樱桃的实验表明,与正常的植株相比,PNRSV 可使植株每年降低高度 2%~8%,枝条长度减少 2%~22%,主干直径缩小 5%~27%。对北美桃 Lottie 发育的影响达 12%(Pine,1964),对法国栽培桃 Spring 和 Robin 的影响分别为 24%~28%和 24%~33%。除影响发育外,PNRSV 对果树产量的影响也非常严重,急性期在酸樱桃上造成的产量损失达 91%~98%,慢性期

也达 36%~43%。

李属坏死环斑病毒(PNRSV)在我国仅限于个别发生。PNRSV 自然侵染秋海棠的初次报道是在陕西省的西安(魏宁生等 1989)。后又有陕西省甜樱桃感染 PNRSV 的报道(阮小风等 1998)。PNRSV 在当地甜樱桃园的感染率较高,且多与苹果花叶病毒(ApMV)混合感染,造成严重的树体衰弱和流胶。

第二节 识别特征与早期诊断

李属坏死环斑病毒(PNRSV)可侵染多数李属的栽培种。除某些株系不产生症状外,其他 PNRSV 的株系在系统性侵染的第一年至第二年的急性期,均具有明显的症状,表现为新叶坏死,环斑和孔洞,但在后续的年份,叶和果实变为隐症(Wells and Kirkpatrick, 1986)。急性期的春季,症状表现为叶褪绿或坏死斑,环形或不规则线形。某些寄主延迟发芽,叶和花芽死亡,并最终枯死。杏白斑株系在某些李属栽培种上产生白色或浅黄色斑,褪色,线形或橡树叶形。在某些杏树品种上,花和腋芽均不能生长。某些桃树品种上,在初始症状之后,严重的感染可导致树皮坏死、癌肿和树干龟裂。在甜樱桃和酸樱桃上,恢复型株系造成坏死叶斑;樱桃多皱花叶株系则产生褪绿斑,并伴有叶畸形和耳状突起。某些感染病毒的李子砧木或接穗嫁接之后导致树体衰弱。还有与其他核果类病毒复合侵染的情况,如与李矮化病毒的复合侵染表现为桃矮化,而在酸樱桃上则使得黄症加重。

不同病毒株系在寄主范围和症状表现上存在差异。一些株系在第一年有坏死反应,之后发生慢性褪绿叶斑和坏死斑、叶背耳状突起、畸形、果实晚熟等。个别株系引起几种栽培李子发生叶褪绿线斑和花叶。一些 PNRSV 株系可使樱桃和杏发生椭圆叶斑。在多数李属植物上,症状的表现与栽培品种和病毒株系有关。

常见自然寄主的症状为:李急性期症状,叶梢褪绿,叶上有黄色环斑、小坏死斑、外围深色,后病斑脱落形成穿孔;而慢性期无病带毒,病苗接口以上接穗处变粗。甜樱桃表现粗缩花叶,月季上为花叶,啤酒花无症或有环状及带状花叶。

鉴别寄主症状:黄瓜接种后 4~5d,子叶上产生大而扩散性褪绿斑,约第 6~18d 出现顶枯,真叶不长出。昆诺阿黎接种后 5~6d 产生局部和系统褪绿环和灰色坏死斑,叶畸形,有的毒株则无症。胶苦瓜 *Momordica balsamina* 接种先出现叶灰色坏死斑,后系统侵染。瓜尔豆 *Cyamopsis tetragonoloba* 接种产生局部深色斑,继而系统脉坏死。山樱花 *Prunus serrulata* 移栽后,带毒苗的芽局部性坏死和流胶。

第三节 传播和流行

一、传播途径

李属坏死环斑病毒(PNRSV)可通过花粉和种子在大多数李属植物中传播(Nyland *et al.*, 1976)。种子带毒使 PNRSV 极易通过常规的繁殖材料传播。病毒的种传率因寄主种类、侵染方式(自然或人为接种)、感染时的植株树龄以及急性和非急性感染期不同而异。PNRSV 在不同寄主上的种传率为:樱桃 55%、酸樱桃 30%、马哈利酸樱桃 10%~70%、

桃 3.6%、櫻桃李 0~4%。

PNRSV 的花粉传播率达 77%，且急性期较慢性期低，分别为 38%和 78%~93%(George and Davidson,1966)。花粉内部和表面均可带毒。表面带毒使病毒在植株与植株间传染，内部带毒则导致种子感染。对于非风传花粉品种，蜜蜂就成了花粉传播的介体(Kelley and Cameron, 1986)。嫁接和机械接种是 PNRSV 的另一重要传播途径。也有线虫(*Longidorus macrosoma*) (Fritzsche and Kegler, 1968)和螨(*Vasates fockeui*) (Praesler, 1968)传毒的报道。

所有的李属植物及其栽培种都对 PNRSV 的一个或数个分离物敏感。经过血清学和生物学确定的 PNRSV 是在自然状态下的月季 *Rosa* spp.和酒花 *Humulus americanus* Nutt. 上发现的。虽然 PNRSV 可被人工接种到许多草本植物上，但自然情况下，除了酒花外，还没有感染草本植物的报道(Mink, 1991)。

二、流行

由于 PNRSV 在櫻桃上表现潜隐，可通过来自带毒母树上的繁殖材料种子和砧木进行传播(Gilmer and Kamalsky, 1962)。同一果园中病毒的传播与花粉有关(Gilmer and Way, 1963)。櫻桃和桃园开花期病毒传播的空间性实验表明，PNRSV 是通过传粉过程侵染健康植株的。然而其他研究却发现，产生了带毒种子的健康母树本身并未受到病毒的感染，其水平传播机制尚不清楚(George and Davidson, 1963)。用感染了 PNRSV 病毒的花粉和蓟马对黄瓜苗进行传毒试验，结果发现单独使用花粉或蓟马时，均不能成功传毒(Greber *et al.*, 1992)。

第四节 生物学特性

一、生物学特性

(一) 粒体形态

李属坏死环斑病毒(PNRSV)包括众多内部相关的病毒株系，是一个复杂的组群。该病毒名称既可作为亲缘相关的 *Ilarvirus* 第 3 亚组(包括苹果、月季和李属的花叶和线斑病毒)的总称，也可特指李属坏死环斑病毒。病毒粒体形状为等轴至短杆，直径 22~23nm，轴距比 1.0~1.5，多数毒株含有 3 种大小的粒体，也有某些毒株含有大到 70nm 的杆状粒体(图 27-2)。

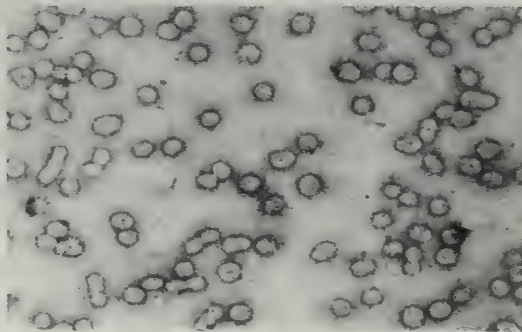


图 27-2 李属坏死环斑病毒(*Prunus necrotic ringspot virus*)颗粒

(二) 物理学特性

PNRSV 含有三种大小的粒体, 沉降系数分别为 72S(T)、90S(M)、95S(B), 粒体的相对分子质量分别为 0.31×10^6 、 0.66×10^6 、 0.95×10^6 。M 和 B 均有侵染力(Loesch and Fulton, 1975)。氯化铯中的密度为 1.35g/cm^3 。A_{260/280} 为 1.56。

(三) 生物化学特性

RNA 约占粒体重量的 16%, 蛋白质占 84%, 脂肪占 0%。RNA 基因组为 4 分子正单链, 全基因组大小为 8.056kb, 基因组分为 3 个部分, 最长为 3.662kb, 其次为 2.507kb, 最短是 1.887kb。基因组 RNA 组成为 27%G、25%A、21%C、27%U。蛋白外壳含 1 种亚基, 相对分子质量为 2.5×10^4 , 约含 196 氨基酸残基(Gonsalves and Fulton, 1977)。

病毒在植物组织粗提液中极不稳定, 几分钟内便会丧失活性, 而在稀释液中最长存活 9~18h。采用 2-巯基乙醇、半胱氨酸或其他巯基试剂, 或使用酚酶抑制剂如二乙氨基双硫氨甲酸钠(sodium diethyldithiocarbamate)可提高粗提液侵染的稳定性达数小时。在病汁液中, 病毒致死温度为 55~62℃(Fulton, 1970)。病毒有许多毒株, 仅表现在寄主范围或症状上有差异。

二、致病性

李属坏死环斑病毒(PNRSV)的自然寄主包括李属、蔷薇属和啤酒花属。被侵染症状在一些寄主上可长期显现, 而在另一些寄主上则在初期侵染之后消失(可恢复型)。自然寄主上的症状:

<i>Prunus cerasus</i> (酸樱桃)	坏死线环或环斑、孔洞, 可恢复型。
<i>Prunus persicae</i> (桃)	棕色线和环, 可恢复型。
<i>Rosa</i> spp.(月季)	褪绿线或环, 橡叶型, 不可恢复。
<i>Prunus domestica</i> (李)	某些株系表现褪绿线斑。
<i>Prunus dulcis</i> (杏)	浅花叶。
<i>Humulus americanus</i> (酒花)	无症状。
<i>Cucumis sativus</i> (黄瓜)	局部褪绿枯斑, 系统坏死和重度矮化。

PNRSV 可侵染几乎所有的李属植物(Gilmer, 1955), 症状由轻微的斑点状到严重的叶坏死和植株死亡。通常在春季感染后出现初次症状, 可发生在树的任何部位, 或仅出现在某些枝条上。典型的症状有褪绿或坏死斑, 在新叶上为褪绿线, 坏死斑的中部脱落形成穿孔。病毒的某些株系在李子上可形成主叶脉旁的褪绿区(栎树叶型), 其他株系可导致浅黄花叶, 如椭圆斑。初次感染可延缓新叶的生长, 使花梗变短, 花变形, 花瓣出现褪色条斑。此后数年的继发感染中, 植株虽然带毒, 但可不表现症状。树木生长变缓, 产量下降。

PNRSV 使酸樱桃叶芽中还未伸展的幼叶出现严重的坏死斑, 这与能够引起同样症状的李矮化病毒(PDV)不同, 后者只侵染距离树梢 25~50mm 已展开的叶片。

PNRSV 在蔷薇上表现为褪绿线或环, 病毒的症状因寄主和环境而变化, 生长早期较后期严重。PNRSV 在蔷薇上的症状与李属不同, 后期不能恢复。由于 PNRSV 在蔷薇上

的症状与苹果花叶病毒很难区分，常需借助血清学方法鉴定。

PNRSV 侵染酒花不引起明显的症状(Thresh and Ormerod, 1974)。

PNRSV 可机械接种的寄主范围广，但多数无症状表现。

黄瓜 *Cucumis sativus* 和长春花 *Catharanthus roseus* 是 PNRSV 的繁殖寄主。但李属坏死环斑病毒(PNRSV)经黄瓜传代，每几天转化一次，经过数月之后，其致病性会显著降低。

第五节 生态学特性

一、病毒株系

李属坏死环斑病毒(PNRSV)侵染寄主后可引起褪绿、斑驳、坏死等多种不同症状。虽然多数情况下，可根据寄主的不同来加以识别和判断，但因该病毒非常容易变异，因此，也会出现分离物无法确定的情况(Waterworth and Fulton, 1964; Ramaswamy and Posnette, 1971)。PNRSV 是一个多粒体病毒，对 *Vigna sinensis* 的侵染试验表明，底部粒体 B 是病毒侵染的决定因素，B 粒体与 M 粒体的结合可明显地提高侵染力，而顶部粒体 T 的增加则使侵染力降低。这种多粒体结合带来的遗传组合变化是病毒致病性和变异的决定因素。其影响还表现在不同株系在寄主范围和症状的差异上(Loesch and Fulton, 1975)。

李属坏死环斑病毒(PNRSV)在自然寄主上分为三个株系(strain)：①恢复型坏死环斑株系(Nyland *et al.*, 1976)，导致酸樱桃坏死环斑每年周期性发生，在酸樱桃上不表现潜隐。②李线斑株系，被侵染 *Prunus domestica* 的叶表现为褪绿环和橡叶(Seneviratne and Posnette, 1970)。③由 Nyland and Lowe(1964)描述的导致甜樱桃重型花叶和杏白斑的株系。

二、交叉保护

血清学测定发现某些 PNRSV 的分离物具有交叉保护现象，可以保护已受侵染的李属植物不再受到其他分离物的侵染(Marenaud and Bernhard, 1968)，但不是所有的分离物都具有交叉保护现象。在恢复型株系侵染的酸樱桃上，接种典型株系可导致恢复型症状消失(Moore and Slack, 1952)。显然，恢复型不能抵御典型株系，后者占据了控制地位。但是，浅隐环斑却能保护其不受同种或其他潜隐环斑的再次侵染(Moore and Keitt, 1949)。

三、协同作用

假设引起坏死型急症的病毒在樱桃上表现黄症，其嫁接健康的樱桃后将仍应表现黄症。实验证明，李属坏死环斑病毒(PNRSV)和李矮化病毒(PDV)的复合侵染使樱桃表现黄症(Cropley *et al.*, 1964)。Fridlund(1965)证实了黄症是 PNRSV 和 PDV 协同作用的结果，尽管 PDV 的单独感染也能产生黄症，但症状较轻。用 PNRSV 和 PDV 混合接种黄瓜苗，几天后，黄瓜苗多数枯萎。

第六节 检测与诊断

一、生物学测定

PNRSV 能使酸樱桃幼叶发生卷曲,但不是所有的株系都表现此症状。对不产生症状的 PNRSV 感染,常用芽接 Shirofugen 樱桃的方法检测 PNRSV 的侵染情况(Milbrath and Zeller, 1945)。被感染的芽在嫁接几星期内出现周围组织坏死和褪色,在一个 Shirofugen 樱桃枝条上可以同时嫁接几个芽进行实验,也可用 *P. tomentosa* 苗进行芽接,它比 Shirofugen 樱桃更耐寒(Fridlund,1954),嫁接后的新叶出现斑驳症状。此外,还可嫁接桃“GF305”或 *P. serrulata* 进行检测。值得注意的是,无论是 *P. tomentosa* 还是 Shirofugen 樱桃都无法通过嫁接的方式将 PNRSV 和 PDV 感染区分开来。

机械接种草本寄主是鉴别 PNRSV 较可靠的方法。但应注意不能用带毒的李属植物直接接种草本,正确的方式是先接种黄瓜,再用黄瓜的褪绿斑区接种草本寄主。

二、血清学检测

血清学鉴定 PNRSV 较为快捷,是最常用的检测手段。血清学检测有:①琼脂双扩散法:适宜检测寄主的病汁液;②免疫电镜:诱捕修饰可判断阳性样品;③ELISA:适合大量样品的检测。

ELISA 的应用最为广泛,具有灵敏度高、特异性强、安全、快速、一次可作大量样品检测等优点,非常适用果树病毒的普查和快速检测。目前已有多种不同的 ELISA 方法检测 PNRSV 的报道(Torrance and Dolby, 1984; Mink and Aichelle, 1984; Scott *et al.*, 1989; Uyemoto *et al.*, 1992)。

PNRSV 病毒具有中等免疫性,与 Danish plum line pattern virus 近缘,与 rose mosaic virus、apple mosaic virus 远缘,与 Cation's Shiro plum line pattern virus、prune dwarf virus 无血清学关系。

三、分子生物学检测

近年来分子生物学方法检测 PNRSV 的报道日趋增加。有分子杂交探针检测法(Crosslin, *et al.* 1992; Scott *et al.*, 1992)和 PCR 检测法(Rowhani *et al.*, 1995; Spiegel *et al.*, 1996; Rosner, *et al.*, 1997)。此外,还有免疫足印法(immuno tissue printing)(Knapp *et al.*, 1995)。斑点杂交作为 PNRSV 的常规检测方法,避免了反复离心和澄清样品等复杂程序,具有简便易行、可一次大批量检测样品的优点,且其灵敏度较 DAS-ELISA 高出 10%(Mas *et al.*, 1993)。上述这些方法都使病毒的快速、准确检测成为可能。

第七节 风险分析

果树繁殖材料的国际性贸易和交换对 PNRSV 在世界范围内的传播和蔓延起着不可忽视的作用,这也是 PNRSV 在美洲、欧洲和亚洲大面积分布的原因所在。

作为果树繁殖材料的方式,繁殖材料在病毒的传播和蔓延中具有很高的风险性。用

于繁殖材料的芽、接穗和砧木如果来源于被病毒侵染的母株，病毒就很容易被传播蔓延至所有的后代。虽然可以通过汰选畸形母株祛除那些能产生明显症状的病毒，但对于症状潜隐的病毒，病毒通过繁殖材料传播将是难以避免的。特别是经过几代的积累之后，潜隐病毒则较其他病毒更具危害性。

花粉传播是造成 PNRSV 高风险的另一重要因素。因为花粉传播将最终导致老果园全部植株被感染。此外，花粉和种子传毒对健康果园的隔离也同样构成持续性的威胁，尽管这些果园中最初所用的都是经过检测的无毒繁殖材料。受到感染的种苗再作为砧木被引入新的种植园，造成大批量的新果园感染。

第八节 预防与控制

病毒控制是提高果树品质和产量的前提。特别是对于感病植株无有效处理方法的情况，预防就是最重要的措施。治疗性的方法，如：热处理法、茎尖脱毒、显微嫁接等技术在无毒材料的选育中也起着不可替代的作用。

预防措施可用于果树生产、健康种植材料的选育、病毒自然传播的预防、抗性和耐病性品种的利用和病毒的生物学控制等各个方面。

一、筛选健康繁殖材料

李属坏死环斑病毒(PNRSV)可侵染多数李属植物并导致桃大量减产(Scott *et al.*,1989; Uyemoto *et al.*, 1992)。在特定的品种区,PNRSV 的发生较其他区域都高(Scott *et al.*,1989)。由于 PNRSV 在李属植物表现潜隐，极易通过繁殖接穗而传播。PNRSV 也可通过种传，种传率因寄主而易，有的可高达 70%。由被感染的种子而长成的苗木可能终生都无症状显现，因而很难控制病毒的传播。控制该病的较为有效的办法就是使用无毒砧木和拔除 ELISA 检测呈阳性的树木。

在无毒砧木生产中，最基本的要求就是无论是接穗还是砧木，其来源都必须是经过鉴别寄主鉴定的无毒母本繁殖材料。许可证制度和果园内病毒扩散的控制与管理是预防 PNRSV 的基本方法。许可证是对商业苗圃的主要栽培品种实施病毒检测制度，以确保繁殖材料是无毒的。果园管理则是预防和控制植株间的病毒传染。总之，有效的管理应为：①及时祛除病株；②避免使用在过去的两周内曾在核果类树木上采过蜜的蜜蜂；③使用无毒母本做原材料。

二、预防病毒传播

PNRSV 控制的另一个难点是其花粉传播。花粉在果园内的传播已被证实，无毒母本植株上产生的种子可由此被传染，这种感染源的祛除要求隔离距离至少在半英里以上。因此，对于生产砧木的无毒种子园必须进行空间隔离。尽管，在无毒砧木种子的生产中 PNRSV 不可能完全被控制。无论是在自然状态下的野生李属植物，还是经济品种生产中，这种隔离控制的实施都是非常困难而有限的。病毒在果园中野生李属上的发生，说明存在野生种和栽培种间的相互感染。PNRSV 对酒花的侵染表明还存在未发现的植株与植株间的传染途径。

用常规的热处理和组培脱毒技术,也可达到控制 PNRSV 传播的目的。用 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ 处理 16h、夜间降低 10°C 的周期热处理樱桃 20d, 或周期性处理桃 40d, 可祛除小树上大部分的 PNRSV。此法使从完全感染的品种中培育无毒繁殖材料成为可能(Lukicheva and Mitrofanov, 2002)。体外茎尖脱毒技术也可达到脱毒的效果(Juare *et al.*, 1988)。

三、利用抗性和耐病的果树品种

不同品种的果树对病毒的耐力和抗性机制存在差异。高抗性品种常为高敏感型反应,而耐受型则表现为隐症或很轻微的症状。在李属植物中对 PNRSV 完全免疫的情况是不存在的,然而对在 PNRSV 的耐受性却因寄主不同而异,如 *Prunus caroliniana* 和 *P. ilicifolia*, 初期感染症状轻微且持续时间短,很快即可恢复。但这些具有较高耐受性的寄主与樱桃的亲缘关系太远,因此不具备抗性利用的价值(Gilmer, 1955)。在 PNRSV 流行地区,这些抗性品种的应用可有效地降低果树的受害程度,减少产量和品质的损失。此外,免疫和耐病性的果树品种,还是培育具有重要经济价值杂交新种的极好的亲本材料。然而,应注意到的是这些耐病品种也可能成为一个长期的病毒感染来源,从而加速病毒的传播。

四、生物控制

植物病毒的生物控制包括交叉保护、繁殖材料的保护和抗性基因的利用。PNRSV 的发生还可通过接种无症状株系的交叉保护作用而加以抑制,尽管这一控制方法不在常规考虑之内。转基因工程培育抗性品种是 PNRSV 的另一控制策略,该策略在一些植物病毒的抗性培育中已有显著的效果,这其中也包括与 PNRSV 同属 *Ilarvirus* 属的病毒(Hull and Davies, 1992)。

(韩丽娟)

主要参考文献

- 阮小凤, 杨勇, 马书尚等. 1998. 甜樱桃病毒病的 ELISA 检测研究. 山东农业大学学报, 29(3): 277~282 [Ruan X F, Yang Y, Ma S S *et al.* 1998. Research on virus detection by ELISA in sweet cherry. *J of Shandong Agricultural University*, 29(3):277~282]
- 魏宁生, 吴云峰. 1989. 花卉病毒病害的鉴定(II). 云南农业大学学报, 4(4): 302~308 [Wei N S, Wu Y F. 1989. Identification of flower virus diseases (II). *Journal of Yunnan Agricultural University*, 4(4): 302~308]
- Cochran L C, Hutchins L M. 1941. A severe ring-spot viruses on peach. *Phytopathology*, 31:860
- Cropley R, Gilmer R M, Posnette A F. 1964. Necrotic ring spot and prune dwarf viruses in *Prunus* and in herbaceous indicators. *Ann Appl Biol*, 53: 325~332
- Crosslin J M, Hammond R W, Hannerschlag F A. 1992. Detection of *Prunus* necrotic ringspot virus serotype in herbaceous and *Prunus* hosts with a complementary RNA probe. *Plant Dis*, 76: 1132~1136
- Fritzsche R, Kegler H. 1968. Nematoden als vectoren von viruskrankheiten der obstgehoteze. *Tagungsbericht Akademie der landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik*, 97: 289~295
- Fridlund P R. 1954. The reaction of *Prunus tomentosa* seedling to latent *Prunus* virus cultures. *Phytopathology*, 44: 488~489
- Fridlund P R. 1965. Symptoms of necrotic ringspot and prune dwarf in several *Prunus* species. *Plant Dis Rep*, 49: 288~292
- Fulton R W. 1970. *Prunus* necrotic ringspot virus. In: Descriptions of plant viruses No. 5. Britain: CMI/AAB
- George J A, Davidson T R. 1963. Pollen transmission of necrotic ringspot virus and sour cherry yellows viruses from tree to tree.

- Can J Plant Sci*, 43: 276-288
- George J A, Davidson T R. 1966. Virus assay of seeds from selected Montmorency cherry trees. *Can J Plant Sci*, 46: 501-505
- Gilmer R M. 1955. Host range and variable pathogenesis of the necrotic ring spot virus in the genus *Prunus*. *Plant Dis Rep*, 39: 194-201
- Gilmer R M, Kamalsky L R. 1962. The incidence of necrotic ring spot and sour cherry yellows viruses in commercial mazzard and mahaleb cherry rootstocks. *Plant Dis Rep*, 46: 583-585
- Gilmer R M, Way R D. 1963. Evidence for tree-to-tree transmission of sour cherry yellows virus by pollen. *Plant Dis Rep*, 47: 1051-1053
- Gonsalevs D, Fulton R W. 1977. Activation of *Prunus* necrotic ringspot virus and rose mosaic virus by RNA 4 components of some Ilarviruses. *Virology*, 81: 398-407
- Greber R S, Teakle D S, Mink G I. 1992. Thrips-facilitated transmission of prune dwarf and *Prunus* necrotic ringspot viruses from cherry pollen to cucumber. *Plant Dis*, 76: 1039-1041
- Hull R, Davies J W. 1992. Approaches to nonconventional control of plant virus diseases. *Crit Rev Plant Sci*, 11: 17-33
- Juarez J, Arregui J M, Camarasa E *et al.* 1988. Recovery of virus free peach trees from selected clones by shoot-tip grafting in vitro. *Acta Hort*, 235: 177-182
- Kelley R D, Cameron H R. 1986. Localization of prune dwarf and *Prunus* necrotic ringspot virus in sweet cherry pollen and fruit. *Phytopathology*, 76: 317-322
- Knapp E, Machado A da Camara, Pühringer H *et al.* 1995. Localization of fruit tree viruses by immuno tissue printing in infected shoots of *Malus* and *Prunus* sp. *J Virol Meth*, 55: 157-173
- Loesch L S, Fulton R W. 1975. *Prunus* necrotic ringspot virus as a multicomponent system. *Virology*, 68: 71-78
- Lukicheva L A, Mitrofanov V I. 2002. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo Botanicheskogo Sada*, 86: 59-61, 75-76
- Mas P, Sanvhez-Navarro J A, Sanchez-Pina M A *et al.* 1993. Chemiluminescent and colorigenic detection of cherry leaf roll with digoxigenin-labeled RNA probes. *J Virol Meth*, 45: 93-102
- Marenaud C, Bernhard R. 1968. Dtsch. Akad. Landwirtsch. Wiss. *Tagungsber*, 97: 145-153
- Milbrath J A, Zeller S M. 1945. Latent viruses in stone fruits. *Science*, 101: 114-115
- Mink G I, Aichele M D. 1984. Detection of *Prunus* necrotic ringspot and *Prunus* dwarf viruses in *Prunus* seed and seedlings by enzyme-linked immunoabsorbent assay. *Plant Dis*, 68: 378-381
- Mink G I. 1991. *Prunus* necrotic ringspot virus. In: Kumar J, Chsube H S, Singh U S *et al.*, eds. *Plant Diseases of International Importance, Vol. 3: Diseases of Fruit Crops*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ. 335-356
- Moore J D, Keitt G W. 1949. An indexing method for necrotic ring spot and yellows of sour cherry. *Phytopathology*, 39: 15-16
- Moore J D, Slack D A. 1952. Interaction of stains of necrotic ring spot virus. *Phytopathology*, 42: 470-471
- Né meth M, Schmelzer K. 1972. Der Scharka Virus der Pflaume an *Prunus glandulosa* Thumo. *Acta Phytopath Acad Sci Hung*, 7(1-3): 193-196
- Nyland G, Gilmer R M, Moore J D. 1976. *Prunus* ring spot group. In: Gilmer R M, Moore J D, Nyland G *et al.*, eds. *Virus Disease and Non-infectious Disorders of Stone Fruits in North America*. Washington DC: Agriculture Handbook No. 437: 104-132
- Nyland G, Lowe S K. 1964. The relation of cherry rugose mosaic and calico viruses to *Prunus* ringspot virus. *Phytopathology*, 54: 435-436
- Pine T S. 1964. Influence of necrotic ringspot virus on growth and yield of peach trees. *Phytopathology*, 54: 604-605
- Proeseler G. 1968. Übertragungsversuche mit dem latentem *Prunus*-virus und der Gallmibe *Vasates fockeui* nal. *Phytopathologisches Zeitung* 63: 1-9
- Ramaswamy S, Posnette A F. 1971. Properties of cherry ring mottle, a distinctive strain of prune dwarf virus. *Ann Appl Biol*, 68: 55-65
- Rosner A, Maslenin L, Spiegel S. 1997. The use of short and long PCR products for improved detection of *Prunus* necrotic ringspot virus in woody plants. *J Virol Methods*, 67: 135-141
- Rowhani A, Maningas M A, Lile L S *et al.* 1995. Development of a detection system for viruses of woody plants based on PCR analysis of immobilized virions. *Phytopathol.*, 85: 347-352
- Scott S W, Barnett O W, Burrows P M. 1989. Incidence of *Prunus* necrotic ringspot virus in selected peach orchard of South Carolina. *Plant Dis*, 73: 913-916
- Scott S W, Bowman-Vance V, Bachman E J. 1992. The use of nucleic acid probes for the detection of *Prunus* necrotic ringspot virus and prune dwarf virus. *Acta Horticulturae*, 309: 79-83

- Seneviratne S N de S, Posnette A F. 1970. Identification of viruses isolated from plum trees affected by decline, line pattern and ringspot diseases. *Ann Appl Biol*, 65: 115-125
- Spiegel S, Scott S W, Bowman-Vance V *et al.* 1996. Improved detection of *Prunus* necrotic ringspot virus by the polymerase chain reaction. *Europ J Plant Pathol*, 102: 681-685
- Thomas H E, Rawlins T E. 1939. Some mosaic disease of *Prunus* species. *Hilgardia*, 12: 623-644
- Thresh J M, Ormerod P J. 1974. Report of East Malling Research Station for 1973. 207-208
- Torrance L, Dolby C A. 1984. Sampling condition for reliable routine detection by enzyme-linked immuno-sorbent assay of three ilarviruses in fruit tree. *Ann Appl Biol*, 104: 267-276
- Uyemoto J K, Asai W K, Luhn F. 1992. Iilarviruses: evidence for rapid spread and effects on vegetative growth and fruit yields of peach trees. *Plant Dis*, 76: 71-74
- Valleau W D. 1932. A virus disease of plum and peach. *Agr Exp Sta Bull*, 327: 89-103
- Waterworth H E, Fulton R W. 1964. Variation among isolates of necrotic ringspot and prune dwarf viruses isolated from sour cherry. *Phytopathology*, 54: 1155-1160
- Wells J M, Kirkpatrick H C. 1986. Symptomology and incidence of *Prunus* necrotic ringspot virus in peach orchards in Georgia. *Plant Dis*, 70: 444-447

第二十八章 松材线虫

第一节 起源与分布	574	第五节 生物学特性	589
第二节 识别特征与早期诊断	577	第六节 生态学特性	595
第三节 传入途径与入侵成因	585	第七节 风险分析与早期预警系统	602
第四节 危害现状与生态经济影响评估	587	第八节 综合治理策略与技术	604

摘要 松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 是毁灭性的森林病害——松材线虫病(又叫松树萎蔫病)的病原物, 主要危害针叶树木, 尤其是松属树种(*Pinus* spp.)。松材线虫在北美分布广泛, 但在其原产地并不造成严重危害。20 世纪初传入日本后, 导致松树严重死亡, 尤其是 70 年代后, 松材线虫病在日本大量爆发流行, 日本松林由此遭到毁灭性的破坏。我国于 1982 年首次在江苏南京发现有松材线虫病, 其后, 在短短的十几年中, 此病在我国迅速扩展蔓延, 造成我国松林资源的严重破坏和不良的生态后果, 经济损失巨大, 疫情的发展已直接威胁到我国的世界自然文化遗产——黄山、张家界等地理景观的生态安全。由于松材线虫病发病致死速度快、传播蔓延迅速、防治难度大, 因而被称为松树上的“癌症”。松材线虫病的传播与人类活动密切相关, 许多国家均将其列为重点(A 类)植物检疫对象。随着国际贸易的全球化进行和我国加入世贸组织, 松材线虫由境外反复进入我国的可能性越来越大, 松材线虫病在我国还具有更加广泛定殖的可能性和定殖后扩散的可能性。基于有效控制、治理和扑灭松材线虫病的目的, 本章全面总结和概括了目前有关松材线虫的主要研究成果和最新研究进展, 包括其起源和分布、形态特征、生物学特性、致病机理、与媒介昆虫及寄主植物的相互关系、风险性评估, 综合治理等, 以期更加深入地研究和探索松材线虫病的可持续控制。

关键词 松材线虫 松材线虫病 风险性评估 综合治理 可持续控制

Chapter 28 Pine Wood Nematode *Bursaphelenchus xylophilus*

Abstract: Pine wood nematode (PWN) *Bursaphelenchus xylophilus* is the agent responsible for pine wilt disease, which caused a destructive forest disaster. It disserves conifer, especially pine trees (*Pinus* spp.). PWN distributed in North America widely. But no economic damage was caused by it in its original locations. This nematode was introduced into Japan at the

beginning of the 20th century and it has been killing a lot of native pine trees. Since the first report of the nematode in Nanking of China in 1982, it has been spreading rapidly and wildly in China. It caused a serious destruction to forest resources and a worse ecological result. And a lot of economic losses have happened. Now the development of its epidemic situation has threatened directly to the ecological safety of world natural culture legacy in China—Huangshan, Zhaojiajie Mountains, etc. As the pine wilt disease comes on and prevails rapidly, and it is difficult to be controlled, it is called “the cancer of pine trees”. The transmission of PWN is related to human activities closely. Many countries consider it an important species of plant quarantine. With the joint into WTO, the possibility of PWN introduction repetitiously from other countries into China is increasing. At the same time, the potential of colonization and dispersion of PWN in China has been much greater. For the sake of controlling, managing, and eradicating the disease, furthermore on the aim of the sustainable control, we reviewed the research achievements of PWN up to now in this chapter, including its origin and distribution, morphology, biology, ecology, mechanism of killing hosts, pest risk analysis (PRA), integrate management, etc.

Key words: pine wood nematode (PWN), *Bursaphelenchus xylophilus*, pine wilt disease, pest risk analysis (PRA), sustainable management.

第一节 起源与分布

一、起源

松材线虫(pine wilt nematode, PWN)是毁灭性森林病害——松材线虫病(又称松树萎蔫病, pine wilt disease)的病原物。早在 20 世纪初, 日本就报道有松材线虫病的发生, 但直至 1972 年 Mamiya 和 Kiyohara 才将其病原线虫定名为 *Bursaphelenchus lignicolus*。20 世纪 70 年代以来, 松材线虫病在日本大量爆发流行, 造成了严重的经济损失。1979 年 Dropkin and Foudin 首次在美国密苏里(Missouri)发现由松材线虫致死的松树, 但受害的松树主要为外来树种, 如欧洲赤松 *Pinus sylvestris* 和欧洲黑松 *P. nigra*, 因此, 当时在美国科技界引起很大的反响, 认为是来自日本的一种危险性外来入侵种, 文献中报道 “We’ve been invaded!”(Dwinell and Nickale, 1989)。1981 年 Nickle 等将 *B. lignicolus* 作为 *B. xylophilus* 的同物异名后, 这种恐惧才被消除。因为 *B. xylophilus* 是从滑刃属 *Aphelenchoides* 移到伞滑刃属 *Bursaphelenchus* 的(Nickle, 1970), *A. xylophilus* 是北美的一个土著种, 早在 1929 年, Steiner 和 Buhner 就从美国的长叶松 *P. palustris* 原木上及由小蠹致死的萌芽松 *P. echinata* 树干上分离到此线虫, 并于 1934 年定名为 *A. xylophilus*。此线虫广泛分布于北美的针叶林中, 在美国, 34 个州有记载分布, 在加拿大, 除爱德华王子岛以外, 所有省份都有分布。但松材线虫在其原产地通常并不造成危害, 常营腐食性方式生活, 与松材上的蓝变菌及其他

真菌密切相关。1983年,在加拿大的马尼托巴(Manitoba),也从感染矮化丛枝病(dwarf mistletoe) *Arceuthobium americanum* 的死亡班克松 *P. banksiana* 上分离到松材线虫(Knowles *et al.*, 1983),通过致病性鉴定,证明它与松树的死亡有关(Burnes *et al.*, 1985)。

关于日本松材线虫的起源,近些年来,许多学者采用不同的方法,对不同地理株系的松材线虫的亲缘关系进行研究,结果表明:日本的松材线虫与美国的松材线虫亲缘关系较近,而与加拿大的松材线虫亲缘关系较远,说明日本的松材线虫来源于美国(Iwahori, 1998, Bolla and Bochert, 1993; Tares *et al.*, 1992, 1993)。

松材线虫在亚洲的分布,除日本以外,已扩散到中国大陆、台湾、香港和韩国。20世纪70年代后期,松材线虫随进口松材传入香港,在短短的10年时间内导致香港地区大部分的马尾松 *P. massoniana* 死亡(Corlett, 1999)。1985年台湾报道有松材线虫病发生。我国内地于1982年在南京中山陵首次发现松材线虫病(程瑚瑞等, 1983),随后,此病在江苏迅速扩展、蔓延,并造成了严重的经济损失。1988年在安徽滁州和马鞍山、广东深圳等地均发现有松材线虫病,1991年山东烟台、浙江舟山等地有发生,1999年湖北恩施也出现有松材线虫病。目前,松材线虫病在我国已扩散到6个省(地、市),对我国的森林资源、自然景观和生态环境造成了严重破坏。关于我国松材线虫的入侵来源问题,至今尚未清楚,推测我国的松材线虫可能属于多起源,一部分来源于日本,一部分来源于北美。

1988年韩国釜山报道有松材线虫病,主要危害日本黑松 *P. thunbergii* 和日本赤松 *P. densiflora*。1999年葡萄牙里斯本报道在海岸松 *P. pinaster* 上发现有松材线虫,分子鉴定结果表明,葡萄牙的松材线虫与美国的“m”形松材线虫相同(Mota *et al.*, 1999)。1984年欧洲芬兰截获了从美国和加拿大进口的带有松材线虫的木材。1986年欧洲和地中海植物保护组织(EPPO)将松材线虫列入植物检疫名录。至目前为止,世界已有46个国家将松材线虫定为检疫对象,对其实行官方控制。

二、分布

目前,松材线虫在世界的分布主要有:中国、日本、韩国、葡萄牙、美国、加拿大、墨西哥、尼日利亚。松材线虫在法国是否有分布,尚未完全明确。

我国自1982年在南京中山陵首次发现该病后,20年来,在党中央、国务院的重视下,通过各级政府和林业部门的努力,防治工作取得了明显的成效,拔除了一批疫点,减缓了松材线虫病的扩散蔓延速度。据统计,中国松材线虫病蔓延速度仅为日本同期的1/26。但松材线虫病的发生范围仍然逐年扩大,现已扩散至苏、浙、皖、鲁、粤、鄂6省以及台湾和香港地区,县级发生区每隔5年翻一番。

松材线虫的分布情况见表28-1和图28-1。

表 28-1 松材线虫的分布情况(根据 CABI/EPPO 1999 的资料修改)

国家和地区	分布情况	国家和地区	分布情况	国家和地区	分布情况
欧洲		加拿大	A	Kentucky	X
葡萄牙	C	Alberta	X	Louisiana	X
芬兰	F	British Columbia	X	Maryland	X
挪威	F	Manitoba	X	Massachusetts	X
瑞典	F	New Brunswick	X	Michigan	X
法国	?	Newfoundlang	X	Minnesota	X
亚洲		Northwest erritories	X	Mississippi	X
中国	B	Nova Scotia	X	Missouri	X
安徽	X	Onatario	X	Nebraska	X
广东	X	Quebec	X	New Jersey	X
浙江	X	Saskatchewan	X	New York	X
江苏	B	Yukon	X	North Carolina	X
山东	X	美国	A	Ohio	X
湖北	C	Alabama	X	Oklahoma	X
香港	A	Arkansas	X	Oregon	X
台湾	A	California	X	Pennsylvania	X
日本	A	Connecticut	X	South Carolina	X
本洲岛	X	Delaware	X	Tennessee	X
九州岛	X	Florida	X	Texas	X
琉球群岛	X	Georgia	X	Vermont	X
四国岛	X	Illinois	X	Virginia	X
韩国	B	Indiana	X	West Virginia	X
北美洲		Iowa	X	Wisconsin	X
墨西哥	X	Kansas	X		

注：A 表示广泛分布；B 表示限制性分布；C 表示少量分布；F 表示仅截获到；X 表示有分布，但无详细分布资料。



图 28-1 松材线虫在世界的分布地图

第二节 识别特征与早期诊断

一、为害症状

松材线虫病的典型症状是针叶变为红褐色，松针倒挂，然后全株枯萎死亡。从远处看，受害松林一片火红，似“火烧状”（见图 28-2）。其发病过程大致分为 4 个阶段：
 ①病害初期，植株外观正常，树仍然是绿的，但树脂分泌开始减少，在自然条件下，7 月中旬出现这一症状；
 ②树脂分泌停止（通过打孔检测），蒸腾作用减弱，树冠部分针叶失去光泽、变黄，此时，一般能观察到天牛或其他甲虫为害和产卵的痕迹（见图 28-3）；
 ③多数针叶变黄，植株开始萎蔫，这时可以发现甲虫的蛀屑；
 ④整个树冠部分针叶由黄变为褐色或红褐色，树势迅速衰退，然后全株枯死。在野外，病害一般发生在 7~9 月。



图 28-2 松材线虫病为害症状(成新跃 摄)

左：发病松林症状；右：单株症状

在高温干旱时，从出现第一症状到死亡约经过 30~45d。发病和死树的时间也是诊断此病的重要依据之一。但在寒冷地区病树可能到第二年才死亡。枯死的病树被伐倒后，有时可以从截面上观察到由轴心向边缘呈辐射状的蓝变现象(见图 28-4)。



图 28-3 树杆上的天牛产卵孔 (成新跃 摄)

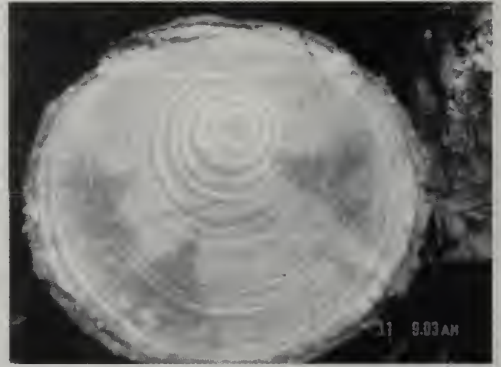


图 28-4 衰弱木的蓝变现象 (成新跃 摄)

松材线虫病为害导致的萎蔫与自然干旱胁迫下产生的萎蔫，可通过其症状将两者区分：感病植物的针叶萎蔫时，通常从局部发展到整体，萎蔫最先发生在针叶基部，然后沿基部向上延伸，并伴随褪绿、褐变，植株上任何部位的针叶均可最先表现症状，各部位也可同时表现症状，并常有上部针叶枯萎而下部针叶仍表现正常的现象；而干旱胁迫下植株的萎蔫则不同，最先表现萎蔫的部位是梢，而且萎蔫发展的过程是从上至下，从叶尖到叶基，针叶基部不变褐，并基本表现为整株针叶均匀褪绿和失水。此外，松材线虫为害引起的松树死亡，能够在松树的任何部位(除针叶外)检测到大量的松材线虫。

二、早期诊断技术

从松材线虫病的发病过程可知，往往在表现出明显的田间症状之前，受害植株已在生理生化上发生明显的改变。因此，可根据植株生理生化变化进行早期诊断。主要诊断方法有以下几种。

(一) 流胶法

由于树脂流胶的减少和停止是感染松材线虫的早期症状，因此，以流胶量变化为基础的流胶法是被公认和广泛采用的早期诊断技术(杨宝君等，1999)。此法简单、易行，易辨认，诊断准确率在 90% 以上。健康的松树流胶很多，胶会从孔壁一直往下流；而感染了松材线虫的松树流胶减少，胶只是停留在孔壁处，不向下流。从打孔到观察的时间要视当时的温度而定。一般在春、夏、秋季，打孔后 24h 即可观察，在冬季观察可在打孔后 48~72h 进行。此法一定打圆洞，其他形状的洞不可，因为其他形状会有一定的角度，胶易从角处流出，造成误诊(杨宝君等，1999)。

(二) 叶绿素荧光强度法

Melakeberhan 和 Webster(1991)观察到欧洲赤松幼苗接种松材线虫后,接种苗的叶绿素荧光强度发生显著变化,因此提出可采用叶绿素荧光强度法对感染松材线虫的植株进行组织学变化的早期检查。

(三) 酸性品红追踪法

杨伟东于 1995 年根据受害松树早期便有挥发性物质渗透入导管,导致气穴产生而阻碍树液上升的现象,将 3~4 年盆栽幼苗接种松材线虫后,采用酸性品红追踪树液流动的情况,并根据茎干横切面着色情况判断是否有挥发性物质渗漏入导管,提出采用酸性品红追踪法能够对松材线虫病进行早期诊断。

(四) pH 指示剂法

王玉嬅等(2001)通过对几种松树的松材线虫病木和健木的 pH 差异分析发现,由于松材线虫侵害后产生代谢酸,使木材的酸度增加,病木和健木 pH 差异显著,因此,提出可利用指示剂的颜色反应来进行松材线虫病的早期诊断和快速检验。但由于不同树种和不同地区健木本身的 pH 不同,因而需采用不同的指示剂。

(五) 蒸腾作用及叶部过氧化物同工酶方法

谈家金等(2001)根据松材线虫接种黑松后寄主在生理生化方面的变化,提出蒸腾作用及叶部过氧化物同工酶方法可作为松材线虫病早期诊断的辅助方法。

三、抽样检测

取样方法:在野外林间取样,对于活的树木,通常采用打孔取样;但对于无症状的树木,打孔取样往往难以检测到线虫,采用刨片取样较为容易检测到线虫;对于已死或将死的树木,砍倒后对不同部位的树干横截面进行取样。对于进口的木材及木质制品的检测,通常采取随机抽样,由于因松材线虫致死的病木常伴随有树脂减少、含水量降低、墨天牛为害症状及由真菌形成的辐射状蓝变等现象,所以对木材的检疫尤其要注意对这些有直观外部变化的病木的检测。样品取回后进行室内分离和鉴定。

分离方法:通常采用贝氏(Baermann)漏斗法。将取样的木块切成小薄片,浸渍在清水中,12~24h 后,线虫从水中游出。收集漏斗底部的水样,在显微镜下观察是否有线虫,并挑取线虫制成玻片标本,在高倍显微镜下进一步进行形态观察和种类鉴定。

四、形态识别

从木材样品中往往可分离到多种线虫,因此,需要对分离的线虫进行种类鉴定,确定其是否为松材线虫。进行形态学鉴定,需要制作高质量的玻片标本,具有高分辨率的显微镜,并具有一定的线虫分类学经验,尤其是在进行松材线虫与近缘种(如拟松材线虫 *B. mucronatus* 和假伞滑刃线虫 *B. fraudulentus*)的鉴定时更为重要。

(一) 分类地位

松材线虫，学名 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Buhrer, 1934) Nickle，异名 *Bursaphelenchus lignicolus* (Mamiya and Kiyohara, 1972)，属于线虫动物门 Nematoda，侧尾腺纲 Secernentea，滑刃目 Aphelenchida，滑刃科 Aphelenchoididae，伞滑刃亚科 *Bursaphelenchinae*，伞滑刃属 *Bursaphelenchus*。

(二) 主要形态特征

体小而细长，唇区高，缢缩明显。口针发达，基部稍增厚，中食道球很发达，卵圆形，占体宽的 2/3 以上。食道腺细长，叶状，覆盖于肠背部。雄虫尾部显著向腹面弯曲，圆锥形，末端尖；具有小的交合伞(bursa)，卵圆形，包于腹部末端；交合刺(spicule)粗大，镰刀形，向腹面弯曲，喙突显著，远端膨大如盘状，尾似鸟爪，无引带。雌虫尾部圆筒形，末端宽圆，少数种群具有微小的尾尖突；阴门(vulva)开口于体长的 73%处，其上覆盖有较宽的阴门盖。形态结构如图 28-5。

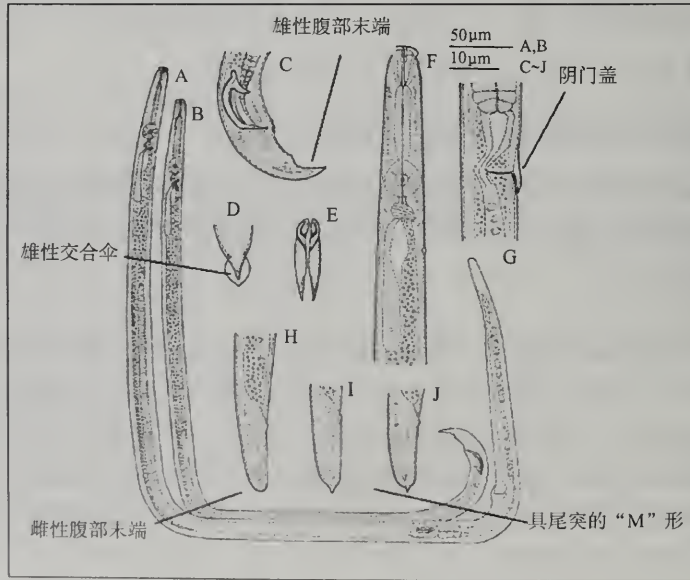


图 28-5 松材线虫的形态结构(引自 Mamiyua et al., 1972)

注：A. 雌虫；B. 雄虫；C. 雄虫尾部；D. 雄虫尾部腹面观，交合伞；E. 交合刺腹面观；F. 雌虫前部；G. 雌虫阴门；H-J. 雌虫尾部

(三) 松材线虫与近缘种及复合种的鉴别

Braasch(2001)对欧洲伞滑刃属线虫种类的形态结构进行了详细的研究。松材线虫与拟松材线虫及假伞滑刃线虫近缘，这些近缘种与同属其他种类的形态鉴别较为明显，可通过雄性交合伞及雌性阴门盖的形状区分开来。但松材线虫与其近缘种的形态鉴别有时并不很明显，鉴别它们主要是根据雄性交合刺和雌性腹部末端的形状来进行区分(Braasch,

2001)(如图 28-6), 松材线虫雌性腹部末端宽圆, 无尾尖突, 而其他近缘种的雌性腹部末端均具有明显的尾尖突。但在北美松材线虫中少数株系也存在有一个很短的尾尖突(通常 $<2\mu\text{m}$), 在这种情况下形态学特征难以将松材线虫与其他种分开。当然, 假伞滑刃线虫仅偶尔发生在针叶树中, 而拟松材线虫则广泛分布于欧洲、亚洲及北美, 所以, 最关键的问题是如何准确区分松材线虫和拟松材线虫。



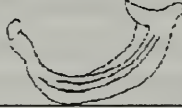
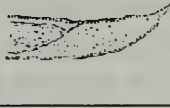

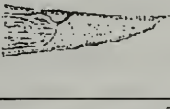


伞滑刃属线虫种类	侧线	雄性交合刺	雌性腹部末端
松材线虫	4		
拟松材线虫 欧洲型	4		
拟松材线虫 东亚型	4		
假伞滑刃 线虫	4		

图 28-6 松材线虫与其他近缘种的形态区别 (引自 Braasch, 2001)

拟松材线虫是 Mamiya 和 Enda(1979)在日本松树体内发现的另一种线虫, 其形态结构与松材线虫极为相似, 但致病性却具有明显的差异, 拟松材线虫的致病性弱, 并不引起松树死亡和导致松树萎蔫病发生。Nickle 等(1981)从形态学和解剖学特征对两种线虫进行了比较和鉴别, 两者的主要区别是拟松材线虫的雌虫腹部末端具有较长的尾尖突(通常 $5\mu\text{m}$ 左右), 而松材线虫雌虫腹部末端宽圆。但 Wingfield 等(1983)从北美的胶冷杉 (*Abies balsamea*)原木上羽化的墨天牛体上分离出带有尾尖突的松材线虫, 这样, 松材线虫在北美存在有两种类型, 即“r”和“m”形, 其中, “m”形具有拟松材线虫的形态特征, 但可与松材线虫杂交产生后代, 而不能与拟松材线虫杂交, 因而明显属于松材线虫。Baujard 等(1979)报道法国存在有松材线虫。法国株系的形态结构与拟松材线虫相似, 雌性腹末端具有尾尖突, 但其对松树幼苗的致病性却明显大于拟松材线虫, 并且, 法国株系既能与日本和美国的松材线虫杂交, 又能与日本的拟松材线虫杂交, 产生后代。通过电泳分析, 法国株系与日本的松材线虫和拟松材线虫都有明显不同。综合形态特征、杂交试验、致病性测定以及生化分析等方面的研究结果, 认为法国株系为松材线虫和拟松材线虫的中间类型, 并提出松材线虫和拟松材线虫是超种(“super species”)(De Guiran. *et al.*, 1985; De Guiran and Boulbria, 1986; De Guiran and Bruguier, 1989)。Mamiya (1986)对日本不同地理种群的松材线虫和拟松材线虫进行杂交, 结果表明, 同种不同株系之间杂交可产生可育的杂合子, 而不同种的株系之间杂交, 虽可产生 F_1 代, 但杂合子数量有限,

而且有的杂合子发生畸变, F_1 代不育, 不能产生 F_2 代, 用 F_1 代与亲代杂交, 也不能产生后代, 说明松材线虫与拟松材线虫是两个独立的种。鉴于以上研究结果, 有人提出将松材线虫、拟松材线虫和假伞滑刃线虫归为一类, 称为松材线虫复合种(pine wood nematode species complex, PWNCS)(Webster *et al.*, 1990)。Riga 等(1992)通过对来自北美和日本的松材线虫及来自法国和日本的拟松材线虫进行杂交试验, 结果表明, 在控制条件下, 实验结果支持将松材线虫和拟松材线虫确定为两个明显不同的种, 并指出松材线虫和拟松材线虫来自同一祖先。同时, 实验结果还为将法国和日本的拟松材线虫株系提高到种的分类地位提供了依据。

五、分子鉴定与快速检测

由于“m”形松材线虫的存在, 松材线虫和拟松材线虫的形态区别不很明显, 要从大量的木头样品中检测出松材线虫, 单根据形态学特征来区分和鉴定这两个近缘种似乎并不可靠。不少学者力图采用生物化学和分子生物学方法, 寻找具有种特异性的分子标记来解决松材线虫复合种的分类与鉴定问题, 创建松材线虫的快速检测方法。目前所采用的研究方法包括: 等位酶分析(De Guiran *et al.*, 1985)、酶联免疫吸附分析(ELISA)(Lawler *et al.*, 1993)、DNA 探针杂交(Webster *et al.*, 1990; Abad *et al.*, 1991; Abad, 2000; Tares *et al.*, 1994)、各种 PCR 技术(Harmey, 1993; Braasch *et al.*, 1995, 1999; Iwahori *et al.*, 1998; Hoyer *et al.*, 1998)、RFLP 分析(Bolla *et al.*, 1988; Kiyohara and Bolla, 1990; Webster *et al.*, 1990; Abad *et al.*, 1991; Braasch *et al.*, 1999)、DNA 序列测定(Beckenbach *et al.*, 1992)。

(一) 等位酶分析

Guiran 等(1985)通过对法国的松材线虫、日本的松材线虫和拟松材线虫的同工酶电泳分析, 发现它们的酯酶和苹果酸脱氢酶同工酶存在有明显的差别, 根据它们的酶谱差异能将三者区分开来。Lawler 等(1993)研究报道, 松材线虫的酯酶带有 3 条, Rf 值分别为 0.42、0.45 和 0.49, 而拟松材线虫的酯酶带仅 1 条, Rf 值为 0.65。根据图谱可鉴定两种线虫。胡凯基等(1995)应用电泳技术对来自中国、日本、加拿大、法国及挪威的松材线虫和拟松材线虫的不同株系进行同工酶电泳分析, 发现谷氨酸草酰乙酸转氨酶的差异明显, 可用于这两种线虫的生化鉴定。

(二) 酶联免疫吸附法

Lawler 等(1993)采用酶联免疫吸附法(ELISA)对松材线虫和拟松材线虫进行了免疫学分化研究, 结果表明: 以松材线虫蛋白为抗原, 制备兔抗和鼠抗血清多克隆抗体, 难以清楚区分松材线虫和拟松材线虫, 而用拟松材线虫蛋白为抗原, 制备鼠抗血清多克隆抗体, 与松材线虫进行蛋白质印迹杂交, 产生的特定带型能区分松材线虫某些特定株系。并且, 通过带型分析比较, 证明松材线虫日本株系与美国株系比与加拿大株系更接近, 前两者均存在有 22kDa 蛋白质带, 而加拿大株系无此蛋白带。所得结论与 Beckenbach 等(1992)根据 DNA 序列分析的所得结论相同。

(三) DNA 探针杂交

Bolla 等(1988)通过对提取的松材线虫和拟松材线虫的基因组 DNA 进行杂交,结果显示了 DNA 在种间和种内的差异。Abad 等(1991)研究报道,采用秀丽隐杆线虫 *Caenorhabditis elegans* 的 *unc-22* 基因构建的异源探针,可用于松材线虫复合种及其不同地理株系的检测和鉴定。Tares 等 (1992) 采用同源 DNA 探针进行松材线虫的鉴定,根据对 13 个松材线虫不同地理株系以及拟松材线虫株系的探针杂交结果分析,确认存在松材线虫和拟松材线虫两个类型,用这些探针可区分松材线虫不同的地理株系,研究结果表明松材线虫有明显的 3 个地理亚群—美国亚群、加拿大亚群和日本亚群,美国亚群和日本亚群的亲缘关系近,此结果支持日本的松材线虫来源于美国而不是加拿大的推断,他们的研究也表明美国的“m”形松材线虫与法国和挪威的株系完全不同。Harmey 和 Harmey (1993)从松材线虫基因组文库中分离、筛选和构建 X14 探针,与经酶切消化后的线虫基因组 DNA 进行 Southern 杂交,不同的线虫种类和株系产生不同的 DNA 指纹。根据 X14 序列设计 1 对引物,用此引物扩增松材线虫基因组 DNA,可产生具有种特异性的 4kb 片段,而用此引物扩增拟松材线虫和假滑刃线虫基因组 DNA,无此片段产生,因此,此探针和引物可用于松材线虫复合种的鉴定。Tares 等(1994)从日本松材线虫基因组中分离和筛选出含有 *MspI* 酶切位点的卫星 DNA,单体单位长度为 160bp,在线虫基因组中占 30%。用 *MspI* 卫星 DNA 构建的探针,只能与松材线虫杂交,而不能与其近缘种杂交,因而具有种的特异性,能有效地用于松材线虫的快速诊断和鉴定。而且, *MspI* 卫星序列在松材线虫中具有多态性,通过不同株系的松材线虫基因组 DNA 与 *MspI* 卫星 DNA 探针杂交,结果表明,日本和美国的松材线虫株系与探针杂交产生的信号比加拿大株系的信号更强,说明日本和美国的松材线虫的亲缘关系较与加拿大的松材线虫的亲缘关系更近。用 *MspI* 卫星 DNA 探针进行检测的方法如下。

(1) 线虫斑点杂交 线虫在尼龙滤纸上用 tip 头轻轻压碎,然后,滤纸通过分次连续的处理:用 10% SDS 浸渍 2min, 0.5mol/L NaOH / 2.5 mol/L NaCl 浸渍 2 次,每次 5min, 3mol/L AcNa (pH 5), 3 次,每次 2min,使线虫裂解。滤纸在室温下干燥 30min, 80℃ 烘烤 1h,再用 *MspI* 卫星 DNA 探针进行预杂交和杂交(图 28-7)。探针可用 ^{32}P 标记,也可 digoxigenin (DIG) 标记。此方法快速、准确,并可检测单条线虫,为松材线虫的快速准确地检测提供了有效的方法。

(2) PCR 扩增检测 根据 *MspI* 卫星 DNA 单体设计的 PCR 引物对松材线虫基因组 DNA 进行 PCR 扩增,可检测单条松材线虫和混合线虫,在混合线虫中,松材线虫与其他线虫的比例可达 1 : 1000。

(3) PCR-ELISA 为了减轻劳动强度和减少分离 PCR 扩增产物的电泳时间,采用自动紫外检测的方法。根据 *MspI* 卫星 DNA 单体设计的 PCR 引物用生物素标记,然后对待测样品进行 PCR 扩增,扩增产物转移到用链霉亲和素(streptavidin)包裹的微板上,通过加入用 DIG 标记的内部探针和用过氧化物酶标记的直接抗 DIG 的抗体进行检测。具有松材线虫的样品才能检测到信号。此方法很灵敏,在松材线虫与其他线虫浓度比在 1 : 100 000 的情况下可检测到信号,并能用于检测单条线虫(Abad, 2000)。

Individuals	<i>B. xylophilus</i> J10	<i>B. xylophilus</i> Bc	<i>B. mucronatus</i>	<i>C. elegans</i>
1				
5				
10				
20				

图 28-7 *MspI* 卫星 DNA 探针与线虫基因组直接杂交
(引自 Tares *et al.*, 1994)

(4) ITS-RFLP 技术 Hoyer 等(1998)建立了能区别松材线虫、拟松材线虫、*B. fraudulentus*、*B. leoni* 和 *B. sexdentati* 的 ITS-PCR-RFLP 技术体系。Iwahori 等(1998)采用 PCR-RFLP 方法对来自日本、美国、加拿大和中国的松材线虫及日本、中国和法国的拟松材线虫进行了研究, 结果表明, 日本的松材线虫致病株系与中国和美国的松材线虫株系酶切图谱一致, 而日本的松材线虫非致病株系略有不同, 加拿大的松材线虫株系明显不同。通过 RFLP 及 DNA 序列分析, 说明日本、中国和美国的松材线虫的亲缘关系近, 它们来自同一祖先, 而加拿大的松材线虫与它们的亲缘关系较远, 因此, 研究结果验证了日本的松材线虫起源于美国的假说。研究结果也表明, 松材线虫和拟松材线虫是两个独立的单系群, 即它们是两个不同的种。Braasch 等(1999)采用基于 PCR 的 ITS-RFLP

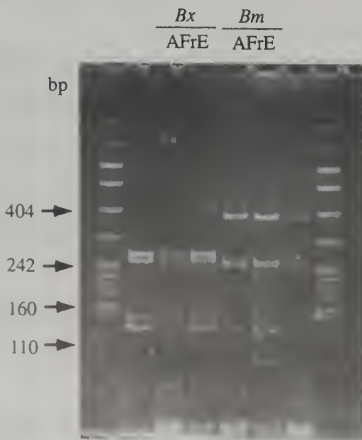


图 28-8 ITS-PCR 扩增产物用 *Hinf I* 限制性内切核酸酶消化的 RFLP 图谱
(引自 Iwahori *et al.*, 2000)

注: Bx 为松材线虫; Bm 为拟松材线虫; A 为活的线虫标本; Fr 为保存在 -20°C 的标本; E 为保存在 99.5% 的乙醇中的标本

技术将松材线虫与其他同属的 17 种线虫区分开来。Mota 等(1999)采用 ITS-RFLP 的方法对葡萄牙死亡松材上的线虫进行了分子鉴定, 研究结果验证了形态学鉴定的结果, 即葡萄牙的线虫与美国的“m”形松材线虫相同, 而与欧洲的拟松材线虫完全不同。Iwahori 等(2000)采用 PCR-RFLP 方法成功地检测了松材线虫和拟松材线虫, 而且将此技术应用于单条线虫及保存在不同条件下的线虫标本的检测(图 28-8)。单条线虫特异 PCR 方法: 将单条线虫放入 $1\mu\text{l}$ 灭菌水于玻片上, 用 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 的滤纸片放在其上面, 用镊子将线虫压碎, 含有线虫的滤纸迅速放入 PCR 缓冲液中, 作为 DNA 模板, 扩增片段含 *ITS1*、*5.8S* 和 *ITS2*, PCR 产物用限制性内切核酸酶 *Hinf I* 消化后, 能明显区分松材线虫和拟松材线虫。此方法快速、简便、有效, 可用于松材线虫的快速检测,

并可用于冰冻和乙醇保存的标本。

(四) DNA 序列测定

Beckenbach 等(1992)研究发现,日本和欧洲的拟松材线虫的热激蛋白基因序列存在有很大的差别,提出将 2 个株系提升为种。

(五) 其他 PCR 技术

Braasch 等(1995)建立了检测松材线虫及其近缘种的 RAPD 技术,用引物 OPY-01 和 OPY-07 能区分松材线虫和拟松材线虫,引物 OPY-08 能区分拟松材线虫和假伞滑刃线虫。郑经武(1998)对松材线虫和拟松材线虫的 RAPD 分析结果表明,引物 P253 可扩增出具有种特异性的片段。张路平等(2002)对松材线虫和拟松材线虫不同株系线粒体 DNA 进行了 RAPD 分析,研究表明,松材线虫和拟松材线虫分别聚集在一起,为两个明显的类群,松材线虫类群又分为 2 组,一组以日本株系为代表,另一组以美国株系为代表,中国的两个松材线虫株系分别分在两组内,长岛株系与日本株系遗传距离近,富阳株系与北美株系遗传距离近,推测中国的两个株系可能来源不同。许建平等(1998)对来自南京、浙江、日本的松材线虫和拟松材线虫进行 PCR 扩增,在 350bp 处扩增出仅松材线虫具有的特异性条带,可用于松材线虫的 PCR 快速检测。张立海等(2001)对松材线虫和拟松材线虫的 rDNA ITS1 片段进行序列测定和 PCR-SSCP 分析。

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

松材线虫的传播途径有如下几种。

(一) 人为的长距离传播

松材线虫的长距离传播是人为造成的,由于木材的长距离运输,将带有线虫和媒介昆虫的感病木材从疫区传到新的地区。在长距离传播过程中必须具备 3 个条件,即松材线虫、媒介昆虫和木材,三者必须同时从甲地传到乙地,病害才能在新的生境中成功地定殖、扩散和繁殖,因为如果只有木材和线虫,没有媒介昆虫,线虫不能侵入新的寄主植物;如果只有线虫和媒介昆虫,没有木材,媒介昆虫长时间没有木材的依附,难以生存下去;如果只有媒介昆虫和木材,没有松材线虫,当然不可能有松材线虫病的发生。因此,在长距离传播过程中必须有线虫、媒介昆虫和木材同时存在,线虫是主体,媒介昆虫是接种动力,木材是载体。另一种情况是如果带有线虫的木质材料上带有树皮,即使没有带媒介天牛,但也会招致本地存在的松材线虫高效传播介体——松墨天牛到其上产卵,这样,松材线虫同样可以通过本地的松墨天牛传播和扩散出去。因此,要控制松材线虫的长距离传播,必须加强对苗木、原木、板材、方材、木质包装材料以及各种衬垫木、填充木、压角木等的检疫,它们都是松材线虫的主要载体。通过加强检疫,控制松材线虫的人为传播。

(二) 媒介昆虫引起的近距离传播

松材线虫的近距离传播主要是通过媒介昆虫的取食和产卵传播的。当媒介昆虫从感病的树木飞到新的树木上取食和产卵时，松材线虫就随着媒介昆虫从发病的松树传到未发病的松树上，从发病的松林传到未发病的松林。松墨天牛在林间自然飞翔和传播松材线虫的距离仅不足 200m，也有报道最远飞行距离为 3.3km。因此，要控制松材线虫的近距离传播，必须对媒介昆虫进行控制和防治。

(三) 松材线虫经土壤和水传播

有试验表明，木片中的松材线虫可进入土壤或附近的水中，从松树的根部直接侵入或从根的伤口侵入到易感病的松树上，致使其发病。当然，这种概率并不大。

二、入侵成因

松材线虫传播到一个新的地区，要能成功定殖、建群和扩展，必须具备有致病的松材线虫、感病的寄主植物、携带线虫的媒介昆虫和适宜的环境条件，这四个因素必须同时存在时，松材线虫才能成功入侵。松材线虫之所以能在我国成功入侵并爆发流行，是因为这四个条件同时具备。

(一) 大量的外来松材线虫进入中国的可能性

由于松材线虫可在木质包装材料中长时间的存活，所以可随木质包装材料一起被带入中国。我国每年进口有大量的原木、木质制品及木质包装材料，松材线虫很容易随这些木质材料进入我国。从1998年至今，我国已经数百次从美国、日本、韩国等输华货物的木质包装材料、木质制品上检测到活体松材线虫，这是松材线虫可随木质包装材料进入中国的最好例证。此外，芬兰、挪威、瑞典和法国也曾从北美货物的木质包装材料中截获到松材线虫。因此，松材线虫完全可随木质包装材料被带入中国。

(二) 中国具有足够的感病寄主植物

松材线虫的寄主主要为针叶树种。我国幅员辽阔，针叶树种种类繁多，针叶树面积占整个森林面积的 42.7%，从平原到高山几乎所有的林区都可见到针叶树的广泛存在。松树是我国主要的林业森林资源，在境内生长的松属树种约 50 种，面积约占整个针叶树林的 58%。而且，大多数松树树种对松材线虫病的抗性低，许多种类是易感甚至高感树种，如云南松 *P. yunnanensis*、红松 *P. koraiensis*、华山松 *P. armandii*、黄山松 *P. hwangshanensis* 等，我国第一大树种—马尾松过去被认为是高度抗病树种，而现实表明马尾松在我国疫区内却为感病树种，在林中有大量的马尾松感病死亡。因此，在我国境内有大量的感病寄主存在，为松材线虫病的发生、扩展和蔓延提供了易感寄主群体。

(三) 大量的高效媒介昆虫的存在

松材线虫的传播介体主要为墨天牛属 *Monochamus* 昆虫(鞘翅目 Coleoptera、天牛科 Cerambycidae)，全世界已记载约 150 种，我国已记载有 24 种，其中，已确定为松材线

虫传播媒介的主要有 2 种：松墨天牛 *M. alternatus* 和云杉花墨天牛 *M. saltuarius*，其他分布的墨天牛是否为松材线虫潜在的传媒介体，尚有待于进一步研究证实。松墨天牛是中国、日本和韩国松材线虫最重要的传播媒介，在我国北纬 40°以南广泛分布，并且大量存在，分布地区包括北京、河北、山西、陕西、甘肃、山东、河南、四川、西藏、湖北、江西、安徽、江苏、浙江、福建、湖南、广东、广西、云南、贵州、海南以及香港、台湾。云杉花墨天牛主要分布在我国东北地区的黑龙江、辽宁、吉林、内蒙古，在河北、山东、新疆、山西、江西、浙江、安徽、河南也有分布。因此，我国全境内基本均有松材线虫的传播媒介存在，使松材线虫病的自然扩散具备了传播和侵染的条件。

(四) 我国南方大部分地区气候条件适宜

松材线虫病适宜的发病气候条件为年平均气温 10℃以上，年平均气温低于 10℃的地区不发生松材线虫病，年平均气温 10~12℃的地区，松材线虫病有零星发生，年平均气温 14℃以上的地区是松材线虫病的最适发生区，可爆发流行。我国南部大部分地区均具备此病流行的气候条件。据有人对我国松材线虫病适生区分析，海南、香港、广东、广西、福建、台湾、浙江、江西、云南、贵州、四川、湖南、湖北、江苏、安徽、河南、陕西、山东、山西、河北均是松材线虫的适生区，辽宁、新疆、西藏、甘肃的部分地区也适合松材线虫的发生。因此，我国大部分地区的气候条件适合松材线虫的发生。只要有致病的线虫传入到新的地区，松材线虫病就可能在此地区发生和流行。

(五) 从中国发病疫点来看，我国的松材线虫很可能是随进口货物的木质包装材料传入

松材线虫最初于 20 世纪 80 年代初期在江苏省的南京发现，追踪其来源，发现与从疫区国家进口仪器设备的木质包装材料有关。根据松材线虫在我国的发生特点，一些孤立疫点，如山东的长岛和浙江的宁波，最初发病点附近的单位也曾从松材线虫疫区国家进口过仪器设备。因此，中国的松材线虫很有可能是由疫区国家输华货物的木质包装材料传入的。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

一、松材线虫病的危害现状

松材线虫病具有发病致死速度快、传播蔓延迅速、防治难度大的特点，因此被称为“松树癌症”。松材线虫发生危害最重的是日本和中国。据文献报道，松材线虫于 1905 年首次在日本南部九州长崎(Kyushu 岛)发现，使日本赤松、日本黑松、琉球松 *P. luchuensis* 大面积死亡。1925 年，在九州佐世保的海军基地突然爆发此病，并迅速遍及整个九州地区。此病害随后稳定地向东北方向扩展，至 1927 年，病害已波及日本全国 27 个府县，被害松树达 100m³，1932 年损失达 10 000m³，1937 年达 30 000m³，1947~1950 年之间，损失达 100 万立方米。20 世纪 50~60 年代，实行清除死树的防治控制措施，年损失降低到 50 万立方米。然而，病害继续扩展蔓延，至 70 年代，松材线虫病在日本再次爆发流行，日本松林资源由此遭到灭顶之灾，1978~1981 年为爆发高峰期，年损失量高达 240

万立方米余。至 1982 年, 松材线虫病已遍及全日本, 日本政府实施松材线虫病防治工程, 大量施用化学杀虫剂毒杀媒介天牛和施用杀线虫剂注干毒杀线虫, 病木砍伐后用熏蒸剂熏蒸, 80 年代年损减少到 100 万立方米, 至 1999 年, 木材年损失下降到 72 万立方米 (Kosaka, *et al.*, 2001)。但日本政府用于防治松材线虫病的费用却是巨大的, 仅 1981 年日本政府就耗资 3 千万美元用于防治松材线虫病 (Oku, 1982)。自 1977~1997 年这 20 年中, 日本用于松材线虫病的防治经费占全部森林病虫害防治经费的 90%。

我国最初于 1982 年在江苏省南京市中山陵园后山发现有 265 株黑松枯死, 经鉴定为松材线虫病。1983 年在紫金山因松材线虫致死的松树就达 5280 株, 1984 年枯死松树达 10 000 余株。随后, 松材线虫病在江苏迅速蔓延, 并扩展到浙江、山东、安徽、广东、湖北等省。至 1996 年底, 江苏、浙江、安徽、山东、广东 5 省发病面积超过 4 万公顷, 累计枯死松树达 670 万株。至 2001 年底, 我国发生面积达 8.4 万公顷, 病死树数量越来越大, 每年病死树数量逐年上升, 累计枯死松树达 3500 多万株, 直接经济损失 25 亿元, 间接经济损失达 250 亿元, 特别是距黄山的直线距离只有 68km, 距离张家界直线距离不到 100km, 对黄山、张家界等一批世界自然文化遗产构成了严重威胁。

松材线虫在北美主要严重影响木材的出口。虽然已报道松材线虫在美国能危害几种外来的树种, 如欧洲赤松、欧洲黑松, 但它们主要生长在种植园, 作为观赏和圣诞树种种植, 因而对森林的影响并不大。在加拿大也报道松材线虫能为害几种针叶树, 但未对松林造成严重危害。

二、松材线虫入侵对生态经济的影响

松材线虫病为害造成的巨大的损失, 表现在如下方面。

(一) 直接经济损失

受害松树大量死亡; 受线虫危害的松树木质较差, 常有虫蛀孔, 严重影响木材及木质制品的贸易, 尤其是影响国际贸易。为了防止蔓延, 在防治上采取的主要措施是将枯死树全部砍伐, 进行烧毁或用溴甲烷进行熏蒸处理; 对发现疫情的森林进行化学防治或生物防治, 采取防治措施所投入的人力、物力和财力相当大。

(二) 间接生态经济损失

松材线虫病对森林生态系统的影响很大, 松树是我国的主要造林绿化先锋树种, 常常大面积连片种植松树纯林, 树种单一, 生物多样性较低, 生态系统不稳定, 极易遭受外来有害生物的破坏。易感松树纯林受到松材线虫侵染后形成连片感染枯死, 病树砍伐后只剩稀疏灌丛和杂草, 松林水土流失严重, 较为脆弱的生态系统出现崩溃, 逆行演替退化为杂草灌丛。我国一些名胜风景区, 如黄山、张家界等, “迎客松”——黄山松是主要的景观之一, 黄山松是感病树种, 一旦松材线虫传入这些名胜风景区, 将造成自然景观生态系统的严重破坏, 将对我国的旅游资源造成毁灭性的打击, 损失不可估量, 后果将不堪设想。此外, 我国许多城市的绿化树种为黑松、马尾松、雪松等针叶树种, 遭到松材线虫为害后, 对城市绿化造成的经济损失和生态影响巨大而长远。

第五节 生物学特性

一、松材线虫的培养

松材线虫的培养方法有两种：一种是快速培养法，一种是扩大培养法。快速培养法：将病木锯短，放在烧杯中，加入适量的清水(薄层)，木段上部盖上湿纱布，下端拖在水中，置于 25~28℃ 培养箱中培养 3~4d，就可看到有较多的松材线虫雌雄成虫。扩大培养法：将灰葡萄孢霉菌培养在 PDA 平板上，待菌丝长满平板后，将线虫接入其内，在 20~25℃ 下培养 7~10d，可见大量的松材线虫雌雄成虫。

松材线虫在灰葡萄孢霉-PDA 培养基上培养，世代历期很短，只需 4~5d。幼期为 4 龄，第 1 次脱皮在卵内进行，孵化出来后即为第 2 龄幼虫，经过 2~3d，就发育为成虫，并开始产卵。世代重叠明显。松材线虫繁殖能力强，通常单条雌虫平均产卵 100 粒左右，若在适宜的条件下，单条雌虫可繁殖 230 000 个后代。

二、生活史与侵染循环

松材线虫具有两个明显的生活史阶段，即繁殖阶段和分散阶段，并且，其生活史与媒介昆虫松墨天牛的生活史相偶联。在 5~6 月，携带线虫的天牛成虫出现，进行补充营养取食，此时，在天牛气管中的线虫从气门逸出，通过天牛取食造成的伤口进入寄主植物体内。线虫在寄主植物的体内脱皮变为成虫，交配、产卵，并迅速繁殖，在植株体内穿移。Yik 等(1981)通过扫描电镜观察到松材线虫在松树中的侵染部位，证明松材线虫在树脂道内。线虫取食上皮细胞(epithelial cell)和薄壁细胞(植食性 phytophagous)或取食侵入木材的真菌(菌食性 mycophagous)。受侵染后 30d 内，寄主表现出蒸腾作用减弱和树脂分泌减少，树木开始出现褪绿，在 3 个月内，树木开始死亡。秋末冬初，当树木死亡或干枯时，线虫受到环境胁迫，由繁殖型阶段转变为分散型阶段。线虫进入非取食的分散型第三龄幼虫期，并聚集在天牛蛹室周围的木质部中。此时期幼虫含有高的类脂化合物，适合于在不利条件下生存。分散型第三龄幼虫期历期很长，直至第二年春末。如果将分散型的第三龄幼虫放在真菌上培养，它们则蜕皮变成繁殖型的第四龄幼虫，然后继续发育为成虫，并迅速繁殖。第二年春末，当天牛蛹羽化为成虫时，分散型的第三龄幼虫蜕皮变为分散型的第四龄幼虫，这个时期的幼虫特别抗干旱，适合于昆虫传播，因此这个时期称为传播时期或称为持久型幼虫(dauer larvae)。第四龄幼虫通过胸气门进入刚羽化的天牛小成虫(callow adult)体内，并以休眠状态保持在成虫气管中，但并不进入天牛的体腔内。在松材线虫的传播媒介天牛中，以松墨天牛的传播效率最高，据日本报道，松墨天牛平均携带松材线虫 18 000，有的可多达 100 000 条扩散型幼虫(Kobayashi *et al.*, 1984; Kondo, 1986; Zhang *et al.*, 1995)，而北美的传播媒介天牛传播效率相对较低，而且并不是所有的天牛个体都能被松材线虫侵染，例如，Kinn(1987)发现仅 31.4% 的南美松墨天牛 *M. titillator* 和 50% 的卡罗莱纳墨天牛 *M. carolinensis* 携带线虫。当天牛成虫寻找适合的新寄主进行补充营养取食时，第四龄分散型幼虫即从天牛的气门逸出，通过天牛取食幼枝树皮造成的伤口进入植株组织内。这样，新的生活史循环又开始了。这种方式的传播称为初侵染(primary infection)(图 28-9)。一旦进入易感的寄主植物体内，线虫则迅速

繁殖，使受侵染的松树在较短的时间内表现出衰退和萎蔫症状。



图 28-9 松材线虫传播途径与侵染循环

在美国还报道松材线虫存在另一种侵染循环。Wingfield(1983)首次报道松材线虫通过天牛产卵传播到受环境胁迫的已死或将死的松树或已砍伐的带皮的松材上，线虫在寄主植物体内取食侵入木材的真菌，这种传播方式称为次生侵染(second infection)(图 28-9)。次生侵染在拟松材线虫和 *B. cocophilus* 中也得到证实，目前认为这是伞滑刃属线虫常见的进行转移的方式。在这种情况下，松材线虫不是松树萎蔫病的真正病原物。这种生活史循环为松材线虫在缺乏易感寄主时使自己保存下来提供了生态学的有效途径，而且也增加了被引入新的地区的可能性。但次生侵染传播在日本未见报道。由于松材线虫在美国有次生传播，如果天牛在已死或将死的树或砍伐的原木上产卵，则松材线虫与松树萎蔫没有直接的关系。因此，在美国，松材线虫的分布并不等于松树萎蔫病的分布(Dwinell, 1997)。

可见，松材线虫以繁殖型和分散型两种途径通过第三龄和第四龄幼虫期(图 28-10)。在文献中，常以阿拉伯数字表示繁殖型幼虫期，如用 J_2 、 J_3 、 J_4 表示的第二龄、第三龄和第四龄繁殖型幼虫期，而用罗马数字表示分散型幼虫期，如用 J_{III} 和 J_{IV} 表示第三龄和第四龄分散型幼虫期。在适合的环境条件下，如食物(松树的薄壁组织和上皮组织以及真菌)充足和湿度合适时，线虫进入繁殖型的生活史循环，迅速繁殖、扩增。当寄主死亡、食物缺乏或质量下降、以及湿度不够时，松材线虫由繁殖阶段转变为分散阶段，即从第二龄繁殖型幼虫期(J_2)蜕皮进入第三龄分散型幼虫期(J_{III})，第三龄分散型幼虫聚集在天牛蛹室周围的木质部中，当天牛成虫羽化时，第三龄分散型幼虫即蜕皮变为第四龄分散型

幼虫(J_{IV})。研究表明,线虫的蜕皮和天牛的羽化是一个同步的过程,线虫 J_{III} 蜕皮变为 J_{IV} 的时间取决于蛹室内某种化学物质的存在,这种化学物质是墨天牛属所特有的与成虫羽化有关的化学物质(Necibi and Linit,1998)。非取食的第四龄分散型幼虫进入刚羽化的、体壁尚未完全骨化的天牛成虫体内,当天牛成虫发育成熟进行补充营养取食时,线虫则通过天牛传播到新的寄主植株上,并从天牛取食或产卵造成的伤口进入新的寄主植物体内。第四龄幼虫从天牛气管逸出的行为必须与天牛的取食和产卵行为相偶联,这样才能使线虫保持最大的适合度。观察发现线虫的逸出在天牛羽化的第一周最少,第二、三周达到高峰,然后逐渐下降。推测第四龄分散型幼虫进入天牛气管以及从天牛气管逸出的行为受体内外化学信号物质的调控(Linit, 1989)。

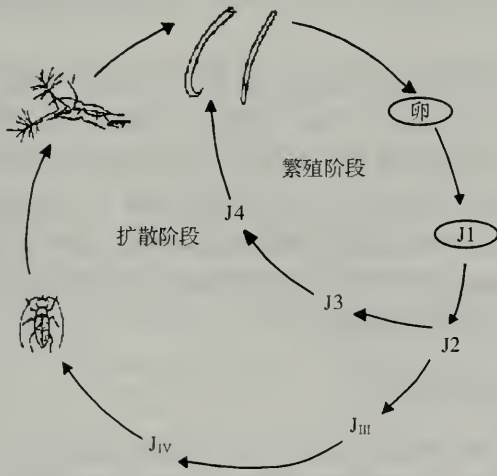


图 28-10 松材线虫生活史图

高温干旱条件有利于松材线虫病的发生和蔓延。松材线虫大多在 6~7 月份侵入新的寄主树木,松树感病后 30~40d 就出现针叶褪绿,在高温干旱时从开始出现症状至死亡大约为 30~45d,所以松林出现松材线虫病的症状一般在 7~9 月份。但对于温度较低的地区,部分松树感病后当年不枯死,至次年夏天才枯死,有的植株不表现全株枯死现象,而仅为树冠少量枝条枯死。此外,当线虫侵染具有抗性的松树时,或在不利的气候条件下,感病植株也不表现出明显的症状。松材线虫对不利的环境条件具有很强的生存适应能力,如在干燥、低温及食物缺乏时,松材线虫能在干旱后的衰弱木上继续繁殖,这样,在干旱的季节,松材线虫病的死亡率增加。松树感染松材线虫后症状表现的时间与松树的品种、种源、立地条件、气候条件以及松材线虫的株系来源密切相关,黑松感病枯死时间往往比马尾松提早 10~15d,南方的马尾松种源比北方的马尾松表现症状轻,而且表现症状的时间也迟。在阳坡或南坡以及立地条件较贫瘠的感病松林往往较阴坡或北坡的感病松林发病重,表现时间也更早。如遇上高温、干旱的年份,症状表现更重,时间也更早。长期高温干旱的气候条件有利于病害的严重发生和蔓延,感病品种在凉爽的高海拔地区并不发病。

三、松材线虫的致病性

(一) 线虫不同株系的致病差异

据研究报道,松材线虫不同株系的致病性差异明显。Wingfield 等(1983)研究发现,松材线虫致病力存在有明显的差异,并且分离出具有寄主专化性的具有尾尖突的“m”形松材线虫。Kiyohara and Bolla(1990)从日本分布区内收集了的37个松材线虫株系,研究表明,它们的致病力各不相同,致死率在10%~90%之间。张治宇等(2002)测定了来自中国、日本和加拿大的不同地理株系的松材线虫对3~4年生黑松的致病力,发现它们的致病力有明显的分化,不同株系对黑松的致死率最高达到87.5%,相对的寄主适合度(relative host suitability, RHS)系数为0~110。而且,中国松材线虫株系的致病力高于日本和加拿大种群。

研究表明,致病性弱的株系在真菌上培养,其繁殖力明显较致病性强的株系弱(Kiyohara and Bolla,1990; Kiyohara, 1986)。用接种在无菌松枝上的真菌培养松材线虫,致病性弱的株系和致病性强的株系两者产生的第三龄分散型幼虫的数量和比例存在有明显的差异(Aikawa and Kosaka, 1998)。而且,致病性弱的株系比致病性强的株系在离体条件下运动要慢(Kaneko *et al.*, 1998; Iwahori and Futai, 1995)。即使在寄主植株体内,致病性弱和致病性强的株系的繁殖能力和运动能力也表现出明显的差异。因此,认为松材线虫的繁殖能力是影响致病能力的主要因素。

(二) 线虫不同龄期的致病性差异

Ishida and Hogestu(2001)对松材线虫不同发育时期的致病性进行了研究,结果表明,幼龄幼虫与老龄幼虫及成虫的致病性明显不同,幼龄幼虫能直接杀死松树细胞,对松树薄壁组织细胞有强的致病作用,而老龄幼虫和成虫只有生活在树脂道中才对松树细胞有致病作用。

(三) 线虫对寄主不同发育阶段的致病性差异

松材线虫的致病性鉴定较为困难,许多关于致病性方面的研究报道都是基于对幼苗的致病性测定。但是,接种针叶幼苗的致病性并不能完全代表成年树木的致病性(Dwinell, 1997)。Bedker 等(1987)引证了许多关于试验中的幼苗致死率不能代表松材线虫在自然条件下对成树的致死能力方面的研究,如湿地松(*P. elliotii*)的幼苗在温室中接种能被松材线虫杀死,但在自然条件下打孔接种10年的成树(10^5 条/孔),即使在最干旱的条件下也不发病。Wingfield 等(1984)对美国的松材线虫进行了致病性测定,对幼苗期接种能致死的寄主植物班克松 *P. banksiana*, 多脂松 *P. resinosa* 和欧洲黑松树冠进行田间接种,但未表现症状。Kishi(1999)通过对3~10年的日本赤松和2~21年的日本黑松接种试验表明,幼树比成树的萎蔫速度更快,死亡比例更高。

(四) 不同温度条件下致病性的差异

Ichihara 等(2000)研究发现,用松材线虫接种日本黑松幼苗,不同株系和不同的环境

条件下致病性有明显差异。致病株系在 30℃ 时，线虫在寄主的表皮层和木质部扩增，分布在寄主的皮层树脂道、皮层组织和木质部树脂道，因而在表皮和木质部均发生细胞死亡和产生病害症状。当环境条件为 25℃ 时，致病株系主要分布在寄主的皮层树脂道，在木质部树脂道和皮层组织中很少有线虫分布，因而病害症状和细胞死亡仅发生在皮层树脂道，而在其他组织中很少发生。非致病株系在 30℃ 条件下在寄主中的分布及产生的病害症状与致病株系在 25℃ 条件下相同。研究结果表明，致病株系在较低温度条件下在寄主体内的分布与非致病株系一样，只能在皮层树脂道中扩增，而不容易在木质部树脂道和皮层组织中穿移，而寄主的细胞死亡和病害早期症状的产生与线虫穿移同时发生，从而说明松材线虫的侵入导致细胞死亡和早期症状的产生。

四、松材线虫病的致病机理

关于松材线虫病的致病机理，目前尚未完全清楚，杨宝君(2002)对此进行了全面综述，大致存在有 3 种观点。

(一) 酶学说

持这种学说观点的人认为，松材线虫入侵植株体内后，能分泌多种酶作用于寄主植物，从而导致松树萎蔫。这些酶中，最重要的是纤维素酶。Odani 等(1985)观察到松材线虫产生纤维素酶，可分散到整个植株中，把松材线虫的粗提液注入松树苗中，出现和松材线虫侵染同样的症状，而在粗提液中检测出了纤维素酶的活性。Yamamoto 等(1986)将松材线虫保持在 0℃ 12h，在其悬浮液的上清液中发现有纤维素酶的活性，36h 后纤维素酶的含量逐渐增加，用上清液培养松苗，针叶出现坏死现象，这是松材线虫侵染引起松树萎蔫的早期症状，因而提出松材线虫的致病机理是：由于松材线虫分泌的纤维素酶的作用，使松树薄壁细胞的细胞壁和细胞膜遭到破坏，使树脂从树脂道中渗漏出来，扩展到相邻的管胞中，使水分输导受到障碍，导致萎蔫。蒋丽雅等(1995)从松材线虫的匀浆抽提液及分泌液中分析出纤维素酶的存在。Kojima 等(1994)发现松材线虫分泌的纤维素酶和拟松材线虫的不同，致病型松材线虫比非致病型松材线虫分泌的纤维素酶活性强。一些试验证据也支持酶学说，如 Mori 和 Inoue(1986)用松材线虫接种黑松后，黑松体内产生乙烯，与用市售的纤维素酶接种松枝产生乙烯相同，冷冻杀死的松材线虫接种也可产生乙烯，但煮沸杀死的线虫接种就不能产生乙烯，因而认为乙烯的形成是松材线虫分泌的纤维素酶的作用。严东辉等(1997)分析了松材线虫的体外酶，发现松材线虫的体外酶不仅有纤维素酶，还有过氧化物酶、蛋白酶和淀粉酶。此外，Bolla 等(1986, 1987)对不同致病型松材线虫的碳水化合物的代谢进行了研究，认为非致病型松材线虫的碳水化合物代谢是经无氧的乙醇发酵的循环途径，而致病型松材线虫的碳水化合物的代谢是通过有氧的糖代谢途径，葡萄糖产生琥珀酸乳酸盐，并通过甘油的产生保持氧化还原平衡，其原因是由于两类线虫的乙醇脱氢酶基因不同。

(二) 穴化学说

持这种学说观点的人认为，松树感染松材线虫后，植株体内单萜和倍半萜的含量增加，这些物质进入管胞，在管胞中形成空穴，致使水分传导受阻，针叶蒸腾作用减弱，

逐渐停止,是导致松树枯萎症状的主要原因。Myers(1986)观察松苗感染松材线虫后的组织变化,发现形成层和射线组织受到破坏,导致松苗死亡。这种死亡是管胞被气体、松脂或射线组织死亡时所产生的代谢产物堵塞所致。Kuroda 等对松材线虫的致病机理进行了多年的研究,首先,通过对接种松材线虫的黑松注入酸性品红,观察组织变化情况,发现2周后水分输导受阻,树干横截面放射方向有白色线状纺锤形部分,管胞内进入气体,中间出现空穴,以后空穴逐渐增大,4周后几乎扩展至整个树干的断面,其木质部含水量比健株低30%,形成层和筛管部位组织坏死是由于空穴造成的水分输导受阻所致。通过对管胞内充塞的气体成分分析表明,木质部内单萜烯和倍半萜烯的含量明显增加,其中, α -萜烯含量比健株高出2~4倍, β -萜烯和其他几种单萜烯增高3倍,长叶烯也增高3倍,这些物质的增加发生在空穴化之前,因而认为线虫进入树体后促进了挥发性物质的产生,单萜烯和倍半萜烯呈汽化状态进入管胞,引起空穴,使水分输导受阻。其后,又发现松材线虫在松树苗内取食薄壁细胞,造成组织破坏而致死,5年以上的松树枯死是水分输导障碍导致缺水所致。用 α -萜烯注射到树干中,能引起管胞中空穴的形成。用致病性和非致病性的松材线虫以及拟松材线虫接种黑松,发现致病型松材线虫接种的松树管胞中的空穴形成和薄壁细胞的病变普遍存在,而非致病的松材线虫及拟松材线虫接种的松树中,这种变化受到限制,未表现水分失调(Kuroda, 1989, 1991; Kuroda *et al.*, 1988, 1991)。Fukuda 等(1992)提出感病树木水分输导功能失调主要是由气体物质使管胞空穴化引起的,并根据研究结果把松材线虫病害的发展过程归纳为3个阶段:首先,少量的线虫侵入,诱发树木薄壁细胞的脂肪滴消失,这可能与松树组织内的萜烯类化合物的合成量增加有关;然后,细胞发生变性和坏死,导致毗邻管胞的空穴化或有时导致被释放的物质堵塞管胞腔和纹孔膜,这种细胞学上的变化和管胞空穴化是连续进行的;最后,内部症状扩展至整个树体,线虫群体增加,形成层死亡,水分输导完全停止,同时,针叶内水分亏缺,光合作用和呼吸作用停止,针叶黄化。Ikeda 和 Kiyohara(1995)研究发现空穴形成的过程:开始管胞中的少量空穴形成,然后逐步增加,大量形成后,导致水分输导受阻。因此,此学说认为松树感病后发生萎蔫主要是由于管胞中出现空穴,影响了水分输导造成的,而空穴是由于单萜烯和倍半萜烯类物质的急剧增加所致。

(三) 毒素学说

持这种观点的人认为,松树感染松材线虫后,体内产生有毒物质,导致松树萎蔫。但对毒素的来源有不同的看法。一种认为毒素是受松材线虫刺激后松树寄主产生的异常代谢产物,目前已知至少有5种代谢物存在于感染线虫的松树里:苯甲酸和儿茶酚存在针叶里,苯甲酸、8-羟基香芹鞣酮、二氢松柏醇和10-羟基马鞭烯酮存在于木材中。Oku(1990)将感染松材线虫的松树提取物接种到松树幼苗上,可导致萎蔫发生,而用健康松树的提取物接种,则无此症状发生,经分析,感病植物提取物中有多种松树的异常代谢产物,如苯甲酸、儿茶酚、8-羟基香芹酮和二羟基松柏醇等,经接种试验,苯甲酸、8-羟基香芹鞣酮和二羟基松柏醇对松苗有毒害作用,可使松苗萎蔫。Bolla 等(1984, 1986)将感染松材欧洲赤松木质部用三氯甲烷粗提,经分析,其抽提物中有两种主要成分,即10-羟基马鞭烯酮和8-羟基香芹鞣酮,用这两种物质接种松苗都能引起萎蔫,产生

的症状与松材线虫侵染的症状一样。陈玉惠等(2002)通过在黑松和湿地松幼苗上接种松材线虫,研究松材线虫侵染对松幼苗活性氧代谢的影响,结果表明:在接种松材线虫后,黑松较湿地松发病快且重,黑松内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性逐渐降低;湿地松内 SOD 和 CAT 在接种早期活性增加,随后下降。两种幼苗接种后,过氧化物酶(POD)活性、 H_2O_2 和丙二醛(MDA)含量不断增加。 H_2O_2 和 MDA 的积累与植株发病速度呈明显相关。因此,松材线虫病的发生和发展与寄主植物组织的膜脂过氧化作用有关。

另一种认为毒素是由松材线虫伴生的细菌产生的。Kawazu(1996, 1998)从松材线虫体表分离到 3 种芽孢杆菌(蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus*、枯草芽孢杆菌 *B. subtilis* 和巨大芽孢杆菌 *B. megaterium*),这些芽孢杆菌可产生对松苗有毒的物质——苯乙酸,用苯乙酸接种松苗,导致松苗萎蔫,因而提出松材线虫的伴生细菌是松树萎蔫病的真正病原。而实验研究表明,松材线虫和细菌共同的作用才能导致松树的萎蔫。郭道森等(2001)研究发现,用无菌线虫或线虫上分离的细菌单独接种黑松愈伤组织,仅表现为轻微褐变,而用两者混合接种,则黑松愈伤组织严重褐变、萎缩,表现出高度感病,说明松材线虫与细菌共同作用,导致松树萎蔫病的发生。谈家金和冯志金(2001)通过松材线虫及细菌对马尾松水培离体松枝的分别单独接种和混合接种试验,结果表明,单独接种不能使松枝萎蔫,只有两者混合接种才能使松枝发病枯死,从而说明,松材线虫的伴生细菌对松树萎蔫病的发生起着重要的作用。洪英娣等(2002)从松材线虫致死的松材木质部和松材线虫体表分离出 3 个出现频率较高的细菌菌株,经鉴定为荧光假单胞菌 I 型和 II 型(*Pseudomonas fluorescens*, biotype I, biotype II)及泛菌属 1 种(*Pantoea* sp.),用细菌培养液接种黑松愈伤组织,可使组织变褐。

第六节 生态学特性

一、松材线虫与寄主植物

(一) 寄主的种类及其抗感病性

松材线虫的寄主为针叶植物,主要为松属 *Pinus* 树种,少数为非松属树种,包括:冷杉属 *Abies*、*Chamaecyparis*、雪松属 *Cedrus*、落叶松属 *Larix*、云杉属 *Picea* 及黄杉属 *Pseudotsuga*。通过接种试验,松材线虫可寄生 58 种松属树种和 13 种非松属树种,在自然条件下感病的松属树种为 36 种,非松属树种为 8 种。

不同树种对松材线虫的抗性有显著差异。日本黑松、日本赤松、硫球松为极易感树种,我国的马尾松及欧洲赤松、欧洲黑松为感病树种,北美的针叶树种普遍抗性较强,美国的火炬松 *P. taeda*、湿地松 *P. elliotii*、短叶松 *P. echinata* 和刚松 *P. rigida* 为抗性树种。Burnes(1985)对加拿大的松材线虫株系进行了致病性鉴定,在 3 年树龄的班克松、日本赤松、多脂松、北美乔松 *P. strobes* 上注射接种 5000 条线虫/伤口,温室中 20℃ 条件下观察发病情况,班克松在 4 周内表现出症状,幼苗退绿,然后迅速萎蔫和死亡,在 6 周以后,日本赤松和红松有部分发病和死亡,白松为抗性树种,无死亡株。Yang 和 Wang(1989)研究了中国的本地松和外来松对松材线虫的易感性,用松材线虫中国株系对

2~5 年树龄的 15 种松树进行接种, 发现白皮松 *P. bungeana* 是高度易感树种, 云南松 *P. yunnanensis*、日本赤松、华山松 *P. armandii*、华南五针松 *P. kwangtungensis*、湿地松、红松 *P. koraiensis* 和日本黑松等 7 种是易感树种, 黄山松 *P. taiwanensis*、乔松 *P. griffithii*、粤松 *P. fenzeliana* 和樟子松 *P. sylvestris* var. *mongolica* 等 4 种是中度易感树种, 火炬松、马尾松和班克松是抗性树种。在日本、中国和韩国, 日本赤松和日本黑松是易感品种, 在台湾, 疏球松和日本黑松是易感品种, 在北美, 松材线虫主要为害外来树种, 尤其是欧洲赤松受害最重。线虫的发育和树木的死亡大部分取决于夏季温度和树木的易感性 (OEPP, 2001)。

Ikeda 等(1980)报道, 在受松材线虫感染时, 松树产生乙醇和其他挥发性化合物, 当油性树脂分泌停止 10d 后达到最高峰, 与线虫在侵染 2 周后开始爆发繁殖的时间相似, 认为这些化合物可能刺激线虫的繁殖行为。Shuto 和 Watanabe(1988)报道, *n* 链烷醇, 如乙醇、己醇和辛醇, 对松材线虫的产卵有刺激作用。

(二) 寄主的抗性生理

在植物体内具有相当高而足以起着抗病作用的化学物质。主要有酚类化合物、木质素、不饱和内酯、有机硫化合物、皂角类物质和细胞壁水解酶几大类, 松树中萜类物质与抗松材线虫病的关系一直受到人们的关注。植物的抗性可能与其萜类化合物的含量有关。有研究表明, 马尾松树干的长叶烯、 α -古巴烯和去氢枞酸的含量与其抗性呈负相关, 而 β -蒎烯、单萜和枞酸型树脂酸的含量与其抗性呈正相关。Ishikawa 等(1987)报道, β -月桂烯与寄主植物对松材线虫的易感性有关, 通过对 1 年树龄的松树枝的测定表明, 抗性树种的 β -月桂烯含量很少, 而易感性树种的 β -月桂烯含量较高, 通过对松树种间、种内及树龄间的比较, 认为 β -月桂烯的含量可以作为日本赤松和日本黑松抗性筛选的指示剂。徐福元等(1994)报道松树的萜类化合物、树龄和感病性之间的关系, 认为马尾松的树龄、感病性与 α -古巴烯和长叶烯之存在正相关性, 而与 β -蒎烯含量呈负相关性。赵振东等(2001)对不同抗性的马尾松的化学成分研究发现, 尽管在高抗、中抗和敏感种源的马尾松体内中性萜类化合物的组成类似, 但化合物的含量差异明显, 高抗种源比中抗和敏感种源含有更多的长叶烯(高达 32.4%)、长叶蒎烯、雪松烯、山达海松二烯和 α -松油醇, 而含有较少的 α -蒎烯、 β -蒎烯、 β -水芹烯、反式石竹烯、 β -芹子烯和山达海松醛。而且, 长叶烯和反式石竹烯可作为马尾松种源抗松材线虫病的特征化合物, 长叶烯含量越高, 与反式石竹烯含量的差别越大, 马尾松种源的抗松材线虫病的能力越强; 反之, 长叶烯含量越低, 且与反式石竹烯的含量越接近, 马尾松种源的抗病性弱。Suga 等(1993)研究发现, 在抗性树种马尾松、刚松、长叶松中存在有对松材线虫起作用的驱虫物质和杀线虫物质, 马尾松木质部中含有驱虫物质 α -humulene 和 2 种杀线虫物质, 即 pinosylvin monomethylether (PSM) 和 (-)-nortrachelogenin, 树皮中含有两种杀线虫物质, 即 methyl ferulate 和 (+)-pinosinol, PSM 表现杀线虫活性最高, 在刚松木质部和长叶松木质部和树皮中均存在, 松树对松材线虫的抗性与这些内源防御物质有关。

氨基酸的含量在一些抗病的林木或非感病期的植株中常表现出较低的水平。徐福元等报道, 9 种氨基酸(组氨酸、苏氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、胱氨酸、甲硫氨酸、亮氨酸、

酪氨酸、精氨酸)含量低的马尾松种源抗松材线虫病。

线虫侵染后,寄主的某些异常代谢产物同样具有杀线虫活力或抑制线虫活力的特性。Bolla 等(1989)报道,健康樟子松体内的松香酸不具杀线虫活力,而在感病后产生较多的脱氢松香酸却有杀线虫活性。Yamada 和 Ito(1993)报道抗病的北美乔松接种线虫后,接种的枝条就会产生抑制线虫活力的物质,其中含有赤松素、生松素等成分(谈家金等,2001)。Hanawa 等(2001)从感染松材线虫的北美乔松的表皮中分离出一种 stilbenoid, 3-o-methyl-di-hydropinosylvin, 为杀真菌物质,证明具有杀线虫作用。

研究表明,抗性树种北美乔松和火炬松接种强致病性的松材线虫后,可产生伤口周皮构造(wound periderm formation)和层皮树脂道闭塞(Yamada and Ito, 1993);感病树种日本黑松在接种弱致病性的松材线虫后,也可诱导产生伤口周皮构造和层皮树脂道闭塞,而在接种强致病性线虫株系后,则不能诱导产生(Ishida *et al.*, 1993; Kiyohara, 1996)。Ichihara 等(2000)通过研究在黑松皮层中与松材线虫早期入侵有关的皮层树脂道的分布与周皮形成,结果表明,线虫的侵入在茎中受到限制,周皮关闭皮层树脂道,线虫早期入侵也限制在已形成伤口周皮的茎中。通过注射线虫诱导在表皮组织中围绕注射组织产生伤口周皮,周皮可能起阻碍线虫在皮层树脂道中穿移的作用,线虫穿移被伤口周皮中断,可能是松树抵抗后入侵线虫的一个因素。线虫在自然条件下通过松墨天牛成虫取食侵染健康松树,当天牛取食到达木质部时,线虫能直接进入木质部树脂道,并向下迁移到树干,而不受周皮的阻碍。当线虫进入皮层树脂道时,它们受周皮的阻碍,线虫不能从皮层树脂道直接进入放射状树脂道(radial resin canals),因为放射状树脂道末端不与皮层树脂道相连。然而,线虫也可能破坏周围组织,入侵皮层组织,能突破放射状树脂道的末端,入侵木质部树脂道和树干。

诱导抗性是树木的一种主动抗性。Kiyohara(1981)研究发现用致病性很弱的松材线虫株系预先接种黑松幼苗后,可诱导植株对后接种的致病性强的松材线虫株系的抗性。此后,在此领域开展了一系列的研究工作。这种诱导抗性在自然条件下在成年松树中也能表达(Kosaka *et al.*, 2001)。但如何使弱致病性株系产生的系统诱导抗性具有稳定性和持久性,是一个尚需探讨的问题。使用高浓度的弱致病株系接种和多次接种产生的诱导抗性可能效果更好。Kosaka(2001)对此领域的研究进行了全面综述。葛明宏等(1999)研究发现吲哚丁酸、乙烯和铵可诱导马尾松较高的抗病性,其诱抗效果可达 60%~100%。因此,诱导抗性被认为是松材线虫病防治的一种具有前途的方法。

二、松材线虫与媒介昆虫

(一) 媒介昆虫种类

松材线虫的媒介昆虫为墨天牛属昆虫(*Monochamus* spp.)。墨天牛的幼虫是木材的重要害虫,以危害针叶树为主,在日本、中国和台湾,松墨天牛 *M. alternatus* 是最重要的传病媒介,云杉花墨天牛 *M. saltuarius*、*M. nitens* 和云杉小墨天牛 *M. sutor* 也被认为是传病媒介(Kobayashi *et al.*, 1984)。在韩国,松材线虫仅通过松墨天牛传播。在美国,卡罗来纳墨天牛 *M. carolinensis*、白点墨天牛 *M. scutellatus*、南美松墨天牛 *M. titillator*、*M. muraror* LeConte、冷杉墨天牛 *M. scutellatus oregonensis* 和褐点墨天牛 *M. notatus* 可传播

松材线虫。在加拿大,有 14 种潜在的昆虫介体可传播松材线虫,其中包括 6 种天牛:卡罗来纳墨天牛、香枞墨天牛 *M. marmorator*、*M. mutator*、钝角墨天牛 *M. obtusus*、白点墨天牛和南美松墨天牛。在墨西哥,褐点墨天牛、*M. rubiginus* Bates 为松材线虫的传播介体(Dwinell and Nickle,1989)。在葡萄牙,松材线虫由高卢墨天牛 *M. galloprovincialis* 传播(Sousa *et al.*, 2001)。据报道,天牛科有 21 种、象甲科 2 种、吉丁虫科 1 属的昆虫可携带松材线虫(见表 28-2)。

表 28-2 松材线虫的媒介昆虫

种名	学名	分布
松墨天牛	<i>Monochamus alternatus</i> Hope	中国(安徽、福建、广东、广西、贵州、海南、河南、香港、湖北、湖南、江苏、江西、山东、四川、新疆、云南、浙江、台湾);日本(北海道、本州岛、九州岛、硫球群岛、四国岛);韩国;老挝;越南
卡罗来纳墨天牛	<i>Monochamus carolinensis</i> (Olivier)	加拿大(New Brunswick, Ontario, Quebec); 墨西哥; 美国(Alabama, Arkansas, Florida, Georgia, Illinois, Indiana, Kansas, Kentucky, Louisiana, Maine, Massachusetts, Michigan, Minnesota, Mississippi, Missouri, New Jersey, New York, North Carolina, Ohio, Oklahoma, Pennsylvania, South Carolina, Tennessee, Texas, Virginia, Wisconsin)
高卢墨天牛	<i>Monochamus galloprovincialis</i>	葡萄牙
香枞墨天牛	<i>Monochamus marmorator</i>	加拿大(Manitoba, New Brunswick, Nova Scotia, Ontario, Quebec); 美国(Connecticut, Delaware, Illinois, Indiana, Maine, Maryland, Massachusetts, Michigan, Minnesota, New Jersey, New York, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, Rhode Island, Vermont, Virginia, Wisconsin)
可变墨天牛	<i>Monochamus mutator</i> LeConte	加拿大(Manitoba, New Brunswick, Northwest Territories, Ontario, Quebec, Saskatchewan); 美国(Minnesota)
闪光墨天牛	<i>Monochamus nitens</i> Bates	日本
褐点墨天牛	<i>Monochamus notatus</i> Drury	墨西哥、美国
钝角墨天牛	<i>Monochamus obtusus</i> Casey	加拿大(British Columbia)美国(California, Idaho, Oregon, Washington)
锈红墨天牛	<i>Monochamus rubiginus</i> Bates	墨西哥
云杉花墨天牛	<i>Monochamus saltuarius</i> Gebler	中国(黑龙江)、日本、奥地利、德国、意大利、立陶宛、波兰、俄罗斯、瑞士、乌克兰
白点墨天牛	<i>Monochamus scutellatus</i> Say	加拿大、美国
冷杉墨天牛	<i>Monochamus scutellatus oregonensis</i> (LeConte)	美国
云杉小墨天牛	<i>Monochamus sutor</i>	中国、日本

种名	学名	分布
南美松墨天牛	<i>Monochamus titillator</i> Fabricus	加拿大(Ontario); 美国(Alabama, Arkansas, Connecticut, Delaware, Florida, Georgia, Illinois, Indiana, Iowa, Kentucky, Louisiana, Maine, Maryland, Massachusetts, Michigan, Mississippi, New Hampshire, New Jersey, New York, North Carolina, North Dakota, Ohio, Pennsylvania, Rhode Island, South Carolina, Tennessee, Texas, Vermont, Virginia, West Virginia, Wisconsin)
锦天牛	<i>Acalolepta fraudatrix</i>	日本
二斑色天牛	<i>Uraecha bimaculata</i>	日本
褐幽天牛	<i>Arhopalus rusticus</i>	日本、美国
梗天牛	<i>Arhopalus rusticusobsoletus</i>	美国
小灰长角天牛	<i>Acanthocinus griseus</i>	日本
台湾长角天牛	<i>Acanthocinus gundaiensis</i>	中国
长角天牛	<i>Acanthocinus clavipes</i>	日本
脊鞘幽天牛	<i>Asemum striatum</i>	美国
椎天牛	<i>Spondylis buprestoides</i>	日本
松纵坑切梢小蠹	<i>Blastophagus piniperda</i>	中国
黄星桑天牛	<i>Psacotha hilaris</i>	日本
根颈象	<i>Hylobitelus baroldi</i>	日本
苍白根颈象	<i>Hylobius pales</i>	美国
北方木蠹象	<i>Pissodes approximatus</i>	美国
角颈象	<i>Shirahosshizo</i> spp.	日本
叩头虫	<i>Paracalais berus</i>	日本
日本大谷盗	<i>Trogossia japonica</i>	日本
接眼吉丁虫	<i>Carysbothris</i> spp.	美国
黑翅土白蚁	<i>Odontotermes formosanus</i>	中国

虽然亚洲、欧洲和北美的墨天牛在地理分布、寄主植物、产卵场所的选择、龄期数及生活史长短方面有不同,但生物学习性大体相似。成虫天牛在活的植株及带皮的原木上产卵,幼虫在植株体内发育。首先,雌虫咬一个洞,将卵产入其中,幼虫 1~2 个月在形成层取食,使整个树皮松弛,然后幼虫钻蛀新增的木质部(sapwood),形成一个卵圆形的通道孔,隧道通常为“U”形,蛹室位于外皮层下的新增木质部。松材线虫持久型幼虫(dauer larvae)通过天牛胸部气门侵入刚羽化的墨天牛成虫体内(callow adult),并以休眠状态保持在气管中。Konda(1986)通过电镜扫描观察发现,80%的线虫在天牛的胸部气管中,其余的在腹部及其他部位的气管中。线虫在气管中大部分都同向排列,少数反向排列。天牛羽化后,移动到合适的寄主上取食嫩枝的树皮,约 14~20 天雌虫达到性成熟。

线虫分散型幼虫从天牛的气门逸出,通过天牛取食和产卵造成的伤口进入寄主植物体内。线虫一旦进入易感的寄主植物体内,就蜕皮变为成虫,迅速繁殖,并在整个植株内穿移,取食形成层组织及树脂道的薄壁组织细胞。这样,受松材线虫侵染的树木就表现出萎蔫症状和迅速死亡。这种情况下,松材线虫作为一个初次病原物导致松树的萎蔫病。

(二) 松材线虫与墨天牛的化学联系

松材线虫进入和逸出天牛气管必须适时,并与天牛的生物学过程相偶联。对此有人提出假说:如果线虫进入气管太早,将导致线虫在天牛蛹蜕皮变为成虫时随表皮内层脱落;而如果进入气管太晚,将错过天牛成虫,线虫被限制在质量下降的食物资源上。如果线虫从甲虫气管逸出太早,可能导致线虫进入能够产生防御反应的健康松树体内;而如果逸出太晚,将导致线虫在甲虫气管内遇到干燥的危险,而且使甲虫遇到更多的危险,导致甲虫死亡(Stamps and Linit, 2001)。通常在天牛成虫羽化的第1周,线虫逸出很少,而第2~3周线虫逸出达到高峰期,然后下降(Kobayashi *et al.*,1984)。松材线虫的第四龄分散型幼虫(J_{IV})从天牛气管逸出可能受外部和内部因素的影响。研究报道,非取食的第四龄分散型幼虫(J_{IV})的主要食物储存物是中性储存类脂(neutral storage lipid, NS lipid)和糖原(Konda and Ishibashi, 1978)。中性储存类脂与线虫从介体中逸出密切相关,在天牛羽化后的前4周,保存在天牛气管内的第四龄分散型幼虫(J_{IV})的中性储存类脂明显高于从天牛气管逸出的第四龄分散型幼虫(J_{IV}),表明在线虫的逸出过程中,消耗了中性储存类脂(Stamps and Linit,1988)。研究表明,线虫进入和涌出天牛气管,受化学信号物质的调控,Kobayashi等(1984)认为,化学信号物质如 β -月桂烯很可能存在于此过程中。一些研究者已鉴定出存在于松树、天牛蛹室和天牛中的对松材线虫有很强引诱性的化学物质,其中 β -月桂烯和 α -蒎烯是存在于松树中的作用最强的挥发性单萜类,前者在线虫从天牛转移到松树上及线虫在松树内的穿移过程中起重要的作用,因为它对繁殖期和分散期的线虫都有很强的引诱作用(Ishikawa *et al.*,1986; Tominaga *et al.*,1984)。在脂肪酸及其衍生物中,亚油酸和一油酸是最有引诱性的,亚油酸是松树中最常见的一种脂肪酸,发现存在于天牛蛹室中,一油酸是油酸的糖原,是松树中常见的脂肪酸。甲苯是甲虫成虫戊烷洗脱下的碳氢化合物,对繁殖型和分散型线虫都有引诱作用(Shuto and Watanabe,1987)。Stamps和Linit(2001)通过对第四龄分散型幼虫(J_{IV})对以上几种化合物的趋化性研究发现,当扩散型幼虫在低中性储存类脂区域时,对松树挥发性物质 β -月桂烯的反应特别强烈,而当幼虫在高的中性储存类脂区域,对天牛的碳氢化合物甲苯的反应特别强烈,因此推测,当线虫中性储存类脂含量最低时,受松树挥发性物质 β -月桂烯的诱导,线虫从天牛气管逸出,并从天牛造成的伤口进入松树植株体内;而当线虫中性储存类脂含量最高时,受天牛表皮的碳氢化合物甲苯的诱导,线虫继续保持在天牛气管内。中性储存类脂可能是作用于线虫行为的一个或多个未知的内在因素的共同相关化合物。研究结果说明,内在因素在调控线虫对外部信号反应中起重要的作用,而 β -月桂烯则是线虫从媒介昆虫体内逸出的化学信号物质。Stamps和Linit(2001)提出了一个线虫逸出的滚动杠杆模型(rolling fulcrum model)(如图28-11)。在此模型中,内在因素如中性储存类脂作用于滚动杠杆,改变线虫对外部兴奋和抑制刺激的反应。高的中性储存类脂引起杠杆向左边移动,使决策杠杆更难以趋向于在开始逸出行为方面的投资,结果使线虫对 β -月桂烯产生较少

的反应，而对逸出抑制信号物如甲苯或 CO₂ 产生更多的反应；当中性储存类脂减少时，滚动杠杆向右边移动，允许外部兴奋物如 β-月桂烯输入，更容易将杠杆推向逸出投资，这样，导致线虫第四龄幼虫从甲虫体内逸出。在中性储存类脂极度低时，杠杆迅速向右移动掉入逸出投资箱，这时不需要任何外来信号刺激。而关于线虫进入天牛气管的化学控调机制尚需进一步研究。

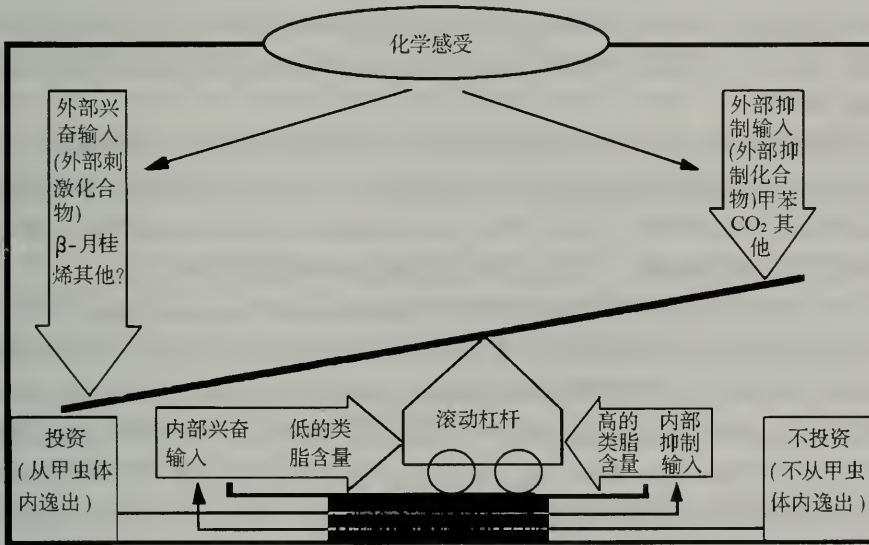


图 28-11 滚动杠杆模型(引自 Stamps and Linit, 2001)

(三) 松材线虫与墨天牛的种群数量动态

Yoshimura 等(1999)基于松墨天牛的种群动态和松材线虫病的发生的详细数据，提出一个描述松树和携带线虫的松墨天牛的密度，介体相互作用的数学模型的主要结果是：①有一个最小的松树密度，低于这个密度，病害入侵失败，然而，即使松树密度超过这个密度，当松墨天牛密度很低时，由于 Allee 效应，病害无法入侵；②最小松树密度随着消除速率的增加而不成比例地增加；③健康树逃脱侵染的可能性随着松树初始密度或松墨天牛初始密度的增加而迅速下降。Takasu 等(2000)用一维积分方程(integro-difference equation in a one-dimensional space)构建了松树和媒介天牛的种群动态模型，模型的结果表明：①Allee 效应作用于甲虫的繁殖，一旦甲虫密度低于一定的阈值时，线虫不能入侵松林；②甲虫的扩散距离的分布严格影响病害的扩散速度，当作长距离迁飞的甲虫从零增加时，扩散范围迅速加快；③然而太频繁的长范围扩散，会导致由于 Allee 效应线虫入侵失败，提出正确评估昆虫运动对预测线虫范围扩散的速度的重要性；④当根除速度增加，范围扩散速度首先逐渐下降，当根除速度达到一定值后，病害扩散速度突然下降到零。

三、松材线虫与真菌微生物

松材线虫与同属其他种类一样,能营菌食性的生活方式。当天牛在死亡的或将死的松树或砍伐的带皮原木上产卵时,此时树木受其他钻蛀性害虫如小蠹的为害,并伴随有蓝变真菌的生长,当松材线虫随着天牛产卵被传播到这种树木上时,就能进入树木体内并以这些蓝变真菌为食。与松材线虫有关的主要真菌有:长喙壳菌(*Ceratocystis* spp.)、镰刀菌(*Fusarium* spp.)、*Verticicladiella* spp.、大茎点属(*Macrophoma* spp.)、*Pestalotiopsis* spp.、*Phomopsis* spp.、色二孢属(*Diplodia* spp.)、*Ophiostoma* spp.等(Maehara and Futai 2000, Fukudhige, 1991)。

用灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)培养松材线虫,繁殖特别迅速,推测葡萄孢含有一种松材线虫的生长因子或类似激素的物质。Matsumori 等(1989)从灰葡萄孢菌中提取出类似激素的化学物质,3-辛醇和1-辛烯-3-醇,它们表现出的对松材线虫的引诱、蜕皮和繁殖活动的作用与 β -月桂烯相似,它们在松材线虫的生长中起重要的作用。

另一类与松材线虫有关的真菌是食线虫真菌(nematode-trapping fungi), Mamiya and Tamura(1976)报道了日本的食线虫真菌(*Dactylella leptospora*)存在于天牛蛹室中。Wingfield (1987)报道了美国的2种食线虫真菌(*Arthrobotrys cladodes* Drechsler、*Arthrobotrys superba* Corda)存在于天牛蛹室和松材线虫体上。莫明和等(2002)对捕食线虫的节丛孢属丝孢菌 *Arthrobotrys* 捕食松材线虫和拟松材线虫的能力进行了测定,发现不同种类及同种不同株系对线虫的捕食能力存在明显的差异。Liou 等(1999)从台湾的松材线虫体上分离出一种新的食线虫菌(*Esteya vermicola*),对松材线虫有很高的侵染性。这些捕食线虫菌为松材线虫的生防带来了希望。

四、松材线虫与细菌微生物

研究发现,松材线虫常伴生有细菌存在。Kusunoki(1987)用电子显微镜观察松材线虫病的感病组织时,发现受到破坏的树脂道内和薄壁组织细胞间有大量的细菌存在。Kawazu 等(1996)研究发现,松材线虫伴生的细菌在含动物营养液 NB 的培养基上生长,比在马铃薯蔗糖(PSM)培养基上生长,更适宜于毒素苯乙酸(PA)的产生。推测死亡的线虫在马铃薯蔗糖培养基中提供细菌产生苯乙酸的营养,在致病性强的线虫株系中比致病性弱的线虫株系中产生更多的苯乙酸。认为伴生细菌苯乙酸的产生能支配线虫的致病性。Kawazu 等(1998)从松材线虫体表分离到3种芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)。赵光博于2000年发现松材线虫体表外附着有大量的细菌。洪英娣等(2002)也从松材线虫体表及病树木质部组织中分离到2种假单胞菌(*Pseudomonas* spp.)和1种泛菌(*Pantoea* spp.)。研究报告,细菌与松材线虫共同作用,导致松树的萎蔫。

第七节 风险分析与早期预警系统

松材线虫的风险分析是指对其可能在某一区域传入、发生和危害的风险性进行定性和定量评估的系统,包括风险的可接受程度、传播途径的类型、传入途径控制措施的有效性和对措施进行评价。松材线虫是我国禁止入境的重要植物检疫对象,虽然目前它还

只在中国一些省份的局部地区发生，但在中国还是具有更广泛定殖的可能性和定殖后扩散的可能性，对我国的经济影响极大。并且随着我国加入世贸，松材线虫由境外反复进入我国的可能性越来越大。为此，我国政府对松材线虫病进行了风险性分析，以下介绍分析的主要内容。

一、风险性评估

根据松材线虫在北美和日本的广泛分布和国内区域性分布特点，松材线虫在我国符合检疫性有害生物的地理和管理标准。通过对松材线虫和寄主树种在我国的分布、松材线虫在中国的适生性、松材线虫的抗逆性和适应性分析，中国广泛存在着大量感病的松树树种，适宜松材线虫定殖，并依据日本松材线虫病发生环境推测，中国年平均温度在10℃的地区应为松材线虫的适生区，我国的北京、天津、河北、山西、上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、湖南、广东、广西、海南、四川、贵州、云南、陕西、台湾、香港均是松材线虫的适生区，辽宁、甘肃、西藏、新疆的部分地区也适合松材线虫的发生。中国大多数地区的气候条件适合松材线虫的生长，中国又存在松材线虫疫病区，病害在局部地区能流行性暴发，说明中国的气候适合松材线虫病的发生和流行。分析还认为松材线虫具有迅速适应新地理环境的能力，能逐渐增强对抗性树种的适应性，最终使抗性树种失去抗病性。松材线虫进入日本和中国，以及逐渐适应我国原本具有抗性的马尾松就是实例。

分析进一步认为由于松材线虫在我国存在适合自然传播的生物特性阶段，即有扩散性3、4龄幼虫以及有效的传播媒介，所以松材线虫病可以在我国蔓延和扩散。在亚洲，松材线虫自然传播多由媒介天牛传播，在补充营养时从伤口侵入到松树体内。在北美，松材线虫通过天牛在衰弱的松树产卵时选成的伤口侵入到松树体内。虽然松材线虫自然传播受天牛活动范围的限制，松墨天牛在林间自然飞翔和传播松材线虫病的距离仅不足200m，报道最远的极端飞行距离为3.3km，因此，松材线虫病的自然扩散相对距离是有限的。但是，松材线虫可借助罹病的松材、松树苗木和罹病松材制作的木质包装材料、木制品等的运输作为远距离扩散传入到一个新的地区。由于交通便利，人为的病材外流控制有一定的难度，使得该线虫病不断向外扩展。此外，松树病材中羽化出来的传媒天牛，偶尔可能爬到通过林区的运输工具如火车、汽车上，被运输带到很远的地方，从而将病害传播扩散开来。松材线虫的这些传播特点，加上松材线虫的两种传播媒介天牛松墨天牛和云杉花墨天牛在我国基本全境存在，为广泛高效传播松材线虫提供了极有利的条件。另外，中国分布的其他墨天牛也可能是松材线虫潜在的传媒体，并且中国缺乏松材线虫天敌，从而使松材线虫病在中国失控而流行猖獗。

此外，松材线虫已给我国造成了十分重大的经济损失。除此之外，它还严重威胁着中国的林业资源和造林绿化事业、总价值数以千亿元计的中国最大松树林业森林资源，以及这些森林资源在调节气候、防风固沙、抵御各种自然灾害、保障农业稳产高产方面的生态价值；影响我国林木加工业和相关产品出口创汇；以及威胁着中国众多的名胜古迹和风景旅游区资源和城市绿化景观生态。松材线虫病的这些潜在的经济重要性更是无法估量。

分析认为，目前的松材线虫的入境可能主要是随货物木质包装材料传入中国。

二、风险管理

依据松材线虫病传入的可能、途径和潜在的经济影响,并根据世界贸易组织的《食品卫生检验及动植物检疫措施协定》(简称SPS协定)对贸易影响最小的原则,我国选择了一种既能有效防止松材线虫传入,又能对贸易的影响降低到最小程度的植物检疫措施,即美国和日本用针叶树制作的输华木质包装材料必须经过中方认可的热处理。技术要求是木材中心温度达到56℃以上,持续处理30min。该风险管理措施可将松材线虫随美、日输华货物木质包装材料传入中国的风险降低到我国可接受的水平,同时可操作性强,易于实施。另外还提出了4种降低风险管理措施的备选方案。这4种备选方案是:备选方案1——禁止美国和日本所有的木质包装材料输华;备选方案2——禁止美国和日本针叶树制作的木质包装材料输华;备选方案3——化学药剂熏蒸处理;备选方案4——美国和日本用针叶树制作的输华木质包装材料必须经过指定的热处理。

总之,林业上特大的毁灭性病害—松材线虫起源于北美大陆,在美国、日本广泛分布。20世纪80年代初松材线虫可能是随输华货物的木质包装材料传入我国,中国随之采取了严格的官方控制措施,将松材线虫限制在我国局部地区,所以松材线虫符合检疫性有害生物的地理和管理标准。由于中国存在大面积松材线虫感病松树、广泛分布高效的传媒天牛、气候条件适合松材线虫的流行发生、难觅松材线虫的自然天敌,所以该线虫可以在中国定殖、扩散。松材线虫可随美、日输华货物的木质包装材料进入中国,并被传播到松树上,所以松材线虫传入的风险极高。若松材线虫仍不断随美国和日本输华货物的木质包装材料传入中国,将对中国的林业生产造成毁灭性的打击,对中国的环境、旅游资源的影响也是灾难性的,并使中国所采取的严格的官方控制措施前功尽弃。基于上述评估,认为美国和日本用针叶树制作的输华木质包装材料必须经过指定的热处理,是可供选择降低风险管理措施的最佳方案。风险管理措施可极大地降低松材线虫随美、日输华货物木质包装材料携带危险性病害松材线虫反复进入我国的可能,是我国及早控制、压缩和扑灭松材线虫病的非常重要的检疫措施。

第八节 综合治理策略与技术

松材线虫病的发生、发展是一个人为因素影响,综合松材线虫、媒介天牛、寄主松树互作的复杂病害系统,对感病松树林具有毁灭性的破坏。国内外均将此病原被列为重点(A类)植物检疫对象。我国大陆自1982年首次发现松材线虫病以来,虽然在松材线虫病的控制和治理上取得了一些进展,但现疫情仍已扩散至江苏、安徽、浙江、山东、广东、湖北、上海、重庆等9个省(地、市)的数十个县(区),发生总面积达7.3万公顷,累计枯死松树2000多万株,对我国生态环境建设和经济社会发展造成很大影响。为坚决遏制其蔓延扩散,我国提出了逐步实现“控制、压缩、扑灭”松材线虫病的目标。松材线虫病远距离的蔓延、扩散,都是人为活动将松材线虫注入到无抵御能力的感病寄主生态中去的结果,松材线虫一旦定殖成功,就形成了新疫点,并由传播天牛不断地将疫点范围扩大。因此,松材线虫病的防治可以相对地分为病害传播扩散的控制和病害流行蔓延的治理。控制是针对防止、压缩人为因素和传播天牛扩散病害而言的,治理是针对已有疫区

中压缩、扑灭松材线虫和传播天牛为害而言的。现主要从以下几个方面进行灾害控制策略和技术的阐述。

一、以病原为出发点的控制策略和技术

松材线虫是松材线虫病发生的主导因子，清除病原、减低侵染来源和数量以及抑制松材线虫活性，对降低疫情和治理疫病能起到积极的关键性作用。在新老疫区(点)清理病死树和进行病木除害处理是必需的。

(一) 清理病死树

每年春天病害感染发生前，对老疫点的重病区感病松树进行一次性全面的皆伐，彻底清除感染发病对象。对较轻区域采用全面清理病死树的措施，减少病原，防止病害临近扩散蔓延，逐步全面清理中心发生区的病死树，压缩受害面积，控制灾害的发生程度。对新发生疫点和孤立疫点实施皆伐；并通过采用“流胶法”早期诊断 1km 范围内的松林，对具有出现流胶异常的树及时拔除。

实施清理病死树时，伐桩高度应低于 5cm，并做到除治迹地的卫生清洁，不残留直径大于 1cm 松枝，以防残留侵染源。处置死树和活树时，应分别进行除害处理。

(二) 病木除害处理

砍伐后病死树应就地将直径 1cm 以上的枝条、树干和伐根砍成段，分装熏蒸袋用 $20\text{g}/\text{m}^3$ 磷化铝密封熏蒸处理，搁置原地至传媒天牛羽化期结束。滞留林间的病枝材，亦可采用此法。对清理下山的病枝、根桩等可集中后，在指定地点及时烧毁。伐下的病材在集中指定地点采用药物熏蒸、加热处理、变性处理、切片处理等。药物熏蒸要求选择平坦地，集中堆放，堆垛覆盖熏蒸帐幕，帐幕边角沿堆垛周围深埋压土。药物用硫酰氟、溴甲烷或磷化铝，用量标准分别为 $50\text{g}/\text{m}^3$ ， 20°C ，24~48h 或 $20\text{g}/\text{m}^3$ ， 20°C ，72h 以上。熏蒸处理结果要求木材中松墨天牛和松材线虫死亡率达到 100%，否则再重复进行处理。加热处理要求病材在 60°C 以上的温度中持续 2~3h，直至将病原和天牛杀死为止。研究表明在“m”形火道炕房处理松材线虫病木，炕温不低于 50°C 时处理 2h 以上，可以干净彻底地杀死病木内的松材线虫和松墨天牛幼虫，两者的死亡率均可达 100%。另外的研究表明，不同规格的松材线虫罹病材经 $65\sim 75^\circ\text{C}$ ，15h 热烘，9MPa 或 $157\sim 168^\circ\text{C}$ ，10min 液压和两种方法联合处理对松材线虫和松墨天牛都有较好的杀虫效果，其中 2.8cm 以下板材和 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 以下材料经 3 种方法处理后，杀虫效果均达 100%。病材变性处理为胶合板、纤维板、刨花板、制浆、烧碳等，或切成厚度小于 1cm 的碎片，也能有效地消灭松墨天牛和(或)松材线虫，达到除害的要求。

病死树的伐根应套上塑料薄膜覆土，或用磷化铝(1~2 粒)进行熏蒸处理，或用杀线剂虫线清等进行喷淋处理，也可采取连根刨除，再用前述方法除害。

(三) 治疗病树

寻找高效内吸性杀线剂及其经济、简便的使用技术，也是目前寻找治理松材线虫的有效途径之一。最近的研究表明有很多的生物源物质对松材线虫表现出非常强的生物活

性,如含有仲胺型氮原子的苦豆碱和含叔胺型氮原子的脱氢苦豆碱具有强烈的杀线活性,而且后者比前者更强。将 2%阿维菌素乳油按木材体积为 400~600ml/m³ (60~90ml/株)的剂量,注入树干防治日本黑松和马尾松上的松材线虫,持效期可达两年,并且大剂量用药(210ml/株)对黑松生长无影响,药剂注入树体内对环境无污染。Alen 等(2000)从热带雨林的 21 个科 63 种植物中提取和分析了抑制松材线虫的物质,结果来自于 *Bischofia javanica*、*Knema hookeriana* 和 *Areca catechu* 这 3 种植物的提取物,在非常低的有效浓度下[0.7mg/cotton ball (mg/bl.)]表现出强烈的活性。并从 *K. hookeriana* 分离提纯到了对松材线虫更具强烈作用的有效成分,结构分析表明,化合物属于 3-undecylphenol 和 3-(8Z-tridecenyl)-phenol。日本最近还在研究发展水溶性虫线光,干部注射治疗松材线虫病时,20g/m³的剂量下,能有效地防止松材线虫侵染对 4 年生日本黑松造成的萎焉。

(四) 松材线虫天敌的利用

目前对于松材线虫天敌的研究工作还仅仅停留在种类调查和采集阶段。国外报道的松材线虫天敌包括 5 种真菌和 8 种捕食螨(表 28-3),这些天敌真菌和捕食螨均可以附着在松墨天牛体表,随松墨天牛传播。

表 28-3 目前已知的松材线虫天敌种类

种类	学名	作用方式
真菌	<i>Arthrobotrys</i> sp. 1	紧缩性环状捕捉
	<i>Arthrobotrys</i> sp. 2	黏着网状捕捉
	<i>Ductylaria polycephala</i>	黏着网状捕捉
	<i>Dactylella leptospora</i>	非紧缩性环状捕捉
	<i>Harposporium</i> sp.	孢子萌发侵入寄生
螨	<i>Dendrolaelaps unispinatus</i>	捕食
	<i>D. fukikoe</i>	捕食
	<i>Hypoaspis</i> sp.	捕食
	<i>Proctolaelaps hystrix</i>	捕食
	<i>Proctolaelaps</i> sp.	捕食
	<i>Lasioseius sugawarai</i>	捕食
	<i>Parholaspulus</i> sp.	捕食
	<i>Ameroseius matsudae</i>	捕食

二、以寄主为出发点的控制策略和技术

营造和构建由多重免疫和抗性树种组成的混交林可以将现有感病树种的风险进行稀释。如在松林适当种植梧桐、台湾相思、苦楝及细叶桉等提高松树抗性,对皆伐林地改种其他树种,使松材线虫的为害局部化和个体化,直至与所在森林环境建立起协调的适应性。

合理科学的营林措施能改善松树对松材线虫病的抵御能力，应当加强林业管理。利用寄主松树的抗性控制松材线虫病，是最终控制松材线虫病必需的基本策略和技术。目前植物抗性可以分为被动抗性和主动抗性两类。被动抗性靠植物预存或先天生成的因子起作用；主动抗性有非亲和抗性、侵染诱发的抗病性和诱导抗性。非亲和抗性发生在寄主植物抗病品种与病原物不亲和小种（菌株、菌系）之间，由抗病基因（*R*）对无毒基因（*avr*）互作决定；侵染诱发的抗病性表现在受病原物侵染时，植物能迅速和高强度地调动防卫反应，防卫反应的速度和程度足以抵御病原物的进一步发展；诱导抗性则是因为受病原物侵染后，植物防卫机制应答不及时或较弱，不足以抵御病原物的侵染，而当预先施加人为的刺激后，植物再遇相同激发子时就能获得不同程度的抵抗力。这几种抗性在松树与松材线虫的互作中都有体现。但在感病树种和个体上，树木的诱导抗性是一值得利用的特性。由于生物的任何可遗传的性状，都是由长期进化固定下来的，并在现阶段具有遗传稳定性的基因控制的，而其表达受外源所激活。在植物与病原物的关系中，这种激活因子主要来自于病原物。因此，植物在与微生物长期的协同进化过程中，能够保留可以决定对付所有病原物侵染的非寄主抗性、先天抗性和诱导抗性的遗传信息。所以，诱导抗性是树木生存进化的一个重要途径，也是树木和有害生物（昆虫和病原菌）协同进化的产物。而且，目前已知诱导抗性的发生在植物和病害种类上都广泛存在，并多数具有系统性特点。因此，利用松树的多种抗性，尤其是诱导抗性，是一值得探索利用的控制松材线虫病的途径。

通过现代生物技术和遗传育种方法培育抗松材线虫和松墨天牛的品种也是松材线虫可持续控制的有效手段，需要加强这方面的研究。

三、以媒介昆虫为出发点的控制策略和技术

传播媒介松墨天牛的防治是松材线虫病控制的中心环节。无论是老疫区范围的扩大，还是人为远距离的扩散，都是由松墨天牛进行初次侵染的。因此，对松墨天牛进行监测、控制和治理是病害防治的重中之重。

目前松墨天牛的主要防治措施和技术有：检疫、监测、清理和熏蒸病死木、飞机喷药、引诱剂、饵木诱杀、将病死木切片、锯板烘干、水浸、土埋、热水加温、林分更新改造、营造抗病树种以及生物防治，这些措施的良好实施对病害的控制能起到有效的防治作用。

（一）疫情监测

以松墨天牛为对象的疫情监测，主要是通过诱捕器进行。在林间设置松墨天牛引诱剂，能早期发现和检测松材线虫病。研究表明疫区林间引诱松墨天牛时，在没有松材线虫病的健康林地，分离不到松材线虫，而松材线虫病发生区引诱到的天牛 65% 都携带有松材线虫。具体方法是在松墨天牛羽化期（5~8 月），每个固定监测点设置一个诱捕器，放置点应设在山顶、林道旁等空气流通处。诱捕器下端应离地面 1.5m 左右。集虫器用锌铁皮塑料等加工，防止天牛成虫爬出逃逸。先在诱捕器诱芯内放入清洁棉花，再加入调配好的引诱剂 200ml，以后每隔 20d 往诱芯添加 140ml。每隔 1~2d（羽化后期可 5~7d）检查诱捕天牛情况，收集诱捕的天牛进行分离、镜检，检查是否携带松材线虫，一旦发现天

牛携带松材线虫，秋季采用“打孔流胶法”在诱捕点周围 1km^2 范围内进行早期诊断，抽取病树样品进行分离鉴定，确定疫情发生地点，分析疫情扩散蔓延情况。

(二) 松墨天牛的防治

1. 化学防治

在松墨天牛成虫补充营养期，进行化学防治。采用 12% 倍硫磷 150 倍液+4% 聚乙烯醇 10 倍液+2.5% 溴氰菊酯 2000 倍液林间喷雾，其防治效果十分显著，死树减退率可达 100%，取食疤痕减退率为 96.4%，有效期达 20d 左右，且成本较低。打孔注射方法，采用甲胺磷 1:3 (体积比)，9ml/株处理效果较好。9711 型聚乙烯醇可作为倍硫磷的助剂使用，它能使倍硫磷残效期延长至 28d。

在发生区分别于松墨天牛羽化初期、盛期进行防治。采用地面树干、冠部喷洒或飞机喷洒绿色威雷(触破式微胶囊剂)，750~1200m/hm² (300~400 倍液)，或其他内吸性好、下导性强的杀虫剂。触破式微胶囊在天牛成虫踩触时立即破裂，释放出的高效原药通过天牛节间膜进入天牛体内，进而杀死天牛。航空喷洒触破式微胶囊剂的研究结果表明，触破式微胶囊剂对松墨天牛击倒快(6h 内死亡率 100%)，持效期长达一个多月，喷雾后第 20d 松墨天牛的校正死亡率仍高达 80% 以上。每公顷喷洒 900ml 内含菊酯的触破式微胶囊悬浮液能使松材线虫病林地的松树枯死率比对照林地平均下降 38.8%，在松墨天牛成虫补充营养期间，采用灭幼脲 3 号微胶囊分别与安高杀 1 号微胶囊(拟除虫菊酯类)、安高杀 3 号微胶囊(除虫菊酯和有机磷复配)、安高杀 2 号微胶囊(有机磷类)、安高杀 4 号微胶囊(杂环类)等其他农药微胶囊混合喷雾，能有效地防治松墨天牛成虫。对有特殊意义的名松古树和需保护的松树，于松墨天牛羽化初期，在树干基部打孔注入虫线光 A(Enamectin 安息香酸盐液剂)400ml/m³ (估计立木材积)，或注入虫线清 1:1 乳剂 400ml/m³ 进行保护。

2. 诱杀

松墨天牛的成虫喜在新鲜伐倒木上产卵，通过此习性设置饵木诱杀松墨天牛效果也明显。用新鲜马尾松做诱木的研究表明，松墨天牛成虫产卵部位主要集中在饵木距基部 2~5m 处，平均每平方米诱木能诱集松墨天牛幼虫 0.58 条，最高 0.76 条，最低 0.44 条。诱木防治时，在除治区的山顶、山脊、林道旁或空气流通处，选择衰弱或较小的松树作为诱木，引诱传媒天牛集中在诱木上产卵，每 0.67hm² 设置 1 株(松墨天牛密度大的松林可适当增设诱木数量)，于松墨天牛羽化初期(5 月上旬)，在诱木基部离地面 30~40cm 处的 3 个方向侧面，用刀砍 3~4 刀(小树可少些)，刀口深入木质部约 1~2cm，刀口与树干大致成 30° 角，用注射器把引诱剂注入刀口内。诱木引诱剂使用浓度为 1:3 (1 份引诱剂原液用 3 倍清水稀释)，施药量(ml)大致与诱木树干基部直径(cm)树相当。也可设置集虫器，内盛清水或 3% 杀螟松乳剂。于每年秋季将诱木伐除并进行除害处理，杀死其中所诱天牛，减少天牛种群密度。M99-1 引诱剂连续 2 年的系统研究表明，在松墨天牛成虫期，每个诱捕器可诱捕 151.5 头天牛成虫，平均降低下代卵量 1204.4 粒。

3. 生物防治

国内外有关松墨天牛天敌研究和利用的报道相对较多，可以大致分为寄生性天敌、捕食性天敌以及天敌微生物。目前国内利用天敌防治松墨天牛研究工作主要集中在管氏肿腿蜂的研究利用方面。天敌的种类如下：

寄生性天敌：管氏肿腿蜂 *Scleroderma guani*、花绒坚甲 *Dastarcus longulus*、黑色枝跗瘦蜂 *Ibalia leucospoides*、姬蜂 *Icheumonoidae* sp.及金龟子小蜂等。

捕食性天敌：日本大谷盗 *Temnochila japonica*、蚊态郭公虫 *Thanasimus leivisi*、朽木坚甲 *Allecula fuliginosa*、赤背齿爪步甲 *Dolichus hallousis*、小步甲 *Carabidae* sp.、长阎魔虫 *Cylister lineicollis*、叩头虫 *Elateridae* sp.、蚂蚁、蜘蛛、蛇蛉和蠋螋以及捕食性鸟类等共6目14科33种。

天敌微生物：真菌有球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*、布氏白僵菌 *B. brongniartii*、卵孢白僵菌 *B. tenella*(有材料报道布氏和卵孢白僵菌为一种)、金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae*、粉质拟青霉菌(黄僵菌) *Isaria farinosa*、黄曲霉 *Aspergillus flavus*、轮枝霉菌(*Verticillium* spp.)和枝顶孢霉(*Acremorium* sp.)；细菌有黏质沙雷氏杆菌 *Serratia marcescens*；天牛的寄生线虫夜蛾斯氏线虫 *Steinernema feltiae* 等。

生物防治是环境协调性和可持续控制有害生物的调控措施，是害虫综合治理的中心环节之一。松墨天牛的寄生性天敌中，管氏肿腿蜂在林间防治试验中表现出较好的效果。研究表明管氏肿腿蜂在林间当代扩散半径达50m左右，寄生率平均为31.2%，3个月后蜂群在林间扩散半径达150m左右，寄生率提高到25.0%~46.1%，当年林间实际防效达74.3%~87.4%，下一年的持续防效达85.2%~95.7%。捕食性天敌中，花绒坚甲是墨天牛属蛹期的天敌，有时能引起较高的幼虫死亡率；啄木鸟对松林中的天牛种群密度控制作用不可低估。

病原微生物中，球孢白僵菌毒力是目前防治松墨天牛较有效的病原真菌。据报道松墨天牛的病原真菌中，以球孢白僵菌和布氏白僵菌为多，分别占37.8%、32.9%，金龟子绿僵菌和枝顶孢霉的出现频率较低，分别占15.9%、9.1%，布氏白僵菌和球孢白僵菌的室外应用试验，天牛幼虫的死亡率分别为51.1%、61.1%。细菌、昆虫病原线虫对松墨天牛也有较高的控制作用和应用前景。目前生物防治中最有效的因子可能是寄生线虫，据报道从法国引进的天牛寄生线虫夜蛾斯氏线虫能使病死木中松墨天牛的死亡率达到80%。另外一个值得实验研究的生物防治途径是通过肿腿蜂携带白僵菌的方法感染天牛幼虫，降低林间天牛数量，达到控制和减少病死树的目的。

另外，国内还正在探索研究对松墨天牛有作用的印楝提取物(azadirachtin)和松墨天牛驱避剂。印楝内含多种对昆虫有明显的拒食、阻食、驱避、杀灭效果和导致昆虫雄性不育、雌虫生殖力下降或不育的有效杀虫活性物质。国内用印楝提取物(含10%)饲喂桑天牛 *Apriona germari* (Hope)的研究结果表明，在印楝提取物剂量很低的条件下($4.0 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{mm}^2$)就会引起死亡，在亚致死剂量条件下，虽然雄虫仍能产卵，但产卵量大大减少，而且产出的卵孵化率也大为降低(赵博光等，2001；嵇保中等，1998)。因此，用印楝提取物防治以松墨天牛为主的媒介昆虫，也具有巨大的潜在防治效果。另外，应用植物源驱避剂防治和驱逐松墨天牛成虫，有利于最大限度地降低松林内松墨天牛种群密度，

减少和避免传播松材线虫的机会,从而达到控制松材线虫病的传播与蔓延的目的。

四、检疫

松材线虫病远距离的扩散与贸易往来密切相关。如何在经济贸易全球化的时代,保护我国森林生态不受外来入侵种的为害,是当前森林检疫面临的重要课题。从1998年8月至今,中国许多重要对外港口从美国和日本输华货物的木质包装材料中上百次地截获松材线虫,说明松材线虫极容易被人为传播。加强和提高国家对松材线虫的检疫技术是目前松材线虫病控制的当务之急。我国进境木包装松材线虫检疫,所采用的技术一般还是沿用植物线虫学的常规技术。王玉嫵等(2001)根据感染了松材线虫的病材产生代谢酸,使木材的酸度增加,其pH下降的现象,建立了利用溴酚兰在应施检疫木上的颜色反应进行快速检疫的方法,初步表明产地检疫的准确率可达85%,该项技术还在完善中。鉴于松材线虫分子生物学特征的研究进展,考虑和研制松材线虫的分子鉴定技术是可行的。总之,应该尽快地建立快速准确、简便易行、经济实用的检疫检验技术。

进口货物木质包装材料和疫点病材是人为传播松材线虫的载体。这些材料流向复杂,可被运输到货物到达的任何地方,同时,木质包装材料常在货物运送的目的地被拆卸后随意丢弃。一旦木质包装材料来自松材线虫疫区,则加大了松材线虫传入的风险。对此我国林业部门规定,松材线虫病检疫范围包括来自国内外疫情发生区的松属、雪松属、冷杉属、云杉属和落叶松属等植物的苗木、接穗、插条、盆景等生长繁殖材料;来自国内外疫情发生区的上述植物的木材、枝桠、根桩、木片以及它们的制品等;带有松材线虫及其传播媒介昆虫活体的货物、包装材料、铺垫材料及运输工具。各发生区由当地政府发布命令,明确规定禁止任何单位和个人擅自将松材线虫病发生区的松苗、松木、松材调出疫情发生区。发生区要对松属苗木繁育基地、贮木场和木材加工厂开展产地疫情调查,详细登记带疫情况,并下发除害处理通知书责令限期对疫情进行除害处理。同时根据产地检疫结果,对要求调运的松属苗木和繁殖材料、松木及其制品数量进行全面核实,严禁带疫苗木、木材及其加工产品进入市场流通。调运疫区的松材线虫寄主植物、繁殖材料、木材及其制品必实行检疫要求书制度,要事先征求调入地森检部门的意见,并按照调入地的检疫要求书内容,进行严格的现场检疫检验,确认未携带松材线虫病方可签发植物检疫证书,并及时通知调入地森检部门。实施检疫检查的抽样比例,苗木按一批货物总件数的5%进行抽样、木材按总件数的10%进行抽样。所抽样品的分离鉴定方法按“中华人民共和国林业标准—松材线虫病检疫技术(LY/T1123-93)”进行。森林植物检疫检查站(或木材检查站)要配备专职检疫人员,对过往的松材线虫病寄主植物及其产品实施严格的检疫检查,严禁未通过检疫的松苗、疫木及其制品调运。各地森检部门对来自发生区或来源不明的寄主植物及其产品要进行复检,发现带疫就地销毁;确认无松材线虫的繁殖材料要经过1年以上隔离试种,确认没携带松材线虫方可分散种植;对松木及其制品活包装材料要实施跟踪调查,严防疫情传入。要定期对本地区用材单位进行检疫检查,杜绝非法购买和使用疫情发生区松材及其制品的行动。

五、其他控制策略和技术

基于树体生化和导电率变异的感病活立木、病材早期诊断及快速检疫技术,基于传

统杂交和现代分子育种技术的抗病树种研究,以及基于全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、航空遥感技术(RS)的“3S”集成系统和地面引诱剂等信息素技术的松材线虫病疫情监测技术,可能为我国的松材线虫病的综合控制和治理,带来新的突破性有效防治和检疫技术。探明寄主松树在松材线虫病病程中的特异性致病和感病变化的分子、生化、生物物理指标,是早期诊断和快速检疫技术从根本上得以突破的关键,也是寻找抗性种质和利用基因工程进行抗病品种定向改造的基础。近些年我国在这些方面的研究或在起步或在加深。利用遥感工具航空摄像系统对松材线虫病发生区进行监测,可及时获取病害发生危害的情况,并可通过全球定位系统定位及时找到病害发生区。我国一些地方已进行了这方面的探索,并在十五研究中进行进一步的深入系统研究。通过相关研究建立以松材线虫为主要研究对象,综合应用“3S”技术,解决航天和航空遥感监测的关键技术,集成一套实用化、低成本多平台互补的监测系统,编织由航天航空遥感与地面复位组成的准实时立体监测网络,建立监测、检测、防治辅助决策支持系统,并最终取得应用示范工程的成功,为我国的森林病虫害监测、防治辅助决策提供实用化的手段,为全面控制森林病虫害奠定技术基础。

(谢丙炎 成新跃 吕全 张星耀)

主要参考文献

- 程瑚瑞,林茂松,黎伟强等.1983.南京黑松上发生的萎蔫线虫病.森林病虫通讯,4:1~5 [Cheng H R, Lin M S, Li W Q *et al.* 1983. The occurrence of a pine wilting disease caused by a nematode found in Nanjing. *For. Pest. Dis.*, 4: 1~5]
- 陈玉惠,叶建仁,魏初奖等.2002.松材线虫对黑松、湿地松幼苗活性氧代谢的影响.南京林业大学学报(自然科学版),26(4):19~22 [Chen Y H, Ye J R, Wei C J *et al.* 2002. Effects of pine wood nematode infection on metabolism of active oxygen in Japanese black pine and slash pine seedlings. *J. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 26(4): 19~22]
- 陈玉惠,叶建仁,魏初奖.2001.松材线虫病诊断方法研究进展.南京林业大学学报(自然科学版),25(6):83~87 [Chen Y H, Ye J R, Wei C J. 2001. Research advances in diagnosis of pine nematode wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *J. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 25(6):83~87]
- 葛明宏,徐福元,张培等.1999.激素、钙、水杨酸和铵诱导马尾松、黑松抗松材线虫病的研究.江苏林业科技,26(3):7~12 [Ge M H, Xu F Y, Zhang P *et al.* 1999. Study on resistance of *Pinus massoniana* and *Pinus thunbergii* to pine wood nematode induced by hormone, calcium, salicylate and ammonium. *Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology*, 26(3): 7~12]
- 郭道森,赵博光,高容.2001.利用愈伤组织验证细菌分离物 B619 与松材线虫病的关系.南京林业大学学报(自然科学版),25(5):71~74 [Guo D S, Zhao B G, Gao R. 2001. Experiments on the relationship between the bacterium isolate B619 and the pine wilt disease by using calli of *Pinus thunbergii*. *J. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 25(5): 71~74]
- 洪英娣,曹越,赵博光等.2002.松材线虫携带细菌的鉴定和毒性研究.南京林业大学学报(自然科学版),26(5):37~40 [Hong Y D, Cao Y, Zhao B G *et al.* 2002. Studies on identification and toxicity of bacteria carried by pine wood nematodes. *J. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 26(5): 37~40]
- 胡凯基,杨宝君.1995.松材线虫和拟松材线虫不同株系酶电泳的研究.林业科学研究,8(1):73~77 [Hu K J, Yang B J. 1995. Preliminary comparison of *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus* utilizing enzyme electrophoresis. *Forest Research*, 8(1): 73~77]
- 蒋丽雅,王晓芸.1995.松材线虫提取液和分泌液中纤维素酶定性检测.森林病虫通讯,(3):9~11 [Jiang L Y, Wang X Y. 1995. Detection of cellulase from extractions and exudations of pine wood nematode. *Forest pest and disease*, (3): 9~11]
- 莫明和,周薇,赵明莲等.2002.节孢属丝孢菌对松材线虫和拟松材线虫的捕食.微生物学通报,29(3):13~16 [Mo M H, Zhou W, Zhao M L *et al.* 2002. Capacity of *Arthrobotrys* spp. to capture nematodes *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus* in vitro. *Microbiology Bulletin*, 29(3): 13~16]
- 谈家金,冯志新.2001.松材线虫病病理生理学研究进展.江西科学,19(1):27~30 [Tan J J, Feng Z X. 2001. Advance on

- physiopathology of pine wood nematode disease. *Jinagxi Science*, 19(1): 27~30]
- 谈家金, 王新荣, 冯志新. 2001. 松材线虫伴生细菌与松树萎蔫病关系的初步研究. 植物检疫, 15(6): 326~328 [Tan J J, Wang X R, Feng Z X. 2001. A preliminary study on the relationship between the bacterium accompanying *Bursaphelenchus xylophilus* and pine wilt disease. *Plant Quarantine*, 15(6): 326~328]
- 王玉嫵, 李海燕, 舒朝然等. 2001. 几种松树松材线虫病木和健木 pH 值差异的研究. 植物病理学报, 31(4): 342~348 [Wang Y Y, Li H Y, Shu C R et al. 2001. A study on difference of pH between healthy and pine wilt diseased woods of several pine species. *Acta Phytopathologica Sinica*, 31(4): 342~348]
- 徐福元, 席客, 徐刚等. 1994. 不同龄级马尾松对松材线虫病抗性的探讨. 南京林业大学学报, 18(3): 27~33 [Xu F Y, Xi K, Xu G et al. 1994. Study on the resistances of various year classes of *Pinus massoniana* to pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Journ. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 18(3): 27~33]
- 许建平, 郑经武, 王建伟等. 1998. 松材线虫的 PCR 快速诊断研究. 浙江农业大学学报, 24(2): 133~134 [Xu J P, Zheng J W, Wang J W et al. 1998. A PCR rapid diagnosis of pine wood nematode. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 24(2): 133~134]
- 严东辉, 杨宝君. 1997. 松材线虫体外酶组成分析. 林业科学研究, 10(3): 265~269 [Yan D H, Yang B J. 1997. The enzymes in the secretions of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). *Forest Research*, 10(3): 265~269]
- 杨宝君. 2002. 松材线虫病致病机理的研究进展. 中国森林病虫, 21(1): 27~31 [Yang Baojun. 2002. Advance in research of pathogenetic mechanism of pine wood nematode. *Forest Pest Dis.*, 21(1): 27~31]
- 杨宝君, 刘伟, 徐福元等. 1999. 松材线虫病树早期诊断的研究. 林业科学研究, 12(3): 251~255 [Yang B J, Liu W, Xu F Y et al. 1999. Study on early diagnosis for pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *Forest Research*, 12(3): 251~255]
- 张立海, 廖金铃, 冯志新. 2001. 松材线虫 rDNA 的测序和 PCR-SSCP 分析. 植物病理学报, 31(1): 82~89 [Zhang L H, Liao J L, Feng Z X. 2001. Sequencing and PCR-SSCP analysis of ribosomal DNA of *Bursaphelenchus* nematodes. *Acta Phyt. Sinica*, 31(1): 82~89]
- 张路平, 孔繁瑶, 杨宝君. 2002. 松材线虫和拟松材线虫不同株系线粒体 DNA RAPD 分析. 林业科学研究, 15(1): 7~12 [Zhang L P, Kong F Y, Yang B J. 2002. Intra-and interspecific variation in *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus* revealed by mtDNA polymorphism. *Forest Research*, 15(1): 7~12]
- 张治宇, 张克云, 林茂松等. 2002. 不同松材线虫群体对黑松的致病性测定. 南京农业大学学报, 25(2): 43~46 [Zhang Z Y, Zhang K Y, Lin M S et al. 2002. Pathogenicity determination of *Bursaphelenchus xylophilus* isolates to *Pinus thunbergii*. *J. Nanjing Agric. Univ.*, 25(2): 43~46]
- 赵振东, 李冬梅, 胡樾萼等. 2001. 抗松材线虫病马尾松种源化学成分与抗性机理研究(II). 林产化学与工业, 21(1): 56~60 [Zhao Z D, Li D M, Hu X E et al. 2001. Study on chemical components and resistance mechanism to pinus wood nematode of mason pine provenance(II). *Chemistry and Industry of Forest Products*, 21(1): 56~60]
- 赵振东, 胡樾萼, 李冬梅等. 2001. 抗松材线虫病马尾松种源化学成分与抗性机理研究(III). 林产化学与工业, 21(3): 52~58 [Zhao Z D, Hu X E, Li D M et al. 2001. Study on chemical components and resistance mechanism to pine wood nematode of mason pine provenance (III). *Chemistry and Industry of Forest Products*, 21(3): 52~58]
- 郑经武. 1998. 松材线虫和拟松材线虫种间及种下群体的 RAPD 指纹分析. 浙江农业大学学报, 24(6): 597~601 [Zheng J W. 1998. RAPD analysis of inter-and intra-species of *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus*. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 24(6): 597~601]
- Abad P. 2000. Satellite DNA used as a species-specific probe for identification of *Bursaphelenchus xylophilus*. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 30: 571~574
- Abad P, Tares S, Brugier N et al. 1991. Characterization of the relationships in the pinewood nematode species complex (PWNSC) (*Bursaphelenchus* spp.) using a heterologous unc-22 DNA probe from *Caenorhabditis elegans*. *Parasitology*, 102: 303~308
- Aikawa T, Kosaka H. 1998. Difference in multiplication between the virulent and avirulent isolates of *Bursaphelenchus xylophilus*. *Nematologica*, 44: 451~452
- Alen Y, Nakajima S, Nitoda T et al. 2000. Antinematodal activity of some tropical rainforest plants against the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Z Naturforsch*, 55(3~4): 295~299
- Baujard P, Boulbria A, Ham R et al. 1979. Premieres donnees sur la nematofaune associee aux deperissements du pin maritime dans l'Ouest de la France. *Ann. Sci. forest.*, 36: 331~339
- Beckenbach K, Smith M J, Webster J M. 1992. Taxonomic affinities and intra-and interspecific variation in *Bursaphelenchus* spp. as determined by polymerase chain reaction. *J. Nematol.*, 24: 140~147
- Bedker P J, Wingfield M J, Blanchette R A. 1987. Patogenicity of *Bursaphelenchus xylophilus* on three species of pine. *Can J For*

- Bolla J A, Bramble J, Bolla R I. 1989. Attraction of *Bursaphelenchus xylophilus*, pathotype MPSy-1, to *Monochamus carolinensis* larvae. *Japanese Journal of Nematology*, 19: 32~37
- Bolla R I, Bochert M. 1993. Pinewood nematode species complex: interbreeding potential and chromosome number. *J. Nematol.*, 25: 227~238
- Bolla R I, Fitzsimmons K, Winter R E K *et al.* 1987. Carbohydrate concentration in pine saw affected by inoculation with *Bursaphelenchus xylophilus*. *Journal of Nematology*, 19(1): 51~57
- Bolla R I, Shaheen F, Winter R E K. 1984a. Effect of phytotoxin from nematode induced pine wilt on *Bursaphelenchus xylophilus* and *Ceratocystis ips*. *J. Nematol.*, 16: 297~303
- Bolla R I, Shaheen F, Winter R E K. 1984b. Phytotoxins production in *Bursaphelenchus xylophilus* infected *Pinus sylvestris*. *J. Nematol.*, 16(1): 57~61
- Bolla R I, Weaver C, Winter R E K. 1988. Genomic differences among pathotypes of *Bursaphelenchus xylophilus*. *J. Nematol.*, 20: 309~316
- Braasch H. 2001. *Bursaphelenchus* species in conifers in Europe: distribution and morphological relationships. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 31: 127~142
- Braasch H, Burgermeister W, Pastrik K H. 1995. Differentiation of three *Bursaphelenchus* species by means of RAPD-PCR. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 47: 310~314
- Braasch H, Metge K, Burgermeister W. 1999. *Bursaphelenchus* species in conifers in Germany and their ITS-RFLP pattern. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 51: 312~320
- Burnes T A, Wingfield M J, Baker F A *et al.* 1985. The pine wood nematode in jack pine infected with dwarf mistletoe. *Forest Sci.*, 31(4): 866~870
- CABI/EPPO. 1999. Distribution maps of plant diseases. Wallingford: CABI Publishing. 789
- Corlett R T. 1999. Environmental forestry in Hong Kong: 1871~1997. *For. Ecol. Man.*, 116: 93~105
- De Guiran G, Boulbria A. 1986. Le nematode des pins. Caracteristiques de la souche francaise et risqué d'introduction et d'extension de *Bursaphelenchus xylophilus* en Europe. *OEPP/EPPO Bull*, 16: 445~452
- De Guiran G, Bruguier N. 1989. Hybridization and phylogeny of the pine wood nematode (*Bursaphelenchus* spp.). *Nematologica*, 35: 321~330
- De Guiran G, Lee M J, Dalmasso A *et al.* 1985. Preliminary attempt to differentiate pinewood nematodes (*Bursaphelenchus* spp.) by enzyme electrophoresis. *Revue Nematologie*, 8: 88~89
- Dropkin V H, Foudin A S. 1979. Report of the occurrence of *Bursaphelenchus lignicolus*-induced pine wilt disease in Missouri. *Plant. Dis. Rep.*, 63: 904~905
- Dropkin V H, Foudin A S, Kondo E *et al.* 1981. Pine wood nematode: a threat to U. S. forests? *Plant Dis.*, 65: 1022~1027
- Dwinell L D. 1997. The pinewood nematode: regulation and mitigation. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 35: 153~166
- Dwinell L D, Nickle W R. 1989. An overview of the pine wood nematode ban in North America. Gen. Tech. Rep. SE-55 Asheville, NC: U. S. Department of agriculture forest service, southeastern forest experiment station. 13
- Fukuda K, Hogetsu T, Suzuki K. 1992. Cavitation and cytological changes in xylem of pine seedlings inoculated with virulent and avirulent isolates of *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus*. *J. Jan. For. Soc.*, 74(4): 289~299
- Fukushigi H. 1991. Propagation of *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) on fungi growing in pine-shoot segments. *Appl. Ent. Zool.*, 26(3): 371~376
- Hanawa F, Yamada T, Nakashima T. 2001. Phytoalexins from *Pinus strobus* bark infected with pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Phytochemistry*, 57(2): 223~228
- Harmey J H, Harmey M A. 1993. Detection and identification of *Bursaphelenchus* species with DNA fingerprinting and polymerase chain reaction. *J. Nematol.*, 25(3): 406~415
- Hoyer U, Burgermeister W, Braasch H. 1998. Identification of *Bursaphelenchus* species (Nematoda, Aphelenchoididae) on the basis of amplified ribosomal DNA (ITS-RFLP). *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 50: 273~277
- Ichihara Y, Fukuda K, Suzuki K. 2000. Early symptom development and histological changes associated with migration of *Bursaphelenchus xylophilus* in seedling tissues of *Pinus thunbergii*. *Plant Disease*, 84(6): 675~680
- Ikedo T, Kiyohara T. 1995. Water relations, xylem embolism and histological features of *Pinus thunbergii* inoculated with virulent or avirulent pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *J. Exper. Botany*, 46(285): 441~449
- Ishida K, Hogetsu T. 2001. Pathogenicity of the pine wood nematode at different developmental stages. *J. For. Res.*, 6(4): 253~256

- Ishikawa M, Kaneko A, Kashiwa T *et al.* 1987. Participation of β -myrcene in the susceptibility and/or resistance of pine trees to the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Agric. Biol. Chem.*, 51(12): 3187-3191
- Ishikawa M, Shuto Y, Watanabe H. 1986. β -myrcene, a potent attractant component of pine wood for the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Agric. Biol. Chem.*, 50(7): 1863-1866
- Iwahori H, Futai K. 1995. Comparative movement speed of pathogenic and nonpathogenic isolates of *Bursaphelenchus* nematodes. *Appl. Entomol. Zool.*, 30: 159-167
- Iwahori H, Kanzaki N, Futai K. 2000. A simple, polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism-aided diagnosis method for pine wilt disease. *Forest Pathology*, 30(3): 157-164
- Iwahori H, Tsuda K, Kanzaki N *et al.* 1998. PCR-RFLP and sequencing analysis of ribosomal DNA of *Bursaphelenchus* nematodes related to pine wilt disease. *Fundam. Appl. Nematol.*, 21(6): 655-666
- Kaneko N, Kawazu K, Kanzaki H. 1998. Difference in mobility of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, between two isolates, OKD-1 and OKD-3, with different pathogenicity. *Jap. J. Nematol.*, 28: 17-21
- Kawazu K, Zhang H, Yamashita H *et al.* 1996. Relationship between the pathogenicity of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, and phenylacetic acid production. *Biosci. Biotech. Biochem.*, 60(9): 1413-1415
- Kawazu K, Yamashita H, Kobayashi A *et al.* 1998. Isolation of pine-wilting bacteria accompanying pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, and their toxic metabolites. *Scientific Reports of the Faculty of Agriculture, Okayama University*, 87: 1-7
- Kinn D N. 1987. Incidence of pinewood nematode dauerlarvae and phoretic mites associated with long-horned beetles in central Louisiana. *Can. J. For. Res.*, 17: 187-190
- Kishi Y. 1999. Influence of tree age on wilt and mortality of pines after inoculation with *Bursaphelenchus xylophilus*. *Nihoh Ringakkai Shi*, 81(4): 330-333
- Kiyohara T, Bolla R I. 1990. Pathogenic variability among populations of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Forest Science*, 36: 1061-1076
- Knowles K, Beaubien Y, Wingfield M J *et al.* 1983. The pinewood nematode new in Canada. *For. Chron.*, 59: 40
- Kobayashi F, Yamave A, Ikeda T. 1984. The Japanese pine sawyer beetle as the vector of pine wilt. *Ann. Rev. Ent.*, 29: 115-135
- Kojima K, Kamijyo A, Masumori M *et al.* 1994. Cellulase activities of pine-wood nematode isolates with different virulences. *J. Jpn. For. Soc.*, 76(3): 258-262
- Konda E. 1986. SEM observations on the intratracheal existence and cuticle surface of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, associated with the cerambycid beetle, *Monochamus carolinensis*. *Appl. Ent. Zool.*, 21(2): 340-346
- Konda E, Ishibashi N. 1978. Ultrastructural differences between the propagative and dispersal forms in pine wood nematode, *Bursaphelenchus lignicolus*, with reference to the survival. *Appl. Ent. Zool.*, 13(1): 1-11
- Kosaka H, Aikawa T, Ogura N *et al.* 2001. Pine wilt disease caused by the pine wood nematode: the induced resistance of pine trees by the avirulent isolates of nematode. *Eur. J. Plant Pathol.*, 107: 667-675
- Kuroda K. 1991. Mechanism of cavitation development in the pine wilt disease. *Eur. J. For. Path.*, 21(2): 82-89
- Kuroda K, Yamada T, Ito S. 1991. Development of the pine wilt disease in *Pinus densiflora* from the standpoint of water conduction. *J. Jan. For. Soc.*, 73(1): 69-72
- Kuroda K, Yamada T, Mineo K. 1988. Effects of cavitation on the development of pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *Ann. Phytopath. Soc. Japan*, 54(5): 606-615
- Kuroda K. 1989. Terpenoids causing tracheid-cavitation in *Pinus thumbergii* infected by the pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). *Ann. Phytopath. Soc. Japan*, 55(2): 170-178
- Kusunoki M. 1987. Symptom development of pine wilt disease-histopathological observation with electron microscope. *Ann. Phytopath. Soc. Jpn.*, 53: 622-629
- Lawler C, Joyce P, Harmey M A. 1993. Immunological differentiation between *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus*. *Nematologica*, 39: 536-546
- Linit M J. 1989. Temporal pattern of pinewood nematode exit from the insect vector *Monochamus carolinensis*. *Journal of Nematology*, 21: 105-107
- Liou J Y, Shih J Y, Tzeng S S. 1999. Esteya, a new nematophagous genus from Taiwan, attacking the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). *Mycological Research*, 103(2): 242-248
- Machida N, Futai K. 2000. Population changes of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchida), on fungi growing in pine-branch segments. *Appl. Entomol. Zool.*, 35(3): 413-417

- Mamiya Y, Kiyohara T. 1972. Description of *Bursaphelenchus lignicolus* n. sp. from pine wood and histopathology of nematode-infested trees. *Nematologica*, 18: 120~124
- Mamiya Y. 1986. Interspecific hybridization between *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus* (Aphelenchida: Aphelenchoididae). *Applied. Ent. Zool.*, 21: 159~163
- Mamiya Y, Enda N. 1979. *Bursaphelenchus mucronatus* n. sp. (Nematoda: Aphelenchoididae) from pine wood and its biology and pathogenicity to pine trees. *Nematologica*, 25: 353~361
- Mamiya Y, Tamura H. 1976. A kind of nematode trapping fungi *Dactylella leptospora* found in wood around pupal chambers of *Monochamus alternatus*. *For. Pests*, 25: 147~149
- Matsumori K, Izumi S, Watanabe H. 1989. Hormone-like action of 3-octanol and 1-octen-3-ol from *Botrytis cinerea* on the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Agric. Biol. Chem.*, 53(7): 1777~1781
- Melakberhan H, Webster J M. 1991. Effect of *Bursaphelenchus xylophilus* on the water potential and water-splitting complex of photosystem II of *Pinus sylvestris* seedling. *Phys. Mol. Plant Path.*, 38(2): 83~91
- Mori T, Inoue T. 1986. Pine-wood nematode induced ethylene production in pine stems and cellulase as an inducer. *J. Jpn. For. Soc.*, 68(2): 43~50
- Mota M M, Braasch H, Bravo M A *et al.* 1999. First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe. *Nematology*, 1(7~8): 727~734
- Myers B F. 1986. Cambium destruction in conifers caused by pine wood nematode. *J. Nematol.*, 18(3): 398~402
- Necibi S, Linit M J. 1998. Effect of *Monochamus carolinensis* on *Bursaphelenchus xylophilus* dispersal stage formation. *J. Nematol.*, 30(2): 246~254
- Nickle W R, Golden A M, Mamiya Y *et al.* 1981. On the taxonomy and morphology of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Buhrem 1934) Nickle W R (1970). *Journal of Nematology*, 2: 385~392
- Odani K, Sasaki S, Nishiyama Y *et al.* 1985. Early system development of the pine wilt disease by hydrolytic enzymes produced by the pine nematodes-cellulase as a possible candidate of the pathogen. *J. Jpn. For. Soc.*, 67(9): 366~372
- OEPP/EPPO. 2001. Diagnostic protocols for regulated pests: *Bursaphelenchus xylophilus*. *Bulletin OEPP/ EPPO Bulletin*, 31: 61~69
- Oku H. 1982. Pine wilt disease in Japan. *In: Appleby J E, Malek R B eds. Proc. Natl. Pine Wilt Disease Workshop. III. Nat. Hist. Surv., Champaign.* 11~13
- Oku H. 1990. Phytotoxins in pine wilt disease. *Nippon Nogeikagaku Kaishi*, 64(7): 1254~1257
- Riga E, Beckenbach K, Webster J M. 1992. Taxonomic relationships of *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus* based on interspecific and intraspecific cross-hybridization and DNA analysis. *Fundam. Appl. Nematol.*, 15: 391~395
- Shuto Y, Watanabe H. 1987. Attractants from a vector, *Monochamus alternatus* for the pine wood nematode. *Agric. Biol. Chem.*, 51(5): 1457~1458
- Shuto Y, Watanabe H. 1988. Stimulating effect of ethanol on oviposition of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Agric. Biol. Chem.*, 52(11): 2927~2928
- Sousa E, Bravo M A, Pires J *et al.* 2001. *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) associated with *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera: Cerambycidae) in Portugal. *Nematology*, 3(1): 89~92
- Stamps W T, Linit M J. 1988. Neutral storage lipid and exit behavior of *Bursaphelenchus xylophilus* fourth-stage dispersal juveniles form their beetle vectors. *J. Nematol.*, 30(2): 255~261
- Stamps W T, Linit M J. 2001. Interaction of intrinsic and extrinsic chemical cues in the behaviour of *Bursaphelenchus xylophilus* (Aphelenchida: Aphelenchoididae) in relation to its beetle vectors. *Nematology*, 3(4): 295~301
- Steiner G, Buhner E M. 1934. *Aphelenchoides xylophilus* n. sp. a nematode associated with blue-stain and other fungi in timber. *J. Agric. Res.*, 48: 949~951
- Suga T, Ohta S, Munesada K *et al.* 1993. Endogenous pine wood nematocidal substances in pines, *Pinus massoniana*, *P. strobes* and *P. palustris*. *Ecochemistry*, 33(6): 1395~1401
- Takasu F, Yamamoto N, Kawasaki K *et al.* 2000. Modeling the expansion of an introduced tree disease. *Biological Invasions*, 2(2): 141~150
- Tares S, Abad P, Bruguier N *et al.* 1992. Identification and evidence for relationships among geographical isolates of *Bursaphelenchus* spp. (pinewood nematode) using homologous DNA probes. *Heredity*, 68: 157~164
- Tares S, Lemontey J M, De Guiran G *et al.* 1993. Cloning and characterization of highly conserved satellite DNA sequence specific for the phytoparasitic nematode *Bursaphelenchus xylophilus*. *Gene*, 129: 269~273

- Tares S, Lemontey J M, De Guiran G *et al.* 1994. Use of species-specific satellite DNA from *Bursaphelenchus xylophilus* as a diagnostic probe. *Phytopathology*, 84: 294-298
- Tominaga Y, Yamamoto M, Kuwahara Y *et al.* 1984. Behavioral responses of the pine wood nematode to terpenes. *Argic. Biol. Chem.*, 48(2): 519-520
- Webster J M, Anderson R V, Baillie D L *et al.* 1990. DNA probes for differentiating isolates of the pinewood nematode species complex. *Rev. Nematol.*, 13: 255-263
- Wingfield M J. 1983. Transmission of pinewood nematode to cut timber and girdled trees. *Plant Disease*, 67: 35-37
- Wingfield M J. 1987. Fungi associated with the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, and cerambycid beetles in Wisconsin. *Mycologia*, 79(2): 325-328
- Wingfield M J, Balchette R A, Nicholls T H. 1984. Is the pine wood nematode an important pathogen in the United States? *J. Forestry*, 232-235
- Wingfield M J, Blanchette R A. 1983. The pine-wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Minnesota and Wisconsin: insect associates and transmission studies. *Can. J. For. Res.*, 13: 1068-1076
- Wingfield M J, Blanchette R A, Kondo E M. 1983. Comparison of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* from pine and balsam fir. *European J. Forest Path.*, 13: 360-372
- Yamada T, Ito S. 1993. Chemical defense responses of wilt-resistant pine species, *Pinus strobes* and *P. taeda*, against *Bursaphelenchus xylophilus*. *Ann. Phytopath. Soc. Japan*, 59(6): 666-672
- Yamamoto N *et al.* 1986. Cellulase exudation by the pine wood nematode and detection of activity in its crawling track. *J. Jpn. For. Soc.*, 68: 237-240
- Yang B J, Wang Q. 1989. Distribution of the pinewood nematode in China and susceptibility of some Chinese and exotic pines to the nematode. *Can. J. For. Res.*, 19: 1527-1530
- Yang W D. 1995. Observation on early response of *Pinus massoniana* infected by *Bursaphelenchus xylophilus*. In: International symposium on pine wilt disease caused by pine wood nematode. Beijing: China
- Yik C P, Birchfield W. 1981. Observations on the morphology of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *J. Nematol.*, 13(3): 376-384
- Yoshimura A, Kawasaki K, Takasu F *et al.* 1999. Modeling the spread of pine wilt disease caused by nematodes with pine sawyers as vector. *Ecology*, 80(5): 1691-1702
- Zhang X, Stamps W T, Linit M J. 1995. A nondestructive method of determining *Bursaphelenchus xylophilus* infestation of *Monochamus* spp. vectors. *Journal of Nematology*, 27: 36-41

第二十九章 马铃薯胞囊线虫

第一节 马铃薯胞囊线虫的起源与分布	618	第五节 生物学特性	631
第二节 识别特征与早期诊断	620	第六节 风险分析与早期预警系统	634
第三节 传入途径与入侵成因	627	第七节 预防、根除与控制	634
第四节 危害现状与生态经济影响的评估	630		

摘要 马铃薯胞囊线虫包括马铃薯金线虫 *Globodera rostochiensis* 和马铃薯白线虫 *G. pallida*, 是马铃薯等茄科植物上两种最重要的植物寄生线虫, 一般造成马铃薯产量损失 9%~20%, 在热带地区, 危害严重时造成产量损失 80%~90%, 甚至绝收。马铃薯金线虫在全世界 72 个国家有发生和分布, 马铃薯白线虫在全世界 39 个国家有发生和分布, 世界许多国家都将马铃薯金线虫和白线虫列为重要检疫对象, 我国目前尚无马铃薯金线虫和白线虫发生危害的报道, 因此是我国重要对外检疫对象。本章简要介绍了马铃薯金线虫和白线虫的起源、分布、症状、形态鉴别特征、传入我国的可能性、危害损失、侵染循环、检验抽验方法以及预防和控制措施, 以便对潜在外来有害线虫—马铃薯金线虫和白线虫入侵的可能性和入侵后的严重性有较全面的认识。

关键词 马铃薯胞囊线虫 马铃薯金线虫 马铃薯白线虫

Chapter 29 Potato Cyst Nematodes *Globodera rostochiensis*, *G. pallida*

Abstract: Golden potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* and pale potato cyst nematodes *G. pallida* are the most important quarantine nematode pests on potato in the world. There is no distribution and occurrence record of *G. rostochiensis* and *G. pallida* in China, so these two cyst nematodes are also quarantine nematode pests for China. Their origin, damages, symptoms, morphological characteristics, diagnosis, invasive possibilities, yield losses, inspective methods and integrated nematode management were introduced in this chapter.

Key words: potato cyst nematode, *Globodera rostochiensis*, *Globodera pallida*

第一节 马铃薯胞囊线虫的起源与分布

一、马铃薯胞囊线虫的起源

马铃薯胞囊线虫包括马铃薯金线虫 *Globodera rostochiensis* 和马铃薯白线虫 *G. pallida*，它们是马铃薯等茄科植物上两种最重要的植物寄生线虫。千万年以前，马铃薯金线虫和马铃薯白线虫与马铃薯在南美洲共同进化(Stone, 1979)。最初人们认为在 1 万至 9 万年前，马铃薯金线虫和马铃薯白线虫开始发生分化，形成两个独立的种(Stone, 1979)，但是最近的分子生物学研究表明在几百万年前，这两个种就开始分化(Bakker and Bouwman-Smits, 1988)，自形成独立的种后，每个种内发育形成许多小种或致病型。关于马铃薯胞囊线虫共同进化和传播方式有几种不同的看法。Brucher(1959)认为马铃薯胞囊线虫起源于阿根廷的西北部，Franco(1979)赞成 Brucher 的观点，并进一步认为，在更新世冰河作用期(Pleistocene glaciations)，在分散隔离的群体中的两个种起源于这一地区，然后向北迁移扩散，仅仅只有马铃薯白线虫入侵到的的喀喀湖(Titicaca Lake)下游地区(Turner and Evans, 1998)。Stone(1979) 坚决主张在更新世时代(Pleistocene era)，一种最原始的马铃薯胞囊线虫(马铃薯金线虫 *G. rostochiensis*)出现在阿根廷的西北部，然后向北迁移，马铃薯金线虫这个物种可以在的喀喀湖任何一边形成，紧接着，马铃薯白线虫向南再迁移扩散到玻利维亚。目前，普遍认为马铃薯胞囊线虫起源于安第斯山脉，然后向欧洲及世界各地迁移扩散(Jatala and Bridge, 1990)。

马铃薯胞囊线虫最初传播到欧洲可能与 19 世纪 50 年代欧洲开始大量引进优良抗病的马铃薯育种材料有关。1881 年，Kuhn 最先记录了马铃薯上的胞囊型线虫，这使人们认为马铃薯胞囊线虫传入欧洲 30 年后才繁殖到可以检测和危害的水平(Turner and Evans, 1998)。1900 年，马铃薯胞囊线虫已经在英格兰发生和存在，在 20 世纪初叶，欧洲许多国家发现马铃薯胞囊线虫，随后马铃薯胞囊线虫传播到世界其他地区(图 29-1)(Turner and Evans, 1998)。



图 29-1 马铃薯胞囊线虫从起源中心向世界各地传播的路线
(引自 Turner and Evans, 1998)

虚线表示马铃薯金线虫传播路线，实线表示马铃薯白线虫传播路线

1923年, Wollenweber 最先将马铃薯胞囊线虫与甜菜胞囊线虫区分开来, 并命名为 *Heterodera rostochiensis* (Turner and Evans, 1998)。Stone(1972)年鉴别和描述了马铃薯上的第二种胞囊线虫, 并在 *Globodera* 亚属下命名了马铃薯白线虫(*Heterodera pallida*)。由于球胞囊线虫属和胞囊线虫属间存在明显的形态学和生物学的差异, 1975年, Behrens 将 *Globodera* 亚属提升到属水平, 因此马铃薯金线虫和白线虫两个种的学名分别由 *H. rostochiensis* 和 *H. pallida* 提升到目前公认的拉丁学名 *G. rostochiensis* 和 *G. pallida*(Turner and Evans, 1998)。

二、马铃薯胞囊线虫的分布

(一) 马铃薯金线虫的分布

马铃薯金线虫目前在全世界五大洲 72 个国家有发生和分布 (Baldwin and Mundoo, 1991; Brodie *et al.*, 1993; EPPO, 1992; Evans and Stone, 1977; Evans *et al.*, 1975; Morris, 1971; Phillips, 1981; 彭德良, 1997a, 1997b)。

欧洲: 阿尔巴尼亚、奥地利、白俄罗斯、比利时、保加利亚、捷克、丹麦、爱沙尼亚、法罗群岛、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、马耳他、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、俄罗斯(俄罗斯中部、西伯利亚东部、远东地区、俄罗斯北部和南部)、西班牙(加那利群岛)、斯洛伐克、英国(苏格兰和海峡群岛)、瑞典、瑞士、乌克兰和南斯拉夫。

亚洲: 亚美尼亚、塞浦路斯、印度(喀拉拉邦、泰米尔纳德邦)、日本(北海道)、黎巴嫩、马来西亚(未证实)、巴基斯坦、菲律宾、斯里兰卡、塔吉克斯坦、以色列(仅在 1954 年和 1965 年偶然在 Sharon region 的小面积发现, 本国申明已根除, 但 FAO 报道仍有分布)、阿曼、沙特阿拉伯、叙利亚、土耳其、约旦。中国目前尚未发现。

非洲: 阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥(仅被截获)、塞拉利昂、南非、突尼斯和加那利群岛。

大洋洲: 澳大利亚(两次爆发, 1986 年在西澳大利亚, 1991 在维多利亚; 两次都采取了官方铲除计划)、新西兰、诺福克岛。

北美洲: 美国(纽约—长岛; 加利福尼亚州及东海岸, 特拉华州已铲除)、加拿大(纽芬兰省、温哥华省)和墨西哥。

中北美洲和加勒比地区: 哥斯达黎加、巴拿马。

南美洲: 阿根廷、玻利维亚、智利、哥伦比亚、厄瓜多尔、秘鲁、委内瑞拉和巴西。

(二) 马铃薯白线虫的分布

马铃薯白线虫分布虽然不如马铃薯金线虫广泛, 但是在全世界五大洲热带和亚热带的冷凉地区以及温带的 39 个国家有发生和分布, 具体分布的地区如下(Turner and Evans, 1998; Phillips, 1981; Brodie *et al.*, 1993; Swarup *et al.*, 1988; Evans *et al.*, 1975)。

欧洲: 奥地利、比利时、保加利亚、丹麦(Faroe Islands)、斯洛伐克、爱沙尼亚、芬兰(仅有截获记录)、法国、德国、希腊(仅克里特岛)、冰岛、爱尔兰、意大利、卢森堡、马耳他(仅有分离记录)、荷兰、英国、挪威、葡萄牙、俄罗斯(俄罗斯欧洲部分)、西班牙

(包括加那利群岛)、瑞典、瑞士和南斯拉夫。

亚洲：塞浦路斯、印度(喜马偕尔邦、喀拉拉邦、泰米尔纳德邦)、巴基斯坦。中国目前没有分布。

非洲：阿尔及利亚、突尼斯。

大洋洲：新西兰。

北美洲和加勒比海地区：加拿大(纽芬兰)。

南美洲：整个安第斯高海拔地区：阿根廷、玻利维亚、智利、哥伦比亚、巴拿马、厄瓜多尔、秘鲁和委内瑞拉。

第二节 识别特征与早期诊断

一、早期诊断症状

如图 29-2 所示。马铃薯金线虫和白线虫为害寄主植物马铃薯的根系，地上部无特殊识别症状，根系受害引起植物逆境反应，使水分和营养物质的吸收能力降低，地上部表



图 29-2 马铃薯胞囊线虫侵染症状(Turner and Evans, 1998)

- a. 马铃薯胞囊线虫以机械方式沿种植行传播导致长条形植株受害症状; b. 马铃薯根系上的雌虫和胞囊;
c. 马铃薯胞囊线虫侵染后植株表现黄化症状; d. 马铃薯植株根系胞囊

现为水分和无机营养缺乏症状(Jones, 1970), 地上部矮化、发黄和其他失绿症状; 在干旱条件下叶片表现凋萎症状, 中午时分凋萎症状表现特别明显。金线虫和白线虫为害后常常使马铃薯早衰和侧根增生。田间病株分布不均匀, 有发病中心团, 随着连续种植马铃薯和农事操作, 病团年年扩大, 最后全田发病, 并从一块田传到另一块田。田间病害诊断最主要的是进行金线虫和白线虫的胞囊调查。在马铃薯开花前后, 取植株根系, 仔细观察受害植株的根部可见到金黄色的球形雌虫, 故称马铃薯金线虫(golden potato cyst nematode), 雌虫成熟后逐步变成深褐色, 马铃薯收获后, 根系胞囊遗落到土壤中。而马铃薯白线虫根部的雌虫直至死亡仍为白色, 故称马铃薯白线虫。在马铃薯块茎上也观察到白线虫雌虫, 但是发生的频率低(Brown, 1969; Guile, 1970; Franco, 1981)。

二、形态特征

(一) 马铃薯金线虫的形态特征

1. 马铃薯金线虫形态特征测量值

据 Stone(1973)研究报道, 马铃薯金线虫雌虫、雄虫、幼虫的形态测量值如下。

雌虫($n=25$): 体长(不包括颈) $520(420\sim 640)\mu\text{m}$, 口针长 $(22.9\pm 1.2)\mu\text{m}$, 口针基部至背食道腺开口的距离为 $(5.7\pm 0.9)\mu\text{m}$, 头基部宽 $(5.2\pm 0.7)\mu\text{m}$, 头端至中食道球瓣门的距离为 $(73.2\pm 14.6)\mu\text{m}$, 中食道球瓣门至排泄孔的距离为 $(65.2\pm 20.2)\mu\text{m}$, 头端至排泄孔的距离为 $(145.3\pm 17.4)\mu\text{m}$, 中食道球平均直径 $(30\pm 2.8)\mu\text{m}$, 阴门膜孔直径 $(22.4\pm 2.8)\mu\text{m}$, 阴门裂长 $(9.7\pm 1.9)\mu\text{m}$, 肛门至阴门膜边缘距离为 $(60.0\pm 1.0)\mu\text{m}$, 肛门至阴门间角质层脊数为 (21.6 ± 3.5) 个。

胞囊($n=25$): 体长(不包括颈) $(445\pm 50)\mu\text{m}$, 宽 $(382\pm 6)\mu\text{m}$, 颈长 $(104\pm 19)\mu\text{m}$, 阴门锥直径 $(18.8\pm 2.2)\mu\text{m}$, 肛门至阴门锥 $(66.5\pm 10.3)\mu\text{m}$, 格氏比值(Granek's ratio, 肛门至阴门锥近缘的距离/阴门锥直径) $=3.6\pm 0.8$ (Stone, 1973)。

雄虫($n=50$): 体长 $(1197\pm 100)\mu\text{m}$, 排泄孔处体宽 $(28.1\pm 1.7)\mu\text{m}$, 头基部宽 $(11.8\pm 0.6)\mu\text{m}$, 头高 $(6.8\pm 0.3)\mu\text{m}$, 口针长 $(25.8\pm 0.9)\mu\text{m}$, 口针基部到背食道腺开口的距离为 $(5.3\pm 0.9)\mu\text{m}$, 头端到中食道球瓣门距离为 $(98.5\pm 7.4)\mu\text{m}$, 中食道球瓣门至排泄孔的距离为 $(73.8\pm 9.0)\mu\text{m}$, 头端到排泄孔距离为 $(172.3\pm 12.1)\mu\text{m}$, 尾长 $(5.4\pm 1.1)\mu\text{m}$, 泄殖腔处体宽 $(13.5\pm 0.4)\mu\text{m}$, 交合刺长 $(35.5\pm 2.8)\mu\text{m}$, 引带长 $(10.3\pm 1.5)\mu\text{m}$ (Stone, 1973)。

二龄幼虫($n=50$): 体长 $(468\pm 20)\mu\text{m}$, 排泄孔处体宽 $(18.3\pm 0.5)\mu\text{m}$, 基部头宽 $(9.9\pm 0.4)\mu\text{m}$, 头高 $(4.6\pm 0.6)\mu\text{m}$, 头端到中食道球瓣门距离为 $(69.2\pm 1.9)\mu\text{m}$, 口针长 $(21.8\pm 0.7)\mu\text{m}$, 口针基部到食道腺开口的长度为 $(2.6\pm 0.6)\mu\text{m}$, 中食道球瓣门至排泄孔距离为 $(31.3\pm 2.3)\mu\text{m}$, 头端至排泄孔的距离为 $(100.5\pm 2.4)\mu\text{m}$, 尾长 $(43.9\pm 11.6)\mu\text{m}$, 透明尾长 $(26.5\pm 1.8)\mu\text{m}$, 肛门处体宽 $(11.4\pm 0.6)\mu\text{m}$ (Stone, 1973)。

2. 马铃薯金线虫形态描述

如图 29-3 所示。

雌虫: 亚球形, 具突出的颈, 虫体球形部分的角质层具有网状脊, 无侧线。口针锥

部约为口针长度的 50%，有时略弯曲，口针基部球形，明显向后倾斜。排泄孔明显，位于颈基部。阴门膜略凹陷，阴门横裂状。肛门位于阴门膜之外，肛门与阴门间角质层有 20 个平行脊(Stone, 1973)。

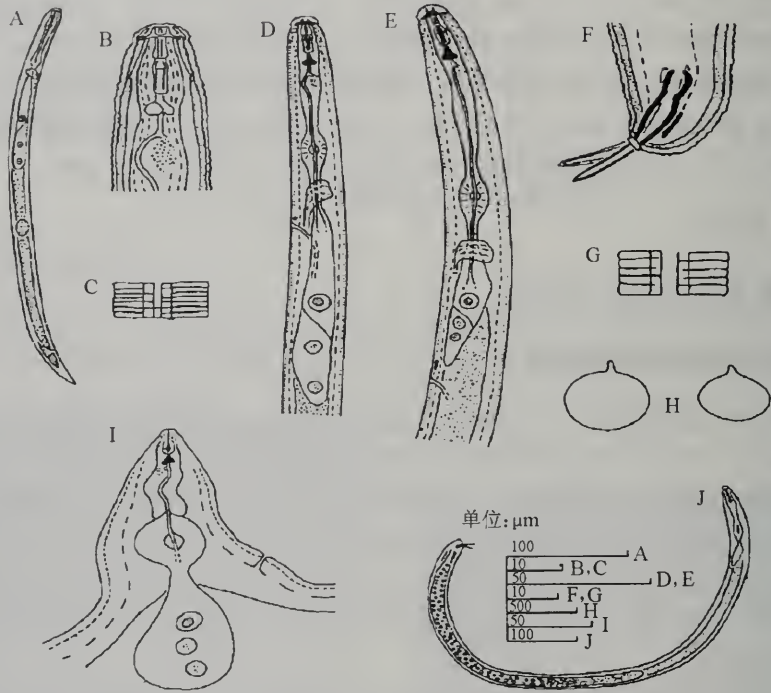


图 29-3 马铃薯金线虫 *Globodera rostochiensis* Wollenweber (引自 Stone, 1973)

A. 幼虫整体; B. 二龄幼虫头部区域; C. 二龄幼虫中部侧区; D. 二龄幼虫食道区域; E. 雄虫食道区域;
F. 雄虫尾部; G. 雄虫虫体中部侧区; H. 胞囊; I. 雌虫头部和颈部; J. 雄虫整体

胞囊：亚球形，具突出的颈，无突出的阴门锥；阴门锥为单环膜孔型(single circular fenestra)，新胞囊的阴门锥完整，较老的胞囊部分或全部阴门锥丢失。无阴门桥、下桥及其他残存的腺体结构；无泡状突，但阴门区域可能有一些小而不规则黑色素沉积物。无亚晶层，角质膜与雌虫相似，为“Z”字型(Stone, 1973)。

雄虫：蠕虫形，具钝圆形的尾，热杀死固定时，虫体弯曲，后部卷曲 90°~180°，呈“C”形或“S”形，角质层具规则环纹，侧区 4 条侧线延伸至尾末端，两条外侧线具网纹但内侧线无网纹。头部圆形缢缩，具 6~7 个环纹，头骨架严重骨化。前头状体 (anterior cephalids) 和后头状体分别位于 2~4 和 6~9 个体环处。口针发育好，基部球向后倾斜，口针锥部占整个口针长的 45%。中食道球椭圆形，中间有明显的新月形瓣门，无明显的食道肠瓣状结构。半月体 2 个环纹长，位于排泄孔前 2~3 个环纹处，半月小体 1 个环纹长，位于排泄孔后 9~12 个体环处。单精巢，泄殖腔开口小，具升起的唇。交合刺强壮，弓形，末端单指尖状。引带小(Stone, 1973)。

二龄幼虫：蠕虫形，但在卵内折叠成 4 折，角质层环纹清晰，侧区刻线 4 条，偶尔

有网格化。头圆，稍微缢缩，4~6个环纹。口盘卵圆形，侧唇和一对背腹亚中唇环绕口盘。口盘和唇形成卵圆形轮廓。头骨架严重骨化，前、后头状体分别位于第2~3个和第6~8个体环处。口针发育好，口针锥部小于口针长的50%，口针基部球略向后倾斜。食道腺体在腹面延伸至排泄孔后35%体长处，排泄孔位于20%体长处，半月体2个体环长，位于排泄孔前1个环纹处，半月小体小于1个体环长，位于排泄孔后5~6个环纹处。4细胞生殖腺体原基(four-cell gonadial primordium)约位于体长的60%处。尾部逐渐变细，直至尾端，后部的一半到2/3为透明尾(Stone 1973)。

(二) 马铃薯白线虫的形态特征

1. 马铃薯白线虫的形态测量值

根据 Stone (1973)的研究，马铃薯白线虫的测量值如下。

雌虫($n=25$): 口针长(27.4 ± 1.1) μm ，头基部宽(5.2 ± 0.5) μm ，口针基部球至背食道腺开口距离为(5.4 ± 1.1) μm ，头顶到中食道球瓣门距离为(67.2 ± 18.7) μm ，中食道球瓣门至排泄孔的距离为(71.2 ± 21.9) μm ，排泄孔到头顶距离为(139.7 ± 15.5) μm ，中食道球平均直径(32.5 ± 4.3) μm ，阴门膜孔平均直径(24.8 ± 3.7) μm ，阴门裂长(11.5 ± 1.3) μm ，肛门至阴门膜孔的距离为(44.6 ± 1.9) μm ，阴门与肛门间角质层的脊数(12.5 ± 3.1)个(Stone 1973)。

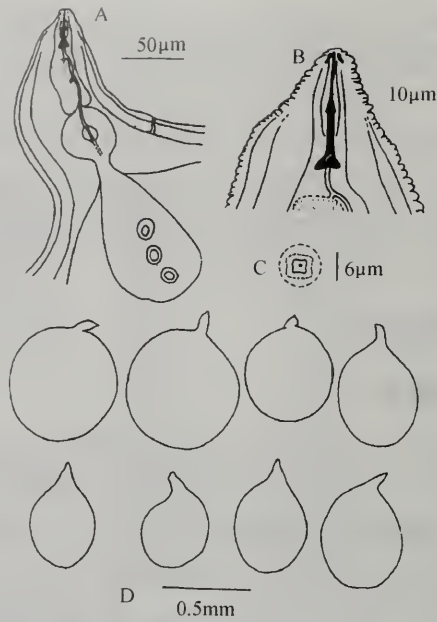
胞囊($n=25$): 长(不包括颈)(579 ± 70) μm ，宽(534 ± 66) μm ，颈长(118 ± 20) μm ，阴门膜孔直径(24.5 ± 5.0) μm ，肛门至阴门膜孔距离为(49.9 ± 13.4) μm ，格氏比值(肛门至阴门锥近缘的距离/阴门锥直径)= 2.1 ± 0.9 。

雄虫($n=50$): 体长(1198 ± 104) μm ，排泄孔处体宽(28.4 ± 1.3) μm ，头基部宽(12.3 ± 0.5) μm ，头部高(6.8 ± 0.3) μm ，口针长(27.5 ± 1.0) μm ，口针基部球至背食道腺开口距离为(3.4 ± 1.0) μm ，头顶至中食道球瓣的距离为(96.0 ± 7.1) μm ，中食道球瓣至排泄孔距离为(81.0 ± 10.9) μm ，排泄孔至头顶距离为(176.4 ± 14.5) μm ，尾长(5.2 ± 1.4) μm ，泄殖腔处体宽(13.5 ± 2.1) μm ，交合刺长(36.3 ± 4.1) μm ，引带长(11.3 ± 1.6) μm 。

二龄幼虫($n=30$): 体长(486 ± 23) μm ，排泄孔处体宽(19.3 ± 0.6) μm ，头基部宽(10.6 ± 0.5) μm ，头部高(5.5 ± 0.1) μm ，口针长(23.8 ± 1.0) μm ，口针基部球至背食道腺开口距离为(2.7 ± 0.9) μm ，头端至中食道球瓣门的距离为(68.7 ± 2.7) μm ，中食道球瓣至排泄孔至距离为(39.9 ± 3.3) μm ，排泄孔至头端距离为(108.6 ± 4.1) μm ，尾长(51.1 ± 2.8) μm ，肛门处体宽(12.1 ± 0.4) μm ，透明尾长(26.6 ± 4.1) μm 。

2. 形态描述

雌虫(图 29-4): 虫体亚球形，具突出的颈部。白色，一些群体经4~6周呈奶油色，当雌虫死亡时，变成亮褐色。头部具有融合的唇和1个或2个明显的唇片。颈部环纹不规则，大多数体壁变成网纹型脊，头骨架发育弱。无刻线。口针锥部约为口针长的50%，与口针杆部区别明显。中食道球大，几乎环形，瓣门新月形。排泄孔明显，位于颈基部。双卵巢充满整个体腔。阴门横裂，周围角质层轻微环形凹陷，形成阴门膜孔。阴门口位于两个细的唇突状新月形区域之间。肛门与阴门膜孔间角质层有12个平行的脊，少数交叉相联。



(Stone, A, R. 1973)

图 29-4 马铃薯白线虫 *Globodera pallida* 雌虫(引自 Stone, 1973)

A. 雌虫前端颈部区域; B. 雌虫头部; C. 雌虫头部顶面观; D. 雌虫整体

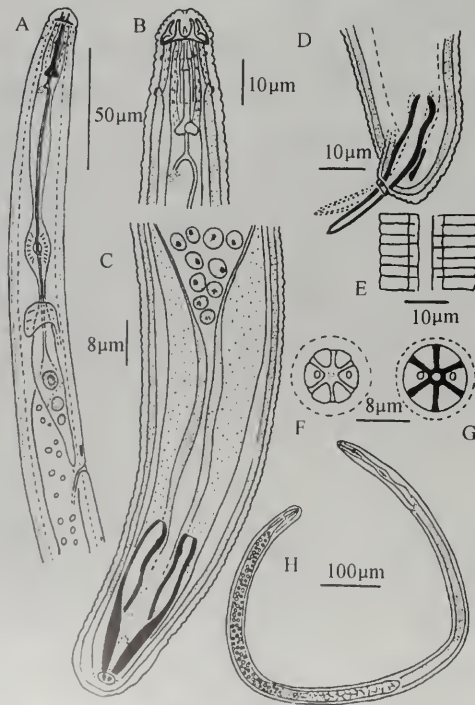


图 29-5 马铃薯白线虫 *Globodera pallida* 雄虫(引自 Stone 1972)

A. 雄虫前端; B. 雄虫头部; C. 雄虫尾区腹面观; D. 雄虫尾部侧面观; E. 雄虫虫体中部侧区; F. 头部顶面观; G. 头部侧面观; H. 雄虫整体

胞囊：新胞囊亮褐色，亚球形，具突出的颈。阴门锥为单环膜孔型。无阴门桥、下桥和其他内腺突，无泡状突，但在阴门区域有时有小突黑色的或变厚的阴门体。肛门明显。无亚晶层。

雄虫(图 29-5)：蠕虫形，尾短末端钝圆，热力杀死呈“C”或“S”形，后部卷曲 90°~180°。角质层具明显的环纹，侧区四条刻线延伸至尾部末端，外刻线有时有网纹但内刻线无网纹。头部缢缩，6 个或 7 个环纹，头骨架严重骨化。有大的口盘和 6 个不规则的唇片。前后头状体分别位于 2~4 个和 6~9 个体环处。口针发育良好，口针基部球向后倾斜，口针锥部约为口针长的 45%，口针套管为口针长的 70%。中食道球椭圆形，具有强壮的新月形瓣门。食道腺核 3 个，背食道腺核大多数明显，食道腺垂体延伸至排泄孔附近，约占到头部体长的 15%。半月体 2 个环纹长，位于排泄孔后 2~3 个环纹处。单精巢，顶端为单个帽状细胞，其位置位于 40%~65%体长处。泄殖腔具小的环形唇，有 2 个强壮的交合刺，引带小(Stone, 1973)。

二龄幼虫(图 29-6)：蠕虫形，但在卵内折叠成 4 折。角质层环纹规则，侧区四条侧线，偶尔有完成的网纹，角质层前 7~8 个环纹较厚。头部圆形，轻微缢缩，4~6 个环纹。口盘由 2 个侧唇环绕，具头感器开口，背腹亚侧唇对经常融合，唇和口盘的连线呈亚梯

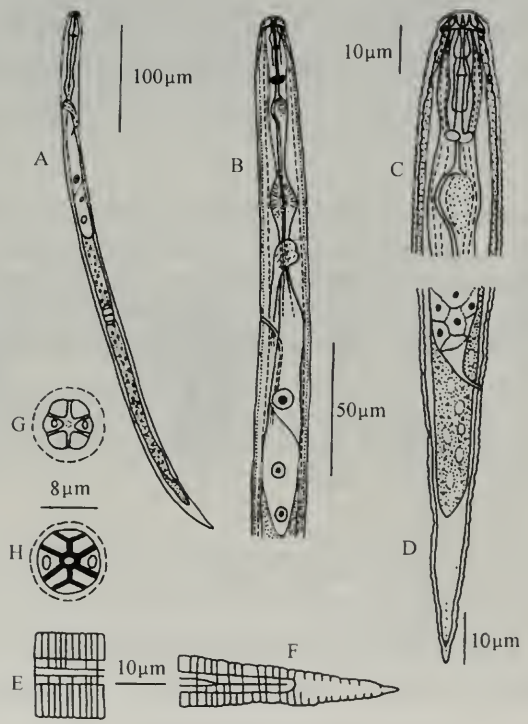


图 29-6 马铃薯白线虫 *Globodera pallida* 二龄幼虫(引自 Stone, 1972)

- A. 二龄幼虫全体; B. 二龄幼虫前端; C. 幼虫头部; D. 幼虫尾部; E. 虫体中部侧区; F. 二龄幼虫尾部侧面观;
- G. 二龄幼虫头部顶面观; H. 头基部水平的顶面观

形 rectangular), 头骨架严重骨化。前头状体和后头状体分别位于 2~3 个和 6~8 个体环处。口针发育好, 口针基部球侧面观前表面具有明显向前的突起, 口针锥部几乎为口针长的 50%。食道腺体向后延伸, 几乎占 35% 的体长。排泄孔位于 20% 体长处。半月体明显, 2 个体环长, 位于排泄孔前 1 个环纹处; 半月小体位于排泄孔后 5~6 个环纹。4 细胞生殖腺体原基约位于体长的 60% 处。无尾感器。尾部渐变细, 末端圆指状, 体腔延伸至尾长的一半, 其余尾长形成一个透明尾区(Stone, 1973)。

(三) 马铃薯金线虫和白线虫的鉴别特征

马铃薯白线虫与马铃薯金线虫在形态上极为相似, 两个种的主要区别主要有以下几个方面(图 29-7, 图 29-8)。

马铃薯白线虫的幼虫口针较长, 为 23.6(21~26) μm , 而金线虫的幼虫口针较短, 为 21.8(21~23) μm ; 白线虫的幼虫体长较长, 为 484(440~525) μm , 而金线虫的幼虫体长较短, 为 468(425~505) μm ; 白线虫的幼虫尾长较长, 为 51.9(46~52) μm , 而金线虫幼虫尾长 43.9(40~50) μm ; 白线虫幼虫口针基部球前表面向前突起, 而金线虫的幼虫口针基部球圆形, 向后倾斜; 白线虫幼虫头部口盘和唇形成梯形轮廓, 而金线虫幼虫口盘与唇形成卵圆形轮廓。白线虫的雌虫为白色或奶油色至亮褐色, 金线虫雌虫为金黄色; 白线虫雌虫口针较长, 为 26.7(23~29) μm , 而金线虫雌虫口针较短, 为 22.9(21~25) μm , 白线虫雌虫阴门与肛门间角质层的脊数 12.2(8~20), 而金线虫雌虫阴门与肛门间角质层的脊数为 21.6(16~31)。白线虫胞囊阴门与肛门间距离较短, 为 32~35 μm , 而金线虫胞囊阴门与肛门间距离较长, 为 88~102 μm (图 29-7)(Turner and Evans, 1998; 彭德良, 1997a, 1997b)。

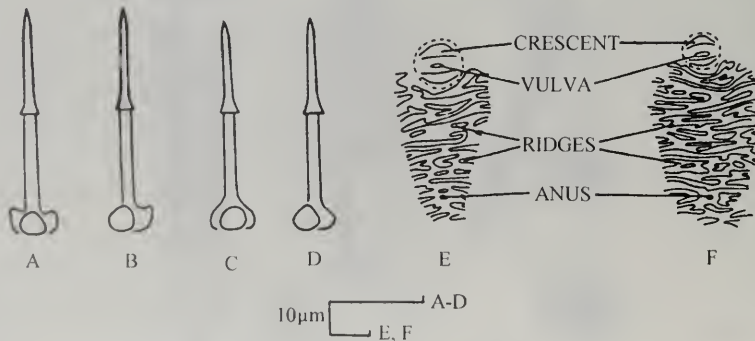


图 29-7 马铃薯金线虫和马铃薯白线虫的区别(引自 Stone, 1973)

A-B. 马铃薯白线虫二龄幼虫口针; C-D. 马铃薯金线虫二龄幼虫口针; E. 马铃薯白线虫雌虫肛门(anus)-阴门区(vulva), 示角质层脊(ridge)数; F. 马铃薯金线虫雌虫肛门-阴门区, 示角质层脊数

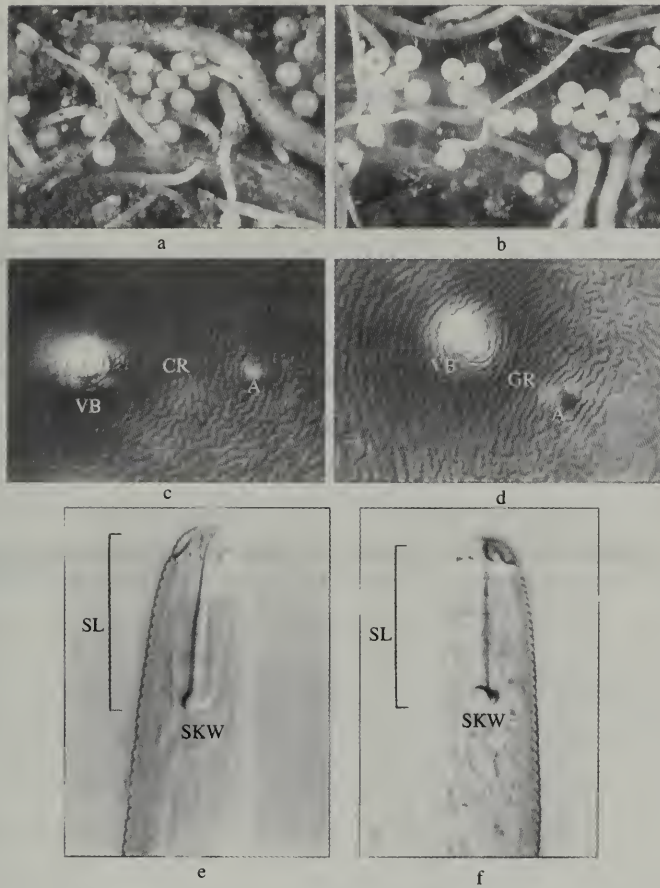


图 29-8 马铃薯金线虫和马铃薯白线虫的形态学鉴别特征(Marker R J and Brodie B B, 1998)

a-b. 根系上的雌虫和胞囊: a. 马铃薯金线虫(金色胞囊); b. 马铃薯白线虫(白色胞囊); c-d. 胞囊阴门锥类型(VB=阴门盆, CR=角质层脊数, A=肝门, GR=格里克比值=从阴门盆最近的脊到肛门的距离/阴门盆的直径): c. 马铃薯金线虫($GR > 3.2$); d. 马铃薯白线虫($GR < 3.0$); e-f. 二龄幼虫口针特征(SL=口针长, SKW=口针基部球宽): e. 马铃薯金线虫(口针长 $21 \sim 23 \mu\text{m}$, 口针基部球宽 $\leq 4 \mu\text{m}$, 口针基部球形); f. 马铃薯白线虫(口针长 $21 \sim 26 \mu\text{m}$, 口针基部球宽 $\geq 4 \mu\text{m}$, 口针基部球强壮, 钩形)

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

人类活动是马铃薯金线虫和白线虫远距离传播和扩散的唯一途径。马铃薯金线虫和白线虫传播到一个新的国家或地区最可能的途径是胞囊随黏附在马铃薯种薯、苗木、花卉鳞球茎、消费或加工用马铃薯块茎上黏附的土壤中被带入。由于马铃薯金线虫和白线虫的胞囊很小(大约 0.5mm 左右), 故即使种薯的带土量很少, 仍可能随土壤被埋在种薯的芽眼或任何不规则的凹面中, 从而传入新的地区。

二、传入中国的可能性

近年来,全球经济一体化使得各国之间贸易往来越来越频繁,不断引进或交换优良农作物品种资源。马铃薯金线虫和白线虫极有可能随马铃薯种质资源及其他植物资源的交换和引进而传入中国,尤其是从疫区国家或地区引进马铃薯种薯时,马铃薯金线虫和白线虫传入的可能性将会成倍地增加。

(一) 检疫截获情况

在 20 世纪 80~90 年代,我国广州、深圳口岸曾从来自英国和北爱尔兰的马铃薯块茎上截获到马铃薯金线虫;南京和上海曾从来自俄罗斯等国家的运输船只上 2 次截获马铃薯金线虫、1 次截获马铃薯白线虫。欧洲植物保护组织(EPPO)的有关国家也频频从马铃薯种薯上截获到马铃薯金线虫和白线虫(表 29-1)。

表 29-1 欧洲植物保护组织(EPPO)地区在马铃薯种薯上截获到马铃薯金线虫和白线虫

截获的线虫	截获国家	输出国家	年份
马铃薯金线虫	爱沙尼亚	白俄罗斯	1999
	爱沙尼亚	波兰	1999
	捷克共和国	法国	1997
	捷克共和国	比利时	1998
	捷克共和国	希腊	1998
	捷克共和国	意大利	1999
	挪威	塞浦路斯	1998
	匈牙利	波兰	1999
	爱尔兰	意大利	1999
	挪威	塞浦路斯	1997
	挪威	英国	1998
	芬兰	瑞典	1997
	西班牙	英国	1999
	荷兰	马耳他	1997
	挪威	塞浦路斯	1997
马铃薯白线虫	挪威	英国	1998
	芬兰	瑞典	1997
	西班牙	英国	1999

(二) 传播到中国寄主植物上的可能性

马铃薯白线虫的胞囊可以随引进的马铃薯种薯或其他植物种苗传入中国, 如果这些种苗被直接种植到地里, 马铃薯白线虫的胞囊随之传入中国的土壤并在田间定殖和繁殖。由于马铃薯白线虫的胞囊抗逆性很强, 可以在土壤内越冬、滞育及度过不良环境, 如果传入地土壤类型和温度合适, 待遇到合适的寄主如马铃薯后, 胞囊内的二龄幼虫开始孵化, 从寄主植物的根部侵入, 从而传播到寄主植物上。

携有马铃薯金线虫和白线虫的胞囊的马铃薯种薯或其他植物种苗如未进行处理就被直接种植在农田里, 马铃薯金线虫和白线虫的胞囊就会在中国的土壤和田间长期存在, 因为马铃薯金线虫和白线虫鞣质的胞囊抗逆性都很强, 胞囊内的卵可以通过越冬、滞育及度过不良环境, 在土壤中存活 20~30 年(Jones, 1970)。一旦温度和湿度条件合适以及遇到合适的寄主如马铃薯等植物, 马铃薯金线虫和白线虫胞囊内的二龄幼虫就会开始孵化, 并从寄主植物的根部侵入, 在寄主植物上发育和繁殖。

三、定殖可能性

(一) 寄主植物

马铃薯金线虫和白线虫最主要的农作物寄主有马铃薯、茄子和番茄。此外, 茄属的 90 种植物包括与马铃薯近缘的植物及具有不同抗性水平的 *Solanum tuberosum andigena*、*S. vernei* 和 *S. sucrense* 均是其寄主(Evans and Stone, 1977)。

(二) 寄主植物在中国的分布

马铃薯是中国的主要农作物之一, 种植面积为世界第一, 1999 年的种植面积为 3 201 970hm²(占世界马铃薯种植面积的 17.8%), 总产量为 55 354 163t, 平均单产为 17 288t/hm², 比世界平均单产略高。

马铃薯在中国既是粮食作物又是重要的经济作物, 它是我国云南、贵州、四川等高寒山区和东北部分地区重要的粮食作物, 也是我国城镇居民重要的蔬菜。因此, 马铃薯在我国国民经济中占有举足轻重的地位。

其他两种农作物寄主番茄和茄子也是中国的重要蔬菜, 种植面积也很广。

(三) 潜在风险地区的环境适宜性

马铃薯胞囊线虫适合在气候凉爽的地区发生。在中国马铃薯生长的主要地区均是气候凉爽的温带地区, 因此气候条件非常适合马铃薯胞囊线虫的发生。如东北、西北和西南地区是我国马铃薯的主要产区, 属气候稍寒冷的温带地区或低纬度的高寒山区, 气候凉爽, 气温较低, 很适合马铃薯胞囊线虫的爆发流行。因此, 一旦马铃薯胞囊线虫随种薯传入我国, 其后果将是灾难性的。

(四) 定殖后扩散的可能性

在自然条件下, 马铃薯白线虫的幼虫会在土壤中作短距离移动, 一旦马铃薯白线虫

在中国定殖，白线虫的胞囊可随马铃薯种薯、田间耕作、农业机械(具)、土壤、带根作物的移动而扩散到其他地区。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

一、危害情况

在马铃薯集约种植地区，马铃薯金线虫和白线虫引起的产量损失非常高，据估计，在一般病区马铃薯因金线虫和白线虫为害造成的年产量损失为 9%，在热带地区，因马铃薯金线虫和白线虫病流行而又没有采取防治措施的地方，产量损失高达 80%~90%，甚至绝收(Jatala and Bridge, 1990)。许多国家采取了严格管理措施，将马铃薯金线虫和白线虫的群体密度压在很低水平，在这种情况下虽然马铃薯的产量没有遭受直接损失，但是必须承担长期监测和检疫的费用(Brown *et al.*, 1983)。

马铃薯块茎产量与单位土壤中含金线虫卵数密切相关，当金线虫卵密度为每克土 20 粒时，马铃薯产量平均损失为 2.75t/hm²，最大损失为 6.25t/hm²(Brown and Sykes, 1983)。但马铃薯金线虫和白线虫的危害阈值会因土壤类型、地理位置和气候条件不同而存在较大差异。在意大利，马铃薯金线虫危害阈值为每克土 1.2~2.1 个卵，马铃薯白线虫群体阈值为每克土 1.7 个卵 (Greco *et al.*, 1982)。在荷兰，马铃薯品种对金线虫的耐性阈值为 1.5 个卵/g 土，当每克土壤中马铃薯金线虫的卵为 9、28、128 个时，造成马铃薯产量损失分别为 20%、50%和 90%(Seihorst, 1982)。Evens and Brodie(1980)报道，在马铃薯金线虫广泛分布地区实施各种严格的防治措施后，金线虫引起的马铃薯产量的损失仍然达 9%，如在某一地区流行而不对其给予积极防治的话，收获的马铃薯比所种植的马铃薯种薯还要少。尤其是在发生某种致病型而无抗病品种可以种植的情况下，连年重茬种植减产 90%，甚至绝产(Brown, 1969; Brodie, 1984; Jatala and Bridge, 1990; Jones, 1970; Philis, 1991)。

二、经济重要性评估

在欧洲一些国家以及我国云南、贵州、四川等高寒山区和东北部分地区，马铃薯既是粮食作物又是重要的经济作物，因而其在水世界经济中的地位是举足轻重的。据估计，在病区，马铃薯金线虫和白线虫为害造成的年产量损失为 20%~30%，而在马铃薯金线虫病流行而又没有采取防治措施的地方，产量损失更高达 90%，甚至绝收，造成巨大的经济损失甚至饥荒。此外，马铃薯金线虫嗜好的另外两种寄生番茄和茄子也是具有重要经济价值的两种蔬菜，一旦马铃薯金线虫传入为害上述作物，损失将是巨大的。

马铃薯金线虫与大丽菊轮枝菌(*Verticillium dahliae*)复合侵染引起马铃薯早死病(early dying disease) (Harrison, 1971)。金线虫幼虫侵染根的皮层、中柱鞘和内皮层，为大丽菊轮枝菌的侵入提供了通道，有助于病原菌攻克根的自然防御能力；大丽菊轮枝菌侵染根部也破坏了马铃薯对马铃薯金线虫的抗病性(Evans, 1983b)。这种复合侵染性病害一旦未能在发病初期控制，带给马铃薯的危害将会是毁灭性的。马铃薯白线虫与青枯病菌(*Ralstonia solanacearum*)及轮枝菌(*V. dahliae*)之间的相互作用亦有过报道(Jatala and Bridge, 1990; Franco and Bendezu, 1985)。

马铃薯金线虫和白线虫对低温及化学物质的抗逆性极强，如果土壤类型和温度合适的话，金线虫胞囊内的卵可存活 28 年之久。在无寄主植物的情况下，在冷凉土壤中，马铃薯金线虫的年衰退率为 18% 左右。对于马铃薯金线虫和白线虫，目前尚无有效的根除办法，无成功铲除马铃薯金线虫的报道，其主要困难是无法在传入的早期就检测到金线虫和白线虫，一般而言，金线虫和白线虫从传入到定殖后达到可被检测到的水平至少需要 7~8 年时间。

目前全世界有 106 个国家将马铃薯金线虫和白线虫列为重大检疫性有害生物，并对其实行官方治理。

马铃薯金线虫和白线虫是中国政府确认的检疫性有害生物，在中国无分布，随马铃薯种薯等繁殖材料及其他种苗传入中国的可能性很大，在中国定殖及扩散的可能性大，经济影响十分巨大，因此应将马铃薯金线虫和白线虫列为重大外来入侵有害生物，进行早期预警研究。

第五节 生物学特性

一、侵染循环

胞囊内的卵维持休眠状况直到有合适的刺激物如寄主植物根释放的化学刺激物质的刺激才开始孵化，马铃薯胞囊线虫的卵能在胞囊内保持休眠 30 年仍然维持活力(Winslow and Willis, 1972)。在休眠阶段，卵对杀线虫剂有抗性(Spears, 1968)。

在寄主根部分泌物的刺激下，从土壤中线虫胞囊内孵化出的马铃薯白线虫的二龄幼虫侵入到寄主根内，在根的中柱鞘、皮层或内皮层的一组细胞中取食，将其转变成大的合胞体转移细胞(syncytial transfer cell)，此后线虫在此营固定性内寄生生活，并完成其余的发育过程；经 2 次蜕皮，二龄幼虫变为 3 龄幼虫、4 龄幼虫，而从 3 龄幼虫开始出现性别的分化，雄性幼虫仍为蠕虫状，而雌性幼虫的身体开始膨大；4 龄雌性幼虫再蜕皮变为雌成虫，虫体的后部不断膨大，撑破根表皮露出根外，仅头和颈部固着于根内；蠕虫状雄虫与雌虫交配后死亡，而雌虫继续留在根上。雌虫显露于根表时呈白色，在雌虫完全成熟时，其表皮变硬、变褐色从而成为保护壳，这就是胞囊，内含大量的卵。当马铃薯收获后，胞囊从根表面脱落掉入土中，其内的卵休眠成为下一季作物的初侵染源。鞣质的胞囊壁粗糙而且厚，比较坚硬，保护内部的卵，使其土壤内越冬、滞育及度过不良环境。保留在胞囊内的卵，当受到寄主植物根分泌物刺激时 60%~80% 卵可以孵化，田间缺少茄属寄主植物时每年大约有 1/3 卵能自然孵化，另一些保留在胞囊内的卵经二十多年后还具有活力。在一个生长季节内，马铃薯白线虫的生活史为 1 代(Morris, 1971; Franco, 1979)。

马铃薯金线虫和白线虫是固定性内寄生线虫。以鞣质的胞囊在土壤内越冬、滞育及度过不良环境。棕褐色的胞囊内常含有 300~500 个卵，如果土壤类型和温度合适，胞囊内的卵可以存活长达 28 年(Baldwin and Mundoo campo, 1991; Grainger, 1964)。在生长季节，温、湿度适宜的条件下，在寄主根部分泌物的刺激下，卵壳脂蛋白膜的渗透性发生变化，从而打破卵的滞育状况，刺激卵孵化。根分泌物允许溶质的渗漏并增加氧气的吸收和增加幼虫的水化作用，幼虫的水化作用又与亚腹腺体中分泌的颗粒的积累有关，以

便孵化后取食。感病和抗病品种中的根渗物具有相似的刺激孵化作用效果。孵化的 2 龄幼虫从寄主植物根尖附近及新侧根侵入，进入植物根内并移动寻找适合取食位点，成为固定性取食，并在中柱鞘、皮层或内皮层细胞上取食，幼虫注射腺体分泌物并诱导头部周围寄主细胞增大，融合形成合胞体转移细胞 (syncytial transfer cell)(Brodie *et al.*, 1993)，合胞体提供金线虫和白线虫发育所需的营养，此后金线虫和白线虫的幼虫在此营固定性内寄生生活。合胞体内的细胞质变浓密，呈颗粒状，其细胞壁向内生长，临近的输导组织内表面增加，使得营养源源不断地从植物其他组织传递到合胞体。幼虫持续不断地从合胞体细胞获取营养直至完成发育，2 龄幼虫经第 2 次蜕皮后变成三龄幼虫，此时开始出现性别分化称之为三龄雌性幼虫和三龄雄性幼虫；再经第 3 次蜕皮成四龄雌性幼虫和四龄雄性幼虫。四龄雄性幼虫卷曲在第 3 次蜕皮的角质层内，再经第 4 次蜕皮变成雄成虫，离开植株进入土内，与雌成虫交配数次，此时雄成虫不再取食，但可在土壤内存活 10 天左右。四龄雌性幼虫虫体呈腊肠状，经第 4 次蜕皮后变成雌成虫，雌成虫的后端不断膨大，撑破根表皮露出根外，仅头和颈部固着于根内。雌成虫释放性信息素吸引雄成虫交配、受精产卵，雌成虫初为白色，死亡后体壁变厚，呈黄色，最后变成金黄色，故称之为金线虫(Brodie *et al.*, 1993)。马铃薯金线虫雌虫经 4~6 个星期金黄色阶段；雌虫完全成熟时体壁变硬，转变为褐色胞囊。

二、生活史

马铃薯胞囊线虫的生活史很大程度上受温度、湿度、昼长和土壤因素的影响。总的来说，马铃薯胞囊线虫能在任何能够种植马铃薯的环境中存活。依据土壤温度的不同，马铃薯完成一个生活史需要 38~48d(Chitwood and Buhner, 1945)。

马铃薯金线虫和白线虫的生活史与寄主植物的生活周期保持同步，适合马铃薯生长的环境条件也最适合马铃薯金线虫和白线虫的生存和繁殖。一般来说，较低的土壤温度下，金线虫和白线虫处于较为活跃的状态；而土壤维持长时间的高温，金线虫和白线虫的生长发育就受到抑制。当土壤温度达到 10℃ 时，在寄主植物根分泌物刺激下，胞囊内的卵接受合适的孵化信号(Clarke and Hennessy, 1984)，二龄幼虫从卵内孵化逸出胞囊向寄主植物根系迁移。寄主植物根渗物刺激 60%~80% 的卵孵化，而在水中仅仅有 5% 的卵孵化。其余的卵直到随后几年都不孵化。马铃薯金线虫孵化的最适温度为 20℃ 左右，低限为 10℃，生长发育适温为 20~25℃。马铃薯白线虫孵化的最适温度为 16℃ 左右，土壤温度超过 30℃ 以后，白线虫不能正常发育(Jatala and Bridge, 1990)。

二龄幼虫侵入根尖开始在根内取食。根部皮层的细胞受二龄幼虫的取食的刺激形成合胞体细胞，此合胞体细胞为线虫的发育提供营养。在取食位点形成后，幼虫生长发育，经 3 次脱皮后变成成虫。

雄性幼虫仍然活跃，在寄主植物上取食直至发育成熟，雄虫发育成熟后停止取食，变成蠕虫形寻找雌虫交配(Green *et al.*, 1970)。雄成虫并不取食。食物供应决定雌雄性别，在不利的环境条件和严重侵染时，更多的幼虫发育成雄虫。马铃薯胞囊线虫进行两性生殖。雄虫受到雌虫性信息素的吸引进行交配。雄虫可以交配几次。交配后，每头雌虫产卵约 500 粒(Stone, 1973)，而后死亡，死亡雌虫的角质层形成胞囊。

在缺乏寄主的情况下，马铃薯胞囊线虫的群体密度的年度衰减率在不同的土壤类型

中略有变化,在冷凉土壤(如苏格兰土壤)年度衰减率为18%,温暖的土壤中为50%,平均衰减率约为30%。

马铃薯金线虫在较冷温度条件下如英伦三岛,每年主要发生1代,发生时期依赖于种植时期,当在4月上中旬和6月中旬种植时,2龄幼虫侵入90天后可完成1代,在潮湿的土壤中少量的第2代可能发生,但在25℃以上发生量急剧衰减。在温暖的以色列,仅仅冬季种植的作物方可能被侵染。

在无寄主植物的情况下,在寒冷土壤中的马铃薯金线虫群体的年衰退率为18%左右,在温度适中的土壤中为50%~80%,在高温土壤中可高达95%。在寄主植物根分泌物存在的情况下,可刺激60%~80%卵孵化,在砂性土壤的卵孵化率大于泥炭土和黏土(Jones, 1970)。由于根空间的竞争和它们对性别的影响,金线虫在寄主作物上的繁殖率很大程度上依赖于初始群体密度。当每克土壤中有少量马铃薯金线虫的卵时,繁殖率可高达60倍,而当每克土壤马铃薯金线虫卵量大于100时,收获后金线虫的群体可能较小,这是由于根系受到破坏和取食位点减少的缘故。

马铃薯金线虫和白线虫具有休眠和滞育的特性,在不良环境压力的影响下,即使作物生长期有活跃的孵化刺激物质存在,孵化也会停止,恶劣环境消除后,幼虫又开始迅速孵化。马铃薯金线虫的胞囊对卵具有保护作用,有很强的抗脱水能力。这些特性使线虫能在不良的环境中得以生存,并且有利于远程传播。

三、传播途径和存活机制

马铃薯金线虫和白线虫远距离传播主要依靠污染的马铃薯种薯、黏附在种薯上的病土以及其他带根的繁殖材料的调运(Jones, 1970)。在田间自然条件下,金线虫和白线虫通过水流、灌溉水和雨水传播,农具和人的鞋底可以携带白线虫的胞囊,病田土壤的翻耕和搬运也是传播途径之一,大风也有传播作用。马铃薯金线虫和白线虫完成1个世代虽然只要30~50d,但大部分卵有蛰伏特性,第二年才孵化,因此当年田间病害的再侵染不重要。卵由于有胞囊的保护,对土壤干燥和极端低温(-15℃)等不良环境条件抵抗力很强,在没有寄主的土壤及极端逆境中,胞囊内的卵可以存活20~30年(Jones, 1970)。

四、发病的环境因素

(一) 土壤条件

有利于马铃薯生长发育的环境条件也有利于马铃薯金线虫和白线虫的繁殖和存活。马铃薯白线虫在冷凉土壤中繁殖旺盛,而长时间的高温土壤将限制马铃薯白线虫的发育和繁殖(Jones, 1970),透气良好的砂土、粉砂土和泥炭土有利于白线虫移动、侵入和为害。

(二) 气候条件

马铃薯金线虫群体数量的增长随气候和季节变化较大。一般土温达到10℃时,金线虫开始活动,孵化的最适温度为20℃,20~25℃为侵入和发育的最适温度,在这种温度范围内,湿度达50%~70%发生较重,30℃以上高温和干燥条件下发病轻。马铃薯白线虫孵化的最适温度为16℃,16~25℃为侵入和发育的最适温度。

(三) 昼长和光周期

昼长或光周期对马铃薯金线虫的生长、孵化和侵染性具有较明显的影响。生长在有稳定而充足的光照条件下的植物比光照不足的植物产生胞囊的数量多;生长在完全黑暗中的植物上的胞囊会延长滞育期。植物生长昼长为 16h 产生胞囊的数目、孵化率和侵染率都比昼长 12h 高。

(四) 品种

不同的马铃薯品种对马铃薯金线虫的抗性有很大的差异,目前,在欧洲及其他国家已培育出抗马铃薯胞囊线虫的马铃薯品种有 135 个,这些品种中的大多数对马铃薯金线虫都具有较好的抗性。

第六节 风险分析与早期预警系统

在全世界所有作物有害生物中,马铃薯胞囊线虫(金线虫和白线虫)是最难防治的有害生物(Chitwood, 1951)。一旦马铃薯胞囊线虫在一个地方定殖,就很难根除,因为马铃薯胞囊线虫是具有最高存活率的生物之一,由于胞囊内的卵受到持久性胞囊壁的保护,所以马铃薯胞囊线虫能够存活 30 年之久(Winslow and Willis, 1972; Chitwood, 1951)。此外,建立线虫种群很慢,它们的存在不容易检测,一旦马铃薯胞囊线虫的种群增加到很高的水平,必然会导致严重的作物损失。

马铃薯金线虫和白线虫是中国政府确认的检疫性有害生物,迄今在中国无分布。马铃薯是我国重要的经济作物,马铃薯金线虫和白线虫传入后,有可能对马铃薯的生产造成毁灭性打击,造成巨大经济损失,社会影响巨大,因此,应对马铃薯白线虫进行风险分析和早期预警系统研究。

第七节 预防、根除与控制

由于马铃薯金线虫和白线虫是一种严重的毁灭性线虫,我国目前还未发现有分布和为害,因此在防治金线虫和白线虫的策略上必须采取严格的检疫措施;同时也可轮作、选栽抗病品种以及其他的综合防治措施,可严密控制此线虫的发生。

一、严格实施检疫制度

禁止从马铃薯金线虫和白线虫疫区引进种薯。因为金线虫和白线虫的胞囊能随土壤传播,因此从国外引进马铃薯应禁止带土,而且引进的马铃薯应在有严密的检疫设施条件下连续隔离种植两个生长季节方可放行,对进口马铃薯检疫检验除检查薯块外,还应检查薯块所携带的土壤,发现马铃薯金线虫和白线虫应立即销毁。

(一) 检验法规

植物检疫是通过法律禁止马铃薯白线虫传入和蔓延的重要措施之一。目前全世界

106 国家将马铃薯金线虫列为重大检疫性有害生物,对其实施官方治理。中国政府于 1992 年重申马铃薯金线虫和白线虫是重大的检疫性有害生物。根据检疫系列规定,有关的货物进口、出口、国内调运时都应进行检验,同时这种线虫还常常在其他植物的块茎、根茎、球茎、鳞茎、砧木上黏附的泥中发现,因此凡是从病区或进口来的上述繁殖材料都要用水冲洗、刷净或用温水浸泡或用化学杀线虫剂处理后方可种植,以降低污染程度。

(二) 检验方法

对进口马铃薯的检疫,主要是检验马铃薯金线虫和白线虫的胞囊,两种虫的检测方法基本相同。

1. 现场检验与抽样

现场检验:检查马铃薯种薯、食用马铃薯薯块的带土情况,肉眼观察薯块基本不带土壤,则对进境马铃薯薯块进行随机抽样,带回实验室检验;肉眼观察发现薯块带有土壤,应将带有土壤的所有薯块带回实验室进行检查。查看带根、土的茄属植物及其他带根、土的植物繁殖材料的带土情况,收集上述植物繁殖材料和运输工具上可能携带的土壤,连同植物繁殖材料一并带回实验室检查。

抽样:马铃薯块茎在 50kg 以下的要全部检查;大批量的马铃薯,棋盘式或五点式随机抽样。抽样时应注意上、中、下层的代表性。抽样比例以品种为单位,按总件数的 10% 抽样,每件按种薯总数的 5%~10% 抽样。检查样本确定后,用毛刷刷落并收集附在薯块上的泥土。

2. 室内分离和检验方法

土壤的收集:用毛刷将马铃薯等块茎和根上的土壤刷下来,特别注意收集薯眼等内凹表面的土壤;若马铃薯种薯等繁殖材料的带土量小,应用水将马铃薯块茎上黏附的少量土洗刷下来。

胞囊分离根据不同情况有以下三种分离方法。

胞囊漂浮器分离法分离胞囊:此方法一般用于检验 500g 以上的泥土。将现场采集到的土样铺于干净的浅瓷盘内,置于通风无阳光处凉干,用手(或用小的圆木棍)将泥土轻轻压碎,用孔径为 3mm 的标准筛过筛,除去泥土中混杂的植物组织和粗砂等杂物后备用。将漂浮筒和下筛淋湿。漂浮筒内灌满清水。在上筛中放置凉干的土壤样品 500g 左右。用强水流冲洗,使土样全部被淋洗至漂浮筒内。进入筒内的土粒因较重而逐渐下沉,而较轻的胞囊和一些有机杂物则陆续向上漂浮。经 1~2min 后漂浮于筒口水面之上。再由上筛加水至漂浮筒内,使漂浮于筒口的胞囊和杂物沿水槽流到下筛(100 目)上面。将下筛含胞囊的残留物冲洗至 500~1000ml 的三角瓶内,往瓶内加清水,直至瓶口处。静置片刻,待漂浮物浮于液面时,将漂浮物倒入装有滤纸的漏斗中过滤,待滤纸晾干后即可镜检。

简易漂浮法分离胞囊:收集的土壤数量在 500g 以下时可采用此方法分离胞囊。将上述泥土倒入 2 000ml 的三角瓶中,加 1 500ml 水,充分摇晃使之呈悬浮液,然后加水至瓶口处,静置片刻,待三角瓶颈部的水变清时,将三角瓶瓶口的漂浮物通过 20 目和 100 目的套筛,彻底冲洗 20 目筛网,使所有的胞囊被冲到 100 目的筛网上。将 100 目筛网上

的收集物轻轻地倒入装有定性滤纸的漏斗中过滤，待滤纸晾干后即可在解剖镜下检查是否有胞囊。

直接过筛分离胞囊：马铃薯薯块上的马铃薯白线虫胞囊的分离尽量使用该方法。将洗涤马铃薯薯块的泥水溶液倒入 20~100~500 目的三层套筛中，然后用水喷淋冲洗，使杂质留在 20 目的粗筛内，而胞囊则会被冲到 100 目的细筛中，500 目的网筛由于收集胞囊线虫的二龄幼虫、雄虫和其他蠕虫形线虫。将 100 筛网上的胞囊和残余物冲洗入三角瓶内，一并倒入装有定性滤纸的漏斗中过滤，待滤纸晾干后镜检。将 500 目网筛上的收集物冲洗到小培养皿中镜检。

3. 室内镜检进行金线虫和白线虫的种类鉴定

晾干后的滤纸可在解剖镜下检查，寻找胞囊。若发现胞囊，则用竹针或眉笔或 0 号狼毛笔将其挑至凹玻片上或装有白色滤纸的小培养皿中。制作胞囊和阴门锥玻片标本，并在显微镜下进行鉴定。

金线虫和白线虫的种类鉴定：在显微镜下观察胞囊和阴门锥形态特征。观察内容包括胞囊外形、外表色泽、角质膜花纹，测量胞囊长度、宽度和颈部长，阴门锥要观察膜孔类型、有无阴门桥、下桥及肛门到阴门之间的隆起脊纹数，测量阴门膜孔长度、宽度、阴门裂长度和肛门至阴门的距离。

二、轮作

马铃薯金线虫和白线虫的寄主范围窄，利用寄主范围比较窄的特点，将马铃薯与非茄科作物轮种，即造成田间没有寄主，金线虫和白线虫群体数量会逐年下降。以后胞囊内的卵会以一定的比例死亡或孵化，连续数年不栽种马铃薯会在很大程度上减少线虫数量。通常采用 5~9 年不种马铃薯，可取得较好的防治效果。采用轮作加抗病品种以及杀线虫剂(熏蒸剂或内吸性颗粒剂)的综合措施，可以将线虫数量控制在经济阈值之下。试验证明，在英国诸岛上，线虫对土壤缺少寄主的侵染程度每年以 30%~50% 下降，6~7 年后，田间线虫造成的损失达到允许水平以下(Trudgill *et al.*, 1987)。另外，早熟品种的马铃薯和供制罐头用马铃薯，生育期比较短，能限制线虫群体数量增加，可以缩短轮作期(Winslow and Willis, 1972)。

三、选用抗病品种

种植抗病品种，每年可以减少马铃薯金线虫和白线虫群体量约 80%~85%，抗病品种能抑制马铃薯金线虫和白线虫的雌虫发育，在金线虫和白线虫群体数量极高时，抗病品种也会因受到数量极多的幼虫侵入，产量受到一定程度的损失。

目前许多发病的国家的育种学家利用主效基因和多基因抗性培育出了抗金线虫的马铃薯品种，多数是单抗金线虫，如在英伦三岛已有 7 个抗金线虫 Ro1 致病型和 Ro4 致病型的抗性品种，如 Maris Piper、Maris Anchor、Pentland Javelin、Pentland。1966 年，Cornell 大学的植物育种学家育成了一个新的马铃薯品种 Peconic，与纽约的普通栽培品种 Katahdin 类似，这个 Peconic 抗纽芬兰的马铃薯金线虫小种(Spears, 1968)。

发现马铃薯品种 *Solanum tuberosum andigena* CPC 克隆 1673 对马铃薯金线虫具有抗

性,推动了全球培育携此抗性基因的商业化品种的研究(Ellenby,1954)。后来证实这种抗性是单显性基因,称为 *H1* 基因,这种抗性是稳定的,能阻碍马铃薯金线虫的致病型 Ro1 和 Ro4 的繁殖,对金线虫其他致病型和对马铃薯白线虫没有抗性(Cook and Evans, 1987)。马铃薯的双倍体种(主要是 *S. vernei*)以及三倍体 *S. tuberosum andigena* 已被用作培育抗马铃薯金线虫毒性型和马铃薯白线虫的抗病品种的抗源。至 1995 年全世界培育出的抗马铃薯胞囊线虫的品种 135 个,这些品种大多数只对金线虫有抗性(Trudgill *et al.*, 1998; Baldwin and Mundoocampo, 1991)。目前对马铃薯白线虫抗性最好的品种是秘鲁的 Maria Huanca, 此品种对广泛分布于南非和欧洲的两个白线虫的致病型有高度抗性(Franco and Gonzalez, 1990)。至 1995 年,全世界培育出的抗马铃薯白线虫的马铃薯品种有 22 个,这些品种只对白线虫有抗性(Trudgill *et al.*, 1998)。

四、化学防治

土壤熏蒸杀线虫剂和非熏蒸杀线虫剂都用于防治马铃薯金线虫和白线虫。当采取检疫措施需要立即降低土壤内金线虫密度时,土壤熏蒸杀线虫剂如溴甲烷、威百亩、必速灭、D-D 混剂等常用来防治马铃薯金线虫,并在欧洲及其他一些国家获得成功。在美国,应用 1,3-D 处理大量的马铃薯至到 1984 年仍然被当作一项检疫处理措施,大剂量(420L/hm²)防治马铃薯金线虫的效果高达 99%(Brodie and Mai, 1989)。在荷兰,综合防治措施中广泛使用二氯乙烯和威百亩防治淀粉马铃薯上的金线虫(Brodie *et al.*, 1993)。常规作物保护也可以应用熏蒸性杀线虫剂(Whitehead, 1986)。(Brodie and Mai, 1989)。在单季马铃薯种植区,涕灭威、草肟威都是很好的杀线剂,其用量是每公顷 3~5kg(有效成分);另外克线磷、灭克磷也是很有效的药剂,但在有机质丰富的土壤里,效果较差。非熏蒸杀线虫剂可在播种前和作物生长期施用防治马铃薯金线虫,氨基甲酸酯类杀线虫剂涕灭威和万强广泛用于防治马铃薯金线虫,使用方法可以土壤表面处理和再定植时应用(Whitehead, 1986)。值得注意的是,所有杀线剂对人类均有害,在使用时操作需要特别地小心,以保证安全,同时这些药剂也很贵,因此大面积用药应考虑经济效益(Whitehead, 1986; 彭德良, 1997)。

五、物理防治

可以利用太阳热力来杀死土壤内的金线虫和白线虫。马铃薯收获后,夏季在病土上覆盖无色或黑色塑料薄膜,并灌水至土湿,40d 后取走覆盖物,防治效果分别达到 77%~96%和 66%~67%(Baldwin and Mundoocampo, 1991; Vovlas and Grammatikaki, 1989)。

(彭德良)

主要参考文献

- 彭德良. 1997a. 马铃薯金线虫. 见: 中华人民共和国动植物检疫局, 农业部植物检疫实验所编. 中国进境有害生物选编. 北京: 中国农业出版社. 49~53 [Peng D L. 1997a. Golden potato cyst nematode. *In*: Selected Pests of Plant Quarantine significance to China. Beijing: China Agricultural Press. 49~53]
- 彭德良. 1997b. 马铃薯白线虫. 见: 中华人民共和国动植物检疫局, 农业部植物检疫实验所编. 中国进境有害生物选编. 北京: 中国农业出版社. 53~58 [Peng D L. 1997b. Pale potato cyst nematode. *In*: Selected Pests of Plant Quarantine significance to

China. Beijing: China Agricultural Press. 53~58]

- Bakker J, Bouwman-Smits L. 1988. Contrasting rates of protein and morphological evolution in cyst nematode species. *Phytopathology*, 78, 900-904
- Baldwin J G, Mundoocampo M. 1991. Heteroderidae, cyst and non-cyst forming nematodes. In: Nickle W R ed. *Manual of Agricultural Nematology*. New York: Marcel Dekker Inc. 275-362
- Brodie B B. 1984. Nematode parasites of potato. In: Nickle W R ed. *Plant and Insect Nematodes*. New York: Marcel Dekker Inc. 167-212
- Brodie B B, Evans K, Franco J. 1993. Nematode parasites of potatoes. In: Evans R, Trudgill D L, Webster J M eds. *Plant Parasitic Nematodes in Temperate Agriculture*. Wallingford: CAB International. 87-132
- Brodie B B, Mai W F. 1989. Control of golden nematodes in the United States. *Annual Review of Phytopathology*, 27: 443-461
- Brown E B. 1969. Assessment of the damage caused to potatoes by potato cyst eelworm, *Heterodera rostochiensis* Woll. *Annals of Applied Biology*, 63: 493-502
- Brown E B, Sykes G B. 1983. Assessment of the losses caused to potato by the potato cyst nematode, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. *Annals of Applied Biology*, 103: 271-276
- Chitwood B C. 1951. The golden nematode of potatoes. U. S. Department of Agriculture, Circular. No. 875
- Chitwood B G, Buhner E M. 1945. Summary of soil fumigant tests made against the golden nematode of potatoes (*Heterodera rostochiensis* Wollenweber), 1942-1944. *Proceedings of the Helminthological Society of Washington*, 12: 39-41
- Clarke A J, Hennessy J. 1984. Movement of *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) juveniles stimulated by potato-root exudate. *Nematologica*, 30: 206-212
- EPPO. 1992. Distribution of *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. Reporting Service 523/16, EPPO Secretariat, Paris
- Evans K. 1983. Interactions between *Globodera pallida*, *G. rostochiensis* and *Verticillium dahliae* on four potato cultivars. *Nematologica*, 28: 143-144
- Evans K, Brodie B B. 1980. The origin and distribution of the golden nematode and its potential in the USA. *American Potato Journal*, 57: 79-89
- Evans K, Franco J, De Scurrah M M. 1975. Distribution of species of potato cyst nematodes in South America. *Nematologica*, 21: 273-280
- Evans K, Stone A R. 1977. A review of the distribution and biology of the potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. *PANS*, 23: 178-189
- Franco J, Bendezú E. 1985. Estudio del complejo *Verticillium dahliae* Kleb. y *Globodera pallida* Stone y su efecto en el comportamiento de algunos cultivares peruanos de papa. *Fitopatología*, 20: 21-27
- Franco J. 1979. Effect of temperature on hatching and multiplication of potato cyst nematodes. *Nematologica*, 25: 237-244
- Franco J. 1981. Potato cyst nematodes, *Globodera* spp. Technical Information Bulletin 9. International Potato Centre, Lima, Peru, 21
- Franco J, Gonzalez A. 1990. A new race of *Globodera pallida* attacking potatoes in Peru. *Revue de Nematologie*, 13: 181-184
- Grainger J. 1964. Factors affecting the control of eelworm diseases. *Nematologica*, 10: 5-20
- Greco N, Di Vito M, Brandonisio A *et al.* 1982. The effect of *Globodera pallida* and *G. rostochiensis* on potato yield. *Nematologica*, 28: 379-386
- Green C D, Greet D N, Jones F G W. 1970. The influence of multiple mating on the reproduction and genetics of *Heterodera rostochiensis* and *H. schachtii*. *Nematologica*, 16: 309-326
- Guile C T. 1970. Further observations on cyst colour changes in potato cyst eelworm pathotypes. *Plant Pathology*, 19: 1-6
- Harrison J A C. 1971. Association between the potato cyst nematode, *Heterodera rostochiensis* Woll. and *Verticillium dahliae* Kleb in the early-dying disease of potatoes. *Annals of Applied Biology*, 67: 185-193
- Jatala P, Bridge J. 1990. Nematode parasites of root and tuber crops. In: Luc M R, Sikora A, Bridge J eds. *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture*. Cambrian Printers Ltd: CAB International. 137-180
- Jones F G W. 1970. The control of the potato cyst nematode. *Journal of the Royal Society of Arts*, 118: 179-199
- Kameraz A Y. 1976. A way of obtaining nematode resistant varieties of potato: VIII Vsesoyuznoe soveshchanie no nemat. odnym bolezniam sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Kishinev. USSR Tezisy dokladov i soobshchenii. 50-51
- Marks R J and Brodie B B eds. 1998. *Potato Cyst Nematodes: Biology, Distribution and Control*. Wallingford: CABI Publishing. UK. 423
- Morris R F. 1971. Distribution and biology of the golden nematode, *Heterodera rostochiensis* in Newfoundland. *Nematologica*, 17: 370-374

- Philis I. 1991. Assessment of potato yield loss caused by the potato cyst nematode *Globodera*. *Rostochiensis Nematologia Mediterranea*, 19(2): 221-225
- Phillips J. 1981. Species of potato cyst nematodes from the Xylophagou Area in Cyprus. *Nematologia Mediterranea*, 12(2): 247-252
- Seiherst J W. 1982. The relationship in field experiments between population density of *Globodera rostochiensis* before planting potatoes and yield of potato tubers. *Nematologica*, 28: 277-284
- Spears J F. 1968. The golden nematode handbook: survey, laboratory, control, and quarantine procedures. USDA Agriculture Handbook. No. 353
- Stone A R. 1972. *Heterodera pallida* n. sp. (Nematoda: Heteroderidae), a second species of potato cyst nematode. *Nematologica*, 18: 591-606
- Stone A R. 1973. *Heterodera rostochiensis*. C. I. H. *Descriptions of Plant-Parasitic Nematodes*, Set. 2. 17. St. Albans, Herts, England.
- Stone A R. 1979. Co-evolution of nematodes and plants. *Symbolae Botanicae Uppsala*, 22(4): 46-61
- Swarup G. 1988. Cyst-forming nematodes of India and thier management. In: Maqbool M A ed. *Advances in Plant Nematology*, 181-201
- Trudgill D L, Evans K, Philips M S. 1998. Potato cyst nematodes: damage mechanisms and tolerance in the potato. In: Marks R J, Brodie B B eds. *Potato Cyst Neamtodes, Biology, Distribution and control*. Wallingford: CABI Pubhshing. 117-133
- Trudigill D L, Philips M S, Alphey T J W. 1987. Integrated control of potato cyst nematode. *Outlook on Agriculture*, 16: 167-172
- Turner S J, Evans K. 1998. The origins, global distribution nadbiology of potato cyst nematodes(*Globodera rostochiensis*(Well.) and *Globodera pallida* Stone). In: Marks R J, Brodie B B eds. *Potato Cyst Nematodes, Biology, Distribution and Control*. CAB international. 7-26
- Vovlas N, Grammatikaki. 1989. Occurrence of potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* and *G. pallida*) on Crete and suggestions for control. *FAO Plant Protection Bulletin*, 3(2)
- Whitehead A G. 1986. Chemical and integrated control of cyst nematodes. In: Lamberti F, Taylor C E eds. *Cyst nematodes*. New York and London: Plenum Press. 413-432
- Winslow R D, Willis R J. 1972. Nematode diseases of potatoes: II Potato cyst nematode, *Heterodera rostochiensis*. In: Webster J ed. *Economic Nematology*. New York: Academic Press. 18-34

第三十章 香蕉穿孔线虫

第一节 起源与分布	640	第三节 生物生态特性与入侵风险	644
第二节 识别特征与早期诊断	642	第四节 预防、根除与控制	647

摘要 香蕉穿孔线虫 *Radopholus similis* (Cobb) Thorne 是一种非常重要的植物病原线虫,引起香蕉发生根腐病、黑头病、猝倒病,香蕉穿孔线虫广泛分布于全世界 59 个国家和地区,造成产量损失 50%以上,由于其危害严重性,许多国家和地区将其列为危险性检疫线虫,我国将其列为一类对外植物检疫对象。本章简要介绍了香蕉穿孔线虫的起源、分布、为害症状、形态鉴别特征、寄主植物范围及危害损失、侵染循环以及预防和控制措施,以便对外来有害生物—香蕉穿孔线虫入侵后的严重性有比较清醒的认识。

关键词 香蕉 穿孔线虫 香蕉穿孔线虫 线虫综合治理

Chapter 30 Burrowing Nematode *Radopholus similis* (Cobb) Thorne

Abstract: The burrowing nematode *Radopholus similis* (Cobb) Thorne has become a significant pest of commercially grown banana worldwide. It is an important quarantine nematode in the world. This nematode has not been reported from China. So it is also a quarantine pest for China. In this chapter we briefly introduced its origin, damage, symptom, morphological characteristics, diagnosis, yield losses and integrated nematode management.

Key words: bananas, burrowing nematode, *Radopholus similis*, integrated nematode management

第一节 起源与分布

一、起源

穿孔线虫 *Radopholus similis* (Cobb) Thorne, 英文俗名 burrowing nematode, 最初由 Cobb 1891 年在斐济的香蕉根内发现,引起香蕉发生根腐病、黑头病、猝倒病等。目前,此线虫在全世界许多香蕉产区均有发生,但是仍有一些香蕉产区尚未发现。关于香蕉穿孔线虫的起源目前还没有统一的定论,Queneberne (1990)推测香蕉穿孔线虫的广泛分布常常与 Cavendish 亚组的香蕉球茎输入有关。Marin 等(1998)认为,早在 19 世纪 20 年代,

当香蕉品种 Gros Michel 到达马提尼克岛时,香蕉穿孔线虫可能已经在中美洲和加勒比海地区蔓延,并提供了一些香蕉穿孔线虫分布的概述,但是并没有驳倒 Queneberne (1990) 的假设。因此,香蕉品种 Gros Michel 在到达美洲以前,可能并没有与香蕉穿孔线虫接触,因为加拉利岛和毛里求斯明显地没有香蕉穿孔线虫侵染香蕉,在中国和越南也没有香蕉穿孔线虫的报道,而中国和越南是矮种香蕉 Cavendish 和 Valery 的发源地,否则香蕉穿孔线虫必然会接触到 Cavendish 和 Valery。香蕉品种 Cavendish 比 Gros Michel 和 Cocos 更感香蕉穿孔线虫,目前 Cavendish 已经成为了替代 Gros Michel 和 Cocos 的重要香蕉品种,这事实上有助于香蕉穿孔线虫在香蕉生产国的广泛传播(Marin *et al.*, 1998)。

二、分布

如图 30-1 所示,穿孔线虫分布极为广泛,现已广泛定殖于世界上绝大多数香蕉产区 和温带温室作物上。目前香蕉穿孔线虫分布于南美、中美、加勒比海地区、非洲的次撒哈拉地区、印度洋各岛以及欧洲、亚洲和大洋洲的 59 个国家和地区。主要分布的国家和地区是日本、印度、越南、韩国、印度尼西亚、马来西亚、巴基斯坦、菲律宾、泰国、斯里兰卡、文莱、阿曼、斐济、巴布亚新几内亚、埃及和整个撒哈拉附近地区,以及印度洋诸岛屿、喀麦隆、赞比亚,加纳、科特迪瓦、肯尼亚、马达加斯加、马拉维、莫桑比克、留尼汪、西非共和国、津巴布维、南非、苏丹、坦桑尼亚、布隆迪、乌干达、索马里、中非共和国、刚果共和国、马德拉群岛、加拿大、美国、哥伦比亚、哥斯达黎加、古巴、厄瓜多尔、伯利兹、法属瓜德罗普岛、洪都拉斯、牙买加、马提尼克、巴拿马、波多黎各、圣卢西亚、多米尼加共和国、巴西、秘鲁、苏里南、委内瑞拉、澳大利亚(新南威尔士、昆士兰、法属西印度群岛、向风群岛、西萨摩亚及太平洋诸岛屿。局部定殖发生于西班牙(马德里),在比利时、法国、德国部分地区温室的观赏植物上定殖发生;荷兰、丹麦均报道发生过香蕉穿孔线虫病,但此线虫在这两个国家未能定殖。在许多香蕉产区包括以色列、加拉利群岛、毛里求斯、东非、中国等国家和地区仍然没有香蕉穿孔线虫的分布(Orton Williamson and Siddiqi, 1973; Loof, 1991; Marin *et al.*, 1998; 葛建军, 1997)。



图 30-1 香蕉穿孔线虫的世界分布(引自 Marin *et al.*, 1998)

●表示相似穿孔线虫侵染地区

第二节 识别特征与早期诊断

一、为害症状特点

穿孔线虫侵染香蕉时，受害部位主要在根部。受害根部皮层有红褐色到黑色的条状病斑，穿孔线虫穿刺皮层，引起幼苗根外表出现暗红色的坏死斑，不久毗邻的坏死斑可融合，根的皮肤组织萎缩、发黑，严重侵染时这种坏死病斑可环绕根。同时，线虫侵入，为害根的表皮层形成坏死，诱发腐生菌的侵入，加速了病部组织的发黑、坏死(图 30-2a)。线虫虽不侵入根的中柱，但可穿通根皮层，形成空腔，线虫则聚集在韧皮部和形成层内取食、发育，而被穿通皮层的根会表现死亡(图 30-2b)。随着幼小侧根的不断死亡，香蕉的根系逐渐减少，最后仅剩几条短残根茬。受线虫危害的香蕉地上部分表现的症状主要为生长不良，发育停滞，叶片及果穗变小，数量也减少，尚未成熟即脱落，严重侵染时导致植株死亡(图 30-2c)(Marin *et al.*, 1998; 葛建军, 1997)。

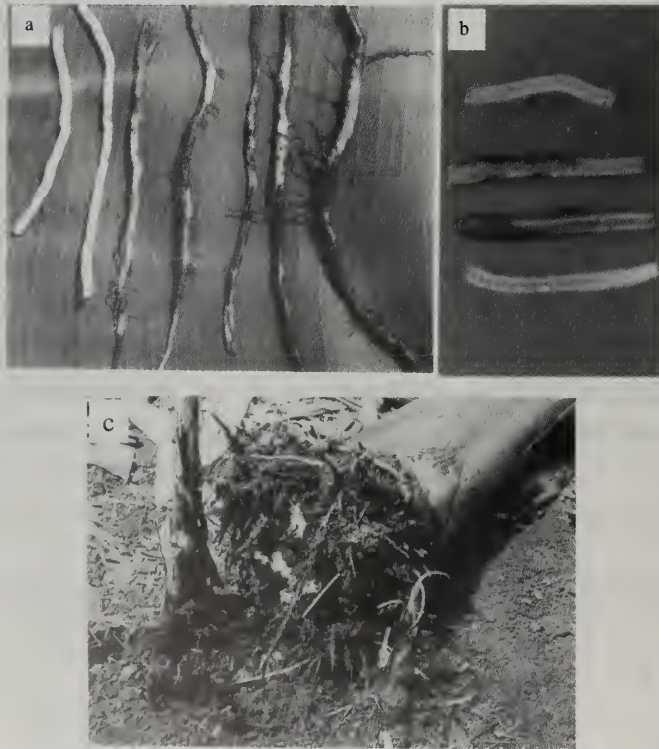


图 30-2 香蕉穿孔线虫病为害症状(Marin *et al.*, 1998)

a. 香蕉发病根症状，发黑；b. 香蕉发病根纵剖面症状；c. 发病香蕉根系

穿孔线虫为害胡椒时导致形成黄化病 (yellow disease)或缓慢萎蔫病(slow-wilt disease)。白色幼嫩的薄根被线虫为害后产生的典型症状是橘黄色至紫色的坏死斑，在老根上此类症状不易被观察到，颜色为褐色。植株幼嫩的根快速、大量的腐烂，导致主根缺乏细的须根，接着较大的侧根也大面积的坏死，使根的生长越来越弱，形成地上部分

症状。地上部分最初症状为叶片下垂，呈黄白色，以后大多数甚至全部叶片表现黄化，接着叶片开始脱落，生长发育停滞，当土壤湿度降低时症状的表现尤为明显。一般在线虫侵染胡椒 3~5 年后，黄化的叶片完全脱落，主茎死亡，称为慢性萎蔫病。在座果的主枝上，花序脱落，在叶、花序脱落完毕后会只剩下光秃秃的树干(Loof, 1991)。侵染椰子树引起非专业化性的衰退症状，主要表现为植株矮化、叶片变黄，叶片及小叶的数量减少，形状变小；开花推迟、芽(苞)脱落、椰子产量降低。穿孔线虫侵入椰子树白色的幼嫩根，在根表面形成橘色的坏死斑，穿孔线虫在此处寄生、繁殖，坏死病斑不断扩大融合，使根大面积腐烂、坏死；椰子树苗被穿孔线虫严重侵染时，幼嫩根组织内呈海绵状，在半坚硬的橘色主根上可导致根表面开裂。一般而言，根的坏死、腐烂仅局限于幼嫩根部分，穿孔线虫不穿刺进入已发育变硬的根或木栓化的表皮层，但由于非常娇嫩的表皮细胞的溶解，穿孔线虫穿刺吸取营养的区域在根冠的后部，但不进入根的中柱。渐渐地，椰子树的根部皮层被线虫穿刺破坏形成空隙，最后空隙融合，形成大的空腔，导致根的死亡(Koshy, 1991a, 1991b; Mohandas and Ramana, 1998)。

二、形态特征

穿孔线虫属线虫纲 Nematoda, 垫刃目 Tylenchida, 垫刃亚目 Tylenchina, 垫刃总科 Tylenchoidea, 短体线虫科 Pratylenchidae, 穿孔线虫属 *Radopholus*。

(一) 形态特征测量值

Sher(1968) 形态测量结果如下:

雌虫($n=12$): $L=520\sim 880\mu\text{m}$, $a=22\sim 30$, $b=4.7\sim 7.4$, $b'=3.5\sim 5.2$, $c=8\sim 13$, $c'=2.9\sim 4.0$, $V=55\sim 61$, 口针长 $17\sim 20\mu\text{m}$; $\sigma=12\sim 20$ 。

雄虫($n=5$): $L=540\sim 670\mu\text{m}$, $a=31\sim 44$, $b=6.1\sim 6.6$, $b'=4.1\sim 4.9$, $c=8\sim 10$, $c'=5.1\sim 6.7$, 口针长 $12\sim 17\mu\text{m}$, 交合刺长 $19\sim 22\mu\text{m}$, 引带长为 $8\sim 12\mu\text{m}$ 。

Taylor(1969) 形态测量结果如下:

年青雌虫($n=20$): $L=540\sim 660\mu\text{m}$, $V=53\sim 58$, 尾长 $57\sim 77\mu\text{m}$, 口针长 $18\mu\text{m}$, 侧尾感器至尾部末端的距离= $44\sim 61\mu\text{m}$ 。

成熟雌虫($n=6$): $L=610\sim 745\mu\text{m}$, $V=52\sim 57$, 尾长 $52\sim 74\mu\text{m}$, 口针长 $18\mu\text{m}$ 。

雄虫($n=12$): $L=535\sim 650\mu\text{m}$, 尾长 $64\sim 86\mu\text{m}$, 口针长 $12\mu\text{m}$, 交合刺长 $18\sim 19\mu\text{m}$, 引带长为 $10\sim 11\mu\text{m}$, 侧尾感器至尾部末端的距离= $46\sim 58\mu\text{m}$ 。

卵= $(50\sim 68)\mu\text{m} \times (19\sim 30)\mu\text{m}$

(二) 形态描述

如图 30-3 所示。

雌虫: 虫体直有时腹面弯曲, 角质层具有明显的环纹。侧区 4 条侧线, 除两端的侧线上有网纹外, 侧线的其他部分无网纹, 侧线始发于近中食道球处, 止于尾末端, 在尾中部附近, 两内侧线汇合。唇区半球形, 有时缢缩, 通常唇环 3~4 个; 唇区骨化程度强, 头骨架背臂和腹臂不宽于亚中唇, 唇片 6 个, 大小相等; 前头小体紧接唇骨架后。口针约 $18\mu\text{m}$ 长, 基部球形发育良好, 前端有凹痕。背部口针基球有时似乎大于腹面口针

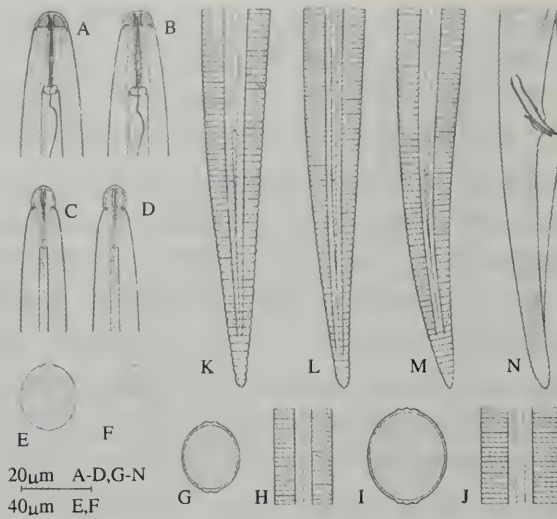


图 30-3 香蕉穿孔线虫(*Radopholus similis*)(Sher, 1968; Orton Williamson and Siddiqi, 1973)

A, B. 雌虫前端; C, D. 雄虫前端; E. 雌虫表面观; F. 雄虫表面观; G. 幼虫虫体中部横切面; H. 幼虫虫体中部侧区; I. 雌虫虫体中部横切面; J. 雌虫中部侧区; K-M. 雌虫后端区域; N. 雄虫后端区域

基球。中食道球圆至卵圆形，发育良好，瓣门明显，食道腺与肠在背面和背侧面重叠。半月体 3 个环纹长，刚好位于排泄孔前。排泄孔位于食道腺—肠交接的瓣门处或此瓣门后。阴门明显，位于虫体中后部。繁殖器官对生，直伸。受精囊球形，充满杆状精子。卵巢内通常有单列卵母细胞。尾部透明区长 9~17 μm ，尾长圆锥形，末端窄圆或有凹痕。侧尾腺开口于尾前部的 1/3 尾长处。

雄虫：口针及食道明显地退化；中食道球和瓣门不明显，口针无明显的基部球。唇区隆起，明显地缢缩，唇区后方 3~5 环纹。唇呈 4 裂状，侧唇明显减少。排泄孔位于中食道球后，半月体紧挨于排泄孔前。单精巢，直伸，精母细胞呈前 3 列后 5 列方式排列，精子棒状。交合伞粗钝齿状，尾部大约 2/3 尾长。交合刺强状，长 18~22 μm ，远末端尖锐。引带棒状，突出，在远末端有锋利的爪状端刺。尾部圆至圆锥形，末端尖。

第三节 生物生态特性与入侵风险

一、生理小种分化现象

穿孔线虫是否存在生理分化现象是迄今为止仍有争议的问题。20 世纪 50 年中期，DuCharme and Birchfield(1956)最早提出穿孔线虫存在 2 个形态上相似的生理小种，即香蕉小种和柑橘小种。香蕉小种侵染香蕉，但不侵染柑橘；柑橘小种既侵染香蕉，也侵染柑橘。在大多数香蕉种植地区均发现有香蕉小种存在，而柑橘小种只在美国的 Florida 州柑橘上发生。Huettel 等(1984)研究发现，香蕉小种染色体数目 $n=4$ ，而柑橘小种的染色体数目 $n=5$ ，二者的同工酶类型和寄主选择也有区别，因此将柑橘小种提升到种的水平，命名为柑橘穿孔线虫(*Radopholus citrophilus*)，香蕉小种仍称为穿孔线虫。无论列为种或小种，因为分离物之间仅仅在致病性上存在差异，而形态上无明显的差异，目前多数线

虫专家普遍认同柑橘穿孔线虫与香蕉穿孔线虫为姊妹种。但近 10 年的分子和细胞遗传学证据显示，香蕉穿孔线虫与柑橘穿孔线虫为同一个种，认为香蕉穿孔线虫是香蕉小种 (Kaplan *et al.*, 1996, 1997; Kaplan and Vanderspool, 2000; Hahn *et al.*, 1996)。但此观点尚未被学术界最终承认，仍有待进一步研究证实。

二、生活史与侵染循环

香蕉穿孔线虫为迁移性内寄生线虫，2、3、4 龄幼虫和雌成虫均具侵染能力，侵入根的任何部位，但通常从根尖处侵入 (Gowen and Queneherve, 1990)。线虫主要为害寄生植物根内的皮层细胞形成空腔，但不进入根的中柱，线虫在根的韧皮部和形成层取食、发育、繁殖后代 (Blake, 1966)。香蕉穿孔线虫可以两性生殖，雌雄交配后繁殖，也能发生孤雌生殖 (Kaplan and Opperman, 2000)。在感病香蕉的组织中，每天雌虫平均产卵 4~5 粒，产卵持续 2 周，8~10d 后卵孵化出二龄幼虫，完成幼虫发育期为 10~13d，在 24~32℃ 条件下，香蕉根上完成一个生活史约 20~25d (Gowen and Queneherve, 1990) (图 30-4)。在温室内 25~28℃ 条件下，穿孔线虫在椰子根上完成一个生活史需 25d (Koshy *et al.*, 1991)。在适宜发病的条件下，香蕉穿孔线虫群体可在 45d 内繁殖 10 倍。每公斤土壤中此线虫的群体可多达 3000 条，而 100g 根内的线虫群体可超过 10 万条。

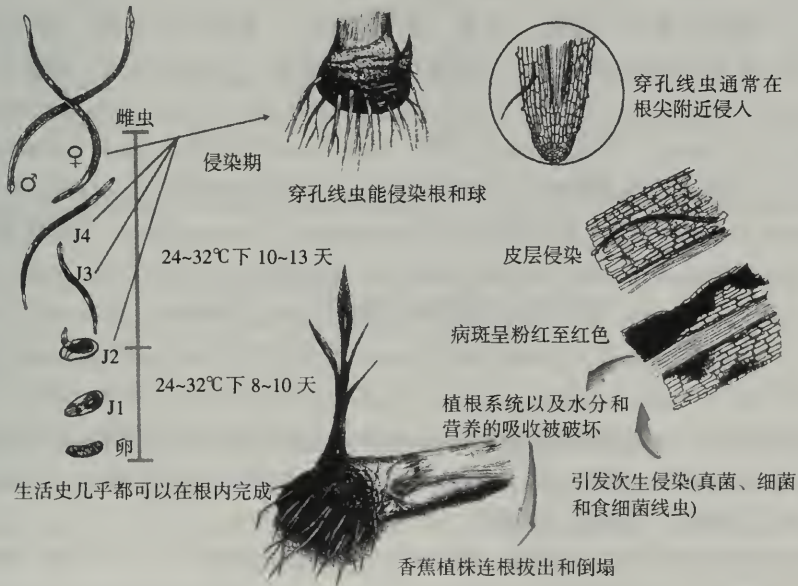


图 30-4 香蕉穿孔线虫(*Radopholus similis*)生活史 (Marin *et al.*, 1998)

在不种植香蕉的土壤中，香蕉穿孔线虫可存活 5 年之久，推测是由于有替代杂草寄主的缘故 (Chabrier and Queneherve, 2002)。在潮湿的土壤 (27~36℃) 中可存活期为 6 个月，而干燥的土壤 (29~39℃) 中仅可存活 1 个月；在温室条件下，于潮湿的土壤 (25.5~28.5℃) 中线虫可存活达 15 个月，在干燥的土壤 (27~31℃) 中存活 3 个月。椰子树幼嫩的新根、少量的降雨及低于 25℃ 的气温条件下，香蕉穿孔线虫繁殖最快。在印度，

10~11 月椰子树根上香蕉穿孔线虫群体数量最大, 而 3~7 月数量最小。在河流冲积层砂壤土中香蕉穿孔线虫繁殖最好, 而在典型的“卡利”泥炭盐土壤中繁殖差; 因此, 在印度的河流冲积地香蕉穿孔线虫对椰子树危害最大, 而在红壤中生长的椰子树受害最轻。此病在田间自然蔓延较快, 故一经发现, 不是点片零星被害, 而是大面积成片的发病 (Koshy *et al.*, 1991)。

香蕉穿孔线虫远距离可通过香蕉、椰子树、槟榔、鳄梨、肖竹芋属等寄主植物的地下部分及黏附的土壤传播, 在田间, 带土的农具、机械、人、畜都是传病媒介。在同一果园或地区内的近距离传播, 主要是通过不同植株根系间相互接触传播或线虫本身游动迁移来实现 (Loof, 1991; Gowen and Queneherve, 1990; Orton Williamson and Siddiqi, 1973)。

三、寄主植物范围

香蕉穿孔线虫的寄主范围非常广, 已报道的寄主有 350 多种, 其中大多数属偶然寄主 (在罹病香蕉树附近存在) 和人工接种寄主。此线虫主要侵染单子叶植物的芭蕉科 (芭蕉属和鹤望兰属植物)、天南星科 (喜林芋属、花烛属植物) 和竹芋科 (肖竹芋属植物), 但也为害双子叶植物。此线虫的主要农作物及经济作物寄主包括香蕉、胡椒、芭蕉、椰子树、槟榔树、芒果、咖啡、茶树、美洲柿、鳄梨、菱叶、油柿、生姜、花生、大豆、高粱、甘蔗、茄子、番茄、蚕豆、香蕉、甘薯、薯蓣、酸豆、姜黄、小豆蔻、肉豆蔻、芫荽、油棕、山葵、王棕 *Roystonea regia*、槟榔竹针葵 *Phoenix canariensis*、鸡蛋果 *Passiflora edulis*、*Cyrtosperma chamissnis*、肯宁安氏假槟榔 *Archontophoenix cunninghamiana*、*Areca (Actinorhynchus) calaparia*、*Areca longlosiana*、*Areca macrocalyx*、*Areca normanbyii*、三雄蕊槟榔 *Areca triandra*、木菠萝属 (*Artocarpus integrifolia*)、绿苋 *Amaranthus viridis*、垣河十万错 *Asystasia gangetica*、袖珍椰子属 (*Chamaedorea cataractarum*)、醉蝶花属 (*Cleome ciliate*)、*Collina elegans*、*Commelina benghalensis*、刺桐属 (*Erythrina dica*)、*Elais gidneensis*、艾麻属 (*Fleurya aestuans*)、羽叶白头树 (羽叶嘉揽) *Garuga pinnata*、*Gliricidia maculata*、*Macaranga indica*、枣椰子 *Phoenix dactylifera*、卡瓦胡椒 *Piper methysticum*、*Phyllanthus amarus*、马齿苋 *Portulaca oleracea*、*Rapis excelsa*、*Solenostemon monostachy*、土人参属 *Talinum triangulare*、磨擦禾属 (*Tripsacum caxum*)、马克肖竹芋 *Calathea makayaha*、明显肖竹芋 *Calathea insignis* 等 (Koshy and Jasy, 1991; <http://lplnemweb.ucdavis.edu/nemaplex/taxadata/G1112.HTM>; 葛建军, 1997)。

香蕉穿孔线虫除严重为害香蕉、胡椒外, 在人工接种条件下, 可严重为害大豆、玉米、高粱、甘蔗; 中度为害茄子、咖啡、番茄。此线虫还可和镰刀菌及小核菌等土壤习居真菌相互作用, 共同形成复合病害, 引起香蕉并发枯萎病症状。

四、入侵风险分析

香蕉穿孔线虫是一种重要的危险入侵植物病原线虫。1969 年苏里南香蕉种植园普遍发生香蕉穿孔线虫病, 造成减产 50% 以上。印尼的邦加岛, 在此病猖獗流行的 20 年内, 2200 万株胡椒树被毁, 造成 90% 以上的植株死亡, 损失严重 (葛建军, 1997)。由于其危害的严重性, 许多国家和地区将其列为危险性检疫线虫, 我国也将其列为一类对外植物

检疫对象(葛建军, 1997)。香蕉、椰子树、槟榔、鳄梨、肖竹芋属等寄主植物的地下部分及黏附的土壤是香蕉穿孔线虫远距离传播的主要途径。因此, 从疫区国家或地区引进花卉苗木或带有土壤的植物种苗时, 该香蕉穿孔线虫有可能被传入中国。近年来, 随着对外交流和旅游业的发展, 入境旅游人员携带花卉种苗的概率增加, 该香蕉穿孔线虫传入我国的风险也日益加大。2002年1月, 我国广州出入境检验检疫局在对来自菲律宾的凤梨种苗实施检疫时, 就截获了香蕉穿孔线虫。广东南海、广州、上海、厦门等口岸也曾多次从来自菲律宾、韩国、马来西亚、新加坡、荷兰等国家的香蕉苗、水溶苗、红掌苗、三角小水溶等植物上截获香蕉穿孔线虫(表 30-1), 为此, 国家质量监督检验检疫总局、农业部、国家林业局联合发布 2003 年第 8 号公告, 对荷兰香蕉穿孔线虫寄主植物及栽培介质采取紧急措施。由此引起了我国政府的高度重视, 要求各级植物检疫部门积极做好防范工作, 严防疫情传入我国。

表 30-1 我国近年来截获的香蕉穿孔线虫情况一览表

截获口岸	截获日期	截获寄主	来源国家	参考文献
上海	1999-02	大巴溶水草	新加坡	宋绍等, 1999
上海	2002-12	肖竹芋	荷兰	国家质量监督检验检疫总局公告, 2003
广东南海	2001-01, 2001-05	红掌苗	韩国 马来西亚	黄法余等, 2001a, 2001b
广东南海	2002-01	果子蔓属, 丽穗凤梨属	菲律宾	黄法余等, 2002
广东广州	1995	香蕉苗	菲律宾	钟国强等, 1999
厦门	1998	火鹤花苗	新加坡	陈勇和王宏毅, 2002

第四节 预防、根除与控制

一、检疫

香蕉穿孔线虫远距离的传播只能借助寄主植物的根和所黏附的土壤来实现, 植物检疫显得十分重要。香蕉穿孔线虫曾随观赏植物根从美国传入法国; 我国台湾省 1991 年从越南、韩国进口的生姜姜块上查见香蕉穿孔线虫; 我国福建亦因引进香蕉苗将此线虫传入国内, 花费了极大的人力、财力、物力才得以将病害铲除, 此沉痛之教训应引以为戒。

应严格禁止香蕉穿孔线虫病疫区的香蕉、观赏作物 (如肖竹芋属、红掌) 幼苗等带根的植物体以及土壤的进口。对于目前认为是非疫区国家的这些植物体的进口必须严格限制, 在出口前和进口后进行严格检查。具体的检验鉴定方法如下: ①根据前面所描述的危害症状, 挑选一些植株的根切成 2~3cm 长碎片, 用贝尔曼漏斗法或浅盘法分离线虫; ②将分离到的线虫制成玻片, 在显微镜下观察, 进行准确的形态鉴定; ③如发现形态特征和测量值与香蕉穿孔线虫一致, 还须进一步进行染色体数目、基数的测定, 初步证实是否为香蕉穿孔线虫; ④为使上述的鉴定确切无误, 还需进行分子生物学的进行, 研究所截获样品的核糖体基因 RFLP 分析和序列测定, 并与国外标准的香蕉穿孔线虫的核糖

体基因序列和 RFLP 谱带进行对比分析。⑤一旦发现了穿孔线虫，还需在检疫隔离苗圃用香蕉、柑橘幼苗作致病性测定，最后确定是否为此线虫。

虽然目前有一些检疫处理措施，但处理效果远不能达到 100%，因此，一旦发现了香蕉穿孔线虫，唯一行之有效的检疫措施就是就地彻底销毁。

二、农业防治

(1) 使用不带线虫的种植材料(椰子、香蕉的幼苗)，间作作物最好不感病，并且不带有香蕉穿孔线虫。

(2) 施用有机肥。加大有机肥的施用，可增强树势，增加土壤中香蕉穿孔线虫的拮抗微生物区系，从而减轻病害。印度每棵胡椒树施 200g 印度苦楝(*Azadirachta indica*)油籽饼、3~5kg 绿色叶肥或 1kg 农家肥，可大大缓解胡椒慢性萎蔫病的发生。

(3) 休闲。在种植无病香蕉组培苗前，简单的自然休闲加机械销毁发病香蕉树根虽然可以防治香蕉穿孔线虫，但是常常不足以减少香蕉穿孔线虫数量。在休闲时，将除草剂草甘膦(glyphosate)注射到发病香蕉树杆的假茎内，有利于成功休闲和防治香蕉穿孔线虫(Chabrier and Queneherve, 2002)。

三、选用抗病品种

在香蕉的生产中，使用抗病、耐病的品种如 Dwarf Cavendish、Yangambi Km5 和 Kunnan，可减少此病的发生(Collingborn *et al.*, 2000)。

四、化学防治

在疫区主要依赖于丙线磷、克线磷、涕灭威、呋喃丹等处理土壤，压低香蕉穿孔线虫群体数量，控制病情的发展。在象牙海岸，应用二溴氯丙烷处理土壤，每公顷香蕉园增产香蕉 22t(增产 101%)；用丙线磷、克线磷处理土壤，香蕉园每公顷分别增产香蕉 24.4t 和 36.6t。在椰子、胡椒生产中，疫区一年两次分别于每株树下施用甲拌磷(phorate)10g 和 3g(有效成分)，防治穿孔线虫效果很好。在美国的试验，用丙线磷和克线磷处理土壤，在第一个产果期分别增产香蕉 188%和 211%；同时第二个产果期的香蕉产量也急剧上升，分别增产 300%和 411%。此外，国外还报道，可削去香蕉等种苗根上被穿孔线虫污染了的组织，接着浸泡于杀线剂药液中，也有较好的防治效果。但是，由于化学防治(尤其是土壤处理)花费的成本很高，不经济，且严重污染环境、地下水等，因此，在胡椒、椰子(尤其是集约化经营的地区)等生产中尽量少使用(葛建军，1997)。

五、物理防治

对于香蕉苗，在线虫感染后使用 55℃ 的热水处理 20~25min 是有效的防治方法，但需一定的设备，且可能伤害植物。此方法对于其他的寄主植物仍有待于试验。

(彭德良 谢丙炎)

主要参考文献

- 陈勇, 李增华. 1995. 香蕉穿孔线虫研究概况. 植物检疫, 9(2): 91~118
- 陈勇, 王宏毅. 2002. 火鹤花穿孔线虫的病源鉴定. 植物检疫, 16(2): 78~80
- 葛建军. 1997. 香蕉穿孔线虫. 见: 中华人民共和国动植物检疫局 农业部植物检疫实验所编. 中国进境植物有害生物选编. 北京: 中国农业出版社. 59~64
- 国家质量监督检验检疫总局公告. 第 8 号(2003-2-14) <http://www.chinajonline.rog/weiquan315/gonggao.asp>
- 黄法余, 陈升毅, 黄箭等. 2001b. 南海口岸从马来西亚红掌上截获香蕉穿孔线虫. 植物检疫, 15(5): 313
- 黄法余, 陈升毅, 梁琼超等. 2002. 从进口凤梨科植物截获香蕉穿孔线虫. 植物检疫, 16(5): 267
- 黄法余, 梁琼超, 邹焕文等. 2001a. 从韩国红掌截获香蕉穿孔线虫. 植物检疫, 15(3): 164
- 宋绍, 威龙君, 郑建中. 1999. 从进口大巴溶水草上截获香蕉穿孔线虫. 植物检疫, 13(4): 255
- 钟国强, 郭权, 黎锦荣等. 1999. 广州口岸进境检疫截获的几种重要检疫性线虫. 云南农业大学学报, 14(增刊): 42~46
- Chabrier C, Queneherve P. 2002. Control of the burrowing nematode (*Radopholus similis* Cobb) on banana: impact of the banana field destruction method on the efficiency of the following fallow. *Crop Protection*, 22: 121~127
- Cobb N A. 1915. *Tylenchus similis*, the cause of a root disease of sugar cane and bananas. *Journal of Agric Res*, 4: 561~568
- Collingborn F M B, Gowen S R, Mueller-Harvey I. 2000. Investigation into the biochemical basis for nematode resistance in roots of three *Musa* cultivars in response to *Radopholus similis* infection. *Journal of Agric. Food. Chem.*, 48: 5297~5301
- Gowen S, Queneherve P. 1990. Nematode parasites of banana plantains and abaca. In: Luc M, Sikora R A, Bridge J eds. *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture*. Wallingford: CAB International. 431~460
- Hahn M L, Burrows P R, Wright D J. 1996. Genomic diversity between *Radopholus similis* populations from around the world detected by RAPD-PCR analysis. *Nematologia*, 42: 537~545
- Huettel R N, Dickson D W, Kaplan D T. 1984. *Radopholus citropholus* sp. n. nematoda, a sibling species of *Radopholus similis*. *Proc. Helminthol. Soc. Wash.*, 51: 32~35
- Kaplan D T, Opperman C H. 2000. Reproductive strategies and karyotype of the burrowing nematode, *Radopholus similis*. *Journal of Nematology*, 32: 126~163
- Kaplan D T, Thomas W K, Frisse L M. *et al.* 2000. Phylogenetic analysis of geographically diverse *Radopholus similis* via rDNA sequence reveals a momomorphic motif. *Journal of Nematology*, 32(2): 134~142
- Kaplan D T, Vanderspool M C, Garret C *et al.* 1996. Molecular polymorphisms associated with host range in the highly conserved genomes of burrowing nematodes, *Radopholus* spp. *Mol Plant-Microbe Interact*, 9: 32~38
- Kaplan D T, Vanderspool M C, Opperman C H. 1997. Sequence tag site and host range assays demonstrate that *Radopholus similis* and *R. citrophilus* are not reproductively isolated. *Journal of Nematology*, 29: 421~429
- Koshy P K, Jasy T. 1991b. Host preference of the burrowing nematode, *Radopholus similis* populations from India. *Indian J Nematol*, 21(1): 39~51
- Koshy P K, Somamma V K, Sundararaju P. 1991a. *Radopholus similis*, the burrowing nematode of coconut. *Journal of Palantation*, 19(2): 139~152
- Loof P A A. 1991. The family *Pratylenchidae* Thorne. In: Nickle W R ed. *Manual of Agricultural Nematology*. New Work: Marcel Deckker Inc. 363~420
- Marin D H, Sutton T B, Barker K. 1998. Dissemination of banana in latin americaa and the caribbean and its relationship to the occurence of *Radopholus similis*. *Plant Disease*, 82(9): 964~974
- Mohandas C, Ramana K V. 1998. Population behaviour of *Radopholus similis* in roots of black pepper(*Piper nigrum* L.) in Kerala, India. *Indian J Nematol.*, 18(1): 18~21
- Orton Williamson K J, Siddiqi M R. 1973. *Radopholus similis*. C. I. H. Description of Plant-parasitic nematodes. Set 2, No. 27 *Radopholus simillis*. <http://plpnemweb.ucdavis.edu/nemaplex/taxadata/G111s2.HTM>
- Sher S A. 1968. Revision of the genus *Radopholus* Thorne, 1949 (Nematoda: Tylenchoides). *Proceeding of the Helminthologica Society of Washington*, 35: 219~237
- Taylor A L. 1969. The Fiji banana-root nematode, *Radopholus similis*. *Proc. Helminthol. Soc. Wash.*, 36: 157~163
- Valette C, Andary C, Geiger J P *et al.* 1998. Histochemical and cytochemical investigations of phenols in roots of banana infected by the burrowing nematode *Radopholus similis*. *Phytopathology*, 88(11): 1141~1148

第三十一章 紫茎泽兰

第一节 分布与起源	651	第五节 生物生态学特性	653
第二节 识别特征	651	第六节 预防、根除与控制	656
第三节 传入途径与入侵成因	651	第七节 应用与基础研究发展战略	658
第四节 危害现状与生态经济影响 评估	652		

摘要 紫茎泽兰是一种入侵性极强的外来杂草,该草成功入侵的原因可能在于它极强的适应能力和竞争能力。紫茎泽兰原产于南美洲,大约于20世纪40年代传入我国,目前我国许多地区已有分布且危害严重。本章综述了以往国内外有关紫茎泽兰的分布与起源、识别特征、生物生态学特性、传入途径及入侵成因、危害现状与生态经济影响以及紫茎泽兰的预防、根除与控制措施的研究与应用概况,并就未来有关紫茎泽兰基础研究的发展战略进行了探讨。

关键词 紫茎泽兰 生物入侵 生物学 危害现状 防除 研究战略

Chapter 31 Crofton Weed *Eupatorium adenophorum* Spreng.

Abstract: Crofton weed *Eupatorium adenophorum* Spreng. is an alien species with strong invasion efficiency. Its successful invasion might be due to its strong adaptability and competition ability. Crofton weed was originated from South America, and introduced into China in the 1940's. Currently this weed has distributed and damaged seriously in many areas of China. Origin and distribution, identification characteristics, introducing approaches and invasion reasons, damage situation and evaluation of ecological economic influence, biological and ecological characteristics, as well as prevention, eradication and control measures of crofton weed were reviewed in this chapter. The strategies of applied and basic studies on crofton weed in the future were also discussed.

Key words: *Eupatorium adenophorum*, biological invasion, biology, damage situation, eradication, research strategy

第一节 分布与起源

紫茎泽兰 *Eupatorium adenophorum* Spreng. 是菊科 Compositae、泽兰属 *Eupatorium* 的多年生草本植物，英文名为 crofton weed 或 Pamakani，俗称破坏草。原产于南美洲的墨西哥至哥斯达黎加一带，作为观赏植物被引种到欧洲，其后又被引到澳洲和亚洲 (Paxton, 1849)。该草每年以几十公里的速度顺风向传播，远距离传播借助于人为的引种、运输及携带，近距离传播由其自身瘦果的扩散能力，经风力完成 (Auld and Martin, 1975)。紫茎泽兰现已广泛分布于世界热带、亚热带地区的 30 多个国家和地区，除原产地外，还包括美国、澳大利亚、新西兰、南非、西班牙、印度、菲律宾、马来西亚、新加坡、印度尼西亚、巴布亚新几内亚、泰国、缅甸、越南、中国、尼泊尔、巴基斯坦以及太平洋群岛 (强胜, 1998)。

第二节 识别特征

一、成株

茎直立，高 30~90cm，分支对生，斜上，全部茎枝被白色或锈色短柔毛。叶对生，叶片质薄，卵形、略三角状或菱形，基部平截或稍心形，顶端急尖；边缘有粗大圆锯齿，花序下方的叶为波状浅齿缘或近全缘；叶面绿色，叶背色浅，两面均被稀疏短柔毛，叶背及沿叶脉处毛稍密，基出三脉，叶柄长约 4~5cm。总苞钟形，长 3mm，宽 4mm，含 40~50 朵小花；总苞片 1 层或 2 层，线形或线状披针形，长 3mm，先端渐尖。花序托凸起，呈圆锥状。管状花，两性，淡紫色；花冠长 3.5mm；花药基部钝 (见彩插 31-1)。

二、幼苗

子叶宽卵圆形，长约 2.2mm，宽 1.7mm，先端钝圆宽出，下胚轴发达，被稀疏柔伏毛，上胚轴亦发育，密被短柔伏毛，均呈紫红色。第一对真叶对生，呈倒卵圆形，长约 3.5mm，宽 2.5mm，表面光滑或生疏柔毛，全缘，基出三脉，中脉突显。从第二对真叶起，叶缘具微缺刻，余同第一对真叶。

三、子实

瘦果，黑褐色，长椭圆形，具 5 棱，长 1.5mm；冠毛白色，纤细，长约 3.5mm。

第三节 传入途径与入侵成因

紫茎泽兰约于 20 世纪 40 年代由缅甸传入我国与其接壤的云南省临沧地区最南部的沧源、耿马等县，后迅速蔓延，经半个多世纪的传播扩散，现已在西南地区的云南、贵州、四川、广西、西藏等省、区广泛分布和为害，并仍以每年大约 60km 的速度，随西南风向东和向北传播蔓延 (向业勋, 1991)。

紫茎泽兰性喜温暖、湿润的环境，适应能力极强，在年平均温度高于 10℃、相对湿

度高于 68%、绝对最低温度不低于 -11.5°C 、最高气温 35°C 以下、最冷月平均温度大于 6°C 的气候条件下均可适宜生长。据对云南省垂直分布带的调查发现,紫茎泽兰适于在热带直至温带的宽气候下发生和生长,其中以亚热带气候区域生长最为茂盛(赵国晶和马云萍,1989)。紫茎泽兰在澳大利亚亦分布于热带至温带(南纬 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$)。从世界范围来看,最北分布区在北纬 37° 的西班牙,最南达南纬 35° 的南非和澳大利亚(Kluge; 1991, Auld 1981)。我国长江流域以南地区处于这一纬度范围,属紫茎泽兰的适生区。根据目前的扩散速度推测,再经半个世纪,紫茎泽兰可能入侵整个长江以南各省区(强胜,1998)。紫茎泽兰可以侵占大片的农田、果园、稀疏林地、草地、路边和间隙空地。一旦定植,由于其发达的地下根茎和大量的子实形成,很难将其清除。紫茎泽兰成功入侵的原因可能是其极强的适应能力和竞争能力,这方面还需进行深入研究。从生态学理论上讲,外来入侵物种成功入侵的原因可从以下几个方面着手去研究:天敌缺乏、强大的适应能力、竞争能力和繁殖能力、土著种适应性差、自然平衡失衡、生态位空余、干扰的驱动性等(Manchester and Bullock, 2000)。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

紫茎泽兰的抗逆性极强,对土壤的选择性不大,即使在干旱瘠薄的荒地、隙地、墙头、石缝里也能生长,对农作物和经济植物的产量、森林的更新、草地的维护有极大影响。已分布有紫茎泽兰的国家和地区都曾报道,该草可侵入农田、草地、草原、路边、宅旁、经济林地和森林。在印度,紫茎泽兰入侵麦田,影响小麦的生长发育和产量。在泰国北部的高地,对豆科牧草造成严重危害。在南非,紫茎泽兰入侵草原、林地和溪边。在澳大利亚,特别喜欢定植于裸地或间歇裸地,在坡度等于或大于 20° 的坡地上生长最为茂盛。在中国,已发现其侵害经济林地、路旁、沟边、荒坡、村旁、丢荒轮歇地以及放牧草地(强胜,1998)。紫茎泽兰侵占农田、林地,与农作物和林木争夺肥、水、阳光和空间,造成粮食作物、经济作物和经济林木减产减收,是农林生产的大敌(张国良,2002)。紫茎泽兰对畜牧生产的危害,表现为侵占草地,造成牧草严重减产。天然草地被紫茎泽兰入侵3年后就失去了放牧利用价值,常造成牲畜误食中毒死亡(强胜,1998)。

紫茎泽兰对马属动物的毒性和牛的拒食性已被肯定。紫茎泽兰具有带纤毛的种子和花粉,可引起马属动物的哮喘病,尤其是具钎的纤毛种子被马属动物吸入后可直接钻入气管和肺部,引起组织坏死和死亡(Jones, 1954; O'Sullivan, 1979)。云南省的永德县因紫茎泽兰为害,使马匹的数量在10年内由3000匹减少到400匹。四川省凉山州盐源县自发现紫茎泽兰后的5年内死掉15213头羊。至今凉山州紫茎泽兰危害面积已达26.46万公顷,每年牧草减产5.17亿公斤,家畜死亡3360头,经济损失2100多万元。实验室研究表明用冻干的或烘干的紫茎泽兰叶片研磨成的粉末饲喂小鼠,均能引起肝脏中毒(Oelriches *et al.*, 1995; Kaushal *et al.*, 2001)。

紫茎泽兰一旦侵入,便很快成为群落中的优势种,甚至发展成单一优势群落,这与其分泌克生性物质、抑制周围其他植物的生长有关。据研究,紫茎泽兰叶的5%水提取液和根的乙醚提取液,对陆稻、黑麦草、白三叶、兰桉、玉米等植物种子的萌发和幼苗生长抑制率可达63%~100%;紫茎泽兰地上部分的石油醚、乙醇和水提取物,在2%的相

对浓度下,对豌豆萌发分别产生 100%、40%和 50%的抑制。此外,紫茎泽兰水浸液对玉米、紫花苜蓿、白车轴草等的发芽率、发芽势、发芽整齐度、胚根胚芽的伸长、干物质、粗蛋白等的形成均有不同程度的抑制作用。10%水提液能使玉米的产量降低 30%,水提液和乙醚提取液也能抑制水稻种子的发芽和幼苗的生长(Angiras *et al.*, 1988; 宋启示等, 2000)。

紫茎泽兰对土壤养分的吸收性强,能极大地耗损土壤肥力。研究表明紫茎泽兰入侵 210d 后,土壤中的速效氮、速效磷、速效钾分别下降 56%~95%、46%~53%和 6%~33%,从而使土壤肥力大幅下降,导致土壤严重退化。据分析测定,紫茎泽兰植株干重的氮、磷、钾含量分别为 0.308%、2.216%和 1.204%。在发生较重的生境上,每亩生物量达 3254kg,消耗的氮、磷、钾分别达 10.0kg、72.1kg 和 39.2kg。另外,紫茎泽兰对土壤可耕性的破坏也较为严重(刘伦辉等, 1989)。

紫茎泽兰为多年生草本植物,茎基部常木质化,茎枝基部特别是靠近地面的茎部能生出须根,萌发出根芽,入土便可产生新植株,这使其在竞争并拓展生存空间中处于有利地位(向业勋, 1991)。紫茎泽兰结实力强,每株可结种子 3 万~4.5 万粒,多的可达 10 万粒。瘦果细小,顶端具冠毛,随风飘移散落,极易在裸地和稀疏植被的生境中定植生长。虽然紫茎泽兰幼苗很小,但其生长速度很快,在种子萌发后的 2~4 周,每周可生长 1.43g,8 周后即可成株建群。

紫茎泽兰入侵林地、草场和桑园、果园等经济林地,其严重后果可归纳为以下方面:一是导致更新造林保存率明显下降;二是侵入幼林地导致幼树衰弱,甚至死亡;三是严重抑制树种的天然更新和森林恢复;四是影响苗木生长,使经济林推迟投产;五是严重降低草地和草场的牧草生产量,造成牲畜中毒,影响畜牧业的发展。

第五节 生物生态学特性

一、生长发育节律

天然生长的紫茎泽兰,其孕蕾时间多从 11 月下旬开始,12 月下旬现蕾,2 月中下旬始花,各地表现出较大的一致性。但结果成熟期,一般在土壤湿度条件相似的情况下,随气温增高而逐步提前,最多可相差 20 多天。在温度大体相同的情况下,干旱导致成熟期提前,湿润使之推后,二者相差也可达 20 多天。新枝萌发从连续降雨的 5 月开始,至 9 月为生长旺期,其中以高温高湿的 7、8 两月生长最快,植株平均月增高 10cm 以上,11 月份花芽分化,株高增长速度下降。当人工割除地上茎时,其营养体生长规律与正常植株基本一致,但 8 月以后割除,对开花结果有较大影响,10 月以后割除,萌发的新枝不再开花结实,但营养生长仍然进行(刘伦辉等, 1989)。

二、土壤肥力对紫茎泽兰生长的影响

不同肥力土壤对紫茎泽兰生长发育的影响差异明显。以肥力最高的混合土上的紫茎泽兰植株为对照,生长于菜园土的紫茎泽兰干物质的增长量仅为对照的 8.6%;生长于肥力极差的生红土上,株高增长约为对照的 10%,干物质增长量约为对照组的 1.3%。另外,植株的分枝也以肥土处理者最多,贫瘠土处理者多不分枝(刘伦辉等, 1989)。

三、紫茎泽兰的光合特性

紫茎泽兰种子的萌发严格需光,但其幼苗又很耐阴,这有利于它侵入其他植物群落。研究表明,紫茎泽兰是一种阳性偏阴的 C_3 类植物,对光照的适宜范围比较宽,光补偿点低,仅为 $700lx$,而光合速率相对较高,最大净光合速率能达到 $23CO_2mg/(dm^2 \cdot h)$,且在一年的较长时间都能维持这样的较高水平(刘文耀等,1988),这也是紫茎泽兰能侵占疏林、草场和经济林地,排斥其他植物而成为优势种群的生物学基础。采用两年生紫茎泽兰盆栽苗与大豆的对比试验表明,当光照强度在 $35\ 000\sim 40\ 000lx$ 时,紫茎泽兰的净光合速率可达 $21.86\ CO_2mg/(dm^2 \cdot h)$,仅比阳性植物大豆的 $25.71\ CO_2mg/(dm^2 \cdot h)$ 稍低,在中午光强上升到 $75\ 000lx$ 时,大豆尚能维持光合生产高峰值的 50% ,而紫茎泽兰的光合生产几乎停止,这表明该杂草具有阳性偏阴的生态习性。紫茎泽兰在整个营养期不同时节的光合进程,通过按月选择晴天作测定,各月的净光合速率日变化均呈双峰曲线(刘伦辉等,1989)。

对紫茎泽兰的遮光试验表明,植株虽有随光照减弱而叶面积增加的规律,但过于荫蔽时,叶片变薄,植株柔弱而易于倒伏,只有在全光照条件的 50% 以上时,植株才处于正常生长水平并开花结实。总体上看,该杂草生长发育的最佳光照条件以全光照的 $50\%\sim 80\%$ 最好,但营养体生长可以忍受 90% 的遮光。

在干旱条件下,紫茎泽兰的光合速率明显降低,当土壤含水量降到 17% 时,叶片萎蔫,光合速率接近于 0 。经受过干旱的植株,在恢复供水后的第 3 天,光合速率只达到原正常水平的 53% 。当土壤含水量在 11% 以下时,植株会干枯死亡(刘伦辉等,1989)。显然,紫茎泽兰需要湿润的土壤条件,这是紫茎泽兰大都分布于沿海地区(如在澳大利亚)或其他较湿润地区的主要原因(如在我国的西南地区)。

四、紫茎泽兰的繁殖特性

紫茎泽兰是一种无融合生殖的三倍体($n=17$)。通常形成无配子种子。Holmgren 于 1919 年在研究该种的减数分裂过程中首先发现了无融合生殖。Baker 发现了该种的体细胞染色体为 51 条,不经授粉和受精即可形成种子(Holmgren, 1919; Baker, 1965)。

(一) 种子繁殖

正常生长的紫茎泽兰群体,其不同年龄级植株都会产生种子,其中以 $3\sim 5$ 年生的植株结实力最高,每株可结种子 3 万~ 4.5 万粒,每平方米能产生 26 万~ 28 万粒种子,连萼瘦果每粒重约 $4 \times 10^{-5}g$,折合千粒重为 $0.04g$,按发芽率 50% 、每平方米生长 5 株计算,每平方米面积上产生的种子可供作 $2.67hm^2$ 种源。不过高产年限之后,随年龄增加,结实力大幅度下降。 12 年生种群,产种量仅及 $3\sim 5$ 年生种群的 14% 左右。落地或扩散的种子主要分布在 $0.5cm$ 以上的表土层中, $2cm$ 以下的土层种子量极少。不同深度种子埋藏试验表明,在等于或小于 $0.5cm$ 的土壤表层发芽率达 51% , $0.5\sim 1.0cm$ 的土层出芽率为 10% , $2cm$ 或更深土层的种子不能萌芽。

5 月份播种的出芽率极低,也无幼苗存活。 6 月份播种的出芽率达到 42% ,但幼苗存活率低。 7 月份播种,出芽率达 50% 以上,而且成苗率也很高,特别是置于遮阴条件

下的幼苗，由于小环境较稳定，成苗率高达 95%。继后 8~9 月份播种，出芽率又大大降低，且很少成苗。10 月份播种不见有幼苗出现。这一结果说明，紫茎泽兰的种子萌发和幼苗生长要求比较稳定的高温高湿条件(刘伦辉等，1989)。

(二) 无性繁殖

调查结果表明，4~5 月植株结实后，地上部分消苗枯死，待雨季来临，又很快从根颈或半木质茎的下部萌发新枝并形成新的植株，其萌生能力大体相似于种子繁殖的规律，即最高萌枝率出现在五龄级群体，每丛形成 40~75 株新植株，按平均 51 株计算，则每亩土地可有 14 万株。1 年生群体萌发新枝的能力很低，一般只有 5 年生群体的 5%~6%，12 年生群体也仅有 25%，以后随年龄增加萌生力进一步下降。

紫茎泽兰离体植株的繁殖力研究表明，只有带根的茎(根颈)才具有强大的萌生力，一般的茎秆萌生力极弱，根不具萌生能力(Auld and Martin, 1975; 刘伦辉等，1989)。

五、紫茎泽兰的化学成分分析

紫茎泽兰所含化学成分较为复杂，目前已分离鉴定的化学成分主要有：正三十二烷(n-dotriacontane)、 β -谷甾醇(β -sitosterol)、豆甾醇(stigmasterol)、蒲公英醇棕榈酸酯(taraxasteryl palmitate)、蒲公英甾醇乙酸酯(taraxasteryl acetate)、槲皮万寿菊素-7- β -O-葡萄糖苷(quercetagetin-5- β -O-glucoside)、3-(2'- β -O-吡喃葡萄糖)-苯基-2-反式丙烯酸(3-(2'- β -O-glucoside)-phenyl-2-trans-propenoic acid)、6-甲氧基山萘酚-7-甲基醚-3- β -O-吡喃葡萄糖苷(6-methoxy-7-methylkaempferol-3- β -O-glucoside)、槲皮万寿菊素-4- β -甲基醚-7- β -O-葡萄糖苷(4'-methylquercetin-7- β -O-glucoside)、6-羟基山萘酚-7- β -O-葡萄糖苷(6-hydroxykaempferol-7- β -O-glucoside)、6-甲氧基芫花素(6-methylgenkwanin)、伞形花内酯(umbelliferone)、正三十二醇(n-dotriacontanol)、紫茎泽兰内酯(eupatoranolide)、2-乙酰氧基-3, 4, 6, 11-四去氢杜松烷-7-酮(2-acetoxy-3, 4, 6, 11-tetradehydrocadinan-7-one)、7-羰基泽兰酮(7-oxoageraphorone)、克拉维醇(kolavenol)、丁香酚-O- β -吡喃葡萄糖苷(eugenyl-O- β -D-glucopyranoside)、5, 4'-二羟基-3, 6-二甲氧基-7-O- β -吡喃葡萄糖基黄酮(5, 4'-dihydroxy-3, 6-dimethoxy-7-O- β -D-glucopyranoxyflavonone)、5, 4'-二羟基-6, 7-二甲氧基-3-O- β -吡喃葡萄糖基黄酮(5, 4'-dihydroxy-6, 7-dimethoxy-3-O- β -D-glucopyranoxyflavonone)、3, 5, 4'-三羟基-6, 7-二甲氧基黄酮(3, 5, 4'-trihydroxy-6, 7-dimethoxyflavonone)、 β -胡萝卜苷(β -daucosterol)、表木栓醇(epifriedelinol)、邻羟基桂皮酸(O-hydroxy cinnamic acid)、阿魏酸(ferulic acid)、咖啡酸(caffeic acid)、 β -金合欢烯(β -farnesene)、杜鹃烯(germacrene)、没药烯(bisabolene)、丁香烯(caryophyllene)等(Bohlmann and Gupta, 1981; Bordoloi *et al.*, 1985; 许云龙等, 1988; 李蓉涛等, 1997; 朱正方等, 1997; 丁智慧等, 1999; 傅响等, 1999;)。在上述化学成分中，有些成分对其他植物有克生作用，有些成分对昆虫有抑制作用(李云寿等, 2000; 王一丁等, 2002)。

六、紫茎泽兰的种群动态

紫茎泽兰当年萌生的植株通常生存率很高，不开花结实，待次年春季始花后，头年萌生的植株生存率明显降低。紫茎泽兰幼苗的繁群量受生境中原有成株数量和生长状况

的明显影响和调节。繁殖能力最高的是 3~5 年龄级的植株。据观察,紫茎泽兰种群发育大致可分成 4 个阶段:1~2 年生为幼年期;3~6 年生为青年期;7~11 年为成熟期;12~15 年后为衰老期。在火烧地,紫茎泽兰种群数量的增加要比在非火烧地更快,这是因为幼苗在火烧地上的成活率比在非火烧地更高。土壤含氮量高时,紫茎泽兰的种群数量和生长量处于较高水平;反之,则低。种群数量还受到光照强度的明显影响(Yadav and Tripathi, 1983; Tripathi and Yadav, 1982, 1987; 强胜, 1998)。

第六节 预防、根除与控制

目前对于紫茎泽兰尚无一套行之有效的早期预警和防除系统,根据已有报道,一般采取保护无害区、控制轻害区、围歼重灾区,集中连片,综合防除的方针,综合运用物理、化学及生物防除等方法,通过建立隔离带达到控制紫茎泽兰蔓延危害的目的。

一、化学防治

化学防治是控制紫茎泽兰的主要方法之一。已报道的主要除草剂(或配方)有:① 0.6%~0.8%的 2,4-D 溶液;② 0.3%~0.6%的 2,4-D 丁酯和 2,4,5-T;③ 5.0% 氯酸钠溶液。前 2 种除草剂或配方,在夏秋季植株旺盛生长时应用非常有效。而最后 1 种除草剂在春夏之交使用效果较好。如要杀死成株,可在花期使用氯酸钠粉。

此外,每 667m²用 10% 草甘膦水剂 1000~1500ml、2, 4-D 250g 加敌草隆 500g,于紫茎泽兰营养器官生长旺盛时期喷雾,亦有良好防效。以上药剂要达到最佳防效,均需喷洒全株,特别是植株下部,喷药量较大,且防效受季节变化的影响,这限制了紫茎泽兰化学防治措施的发展(余宇平等, 1988; 向业勋, 1991; 强胜, 1998)。

二、人工及物理防除

人工防除是目前最有效的防除方法之一。充分发动群众,在秋冬季人工挖除紫茎泽兰全株,晒干烧毁,对于经济价值高的农田、果园和草地具有很好效果,但该方法劳动强度大,劳动效率低,难以在大范围内应用。在有条件的地区,采用轮式或履带式拖拉机驱动的旋转式刀具进行机械防除,可以降低劳动强度,提高劳动效率。但采用机械防除法,土地上遗留的残根断茎仍可萌生新的幼苗,使得防除的成功率不高,而且由于紫茎泽兰发生生境复杂,对在陡坡、零星边坡地、耕地中和疏林下生长的紫茎泽兰,很难进行机械防除。

三、生物防除方法

(一) 植被替代法

零星分布的紫茎泽兰草地一经人工或机械防除后,立即种上人工牧草,在紫茎泽兰已占优势的地方密植速生树种,这些都是以新的生活力强的植被抑制紫茎泽兰生长,最终排除紫茎泽兰的可行方法。例如,三叶豆 *Cajanus cajan* 生长较快,易形成密丛,可通过种植该植物阻止阳生性的紫茎泽兰发生和生长。种植三叶豆既可放养紫胶虫 *Laccifer*

lacca, 还可收获三叶豆种子。用作替代控制的植物宜选用生长快且有较高经济价值、在短时间内郁蔽度可达到 70% 以上的植物。采用此法, 不仅可最终达到控制紫茎泽兰危害的目的, 而且能取得较大的经济效益和生态效益(余宇平等, 1988)。

(二) 利用泽兰实蝇防除

泽兰实蝇 *Procecidochares utilis* Stone 是紫茎泽兰的专一性寄生天敌(陈旭东和何大愚, 1990)。其幼虫蛀入紫茎泽兰幼嫩茎枝端部, 蛀食并刺激被害部位形成膨大虫瘿, 阻碍紫茎泽兰的生长繁殖(陈升碧和关德盛 1994)。泽兰实蝇引起紫茎泽兰形成虫瘿, 是由于被寄生组织的细胞分裂素异常造成的。Bennett 和 van Staden(1986) 研究了虫瘿形成的过程和结构。泽兰实蝇抑制紫茎泽兰生长的主要生理机制是影响其光合速率(郑征等, 1989)。研究表明, 泽兰实蝇寄生可以抑制紫茎泽兰植株高度 20% 左右, 减少叶面积 15%~20%, 影响植株生物量的生产与积累, 干扰植株生物量的正常分配。据调查, 紫茎泽兰被泽兰实蝇寄生后, 单株生物量下降约 30%, 根系密度减少 40% 左右, 冠根比增大约 17%, 植株易于倒伏; 同时寄生会影响植株正常的有性繁殖, 降低开花、结种量及种子发芽能力, 如单株头状花数下降 30.6%, 单株少产籽 33.8%, 种子发芽率下降 18.5%, 并且多数苗长势衰弱易于枯死, 有时产生不孕的头状花序。因此, 利用泽兰实蝇能够减弱紫茎泽兰的大面积传播和危害(刘文耀等, 1991)。

泽兰实蝇在许多国家和地区都作为一项关键措施用来控制紫茎泽兰的危害, 并先后获得成功。美国于 1945 年从墨西哥引进泽兰实蝇到夏威夷后, 对其生物学特性进行了研究, 并对应用于控制紫茎泽兰的可行性进行了分析(Bess and Haramoto, 1959)。澳大利亚于 1952 年引进该虫控制紫茎泽兰(Dodd, 1953, 1961)。新西兰于 1960 年引进和释放泽兰实蝇种群(Auld and Martin, 1975)。印度、南非亦引进泽兰实蝇, 研究其生物学特性, 并进行了安全性测试及繁殖释放, 建立了自然种群(Kluge, 1991; Rahman and Agarwal, 1991)。我国于 1983 年开始在云南省 5000km² 余的范围内移引、释放泽兰实蝇, 经逐步定殖、扩散, 收到了较好的控制效果。贵州西南州从 1990 年 5 月至 1992 年 10 月由昆明引进 5 批泽兰实蝇约 25 000 头, 经州内 14 个点繁殖和重复释放, 至 1994 年已在该州八个县(市)定居寄生, 并向州邻的安顺地区和广西壮族自治区扩散。5 年来泽兰实蝇不断繁殖寄生 20 多代, 在州内外 12 个县(市)扩散面积达 2 万多公顷, 扩散速度平均每年 20~25km, 最远达 40km。以随西南季风由西南向东北方向的扩散速度较快, 紫茎泽兰被寄生株率为 10%~37%, 最高达 85%~96%(陈升碧和关德盛, 1994)。

(三) 用真菌防除

1954 年泽兰尾孢菌 *Cercospora eupatorii* Peck 在澳大利亚昆士兰第一次被报道为控制紫茎泽兰非常有潜力的生防真菌。该菌引致紫茎泽兰叶斑病, 造成被侵染的叶片组织失绿, 使植株生长受阻(Auld, 1969)。该菌株在澳大利亚和美国夏威夷记录为泽兰尾孢菌 *C. eupatorii* Peck, 在马来西亚记作飞机草尾孢菌 *C. eupatorii-odorati* Yen, 在中国最初被报道为飞机草色链格孢菌 *Phaeoramularia eupatorii-odorati* (Yen) Liu et Guo, 在新西兰也以该种名报道, 后又定名为飞机草绒孢菌 *Mycovellosiella eupatorii-odorati* (Yen) Yen Mckenzie, 1990; 刘锡进和郭英兰, 1982; 郭光远等, 1991)。

泽兰尾孢菌具有极高的寄主专一性，主要感染紫茎泽兰。致病的紫茎泽兰植株，其营养生长如株高、叶片数和花朵数以及各种生理参数都明显降低(杨宇容和郭光远1991)。

Qiang and Summerell(1999)把从紫茎泽兰植株上分离、筛选出的链格孢菌[*Alternaria alternata* (Fr.) Keissler]的菌丝体开发为真菌除草剂防治紫茎泽兰。该菌使紫茎泽兰致病的主要原因是其产生的链格孢菌毒素使紫茎泽兰叶组织细胞膜透性上升，离子渗透量增加，膜脂过氧化加强，丙二醛含量上升，从而引起细胞膜伤害，造成膜功能紊乱。该菌菌丝体的侵染速度快，致病力强，对雾期的需求短，能很快杀死杂草，因此是一种极有发展潜力的紫茎泽兰真菌除草剂。真菌除草剂的开发和利用，无疑为紫茎泽兰的防治提供了新的途径(万佐玺等，2001)。

第七节 应用与基础研究发展战略

虽然近年来对紫茎泽兰已有一些研究，其危害性亦引起了人们的警觉和注意，但由于紫茎泽兰是一种外来入侵物种，在许多方面，例如，其入侵机制，对原有群落结构和功能的影响，入侵后的建群、发展和潜在危害以及综合防除等的研究尚远远不够，因此，今后应从以下几个方面进一步加强研究。

一、深入开展紫茎泽兰种群动态及其所处植物群落的调查研究

通过定点系统观察和动态模拟，阐明紫茎泽兰作为一种喜侵入裸地的先锋植物，在植物群落演替及植被发展过程中的作用，为寻求既能控制紫茎泽兰无限蔓延，又可充分利用其防止水土流失和维持植被覆盖等的措施提供理论依据。

二、系统研究并揭示紫茎泽兰种群的遗传分化、演变及适应机制

采用分子生物学、群体遗传学、生物化学和生物信息学等学科的理论和方法，研究紫茎泽兰不同地理种群的遗传分化、快速演变及生态学适应机制。通过研究紫茎泽兰在新入侵地的种群形成与扩张的生态机制、紫茎泽兰与本地物种对生态位机遇的利用与竞争机制，揭示紫茎泽兰入侵对生态系统结构和功能的影响，为严重遭受外来入侵物种破坏的生态系统重建、生态修复及控制提供理论依据。

三、加强对紫茎泽兰入侵风险和环境经济评估模式与体系的研究

在明确紫茎泽兰入侵机制的基础上，建立紫茎泽兰入侵环境经济影响的野外定位观察区，通过定点系统调查，分析紫茎泽兰入侵对种植业、畜牧业、林业和农田生态系统、森林生态系统的影响程度和影响范围，采用生产力变化法、机会成本法、置换成本法等方法，评估紫茎泽兰入侵造成的种植业、畜牧业、林业的直接经济损失和农田生态系统及森林生态系统保持土壤、涵养水源、固碳释氧、营养循环、净化环境、传粉等生态功能丧失的市场价值，评价不同风险控制策略的可行性和有效性。

四、加强对紫茎泽兰可持续控制策略和途径的研究

如研究紫茎泽兰适生区内克生性植物的种群增长规律及其对紫茎泽兰的抑制潜能；紫茎泽兰与克生性植物之间的相互作用及竞争效应；克生性植物的生态适应性及关键生态因子；经典生物防治(如病原菌、昆虫天敌等)的合理利用等，借以阐明紫茎泽兰入侵地生物生态控制机制及生态修复的策略和途径。

五、在防除的同时开展对紫茎泽兰的综合利用研究

紫茎泽兰虽然是一种必须防除的有毒植物，然而通过对其成分分析，发现它含有一些具有实用价值的活性成分，为其利用创造了条件。如采取好氧微生物发酵脱毒后的紫茎泽兰粗蛋白和纤维素可用作饲料；把紫茎泽兰直接投入沼气池会抑制沼气发酵的正常运行，沼气产量明显下降，但经过预处理脱毒后，仍可作为能源开发加以利用；研究发现紫茎泽兰的提取物对许多害虫具有杀虫活性，对昆虫的乙酰胆碱酯酶和 Na-K-ATP 酶均有抑制作用，因此紫茎泽兰在植物源农药的开发和利用方面亦有利用价值；紫茎泽兰植株中富含芳香油，通过萃取、蒸馏等技术可获得精油用于香料工业。此外，由于紫茎泽兰繁殖快，生物量大，除可能将其作为建材工业原料，或利用作为培养基，尝试用于食用菌栽培外，还可研究在控制其蔓延的条件下作为防止水土流失覆盖植物的可能。总之，对紫茎泽兰的成功利用，可望化害为宝，从而产生显著的经济效益和社会生态效益。

(王进军)

主要参考文献

- 陈升碧, 关德盛. 1994. 泽兰实蝇生物学特性观察及生物防治. 西南农业学报, 7(4): 98~102 [Chen S B, Guan D S. 1994. Biological character observation and biological control of *Procecidochares utilis* Stone. *SW China J Agric Sci*, 7(4): 98~102]
- 陈旭东, 何大愚. 1990. 利用泽兰实蝇控制紫茎泽兰的生防策略研究. 应用生态学报, 1(4): 315~321 [Chen X D, He D Y. 1990. Study on the strategy of biological control of *Eupatorium adenophorum* by using *Procecidochares utilis*. *Chinese J Appl Ecol*, 1(4): 315~321]
- 丁智慧, 郭玉彬, 丁靖垵. 1999. 紫茎泽兰花的化学成分. 云南植物研究, 21(4): 505~511 [Ding Z H, Guo Y B, Ding J K. 1999. Chemical constituents from the flower of *Eupatorium adenophorum*. *Acta Bot Yunnanica*, 21(4): 505~511]
- 傅昀, 宋启示, 方绮军. 1999. 紫茎泽兰化学成分及其生物活性研究进展. 云南农业大学学报, 14(4): 411~415 [Fu Y, Song Q S, Fang Q J. 1999. Advances in the studies on the chemical components of *Eupatorium adenophorum* and their biological activities. *J Yunnan Agric Univ*, 14(4): 411~415]
- 郭光远, 马俊, 杨宇容等. 1991. 国内新病害——紫茎泽兰叶斑病原菌的研究. 植物病理学报, 21(4): 245~250 [Guo G Y, Ma J, Yang Y R et al. 1991. New leaf-spot disease of *Eupatorium adenophorum*, caused by *Mycovellosiella eupatorii-odorati* in China. *Acta Phytopathol Sinica*, 21(4): 245~250]
- 李蓉涛, 丁智慧, 丁靖垵. 1997. 紫茎泽兰的化学成分. 云南植物研究, 19(2): 196~200 [Li R T, Ding Z H, Ding J K. 1997. Chemical constituents from *Eupatorium adenophorum*. *Acta Bot Yunnanica*, 19(2): 196~200]
- 李云寿, 邹华英, 卮注等. 2000. 紫茎泽兰精油各馏分对4种仓库害虫的杀虫活性. 西南农业大学学报, 22(4): 331~332 [Li Y S, Zou H Y, Nai Z et al. 2000. Insecticidal activity of different fractions of essential oils extracted from *Eupatorium adenophorum* against four species of stored grain insects. *J SW Agric Univ*, 22(4): 331~332]
- 刘伦辉, 刘文耀, 郑征等. 1989. 紫茎泽兰个体生物生态学特性研究. 生态学报, 9(1): 66~70 [Liu L H, Liu W Y, Zheng Z et al. 1989. The characteristic research of autecology ecology of Pamakani (*Eupatorium adenophorum*). *Acta Ecol Sinica*, 9(1):

- 刘文耀, 刘伦辉, 和爱军. 1991. 泽兰实蝇对紫茎泽兰生长发育及生物量分配影响的研究. 生态学报, 11(3): 291-293 [Liu W Y, Liu L H, He A J. 1991. The effect of *Procecidochares utilis* on growth and development, distribution of biomass of *Eupatorium adenophorum*. *Acta Ecol Sinica*, 11(3): 291-293]
- 刘文耀, 刘伦辉, 郑征. 1988. 紫茎泽兰的光合作用特征及其生态学意义. 云南植物研究, 10(2): 175-181 [Liu W Y, Liu L H, Zheng Z. 1988. The characteristic study of photosynthesis and ecology of *Eupatorium adenophorum*. *Acta Bot Yunnanica*, 10(2): 175-181]
- 刘锡进, 郭英兰. 1982. 中国色链格孢菌. 植物病理学报, 12(4): 1-15 [Liu X J, Guo Y L. 1982. Studies on some species of the genus *Phaeoramularia* in China. *Acta Phytopathol Sinica*, 12(4): 1-15]
- 强胜. 1998. 世界恶性杂草——紫茎泽兰研究的历史及现状. 武汉植物学研究, 16(4): 366-372 [Qiang S. 1998. The history and status of the study on crofton weed (*Eupatorium adenophorum* Spreng.), a worst worldwide weed. *J Wuhan Bot Res*, 16(4): 366-372]
- 余宇平, 梁家社, 何大愚. 1988. 紫茎泽兰防治方法的进展. 杂草学报, 2(2): 39-40 [She Y P, Liang J S, He D Y. 1988. Advance in control method of *Eupatorium adenophorum*. *J Weed Sci*, 2(2): 39-40]
- 宋启示, 付昫, 唐建维等. 2000. 紫茎泽兰的化学互感潜力. 植物生态学报, 24(3): 362-365 [Song Q S, Fu Y, Tang J W *et al.* 2000. Allelopathic potential of *Eupatorium adenophorum*. *Acta Phytoecol Sinica*, 24(3): 362-365]
- 王一丁, 高平, 张其红等. 2002. 紫茎泽兰灭蚜活性物质的分离、纯化及其对棉蚜乙酰胆碱酯酶的影响. 高技术通讯, 12(9): 21-23 [Wang Y D, Gao P, Zhang Q H *et al.* 2002. Isolation, purification, identification of the active aphid-killing substance from *Eupatorium adenophorum* and Eupatorin A's effect on acetylcholinesterase. *High Tech Letter*, 12(9): 21-23]
- 向业勋. 1991. 紫茎泽兰的分布、危害及防治意见. 杂草科学, (4): 10-11 [Xiang Y X. 1991. Distribution, infestation and control of *Eupatorium adenophorum*. *Chinese J Weed Sci*, (4): 10-11]
- 许云龙, 单欣宇, 王宗玉等. 1988. 紫茎泽兰的化学成分初报. 云南植物研究, 10(2): 238-240 [Xu Y L, Shan X Y, Wang Z Y *et al.* 1988. A brief report of the chemical constituents from *Eupatorium adenophorum*. *Acta Bot Yunnanica*, 10(2): 238-240]
- 杨宇容, 郭光远. 1991. 飞机草菌绒孢菌对紫茎泽兰生长及生理影响的研究. 杂草学报, 5(1): 6-11 [Yang Y R, Guo G Y. 1991. Study on the effect of *Mycovellosiella eupatorii-odorati* upon growth and physiological parameters of *Eupatorium adenophorum*. *J Weed Sci*, 5(1): 6-11]
- 张国良. 2002. 生物也疯狂——外来物种入侵的危害. 科学中国人, (10): 52-53 [Zhang G L. 2002. Infestation of biological invasion. *Sci Chinese*, (10): 52-53]
- 赵国晶, 马云萍. 1989. 云南省紫茎泽兰的分布与危害的调查. 杂草学报, 3(2): 37-40 [Zhao G J, Ma Y P. 1989. Investigation of distribution and infestation of *Eupatorium adenophorum* in Yunnan province, *China J Weed Sci*, 3(2): 37-40]
- 郑征, 唐继武, 刘文耀等. 1989. 泽兰实蝇对紫茎泽兰生长及光合作用影响的研究. 杂草学报, 3(2): 21-24 [Zheng Z, Tang J W, Liu W Y *et al.* 1989. Study on effect of *Procecidochares utilis* upon growth and photosynthesis of *Eupatorium adenophorum*. *J Weed Sci*, 3(2): 21-24]
- 朱正方, 杨光忠, 栗国强. 1997. 紫茎泽兰化学成分的研究(1). 天然产物研究与开发, 9(3): 35-39 [Zhu Z F, Yang G Z, Li G Q. 1997. Studies on the chemical constituents of *Eupatorium adenophorum* Spreng. *Natural Prod. Res Develop*, 9(3): 35-39]
- Angiras N N, Singh S D, Singh C M. 1988. Allelopathic effects of some weeds on germination and growth of chickpea and soybean. *Indian J Weed Sci*, 20(2): 82-87
- Auld B A, Martin P M. 1975. The autoecology of *Eupatorium adenophorum* Spreng. in Australia. *Weed Res*, 15: 27-31
- Auld B A. 1969. Incidence of damage caused by organisms which attack crofton weed in the Richmond-Tweed region of New South Wales. *Aust J Sci*, 32: 163
- Auld B A. 1981. Invasive capacity of *Eupatorium adenophorum*. In: Venkata Rao B V ed. Proceedings of the 8th Asian-Pacific Weeds Science Society Conference. Bangalore, India: The Organising Committee Eighth Conference of Asian-Pacific Weed Society. 145-147
- Baker H G. 1965. The nodes of origin of weeds. In: Baker H G, Stebbins G L eds. The Genetics of Colonizing Species. New York: Academic Press. 147-168
- Bennet P H, Van Staden J. 1986. Gall formation in crofton weed, *Eupatorium adenophorum* Spreng. (syn. *Ageratina adenophora*), by the *Eupatorium* gall fly *Procecidochares utilis* Stone (Diptera: Trypetidae). *Aust J Bot*, 34: 473-480
- Bess H A, Haramoto F H. 1959. Biological control of Pamakani *Eupatorium adenophorum* in Hawaii by a tephritid gall fly, *Procecidochares utilis*. population studies of the weed, the fly and the parasites of the fly. *Ecology*, 40: 244
- Bohlmann F, Gupta R K. 1981. Six cadinene derivatives from *Ageratina adenophora*. *Phytochemistry*, 20(6): 1432-1433

- Bordoloi M J, Shakla V S, Sharam R P. 1985. Absolute stereochemistry of the insect antifeedant cadinene from *Eupatorium adenophorum*. *Tetrahedron Letter*, 26(4): 509-510
- Dodd A P. 1953. Observations on the stem gall fly of Pamakani, *Eupatorium glandulosum*. *Proc. Hawaiian Entomol Soc*, 15: 41-44
- Dodd A P. 1961. Biological control of *Eupatorium adenophorum* in Queensland. *Aust J Sci*, 23: 356-365
- Holmgren I. 1919. Zytologisc studien uber die fortpflanzung den gattungen *Erigeron* and *Eupatorium*. *Kgl Svenska Vetenskapskad Handl*, 59: 1-117
- Jones N L C. 1954. Numinbah horse sickness. *Year Book 1954* (Institute of Inspectors of Stock, Sydney, Australia). 80-84
- Kaushal V, Dawra R K, Sharma O P *et al.* 2001. Biochemical alterations in the blood plasma of rats associated with hepatotoxicity induced by *Eupatorium adenophorum*. *Veter Res. Commun*, 25: 601-608
- Kluge R L. 1991. Biological control of crofton weed, *Ageratina adenophorum* (Asteraceae) in South Africa. *Agric Ecol Environ*, 37(1-3): 187-191
- Manchester S J, Bullock J M. 2000. The impacts of non-native species on UK biodiversity and the effectiveness of control. *J Appl Ecol*, 37: 845-864
- Mckenzie E H C. 1990. New plant disease records in New Zealand; miscellaneous fungal pathogens I. *New Zealand J Crop Hortic Sci*, 18(1): 65-73
- O'Sullivan B M. 1979. Crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) toxicity in horse. *Aust Veter J*, 62: 30-32
- Oelrichs P B, Calanatan C A, Macleod J K *et al.* 1995. The isolation of a compound from *Eupatorium adenophorum* (Spreng.) (*Ageratina adenophorum*) causing hepatotoxicity in mice. *Natural Toxins*, 3: 350-354
- Paxton J. 1849. Pocket botanical dictionary. 2nd ed. London: Bradbury and Evans.
- Qiang S, Summerell B A. 1999. Pathogenicity of *Alternaria alternata* on *Eupatorium adenophorum*. In: The Process of 17th Asian-Pacific Weed Science Society Conference. Bangkok; Thailand Plant Protection Society. 556-561
- Rahman O, Agarwal M L. 1991. Biological control of crofton weed (*Eupatorium adenophorum* Sprengel) by a fruit fly *Procecidochares utilis* Stone in eastern Himalayas. *Indian J Weed Sci*, 22(1-2): 98-101
- Tripathi R S, Yadav A S. 1982. Population regulation of *Eupatorium adenophorum* and *E. riparium*; effect of population density, soil nitrogen and light density. *Plant Soil*, 65(1): 35-50
- Tripathi R S, Yadav A S. 1987. Population dynamics of *Eupatorium adenophorum* Spreng. and *Eupatorium riparium* Regel in relating to burning. *Weed Res*, 27: 229-236
- Yadav A S, Tripathi R S. 1983. The population of transplanted seedlings of *Eupatorium adenophorum* and *E. riparium* as regulated by their adult plants. *Trop Ecol*, 24(2): 201-215

第三十二章 普通豚草和三裂叶豚草

第一节	起源与分布	663	第六节	控制技术	673
第二节	形态识别特征	663	第七节	豚草卷蛾安全性及其控制作用评价	677
第三节	传入途径与入侵成因	665	第八节	豚草的应用与基础研究	
第四节	危害现状与生态经济影响	666		发展策略	688
第五节	生物生态学特性	668			

摘要 豚草是一类世界性恶性杂草，具有很强的生态可塑性，适于在各种不同的环境中生长，特别是近期受人为干扰的地带，最易形成单一优势群落，使植物相遭到破坏，严重危害农牧业生产和人类健康。入侵我国的豚草属植物有两种，即普通豚草 *Ambrosia artemisiifolia* 和三裂叶豚草 *A. trifida*。本章综述了两种豚草的起源与分布、分类地位和识别特征、传入途径和入侵成因、生物生态学特性、危害现状和经济影响、利用价值和综合防治措施等，有助于人们全面认识豚草，实施豚草的综合治理。

关键词 豚草 三裂叶豚草 生物学 生态学 生物防治 综合治理

Chapter 32 Ragweeds *Ambrosia artemisiifolia* and *A. trifida*

Abstract: Ragweeds are notorious weeds in the world, which are hazardous to flora in the invaded ecosystem, make loss of yield in agriculture and are harmful to human being health. Successful invasion of these weeds depend on their strong ability of adaptation and competition. In China *Ambrosia artemisiifolia* and *A. trifida* are the two species introduced during 30~60's in the last century. In this chapter, their biological characteristics and impacts on ecosystem, as well as their control strategies (especially biological control) in China were reviewed. Other aspects including genetic mechanism of ecological variation and further economic evaluation of their impacts on the ecosystem were also discussed.

Key words: *Ambrosia artemisiifolia*, *Ambrosia trifida*, biology, ecology, biological control, IPM

第一节 起源与分布

豚草属植物在分类地位上处于菊科向日葵族 Heliantheae 和春黄菊族 Anthemideae 之间, 偏向向日葵族; 起源于美国西南部和墨西哥北部的索诺兰(Sonoran)沙漠地区, 现已分布于美洲、亚洲、澳洲和大西洋群岛的许多国家和地区, 南纬 30°以北到北纬 55°均有分布, 其中北纬 30°~35°到 45°地区的日照长度为豚草的生长提供了适宜的条件, 是豚草适宜生长区, 南半球诸如土壤、温度等条件也都适宜豚草生长(万方浩和王韧, 1990a)。据统计, 世界范围内共有豚草 41 种, 其中北美 31 种, 南美 8 种, 欧洲 1 种, 非洲 1 种。分布在我国豚草为普通豚草 *Ambrosia artemisiifolia* 和三裂叶豚草 *A. trifida*, 属豚草属中最进化、分布最广、危害最大的种类, 为直立一年生草本植物, 靠种子繁殖。其中普通豚草又称艾叶破布草和美州艾, 英文名为 ragweed 或 bitterweed(关广清, 1993b), 大约于 20 世纪 30 年代初传入我国东南沿海, 最早的普通豚草标本见于南京植物园植物标本室, 1935 年采于杭州; 三裂叶豚草英文名为 giant ragweed, 大约于 20 世纪 60 年代传入我国, 随后以极快的速度向其他地方扩散蔓延。据万方浩和王韧(1993b)报道, 已在黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东、安徽、陕西、江苏南京、浙江、江西、湖北、湖南、福建、上海 15 个省市发现豚草, 并形成南京、武汉、南昌—九江、沈阳—铁岭—丹东四个发生和扩散中心, 其中南方省份以普通豚草为主, 东北地区则以三裂叶豚草为主, 且多呈混生状态。另据陈灵芝(1994)报道, 豚草已扩散到 23 个省(市), 并呈继续蔓延之势。

第二节 形态识别特征

一、普通豚草及三裂叶豚草的形态特征

如表 32-1 所示。

表 32-1 普通豚草及三裂叶豚草的形态特征(引自关广清, 1985, 1990)

形态特征	普通豚草(正常型) <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	三裂叶豚草(正常型) <i>Ambrosia trifida</i>
营养器官	茎直立, 茎粗 0.3~3 cm, 株高 5~90 cm, 也有高达 2 m 以上的(Bassett and Crompton, 1975)。茎通常为绿色, 也有许多呈暗红色, 其上通常生有瘤基毛, 具纵条棱, 较粗糙。分枝情况不尽相同, 有的不分枝, 有的表现为巨大的丛状分枝。叶具 2~4 cm 的较短叶柄, 植株下部的叶对生, 上部叶为互生, 叶片一回羽状全裂到三回羽状全裂或深裂, 裂片 0.2~1cm, 整个轮廓呈等腰三角形, 底宽和长度可达 15~20cm。植株上部叶渐小, 柄渐短到无柄, 有时上部叶不裂而呈披针形, 叶具伏毛有粗糙感。豚草开花前的营养株往往易与大籽蒿 <i>Artemisia siversiana</i> 、野艾蒿 <i>A. lavandulaefolia</i> 、	直根系, 其植株较豚草高大粗壮, 株高可达 250~300 cm, 茎粗可达 2.5~3.0 cm, 最小的植株高 30~40 cm, 茎粗 5~6 mm。茎绿色, 有纵条棱, 密生瘤基直立硬毛, 后期毛脱落残留下瘤基。分枝大部分从植株的中上部分枝, 发育好的有四级分枝, 形成小乔木状的巨大植株, 也有少量植株自基部长出数条粗壮的枝, 形成灌木丛状。叶子全株对生。叶柄粗壮, 长 2~5 cm, 有密粗毛, 叶片很大, 长宽均可达 6~15 cm, 掌状三深裂, 有三条强劲的主脉自叶柄顶端发出, 有时两个侧生主脉各分出一个同主脉相同粗细的枝, 看上去好像有五条主脉, 形成五个裂片, 每个裂片短

形态特征	普通豚草(正常型) <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	三裂叶豚草(正常型) <i>Ambrosia trifida</i>
	小花鬼针草 <i>Bidens parviflora</i> 等相混淆	椭圆形, 边缘有浅锯齿, 顶端渐尖。叶片两面均有短粗毛, 叶脉上的毛较长
生殖器官	具很小的头状花序, 有雌雄之分, 通常雌、雄花序同株。雄花序有短柄, 几十个甚至上百个雄花序呈总状排列在枝梢或叶腋的花序轴上, 一株豚草有无数个这种花序轴。每个雄花序有一长 2 mm 左右下垂的柄, 柄端着生浅杯状或盘状的绿色总苞, 总苞是由 5~12 个总苞片联合成为一体的, 其上有糙伏毛, 直径通常 3~4 mm。总苞内着生总苞内着生有 5~30 个小灯泡似的黄色雄花, 每个雄花外面为 5 个花瓣联合成的管状花冠, 花冠顶端膨大如球, 下部呈楔形囊状以一短柄着生于总苞上。雌花生在总状雄花序轴基部的叶腋中, 单生或数个丛生。每个雌花序下有叶状苞片, 其内有椭圆形囊状总苞。种子为复果, 长 4~5 mm, 宽 2~3 mm, 具 6~8 条纵条棱, 每个条棱顶端突出呈尖头状, 顶部中央具喙, 连同周围的尖状突起而呈王冠状	三裂叶豚草的花序及花器结构与豚草相似, 但雄花序粗大, 雄花序的总苞比豚草大, 直径可达 4~7 mm, 由 6~7 个扇形总苞片联合而成, 背面有 5~6 条黑褐色放射线, 总苞比豚草总苞浅, 呈浅盘状, 手触摸时会染上红色。总苞内花的数目也多, 通常为 20~30 朵, 雄花结构与豚草相同。雌花序也生于雄花序轴基部的叶腋内, 每对叶腋有 15~20 个花序聚成轮状, 也有少数单生的。其结构与豚草相同, 但要大一些。成熟的复果倒圆锥型, 褐色宽 4 mm, 长 6~7 mm, 有的竟达 13 mm, 显著大于豚草复果
幼苗	下胚轴较粗, 紫色或紫褐色, 长 10~15 mm, 粗 1.25~1.5 mm; 子叶短椭圆形, 长 3~5 mm, 宽 2.0~3.5 mm, 具短而宽的子叶柄; 上胚轴长 5~10 mm; 初生叶深绿色, 具毛, 叶羽状深裂, 具两对阔卵状披针形的侧裂片和一个较大的顶裂片, 叶柄有毛, 几乎等于叶片的长度; 后生叶具密毛, 全裂, 侧裂片两个, 广椭圆形, 顶裂片三裂倒椭圆形, 有毛	三裂叶豚草的幼苗, 下胚轴长 20~50 mm, 粗壮, 直径可达 5~6 mm, 光滑无毛, 上部绿色, 近地面处黑紫色或红色, 有时长不定根; 子叶大型, 匙状, 长 10~15 mm, 宽 9~15 mm, 基部逐渐过渡为子叶柄, 子叶柄长度与子叶相同; 上胚轴长 20~30 mm, 具棱和开展的毛; 出生叶两个对生, 长卵圆形, 三个裂片, 两个侧裂片较小, 顶裂片较大, 叶背淡绿色, 正面鲜绿色, 具伏生毛, 羽状网脉, 后生叶有三个大齿或三浅裂, 对生

普通豚草及三裂叶豚草植株见图 32-1 和图 32-2。



图 32-1 普通豚草(万方浩 供)



图 32-2 三裂叶豚草植株(万方浩 摄, 2003)

二、普通豚草的变异类型

普通豚草植株的形态变化较大,据报道(关广清,1985),至少有三种变异类型:

早熟类型:植株较矮小,分枝少,茎常为暗紫色。在辽宁7月中、下旬即开花。雄花穗比较少,仅10~20个,花少,果实不多。

迟熟类型:植株高大,分枝多并呈密丛状,茎绿色,9月下旬开花,一直延续到10月上旬。每株可抽出数百乃至近千个雄花序轴(穗),可形成万粒以上种子。

雌株类型:植株不高大,分枝很多,不产生雄性花序。营养生长期,分枝顶端叶密集;开花期,众多分枝的顶端均形成圆锥状序轴。雌花序轴自下而上有很多分枝,下部分枝较长,还有次一级分枝,每个小分枝顶端都有密集的簇生叶,其内簇生若干雌花序,有的小枝中部也有簇生叶及簇生雌花序;向上分枝逐渐变短,小枝顶端簇生叶及簇生花序渐少,花序轴末端的一些小枝细而短小,顶端只有1~2片小叶,着生1~2个雌花序。最上部的一些小枝仅生一个叶,一个雌花序。植株产生的种子很多,其形态特征与一般豚草相似,但比较小,长2~3mm,宽2mm左右。

三、三裂叶豚草的变异类型

三裂叶豚草营养株变异类型也很多,常见的有(关广清,1990):

叶不裂型:该类型营养器官较正常植株小,高为30~100cm,茎粗4~9mm,少分枝或不分枝,最大特点是叶片不分裂。叶对生,叶柄长2~3cm,具叶片延伸下来的窄翼;叶片长椭圆形或阔椭圆形,长6~15cm,宽3~6cm;叶基楔形或圆形,叶端渐尖,叶缘具浅锯齿,齿尖有小突。叶脉为雨状网脉,但基部2条侧脉粗大,似由原来的3条掌状主脉变化而成。叶片两面具有短糙毛,并存有许多凹凸点,正面为凹点,背面为凸点。生殖器官同正常类型,但花序少,种子量不大。

该类型在自然界较为常见。还可见到一部分叶不裂,一部分掌状深裂的过渡类型。

深齿类型:多为3~5掌状深裂,花序枝叶不裂。显著特点是叶缘锯齿较深,往往深达4~6mm,每个锯齿常附有一个小锯齿,呈重锯齿状。3~5裂的叶,裂片较窄,长椭圆形,宽2~3cm,从裂口到裂片端长6~7cm,叶端渐尖,叶基部楔形,叶柄较长,4~6cm,具窄翼;叶脉为掌状三出脉。花序同普通类型。植株同普通类型一样粗壮高大,叶也为对生,在自然界不普遍。

全裂叶型:与正常型差别较大,最大特点为掌状全裂叶。在长长的叶柄顶端,裂生出3条细柄,每柄顶端着生一裂叶。裂片卵状披针形、椭圆状披针形或条形,叶基楔形或偏斜,叶尖渐尖近尾状,叶缘具整齐锯齿或不整齐缺刻状齿。裂片叶柄基部有的有叶片残留。

第三节 传入途径与入侵成因

豚草跨境、跨地区传播,主要是由于无意引入而在运输和扩散过程中侵入到野外的(谢焱,2002),主要分布在路旁、渠道、河岸和院落、果园、旱地等处。货物或农产品的进口是其进入我国的重要渠道,其中主要是粮食进口所带草籽的概率高,如2000年我

国从俄罗斯进口的大豆中,曾45次截获豚草籽,并且含量较大(郑超等,2001);1995年3月14日和5月20日,边城动植物检疫局对轮船承运的进口美国玉米进行检疫,发现三裂叶豚草瘦果平均含量达1.67粒/kg(黄世水和古谨,1996)。豚草也可通过农具、建筑材料、车辆轮胎等进行远距离传播,还可随水传播或借鸟类传播、牲畜携带,如有人观察一只鸟的喙子里可携带86粒豚草种子(关广清,1993b)。

豚草之所以在我国蔓延如此迅速,一个重要的外因是我国缺少豚草原产地所固有的天敌,生物链上缺少抑制豚草生长的一环,再加之我国生物区系成分的自然界对豚草的抵抗力和免疫力低(关广清,1993b)。而豚草本身的遗传和生物学特性,使其具有杂草性状,适于在人类干扰环境下生长,特别是近期受人为干扰的地带,最易形成单一优势群落,是其迅速扩散的内因。这两种害草的主要内在特性有:具备强大的吸水吸肥能力、旺盛的生命力以及强大的繁殖力,如一株豚草可产生数千粒到数万粒种子(Bassett and Crompton, 1975),且种子具有二次休眠特性(王志西等,1999);具备极强的竞争力与排斥力,其化感作用可造成相邻植物的生长受到抑制(Dalrymple and Rogers, 1983; Jackson and Willemsen, 1976)。另外,豚草发生在交通沿线上,极易导致传播(万方浩等,1993)。

第四节 危害现状与生态经济影响

豚草的危害和对生态的经济影响主要表现在以下几个方面。

一、影响人类健康

豚草产生的花粉是人类花粉过敏症(枯草热,也称花粉症)的主要致病原,引发过敏性皮炎和支气管哮喘等变态反应症(李秀梅,1997),危害人类健康。据估计,每株豚草可生产上亿花粉颗粒,花粉颗粒随空气可飘到603.4km以外的地方。就普通豚草与三裂叶豚草的危害比较来看,三裂叶豚草花期长,花粉量大,致敏时间长,是比普通豚草更危险的致敏原。在豚草发生区,每到豚草开花散粉季节,体质过敏者便会发生哮喘,打喷嚏,流鼻涕,鼻子发痒,眼睛流泪、发红、发痒,咳嗽,憋气等症状,体质弱者还会发生其他并发症(如皮炎,皮肤搔痒,手足肿胀等),甚至死亡,一般患者在豚草散粉季节结束后则解除病状。由于无特效药物治疗这种病,欧美国家的一些病人或暂避外地或永离故土,迁居他乡,这已成为欧美一个突出的社会及环境保护的重大问题。美国每年大约有1470万人患有花粉症,人群发病率达2%~15%,其医疗费用高达6亿美元;原苏联一些豚草发生地“枯草热”发病人数占到居民的1/7;在我国豚草分布区,据估测,每年将有111万人发病,损失劳动日值5551万元,花费医疗费用1.11亿元,而更为严重的是,某些医院在不了解病因的情况下,往往将患者当作重感冒而延误治疗。我国近几年部分地区的临床观察发现,豚草花粉过敏患者正逐年增加,如湖北黄石地区豚草花粉皮试阳性率从1995年的41%上升至1999年的66%(那美玲等,2001)。

二、破坏农牧业生产

豚草可混杂并侵入农作物田如玉米、大豆等因地和管理不善的蔬菜地、果园、桑园、苗圃、牧场等,由于具有庞大的根系和巨大的地上营养体,对栽培作物及野生植物都有

明显抑制作用。在豚草的强烈竞争下，作物减产是非常严重的，据乌克兰克拉斯诺达尔边区统计，每公顷中耕作物可因豚草减产 300~500kg，严重时导致中耕作物死亡。研究发现，青贮玉米田每平方米有 10~15 株豚草时，减产 30%~45%；每平方米有 50~100 株豚草时，可导致几乎颗粒无收；10m 行长的大豆有 4 株豚草时，每公顷大豆减产 132 kg；菜豆开花前 30d 存在豚草时，减少豆荚产量 30%，整个生育期(50d)存在豚草，则减产 75%。豚草出苗后第 8 周，株高平均比大豆高 25cm，株冠截获光合有效辐射为 24%，但如果在大豆生长季的前 4 周保持无豚草为害，大豆产量不会显著降低。豚草造成农作物产量降低的原因主要有两个方面：①其吸肥吸水能力、再生能力极强，而与作物争水、争肥，引起土壤干旱贫瘠，干扰作物生长甚至导致农田荒芜；②其竞争能力极强，包括生长旺盛形成的光竞争优势和通过化感作用抑制其他植物生长，从而降低农作物产量。

另外，豚草也可混杂于牧场、掺杂在奶牛的饲料中，影响牛奶和奶制品的生产质量。如原苏联报道，由于豚草含有苦味物质和香精油(占干重的 0.07%~0.15%)，牲畜不取食，偶尔被奶牛取食，其奶制品含有不愉快的气味和味道。

三、破坏本地植被相结构、影响园林、交通和旅游业景观

豚草的生命力、竞争力及生态可塑性极强，能迅速压倒其他一年生植物。在我国豚草的分布栖境中，植被相极为单一，易形成豚草单一群落，严重破坏本地植被相的结构及与之有关的动植物区系，降低了自然生态系统的稳定性和物种多样性；同时由于豚草沿交通枢纽分布，扩散更为迅速，极易侵入人口密集区，造成巨大的景观破坏(万方浩等，1993)。在铁岭、丹东、长春、北京、上海、南京、武汉、南昌等主要大中城市的旅游区、公园、城市交通要道两侧，均发现豚草的大量成片生长，据李秀梅(1997)报道，密度由 556 株/m² 到 3749 株/m²，个别密集点甚至高达 7000 多株/m²。豚草的蔓延不仅使这些地方的植被和景观遭到破坏，而且也使之成为花粉病的传播中心和高度发病中心，给我国的旅游业的发展带来严重影响，并对国际声誉造成一定损害。

豚草的发生也影响了土壤动物的群落结构。孙刚等(2002)的初步研究结果发现，在豚草发生地土壤动物个体数量和类群数明显少于对照样地；豚草对于土壤动物的抑制作用具有类群上的选择性，对线虫类和线蚓类的抑制作用更强；豚草对土壤动物的影响，生殖生长期大于营养生长期，普通豚草大于三裂叶豚草，豚草纯群落大于豚草与其他植物混生群落。

四、传播病虫害

普通豚草的花和全株可感染甘蓝菌核病，并作为中间寄主感染甘蓝。实验室条件下子囊孢子可感染豚草花和果实，当这些染病组织接触甘蓝时，甘蓝叶也染病。豚草花粉还可单独成为菌核病的生长基质，但只在大量存在时才能引起甘蓝叶染病。普通豚草也是万寿菊、向日葵叶斑病原细菌 *Pseudomonas syringa* 的转株寄主，豚草上的病斑可使它们染病。普通豚草还是群心菜害虫豆荚草盲蝽 *Lygus hesperus* 等的寄主。

第五节 生物生态学特性

一、生物学特性

(一) 种子

休眠：新成熟的种子具有先天休眠特性，给予适宜发芽条件也不萌发，原因在于种子内存在萌发抑制剂—脱落酸，但脱落酸存在的确切部位目前还不清楚。以湿沙和种子混合在 4℃ 低温下，层积 12 周后脱落酸消失，可打破先天休眠。解除先天休眠的种子，在水分、温度、光照不适宜的条件下，又会陷入强迫休眠不能萌发，强迫休眠还会诱导出二次休眠。诱导种子进入二次休眠的主要因子是温度，早春的低温可诱导缺光二次休眠，表层的种子如有光的刺激在早春低温下可萌发，深层种子由于见不到光，不能萌发，进入缺光强迫休眠，继而进入先天性二次休眠，此时即使给予光线也不能萌发。中晚春温度升高到 21℃ 以上则表层种子也进入二次休眠。豚草种子休眠程度随生育地的纬度不同而有变化，纬度越高，种子成熟后进入休眠状态的比例越大，解除休眠所需的低温层积时间也越长(王志西等, 1999)。

休眠特性可保持有活力的种子来源的持续性，是豚草种群爆发的基础，它不但有利于豚草扩展分布区，而且也为豚草的消除设置了障碍。

萌发：温度、光和水分可以影响豚草种子内部的萌发抑制和促进复合体系。4℃ 低温打破先天休眠，变温促进萌发；光促进萌发，即使瞬间的光也能提高萌发率；光质也影响萌发，红光使种子中光敏素转向活跃型，远红光则使光敏素转向不活跃型，遮荫下远红光比率大，抑制种子萌发；水分影响萌发，萌发要求土壤湿度 14%~22%。此外，氧气、二氧化碳和乙烯等土壤气体也促进萌发。种子发芽率随土壤深度的增加而降低，在土壤中，1~4cm 处种子萌发最好，6~8cm 处种子萌发率显著降低，而 10cm 处种子几乎不出苗，土表种子发芽出苗存活率为 68%，而 10~15cm 深的幼苗存活率为零。这说明豚草易在受人为干扰的土壤中生活，且一旦侵入新环境，因其生命力强而难以防除。

(二) 营养生长

豚草植株的生物量以“S”形曲线增长，分缓慢生长、旺盛生长和生长转变三阶段。

缓慢生长阶段：普通豚草 0~62 日龄，三裂叶豚草为 0~50 日龄。此阶段主根伸长较快，分别为最大长度的 71.2% 和 58.4%。主茎生长缓慢，分别仅为最后高度的 16.0% 和 7.8%。根、茎、叶干物质分配，普通豚草依次为 15%、18% 和 67%，三裂叶豚草依次为 17.6%、24.8% 和 57.6%。此阶段主要是长根和长叶，为旺盛阶段打下吸收器官的形态基础和能量基础。

旺盛生长期：普通豚草为 62~90 日龄，三裂叶豚草为 50~80 日龄。此阶段生长根、茎、叶干物质普通豚草依次为 9.5%、33.7% 和 56.8%；三裂叶豚草为 14.8%、50.3% 和 43.9%。原来不被注意的豚草苗忽然长高，压倒其他一年生植物。由于豚草生长快，可形成很大的光竞争优势，如可在大豆苗后 6、8、10、12 周豚草分别截获 11%、24%、38% 和 45% 的光合有效辐射。

(三) 生殖生长

生殖生长经过现蕾、开花和结实各阶段，这些过程受营养生长状况和外界条件的影响。豚草剪叶实验表明(关广清等, 1991), 剪叶对营养生长的损害, 直接影响到结实量。单次剪叶 1/3 者, 早期剪叶比后期剪叶种子量减少率大, 以始蕾期为最大(39.4%); 单次剪叶 2/3 者, 除盛花期种子减少率为 23.1%外, 以前各次剪叶均降低 40%左右; 单次全剪叶者种子减少率在 47%以上, 以蕾期剪叶为最重, 减少率达 73%左右; 花期剪叶对种子量的影响反而减轻; 连续三次剪 2/3 叶者, 生长初期剪叶影响结实率最大(70.6%)。这些数据说明前期连续重剪叶和蕾期单次重剪叶, 影响结实最大。

二、生态学特性

豚草是一类典型的短日照、喜光植物。当夏至过后, 随着日照时间的缩短, 迅速进入花期。大量资料表明, 我国豚草大量出苗在 4 月中旬至 5 月初, 营养生长期 5 月初至 7 月中旬, 蕾期 7 月初至 8 月初, 开花期 7 月下旬至 8 月末, 果熟期为 8 月中旬至 10 月初。其生长发育受温度、日照、光强、光质等影响。

(一) 温度对生长发育的影响

豚草的生长发育对低温很敏感, 低温能阻滞植株生长, 使其矮化。自然条件下, 当土表 5 cm 地温达到 6.1~6.6℃时, 豚草种子开始萌发出苗, 出苗的最低温度不能低于 6~8℃, 发芽要求的土壤湿度为 14%~22%。豚草的生育期参差不及, 交错重叠, 直接原因为出苗期可从 3 月中下旬一直延续至 10 月下旬, 历时 7 个月之久, 早、晚熟型豚草相差 1 个多月。温度高促进现蕾, 温度低达不到现蕾积温(688DD)。

(二) 日照长度对开花行为的影响

日照长度是控制豚草生殖生长的主要因子, 短日照能促进植物开花。在加拿大发现北纬度的豚草开花较早, 营养生长期短。日照长的白天有利于雄花的生长发育, 而短日照有利于雌花的形成。在长日照纬度下, 仅在生长季末期开花, 形成大量花粉。因此, 早期开花的植株上晚期发育的枝条以及晚期开花的植株, 雌花数增高, 在极端短日情况下, 导致雄花发育无效, 形成雌雄异株。

(三) 光强和光质对生长发育的影响

豚草对光强和光质反应敏感, 适于全光照生长, 也能在适度荫蔽条件下(光照在全光照 70%以上)正常生产, 但在低于 10%全光照下植株难以生存, 在低于 30%全光照下, 花粉则不能产生, 或发育不良、生活力低下(杨毅和郭文源, 1991)。冬季种植在温室内的豚草在不给予补充光源的情况下, 植株矮小黄化, 幼苗死亡率高, 过早进入生殖生长期。在聚酯纤维网做滤光实验中, 光强度比直射光降低 6.3%, 豚草的生长明显降低, 在远红光下生长的豚草植株未达到成熟即死亡。不过在自然条件下, 在玉米田中 3%遮荫情况下, 生长良好。盆栽豚草从营养生长初期开始用塑料窗纱笼罩, 植株的生长高度、分枝及结籽与自然条件下生长的相比并不显著降低。

(四) 再生力和生态可塑性强

豚草在早期刈割后,促进分枝并形成大量种子,每株种子可达3万~4万粒。刈割高度越高,茎基部的腋芽形成的新枝越多,刈割高度在3~5cm、12~15cm、20cm、25cm和30cm高时,分别形成4~5个、6~7个、9个、10个和15个新枝。在蕾期低割,还可从根上发出新芽。在8月中旬,刈割高度在5cm和10cm时,植株最终生长高度显著降低,但还能开花结实,重复刈割时,可再生4~5次,模拟放牧实验表明,刈割对豚草生长高度和结实量有显著影响,但在生长旺季可增加结实枝数目。

(五) 吸水和吸肥能力极强

豚草属浅根系植物,只能吸收表土的肥水,喜湿怕旱。豚草形成1g干物质需消耗948g水,耗水量是禾谷类作物的2倍以上。如果豚草密度达10株/m²,那么1hm²土地的耗水量多达24t,相当于消耗200mm的降雨量,这足以造成土壤的干旱。因此,一般说来,豚草从土壤中吸收养分的能力是大田作物和蔬菜的1.5~2倍。一年吸收氮的总量为2.49g/m²,豚草形成1t干物质耗氮量为14.5kg,五氧化二磷1.5kg,与玉米吸收氮、磷的量相近。豚草能适应不同肥力、酸碱度的土壤,但在黏土、沙土和粉砂土混合的土壤中,生长良好,最适土壤类型是砂壤土和砂质黏壤,在pH值6.0~7.0的土壤中,植株生长旺盛,而在强酸性土壤上生长的植株活力差,植株矮小。

(六) 具化感作用,抑制其他植物生长

1. 化感作用

化感作用是一种植物通过淋溶、挥发、残体分解和根系分泌等向环境中释放化学物质,而对周围其他植物(包括微生物)产生任何直接或间接的有害作用,又称异株相克作用。豚草能成为群落演替中的优势群落,与其具化感作用,抑制自然植被发展及农作物生长,从而加强了自身在自然界的竞争力有关。早在1973年,Jacson和Willemssen就报道了豚草在弃耕地次生演替中扮演先锋植物的角色,化感作用是主要因素。

目前,关于普通豚草和三裂叶豚草化感作用的研究,已有一定量的积累。陈贤兴和单和好(2003)研究发现普通豚草的茎叶水浸液对萝卜、绿豆、番茄、甜瓜、大白菜等经济作物种子萌发率和发芽速度指数及幼苗的苗高和根长均有不同程度的抑制作用;普通豚草残株与沙子以1%的重量比混合,对玉米、大豆的株高和鲜重有显著抑制作用。Watanbo(1981)通过研究发现豚草对莴苣、水稻等有明显的化感抑制作用,其中的可能化感物质为肉桂醇和ambrosic酸。Bradov(1984)研究发现10%(W/W)的豚草叶水提取液对洋葱、燕麦、画眉草、稗草、莴苣、红车轴草、胡萝卜、黄瓜、番茄、苋、反枝苋等种子的萌发具有明显的抑制作用,稀释到1:40对莴苣、胡萝卜、苋等种子萌发仍具抑制作用,不同组织、不同溶剂(石油醚、甲醇、二氯甲烷等)的提取液对莴苣种子均显示出较强的抑制作用。王大力和祝心如(1996a)研究发现普通豚草的茎叶部分的水浸液对农作物如大豆、玉米、小麦、水稻的种子萌发和幼苗的幼根伸长有明显的抑制作用,同时使根系形态发生较大的变化,但根系的水浸液对作物的幼芽伸长有一定的促进作用,其挥

发物对大豆和玉米的种子萌发有一定抑制作用，根区土壤对农作物无明显的作用；三裂叶豚草植株的水提取液能抑制萝卜和高粱的种子萌发及幼苗生长。祝心如等(1997)通过实地考察和室内研究证实，三裂叶豚草能抑制邻近生长的大豆的根瘤形成，但其根系发育和分布不受影响。

2. 化感物质成分

豚草具化感作用是因为其体内含有能抑制其他植物的化感物质。关于其化感物质的分离和鉴定，已经积累了一定的基础数据。如豚草中的主要化学物质有：绿原酸、咖啡酸、cumanin、peruvin、dihydrocumanin、dihydroparthenolide、psilostachyin、ambrosic acid、psilostachyin A、psilostachyin B、psilostachyin C、 α -patchoulin、 β -guaiene、 α -bulnesene、 β -bisabolene、 α -蒎烯、 β -蒎烯、苈烯、2-冰片烯、里那醇、4-萜品醇、樟脑、 α -萜品醇、马鞭烯酮、橙花叔醇、法尼醇、勺叶桉醇，2，4-二甲基庚烷、2，6，7-三甲基癸烷、5-甲基壬烷、2-冰片烯等(Rice, 1968; Porter and Mabry, 1969; Bianchi *et al.*, 1968; Watanabo *et al.*, 1981; Bohlmann *et al.*, 1965; Geissman and Judith, 1967; Fischer *et al.*, 1981; Fischer and Quijano, 1984; 王大力和祝心如, 1996a; 王大力和祝心如, 1996b; 吕怡兵等, 1999)。从已积累的对豚草属植物特有的化学成分组成来看，可归为四大类：酚酸类、聚乙炔、倍半萜烯内脂和甾醇类化合物(王大力, 1995)。其中酚酸类化合物的化感作用已早为人知，如Bohlmann(1965)报道了一些聚乙炔类化合物具生物毒性，而倍半萜烯内脂是较为广泛存在的一类化合物，也是其他许多化感植物的化感成分，Bradow(1984)从豚草中分离出该类化合物并证实其具化感作用。普通豚草释放到环境中的物质有四聚乙炔、倍半萜烯烃的混合物、甲基咖啡与 β -谷留醇的混合物以及豆留醇等，其中倍半萜烯烃的混合物强烈抑制洋葱、燕麦、黑麦和帕氏苋的种子萌发，还抑制玉米胚根、胚芽鞘及大豆下胚轴的生长。

三、两种豚草的物候期比较

见表 32-2。

表 32-2 两种豚草的物候期比较

比较特征		豚 草	三裂叶豚草
群体持续天数/d	出苗期	65	58
	营养生长期	110	110
	花蕾期	28	30
	开花期	59	69
	果熟期	30	48
个体发育天数/d	出苗—一对真叶	8	6
	一对真叶—现蕾	87	84

续表

比较特征		豚 草	三裂叶豚草
	现蕾—开花	24	20
	开花—果始熟	35	40
	果始熟—果全熟	15	24
出苗温度/℃	出苗始期	9.4	6.9
	出苗盛期	10.1	9.2
	出苗末期	20.8	19.9
生育期积温/℃	活动积温	3230.3	3275.1
	有效积温	2387.9	2406.5

四、两种豚草出苗与温度的关系

土壤化冻不久，三裂叶豚草和普通豚草在3月末和4月初相继出苗，属早春一年生杂草，大量出苗是4月中下旬，这时气温为8.6~12℃，5cm地温为6.7~11.1℃。两种豚草出苗末期在5月末和6月上旬，这时气温和5cm地温均上升到20℃左右，这个温度诱导豚草种子进入二次休眠，以后不再继续出苗。三裂叶豚草种子进入二次休眠的温度略低些。两种豚草发芽最低温度为5℃，最适温度在10~20℃上下，在自然环境下，21℃以上不再发芽。在其他萌发条件具备的情况下，温度是两种豚草种子发芽的限制因素，纬度不同的地区，豚草出苗时间不同。

五、积温与二种豚草散粉时间的关系

根据积温学说，在其他气象条件满足的情况下，温度对发育速度起主导作用。每一个发育时期要求一定的下限温度，同时需要一定的有效积温。三裂叶豚草从出苗到第一对真叶，到现蕾开花三个生育时期有效积温相加，为1332℃，普通豚草为1510.3℃，三裂叶豚草要求积温低于普通豚草178.3℃，因此比普通豚草早现蕾开花。三裂叶豚草现蕾到开花期，4年日平均温度为22.2~24.9℃，普通豚草为23.6~26.1℃，这可以看出，三裂叶豚草开花的下限温度比普通豚草低，这也是它开花比普通豚草早的一个原因。从开花到果实成熟所需的有效积温，三裂叶豚草平均为744.5℃，普通豚草为672.6℃，前者比后者高71.9℃，由于三裂叶豚草开花要求积温高，所以开花持续时间长。由此可见，两种豚草开花早晚、花期长短与积温有密切关系，温度较高年份开花早，较低年份开花晚。开花期间温度高时，花期短；温度低时，花期长。因此，在掌握豚草有效积温基础上要根据长期天气预报，推测出当年豚草开花散粉的时间和持续期，做好花粉病的防治工作(李素德, 1993)。

六、遗传与进化

三裂叶豚草和普通豚草的染色体数目分别为 $2n=24$ 和 $2n=36$ ；其核型为间期核，其中三裂叶豚草为浓密分散型，普通豚草为稀复杂染色体中心型(祖元刚和沙伟，1999)。豚草从传入中国，经过短期适应后蔓延爆发，而关于其遗传演变和生态适应机制的研究，目前已开始有所涉及。沙伟等(2000)采用水平切片淀粉凝胶电泳测定了东北地区分布的不同生态环境条件下 7 个三裂叶豚草种群的遗传结构后发现，三裂叶豚草种群内存在着丰富的遗传变异，多态位点百分率为 80.0%，等位基因平均数为 1.80，期望杂合度为 0.375，遗传一致度和遗传距离为 0.959 和 0.042；等位酶分析结果发现，其种群具有丰富的遗传多样性，其遗传变异与其生态环境相适应，而其遗传距离与地理分布距离无关。沙伟等(2000)对豚草种群的遗传结构的研究发现，豚草种群内亦存在丰富的遗传变异，而种群遗传结构的变化与其生态环境的变化没有直接的关系。

第六节 控制技术

近几十年来，国内外学者对豚草的各方面的研究进行得比较深入，提出了许多卓有成效的防治措施，如引入天敌、种植替代植物、施加除草剂、人工拔除等。苏联从 20 世纪 30 年代以来，开展对豚草的防治，先后经过群众性的铲除、刈割、药剂防治及各种农业技术措施等防除工作。豚草的生物防治始于 20 世纪 60 年代中期，其大量工作是在豚草原产地搜寻、调查控制豚草的本地天敌。除此以外，还有许多研究报道了取食豚草属及其近缘属植物的天敌昆虫、线虫、真菌和细菌(万方浩，1993)。我国各级政府及科学家对豚草的危害早已引起重视，宣传部门自 1987 年以来先后宣传豚草的危害，敦促加强豚草的防除。迄今为止，豚草的主要防除措施可以归纳为以下 4 个方面。

一、生物防治

生物防治是从整个生物界生态平衡的角度出发的，在建立豚草植食昆虫区系和病原菌系之后，豚草将受到自然的抑制，这是一种具有长远目标适于各个场所的豚草防除方法。其主要措施是从豚草原产地引入专一性天敌来控制豚草的扩展蔓延、降低危害。由于该方法既省功省钱、又不污染环境，因此在豚草危害严重的原苏联、澳大利亚、南斯拉夫和我国，均受到相当重视。

据国外的研究报道，为害豚草的昆虫、线虫、壁虱和真菌达 400 多种，食叶类中有前途的是叶蛾、卷叶蛾、象甲以及种子害虫食蝇和雄花上发育的长角象甲，同时也发现锈病菌有很高的致病性。对我国国内豚草分布区天敌昆虫和病原菌的调查结果表明，没有专一性天敌昆虫和强致病力的病原菌能加以利用。1987 年、1988 年和 1990 年我国先后从加拿大、苏联及澳大利亚引进了豚草条纹叶甲 *Zygogramma suturalis*、豚草卷蛾 *Epiblema strenuana*、豚草蓟马(*Liothrips* sp.)、豚草实蝇(*Euaesta* spp.)及豚草夜蛾 *Tarachidia candefacta* 5 种天敌昆虫，并对其进行了研究，从而揭开了我国豚草生物防治的序幕。有关豚草卷蛾的引进与使用技术将在下一节专门讨论。

(一) 用豚草条纹叶甲防除

豚草条纹叶甲属鞘翅目 Coleoptera 叶甲科 Chrysomelidae 豚草叶甲属 *Zygogramma*, 其在豚草防除方面的应用最为成功。这种昆虫的特点是(万方浩等, 1989; 关广清, 1987; Kovalev and Vecnernin, 1986): ①专食性特别强: 只取食普通豚草和多年生豚草 *Ambrosia psilostachia*, 而不取食在我国广泛分布的三裂叶豚草, 即使在缺乏水分情况下, 豚草条纹叶甲宁可取食土表、叶表以及湿纸表面的水, 也绝不为了得到水分而取食其他植物; ②生活史与豚草同步, 发育上具同步性: 即豚草的各生育阶段, 从出苗到开花均有豚草条纹叶甲的成虫和幼虫取食; ③形成“昆虫种群波”, 能彻底消灭豚草: 所谓种群波就是指该虫成虫有群聚取食特性, 能以 5000 头/ m² 的高密度形成像草原上火灾那样向周围蔓延的运动波, 速度是一昼夜 3m, 波带所经之处豚草被全部消灭; ④生态可塑性大: 豚草条纹叶甲在缺乏食料时, 能继续活动, 并在一定温湿度变幅内具有很强的耐饥能力, 一龄幼虫的耐饥能力为 3.1d, 雌、雄成虫的耐饥能力分别为 14d 和 10.2d, 这种能力大大加强了其在田间的搜索成功率和适应能力。此外, 在实验室和田间条件下, 温度极低时, 豚草条纹叶甲还能继续生存。

Bassett 和 Terasmae(1962)研究证实, 豚草条纹叶甲能对豚草起到显著的控制效果, 目前, 该天敌已在原苏联定居, 并初步控制了豚草的蔓延和危害。豚草条纹叶甲 1987 年从苏联和加拿大被引进我国后, 已对其寄主专一性、生物学及生态学特性、控制效果、室内繁殖等进行了较多的研究(万方浩等, 1989; 万方浩和王韧, 1990b, 1990c, 1990d, 1991; 李迪强和万方浩, 1993a, 1993b), 发现其仅取食普通豚草; 在我国北京地区一年能发生三代, 以成虫越冬, 对豚草起主要控制作用的是越冬代成虫和第一代, 因此, 提高第二代田间虫口数量和保护第三代成虫安全越冬, 提高越冬基数, 是田间释放后的重要环节; 小区实验表明, 豚草幼苗是较为有利控制时期, 在具有 4 片叶的豚草幼苗期, 每株上释放 2 头 1 龄条纹叶甲幼虫, 控制效果可达 95.7%。该虫适宜在温带地区生长繁殖, 繁殖力及对不同环境条件的适应性较强, 很有希望在我国北方释放区建立自然种群并成为控制豚草的重要天敌。但在高温条件下, 卵的孵化率极低, 幼虫死亡率亦较高, 能否在南方建立种群, 尚需进一步研究。

(二) 病原菌防治豚草

在湖南, 通过对豚草病原菌的研究已分离出苗期的病原菌、营养生长期的病原菌和花期病原菌 9 种。致病性测验的结果表明, 各病原菌对花期豚草的侵染率虽然各有差异, 但都未达到理想的效果, 其适用性还有待于进一步研究。

真菌: 在豚草天敌调查中还发现一些使豚草发病的微生物, 其中白锈菌(*Albugo tragopogonis*)对豚草有较强的控制效果。研究表明, 在温度 16.7~18.4℃ 情况下, 往豚草幼株上喷洒白锈菌孢子悬浮液并保持液滴 4h 以上可使豚草感病, 叶背面长出许多白色小孢, 叶正面在小孢处褪绿。

细菌: 近年来发现豚草受多种细菌感染。美国威斯康星州的几个地区发现万寿菊叶斑病病原菌(*Pseudomonas syringae* pv. *tagetis*)可使豚草叶片长出褪绿的叶斑, 同时顶端黄化。美国还发现一种豚草茎部抑制细菌, 用机械方法进行接种试验表明, 该菌在豚草

木质部中形成浓重的菌落，菌株明显矮化，故称此病为豚草矮化病。

二、植物替代控制

豚草的替代控制是一种生态防除豚草的方法，其核心是根据植物群落演替的自身规律，用有经济价值的植物取代豚草种群，其优点有：①替代控制植物一旦定植便能长期抑制豚草，不必连年防治；②替代控制植物能保持水土，改良土质，提高环境质量；③替代控制植物有直接经济效益能在短期内收回栽培成本，长期获利；④替代控制植物可使荒地变为经济用地，提高土地利用效率。而一种植物能取代另一种植物的方式至少有两种，一是具备强大的竞争优势，二是特殊的化感作用(异株克生作用)。

豚草是喜干扰、怕胁迫的一年生植物，按照植物演替规律，可以用不喜干扰而耐胁迫的多年生草本和小灌木替代控制；且豚草种子具有休眠特性，发芽要求一定的光、温条件，用替代植物遮荫，减少光量、光质和土壤干扰，可造成种子的强迫休眠和二次休眠；另外，豚草存在缓慢生长阶段，用替代植物在此阶段造成强大的冠层压力就可以抑制其旺盛生长。因此，豚草的植物替代控制策略是可行的。

原苏联曾在第聂彼特罗夫—诺沃莫斯科斯克公路两侧带状地段上用播种禾本科牧草无芒雀麦 *Bromus inermis* 的方法有效地抑制了豚草种群的增长，开创了豚草的替代控制先河，以后相关的研究逐渐增加和深入。Libel 和 Worsham(1983)研究表明，大田生长的小麦水浸液对豚草的种子萌发和根的生长有抑制作用，当在有光线的条件下，这种作用会提高 70%左右。陈贤兴等(2002)研究了 6 种植物地上部分的水浸提液对豚草的化感作用，结果表明，白花夹竹桃 *Nerium indicum cv. paihua*、海桐 *Pittosporum tobira*、鬼针草 *Bidens pilosa*、杨梅 *Myrica rubra* 和大叶桉树 *Eucalyptus robusta* 的茎叶水浸提液对豚草的发芽率，胚根、胚轴及幼苗生长有抑制作用。关广清等(1995)用演替中后期出现的有经济价值的多年生草本和灌木分别代表具有光竞争、地下竞争优势的替代植物进行了作用方式和效果的研究，结果表明，紫穗槐 *Amorpha fruticosa*、沙棘 *Hippophae rhamnoides*、小冠花 *Coronilla varia*、草地早熟禾 *Poa pratensis*、菊芋 *Helianthus tuberosus* 用于沈阳—大连和沈阳—桃仙机场高速公路替代控制豚草示范区的建设，收到了较好的效果。我国沈阳农业大学实验站也通过多年的研究表明，紫穗槐是一种很好的豚草替代植物，因其在豚草缓慢生长期迅速萌枝，生长旺盛，树冠层巨大，可有效抑制住豚草，紫穗槐冠层下普通豚草死亡 56%，三裂叶豚草死亡 60%，没有死亡的植株细弱，叶面积很小。利用紫穗槐控制豚草，在沈大高速公路上取得了成功(金惠军和崔松，1997)。以紫穗槐、沙棘、菊芋为替代植物的年纯经济效益每公顷在 122.4~537.36 元之间，未来产生的经济效益预测值为 222.94 万元(万方浩，1993)。

由于豚草替代控制是从植物群落演替的自然规律出发的，适用于交通沿线、河岸、坝坡、野外旷地呈条状和片状分布的大面积豚草防除。沈大和沈桃高速公路豚草替代控制示范区已充分显示了替代植物控制豚草的威力和充分利用路基地创造财富的潜力。随着经济建设的发展，公路、铁路、水利设施建设必将日益增多，这些多干扰的土地是豚草最喜欢生长的地方，及时种植替代植物不但可以防止和抑制豚草，而且也是水土保持的需要。荒野豚草发生地可以种植多年生豆科和禾本科牧草，把这些豚草滋生地发展为饲料基地，既抑制豚草又可支持畜牧业的发展和促进我国食物结构的改变。在居民区种

植草坪植物和观赏灌木既可消除花粉的危害，又可创造幽雅宜人的生活环境。此外，替代控制封闭豚草发生区，防止豚草扩散蔓延。替代控制完全可以和城乡绿化工作结合起来，推广应用前景极为可观。

三、化学防治

在豚草的防除措施中，化学防除作为一种有效方法一直被世界各地普遍采用。因其从打破植物个体器官平衡出发，见效快而显著，在经济能力允许和不企图保留植被情况下，可以大面积应用，如豚草替代控制区的预处理，飞机场、库房、矿山以及各种施工场所，尤其适用于杀灭小块豚草新发生中心以及果园、非耕地、城市公园隙地、游览场所、居民区、草坪、荒坡、滩地等零星分散的豚草植被或群丛。亦可在采用生物防除及替代控制外，辅以必要的化学防除，以提高对豚草的控制效果。化学防治在部分地区已取得了较好的防治效果。以江苏省为例，至1992年推广农药使用以来，以人工拔除为参照，已获得的经济收益为75.86万元，未来产量的经济效益预测值为3044.6万元。

针对除草剂的筛选，迄今已有相当的工作。目前提出和常用的药剂主要有：西玛津、阿特拉津、扑草净、取代脲类和二苯醚、2,4-D丁酯(2,4-DB)、敌草快、百草枯、草甘膦等。如10%草甘膦和20%克无踪对豚草起直接杀伤作用，而20%二甲四氯药剂对豚草产生茎叶至畸作用，抑制豚草生长；75%阔叶净能导致豚草矮化，影响其生长能力(刘良玉等, 1998)。但总体来说，使用药剂较单一，新开发的高效除草剂类型少，其中一些除草剂如克无踪、草甘膦和百草敌目前对我国的农作物尚无选择性，仅限于非耕地和果园使用。因此，还急需筛选出抑制豚草的新型除草剂，并且在筛选除草剂的同时要考虑除草剂对天敌昆虫的影响，主要是天敌昆虫对除草剂的承受能力、适应力和遗传变异。

由于不同生育期对茎叶处理除草剂的敏感性有差异，生育期越早，对除草剂越敏感。豚草的化学防治应掌握在2~4叶期，如在江西省，根据豚草生长阶段，宜在5月下旬至7月上旬喷雾除治(姜景峰和姜晓装, 1995)。

四、物理防治

豚草的物理防治主要措施为人工拔除和人工割除，在一些豚草个体数量不大的地区，采用人工拔除不失为一种有效的简便方法，只要铲除适时、彻底，效果是很好的。不同的地区，由于气候的差异造成豚草长势不同，其铲除的适期亦存在些许差异，但均可掌握在豚草开花结实之前，即6月上旬至7月下旬为宜，此时既便于识别、又亦拔除，且可避免开花散粉引起人类中毒，又可防止结出新的种子，同时阻止再发新枝。拔除的豚草幼苗要切去根部，地上部分就地烧毁或集中沤制绿肥，或用作牛、羊饲料(邓余良等, 2003; 姜景峰和姜晓装, 1995)。人工拔草费工大，难于全面清除，且处理不当，易造成人为携带和传播的危险。

第七节 豚草卷蛾安全性及其控制作用评价

一、安全性评价

(一) 危害识别

豚草卷蛾是一种原产于北美,控制豚草和银胶菊(*Parthenium hysterophorus*)的有效天敌。澳大利亚经过寄主专一性测定之后于1983年引进并释放该天敌控制银胶菊取得很好的控制效果(McFadyen, 1989)。长期的田间监测表明该虫在自然界只取食豚草、银胶菊和苍耳 *Xanthium sibiricum*, 不危害向日葵 *Helianthus annuus*(McClay, 1987)。中国农业科学院于1987年从澳大利亚引进该天敌,对其寄主专一性测定结果表明,此虫只在普通豚草、三裂叶豚草和苍耳上产卵并完成发育。但在混栽区诱导实验中发现幼虫可转移到向日葵上蛀食并形成虫瘿(万方浩等, 1993),考虑到其安全性,我国仅于1990年在南方(湖南临湘)非向日葵作物区释放控制豚草并已定殖。然而有关豚草卷蛾的安全性在生物学家之间存在不同的观点。印度在进行寄主专一性测定时表明豚草卷蛾可选择小葵子 *Guizotia abyssinica* 产卵并取食,因而未能通过释放(Jayanth, 1987);俄罗斯科学家 Kovalev(1995)对澳大利亚和中国释放豚草卷蛾的安全性仍持怀疑态度。

(二) 种系发生的风险限制

卷蛾属近100余种的北美寄主植物记载表明:几乎所有的卷蛾属虫种均取食菊科植物,且所有取食菊科植物的种均是蛀根或蛀茎的,大部分仅取食单一属中的植物种类或单一种;所取食的菊科植物中,绝大部分植物属于向日葵族和紫菀族 *Astereae*,反映出昆虫种系取食习性的相似性;唯一取食其他科的是在美国加州发现的一新种卷蛾 *Epiblema deverrae*, 取食红树根 *Madia madiodes*(万方浩, 1991)。在田间条件下,豚草卷蛾所喜好的寄主植物(豚草属、银胶菊属和苍耳属)都归属于向日葵族中的豚草亚族 *Ambrosiinae*, 寄主范围狭窄。虽然在非选择性条件下或诱导性实验中,除嗜好寄主植物以外,豚草卷蛾可取食向日葵族中其他一些植物,但在这些植物上发育异常,决非是豚草卷蛾的适宜寄主。豚草卷蛾选择寄主受植物体内倍半萜烯内脂(*sesquiterpene actones*)的吸引。豚草、银胶菊和苍耳3个属均含有此类化合物,三者在分类学上近缘,在化学物质上相似,上述3个属的植物中唯一有工业经济价值的是 *Parthenium argentatum* (可用做制造橡胶的材料),但该植物不含倍半萜烯内脂。另外,豚草和银胶菊的天敌昆虫,其寄主植物范围也一致(万方浩, 1991)。

(三) 寄主专一性风险

1. 室内非选择性条件下豚草卷蛾幼虫的寄主专一性测定

马骏等(2002)测定了豚草卷蛾在室内条件下对32种供试植物的取食和发育情况,结果表明幼虫仅能在豚草和苍耳上取食并完成发育,发育历期基本一致,在其他供试植物上,低龄幼虫均在供试龄期全部死亡(表32-3)。少量低龄幼虫能蛀入黄花蒿;部分1龄

幼虫可钻入向日葵叶片；另外在加拿大蓬和两种菊花上出现少量食痕，但幼虫不能蛀入。接种的高龄(4~6龄)幼虫，除豚草和苍耳以外，还能在菊花(黄连)、黄花蒿和两种向日葵(白 97-1 和天委 F₂)上完成发育，但存活率比豚草和苍耳低得多，历期也有所延长。高龄幼虫在非寄主植物上不取食，大部分幼虫在茎秆外吐丝包裹虫体后，不食不动直到死亡，甚至出现化蛹现象。在非选择情况下，由饥饿强迫在非目标寄主上发生“企图蛀食”所形成的“蛀孔”，形成一种取食假象。

表 32-3 室内非选择性条件下豚草卷蛾各龄幼虫的寄主专一性测定(马骏等, 2002)

供试植物	1-3 龄幼虫				4-6 龄幼虫			
	头数	取食	发育至化蛹	存活/d	头数	取食	发育至化蛹	存活率/%
菊科 Compositae								
豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	55	+++	Y	7~12	64	+++	Y	75.4
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	48	+++	Y	6~12	100	+++	Y	61.7
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	60	+	N	1~3	34	+	Y	8.8
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	50	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
野艾蒿 <i>A. lavandulaefolia</i>	60	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
加拿大蓬 <i>Conyza canadensis</i>	25	±	N	1~2	NA	NA	NA	NA
菊花 <i>Dendranthema morifolium</i>								
黄连 <i>D. morifolium</i> (cv. Yellow lotus)	30	±	N	1~2	30	+	Y	3.3
富士雪 <i>D. morifolium</i> (cv. Fuji snow)	50	±	N	1~2	NA	NA	NA	NA
硫华菊 <i>D. morifolium</i> (cv. Liuhua)	30	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
国庆菊 <i>D. morifolium</i> (cv. Guoqing)	50	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
万寿菊 <i>Tagetes erecta</i>	154	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
孔雀草 <i>T. patula</i>	156	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
麦杆菊 <i>Helichrysum bracteatum</i>	50	-	N	1~2	30	-	N	0
向日葵 <i>Helianthus annuus</i>								
白 97-1 <i>H. annuus</i> (var. Bai 97-1)	50	±	N	1~2	30	+	Y	10.0
寸嗑 <i>H. annuus</i> (var. Cunke)	50	+	N	1~2	25	+	N	0
天委 1 号 <i>H. annuus</i> (var. Tianwei 1)	60	±	N	1~2	30	+	N	0
天委 F ₂ <i>H. annuus</i> (var. Tianwei F ₂)	85	±	N	1~2	30	+	Y	6.7
内蒙 1 号 <i>H. annuus</i> (var. I-M1)	60	+	N	1~2	30	+	N	0
内蒙 2 号 <i>H. annuus</i> (var. I-M2)	50	±	N	1~2	34	+	N	0
鲤肠 <i>Eclipta prostrata</i>	40	-	N	1~2	40	±	N	0
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	40	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
女苑 <i>Turczaninowia fastigiata</i>	NA	NA	NA	NA	30	-	N	0
蓴麻科 Urticaceae								
蓴麻 <i>Boehmeria</i> sp.	50	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA

续表

供试植物	1~3 龄幼虫				4~6 龄幼虫			
	头数	取食	发育至化蛹	存活/d	头数	取食	发育至化蛹	存活率/%
锦葵科 Malvaceae								
棉花 <i>Gossypium hirsutum</i>	50	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
唇形科 Labiatae								
益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	NA	NA	NA	NA	40	-	N	0
苋科 Amaranthaceae								
青霜(野鸡冠花) <i>Celosia argentea</i>	NA	NA	NA	NA	60	-	N	0
空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	NA	NA	NA	NA	40	-	N	0
牛膝 <i>Achyranthes bidentata</i>	38	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
藜科 Chenopodiaceae								
藜(灰菜) <i>Chenopodium album</i>	25	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
土荆芥 <i>C. ambrosioides</i>	26	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
豆科 Leguminosae								
大豆 <i>Glycine max</i>	30	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
花生 <i>Arachis hypogaea</i>	42	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
蓼科 Polygonaceae								
毛蓼 <i>Polygonum barbatum</i>	31	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
茄科 Solanaceae								
辣椒 <i>Capsicum frutescens</i>	40	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
旋花科 Convolvulaceae								
甘薯 <i>Ipomoea batatas</i>	35	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA
空心菜 <i>I. aquatica</i>	80	-	N	1~2	NA	NA	NA	NA

注: +++; 正常取食, 并完成发育; +: 轻微取食, 只有少量幼虫蛀入茎内; ±: 企图取食(有少量食痕, 幼虫未蛀入); -: 不取食; Y: 能在茎秆内完成发育; N: 不能在茎秆内完成发育; NA: 数据未获得

2. 风险定量分析

(1) 寄主专一性风险定量测定表明, 在田间 17 种供试植物(豚草、苍耳、黄花蒿、菊花、黄连、富士雪、硫华菊、国庆菊、万寿菊、孔雀草、麦秆菊、向日葵(白 97-1、寸嗑、天委 1 号、天委 F₂、内蒙 1 号、内蒙 2 号))中, 具有羽化出成虫的供试植物及其风险值为: 豚草(1)、苍耳(0.03~0.07)、黄花蒿(0.002)。风险定性分级表明豚草卷蛾在黄花蒿表现为随机风险(风险指数值小于 0.01), 在其余的供试植物上均为 0 风险。

(2) 成虫产卵风险随种群数量的增多而逐渐扩大。在上述田间相同的供试植物中, 具有产卵风险的供试植物及其风险值则为: 豚草(0.76~1)、苍耳(0.05~1)、黄花蒿(0.06)、向日葵(0.001~0.004)、万寿菊(0.016), 向日葵和万寿菊为随机产卵风险寄主(风险值小于 0.01), 其他供试植物的风险值均为 0, 属 0 风险。

(3) 幼虫在供试植物上的取食存活风险, 在豚草上为 1, 苍耳上为 0.42, 在其余供试

植物上为 0。在田间，最大单因子选择性风险指数综合分析表明，豚草卷蛾在豚草和苍耳的风险指数(CRI)分别为 0.76 和 0.25(表 32-4)，属主动选择性风险(active selection risk)，在其他供试植物上的风险指数为 0，属无选择性风险(no selection risk)。

表 32-4 豚草卷蛾在 17 种供试植物上的寄主选择性风险指数(马骏等, 2002)

供试植物	田间第三代产卵选择性 风险指数 SEFRI ₍₁₎	幼虫存活率风险 SEFRI ₍₂₎	寄主专一性综合风 险 CRI
豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	1	1	0.76
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	0.049	0.42	0.25
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	0	0	0
菊花 <i>Dendranthema morifolium</i>			
黄莲 <i>D. morifolium</i> (cv. Yellow lotus)	0	0	0
富士雪 <i>D. morifolium</i> (cv. Fuji snow)	0	0	0
疏华菊 <i>D. morifolium</i> (cv. Liuhua)	0	0	0
国庆菊 <i>D. morifolium</i> (cv. Guoqing)	0	0	0
万寿菊 <i>Tagetes erecta</i>	0	0	0
孔雀草 <i>T. patula</i>	0	0	0
麦杆菊 <i>Helichrysum bracteatum</i>	0	0	0
向日葵 <i>Helianthus annuus</i>			
白 97-1 <i>H. annuus</i> (var. Bai 97-1)	0	0	0
寸嗑 <i>H. annuus</i> (var. Cunke)	0	0	0
天委 1 号 <i>H. annuus</i> (var. Tianwei 1)	0	0	0
天委 F ₂ <i>H. annuus</i> (var. Tianwei F ₂)	0	0	0
内蒙 1 号 <i>H. annuus</i> (var. I-M1)	0	0	0
内蒙 2 号 <i>H. annuus</i> (var. I-M2)	0	0	0

3. 豚草卷蛾在不同供试植物上的种群趋势风险

在上述田间 17 种笼罩植株接虫试验中，豚草卷蛾只能在豚草和苍耳上完成一个完整的世代发育。其种群趋势指数(I)以取食豚草为最高($I=23.15$)，其次为苍耳($I=4.39$)，而取食向日葵、菊花和黄花蒿等其余供试植物的种群趋势指数均为 0。种群风险以取食豚草为最大($RI=1$)，其次为苍耳($RI=0.19$)，两者均为种群选择性风险，在其余供试植物上的种群风险均为 0，与前述单因子选择性风险分析和综合风险分析的结果一致。幼虫在盆栽菊花、麦杆菊、万寿菊、孔雀草上，4 龄以前均不能存活，当接入 5 龄时，能在部分菊花上发育并形成虫瘿，但在所有供试菊花上 I 值和风险指数值均为 0。

(四) 生物气候限制因子

1. 对温湿度的适应性

豚草卷蛾的过冷却点在 $-6.84 \sim -15.84^{\circ}\text{C}$ 之间，随季节不同而变化，在冬季明显低于

夏季，并随入冬气温的逐渐降低而降低，最低达到 -15.84°C 。结冰点与过冷却点的变化趋势相似，但不如过冷却点变化明显。幼虫含水量在夏冬季节之间存在明显差异，越冬滞育幼虫的含水量明显低于生长期幼虫。幼虫含水量与过冷却点存在明显的线性相关性($r=0.9331$, $p<0.01$)，表明降低含水量是过冷却点降低的重要原因之一(马骏等, 2003)。

越冬幼虫在 -10°C 下种群 50%和 90%个体死亡时间分别为 146.36h 和 864.72h，而在 -15°C 下种群 50%和 90%个体死亡时间则分别缩短至 19.9h 和 73.69h，比 -10°C 下的时间要短得多，表明豚草卷蛾具有在最低月平均温度不超过 -10°C 的地区安全过冬的可能性。

在高温条件下，发育期各虫态的存活率和存活历期均随温度升高而下降。在 35°C 下，发育期虫态的化蛹率为 27.3%，其存活率、孵化率、正常羽化率和成虫的交配率在 50%~68.4%之间，产卵量仅为 87.6 粒/头，表明 35°C 已是豚草卷蛾生长发育的限制温度。在 37°C 下各虫态存活率进一步明显下降。当温度超过 39°C 时各虫态均不能存活。根据观察，成虫在 39°C 下不能交配，但能产出少量无效卵。在 40°C 下，成虫既不交配也不产卵，少量雌蛾存活历期最长可达 7 天。若将配对成虫在 40°C 下处理 2 天后置于室温下，成虫已不能恢复正常交配和产卵。表明在此处理条件下成虫的正常生理功能受到不可逆的损伤，实际上可视为死亡。

在高温处理下各虫态 50%和 90%个体死亡所需时间长短依次为成虫>幼虫>卵>蛹，以蛹的死亡历期最短，表明蛹对高温最敏感。

各虫态在不同湿度环境下以成虫所受的影响较小，卵在 68%以下的相对湿度下孵化率不超过 22.8%，若将着卵叶片保持新鲜，则卵的孵化率几乎不受环境湿度的影响。正常情况下化蛹和羽化要求环境湿度在 80%以上。就实际情况而言，豚草卷蛾幼虫和蛹均生活在虫瘿内，除非豚草茎秆干枯，否则环境湿度对其影响甚小，因此，湿度不是豚草卷蛾重要限制因子。

2. 生物气候相似性分析

所谓生物气候相似性，就是针对某种生物对气候环境的具体要求以及气候环境所能提供给生物所必需的气候条件的吻合程度。研究生防作用物及其寄主的生物气候相关性，其目的—是估计生防作用物在目标防治区释放后定殖的可能性，及其种群的增长潜力；二是估计生防作用物定殖于其他地理区的可能性，以及在给定的地理区对非目标物种的风险程度。进一步扩大利用豚草卷蛾，需要从生物相似性角度明确：①如果豚草卷蛾释放用于控制豚草、三裂叶豚草、苍耳和银胶菊，在这些杂草分布区此种天敌的能否定殖及其定殖后种群的增长潜力；②假如向日葵、菊花等重要经济作物在逼迫环境下可成为豚草卷蛾取食寄主，这种风险寄主是否一定是其生态寄主，即豚草卷蛾在向日葵分布区，两者的生物气候相似性吻合程度。利用 CLIMEX 模拟所得到的生物-气候相似性参数值 EI，可转化为定量测定生物气候风险值(bioclimate risk index, BCRI)。根据 Worner(1988)对 EI 值的分级标准，可将生物-气候相似性风险值粗略地归纳为性质不同的 3 级：即当 $\text{BCRI} \geq 0.09$ 时，适宜两者同时分布，属必然风险(inevitable risk)；当 $0.04 \leq \text{BCRI} < 0.09$ 时，为两者同时分布的边际区，属随机(偶然)风险(random risk)；当 $\text{BCRI} < 0.04$ 时，不适宜两者同时分布，为 0 风险(no risk)。BCRI 具有两种用途，即一方面预测生防作用物在释放地定殖的可能性，另一方面预测生防作用物释放后对可为害的非目标生物所具有

的风险程度。因此作为不同预测目的,可按照不同用途划分不同的风险分级标准(马骏等, 2003c)。

3. 豚草卷蛾、豚草、三裂叶豚草、银胶菊和向日葵在我国的适生性分布

利用 CLIMEX 反复模拟调试后,得到豚草卷蛾、豚草、三裂叶豚草、银胶菊和向日葵的气候适应性参数(表 32-5)。这些参数客观地反映了豚草卷蛾等 5 种生物对气候条件的需求特征和对气候逆境因子忍耐程度。在我国大陆 85 个气象观测地区中,豚草卷蛾在我国可定殖($EI \geq 20$)的气候观测区有 64 个,其中有 6 个地区的 EI 值为 0。豚草可能定殖($EI \geq 20$)的气候观测区同样为 64 个。三裂叶豚草可定殖($EI \geq 20$)的地区有 74 个。与豚草相比,三裂叶豚草偏向于东北。银胶菊在气候观测区可分布的地区有 33 个,比前三种的风险分布区要少得多,由于受到低温的限制,主要分布于偏南的暖冬地区。向日葵可定殖的地区有 70 个,表明向日葵作为栽培作物具有较强的气候适应性。

表 32-5 豚草卷蛾、豚草、三裂叶豚草、银胶菊和向日葵 CLIMEX 参数设定值(马骏等, 2003c)

参数	豚草卷蛾	豚草	三裂叶豚草	银胶菊	向日葵
发育起点温度	12.5	4.5	2.0	10.0	2.0
最适发育下限温度	18.0	18.0	13.0	20.0	16.0
最适发育上限温度	28.0	32.0	28.0	34.0	25.0
高温限制温度	35.0	36.0	34.0	35.0	33.0
有效积温	517	2387.9	2406.5	2300.0	1860.0
最低限制含水量	0.05	0.08	0.08	0.13	0.04
最适含水量下限	0.12	0.12	0.12	0.18	0.1
最适含水量上限	1.5	0.9	0.9	0.85	0.8
最高限制含水量	2.0	2.0	1.6	1.5	2.0
滞育诱导日照长度	13.0	14.0	14.0	0	0
冷胁迫阈值温度	0	0	0	5.0	0
冷胁迫温度速率	0.000 12	0.0001	0.000 012	0.0005	0.000 001
冷胁迫日度速率	0.000 01	0.000 15	0.000 015	0	0.000 014
热胁迫阈值温度	35.0	39.0	34.0	42.0	33.0
热胁迫温度速率	0.02	0.02	0.04	0.03	0.0028
热胁迫阈值	80.0	80.0	60.0	0	40.0
干胁迫阈值	0.05	0.08	0.08	0.09	0.08
干胁迫速率	0.002	0.004	0.002	0.015	0.0002
湿胁迫阈值	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0
湿胁迫速率	0.0002	0.0002	0.0002	0.01	0.004
湿热温度阈值	0	0	0	0	30.0

续表

参数	豚草卷蛾	豚草	三裂叶豚草	银胶菊	向日葵
湿热水分速率	0	0	0	0	0.30
湿热胁迫速率	0	0	0	0	0.01

4. 豚草卷蛾在我国对普通豚草可能控制的预测地区

风险评价的目的其实质就是对于风险的预测。以生防作用物与其防治的目标生物而言,希望两种生物气候相似性综合风险指标的 BCRI 值越大越好。按照上述原则,预测出豚草卷蛾在我国释放用于控制豚草时,二者在 85 个气象观测区中可同时适宜定殖($BCRI \geq 0.09$)的地区有:大连、北京、天津、济南、青岛、烟台、天水、西安、开封、南阳、信阳、徐州、南京、蚌埠、芜湖、上海、杭州、温州、武汉、恩施(湖北)、宜昌、巴塘(四川)、成都、宜宾、重庆、西昌、腾冲(云南)、昭通(云南)、昆明、蒙自(云南)、贵阳、芷江(湖南)、常德、长沙、衡阳、郴县(湖南)、九江、南昌、赣州、南平(福建)、厦门、福州、桂林、梧州、百色(广西)、北海、龙州(广西)、南宁、梅县、汕头、湛江、广州、阳江、香港、海口、榆林(海南)。

可同时定殖($0.04 < BCRI < 0.09$)的边际地区有:营口、包头、沈阳、兰州、石家庄、太原。

不能同时定殖($BCRI < 0.04$)的地区有:爱辉(黑龙江)、齐齐哈尔、哈尔滨、佳木斯、牡丹江、海拉尔(内蒙古)、呼和浩特、林西(内蒙古)、苏尼特左旗(内蒙古)、长春、延吉(吉林)、和田(新疆)、库车(新疆)、喀什、且末(新疆)、伊宁、乌鲁木齐、安西(甘肃)、玉门(甘肃)、银川、西宁、玉树(青海)、拉萨。

5. 豚草卷蛾在我国对三裂叶豚草可能控制的预测地区

豚草卷蛾对三裂叶豚草在 85 个气象观测区中可能同时适宜定殖($BCRI > 0.09$)的地区有:大连、北京、天津、济南、青岛、烟台、天水、西安、开封、南阳、信阳、徐州、南京、蚌埠、芜湖、上海、杭州、温州、武汉、恩施(湖北)、宜昌、巴塘(四川)、成都、宜宾、重庆、西昌、腾冲(云南)、昭通(云南)、昆明、蒙自(云南)、贵阳、芷江(湖南)、常德、长沙、郴县(湖南)、南平(福建)、厦门、福州、桂林、梧州、百色(广西)、北海、龙州(广西)、南宁、梅县、汕头、湛江、广州、阳江、香港、海口、榆林(海南)。

可同时定殖($0.04 < BCRI < 0.09$)的边际地区有:包头、沈阳、营口、兰州、太原、石家庄、西宁、拉萨、九江、南昌。

不能同时定殖($BCRI < 0.04$)的地区有:爱辉(黑龙江)、齐齐哈尔、哈尔滨、佳木斯、牡丹江、海拉尔(内蒙古)、呼和浩特、林西(内蒙古)、苏尼特左旗(内蒙古)、长春、延吉(吉林)、和田(新疆)、库车(新疆)、喀什、且末(新疆)、伊宁、乌鲁木齐、安西(甘肃)、玉门(甘肃)、银川、玉树(青海)、衡阳、赣州。

6. 豚草卷蛾在我国对银胶菊可能控制的预测地区

豚草卷蛾与银胶菊在 85 个气象观测区中可能同时适宜定殖($BCRI > 0.09$)的地区有: 信阳、蚌埠、成都、宜宾、重庆、蒙自(云南)、芷江(湖南)、长沙、衡阳、厦门、梧州、百色(广西)、北海、龙州(广西)、南宁、梅县、汕头、湛江、广州、阳江、香港、海口、榆林(海南)。

可同时定殖($0.04 \leq BCRI < 0.09$)的边际地区有: 西安、南阳、武汉、宜昌、西昌、腾冲(云南)、昆明、贵阳、赣州、福州、桂林。

不能同时定殖($BCRI < 0.04$)的地区有: 爱辉(黑龙江)、齐齐哈尔、哈尔滨、佳木斯、牡丹江、包头、海拉尔(内蒙古)、呼和浩特、林西(内蒙古)、苏尼特左旗(内蒙古)、长春、延吉(吉林)、大连、沈阳、营口、北京、天津、济南、青岛、烟台、和田(新疆)、库车(新疆)、喀什、且末(新疆)、伊宁、乌鲁木齐、安西(甘肃)、兰州、天水、玉门(甘肃)、银川、太原、石家庄、西宁、玉树(青海)、开封、徐州、南京、芜湖、上海、杭州、温州、恩施(湖北)、拉萨、巴塘(四川)、昭通(云南)、常德、郴县(湖南)、九江、南昌、南平(福建)。

7. 豚草卷蛾在我国对向日葵可能具有风险的预测地区

向日葵属的各种野生种主要分布在北纬 30° ~ 52° 之间的北美洲南部和西部的广大地区, 以及秘鲁和墨西哥北部等地。我国的向日葵在 16 世纪末或 17 世纪初从国外传入, 至今约有 370 年的历史。目前我国已有 18 个省(市、自治区)种植向日葵, 种植面积居世界第四位, 主要分布在东北、华北、西北的半干旱、轻盐碱地区。

我们假定: 如果豚草卷蛾能为害向日葵, 那么豚草卷蛾在 85 个气象观测区中对向日葵具有风险的($BCRI > 0.04$)的地区有: 大连、北京、天津、济南、青岛、烟台、天水、西安、开封、南阳、信阳、徐州、南京、蚌埠、上海、温州、恩施(湖北)、宜昌、巴塘(四川)、成都、宜宾、西昌、腾冲(云南)、昭通(云南)、昆明、蒙自(云南)、贵阳、厦门、福州、梧州、北海、南宁、汕头、湛江、阳江、香港、花莲、包头、沈阳、营口、兰州、太原、石家庄、西宁、芜湖、杭州、武汉、拉萨、重庆、芷江(湖南)、常德、长沙、衡阳、郴县(湖南)、九江、南平(福建)、百色(广西)、广州、榆林(海南)。

无风险($BCRI < 0.04$)的地区为: 爱辉(黑龙江)、齐齐哈尔、哈尔滨、佳木斯、牡丹江、海拉尔(内蒙古)、呼和浩特、林西(内蒙古)、苏尼特左旗(内蒙古)、长春、延吉(吉林)、和田(新疆)、库车(新疆)、喀什、且末(新疆)、伊宁、乌鲁木齐、安西(甘肃)、玉门(甘肃)、银川、玉树(青海)、南昌、赣州、桂林、龙州(广西)、梅县、海口。

(五) 豚草卷蛾与本地天敌苍耳螟资源生态位分析

1. 寄主种类生态位

经生态位指数测度, 苍耳螟的食物种类生态位宽度指数大于豚草卷蛾。在常用食物资源的利用上, 豚草卷蛾以豚草作为常用食物, 利用率达 93.5%, 而苍耳螟以苍耳为常用食物, 利用率为 59.3%, 明显低于豚草卷蛾对豚草的利用率, 表明苍耳螟的食物种类生态位大于豚草卷蛾。两种天敌的食物种类具有一定的生态位重叠度。

2. 豚草卷蛾和苍耳螟分别在豚草和苍耳上的取食空间生态位

豚草：当植株近基部主茎直径小于 1.0cm 时，两种天敌在各级枝条上的取食空间生态位宽度指数和重叠指数相似，两者均以主茎和一级枝作为常用取食资源，而且重叠程度较高，但在利用率上豚草卷蛾倾向于一级枝，而苍耳螟则偏于主茎。当主茎大于 1.0cm 时，苍耳螟的生态位宽度指数大于豚草卷蛾，而在常用资源利用上两者有所分化，豚草卷蛾以一、二级枝为主，而苍耳螟以主茎和一级枝为主；生态位重叠指数较前两种株型有所减小，表明随着植株增大重叠程度有所降低(马骏等，2003a)。

按照枝条大小(以直径表示)划分，豚草卷蛾两种虫龄和蛹在不同大小枝上的生态位宽度指数均小于苍耳螟的幼虫和蛹，与不同分级枝的分布结果相似。从常用资源的利用率看，豚草卷蛾各龄幼虫主要利用直径在 6.0mm 以内的幼嫩枝，蛹主要利用枝的直径在 8.0mm 以内；而苍耳螟随着虫龄的增大，趋向利用较大的老龄枝，而且常用资源利用范围扩大，实际上直径大于 4.0mm 的枝条均可利用。从均匀度指数看，苍耳螟以蛹的生态位宽度指数最大，豚草卷蛾高龄幼虫的生态位宽度稍高于其他两种虫态。这种现象也反映了两种天敌在豚草上的行为特征，即苍耳螟的移动性大于豚草卷蛾，尤其是苍耳螟的高龄幼虫(5、6 龄)取食部位不固定，移动性更强，对于细小枝不但难以满足其食量需要，而且虫体无法蛀入。豚草卷蛾的低龄幼虫尤其是一龄幼虫也具有一定的移动性，如当植株进入花穗期以后，低龄幼虫蛀入后往往不能刺激枝茎形成虫瘿使幼虫被迫转移，而一旦形成虫瘿后则很少发生转移现象。两种天敌的百分率重叠测度指数表明，同一种虫内不同虫龄和虫态之间的生态位重叠指数明显大于虫种间的重叠指数。

苍耳：当苍耳处较小的株型(主茎直径小于 1.2cm)时，豚草卷蛾的生态位宽度指数明显大于苍耳螟，原因在于豚草卷蛾可选择主茎和一级枝作为常用资源，而苍耳螟仅以主茎作为常用资源。当苍耳主茎直径大于 1.2cm 时，两种天敌的生态位宽度指数十分接近，但常用资源豚草卷蛾以一、二级枝为主，苍耳螟以主茎和一级枝为主，反映了两种天敌对取食枝型的选择差异性，即豚草卷蛾明显趋向于寄主的幼嫩枝条，而苍耳螟主要取食较大的老龄枝。两种昆虫在苍耳上的生态位重叠指数较豚草上的要小，反映了两者在生态位宽度上的差异性。

在苍耳不同大小枝条上，豚草卷蛾幼虫和蛹的生态位宽度指数比苍耳螟的要小，主要以直径 6.0mm 以内的幼嫩枝作为常用资源。苍耳螟的生态位宽度指数随虫龄增大明显增大，幼虫常用枝的直径范围可达到 2.1~16.0mm，其高龄幼虫与蛹的生态位宽度指数相似。百分率重叠测度指数表明，两种天敌在苍耳不同大小枝上的重叠分布程度大于豚草，原因在于长成的苍耳植株其枝的分级程度不如豚草多，因此可利用枝的变异程度不如苍耳。但与后者相似的是，种内的重叠程度大于种间的重叠程度。

(六) 对寄主植物的控制作用

1. 作用机理

豚草卷蛾的取食行为改变了寄主植物的生理状态(Raman, 1992, 1994)。寄主受害后，被取食部位的生长调节剂异常合成，后期所产生的多聚酚可阻碍导管筛的修复生长。豚

草卷蛾在取食阶段，通过隔断导管连接，并诱导产生愈伤营养组织，以及将虫粪排在导管隔离带是控制寄主植物生活力的关键。只要幼虫连续取食，细胞内淀粉和油脂类物质就保持动态平衡，使之有利于鳞翅目幼虫的生长和发育。在虫瘿形成的早期，豚草卷蛾高度的取食压力使寄主植物将体内大多数光合产物向寄生者卷蛾传输。和其他大多数形成虫瘿的昆虫一样，卷蛾类昆虫不但消耗寄主植物的组织，而且诱导寄主改变代谢方式和再生组织的排列，特别在寄主的生长前期，这种取食压力易使寄主生长严重受阻。

2. 控制效能

豚草卷蛾最明显的防治效果是降低了植株的高度和生活力，从而相应地减少花粉和产种量，但是对受害杂草种籽的单粒重、充实率和生活力无影响(McFadyen, 1987, 1992)。在银胶菊等杂草控制区，若雨量充足并有足够的寄主植物可供取食，大多数植株可被卷蛾感染，虫量达到每株 20~30 头，苗期也有每株 1~5 头，在这种情况下所有植株的高度不超过 50cm，而且产种量很少(Navie *et al.*, 1996, 1998)，凡高度超过 150cm 的植株均未受到卷蛾感染。减少了植株高度即相应地减少了产种量，植株的线性空间减少一半(如高度)，表面积能减少到仅为原来的 1/4，花粉和种子的产量减少至原来的 1/4~1/6(McFadyen, 1992)。

豚草卷蛾对豚草的控制潜力表现为种群具有很强的繁殖力和扩散能力。在澳大利亚东部适宜的条件下，种群可以每代 100 倍的速度增殖。在辽宁丹东，田间笼罩种群经 2 代后增加 84 倍；在湖南释放后的田间虫瘿数年平均增长 63 倍，种群以每代 100~150m 的速度向前扩散。成虫能单独飞行或随气流飞行 20km，找到数公里以外的孤立寄主植物。在澳大利亚昆士兰州，豚草卷蛾自 1983 年释放，12 个月内扩散区域超过 100km，到 1986 年秋季，已扩散至整个银胶菊分布区，扩散距离达 1000km 以上(McFadyen, 1989, 1992)。

当有其他植物与控制的目标杂草竞争时，可明显提高豚草卷蛾的控制效果。豚草卷蛾在春季常因种群数量不足对苗株控制效果不明显，但受害苗株会由于竞争长不过其他杂草，因而常未开花即死亡。在冬春两季气候适宜的年份，这种控制效果十分明显。用蒺藜 *Cenchrus ciliaris* 与银胶菊混合栽培，同样的接虫条件下，银胶菊的高度比对照(无蒺藜竞争)矮 25%~44%，地上部分的生物量比对照减少 79%，产种量仅为对照的 2%，但竞争对蒺藜地上部分的生物量并无影响。

3. 影响控制效果的生态因素

不同营养质量对成虫的大小和产卵量影响甚大。成虫喜选择嫩绿的叶片产卵，在生长不良的寄主植物上一般不产卵或产卵极少(McClay, 1987)。幼虫取食萎蔫的植株或枯枝，其发育会受到严重阻碍，甚至死亡。越冬代成虫常由于幼虫营养不良，产卵量平均仅为 100 粒/头，而营养充足时成虫产卵量可多达 1000~1300 粒/头(McFadyen, 1992)。

各地区的有效积温决定了豚草卷蛾一年发生的世代数。若某地的有效积温不足以使豚草卷蛾在 1 年内完成 2 个世代，则难以取得理想的控制效果。气温低于 14℃ 时，其蛾量和产卵量均受到明显抑制。降雨通过寄主植物的生长状态间接影响豚草卷蛾的种群数量。由于幼虫取食的营养质量对繁殖力影响甚大，因此，雨量是影响豚草卷蛾种群数量的重要因素。降雨可抑制成虫羽化，并使成虫死亡率提高。

从理论上讲,利用越冬代种群在营养生长前期控制植株是最佳时期,单个虫瘿即可阻碍植株生长,很少开花,容易导致死亡。豚草卷蛾成虫产卵 100~1000 粒/头,世代存活率高,表现了该虫的潜在控制力。但其发生 1 代需要 28~65d,而其寄主植株一般在雨量充足时经过 8 周后即可开花,当卷蛾有足够的种群数量时,已失去了对豚草的最佳控制时期,这种现象在春季气候干旱地区表现尤为突出。在春季干旱期内,寄主植物十分稀少,而豚草卷蛾随气温升高提前解除滞育,种群会因缺乏食物而大量死亡 (McFadyen, 1986)。解决这一问题的途径之一是在局部区域内人为提供寄主植物适宜的生长条件,以维持必要的卷蛾种群数量。

4. 与本地天敌苍耳螟对豚草的联合控制作用

三因子二次正交旋转组合设计研究表明,两种天敌对寄主的生物量、种子量和株高均有明显的抑制作用(马骏等, 2003a)。各处理组合中,具有最大控制效果的处理组合及其防效分别为:当主茎直径为 1.10cm,单株分别接入豚草卷蛾和苍耳螟 63 头和 8 头时,对生物量的控制效果达到 94.1%;当主茎直径为 1.10cm,分别接入豚草卷蛾和苍耳螟 17 头和 8 头时,对株高的防效为 31.2%;当接虫主茎直径为 0.17cm 时,单株分别接入豚草卷蛾和苍耳螟 40 头和 5 头时,对种子量的防效达到 99.1%。而当主茎直径达到 2.11cm 时,分别接入豚草卷蛾和苍耳螟 40 头和 5 头,两种天敌对寄主生物量、种子量和株高的防效仅分别为 21.0%、6.1%和 21.4%,抑制效果最低。两种天敌的控制效果随寄主生长和补偿能力的增强而减弱。当寄主处于生长前期(主茎直径小于 0.17cm)时,两种虫量的作用效应大于植株的补偿作用;而长成的寄主植物其补偿效应则大于两种天敌的虫量作用。3 种因子间的作用方式相互独立,两种天敌之间不存在明显的竞争干扰现象,属于可利用的有效天敌。综合平均效应表明,寄主的生育期(补偿能力)要大于两种虫量的影响,豚草卷蛾对寄主种子量的影响大于苍耳螟,而苍耳螟对寄主的生物量和植株高度的影响要大于豚草卷蛾。在两种天敌的应用中,为了提高防治效果,建议及早在豚草的生长前期释放或扩增天敌种群数量。

在豚草的生长早期,特别是主茎直径在 0.7cm 以下时,即使低水平虫量也会明显地降低生物量。根据田间观察,豚草在生长前期对虫害十分敏感,即使少量幼虫也可使其生长严重受阻,甚至死亡,特别在苗期(主茎直径 0.1~0.2cm),单株豚草卷蛾虫量一般不超过 2 头,但受害株由此会大量死亡。豚草的耐害能力随植株的生长而增强,对于主茎直径超过 0.7cm 的植株,一般自然发生的虫量水平难以致死植株,虫害的作用主要是降低植株的生活力并使其衰老。当豚草处于生长后期,即使虫量水平较高,但由于植株的补偿作用会使防效不佳。因此,在两种天敌利用过程中,为了提高其控制效果,必须要在豚草生长前期释放或助增足够的天敌数量。

二、风险-效益综合分析

豚草卷蛾取食的寄主植物均为杂草,从环境和生态意义上,这些杂草绝大多数都是需要防治的对象,唯一有经济价值的是黄花蒿(提取青蒿素)(刘春朝等, 2000),但豚草卷蛾在黄花蒿上的种群风险为 0。

第八节 豚草的应用与基础研究发展策略

生物多样性、经济全球化加速了生物入侵,使许多生物到达它们以往不可能到达的地区,而人为活动的干扰更加速了一些入侵生物的蔓延。中国加入世贸组织后,将加速经济全球化,无疑生物全球化也将随之加快,豚草的危害态势也将更为严峻。豚草的危害性已引起了人们的高度重视,多年来各国的科学家对其开展了大量的研究,但主要集中在其生物学和生态学特性、花粉致病和防治 3 个方面,尽管研究的中心已逐渐由宏观向微观、由定性向定量,在群体、个体、细胞乃至分子水平各层次展开,但研究缺乏系统性,更缺少宏观和微观手段的结合。由于豚草是一种外来入侵杂草,在许多方面,例如,其入侵的遗传演变和生态适应机制,对入侵地植物区系群落结构和功能的影响,入侵后的种群建立、扩展和潜在危害以及综合防除等研究尚远远不够,因此今后应加强以下几个方面的工作:①加快豚草分布的普查,弄清豚草的发生情况,扑灭豚草零星发生区,阻止其进一步扩散、蔓延;②做好宣传工作,引起社会的广泛重视,使豚草的防除工作真正变为政府和群众的自觉行动;③考虑豚草治理的长远目标及近期功利相结合,研究豚草的各种防治措施(如生物防治、替代控制、化学防除等)的集成技术体系并示范,以达到在豚草发生区可持续控制的目的;④加强豚草利用研究,使之变害为利,已有研究证实,豚草中的化学物质可作为新型药用植物资源开发的依据,如 Bianchi(1968)研究指出,从豚草中分离的 dihyroparthenolide 和 psilostachin 对人的鼻咽癌的培养细胞具有抑制作用,王蒲海等(1993)研究也认为,psilostachin 等具有抗肿瘤、抑菌、杀螺等活性,豚草中的绿原酸(chlorogenic acid)在医学上证实具有利胆、抗菌、降压、增高白血球及兴奋神经系统等多种药理的作用(戚向阳和张声华,1998);⑤系统研究并揭示紫茎泽兰种群的遗传分化与演变及生态适应机制,以及豚草种群扩张的化学生态学机制,为豚草入侵地生态系统重建、生态修复及控制提供理论依据和技术支撑;⑥加强对豚草入侵风险和环经评估模式与体系的研究,分析豚草入侵对种植业、畜牧业、林业和农田生态系统、森林生态系统的影响程度和影响范围,评估豚草入侵造成的种植业、畜牧业、林业直接经济损失和对农田生态系统及森林生态系统的影响。

(万方浩 刘万学 马骏 郭建英)

主要参考文献

- 陈灵芝. 1994. 生物多样性保护现状及其对策. 见: 生物多样性研究的原理和方法. 北京: 中国科学技术出版社. 13~35
- 陈贤兴, 陈永群, 何献武等. 2002. 几种植物对豚草的生化他感作用. 甘肃科学学报, 14(3): 58~61 [Chen X X, Chen Y Q, He X W *et al.* 2002. The allelopathy of the extracts from several plants on *Ambrosia artemisiifolia*. *Journal of Gansu Sciences*, 14(3): 58~61]
- 陈贤兴, 单和好. 2003. 豚草对几种经济作物的生化他感作用. 海南大学学报(自然科学版), 21(1): 69~73 [Chen X X, Shan H H 2003. The allelopathy of the water extract from *Ambrosia artemisiifolia* on several economic crops. *Natural Science Journal of Hainan University*, 21(1): 69~73]
- 邓余良, 王云翔, 彭慧等. 2003. 豚草的分布与防除技术措施. 植保技术与推广, 23(4): 27~28 [Deng Y L, Wang Y X, Peng H *et al.* 2003. Occurrence and control measures of ragweed. *Plant Protection Technology and Extension*, 23(4): 27~28]

- 丁建清, 万方浩. 1993. 豚草卷蛾生物学特性及控制效果. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 221~226
- 关广清, 韩亚光, 尹睿等. 1995. 经济植物替代控制豚草的研究. 沈阳农业大学学报, 26(3): 277~283 [Guan G Q, Han Y G, Yin R *et al.* 1995. Studies on displacing and controlling of the ragweed with economic plants. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 26(3): 277~283]
- 关广清, 黄宝华. 1993. 生物方法防治豚草. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草的综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 153~155
- 关广清, 李素德, 高东昌等. 1991. 豚草的剪叶实验研究. 应用生态学报, 2(4): 202~297 [Guan G Q, Li S D, Gao D C *et al.* 1991. Effect of defoliation on growth and fruiting of ragweed. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2(4): 202~297]
- 关广清. 1985. 豚草和三裂叶豚草的形态特征和变异类型. 沈阳农学院学报, 16(4): 9~17 [Guan G Q. 1985. Morphological characteristics and differentiation types of *Ambrosia artemisiifolia* and *Ambrosia trifida*. *Journal of Shenyang Agricultural College*, 16(4): 9~17]
- 关广清. 1987. 专食豚草的昆虫—豚草条纹叶甲. 生物防治通报, 3(4): 175~178 [Guan G Q. 1987. *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera: Chrysomelidae) a promising biocontrol agent of common ragweed, *Ambrosia artemisiifolia*. *Chinese Journal of Biological Control*, 3(4): 175~178]
- 关广清. 1993a. 三裂叶豚草及其三种变型. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草的综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 25~28
- 关广清. 1993b. 豚草属植物概述. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草的综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 1~15
- 黄世水, 古瑾. 1996. 从进口玉米中检出假高粱和三裂叶豚草. 植物检疫, 10(6): 379
- 姜景峰, 姜晓装. 1995. 豚草生长节律、最佳防治时间和方法的研究. 江西植保, 18(1): 12~13
- 金惠军, 崔松. 1997. 紫穗槐替代控制豚草的研究. 广东公路交通, 51(增刊): 139~144 [Jin H J, Cui S. 1997. Studies on replace control ragweed with *Amorphafruticosa*. *Guangdong Gonglu Jiaotong*, 51(suppl): 139~144]
- 李迪强, 万方浩. 1993a. 温湿度对豚草条纹叶甲的影响. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草的综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 190~195
- 李迪强, 万方浩. 1993b. 室内繁殖对豚草条纹叶甲影响. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草的综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 196~201
- 李宏科, 李彦宁, 邓克勤. 1993. 恶性杂草——豚草生物防治研究. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 139~148
- 李素德, 高东昌, 关广清. 1993. 豚草和三裂叶豚草的物候期. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 53~58
- 李秀梅. 1997. 恶性害草豚草的综合防治研究进展. 杂草科学, 1: 7~10 [Li X M. 1997. The progress of IPM of *Ambrosia artemisiifolia*. *Chinese Journal of Weed Sciences*, 1: 7~10]
- 李玉凡, 张莉, 于龙勇等. 1993. 豚草天敌——豚草卷蛾生物学特性的研究. 见: 万方浩, 关广清, 王初主编. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 216~220
- 刘春朝, 王玉春, 欧阳潘. 2000. 青蒿素生物合成研究进展. 天然产物与开发, 12(1): 83~86 [Liu C Z, Wang Y C, Ouyang P. 2000. Advance in artemisinin biosynthesis research. *Nat. Product Res. Dev.*, 12(1): 83~86]
- 刘良玉, 李辉, 刘培. 1998. 不同除草剂防除豚草效果研究. 安徽农学通报, 4(2): 55~55
- 吕怡兵, 闫雪, 王洋等. 1999. 三裂叶豚草花粉挥发成分的GC-MS分析. 分析测试学报, 18(2): 42~44 [Lü Y B, Yan X, Wang Y *et al.* 1999. Analysis of the component of *Ambrosia trifida* L. pollen essential oil by gas chromatography-mass spectrometry. *J. Instrumental Analysis*, 18(2): 42~44]
- 马骏, 万方浩, 郭建英等. 2002. 豚草卷蛾的寄主专一性风险评价. 生态学报, 22(10): 1710~1717 [Ma J, Wan F H, Guo J Y *et al.* 2002. Host specificity for *Epiblema strenuana* (Lepidoptera: Tortricidae): a biocontrol agent against ragweed, *Ambrosia artemisiifolia* (Compositae). *Acta Ecologica Sinica*, 22(10): 1710~1717]
- 马骏, 万方浩, 郭建英等. 2003a. 豚草卷蛾与苍耳螟的资源生态位研究. 生态学报, 23(11): 2232~2238 [Ma J, Wan F H, Guo J Y *et al.* 2003a. Resource use overlap between *Epiblema strenuana* and *Ostrinia orientalis*: two biocontrol agents *Ambrosia artemisiifolia* and *Xanthium sibiricum*. *Acta Ecologica Sinica*, 23(11): 2232~2238]
- 马骏, 万方浩, 郭建英等. 2003b. 豚草卷蛾对湿度的适应性. 中国生物防治, 19(4): 158~161 [Ma J, Wan F H, Guo J Y *et al.* 2003b. Adaptability of *Epiblema strenuana* to temperature and humidity conditions. *Chinese Journal of Biological Control*, 19(4): 158~161]
- 那美玲, 李彬, 周军. 2001. 黄石地区豚草花粉分布及临床致病性研究. 中华微生物学和免疫学杂志, 21(增刊): 50~51 [Na M

- L, Li B, Zhou J. 2001. pollen distribution and its nosogenetic to human being of *Ambrosia artemisiifolia* in Huangshi District. *Chin. J. Microbiol. Immunol.*, 21(Suppl.): 50-51]
- 戚向阳, 张声华. 1998. 杜仲叶绿原酸的提取、分离和鉴定. 植物资源与环境, 7(1): 61~62
- 沙伟, 周福军, 祖元刚. 1999. 东北地区豚草种群的遗传变异与遗传分化. 植物研究, 19(4): 452~456 [Sha W, Zhou F J, Zu Y G. 2000. Genetic variability and differentiation of *Ambrosia artemisiifolia* from northeast China. *Bulletin of Botanical Research*, 19(4): 452~456]
- 沙伟, 周福军, 祖元刚. 2000. 不同生境三裂叶种群的遗传结构. 植物研究, 20(1): 94~98 [Sha W, Zhou F J, Zu Y G. 2000. The population genetic structure of *Ambrosia trifida* in different environment. *Bulletin of Botanical Research*, 20(1): 94~98]
- 孙刚, 殷秀琴, 祖元刚. 2002. 豚草发生地土壤动物的初步研究. 生态学报, 22(4): 608~611 [Sun G, Yin X Q, Zu Y G. 2002. Preliminary studies on soil animals in a ragweed habitat. *Acta Ecologica Sinica*, 22(4): 608~611]
- 万方浩, 丁建清. 1993. 豚草卷蛾的寄主专一性测定. 生物防治通报, 9(2): 69~75 [Wan F H, Ding J Q. 1993. Host specificity of *Epiblema strenuana* (Lepidoptera; Tortricidae); a potential biocontrol agent for *Ambrosia artemisiifolia* and *A. trifida* (Compositae). *Chinese Journal of Biological Control*, 9(2): 69~75]
- 万方浩, 郭建英, 王德辉. 2002. 中国外来入侵生物的现状管理对策及风险评价体系. 见: 王德辉, Jeffrey A McNeely 主编. 防治外来入侵物种. 北京: 中国环境科学出版社. 77~102
- 万方浩, 王韧, 关广清等. 1993. 恶性害草豚草综合治理研究. 见: 万方浩, 关广清, 王韧, 主编. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 105~125
- 万方浩, 王韧, 邱式邦. 1989. 豚草条纹叶甲(鞘翅目: 叶甲科)的寄主专一性测定. 生物防治通报, 5(1): 20~23 [Wan F H, Wang R, Qiu S B. 1989. Host specificity tests of *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera; Chrysomelidae); an important biological control agent of *Ambrosia artemisiifolia* L. *Chinese Journal of Biological Control*, 5(1): 20~23]
- 万方浩, 王韧. 1990a. 恶性害草豚草的生物学及生态学特性. 杂草学报, 4(1): 42, 45~48 [Wan F H, Wang R. 1990a. Biological and ecological characteristics of pernicious weed, *Ambrosia artemisiifolia*. *Journal of Weed Sciences*, 4(1): 42, 45~48]
- 万方浩, 王韧. 1990b. 条纹叶甲控制豚草的效果及其评价. 生物防治通报, 6(1): 8~12 [Wan F H, Wang R. 1990b. A case study on the control effects of *Ambrosia artemisiifolia* by the introduced biological control agent, *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera; Chrysomelidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 6(1): 8~12]
- 万方浩, 王韧. 1990c. 豚草条纹叶甲实验种群生命表. 生物防治通报, 6(2): 64~67 [Wan F H, Wang R. 1990c. An experimental population life table of *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera; Chrysomelidae), a potential biological control agent of *Ambrosia artemisiifolia*. *Chinese Journal of Biological Control*, 6(2): 64~67]
- 万方浩, 王韧. 1990d. 低温冷藏对豚草条纹叶甲存活力的影响. 生物防治通报, 6(4): 145~147 [Wan F H, Wang R. 1990. The survival rate and fecundity of *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera; Chrysomelidae) underwent low temperature storage. *Chinese Journal of Biological Control*, 6(4): 145~147]
- 万方浩, 王韧. 1991. 豚草条纹叶甲的生态学特性. 生态学报, 11(3): 232~236 [Wan F H, Wang R. 1991. Laboratory bionomical studies on *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera; Chrysomelidae). *Acta Ecologica Sinica*, 11(3): 232~236]
- 万方浩, 王韧. 1993a. 恶性害草豚草的生物学及生态学特性. 见: 万方浩, 关广清, 王韧主编. 豚草及豚草的综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 59~64
- 万方浩, 王韧. 1993b. 豚草和三裂叶豚草在我国的分布、危害及其防治策略. 见: 万方浩, 关广清, 王韧主编. 北京: 中国科学技术出版社. 89~94
- 万方浩. 1991. 豚草天敌——豚草卷蛾及其可利用性的论证. 生物防治通报, 7(4): 177~180 [Wan F H. 1991. A literature review on *Epiblema strenuana* a potential biological control agent of *Ambrosia artemisiifolia* and its feasibility of application in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 7(4): 177~180]
- 万方浩. 1993. 豚草天敌——豚草卷蛾及其可利用性的论证. 见: 万方浩, 关广清, 王韧主编. 豚草及豚草综合治理. 北京: 中国科学技术出版社. 204~207
- F.大力, 祝心如. 1996a. 豚草的化感作用研究. 生态学报, 16(1): 11~19 [Wang D L, Zhu X R. 1996a. Research on allelopathy of *Ambrosia artemisiifolia*. *Acta Ecologica Sinica*, 16(1): 11~19]
- F.大力, 祝心如. 1996b. 豚草及三裂叶豚草挥发物成分的 GC 和 GC/MS 分析. 质谱学报, 17(3): 37~41 [Wang D L, Zhu X R. 1996b. GC and GC/MS analysis of volatile of *Ambrosia artemisiifolia* and *A. trifida*. *Chinese Journal of Mass Spectrometry Society*, 17(3): 37~41]
- F.大力, 祝心如. 1996c. 三裂叶豚草的化感作用研究. 植物生态学报, 20(4): 330~337 [Wang D L, Zhu X R. 1996c. Allelopathic research of *Ambrosia trifida*. *Acta Phytocologica Sinica*, 20(4): 330~337]
- F.大力. 1995. 豚草属植物的化感作用研究综述. 生态学杂志, 14(4): 48~53 [Wang D L. 1995. Review of allelopathy research of

- Ambrosia* genus. *Chinese Journal of Ecology*, 14(4): 48~53]
- 王浦海等. 1993. 豚草的化学成分研究. *中国中药杂志*, 18(13): 164~168
- 王志西, 刘祥君, 高亦珂等. 1999. 豚草和三裂叶豚草种子休眠规律研究. *植物研究*, 19(2): 158~164 [Wang Z X, Liu X J, Gao Y K *et al.* 1999. Study on the dormancy law of seeds of *Ambrosia artemisiifolia* and *A. trifida*. *Bulletin of Botanical Research*, 19(2): 158~164]
- 谢焱, 汪松, 李振宇. 2002. 中国人入侵物种综述. 见: 王德辉, Jeffrey A, McNeely 主编. 防治外来入侵物种. 北京: 中国环境科学出版社. 60~68
- 杨毅, 郭文源. 1991. 不同光照强度对豚草生长发育的影响. *湖北大学学报(自然科学版)*, 13(2): 175~177 [Yang Y, Guo W Y. 1991. Effect of the different illumination intensities on the growth of ragweed. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 13(2): 175~177]
- 郑超, 张箭, 吴永生等. 2001. 对俄贸易中豚草的检疫地位. *植物保护*, 27(5): 47~48
- 周早弘, 戴凤凤. 2003. 运用植物替代控制豚草的蔓延和传播. *江西植保*, 26(2): 68~70
- 周早弘. 2003. 豚草卷蛾对豚草的控制效果. *江西农业学报*, 15(1): 25~28 [Zhou Z H. 2003. Control effect of *Epiblema strenuana* on *Ambrosia artemisiifolia*. *Acta Agriculture Jiangxi*, 15(1): 25~28]
- 祝心如, 王威, 赵国镇等. 1997. 三裂叶豚草(*Ambrosia trifida*)对大豆根系生长及其结瘤的影响. *生态学报*, 17(4): 407~411 [Zhu X R, Wang W, Zhao G Z *et al.* 1997. Effect of *Ambrosia trifida* on root growth and nodulation of soybean. *Acta Ecologica Sinica*, 17(4): 407~411]
- 祖元刚, 沙伟. 1999. 三裂叶豚草和普通豚草的染色体核型研究. *植物研究*, 19(1): 48~52 [Zu Y G, Sha W. 1999. A karyotypical study on *Ambrosia trifida* and *A. artemisiifolia* from China. *Bulletin of Botanical Research*, 19(1): 48~52]
- Bassett I J, Terasmae J. 1962. Ragweed, *Ambrosia* species, in Canada and their history in post-glacial time. *Can. J. Bot.*, 40: 141~150
- Bianchi E *et al.* 1968. Psilostachyin, a cytotoxic constituent of *Ambrosia artemisiifolia* L. *Aust J Chem*, 21: 1109~1111
- Bohlmann F *et al.* 1965. Natural occurring acetylenes. Academic Press
- Bradow J M. 1984. Germination Regulation by *Amaranthus palmeri* and *Ambrosia artemisiifolia*. In: Comstock M J ed. The Chemistry of Allelopathy. ACS268. 285~299
- Dalrymple R L, Rogers J L. 1983. Allelopathic effects of western ragweed on seed germination and seedling growth of selected plants. *J. Chem. Ecol.*, 9(8): 1073~1078
- Fischer N H *et al.* 1981. Molecular structure of a cis-decanline-type eduesmanolide and its formation from a guaianolide-1(10)-epoxide. *J. Nat. Prod.*, 44(1): 104~110
- Fischer N H, Quijano L. 1984. Allelopathic agents from common weeds: *Amaranthus palmeri*, *Ambrosia artemisiifolia* and related weeds. In: Comstock M J ed. The Chemistry of Allelopathy. ACS 268. 133~147
- Geissman T A, Judith Levy. 1967. Sesquiterpenoid lactones. Chamissonin from *Ambrosia acanthicarpa* Hook. *Phytochemistry*, 7: 899~900
- Jackson J R, Willemssen R W. 1976. Allelopathy in the first stage of secondary succession on the piedmont of New Jersey. *Amer. J. Bot.*, 63(7): 1015~1023
- Jayanth K P. 1987. Investigations on the host-specificity of *Epiblema strenuana* (Walker) (Lepidoptera: Tortricidae), introduced for biological control trials against *Parthenium hysterophorus* in India. *J. Biol. Control*, (1): 133~137
- Kovalev O V, Vecnerin V V. 1986. Description of a new wave process in population with reference to the introduction and settlement of the leaf beetle *Zygogramma suturalis* (Col.: Chrysomelidae). *Entomol. Obozr.*, 65(1): 21~38
- Kovalev O V. 1995. Co-evolution of the Tamarisks (Tamaricaceae) and pest arthropods (Insecta: Arachnida: Acarina), with special reference to biological control prospects. In: Russian Academy of Sciences: Proceedings of the Zoological Institute. Pensoft Publishers Moscow, 259: 25~26
- Libel R A, Worsham A D. 1983. Inhibition of pitted morning glory (*Ipomoea lacunosa*) and certain other weed species by phytotoxic components of wheat straw. *J. Chem. Ecol.*, 9: 1027~1043
- Ma J, Wan F H, Guo J Y *et al.* 2003c. Bioclimatic matching analysis for *Epiblema strenuana* (Lepidoptera: Tortricidae) in China. *Agricultural Science in China*, 2(10): 1130~1136
- McFadyen R E. 1986. The effect of climate on the stem-galling moth *Epiblema strenuana* in eastern Australia. In: 10th National Noxious Plants and Animals Conf. N. S. W. 227~235
- McFadyen R E. 1987. The effect of climate on the stem-galling moth *Epiblema strenuana* in eastern Australia. Proc VIII Aust Weeds Conf Sydney Nsw, 97~99

- McFadyen R E. 1989. Ragweed, Parthenium and Noogoora burr control in the post-Epiblema era. *In*: Proc. 5th Bienn. Nox. Plants conf. Lismore, NSW Dept of Agriculture and Fisheries. Cowra NSW, Australia. 1: 5-8
- McFadyen R E. 1992. Biological control against *Parthenium* weed in Australia. *Crop Protection*, 11(5): 400-407
- Navie S C, McFadyen R E, Panetta F D. 1996. The biology of Australian weeds 27. *Parthenium hysterophorus* L. *Plant Prot. Quar.*, 11(2): 76-88
- Navie S C, Priest T E, McFadyen R E *et al.* 1998. Efficacy of the stem-galling moth *Epiblema strenuana* Walk. (Lepidoptera: Tortricidae) as a biological control agent for ragweed parthenium (*Parthenium hysterophorus* L.). *Biological Control*, 13(1): 1-8
- Porter T H, Mabry T J. 1969. Sesquiterpene lactones. Constituents of *Ambrosia artemisiifolia* L. (Compositae). *Phytochemistry*, 8: 193-194
- Raman A. 1992. Chemical ecology of gall insect-host plant interactions: Substances that influence the nutrition and resistance to insects and the growth of galls. *In*: Ananthakrishman T N, Raman A eds. Chemical Ecology of Phytophagous Insects. New Delhi: Oxford and IBH Publishing Co. 227-250
- Raman A. 1994. Adaptational integration between gall-inducing insects and their host plants. *In*: Ananthakrishman T N ed. Functional Dynamics of Phytophagous Insects. New Delhi: Oxford and IBH Publishing Co. 249-276
- Rice E L. 1968. Inhibition of nodulation of inoculated legumes by pioneer plant species from abandoned fields. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 95(4): 346-358
- Watanabe Sakae *et al.* 1981. Growth and germination inhibition in hog-weed. *Agric. Biol. Chem.*, 45(12): 2919-2920
- Worner S P. 1988. Ecoclimatic assessment of potential establishment of exotic pests. *Journal of Economic Entomology*, 81(4): 973-983
- Worsham A D. 1984. Crop residues kill weeds: allelopathy of work with wheat and rye. *Crops and Soils Magazine*, 11: 18-20

第三十三章 水 葫 芦

第一节 分布与起源	695	第五节 生物学特性	698
第二节 识别特征	695	第六节 生态学特性	699
第三节 传入途径与入侵成因	696	第七节 风险分析与早期预警系统	699
第四节 危害现状与生态经济影响 评估	696	第八节 预防、根除与控制	700
		第九节 应用与基础研究发展策略	708

摘要 水葫芦属雨久花科植物，被认为是世界上最大的恶性水生植物和地球上繁育最快的植物之一。水葫芦起源于南美热带，目前已经蔓延到世界许多热带和亚热带地区包括中美洲、北美洲、非洲、亚洲及澳大利亚、新西兰等国家。水葫芦大约于19世纪初引入中国，现已广泛扩散到17个省市。水葫芦为漂浮性水生植物，可在各种湿生环境中生存，包括湖泊、溪流、池塘、水渠等。繁殖方式分有性和无性两种，以无性繁殖为主，侧生匍匐枝，枝顶出芽生根成新株，水葫芦的植株数量在6~18d内可以增加一倍，种子在几天内可萌发生长，也可休眠15~20年仍保持活力。

水葫芦总是成片发生，影响航运、娱乐、阻碍排灌、发电，与本地水生植物竞争、排挤本地植物，降低水中溶解氧含量，影响水流，同时孳生蚊虫，对世界热带、亚热带许多地区的生态环境和经济带来严重危害。同样水葫芦在我国许多地区造成生态灾害，严重威胁我国农业、渔业、交通运输和生态环境，每年人工控制水葫芦的费用超过1亿。

各国相应采取化学、机械、生物和综合治理的方法控制水葫芦的危害，运用除草剂是最常用的防治方法，采用机械打捞水葫芦已有100多年的历史，但采用这些方法费用高且不能大规模应用，甚至，在大的水系中水葫芦的防除速度远赶不上水葫芦的生长速度。迄今世界各国已释放5种天敌昆虫用于控制水葫芦的危害，包括2种象甲(*Neochetina* spp.)，一种螟蛾(*Sameodes albiguttalis*)，一种叶螨(*Orthogalumna terebrantis*)和一种盲蝽(*Eccritotarsus catarinensis*)。天敌昆虫取食水葫芦，控制水葫芦的生长，降低株高、减少种子产量，减少了除草剂使用量同时降低了水葫芦危害程度。

至今世界各国正在努力开发综合治理水葫芦的新方法，综合各种最适宜的防治技术，为获得高效、经济、持续、安全的治理措施而努力。

关键词 水葫芦 生物入侵 生物学 防除

Chapter 33 Water hyacinth

Eichhornia crassipes (Martius) Solms-Laubach

Abstract: Water hyacinth *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms-Laubach is a member of the pickerelweed family (Pontederiaceae) and it is considered as one of the most productive plants on earth and is one of the world's worst aquatic plants. Water hyacinth originated in tropical South America, but it has become naturalized in many warm areas of the world: Central America, North America (California and southern states), Africa, India, Asia, Australia, and New Zealand. It was introduced into China in the early 1900's, Now it has distributed in 17 provinces in China. Water hyacinth is a free-floating plant. It grows over a wide variety of wetland types such as lakes, streams, ponds, waterways, ditches, and backwater areas. Water hyacinth reproduces sexually by seeds and vegetatively by budding and stolon production. Daughter plants sprout from the stolons and doubling times have been reported of 6~18 days. The seeds can germinate in a few days or remain dormant for 15~20 years.

It forms dense mats that affect navigation, recreation, irrigation, and power generation. These mats competitively exclude native submersed and floating-leaved plants. Low oxygen conditions develop beneath water hyacinth mats and the dense floating mats impede water flow and create good breeding conditions for mosquitoes. Water hyacinth is a severe environmental and economic problem in many areas of the world with a sub-tropical or tropical climate. The weed has become a bio-disaster in China, too. It has posed a great threat to agriculture, fishery, transportation and environment. It is estimated that each year more than 100 million RMB Yuan (12 million US\$) is put for the artificial control of water hyacinth. This species has rapidly spread throughout inland and coastal freshwater bays, lakes, and marshes in countries.

Chemical, mechanical and biological control as well as integrated control have been employed to combat with water hyacinth in the world. The use of herbicides to control water hyacinth is common. Mechanical controls such as harvesting have been used for nearly 100 years, but they are ineffective for large scale control, very expensive, and cannot keep pace with the rapid plant growth in large water systems. Five insects have been released for the biological control of water hyacinth. These include two weevil species (*Neochetina* spp.), one moth species (*Sameodes albiguttalis*), one mite species (*Orthogalumna terebrantis*) and one mired species (*Eccritotarsus catarinensis*). Unfortunately large scale reductions in water hyacinth populations did not occur. But those insect predation reduced plant height, decreased the number of seeds produced, and decreased the seasonal growth of the plants. Thus it, it reduced use of herbicides, and resulted in less plant problems.

Up to the present, many efforts have been made in the world to develop integrated management strategies, selecting the most appropriate control techniques available and implementing those techniques in order to obtain the best level of control that is affordable and sustainable while considering environmental impacts.

Key words: water hyacinth, biological invasive, biology, control

第一节 分布与起源

水葫芦又名凤眼莲、凤眼蓝、布袋莲等、英文俗名为 Water hyacinth, 学名 *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms-Laubach, 属单子叶植物纲 Monocotyledoneae、百合目 Liliflorae、雨久花科 Pontederiaceae、凤眼莲属。原产南美洲, 起源中心为亚马逊河、巴西, 通过自然传播到其他中南美洲国家(Barrett and Forno, 1982; Forno and Wright, 1981; Penfound and Earle, 1948)。大约在 1884 年水葫芦被引入到美国, 从此在美国东南部地区及加利福尼亚和夏威夷广泛传播, 泛滥成灾(USDA, NRCS, 1999)。

目前, 水葫芦已广泛分布于非洲、大洋洲、美洲和亚洲, 在北纬 40°到南纬 45°之间(Holm *et al.*, 1977; Center, 1994)。世界上水葫芦危害最为严重的国家包括肯尼亚、卢旺达、南非、津巴布韦、几内亚、安哥拉、尼日利亚、赞比亚、埃及、苏丹、坦桑尼亚、马拉维、贝宁、乌干达、科特地瓦、印度、越南、泰国、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、缅甸、老挝、柬埔寨、斯里兰卡、巴基斯坦、中国、澳大利亚、斐济、所罗门群岛、巴布亚新几内亚、美国、墨西哥、古巴等, 共计约 50 个国家(Parsons, 1963; Bill, 1969; Ashton, 1973; Forna and Wright, 1981; Barrett and Forno, 1982; Beshir and Bennett, 1985; de Graft-Johnson, 1993; Willoughby *et al.*, 1993; Waterhouse, 1994; Goodland, 1995; Neuville *et al.*, 1995; Navarro and Phiri, 2000; Ding *et al.*, 2001)。

目前水葫芦在我国 17 个省(自治区、直辖市)有自然发生分布, 包括河南、安徽、江苏、上海、江西、湖北、湖南、浙江、四川、重庆、福建、台湾、贵州、广西、云南、广东、海南, 其中分布广泛、严重危害的有浙江、福建、台湾、云南、广东和海南 6 省。

第二节 识别特征

水葫芦植株直立、自由漂浮、具匍匐茎, 漂浮或根生于泥中, 多年生草本植物, 叶片形状和大小变化很大, 在植株密度不大时, 形成短小球状叶柄, 使植株垂直生长。植株在密度大的情况下形成长的叶柄, 有时叶柄长可达 1.5m, 6~10 个叶片呈环状排列(Center and Spencer, 1981)。根状茎粗短, 密生多数细长须根, 具长匍匐枝, 与母株分离后长成新植株。叶基生, 莲座式排列, 叶片卵形或圆形, 大小不一, 宽约 4~12cm, 全缘无毛, 光亮; 叶柄基部有鞘, 中部以下膨大呈葫芦状的气囊。花朵紫色亮丽, 簇生, 穗状花序 6~12 朵, 最多可达 23 朵; 花柱短、中等或长; 最上面的花瓣上有一块蓝色的扇型斑块, 中央点缀着一个桃形鲜艳黄斑; 绿叶杯状, 叶茎基部膨大, 使植株能够漂浮在水面, 花萼单生, 中部有鞘状苞片, 多棱角; 花被紫蓝色, 6 裂, 上面一片较大, 中部

具黄斑；雄蕊 3 长 3 短，长的伸出花外；花丝不规则地结合于花被内；子房长圆形；蒴果卵圆形(李扬汉, 1998; 吴国芳, 1997)。

第三节 传入途径与入侵成因

水葫芦传入我国的时间目前还没有明确的记载。刁正俗(1989)的《中国水生杂草》记录水葫芦于 20 世纪 30 年代由日本传入,但据台湾中兴大学施鉴莹报道,水葫芦于 1903 年已传入我国。《中国植物科属检索表》(下)中对水葫芦的记载是我国植物分类著作中对水葫芦的最早记录。

水葫芦的扩散蔓延的主要成因为:①水葫芦自身的繁殖特性及生态适应性。水葫芦兼有有性和无性两种繁殖方式,每个花穗包含有 300~500 粒种子,种子在水中的休眠期可达 15~20 年(Forna and Wright, 1981);水葫芦还依靠匍匐枝无性繁殖,在摄氏 30℃时,5d 可形成新的植株。其生态适应性极强,在很多生境中均可生长,水库、湖泊、池塘、沟渠、流速缓慢的河道等是其最为适宜的生境(Waterhouse, 1994)。②我国长江流域以南适宜的气候和环境条件。水葫芦在长江流域以南的地区均可生长越冬,最适宜生长温度为 28~30℃(Knippling *et al.*, 1970),且水葫芦对水中的养分和 pH 值的要求并不高,最适合生长的 pH 值为 7,磷含量为 20ppm(Chadwick and Obeid, 1996; Haller and Sutton, 1973),和有足够的氮源,因此水体富营养化也是水葫芦蔓延为害的重要因素,同时,我国南方四通八达的水网加剧了水葫芦的扩散。③人类活动助长了种群扩散。20 世纪 50~60 年代,我国大力提倡推广种植“三水饲料”水葫芦、水花生、水浮莲,各省、县、乡相继引种,并研究了许多高产措施,国内曾出版有《水葫芦的高产繁殖技术》等一系列有关增产技术的专著、文章,近年来有关水葫芦吸附重金属离子、可用于治理污染的研究文献十分常见。由于水葫芦的这些利用价值,客观上促成了它在全国的快速分布和传播(丁建清等, 1995)。④缺乏自然天敌对水葫芦的控制。在我国,很少发现有水葫芦的自然天敌,但在水葫芦的原产地南美,却有 200 多种天敌昆虫取食水葫芦,这是水葫芦在原产地南美洲没有造成危害而在我国成灾的重要原因之一(Waterhouse, 1994)。

第四节 危害现状与生态经济影响评估

水葫芦被列为世界十大害草之一,广泛扩散于世界近 50 多个国家和地区。水葫芦在美国的最早记载是在 1884 年的路易斯安那州,在随后的 20 年中,它扩散到西至加利福尼亚、南到佛罗里达、东至卡罗来纳州。在美国路易斯安那州,19 世纪 40 年代时水葫芦每年造成的损失为 6500 万~7500 万美元(Gowanloch and Bajkov, 1948),1947 年在美国东南部单就鱼和其他水生动植物造成的损失超过 4000 万美元,水葫芦防治的收益与成本比例达 15.3:1(Tabita and Woods, 1962)。Holm 等(1969)报道在 1956 年仅在佛罗里达州、密西西比州、亚拉巴马州,路易斯安那州水葫芦发生造成 4300 万美元损失。在 1965 年美国陆军工程队从水葫芦控制项目中收益 1400 万美元。佛罗里达州从 1980~1991 年间控制水葫芦和水浮莲花费超过 4300 万美元(Schmitz *et al.*, 1993)。目前加利福尼亚州和佛罗里达州每年用于管理水葫芦的费用分别为 50 万美元和 300 万美元 (Mullin *et al.*,

2000)。目前,在美国水葫芦最大的发生地为路易斯安那州,政府渔业部门每年用化学除草剂控制水葫芦 10 116hm² 英亩,花费 200 万美元。

非洲地区也是水葫芦危害最为严重的地区之一。约在 120 年前水葫芦传入非洲,在最近 5~10 年间水葫芦在赤道附近地区传播为害十分迅速。水葫芦给北非的尼罗河流域带来了严重问题(Twongo, 1993)。在西非的科特地瓦、贝宁、尼日利亚和其他一些地方,每年由于上游洪水带来的水葫芦已堵塞了这些国家的很多河流。在东非的维多利亚湖、Kyoga 湖、Alberta 湖和位于乌干达境内的尼罗河、马拉维境内的舍尔河、Kagera 河,水葫芦蔓延成灾,位于维多利亚湖畔的欧文水电站,由于水葫芦的堵塞受到了极大的影响(Beshir and Bennett, 1985)。在南部非洲的赞比亚、津巴布韦、莫桑比克和南非,水葫芦对 Vaal 和 Kafue 河也构成了极大威胁(Harley, 1993; Laisi, 1993; Terry, 1991)。水葫芦大约在 19 世纪末、20 世纪初传入澳大利亚和东南亚国家。近年来,马来西亚每年用于防治水葫芦的费用为 1000 万马来西亚元 (Mahomed *et al.*, 1992), 1978 年澳大利亚曾估算年防治费用为 140~400 万澳元。在巴布亚新几内亚,水葫芦的最早记载是在 20 世纪 60 年代 Bulolo 的一处旧金矿的泥塘中,但到 1987 年,已有 30 多处发现了水葫芦,目前已扩散至 100 处,最严重的地方为 Sepik 河中下游地区。在与水葫芦原产地临近的一些国家和地区,如阿根廷、玻利维亚、古巴和墨西哥,水葫芦也带来了危害。

近年来,水葫芦在我国南方很多地区蔓延成灾,水葫芦覆盖水面,堵塞河道,影响航运,降低水中溶氧量,影响水生生物的生长,严重影响水生生物多样性。如浙江省平阳县共有 1400hm² 水面,已有 1000hm² 被其完全覆盖;温州市的发生面积达 2 万 hm² 以上,水葫芦覆盖面积超过 2/3,已严重影响了当地农业、水上运输及环境保护等。2001 年 10 月,上海市为了让 APEC 会议代表见到一条清亮的苏州河,动用了 12 艘清洁船 30 多名工人,不间断地工作了近 10d,才清除了河面上顺流而下的水葫芦,共打捞出水葫芦 455t。上海市全市动员打捞出水葫芦,仅 2001 年总投入 6000 万元人民币。在台湾,水葫芦发生为害的河道或排水渠达 476 条,面积约 61 000hm²,每年的防治费用上亿元台币。福建省漳州市是我国水仙花的重要产地,然而由于水葫芦覆盖并堵塞了大多数河道和池塘,致使农田灌溉十分困难,水仙花的产量已逐年下降。由于水质富营养化,水葫芦覆盖滇池的水面面积超过 1000hm² 以上,使滇池生物多样性遭到严重破坏,20 世纪 60 年代以前滇池主要水生植物曾有 16 种之多,到 20 世纪 80 年代大部分水生植物种类相继消亡,仅剩 3 种;鱼类则从 20 世纪 60 年代以前的 15 种降至 20 世纪 80 年代的 5 种(吴克强, 1993)。近年来,云南省昆明市为治理滇池里的水葫芦已花费 40 多亿元。

水葫芦在其发生区内,总是成片发生,覆盖大面积的水面,影响到水资源利用的各个方面:①水葫芦堵塞河道、影响航运、阻碍排灌、降低水产品产量,给农业、水产养殖业、旅游业、发电等带来了极大的经济损失。②水葫芦作为一种外来入侵植物,单一成片发生,与本地水生植物竞争光、水分、营养和生长空间,破坏本地水生生态系统,威胁本地生物多样性。同时水葫芦植株大量吸附重金属等有毒物质,死亡后沉入水底,构成对水质的二次污染。③水葫芦大面积覆盖水面,影响周围居民和牲畜生活用水,滋生蚊蝇,对人们的健康构成了威胁。

第五节 生物学特性

水葫芦通常生于水沟、池塘或水田中，漂浮水面或根生于泥中，繁殖方式分有性和无性两种，以无性繁殖为主，侧生匍匐枝，枝顶出芽生根成新株。在最适合生长条件下，水葫芦的植株数量在 5d 内可以增加一倍，一株水葫芦个体可发展成莲座性水葫芦种群 (Center and Spencer, 1981)。水葫芦开花期为 7~9 月，果期为 8~11 月，花的寿命大约 14d，然后花柄弯曲，使花序沉到水面以下，种子得以释放。每个“种子囊”通常含有不多于 50 粒种子，每个花序产生的种子数量在 300 粒以上，而一个莲座每年可以产生若干花序。种子个体小，寿命长，它沉入水底，成为有活性的沉积物，这种活性可以维持 15~20 年 (Forna and Wright, 1981)。种子在潮湿的沉积物上或温暖的浅水中都可以发芽，之后 10~15 周即可以开花。

按 Weber(1950)、Richards(1982)、Watson(1984)和 Watson and Cook(1982, 1987)等人的描述，水葫芦的生长和种群扩增是顶端分生组织和腋生分生组织分化的结果。茎尖的顶端分生组织可以无性生长产生带腋芽的叶，也可以有性生长产生花。如果花序开始发育，顶端分生组织的末端就会暂停叶的产生。这时，紧挨在花序下的腋芽就会分化成连续新枝(continuation shoot)，它产生新的顶端分生组织，继续产生叶。如果腋芽不产生连续新枝，则会发育成匍匐茎。匍匐茎节间的延长使腋芽顶端离开当前莲座，然后再产生短的节间，垂直生长，形成新的莲座。如图 33-1。

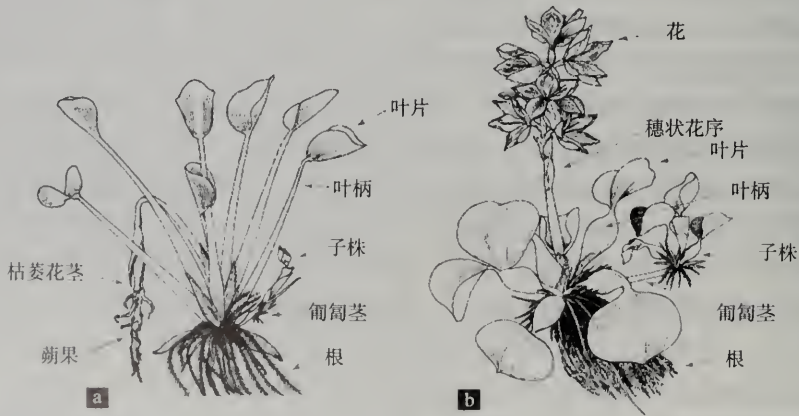


图 33-1 水葫芦全株图(Julien, 1999)

a. 花后; b. 花期

在我国长江流域水葫芦具有较强的增殖能力，每株的分枝数可在 40d 内由 2.5 增加至 5.6。水葫芦在南方适宜温度下可周年发生，是明显的单一优势种，常年覆盖水面。每年从 5 月份开始植株的高度随气温的迅速升高而增加，叶片宽度也有所增加，但随着植株个体的增大，密度开始减小；至 9 月份，植株高度达到最大(最高为 88cm)，密度也降至最低(34 株/m²)；从 10 月份开始，随着秋季到来、气温渐低，其老的叶片或植株死亡，新叶或新植株长势缓慢或停止生长，植株高度开始下降。在温度较低地区的冬季，水葫

芦虽茎叶枯黄，但植株中央和基部仍保持绿色，春季温度回升后，大量新分枝出现(但新植株较矮，最小为 29cm)，密度开始增加，至 5 月份达到顶峰，密度最高为 114 株/m²(段惠等，2003)。

第六节 生态学特性

水葫芦在很多生境中均可生长，如水库、湖泊、池塘、沟渠、流速缓慢的河道等，它在稻田也常发生而成为害草，另外，在沼泽地水葫芦也可生长繁殖(Waterhouse, 1994)，在潮湿环境中水葫芦也可存活几个月(Parija, 1934)。

富营养化水体对水葫芦的生长发育具有促进作用，但水体中盐分含量超过 0.06%时水葫芦植株很快死亡(Muramoto *et al.*, 1991)，对 pH 值的忍受度为 4.0~10.0(Haller and Sutton, 1973)。水葫芦在最适宜生长的条件下，如水体 pH 值为 7、磷含量 20ppm，高水体含氮量，及在温暖(28~30℃)和高光照度条件下生长繁育速度会成倍增长。

重金属离子对水葫芦的生长繁育有重要影响，Soltan(2003)曾研究了在各种不同浓度的重金属离子水中水葫芦的存活状况，实验前、中、后分别测定各液体中重金属离子(Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn)的浓度、pH 值和传导率。并在实验后分析实验植物样品中所携带的重金属离子，结果表明，水葫芦在混合重金属离子浓度 3mg l⁻¹和 100mg 铅 1(-1)溶液中存活，在 100mg Cd 1(-1)溶液中植物很快枯萎死亡。水葫芦在吸收金属离子时表现出去质子化反应(deprotonation)，水葫芦起到了显著的重金属离子发散器的作用，因而，也起到释放重金属污染物到水生环境中的作用。

水葫芦的种群生长随着一年中气温的变化而发生变动，相关研究表明水葫芦生长的极端低温为 10℃，气温高于 40℃则停止生长，25~28℃是最适宜的生长温度，气温为-5℃时，水葫芦根部可存活 1d，-3℃时可存活 2d，霜冻虽然可使水葫芦植株茎叶死亡，但植株根部仍保持绿色并不死亡，因此可顺利越冬，即使根部受到霜冻，部分组织受损，植株仍能存活，但如果气温接近冰点温度持续 3 周以上，植株受冻时间较长，根部会死亡(Webber, 1897; Penfound and Earle, 1948)。相对湿度低于 75%~90%时，水葫芦生长速率明显降低。

相关研究表明与水葫芦生态位相似的水花生在自然条件下可抑制水葫芦的生长，甚至导致其死亡。室内研究表明很小比例的水花生在 15~20d 内即可显著抑制水葫芦生长，使水葫芦叶片黄化，约 30d 后植株死亡。此外，水葫芦存在时水花生的生长比其单独生长时更加旺盛。经研究，水花生对水葫芦的抑制作用是由于水花生植株的水溶性分泌物抑制了水葫芦根部对营养物质的吸收(Dhanapal and Ganeshalch, 2000)。

第七节 风险分析与早期预警系统

目前水葫芦已广泛分布于非洲、大洋洲、美洲和亚洲，在北纬 40°到南纬 45°之间，水葫芦的扩散蔓延主要与其自身的生物学特性有关，水葫芦兼有性和无性繁殖两种形式，能够适应热带和温带多种不同类型的气候条件，在热带、亚热带地区发生危害最为严重。水葫芦在某地越冬残存活种群数量的大小，是评价水葫芦能否发生危害和进行早期预警

的重要指标。Everitt 等(1999)利用水葫芦的光反射特征(即水葫芦比相关其他植物和水体具有较高的近红外线反射、反射图像呈亮橘红色)并应用 GIS 和 GPS 技术,通过计算机分析,绘制水葫芦的分布图,及时掌握水葫芦发生动态,进行早期预警,指导防治。

水葫芦在我国的自然分布区南到海南省,北到河南南部的信阳、南阳一带。根据中国气候特征及水葫芦生物和生态学特性,可以粗略区分水葫芦在我国的发生危害情况:在海南以及广东、广西、云南和福建的部分地区,年平均极端气温在 0~8℃,一月份平均气温在 10~18℃,水葫芦生长虽受到低温影响,但生长不会停止,越冬种群基数大,是我国水葫芦危害严重的区域,同时也有利于采用生物防治技术控制水葫芦危害;而在福建北部和浙江、江苏、上海、湖南等地,由于 1 月份平均气温在 5~10℃,年极端气温在-5~0℃,冬季水葫芦受霜冻茎叶枯死,但水下根部仍可存活越冬,来年随气温回暖种群迅速扩张,造成危害,如利用生物防治技术可能会控制水葫芦危害,但持久控制效果将受到冬季温度的影响;而在湖北、江苏、安徽北部和河南南部,由于冬季温度偏低,水葫芦虽可越冬但种群越冬存活基数较低,采用生物防治技术将十分困难,获得成功的可能性将很小。

第八节 预防、根除与控制

一、人工及机械防除

人工及机械防除水葫芦对环境安全,短时间内也可迅速清除一定范围内的植株。但发生面积大时,需要相当多的劳动力;而且人工或机械防除后,如不妥善处理水葫芦残株,这些残株依靠无性繁殖有可能成为新的传播来源。人工和机械防治与化学防治相同,也难以清除水中的种子,因此需要年年防治,效果不能持久。

二、化学防治

一些化学除草剂如 2, 4-D、克无踪(paraquat)和草甘膦类产品在很多国家用于防治水葫芦(Patnaik and Das, 1984; Dembele, 1994),它们具有效果迅速、应用方便等特点,对于那些急需在短时间内恢复水面的水葫芦发生区,使用除草剂见效快。研究表明施用灭草烟 0.5kg/hm² 可 100%控制水葫芦;百草枯 0.9kg/hm²、2, 4-D 1.0kg/hm² 和草甘膦 2.2kg/hm² 也可抑制水葫芦的生长。但施用上述除草剂都会降低水体中的溶解氧和水体 pH 值,从而导致池中鱼类较高的死亡率(Kannan and Kathiresan, 2002)。使用化学除草剂防治水葫芦的缺点还有:①化学除草剂通常只杀灭水葫芦植株,难以清除水体中的大量水葫芦种子,所以需连续施用,防治效果难以持久;②使用化学除草剂防除水葫芦的同时,往往也杀灭了其他水生植物;③化学防除一般费用较高,通常为生物防治费用的 40~50 倍;④在很多水库、湖泊和河道,一些化学除草剂由于污染水源而被限制或禁止使用(江荣昌和姚秉琦, 1989; 李扬汉, 1998)。

三、生物防治

水葫芦危害成灾的因素之一是由于它缺乏有效的天敌控制。目前国际上应用于防治水葫芦的主要生防天敌有:原产南美和中美州的水葫芦象甲(*Neochetina eichhorniae*

Warner 和 *N. bruchi* Hustache)、原产南美的水葫芦螟蛾(*Niphograptia* (=Sameodes) *albiguttalis* Warren); 水葫芦叶螨(*Orthogalumna terebrantis* Wallwork)、原产巴西的水葫芦盲蝽[*Eccritotarsus carinensis* (Carvalho)]。

19 世纪 70 年代初期美国农业部和国际生物防治研究所(现 CABI-Bioscience)开始应用上述 4 种天敌防治水葫芦, 此后许多国家陆续开展水葫芦生物防治工作并取得一定的成功(Julien and Griffiths, 1998), 但上述 4 种天敌的防治效果总的来说不是很显著。生防作用物发挥作用较慢, 与水葫芦管理实际相矛盾(Center *et al.*, 1999a)。此外, 水体的富营养化会促进水葫芦的爆发性扩张, 降低生物防治效果(Heard and Winteron, 2000)。因此, 需要开发协调一致的管理方法和寻找新的种群能够快速生长的天敌。迄今已报导的 43 种水葫芦天敌中有 19 种被认定为水葫芦的潜在生防作用物(表 33-1)。这 19 种天敌对水葫芦的控制效果较好, 或寄主范围狭小, 其中一些天敌的安全性和控制效果已经达到认可(Perkins, 1974)。其他种类天敌的应用前景有待进一步研究。

表 33-1 水葫芦主要天敌及其特征(Van Driesche *et al.*, 2002)

种 类	田间和室内寄主植物	天敌特性及目前研究状况
1. 目前世界各国广泛应用的天敌		
<i>Neochetina eichhorniae</i> Warner(鞘翅目: 象甲科)	<i>E. crassipes</i> 水葫芦	北美洲、非洲、亚洲、澳大利亚释放(Julien and Griffiths, 1998)
<i>Neochetina brunchi</i> Hustache(鞘翅目: 象甲科)	<i>E. crassipes</i> 水葫芦	北美洲、非洲、亚洲、澳大利亚释放(Julien and Griffiths, 1998)
<i>Niphograptia albiguttalis</i> (Warren) (鳞翅目: 螟蛾科)	<i>E. crassipes</i> 水葫芦	北美洲、非洲、亚洲、澳大利亚释放(Julien and Griffiths, 1998)
<i>Orthogalumna terebrantis</i> Wallwork (蜚螨目: 大翼甲螨科)	<i>E. crassipes</i> , <i>E. azurea</i> , <i>Pontederia cordata</i> , <i>Reussia subovata</i>	北美洲、非洲、亚洲、澳大利亚释放(Julien and Griffiths, 1998)
2. 正在安全性评价或刚释放利用的天敌		
<i>Eccritotarsus catarinensis</i> (Carvalho)(半翅目: 盲蝽科)	雨久花科植物	在巴西严重危害水葫芦(Bennett and Zwolfer, 1968); 在南非经寄主评价后, 1996 年释放, 已建立种群(Hill <i>et al.</i> , 1999, 2000)
<i>Xubida</i> (=Acigona) <i>infusellus</i> (Walker)(鳞翅目: 螟蛾科)	雨久花科植物	1981 年 9 月在澳大利亚释放, 未建立种群, 1995 年再次引进, 1996 年释放(Julien and Griffiths, 1998)
<i>Cornops aquaticum</i> (Bruner)(直翅目: 蝗科)	雨久花科植物	南非正在检疫室安全性测试
<i>Bellura densa</i> (Walker)(鳞翅目: 夜蛾科)	水葫芦及 <i>Colocasia esculenta</i>	南非正在检疫室安全性测试, 由于该虫危害植物其他植物被拒绝释放
<i>Paracles</i> (=Palustris) <i>tenuis</i> (Berg) (鳞翅目: 灯蛾科)	水葫芦及其他植物	室内测试为多食性昆虫, 不能利用。
<i>Thrypticus</i> spp. (双翅目: 长足虻科)	水葫芦及其他雨久花科植物	室内初步研究为单食性昆虫, 有可能成为水葫芦新的天敌
3. 潜在水葫芦生防天敌		
<i>Brachinus</i> sp. (鞘翅目: 步甲科)	水葫芦及其他植物	取食花(Silveira Guido, 1965)

种 类	田间和室内寄主植物	天敌特性及目前研究状况
<i>Argyractis subornata</i> Hampson (鳞翅目: 螟蛾科)	水葫芦及其他植物	取食根部 Forno (1983)
<i>Macocephala acuminata</i> Dallas (半翅目: 蝽科)	水葫芦及其他植物	取食根部, 危害水稻 (Silveira Guido, 1965)
<i>Taosa inexacta</i> Walker (同翅目: 象蜡蝉科)	水葫芦及其他植物	取食生长病弱植株, 食性中等专化性 (Cruttwell, 1973)
<i>Megamelus electrae</i> Muir and <i>Megamelus scutellaris</i> Berg (同翅目: 飞虱科)	水葫芦及其他植物	在阿根廷未发现危害水葫芦 (Cruttwell, 1973), 在巴西发现对水葫芦危害较重 (Bennett, 1967)
<i>Eugaurax setigena</i> Sabrosky (双翅目: 杆蝇科)	水葫芦及其他植物	食性不清楚 (Sabrosky, 1974)
<i>Chironomus falvipilus</i> Rempel (双翅目: 摇蚊科)	水葫芦及其他植物	在巴西水葫芦叶柄上发现 (Silveira Guido, 1965)
<i>Hydrellia</i> sp. (双翅目: 水蝇科)	水葫芦及其他植物	乌拉圭常见种 (Silveira Guido, 1965)
<i>Flechtmannia eichhorniae</i> Keifer (蜉蝣目: 瘦蜉科)	水葫芦及其他植物	乌拉圭新发现种 (Silveira Guido, 1965)

目前, 水葫芦象甲 *N. eichhorniae* 已经在 30 个国家释放, *N. bruchi* 在 27 个国家释放 (表 33-2)。世界各国已对这两种象甲的寄主安全性进行了广泛深入的研究, 表明这两种象甲对供试的 77 科 274 种植物 (含非目标物种) 基本上是安全的 (Julien *et al.*, 1999), 仅发现象甲 *N. eichhorniae* 可取食梭鱼草 (*Pontederia cordata* L.), 因此这两种象甲是水葫芦的专化性天敌。其他水葫芦生防作用物如真菌 (*Cercospora piaropi*) Tharp、水葫芦盲蝽、水葫芦螟蛾和水葫芦叶螨也被引入一些国家并进行了寄主专化性测试, 未发现这些天敌的寄主范围有增大趋势 (Center, 1982; Hill *et al.*, 2000)。在天敌引入国对释放后的天敌进行评估, 可以提供生物安全的数据, 减少不必要的检验检疫试验。例如, 在澳大利亚进行的田间笼罩试验表明水葫芦螟蛾可取食为害植物梭鱼草, 因此可以判定在美国不宜释放该天敌 (Hill *et al.*, 2000)。

表 33-2 世界各国引进天敌防治水葫芦一览表 (Julien, 2001)

释放天敌国家	世界各国已释放的水葫芦天敌					
	<i>Neochetina bruchi</i>	<i>Neochetina eichhorniae</i>	<i>Niphograptus albiguttalis</i>	<i>Eccritotarsus catarinensis</i>	<i>Orthogalumna terebrantis</i>	<i>Xubida infusellus</i>
澳大利亚	1990 年良好	1975 年良好	1977 年较好			1981 年; 1996 年不详
贝宁	1992 年建立	1991 年良好	1993 年未建立	1999 年不详		
中国	1996 年建立	1996 年建立		2001 年未建立		
刚果	1999 年不详	1999 年不详				
古巴	1995 年建立					
埃及	2000 年建立	2000 年建立				

续表

释放天敌国家	世界各国已释放的水葫芦天敌					
	<i>Neochetina bruchi</i>	<i>Neochetina eichhorniae</i>	<i>Niphograpta albiguttalis</i>	<i>Eccritotarsus catarinensis</i>	<i>Orthogalumna terebrantis</i>	<i>Xubida infusellus</i>
斐济		1977 年建立				
加纳	1994 年较好	1994 年建立	1996 年不详			
洪都拉斯	1989 年建立	1990 年建立				
印度	1984 年良好	1983 年良好			1986 年建立	
印度尼西亚	1996 年不详	1979 年建立				
肯尼亚	1995 年建立	1993 年建立				
马拉维	1995 年建立	1995 年建立	1996 年不详	1996 年未建立		
马来西亚	1992 年建立	1983 年建立	1996 年不详			
墨西哥	1995 年建立	1972 年建立				
莫桑比克	1972 年建立	1972 年不详				
缅甸		1980 年建立				
尼日利亚	1995 年建立	1993 年较好				
巴拿马	1977 年不详		1977 年不详			
菲律宾	1992 年不详	1992 年不详				
巴布亚新几内亚	1993 年良好	1986 年良好	1994 年未建立			1996 年不详
卢旺达	2000 年不详	2000 年不详				
所罗门岛		1988 年建立				
南非	1989 年建立	1974 年建立	1990 年建立	1996 年建立		
斯里兰卡		1988 年建立				
苏丹	1979 年建立	1978 年良好	1980 年建立			
中国台湾	1993 年不详	1992 年不详				
坦桑尼亚	1995 年建立	1995 年建立				
泰国	1991 年良好	1979 年良好	1995 年建立			1999 年不详
乌干达	1993 年较好	1993 年较好				
美国	1974 年良好	1972 年良好	1977 年较好			
越南	1996 年建立	1984 年不详				
赞比亚	1997 年建立	1971 年; 1996 年建立	1971 年; 1997 年未建立	1997 年不详	1971 年建立	
津巴布韦	1996 年较好	1971 年良好	1994 年不详	1999 年不详		
总数	30	32	13	6	2	3

(一) 水葫芦象甲

水葫芦象甲(*N. eichhorniae* 和 *N. bruchi*)最早被用作水葫芦的生防作用物。对 *N. bruchi* 的描述最早出现在 1926 年乌拉圭的 Silveira Guido 的研究报告中, 并被认为是水葫芦最可能的天敌。1968 年阿根廷 Hurlingham 的 USDA(United States Department of Agriculture)实验室对其进行了寄主专一性测定(Perkins, 1976)。此后, 经由美国联邦杂草生防工作组(Federal Working Group for Biological Control of Weeds)及相关权威机构的批准, 先后在美国进行释放(前者 1972 年底在美国的东南部释放, 后者 1974 年 7 月释放于佛罗里达), 使水葫芦得到一定程度的控制。东南亚的一些国家, 如泰国、马来西亚、印尼和越南等也先后引入了 *N. bruchi*, 并做了寄主专一性测定(Wright *et al.*, 1999)。

水葫芦象甲 *N. bruchi* 仅被发现取食水葫芦。单雌产卵量可达 108 粒; 卵粒浅白绿色, 卵圆型(0.78mm×0.57mm); 五月份卵孵化期为 8.3d, 八月份为 7.4d。一龄幼虫体长、头宽分别为 2.0mm 和 0.3mm, 幼虫期 10.5d; 二龄幼虫体长、头宽分别为 3.6mm 和 0.5mm, 幼虫期 13.6d; 三龄幼虫体长、头宽分别为 5.9mm 和 0.7mm, 幼虫期 15.1d; 预蛹期和蛹期分别为 7.4d 和 27.0d; 从产卵到成虫羽化历期为 75.7d。在仅供给水的情况雄虫可存活 17.2d, 雌虫存活 30.5d, 在供给水和食物条件下雄虫可存活 26d, 雌虫 53d(Ghassan and Kadam, 2001)。

比较这两种水葫芦象甲, ①*N. bruchi* 对食物质量要求较高, 而 *N. eichhorniae* 较喜欢高温环境(Del Fosse *et al.*, 1976)。②*N. bruchi* 的发生高峰期在春夏两季, 成虫夜出性, 喜欢产卵于水葫芦下部的老球形叶上, 产卵量大, 幼虫发育速率快。*N. eichhorniae* 的发生高峰期在秋冬两季, 卵大多产于水葫芦叶柄基部(Deloach and Cordo, 1976)。③可通过鞘翅上的斑纹、脊(隆线)的位置和两前足基节间的距离鉴别这两种象甲; 雌雄则可利用喙的形状和个体大小区别开来(Deloach, 1975)。二者的行为和生态学特性如发生高峰期及产卵部位说明它们可以共存, 而且作用具有很大的互补性。二者均在水下的水葫芦根须中结茧化蛹, 但研究表明不存在化蛹位点的竞争, 蛹均依靠活的根须供氧, 这一特点决定了其在陆地植物或非浮水水生植物上不能够完成生活史(Harley, 1990)(图 33-2)。因而它们可作为水葫芦安全、有效的生防作用物。目前, 这两种水葫芦象甲是释放范围最广、最成功的天敌昆虫, 在澳大利亚已具有系统成熟的饲养释放技术(Julien, 1999), 但在阿根廷发现有病原菌(*Beauveria* sp., *Aspergillus* sp., *Nosema* sp.)和线虫对其进行侵害, 同时也发现隐翅虫、步甲和蠼螋等可捕食这两种象甲的卵或幼虫, 这些天敌的存在在某种程度上削弱了其控制力(Deloach and Cordo, 1982; Perkins, 1976)。

在富营养化的水体中, 水葫芦生长旺盛, *N. bruchi* 对水葫芦的控制效果比 *N. eichhorniae* 好, 可更大程度上降低水葫芦的生物量。在富营养化水体中 *N. bruchi* 的净繁殖率和内禀增长率显著高于在中等营养的水体。在低营养的水体中, 局部营养丰富的区域可以保证水葫芦象甲种群的建立(Heard and Winterton, 2000)。

水葫芦植株吸附铅、镉、铜等重金属会增强植物化学刺激物质和引诱物质的合成, 象甲的取食水平略有增加, 死亡率有所降低, 但改变均不明显。镉和锌对象甲的生殖潜力有影响, 前者抑制产卵, 后者对产卵的抑制作用取决于含量, 低浓度还有促进产卵的作用。高铁含量的水葫芦对水葫芦象甲 *N. eichhorniae* 有抗性(Cooley, 1979)。Jamil 等(1995)从生化角度证实了铅对象甲的有害影响, 铅抑制酶参与蛋白质和核酸合成, 象甲体内蛋

白质和核酸减少，游离氨基酸增多。此外，还有象甲与植物生长抑制剂配合使用防效更佳报道(Center *et al.*, 1982; Thaik VAN and Center, 1994)。

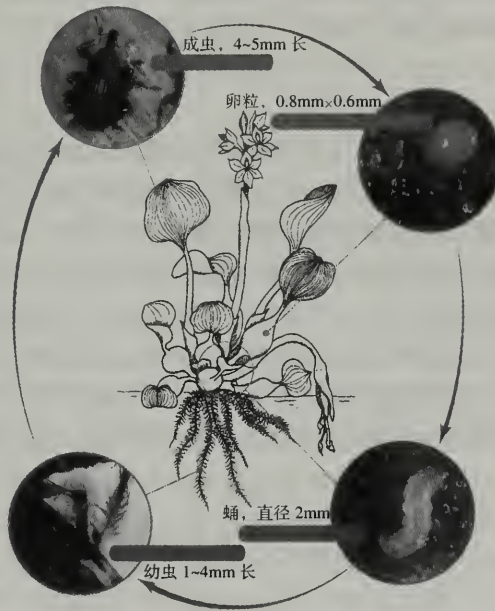


图 33-2 水葫芦象甲生活史(Julien, 1999)

(二) 水葫芦螟蛾

该虫 1874 年首次采集于亚马逊盆地的 Rio Purus。其广泛分布于热带和亚热带的南美洲，在乌拉圭、特立尼达、圭亚那、苏里南和巴西的亚马逊盆地的水葫芦上均可采集到。安全性测定表明其对水葫芦具有高度的寄主专一性，幼虫只能在水葫芦上完成发育，野外调查未发现其为害有益植物(Cordo and Deloach, 1978)。水葫芦螟蛾田间每年发生 5 代，每代发育历期为 34d，繁殖速率极高。主要以幼虫取食水葫芦的花芽，可对水葫芦造成严重的侵害。雌虫的主要产卵部位是遭到破坏的叶组织，因此其可与造成叶组织大量损伤的水葫芦象甲共存，并具有一定的增效作用。该虫在阿根廷有寄生物和病原菌存在，对其控制效力构成潜在的影响(Deloach and Cordo, 1978)。

(三) 水葫芦叶螨

水葫芦叶螨是生物防治水葫芦的五种基本候选天敌之一。该虫发生在巴西北部、苏里南、圭亚那和牙买加，在美国的佛罗里达和路易斯安那州也有发生，可能是随水葫芦一起被意外引入。科学家们于 1968~1973 年间对其作为生防作用物的潜在效力进行了集中研究。水葫芦叶螨每年发生 2~3 代，初步观察发现其常于受到损伤的水葫芦上取食，但进一步研究表明其在受伤和未受伤水葫芦植株上的取食量并无明显差别(Del Fosse, 1975)。早期研究表明发生在美国、阿根廷、乌拉圭的该螨对水葫芦表现出不同的寄主偏好性、光线强弱适应能力和攻击强度。后来的研究证明这些差别都很小，但该螨在阿根

廷表现出更高的寄主专一性。从阿根廷引种到美国后可能由于其基因库扩大, 螨的体质和控制效力有提高。田间未发现对水葫芦叶螨专一的寄生性或捕食性天敌, 但多食性捕食性天敌如隐翅虫(*Paederus* sp.)可捕食该螨。水葫芦叶螨的引进可以增加其他几种天敌对水葫芦的控制力度(Deloach and Cordo, 1975, 1976)。

(四) 水葫芦盲蝽

水葫芦盲蝽属半翅目、盲蝽科, 是目前世界上新的、用于控制水葫芦的天敌昆虫。盲蝽一年可繁育多代, 种群增殖率高, 聚集取食, 成虫寿命长, 移动灵活便捷。种群水平较高时, 可引起水葫芦叶面褪绿黄化, 最终导致叶片死亡, 适宜于作为生防天敌。该虫于 1989 年由南非植物保护研究所的 Nesor 博士在巴西 Rio de Janeiro 的水葫芦上采集到并引入南非, 通过安全性测定后, 于 1997 年在南非进行释放(Hill, 1999)。澳大利亚从南非引入盲蝽后进行了补充性寄主范围测定, 结果表明盲蝽同样可为害鸭舌草, 因此适于在鸭舌草为害也较为严重的东南亚地区释放; 在供试的雨久花科植物中, 盲蝽对水葫芦未表现出明显的嗜食性(Stanley, 1999)。其在中国的应用前景和价值有待研究确定。

(五) 其他天敌

食草鲤鱼 *Ctenopharygodon idella* 被引入水葫芦的生防计划中, 为生防作用物的选择开拓了新的领域(Del Fosse *et al.*, 1976; Camarena and Aguilar, 1999)。南非对其他一些生防作用物, 如取食叶柄的蛾类昆虫(*Bellura densa* 和 *Xubida infusella*)、双翅目昆虫(*Thrypticus* sp.)、直翅目昆虫(蚱蜢 *Cornops aquaticum*)等也进行了研究(Hill *et al.*, 1998)。

(六) 生物防治水葫芦的效果及影响因素

天敌昆虫对水葫芦的控制效果主要在于, 天敌昆虫对寄主植物的取食破坏了植物的分生组织, 损坏了腋芽的萌发力, 减少了植株碳水化合物的储存, 抑制其无性繁殖扩展, 植株常停止生长。最终衰老的组织下沉水底。就水葫芦象甲而言, 其可抑制水葫芦茎的生长, 减少花量和种子产量, 并对植株有一定的破坏作用(Center *et al.*, 1999a, 1999b)。

截至 1996 年世界上已有 13 个国家采用生物防治技术成功控制了水葫芦的危害(Julien, 2001)。如美国于 1884 年把水葫芦作为观赏植物引入后造成蔓延成灾, 20 世纪 60 年代开始释放水葫芦象甲、水葫芦螟蛾和水葫芦叶螨, 美国各地水葫芦的发生危害下降(Goyer and Stark, 1981, 1984; Cofrancesco, 1985; Cofrancesco *et al.*, 1985; Center and Durden, 1986; Center, 1987b)。如目前海湾各州水葫芦发生面积仅为防治前的三分之一(Cofrancesco *et al.*, 1985; Center *et al.*, 1990); 路易斯安那州水葫芦的发生面积已减少 75%(Goyer and Stark, 1984); 在佛罗里达州的一释放点, 水葫芦的覆盖面积从 1974 年的 90% 下降到 1980 年的 25%。

泰国 1896 年从印度尼西亚引入水葫芦后爆发成灾, 目前由于释放水葫芦象甲, 泰国主要河道上的水葫芦已明显减少(Napompeth, 1984)。

在东非维多利亚湖, 水葫芦的最早记录为 20 世纪 80 年代, 到 20 世纪 90 年代中期, 水葫芦已阻塞维多利亚湖湾和入口处 12 000hm² 的水域。乌干达于 1995 年首次引入水葫芦象甲, 此后肯尼亚和坦桑尼亚也于 1997 年引入象甲。截至 1998 年 11 月, 乌干达湖滨的

水葫芦已明显减少,大量水葫芦草垫沉入湖底。肯尼亚和坦桑尼亚海滨也取得相似效果,到1999年12月肯尼亚维多利亚海滨大约有75%的水葫芦草垫沉没(Anonymous, 2000)。

水葫芦在乌干达 Kyoga 湖、巴布亚新几内亚 Sepik 河上的礁湖和墨西哥也取得了成功(Ogwan and Molo, 1999; Julien and Orapa, 1999)。如在1995~1996年墨西哥 Sinaloa 地区7个人工湖中释放了2种象甲,水葫芦的分布由1996年的3014hm²减少62%到1998年的1180hm²。

水葫芦象甲在墨西哥和非洲水葫芦的成功应用,再次验证了早期澳大利亚(Wright, 1979, 1981)、阿根廷(DeLoach and Cordo, 1983)、印度(Jayanth, 1987, 1988)和苏丹(Girling, 1983; Beshir and Bennett, 1985)等国水葫芦生物防治生防成功实例。

水葫芦生物防治成功与否受到多种因素影响。在热带和亚热带水葫芦区,水葫芦大量繁育,形成单一漂浮种群,当受到天敌的为害后,水葫芦会逐渐下沉,或在水面漂浮很长一段时间,由于水体流动和波浪作用,天敌对水葫芦生长的抑制作用,高的营养水平(高质量的植株提高了昆虫的种群率)有利于水葫芦防治的成功。而使用除草剂和人工机械方法清除水葫芦(干扰了天敌种群)、浅的水体(受到天敌控制的水葫芦不能下沉)、短暂的水体、污染水体的毒害作用、高纬度或温带地区的低温作用、温带地区高营养、天敌释放受限制等因素,可限制天敌的控制作用,影响生物防治的效果(Julien, 2001; Hill and Olckers, 2001)。

四、综合治理

单独应用任何一种方法控制水葫芦都不能同时获得快速、持久的效果,因此,近年来国际上开展了水葫芦综合治理技术的研究,并注重加强相关国际交流,如国际生防组织水葫芦工作组于1998年11月在津巴布韦首都哈拉雷召开首届“生物和综合治理水葫芦学术讨论会”。截至目前,共有7种水葫芦天敌在33个国家释放,天敌昆虫的放养技术也日趋成熟。同时,对已释放天敌昆虫的互作机制、农药对天敌的影响等也进行了探讨(丁建清等, 1998)。

(一) 天敌的互作

水葫芦象甲(*N. eichhornia*)和水葫芦叶螨(*O. terebrantis*)具有较好的协同作用。由于利它素的作用,在水葫芦叶螨存在的情况下,象甲的产卵量和取食量均有所增加。食草鲤鱼和水葫芦象甲可共同成功防治灌溉区水域的水葫芦。

Kasno 等(1999)综合应用水葫芦象甲(*N. bruchi*)和水葫芦枯萎病菌(*Alternaria eichhorniae*)防治水葫芦,发现二者协同作用的防治效果好于各自单独使用。病原菌 *A. eichhorniae* 对水葫芦的严重侵害不影响象甲的产卵习性,但对其取食习性有一定影响。天敌昆虫取食造成伤口,病原菌侵入机会增多,水葫芦发病率提高,病害易于形成流行态势。因此,天敌昆虫和病原菌的综合利用在水葫芦的综合治理策略中具有广阔的前景。

(二) 天敌与除草剂的互作

除草剂对天敌的不利影响在于除草剂的喷施导致水葫芦植株死亡腐烂,削减了生活在水葫芦植株内部又不能迁移的幼期天敌昆虫的生境,且对生活在叶表的天敌影响极大。

但采取利于保护天敌的方式,协调生物防治和化学防治,利用除草剂将水葫芦控制在防治指标以下,此时天敌的种群得以维持。

Haag(1986a, 1986b)发现 2,4-D 和草甘膦对象甲成虫无致死作用;Charudattan(1986)曾对病原菌和除草剂的配合使用进行研究,表明同时或先后应用 *Cercospora rodmonii* 和亚致死剂量的 2,4-D 或敌草快,对水葫芦的控制效果均高于单独应用任何一种的效果。Wright 和 Bourne(1990)发现在喷施过 2,4-D 的水葫芦植株上,象甲的繁殖量反而有所增加。除草剂的使用可以改善水葫芦的营养状况,从而激发象甲生殖潜力,使之对水葫芦保持较高的控制压力(丁建清等, 1999),这样可达到生物防治和化学防治综合应用的目的。研究表明在水葫芦发生区域 80% 的地方用药,保留 20% 的保护区作为天敌越冬的生境和食物来源,用以天敌种群增长,来年可以较好地控制水葫芦的重新扩散蔓延(Haag, 1986a)。

现在联合国粮农组织在非洲和南美洲将水葫芦的生物防治列为重点扶持项目,关于杂草生防的风险性、经济利益以及相关法律法规的完善均有待做进一步的研究(Rachel McFadyen, 1998)。水葫芦综合治理的成功与否很大程度上依赖于周密的计划、良好的管理,结合以充足的资金和长久的坚持。

(三) 生物防治和机械防治的协调配合

利用机械防除在短时间内压低水葫芦种群密度,但保留少量水葫芦作为天敌昆虫的食料来源,以维持一定的种群水平,随着天敌昆虫种群数量的增加,水葫芦就可能得到永久的控制。

第九节 应用与基础研究发展策略

水葫芦具有高生物量,促使人们试图采取各种措施使之变废为宝。尤其是在一些发展中国家开展了多种利用尝试。国外利用水葫芦净化污水可追溯到 20 世纪 40 年代前后 Clock、Dymond 等人的工作,20 世纪 70 年代以来主要在美国进行了大量的相关研究。1983 年在印度专门召开了关于水葫芦利用的国际会议,会议提出许多设想,诸如食用,用作畜禽饲料,作为造纸、生产肥料和沼气的原料,还可利用其处理废水,改善水质,也可作为碳源。但此次会议未能给出这些利用措施的费用收益比,而这恰是水葫芦开发利用关键之所在。国外曾将水葫芦做为钾肥,与化学肥料混合,追施于砂质土壤中,与单独施用化学肥料相比,能增加小麦和大麦的产量和品质(矿物质和蛋白质的含量高)(Mekail *et al.*, 1999)。

我国有关水葫芦处理环境污水的研究和利用稍晚于国外,20 世纪 80 年代得到迅速发展,在利用水葫芦控制河湖水体的富营养化、处理生活污水和净化印染、造纸、石油化工废水等方面获得了很大成功。水葫芦根部对重金属具有极强的富集能力,能吸附水中的银、汞、砷、镉、镍、镉等金属离子和其他的一些有害物质(如含氰物质),并能降低生活污水中的 BOD(生化需氧量)值,现已被用于处理多种重金属污染水体和生活污水(田宏, 1992; 张志杰和王志盈, 1988; 戴耀基和陈源高, 1990)。有人对水葫芦吸收累积放射性核素的研究发现其能有效地处理低水平放射性废水,有望发展成为一种投资少、能耗低、管理简便的生物处理方法(周风帆, 1989)。在水葫芦的利用商业化之前,许多

因素都须仔细考虑：水葫芦的人工收获是否满足工业化生产的需求、日晒干燥是否可行以及这些操作过程中的费用，原料来源是否充足，加工贮存是否经济，产品的价格竞争实力和市场前景是否看好等(Harley, 1990)。实践证明水葫芦的利用并非经济可行。水葫芦植株体内含水量高达 95%，纤维也较短，并非适宜的饲料、肥料和造纸的原料。Tiwana 等(1999)对水葫芦晒干后与高粱属植物干草混和做为饲料的可行性进行了研究，证实水葫芦灰分、钾和氯含量高，蛋白质等能量物质含量低，因而不被反刍动物利用。除此之外，水葫芦作为饲料投喂动物后吃剩的残体处理不好仍是污染环境的潜在因素，给利用者带来新的棘手的问题。苏丹曾引进德国技术综合利用水葫芦，终因成本太高而失败。作为生物氧化塘处理污水的首选水生植物，水葫芦不能将这些有害化学物质有效转化(Vesk *et al.*, 1999)。这些植株死后又重新回到水中，构成了二次污染，而且富集了这些有毒金属的水葫芦收获后的去路问题也是应用其净化废水的重要障碍之一。因而很难应用水葫芦有效地治理大面积的水污染。此外，人们不会以环境为代价对水葫芦的严重危害坐视不理，而让其作为持续供应的原料来源。更为严重的是被水葫芦吸收富集于植株体内的污染物质，经食物链各级生物的放大作用不断积累，其结果不仅为害鱼类、水禽和牲畜，而且最终还会危及于人(李宝林, 1994)。

水葫芦对我国的经济、社会和生态环境等都带来了诸多问题，这是不容置疑的事实，解决这一利害冲突的唯一方法就是在控制水葫芦危害的同时开展小规模利用。由于水葫芦在我国发生危害特点与世界其他国家不尽相同，国内各地水葫芦发生危害也各具特点，有必要采取不同的治理对策。目前的综合治理计划，有关生防天敌种群管理与除草剂使用的协同应用可能会使防治成本更高、执行很困难、缺乏可靠性。Center 等(1999a)曾调查发现，水葫芦种群并不取决于生防天敌的重复释放；相反地，在经常使用除草剂控制杂草的水体中，由于天敌的食物供应不稳定，天敌群数量通常很低，抑制了天敌的控害能力，水葫芦反而生长健壮。所以在日常的管理中，保持寄主较高的营养质量，对水葫芦象甲种群很重要，即使象甲种群很小，也可能提高象甲种群的发展潜力。因此提出协调两种控制方法的多种途径，是综合治理计划中的重要环节。

在目前水葫芦防治体系不可能改变的情况下，提高生防天敌的防治效果更为重要。特别应选用那些活动能力强、生活史短、繁殖力强、不受水葫芦种群干扰(主要是使用除草剂)影响的生防天敌，目前符合这些标准的生防天敌主要有 *Thrypticus sp.*、*Taosa* 和 *Megamelus* 属昆虫和水葫芦盲蝽。尽管世界各国开展水葫芦生防的历史已很长，也有一些成功的事例报道，但仍需进行很多方面的研究工作。新的生防天敌释放后需要对其进行量化评估，另外，对一些已应用多年的生防天敌的控制效果及其对环境的影响也需进一步评估，例如，对水葫芦叶螨的生防效果还缺乏定量评估，尽管其对马拉维 Shire Rive 的水葫芦有很好的控制作用，但其作为生防作用物的价值可能被低估。

生物防治仍将是今后控制水葫芦的主要措施，未来对水葫芦的生物防治应从五个方面开展工作：①对现今可用的生防天敌进行充分评价。②针对控制效果不理想的原因，如天敌引入地与天敌起源地气候不匹配(Hill and Cilliers, 1999)，迫切需要调查耐寒性天敌应用于温带地区水葫芦生物防治的效果，寻找额外自然天敌补充。③加强对生物防治措施(如大量释放或追加补充释放、连续释放天敌)的核查。④对综合防治、生物防治及其他防治措施进行评估。⑤进一步深入研究影响防治效果(促进或抑制)的因子。

对管理部门来说,一般都认为生物防治水葫芦有效但见效太慢,因此,希望采取综合治理的措施(应用除草剂和机械控制)能快速有效控制水葫芦的危害(Delfosse *et al.*, 1976; Center *et al.*, 1982b, 1999a; Jones and Cilliers, 1999)。综合两种或更多种防治方法,要求这些方法能协同一致,至少不相互对立。需要进一步研究除草剂及其助剂对天敌昆虫的毒性作用和生防与化防协调一致的方法。就我国而言,对水葫芦的风险评估、入侵生态学、种群扩张爆发成灾机理等的研究尚少,这些基础研究问题未能解决,成为我国目前治理水葫芦的重要障碍。目前国内正在开展以生物防治为主辅以化学防治措施的水葫芦持续控制技术体系研制工作,成功控制水葫芦仍待时日。

(张国良)

主要参考文献

- 戴耀基,陈源高. 1990. 凤眼莲对含银废水的净化研究——动态模拟试验. 环境科学学报, 10(3): 362~370
- 刁正俗. 1989. 中国水生杂草. 重庆: 重庆出版社. 501
- 丁建清, 王韧, 范中南等. 1995. 恶性水生杂草水葫芦在我国的发生为害及其防治策略. 杂草学报, 9(2): 49~51
- 丁建清, 王韧, 付卫东等. 1999. 利用水葫芦象甲和农达综合控制水葫芦. 植物保护, 25(4): 4~7
- 丁建清, 王韧, 王念英等. 1998. 三种化学除草剂对水葫芦象甲的影响. 中国生物防治, 14(1): 7~10
- 段惠, 强胜, 吴海荣等. 2003. 水葫芦 [*Eichhornia crassipes*(Martius) Solms-Laubach]. 杂草科学, 2: 39~40
- 江荣昌, 姚秉琦. 1989. 化学除草技术手册. 上海: 上海科学技术出版社. 373
- 李宝林. 1994. 凤眼莲净化水质的利用及其所诱发的环境问题. 环境保护, 6: 32~33
- 李扬汉. 1998. 中国杂草志. 北京: 中国农业出版社
- 田宏. 1992. 水葫芦对含氧废水的净化、抗性及其生理反应的初步研究. 生物学杂志, 5: 14~17
- 吴国芳. 1997. 中国植物志, 第十三卷第三分册. 北京: 科学出版社
- 吴克强. 1993. 滇池流域的生态失调. 国内湖泊(水库)协作网通讯, 1: 47~49
- 张志杰, 王志盈. 1988. 凤眼莲对铅、镉废水净化能力的研究. 环境科学, 10(5): 14~17
- 周凤帆. 1989. 利用凤眼莲净化水中放射性核素钴、锌和铯的研究. 中国环境科学, 9(1): 26~30
- Anonymous. 2000. Lake victoria; against the odds. *Water Hyacinth News*, 1: 3~7
- Ashton H I. 1973. *Aquatic plants in Australia*. Melbourne, Australia: Melbourne University Press. 368
- Barrett S C H, Forno I W. 1982. Style morph distribution in New World populations of *Eichhornia crassipes*. *Aquatic Botany*, 13: 299~306
- Bennett F D, Zwölfer H. 1968. Exploration for natural enemies of the waterhyacinth in northern South America and Trinidad. *Hyacinth Control Journal*, 7: 44~52
- Bennett F D. 1967. Notes on the possibility of biological control of the water hyacinth *Eichhornia crassipes*. *Pest Articles and News Summaries Section C*, 13(4): 304~309
- Beshir M O, Bennett F D. 1985. Biological control of water hyacinth on the White Nile, Sudan. In: Delfosse E S ed. *Proceedings of the VI International Symposium on Biological Control of Weeds*. Vancouver, Canada, Agriculture Canada, Ottawa: Canadian Government Publishing Centre. 491~496
- Bill S M. 1969. The water weed problems in Australia. *Hyacinth Control Journal*, 8: 1~6
- Camarena M O, Aguilar Z J A. 1999. Biological control of aquatic weeds in Mexican Irrigation Districts. *Irrigation under conditions of water scarcity*. Vol 1A. 17th ICID International Congress on Irrigation and Drainage. 141~152
- Center T D, Dray F A, Jubinsky G P *et al.* 1999a. Biological control of waterhyacinth under conditions of maintenance management: can herbicides and insects be integrated? *Environmental Management*, 23: 241~256
- Center T D, Dray F A, Jubinsky G P *et al.* 1999b. Waterhyacinth weevils (*Neochetina eichhorniae* and *N. bruchi*) inhibit waterhyacinth (*Eichhornia crassipes*) colony development. *Biological Control*, 15: 39~50
- Center T D, Durden W C. 1986. Variation in waterhyacinth weevil interactions resulting from temporal differences in weed control

- efforts. *Journal of Aquatic Plant Management*, 24: 28-38
- Center T D, Spencer N R. 1981. The phenology and growth of waterhyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms] in an eutrophic north-central Florida lake. *Aquatic Botany*, 10: 1-32
- Center T D. 1982. The waterhyacinth weevils (*Neochetina eichhorniae* and *N. bruchi*). *Aquatics*, 4(2): 8, 16, 18-19
- Center T D. 1987. Insects, mites, and plant pathogens as agents of waterhyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms] leaf and ramet mortality. *Journal of Lake and Reservoir Management*, 3: 285-293
- Center T D. 1994. Biological control of weeds; waterhyacinth and waterlettuce. In: Rosen D, Bennett F D, Capner J L eds. *Pest Management in The Subtropics. Biological Control - A Florida Perspective*. UK: Intercept Ltd. 481-521
- Center, T D, Steward K K, Bruner M C. 1982b. Control of waterhyacinth (*Eichhornia crassipes*) with *Neochetina eichhorniae* (Coleoptera: Curculionidae) and growth retardant. *Weed Science*, 30: 453-457
- Chadwick M J, Obeid M. 1996. A comparative study of the growth of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* in water culture. *Journal of Ecology*, 54: 563-575
- Charudattan R. 1986. Integrated control of water hyacinth with a pathogen, insects and herbicides. *Weed Science*, 34(Suppl): 26
- Cofrancesco A F, Stewart R M, Sanders D R. 1985. The impact of *Neochetina eichhorniae* (Coleoptera: Curculionidae) on waterhyacinth in Louisiana. In: Defosse E S ed. *Proceedings of the VI International Symposium on Biological Control of Weeds*. Vancouver, Canada, Agriculture Canada, Ottawa, Ontario: Canadian Government Publishing Centre. 525-535
- Cofrancesco A F. 1985. Biological control of waterhyacinth and alligatorweed in Galveston District and at Jean Lafitte Park, Louisiana. In: *Proceedings of the 19th Annual Meeting of the Aquatic Plant Control Research Program*, November 26-29, 1984, Galveston, Texas. Waterways Experiment Station Miscellaneous Paper A-85-4, U. S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA. 103-109
- Cooley. 1979. A preliminary study of metal distribution in three waterhyacinth biotypes. *Water Resource*, 13: 343-348
- Cordo H A, Deloach C J. 1975. Ovipositional specificity and feeding habits of the waterhyacinth mite, *Orthogalumna terebrantis*, in Argentina. *Environmental Entomology*, 4(4): 561-565
- Cordo H A, Deloach C J. 1978. Host specificity of *Sameodes iguttalis* in Argentina; a biological control agent for waterhyacinth. *Environmental Entomology*, 7(2): 322-328
- Crutwell R E. 1973. Preliminary investigations on some insects causing minor damage to waterhyacinth, *Eichhornia crassipes*. Report of the West Indian Station, Commonwealth Institute of Biological Control, Trinidad
- De Graft-Johnson K A A. 1993. Aquatic plant infestations in water bodies in Ghana. In: Greathead A A, DeGroot P eds. *Control of African Floating Water Weeds. Proceedings of a Workshop held in Zimbabwe, June 1991*. Commonwealth Science Council, CAB International and Biomass Users Network, CSC Agriculture Program Series Number CSC(93)AGR-18, Proceedings 295, 186
- Delfosse E S, Sutton D L, Perkins B D. 1976. Combination of the mottled waterhyacinth weevil and the white amur for biological control of waterhyacinth. *Journal of Aquatic Plant Management*, 14: 64-67
- Delfosse E S. 1975. Determination of the feeding mechanism of the waterhyacinth mite. *Hyacinth Control Journal*, 13: 53-55
- DeLoach C J, Cordo H A. 1976. Life cycle and biology of *Neochetina bruchi*, a weevil attacking waterhyacinth in Argentina, with notes on *N. eichhorniae*. *Annals of the Entomological Society of America*, 69(4): 643-652
- DeLoach C J, Cordo H A. 1978. Life history and ecology of the moth *Sameodes albiguttalis*, a candidate for biological control of waterhyacinth. *Environmental Entomology*, 7(2): 309-321
- DeLoach C J, Cordo H A. 1982. Natural enemies of *Neochetina bruchi* and *N. eichhorniae*, two weevils from waterhyacinth in Argentina. *Annals of the Entomological Society of America*, 75(2): 115-118
- DeLoach C J, Cordo H A. 1983. Control of waterhyacinth by *Neochetina bruchi* (Coleoptera: Curculionidae, Bagoini) in Argentina. *Environmental Entomology*, 12: 19-23
- DeLoach C J. 1975. Identification and biological notes on the species of *Neochetina* that attack *Pontederiaceae* in Argentina (Coleoptera: Curculionidae: Bagoini). *The Coleopterists Bulletin*, 29(4): 257-266
- Dembele B. 1994. Water hyacinth, a pest of waterways in Mali? *Sahel-PV-Info*, 62: 12-14
- Dhanapal G N, Ganeshalah K N. 2000. Competitive interaction between two weeds: water hyacinth (*Eichhornia crassipes* Mart. Solms) and alligator weed (*Alternanthera philoxeroides* Mart. Griseb). *Mysore Journal of Agricultural Sciences*, 34(2): 121-124
- Ding J Q, Wang R, Fu W D et al. 2001. Water hyacinth in China: its distribution, problems and control status. In: Julien M H, Hill M P, Center T D et al. eds. *Biological and Integrated Control of Water Hyacinth*. ACIAR Canberra. 29-32
- Everitt J C, Yang C F, Escobar D E. 1999. Using remote sensing and spatial information technologies to detect and map two aquatic macrophytes. *Journal of aquatic plant management*, 37(7): 71-80

- Forno I W, Wright A D. 1981. The biology of Australian weeds. 5. *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 47: 21~28
- Forno I W. 1983. Life history and biology of a waterhyacinth moth, *Argyrestis subornata* (Lepidoptera: Pyralidae, Nymphulinae). *Annals of the Entomological Society of America*, 76: 624~627
- Ghassan J, Kadam R. 2001. Biology of *Neochetina bruchi* Hustache, a bioagent of water hyacinth. *Journal of Maharashtra Agricultural Universities*, 26(1): 62~64
- Girling D J. 1983. Water hyacinth in the Sudan - early results. *Biological Control News and Information*, 4(3): 1
- Goodland R. 1995. Owen Falls Hydro Project. Effects of water hyacinth on Owen Falls Hydro Project. Draft. World Bank Report. 11PP.
- Gowanloch J N, Bajkov A D. 1948. Water hyacinth program. Louisiana Department of Wildlife and Fisheries Biennial Report (1946~1947), 2: 66~124
- Goyer R A, Stark J D. 1981. Suppressing water hyacinth with an imported weevil. *Ornamentals South*, 3(6): 11~21
- Goyer R A, Stark J D. 1984. The impact of *Neochetina eichhorniae* on water hyacinth in southern Louisiana. *Journal of Aquatic Plant Management*, 22: 57~61
- Haag K H. 1986a. Effective control of water hyacinth using *Neochetina* and limited herbicide application. *Journal of Aquatic Plant Management*, 24: 70~75
- Haag K H. 1986b. Effects of herbicides on mortality and dispersive behavior of the water hyacinth weevils, *Neochetina eichhorniae* and *N. bruchi* (Col. Curculionidae). *Environmental Entomology*, 15(6): 1192~1198
- Haller W T, Sutton D L. 1973. Effects of pH and high phosphorus concentrations on the growth of water hyacinth. *Hacinth Control Journal*, 11: 59~67
- Harley K S. 1993. Commonwealth science council survey project on exotic floating African water-weeds: survey report. In: Greathead A A, de Groot P eds. Control of Africa floating aquatic weeds. London: Commonwealth Science Council. 151~174
- Heard T A, Winterton S L. 2000. Interactions between nutrient status and weevil herbivory in the biological control of water hyacinth. *The Journal of Applied Ecology*, 37(1): 117~127
- Hill M P, Center T D, Stanley J N, et al. 2000. The performance of the water hyacinth mirid, *Ecritotarsus catarinensis*, on water hyacinth and pickerelweed; a comparison of laboratory and field results. In: Spencer N R ed. Proceedings of the Xth International Symposium on the Biological Control of Weeds. Bozeman, Montana: Montana State University. 357~366
- Hill M P, Cilliers C J, Nesar S. 1999. Life history and laboratory host range of *Ecritotarsus catarinensis* (Carvalho) (Heteroptera: Miridae), a new natural enemy released on waterhyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laub] (Pontederiaceae) in South Africa. *Biological Control*, 14: 127~133
- Hill M P, Cilliers C J, Olckers T. 1998. A review of the arthropod natural enemies, and factors that influence their efficacy, in the biological control of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach (Pontederiaceae), in South Africa. *Biological Control of Weeds in South Africa*, 103~112
- Hill M P, Olckers T. 2001. Biological control initiatives against water hyacinth in South Africa: constraining factors, success and new courses of action. In: Julien, M, Hill M, Center T et al. eds. Proceedings of the Meeting of the Global Working Group for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research. 33~38
- Holm L G, Weldon L W, Blackburn R D. 1969. Aquatic weeds. *Science*, 166: 699~709
- Holm L, Plucknett D L, Pancho J V et al. 1977. The world's worst weeds. In: *Distribution and Biology*. Honolulu, Hawaii: University Press of Hawaii. 609
- Jayanth K P. 1987. Suppression of water hyacinth by the exotic insect *Neochetinaeichhorniae* in Bangalore, India. *Current Science*, 56(10): 494~495
- Jayanth K P. 1988. Biological control of water hyacinth in India by release of the exotic weevil *Neochetina bruchi*. *Current Science*, 57(17): 968~970
- John N Stanley. 1999. The host range of *Ecritotarsus catarinensis* (Heteroptera: Miridae), a potential agent for the biological control of waterhyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Biological Control*, (14): 134~140
- Jones R, Cilliers C J. 1999. Integrated control of water hyacinth on the Nseleni/Mposa rivers and Lake Nsezi in KwaZulu-Natal, South Africa. In: Hill M P, Julien M H, Center T D eds. Proceedings of the First IOBC Global Working Group Meeting for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. Pretoria, South Africa: Plant Protection Research Institute. 160~167
- Julien M H, Griffiths M W, Wright A D. 1999. Biological control of water hyacinth. Canberra, Australia: ACIAR. 87

- Julien M H, Griffiths M W. 1998. Biological control of weeds. A world catalogue of agents and their target weeds. 4th ed. New York: CABI Publishing
- Julien M H, Orapa W. 1999. Structure and management of a successful biological control project for water hyacinth, *In*: Hill M P, Julien M H, Center T D, eds. Proceedings of the 1st IOBC Global Working Group Meeting for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. Pretoria, South Africa: Plant Protection Research Institute. 123-134
- Julien M H. 1999. Biological control of water hyacinth. Canberra; Australian Centre for International Agricultural Research Monograph
- Julien M H. 2001. Biological Control of water hyacinth with arthropods; a review to 2000. *In*: Julien M H, Hill M P, Center T D, et al. eds. Biological and integrated control of water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. Proceedings of the Second Meeting of the Global Working Group for the Biological and Integrated Control of water Hyacinth ACIAR Proceedings, (102): 152
- Kannan C, Kathiresan R M. 2002. Herbicidal control of water hyacinth and its impact on fish growth and waterquality. *Indian Journal of Weed Science*, 34: 92-95
- Kasno S P, Dharmaputra O S et al. 1999. Integrated use of *Neochetina bruchi* and *Alternaria eichhorniae* in controlling water hyacinth. *Biotropia*, 13: 1-17
- Knipling E B, West S H, Haller W T. 1970. Growth characteristics, yield potential, and nutritive content of water hyacinths. *Proceedings of the Soil and Crop Science Society of Florida*, 30: 51-63
- Laisi E Z. 1993. The control of floating water weeds in Malawi. *In*: Greathead A, de Groot, P eds. Control of Africa's Floating Aquatic Weeds. London; Commonwealth Science Council. 43-53
- Mahomed A Z, Lee B S, Lum K Y. 1992. Developing a biological control initiative in Malaysia. *In*: Ooi P A C, Lim G S, Teng P S eds. Biological Control: Issues in the Tropics. 59-62
- McFadyen R. 1998. Biological control of weeds. *Annual Reviews of Entomology*, 43: 369-393
- Mekail M M, Mawly S E, Zanouny I. 1999. The application of water hyacinth as a supplemental source of K for wheat and barley grown on a sandy soil. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 30(2): 73-82
- Mullin B H, Anderson L W J, DiTomaso J M et al. 2000. Invasive plant species. Issue Paper No. 13. Council for Agricultural Science and Technology, Ames, Iowa
- Muramoto S, Aoyama I, Oki Y. 1991. Effect of salinity on the concentration of some elements in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) at critical levels. *Journal of Environmental Science and Health*, A26(2): 205-215
- Napompeth B. 1984. Aquatic weed management by biological methods in Thailand. *In*: A Symposium on Aquatic Weed Management. Bogor, Indonesia, BIOTROP Special Publication, 40: 51-61
- Navarro L, Phiri G. 2000. Water hyacinth in Africa and the Middle East. A survey of problems and solutions. International Development Research center, Ottawa, Canada. 120pp
- Neuville G, Baraza J, Bailly J S et al. 1995. Mapping of the Distribution and Quantization of Water Hyacinth using Satellite Remote Sensing. Occasional Publications of the Regional Centre for Services in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Nairobi, Kenya. 6pp
- Ogwang J A, Molo R. 1999. Impact studies on *Neochetina bruchi* and *Neochetina eichhorniae* in Lake Kyoga, Uganda. *In*: Hill M P, Julien M H, Center T D eds. Proceedings of the 1st IOBC Global Working Group Meeting for the Biological and Integrated Control of Water Hyacinth. Pretoria, South Africa: Plant Protection Research Institute. 10-13
- Parija P. 1934. Physiological investigations on water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Orissa with notes on some other aquatic weeds. *Indian Journal of Agricultural Science*, 4: 399-429
- Parsons W T. 1963. Water hyacinth, a pest of world water-ways. *Victorian Journal of Agriculture*, 61: 23-27
- Penfound W T, Earle T T. 1948. The biology of the water hyacinth. *Ecological Monographs*, 18: 448-472
- Perkins B D. 1974. Arthropods that stress water hyacinth. *Pest Articles and News Summaries*, 20(3): 304-314
- Perkins B D. 1976. Host specificity of *Neochitina bruchi* Hustache (Coleoptera: Curculionidae), a biological control agent for waterhyacinth. *Journal of Aquatic Plant Management*, 14: 59-64
- Richards J H. 1982. Developmental potential of axillary buds of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* Solms. (Pontederiaceae). *American Journal of Botany*, 69: 615-622
- Sabrosky C W. 1974. *Eugaurax setigena* (Diptera: Chloropidae), a new stem miner in water hyacinth. *Florida Entomologist*, 57: 347-348
- Schmitz D C, Schardt J D, Leslie A J et al. 1993. The ecological impact and management history of three invasive alien plant species in Florida, *In*: McKnight B N ed. Biological Pollution. The Control and Impact of Invasive Exotic Species. Indianapolis,

- Indiana, USA: Indiana Academy of Science. 173-194
- Silveira Guido A. 1965 (Unpublished report). Natural enemies of weed plants. Final report on PL-480 Project S9-CR-1 (Jan. 1962 to 15 Nov. 1965). Universidad de la Republica, Facultad de Agronomia, Montevideo, Uruguay
- Soltan M E. 2003. Rashed; Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. *Advances in Environmental Research*, 7: 321-334
- Tabita A, Woods J W. 1962. History of hyacinth control in Florida. *Hyacinth Control Journal*, 1: 19-23
- Terry P J. 1991. Water hyacinth in the Lower Shire, Malawi and recommendations for its control. Unpublished Report University of Bristol, 64
- Thaik V A N, Ted D. 1994. Effect of paclobutrazol and waterhyacinth weevil (*Neochetina eichhorniae*) on plant growth and leaf dynamics of waterhyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Weed Science*, 42: 665-672
- Tiwana M S, Gupta B K, Eldridge D *et al.* 1999. Evaluation of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as feed in India. In: People and Rangelands: Building the Future. Proceedings of the VI International Rangeland Congress, 604-605
- Twongo T. 1993. Status of water hyacinth in Uganda. In: Greathead A and P de Groot P eds. Control of Africa's floating aquatic weeds. London: Commonwealth Science Council. 644. 55-57
- USDA, NRCS. 1999. The PLANTS Database (<http://plants.usda.gov/plants>). 11 Aug. 2001
- Van Driesche R, Lyon S, Blossey B, Hoddle M, Reardon R. 2002. Biological Control of Invasive Plants in the Eastern United States. USDA Forest Service Publication FHTET-2002-04: 413
- Vesk P A, Nockolds C E, Allaway W G. 1999. Metal localization in water hyacinth roots from an urban wetland. *Plant Cell and Environment*, 22(2): 149-158
- Waterhouse D F. 1994. Biological control of weeds: southeast asian prospects. Brown Prior Anderson Pty Ltd. 302pp
- Watson M A and Cook C S. 1982. The development of spatial pattern in clones of an aquatic plant, *Eichhornia crassipes* Solms. *American Journal of Botany*, 69: 248-253
- Watson M A, Cook G S. 1987. Demographic and developmental differences among clones of water hyacinth. *Journal of Ecology*, 75: 439-457
- Watson M A. 1984. Developmental constraints: effect on population growth and patterns of resource allocation in a clonal plant. *American Naturalist*, 123: 411-426
- Webber H J. 1897. The water hyacinth, and its relation to navigation in Florida. Bulletin No. 18. U. S. Department of Agriculture, Division of Botany. Washington, D. C
- Weber H. 1950. Morphologische und anatomische studien über *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. Adhandlungen der Mathematisch - Naturwissenschaftlicher Klasse, Akademie der Wissenhaften und der Literature Mainz, 6: 135-161
- Willoughby N, Watson I G, Lauer S *et al.* 1993. An investigation into the effect of water hyacinth on the biodiversity and abundance of fish and invertebrates in Lake Victoria, Uganda. NRI Project Report 10066 A032g, Natural Resources Institute, Chatham, UK 27
- Wright A D, Bourne A S. 1990. Effect of 2, 4-D on the quality of water hyacinth as food for insects. *Plant Protection Quarterly*, 5: 4, 139-141
- Wright A D, Hong L W, Sastroutomo S S 1999. *Neochetina bruchi*, a biological control agent for water hyacinth: host-specificity testing in South-East Asia. Biological control in the tropics; towards efficient biodiversity and bioresource management for effective biological control. Proceedings of the Symposium on Biological Control in the Tropics. 141-145
- Wright A D. 1981. Biological control of waterhyacinth in Australia. In: Delfosse, E S ed. Proceedings of the V International Symposium on Biological Control of Weeds. Melbourne, Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Publications. 529-535
- Wright A. D. 1979. Preliminary report on damage to *Eichhornia crassipes* by an introduced weevil at a central Queensland liberation site. In: Medd, R. W. and B. A. Auld eds. Proceedings of the 7th Asian-Pacific Weed Science Society Conference. Sydney, Australia: Council of Australian Weed Science Societies for the Asian-Pacific Weed Science Society. 141-145

第三十四章 喜旱莲子草

第一节 起源和分布	717	第五节 生物学特性	724
第二节 识别特征与早期诊断	718	第六节 风险分析与早期预警系统	725
第三节 传入途径与入侵成因	719	第七节 预防、根除与控制	726
第四节 危害现状与生态经济影响的评估	722	第八节 应用与基础研究及发展策略	732

摘要 喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., 属苋科 Amaranthaceae 莲子草属 *Alternanthera*, 又名空心莲子草、水花生, 是水陆两栖的多年生植物。起源于南美洲, 现已分布于美洲、大洋洲、东南亚、欧洲南部和非洲东西部等国家和地区, 已成为美国、澳大利亚、中国、新西兰、波多黎各、缅甸、泰国、印度尼西亚、印度及东西非许多国家的一种严重的恶性杂草。喜旱莲子草 20 世纪 30 年代由日本人引进中国上海、浙江杭嘉湖平原作为马饲料, 20 世纪 50~70 年代, 作为优良饲料在全国进行大力推广, 80 年代后期逸为野生。目前于我国陕西、河南、安徽、江西、湖南、湖北、重庆、四川、云南、贵州、广西、广东, 江苏、上海、浙江、福建、海南和台湾等 18 个省市自治区有野生分布, 其中以长江中下游地区的四川、重庆、湖南、湖北、江西、安徽、上海、江苏和浙江等省市发生面积广, 危害程度高。

喜旱莲子草具多种生物型, 在美国有宽茎型和窄茎型, 在阿根廷有杂草型和野生型; 具多种生态型: 水生型和陆生型, 前者又分流水型和静水型, 后者又分湿生型和旱生型。多种生物型和生态型、无性繁殖、缺乏天敌系统、抗逆力极强、适应性广、人为引种扩散是造成喜旱莲子草入侵和成灾的重要原因。喜旱莲子草阻塞水上交通、封闭河塘水面、降低作物产量、影响农田排灌、危害人畜健康、危及生物多样性以及破坏生态环境, 给农牧渔业、旅游园艺业、交通国防等带来重大经济损失和严重的生态后果。在中国生物多样性国家报告中被列为首批 9 种重要外来入侵植物之一。

抑制喜旱莲子草常用的方法有植物检疫、农业防治、物理防治、化学防治和生物防治。化学防治常用的除草剂有草甘膦、使它隆、农达和敌草腓等。其中生物防治喜旱莲子草取得重大成功。20 世纪 60~70 年代美国、澳大利亚、新西兰、泰国等国家利用从喜旱莲子草原产地人为引种的莲草直胸跳甲 *Agasicles hygrophila* 对该草进行生物防治取得成功。一种斑螟蛾和一种蓟马也是较有效的天敌。我国从 1986 年起对喜旱莲子草的生物防治进行了可行性论证, 并从美国引进了莲草直胸跳甲。经过安全性测定、生物学生态学研究和大量繁殖、释放, 除江苏扬州外, 在重庆、湖南、江西、浙江、广西、福建、上海等水域上取得成功, 并在重庆、福建、广西等地建立了天敌昆虫莲草直胸跳甲繁殖基地。该天敌已自然扩散到了广东广州、湖北荆州等地。目前研究重点集中于在中国有效利用莲草直胸跳甲的机理方面和其他有潜力的病原微生物方面。利用莲草直胸跳甲控

制水生环境的喜旱莲子草是我国最成功的杂草生物防治的项目，其成功经验值得大力宣传和推广。陆生型和高纬度地区的喜旱莲子草则是目前防治的难点。本章提出以生物防治为主的综合治理喜旱莲子草的应对策略，倡导建立健全自上而下的科学研究与应用推广的技术体系。

关键词 喜旱莲子草 分布 外来入侵植物 预警 杂草生物防治 莲草直胸跳甲 生物多样性 策略

Chapter 34 Alligatorweed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb

Abstract: Alligatorweed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., a member of the Amaranthaceae family, with its origin center in the Rio de la Plata Basin of southern Paraguay and northeastern Argentina, is a widespread invasive weed species in North America, southeast Asia, southern Europe, Oceania and the East and West Africa. Alligatorweed was introduced to China in the early 1930's. By now, it has distributed in at least 18 provinces including Shaanxi, Henan, Anhui, Jiangxi, Hunan, Hubei, Chongqing, Sichuan, Yunnan, Guizhou, Guangxi, Guangdong, Jiangsu, Shanghai, Zhejiang, Fujian, Hainan and Taiwan. The damage situation of alligatorweed in the area along the middle and lower reaches of the Yangtse River, such as Sichuan, Chongqing, Hunan, Hubei, Jiangxi, Anhui, Shanghai, Jiangsu and Zhejiang provinces, is much worse than that in other areas.

As an amphibious perennial plant, the species has facultative biotypes and ecotypes. The biotypes are broad-stemmed form and narrow-stemmed form in the U.S.A., wild form and weedy form in Argentina. The ecotype include aquatic ecotypes (floating form and lentic form) and terrestrial ecotypes (hygrophyte and xerophyte), depending upon the habitat it grows up. *A. philoxeroides* becomes a severe invasive plant species resulting from having many biotypes and ecotypes, agamogenesis, absence of natural enemy system, introduction and popularization. The infestation of alligatorweed can not only form thick biomass to block rivers and canals, close water surface and cause severe flooding, but also reduce crop yield, interfere irrigation ditches, do harm to human and livestock health. Further more, it can monopolize flora to destroy biodiversity, deteriorate ecology and environment. Alligatorweed is listed as one of the 9 worst invasive plants in the National Biodiversity Report of China.

The primary means of controlling alligatorweed include quarantine measures to prevent its dissemination, manual removal, chemical herbicides and biological control with insect natural enemies. Among them, biological control with a flea beetle, *Agasicles hygrophila* introduced from its native habitat in South America, has achieved significant success around worldwide. Other promising biocontrol agents, e.g. the moth *Vogtia malloi*, the thrip

Amynothrips andersonii and another flea beetle *Disonycha argentinensis*, have been studied in USA. Biological control of alligatorweed in China started with the flea beetle *A. hygrophila*, which was introduced from the USA in 1986 and released in Sichuan and Hunan provinces. The beetle has successfully established populations in most of the provinces in south China and exerted effective long-term control of the weed, primarily in aquatic environments. This has become the most successful case of controlling an invasive weed through the classical biological control approaches in China. Considerable challenges remain in managing the serious infestations of alligatorweed in terrestrial and high latitude environments in China. IPM strategies of alligatorweed, mainly biological control method, and challenges in managing alligatorweed in China are also discussed in this chapter.

Key words: *Alternanthera philoxeroides*, distribution, invasive plant, precaution, weed biological control, *Agasicles hygrophila*, biodiversity, strategy

第一节 起源和分布

喜旱莲子草起源于南美洲，其演化中心是巴拉圭南部和阿根廷东北部的里奥拉普拉塔盆地、巴拉圭和巴拿马河的湿地，在巴西东部和南部、玻利维亚、乌拉圭和阿根廷南部、亚马孙流域和南美北部海滨区扩散(Julien, 1981, 1999)。目前分布于美洲、大洋洲、东南亚、欧洲南部和非洲东西部等国家和地区(图 34-1)，即美洲从南纬 38°到北纬 36°、亚洲从南纬 36°到北纬 35°的地区。其中，亚洲分布于中国、印度、印度尼西亚、老挝、缅甸、泰国、越南等(Coulson, 1977, Julien, 1995; Holm *et al.*, 1997; 马瑞燕和王韧, 2001); 美洲分布于阿根廷、玻利维亚、巴西、哥伦比亚、法属圭亚那、圭亚那、洪都拉斯、墨西哥、巴拉圭、波多黎各、苏里南、特立尼达和多巴哥、美国; 澳洲分布于澳大利亚和新西兰以及南欧意大利和东西非等地(Coulson, 1977; Holm *et al.*, 1997; Julien *et al.*, 1995; Garbari and Pedulla, 2001)。现已成为美国、澳大利亚、中国、新西兰、波多



图 34-1 喜旱莲子草的世界分布图 (Holm *et al.*, 1997)

黎各、缅甸、泰国、印度尼西亚和印度等国家的一种严重的恶性杂草(Coulson, 1977; Julien and Bourne, 1988; 张格成等, 1993; Julien, 1995; Julien *et al.*, 1995)。在我国, 自 20 世纪 50 年代后期, 随着养猪事业的发展, 人为引种于京、津、辽、鲁、冀、豫、川、渝、湘、鄂、皖、赣、苏、浙、闽、粤、桂、滇、黔、台等许多省市。目前已于陕西、河南、安徽、江西、湖南、湖北、重庆、四川、云南、贵州、广西、广东, 江苏、上海、浙江、福建、海南、台湾等 18 个省市自治区逸为野生, 其中以川、渝、湘、鄂、赣、皖、苏、浙、沪等长江中下游地区发生广, 危害重(Ma and Wang, 2001)。

第二节 识别特征与早期诊断

一、分类地位

喜旱莲子草, 属苋科 *Amaranthaceae*, 莲子草属 *Alternanthera*, 英名 alligatorweed, 又名空心莲子草, 俗名水花生。我国各地称革命草、抗战草、野花生、空心苋、水蔬菜、螃蟹菊、过江龙、猪笼草、湖羊草、水马兰头、东洋草、洋马兰、甲藤草、水冬瓜、水杨梅、花生藤草、通通草、长梗满天星(台湾)等(参考各地植物志)。

二、形态特征

喜旱莲子草为水陆两栖的多年生草本(图 34-2)。

水生型: 属挺水型水生植物。一般簇生或大面积形成垫状物漂于水面。节间长, 有时可达 19cm 长, 直径为 0.5~1.4cm。根: 由茎节上形成须根, 无根毛, 外皮层无明显分化, 中皮层具 6~9 层薄壁细胞, 气腔分布其中; 维管束 3~4 原型, 一轮。茎: 基部匍匐蔓生于水中, 端部直立于水面, 不明显 4 棱, 长 55~120cm, 节腋处疏生细柔毛; 茎圆桶形, 多分枝, 光滑中空, 只具初生构造, 髓腔较大, 细胞密度小, 细胞内未见草酸钙晶体形成。叶: 对生, 有短柄, 叶片长椭圆形至倒卵状披针形, 长 2.5~5 cm, 宽 0.7~2cm, 先端圆钝, 有尖头, 基部渐狭, 叶面光滑, 无绒毛、叶片边缘无缺刻。叶柄长 0.3~1 cm, 无毛或微有柔毛(中国科学院中国植物志编辑委员会, 1979; 廖衍伦和叶能干, 1984; 林冠伦等, 1990; 马瑞燕和王韧, 2004)。

陆生型: 一般斑块状或浓密的成片草垫状, 节间最长 15cm, 直径约 0.3~0.5cm。根: 有根毛。陆生植株的不定根次生生长可形成直径达 1cm 左右的肉质储藏根, 即宿根, 茎节可生根。茎: 圆桶形, 多分枝, 茎秆坚实, 具次生构造, 含丰富的菱晶簇和羽纹针晶, 细胞密度大, 髓腔小或实心。叶: 对生, 有短柄, 叶片长椭圆形至倒卵状披针形, 先端圆钝, 基部渐狭, 叶片略有绒毛, 叶片边缘常有缺刻。叶片较水生环境中的叶片长宽度略小, 厚度略厚, 叶色较深, 叶片与茎之间的夹角较小, 较挺立(Julien and Broadbent, 1980; 林冠伦等, 1990; Julien *et al.*, 1992; 马瑞燕和王韧, 2004)。

花: 头状花序, 单生于叶腋, 球形, 直径 0.8~1.5cm, 合轴分枝, 总花梗长 1~6cm。花白色或略带粉红, 苞片和小苞片干膜质, 宿存, 白色, 顶端渐尖, 具 1 脉, 苞片卵形, 长 0.2~0.5cm, 小苞片披针形, 长 0.2cm; 花被片 5 枚, 长 0.5~0.6cm, 白色, 光亮, 无毛顶端急尖, 背部侧扁; 花丝长 0.2~0.3cm, 基部合生成杯状, 退化雄蕊 5 个, 顶端分裂成 3~4 窄条, 雌蕊子房倒卵形, 具短柄, 背面侧扁, 顶端圆形, 柱头头状, 雌蕊子房中

一般无发育成熟的种子,但在澳大利亚有时会形成瘦果(Burkhalter *et al.*, 1972; Hockley, 1974; 中国科学院中国植物志编辑委员会, 1979; Julien and Broadbent, 1980; Julien, 1995; 廖衍伦和叶能干, 1984; 林冠伦等, 1990; Holm *et al.*, 1997)。

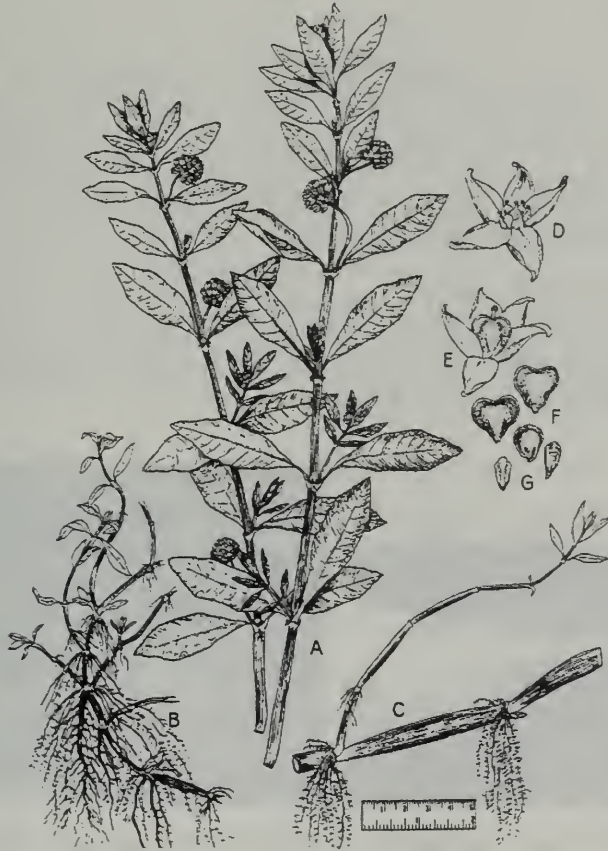


图 34-2 喜旱莲子草(Holm *et al.*, 1997)

A. 植株; B. 根; C. 水生根的新芽; D. 花; E. 无性花和瘦果; F. 瘦果; G. 种子

第三节 传入途径与入侵成因

一、传入途径

我国喜旱莲子草的最早记录为 1933 年 10 月御江久夫采于江苏、上海的标本。早期中国的喜旱莲子草标本记录还有 1934 年 4 月 22 日采于拓林、1947 年 4 月 16 日采于余山、1948 年采于上海枫林桥(裴锴和单人骅, 1952)等。目前认为我国的喜旱莲子草源于 20 世纪 30 年代抗日战争期间,由日本人引种至上海郊区、浙江杭嘉湖平原作为马饲料(刁正俗, 1990)。20 世纪 50~70 年代,随着养猪事业的发展,作为优良饲料在全国进行大力推广,80 年代后期逸为野生,该草自然蔓生面积迅速扩大,发生区域除沟塘河湖水域外,还蔓生于旱地、果园、苗圃和宅旁。在阴湿环境下,土壤较肥沃时,发生更为严重,

其大面积扩散蔓延,对种植业、养殖业、旅游业、交通运输业造成极其不利的影响(王韧和王远,1987,1988;林冠伦等,1987,1990;张格成等,1993;马瑞燕和王韧,2001)。

二、成灾机制

(一) 多种生态型

喜旱莲子草是一种多年生水陆两栖的植物,有多种生态型(图 34-3)。根据喜旱莲子草生境中水分状况,可分为水生型和陆生型。水生型喜旱莲子草在生长季节中植物体全部或部分浸在水环境中;陆生型喜旱莲子草在生长季节中植物体的根部或茎都分布于陆地之上。水生型可以根据水体的流动与否分为流水型和静水型两类;陆生型则根据生长季节中水分供应情况分为湿生型和旱生型两类。在喜旱莲子草 4 种基本类型中,湿生型生境有农田、田埂、沟渠旁、撂荒地、人工草坪等低洼下湿地;旱生型生境有路旁(环境中的水分条件贫乏)、墙角、河岸砂地、高坡空闲等地势高燥之处;静水型生境有池塘、湖泊和一些常年积水的洼地等;流水型生境主要为各种类型(人工或天然)的河流等(马瑞燕和王韧,2004;马瑞燕等,2003a;淮虎银等,2003)。



图 34-3 水生型喜旱莲子草(左)和果园里陆生型喜旱莲子草(右)(安徽巢湖,马瑞燕 摄,1999)

不同生态型的喜旱莲子草,其种群特征有差异。水生型的两种不同生态型的喜旱莲子草在各自的生境中都能形成密度很大的优势种群,尤其是以挺水型喜旱莲子草为优势种形成的群落是影响水域养殖业和阻塞航道的主要因素。陆生型的喜旱莲子草在陆地上的分布范围十分广泛,尤其在一些人为活动影响比较大的陆生环境中喜旱莲子草更易入侵。在有些土著植物都难以生长的旱生环境中,喜旱莲子草仍可以成功地入侵、定居,并形成盖度、密度都比较大的单一优势群落。一些农田、田埂、休闲地(或撂荒地)等,喜旱莲子草在这些生境中都能通过克隆繁殖和克隆生长形成优势群落。人工草坪是喜旱莲子草比较容易入侵的另一个中生型生境类型,入侵后的喜旱莲子草在人工草坪上通常形成斑块状镶嵌体,而且很难被根除(淮虎银等,2003)。

喜旱莲子草的分布与其主要生境的空间分布状况密切相关。但在具体生境之间,喜旱莲子草的分布状况存在比较大的差异。如在水生生境中,喜旱莲子草通常是从岸边或池塘四周向河流或池塘中心生长,水体对喜旱莲子草的扩散具有一定作用;在陆生生境中,喜旱莲子草的分布与各类生境的特点有一定关系,如在比较干旱的路旁,喜旱莲子

草的入侵具有一定的随机性；在人工草坪，喜旱莲子草也表现出一定的分布随机性等。除了人为活动和水体对喜旱莲子草的扩散具有一定程度的影响外，喜旱莲子草本身的生物学特征也是影响其在短距离扩散的主要因素(淮虎银等，2003)。

喜旱莲子草水生型和陆生型叶片解剖结构也存在很大差异和明显适应环境的特点。在旱生条件下，叶片结构表现出如表皮毛分布比较密集、角质层增厚、保卫细胞长、气孔下陷、气孔下室多数无填充物、栅栏组织和海绵组织在叶肉中所占比例大约为 2:1、栅栏组织由 2~4 层长柱形细胞组成、细胞排列紧密、细胞体积较小、叶脉维管束间含机械组织等特点；在水生条件下，叶片结构的特点则包括如表皮毛较少或缺、角质层薄、栅栏组织和海绵组织在叶肉中所占比例大约为 1:1、栅栏组织仅有一层细胞且细胞较大、排列疏松、叶脉维管束间无机组织等。这种适应不同生境的能力，使喜旱莲子草能够在不同的生境条件下迅速蔓延(张彪等，2001)。

喜旱莲子草水生型与陆生型形态结构有差异，但随着环境条件的改变可相互转换，从水中捞出的植株，可在陆地生长成陆生型，造成陆生型喜旱莲子草在旱田大量传播蔓延；路边陆生型植株蔓生到水里，可生长为水生型，并在水域快速繁殖封闭水面(林冠伦等，1990)。

喜旱莲子草在原产地主要分布于淡水生境中，但远离原产地后，喜旱莲子草的生境类型出现了多样化，在不同生境中表现出不同的入侵能力。喜旱莲子草对入侵地区不同生境条件的高度适应性，是其之所以能成为入侵植物并造成严重生态影响的一个主要原因(淮虎银等，2003)。

(二) 多种生物型

喜旱莲子草在许多国家存在多种生物型。在美国有两种生物型：宽茎型和窄茎型(broad-stemmed and narrow-stemmed)，二者有不同的地理分布，宽茎型有较高的干重，一般根扎在沙滩或旱地，窄茎型一般有较长的节间。二者同工酶谱也不同，植物生长规律和对除草剂的反应也有差异(Kay and Haller, 1982; Kay, 1992)。根据染色体数目，在阿根廷，喜旱莲子草也有两种生物型：野生型(Wild form)为 4 倍体($2n=68$)；杂草型(Weedy form)为 6 倍体($2n=102$)，6 倍体喜旱莲子草一般长在耕作田里，具有更强的竞争力和形成单一群落的能力(Wain *et al.*, 1984; Parsons and Cuthbertson, 1992)。

(三) 无性繁殖

喜旱莲子草雄蕊雌化现象普遍，雌蕊子房中一般无发育成熟的种子，在澳大利亚虽有时会形成瘦果，但主要进行营养繁殖(Burkhalter *et al.*, 1972; Hockley, 1974; Julien and Broadbent, 1980; 廖衍伦和叶能干, 1984; Sainty *et al.*, 1998)。茎上腋芽的萌发力极强，由此形成的分枝最多可达 10 个左右，每个分枝又成为新的主茎，依此类推。茎节上产生的不定根既快又多，若将一段茎放入水中，2~3d 腋芽即可萌动，同时在茎节上和断口处产生大量的不定根，生于节的四周，可多达 20 多条，并可进行两次分枝形成二级侧根(廖衍伦和叶能干, 1984)。花序由顶芽发育而成，花序形成后，侧芽发育成主茎，又可进行合轴分枝，因此主茎具有无限延长的能力。据报道，茎从源地起长达 17m 以上，因此有“过江龙”的称呼(Julien and Broadbent, 1980; Julien and Bourne, 1992; 福建省科学技

术委员会和《福建植物志》编写组, 1982)。陆生型, 节节生根, 根有根毛, 具次生构造, 次生长可形成直径达 1cm 左右的肉质储藏根, 极不易腐烂。旱地肉质储藏根受刺激时, 可产生大量的不定芽, 使喜旱莲子草在入侵某一生境后能快速形成比较稳定的种群, 从而提高了该植物入侵的成功率。一个茎节往往就能成为一个新侵染源, 在喜旱莲子草入侵某一植被后所呈现出的斑块状镶嵌体或大片大片单一群落往往是由一段茎、一个基株通过不断的无性繁殖而形成的(淮虎银等, 2003)。另外, 虽然在未受到外界干扰的情况下, 喜旱莲子草的无性繁殖也有一定限度, 如在每一节部通常有 2~3 个分枝, 但当节部受到外力而折断后, 在断裂的节部可以产生 6 个左右的新分枝。喜旱莲子草根和茎纵横交错, 呈蛛网状密布农田、果园、河塘、沟渠和河道等, 是农田、人工草坪中该植物难以根除的主要原因之一。喜旱莲子草依赖无性繁殖的特性入侵、定居、繁殖、生长和扩散, 使其在与其他植物的生存竞争中占绝对优势, 是其成为严重的外来入侵物种最主要的原因(Julien and Broadbent, 1980; 廖衍伦和叶能干, 1984; Julien *et al.*, 1992; 林冠伦等, 1990; 淮虎银等, 2003)。

(四) 缺乏天敌的自然控制

同其他外来入侵植物一样, 喜旱莲子草在其原产地有多种与其具有共生或寄生关系的天敌群落, 可以取食喜旱莲子草的不同器官和组织(Coulson, 1977)。这些天敌包括昆虫、病原微生物、线虫等。许多天敌种类在进化过程中通过专化性的策略来实现其对食物来源(即寄主植物)和生态环境的适应以及物种和种群的生存、繁衍。一般情况下, 这些专化性天敌的种群与喜旱莲子草的种群消长动态呈现直接的相关性, 并在一个较长的时间范围和一定数量水平上保持动态平衡。这是喜旱莲子草在原产地一般不出现单一群落和爆发性种群增长从而造成经济危害的主要原因。

当喜旱莲子草通过无性繁殖的根茎被引种到一个新生态环境时, 其专化性的天敌群落一般都不会被随同带入, 从而使喜旱莲子草逃避了天敌的控制。一旦生态条件适合, 则出现种群的爆发性增长和单一群落。这是该草在我国危害成灾的一个重要和根本性原因。

(五) 人为引种、扩散

我国在 20 世纪 60~80 年代初将喜旱莲子草列入所谓“三水饲料”(水花生、水葫芦、水芹菜)进行人为引种、传播和鼓励养殖种植, 作为代用饲料、药用植物及防污治污植物等。客观上加速和扩大了该草作为入侵植物的分布范围和经济危害程度(王韧, 1986; 王韧和王远, 1987, 1988; 胡国文等, 1987; 林冠伦等, 1990)。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

喜旱莲子草主要在农田(包括水田和旱田)、空地、鱼塘、沟渠、河道等环境中生长为害, 已成为当前亟待研究和解决的草害问题, 主要表现在以下几个方面。

一、阻塞水上交通

喜旱莲子草在河道和水域形成厚重的垫状物, 阻止水流、堵塞航道、增加沉积, 影

响水上交通、运输，甚至影响排洪泄洪，危及人类生存安全(Coulson, 1977; 王韧和王远, 1987, 1988)。

二、封闭河塘水面

喜旱莲子草在鱼塘等水生环境中生长繁殖迅速，覆盖在水面时会影响沉水植物的光合作用，导致水中溶解氧含量降低；喜旱莲子草腐败后污染水质，水体中生物耗氧量和化学耗氧量升高，鱼虾等水产生物会因溶解氧的消耗而窒息；腐败后水中有机质含量的增加会促进微生物的滋生，从而导致鱼病的发生或产生有毒物质毒害水产生物；喜旱莲子草在鱼塘中的沉积还会影响水产捕捞，使大量鱼塘报废。(Coulson, 1977; 林冠伦, 1986; 张格成等, 1993)。

三、降低作物产量

喜旱莲子草根系发达，地上部分繁茂，在农田中生长会与作物争夺阳光、水分、肥料以及生长空间，造成严重减产。在农田、果园、菜园、桑园、苗圃等地，地下茎蔓延呈密布蜘蛛网状。据报道，为害水稻、小麦、玉米、红苕、茼蒿引起产量损失分别为 45%、36%、19%、63%和 47%，蔬菜损失一般为 5%~15%，严重时达 20%以上(尹国仁, 1992; 谭万忠, 1994)。

四、影响农田排灌

在田埂和田间喜旱莲子草成片生长，不仅影响农事操作，而且在田间沟渠内大量繁殖，使水流不畅，影响农田排灌，费工、费时、费电，造成很大浪费(胡国文等, 1987; 林冠伦, 1986; 张格成等, 1993)。

五、危害人畜健康

喜旱莲子草常附着肝蛭虫病的虫卵及幼虫(尾蚴、囊蚴)等寄生虫；该草含 3.8%的皂甙，易引起家畜腹泻和姜虫病(陈昌熙和周永生, 1993; 林冠伦, 1986)；滋生蚊蝇，危害人类健康(Julien and Broadbent, 1980)。

六、危及生物多样性

喜旱莲子草繁殖力强，竞争力强，抑制其他植物生长，使群落物种单一化，危及生物多样性(Coulson, 1977; 王韧, 1986; Vogt *et al.*, 1992)。

七、破坏生态环境

喜旱莲子草在路边、公用绿地、居民区等地生长蔓延，严重影响环境的美观和卫生，入侵公园、林地、草坪、荷塘、河流、湖泊等风景名胜，影响旅游业(王韧, 1986; 王韧和王远, 1987, 1988; Wang, 1989; Julien and Broadbent, 1980; Julien, 1995)。

喜旱莲子草特别在沟渠、河道、沼泽、鱼塘、稻田、果园、菜地和花园内发生危害严重。尤其在阴湿环境下，土壤较肥沃时，发生更为严重(张格成等, 1993)。1986 年全国 159 个县的发生面积达 1334 万公顷，密度有时可达 1020 株/m²，其中以四川、湖南、

江苏发生最重,仅重庆郊区报废的鱼塘达 200hm²以上(王韧和王远,1987,1988;张格成等,1993)。在 1999 年的调查中仅 212 个县,估计发生为害的面积在 200 万公顷以上,分别占耕地面积的 21.45%,水域面积的 17.90%。在沟渠河道内大量繁殖后,堵塞航道,影响水运和农田排灌,费工,费时,耗电,造成的浪费无法估计;若用人工清除,每 hm²菜田需 1200 个劳动工,10 元/工,耗费 24 亿元人民币;用除草剂草甘膦,以 300 元/hm²计算,如仅调查统计的 212 个县推广,每年大约需要 6 亿元人民币。物种多样性丧失,植物群落单一化,生态系统不平衡所导致的生态破坏的影响则更无法用经济数目估计。

第五节 生物学特性

一、萌发

据调查,旱地喜旱莲子草以越冬宿根发芽的占 61.3%,以越冬宿茎发芽的占 38.7%。而在水域中越冬的则以近水边的地下茎根越冬,待发芽生长后再向深水处延伸(林冠伦等,1990)。水生型喜旱莲子草在平均气温 8.5℃即可萌芽生长,陆生型在气温 9.5℃开始萌发,在开阔、向阳、光照时间长的地方,喜旱莲子草萌发的时间比相对光照不足的地方缩短(武模戈和陶令霞,2000)。

二、营养生长

平均气温 10.5℃时喜旱莲子草均已普遍出苗,开始进行营养生长。幼苗开始有 2~4 对嫩叶,叶小,紫红色。气温逐渐升高,其生长速度剧增,平均气温 21℃左右迅速增长,叶面积急剧扩大,但节间数并不增多。新枝的叶腋内萌发出花芽,开始进行生殖生长(武模戈和陶令霞,2000),最适宜生长温度为 22~32℃(Julien *et al.*, 1992)。

三、生物量

喜旱莲子草主要进行营养繁殖,而且生长迅速,在杂草的生存竞争中占绝对优势。在生长高峰期每天可长高 2~4cm,生物量 41 天翻一倍,密度可超过 1000 株/m²(Julien *et al.*, 1992)。在重庆柑橘所喜旱莲子草的密度为 1018.8 株/m²,鲜草量达 63.7~320g,平均每公顷鲜草重可达 28.5~45t。在重庆 5~10 月生长,重量可增加 20.4~165.7 倍,分枝数增加 0.4~9 倍,茎节数增加 2.6~25.9 倍,长度增长 7.1~37.3 倍,叶片数增加 3.58~14.2 倍。株日增重 1.2~2.4g,平均 1.56g;叶片日增长 0.6~4.2 张,平均 2.0 张。喜旱莲子草在夏季长度增长快,而秋季主要是重量的增加。11 月后植株重量相应减轻,主要进行养分积累(张格成等,1993)。喜旱莲子草在我国以旱生型为主,是更难消除的恶性杂草(王韧和王远,1987,1988;林冠伦等,1990;中国环境保护局,2003)。

四、生态学特征

在适宜的生境下,喜旱莲子草成片分布,聚生,少有单株,在水生环境尤为明显。陆生条件下,成片分布,尤其是在无人空闲地常形成单一群落。一般来说,在水体富含有机质(如生活污水)流速慢或静水、水体浅、pH 值呈酸性、光照射充足、温度高的环境中喜旱莲子草发育早、生长快、茎粗壮、株高大、种群大、分枝多,长势旺盛。它在密

度过高时,会产生自屏效应,抑制生长,且老茎腐烂,有臭气,孳生虫蚊(张格成等,1993;林冠伦,1986;武模戈和陶令霞,2000)。

喜旱莲子草抗逆性强,适应性很广,可生长于海拔 0~2700m 间。喜旱莲子草对低温和高温环境适应性强,当冬季水温降至 -5°C 下时,水上植株冻死,水下部分仍有生活力;当春季温度达 10°C 时,地下茎根即可萌发生长,最适温度为 $22\sim 32^{\circ}\text{C}$,水温超过 32°C 时,生长受到抑制,生长在瘠薄土壤中经 30d 35°C 以上的高温 and 伏旱,能照常生长。喜旱莲子草对水分要求不苛刻,其学名“*philoxeroides*”是“喜旱”之意,其实其更喜水,在水中生活旺盛,尤其是污水中。喜旱莲子草被铲除的根茎曝晒 1~2d,在水分适宜时,仍能存活;机械除草或作猪、牛、羊饲料,被损伤的茎节翻入土中照样生根繁殖;深埋 1m 以下的根茎,数年不死,仍能继续膨大生长,未经腐熟或未被家畜消化的茎段进入农田后会造成再次侵染(林冠伦等,1990)。喜旱莲子草耐盐力强,该草可忍耐高达 10%的盐水溶液、浓度 10%的静止海水和浓度 30%的流动海水(Hockley, 1974; Sainty *et al.*, 1998)。喜旱莲子草可适应 pH5~10 的环境,最适为 pH6~8 之间;其耐盐碱,抗污染,可在日排放量达 100 万吨以上、水质混浊、灰褐色、无氧、厌气发酵、排放 H_2S 和甲烷的污水环境中茂盛生长(Sainty *et al.*, 1998)。

五、遗传学特性

最近的研究表明入侵我国各地的喜旱莲子草的遗传多样性非常低,推断我国各地的喜旱莲子草可能来源于很少的甚至是一个无性繁殖系,利用分子标记技术证明了分布广泛的喜旱莲子草是入侵中国后在较短时间内大量传播造成的,可见喜旱莲子草是一种典型的有害外来入侵种(Xu *et al.*, 2003; Ye *et al.*, 2003)。

第六节 风险分析与早期预警系统

喜旱莲子草可广泛分布于美洲南纬 38° 至北纬 36° 之间、亚洲北纬 35° 和澳大利亚南纬 36° 之间的广大区域(Julien, 1995; 马瑞燕和王韧, 2001)。Julien(1995)等利用 CLIMEX 对喜旱莲子草在全世界的适生性分布做了预测。此项研究表明,美洲和亚洲、大洋洲是重发区,欧洲是最危险的潜在的分布区。其对中国的预测如图 34-4 所示,表明喜旱莲子草在中国长江中下游地区和东南沿海地区较为严重。作者的研究认为长江中下游地区为最严重的分布区(马瑞燕和王韧, 2001)。王韧和王远(1987)曾预测,在我国,黄河可能为喜旱莲子草的分布北限,相关实地考察证实了此观点(马瑞燕和王韧, 2001)。新近在黄河以北的豫北地区濮阳、安阳等地排污沟发现了喜旱莲子草(武模戈和陶令霞, 2000),在陕西关中也有该草的分布(张振祥等, 2001),建议未发生水花生的地区要加强防范,防止其无性繁殖体入侵田园、草场或水域。对于喜旱莲子草生防天敌莲草直胸跳甲, Coulson 1977 年报道,在美国 1 月平均温度为 $9\sim 15.5^{\circ}\text{C}$ 等温线范围内是利用莲草直胸跳甲的有效温区,1 月平均温度为 9°C 的地区为该虫越冬的极端北限。林冠伦等(1988)曾预测我国有效利用该虫的范围为南岭以北纬 $23^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之间。Julien 等(1995)预测莲草直胸跳甲在中国只能在成都、福建、广东等地建立种群,起良好的控制作用(如图 34-5 所示)。但作者的调查表明莲草直胸跳甲至少在中国 14 个省市自治区发生(Ma and Wang, 2001)。



图 34-4 用 CLIMEX 预测的喜旱莲子草在中国的潜在的分布(Julien *et al.*, 1995)

x: 表示不适合生长的地区; EI: 生态气候指数; 阴影部分表示已知的分布区



图 34-5 用 CLIMEX 预测的莲草直胸跳甲在中国潜在的分布(Julien *et al.*, 1995)

x: 表示不适合生长的地区; EI: 生态气候指数;

阴影部分(EI<25 表示可以建立种群但不能很好的控制的地区)

第七节 预防、根除与控制

一、植物检疫

在澳大利亚新南威尔士, 喜旱莲子草已被作为一种恶性杂草立法管理, 并将按草划分地区: W_1 为新入侵区, Matiland 为 W_2 , Newcastle City parish Eldon、斯托克顿和斯托韦尔为 W_3 。 W_1 区通告当地该草必须被禁止和消灭, 禁止喜旱莲子草区草皮和土壤的转运与销售; W_2 区内的喜旱莲子草必须被抑制和消灭; W_3 区内要求防止该草的扩散和蔓延并减少其分布。在所有地区喜旱莲子草的买卖严格禁止(Julien, 1995)。建议我国建立健全该植物的检疫体系。

二、机械人工防除

对喜旱莲子草的防治，应侧重于预防。首先防止它的传播，如发现少量植株应立即根除。结合农业措施，在耕翻换茬时花大力气挖除在土中的根茎，然后务必晒干或烧毁。在种群密度较小或新发现的入侵地手工拔除，进行根除。对新入侵的喜旱莲子草，深挖1m，并彻底焚烧，连续三年，能起到根除的效果。在许多水域依靠人工打捞，但打捞后的植株如不能及时得到有效的处理又会死而复活。田间机械割除，既不经济又不科学，因为喜旱莲子草根扎在土壤10~100cm中，且纵横交错，很难奏效。中耕时折断茎节，反而刺激植株分株，促进其繁殖，加速其蔓延与传播(王韧和王远，1987，1988；林冠伦，1986；Sainty *et al.*，1998)。

三、化学防除

在20世纪50年代，美国曾在佛罗里达和路易斯安那州，对该草封闭的水面大量喷洒2,4-D除草剂，结果，非但未控制其蔓延，反而污染了环境；1972年，在澳大利亚利物浦的乔治河上喷洒2,4,5-T丙酸，得到同样的后果(Coulson, 1977；Vogt *et al.*，1992；Julien, 1999)。目前，国外大量使用的化学除草剂有：水域采用草甘膦，浅水和陆地采用甲磺隆(metsulfuron)和敌草腈(dichlobenil)等(Sainty *et al.*，1998)。

目前在我国，化学防除是抑制喜旱莲子草的主要措施之一，草甘膦、使它隆、农达、水花生净等在国内应用较多(姚东瑞等，1997；高仁表等，1997；陆永进等，1996)。草甘膦是传导型灭生性除草剂，它通过喜旱莲子草的茎叶吸收并传导到全株，对地下部分也有较高的杀灭作用。使它隆也是传导型除草剂，它专门用于防除阔叶杂草，对喜旱莲子草的效果较为突出，是防除水稻等禾本科作物田中喜旱莲子草的首选药剂。水花生净是甲磺隆和使它隆的复配剂，它防除喜旱莲子草的效果显著，但由于甲磺隆在土壤中的残留期长，易对作物造成伤害，其使用受到一定的限制。人们还尝试着将除草剂混配使用，以期获得更快、更强、更持久的效果，这些药剂包括草甘膦+使它隆、节磺隆+甲磺隆、百草敌+2-甲-4-氯等，试验结果表明它们都具有较好的防除喜旱莲子草的效果。据娄远来等(2002)报道，植物激素整形素对草甘膦防除喜旱莲子草有显著增效作用，如这点能得到充分验证，对喜旱莲子草的化学防除将会增加一种新的强有力的手段。除草剂短期内对地上部分有效，之后喜旱莲子草会很快繁殖起来。

四、生物防治

(一) 国外进展

美国和澳大利亚是国外开展喜旱莲子草生物防治较早、工作较多、成效也较显著的国家。

1894年美国最早在佛罗里达州发现了喜旱莲子草。1897年，美国官方首次记载了在亚拉巴马州有分布，1898年在路易斯安那州新奥尔良也发现了该草。1901年，美国科学家就已意识到喜旱莲子草是一种威胁水域和航运的杂草。到1957年，北卡罗来纳、南卡罗来纳、佐治亚、佛罗里达、亚拉巴马、密西西比、路易斯安那及得克萨斯总计约

162 400hm²的水域都被喜旱莲子草侵害(Coulson, 1977; Zeiger, 1967)。1960~1962年,美国农业部和陆军工程局委派叶甲分类昆虫学家 George Vogt 到喜旱莲子草的原产地南美调查寻找天敌,先后在巴西、阿根廷、乌拉圭和巴拉圭共找到 53 种天敌,并筛选出 3 种,即:莲草直胸跳甲 *Agasicles hygrophila* Selma and Vogt、一种斑螟(*Vogtia malloi* Pastrami)和一种蓟马(*Amynothrips andersonii* O'Neill),并分别对这 3 种天敌进行了生物学和生态学研究及寄主专一性测定,确定了可以安全利用的策略,同时将它们引到美国佛罗里达州、南卡罗来纳州等地释放,并在水域上获得极大成功。目前喜旱莲子草和天敌昆虫已形成协同共生互利持续稳定状态,喜旱莲子草的生物防治成为水生杂草生防史上第一例成功事例(Coulson, 1977; Vogt *et al.*, 1979; Vogt *et al.*, 1992; Julien and Griffiths, 1998)。

澳大利亚于20世纪70年代后期对这一恶性杂草开展生物防治。此后,新西兰、泰国、中国等国家也先后开展了喜旱莲子草的生物防治(Julien and Griffiths, 1998)。三种天敌中以莲草直胸跳甲作用最大,斑螟蛾较抗寒,蓟马作用较小。但由于莲草直胸跳甲在冬季不耐低温,夏季不耐高温,因此应用受到局限(Buckingham, 1996)。

(二) 喜旱莲子草的天敌昆虫

1. 莲草直胸跳甲

如图 34-6。



图 34-6 莲草直胸跳甲成虫(左)及其在释放点控制喜旱莲子草状况(右)(浙江杭州,唐健 摄,1999)

莲草直胸跳甲(*Agasicles hygrophila* Selman and Vogt)属鞘翅目 Coleoptera, 叶甲科 Chrysomelidae, 跳甲亚科 Halticinae, 在我国又名空心莲子草叶甲、曲纹叶甲、条纹叶甲,是喜旱莲子草的专食性天敌昆虫。其起源于南美,被许多国家引进用于控制喜旱莲子草,现分布于阿根廷、美国、澳大利亚、中国、新西兰、泰国、太平洋岛等地(Julien *et al.*, 1995; Julien and Griffiths, 1998)。

雄成虫体长 5.7mm, 体宽 2 mm; 雌成虫体长 7mm, 体宽 2.2mm。胸部和腹部均为黑色,鞘翅黄到淡黄色,有一纵行略弯的黑色宽带。雄虫腹部第 5 节中央具一长圆形凹窝,外生殖器藏于其内。卵淡黄色,呈“八”字型排成两列,幼虫共 3 龄(Maddox, 1968;

邓国荣等, 1992; 张格成等, 1997; 杨志华等, 2002)。莲草直胸跳甲在自然条件下完成一代需 25d, 卵期 4~9d, 幼虫期 9~16d, 蛹期 6~8d, 成虫寿命平均 48d。在我国广西一年可发生 9~10 代(邓国荣等, 1992), 上海 7~8 代(杨志华等, 2002)。幼虫及成虫均取食叶片, 老熟幼虫钻入茎秆化蛹, 阻碍茎节生长并分泌有毒物质, 抑制植株生长, 被害伤口易引起病原微生物侵染, 加速喜旱莲子草生活力的下降, 雌雄比近于 1:1。莲草直胸跳甲繁殖力高, 平均每雌产卵 1295 粒, 最多达 2636 粒(吴珍泉等, 1994a; 吴珍泉, 1997); 其食性专一(Maddox and Rensnik, 1969), 中国农业科学院生物防治研究所通过对 21 科 39 种植物的测定, 也发现其食性安全(王韧等, 1988)。莲草直胸跳甲自然扩散力强, 每年平均可达 40km 余(黄大兴等, 1996)。生活史中无滞育现象, 高温低温均易引起大量死亡, (12.67±2.36)℃ 为发育起点温度, 有效积温为(272.06±17.43)DD, 最宜温度为 22~28 ℃ (Stewart *et al.*, 1996, 2000; 杨志华等, 2002)。

2. 斑螟

斑螟(*Vogtia malloi* Pastrana)属鳞翅目 Lepidoptera, 螟蛾科 Pyralidae, 斑螟亚科 Phycitinae, 广泛分布于阿根廷北部、巴西和巴拉圭南部。美国、澳大利亚、新西兰引进该虫用于喜旱莲子草的生物防治。斑螟雌虫平均产卵 267 粒, 卵产于顶端叶片。幼虫 5 龄, 蛀茎取食, 一头幼虫可破坏 5~9 个茎, 造成茎顶枯萎、下垂; 幼虫在茎内化蛹; 生活史平均一代 39d; 扩散能力强。通过对 6 科 17 属 30 种植物的测定, 发现斑螟食性专一, 喜欢取食水生植株, 且能在北方越冬(Maddox, 1970; Brown and Spencer, 1973; Vogt *et al.*, 1992; Buckingham, 1996)。斑螟最早于 1971 年在美国佛罗里达和佐治亚释放, 后在亚拉巴马、南卡罗来纳、北卡罗来纳释放, 后扩散到阿肯色、路易斯安那、密西西比和得克萨斯(Brown and Spencer, 1973)。研究认为其扩散距离每月可达 900~1000km, 对水生型和半水生型莲子草有防治效果, 对陆生型效果不明显(Vogt *et al.*, 1992; Buckingham, 1996; 马瑞燕等, 2003)。

3. 蓟马

蓟马(*Amynothrips andersonii* O'Neill)属缨翅目 Thysanoptera, 管蓟马科 Phlaeothripidae, 体长 2.0mm, 体黑色, 取食叶片顶端, 阻碍植株生长, 幼虫和成虫均卷边为害, 生活史 28d。美国农业部用 6 科 13 属 21 种植物进行该天敌寄主专一性测定表明: 该虫只取食 *Alternanthera hassleriana* Chod, 其扩散能力较弱, 可取食水生和陆生的喜旱莲子草(Spencer and Coulson, 1976; Maddox and Mayfield, 1979; Buckingham, 1989, 1994, 1996)。1967~1972 年在亚拉巴马、加利福尼亚、佛罗里达、密西西比、南卡罗来纳和得克萨斯释放后, 逐步在南部各州建立了自然种群。该天敌可取食水生和陆生喜旱莲子草, 是 3 种天敌中扩散能力最差的, 但却具有最强的耐寒能力(Spencer and Coulson, 1976; Buckingham, 1996; Cofrancesco, 1988)。

4. 阿根廷跳甲

阿根廷跳甲(*Disonycha argentinensis* Jaoby)属鞘翅目 Coleoptera, 叶甲科 Chrysomelidae, 体长 4.5mm, 鞘翅黑色, 具乳白色条纹, 胸和腹节为橘黄色。幼虫在土

中化蛹,完成一代发育平均为 49d,成虫寿命平均 147d,产卵量为 409 粒。通过对 57 种植物进行寄主专一性测定,发现该虫仅取食北美洲没有的绿苋草 *Alternanthera paronychoides* St. Hilaire 和苜蓿菜 *Beta vulgaris* L. var. *Cicla* L.,但很少在苜蓿菜上产卵,所产卵不能孵化。阿根廷跳甲取食陆生型杂草并常杀死嫩芽,被认为是抑制陆生型喜旱莲子草最专一、最有效的天敌昆虫(Cordo *et al.*, 1984)。美国农业部农业研究局(USDA-ARS)、阿根廷生防站和澳大利亚科工组织(CSIRO, Long Pocket Laboratory)对该跳甲进行了室内检疫和安全性测定,认为是一种安全的陆生型草的专性天敌(Sands *et al.*, 1982)。澳大利亚和新西兰分别于 1980 年和 1982 年从巴西引进并释放该天敌,结果未能建立种群,其原因不详(Buckingham, 1994, 1996; Julien and Chan, 1992)。目前,澳大利亚又将其纳入新的研究引进计划(Julien, 1999)。

5. 其他天敌昆虫

南美还发现一些能够抑制苋科莲子草属两栖植物(*Alternanthera philoxeroides*、*A. hassleriana*、*A. sessilis*、*A. reineckii* 和 *A. tetramera*)的天敌昆虫,这些天敌包括鞘翅目跳甲科的几种甲虫(*Agasicles connexa*、*A. opaca*、*A. vittata*、*A. interrogations*、*Disonycha eximia* 和 *D. camposi*)和几种双翅目(Diptera)Agromyzidae 科的天敌(*Melanagromyza lternanthera*、*M. marellii*、*Ophiomyia buscki*)。喜旱莲子草的其他种类天敌还包括北美的 *Disonycha pennsylvanica* (Illiger)(Vogt *et al.*, 1979, 1992; Cofrancesco, 1988),泰国的 *Candezea palmerstoni*、*Junonia lemonias*、*Psara basalias*、*P. hipponalis* 和澳大利亚的 *Solider recurvalis*,这些天敌能否作为有效的生物防治天敌尚有待于进一步研究(Napompeth, 1991; Julien, 1999)。

我国关于喜旱莲子草天敌的调查始于 1988 年,江苏农学院林冠伦等(1990)查明喜旱莲子草的天敌包括鞘翅目的叶甲、跳甲、龟甲,鳞翅目的夜蛾、卷叶螟、灯蛾,半翅目的蝽类,同翅目的蚜虫,直翅目的负蝗,软体动物蜗牛、蛞蝓等。主要的天敌种类有:拟小黄卷叶蛾 *Adoxophyes cyrtosema* Meyrick、后黄卷叶蛾 *Cacoecia asiatica* Wals、木撩尺蠖 *Culcula panterinaria* (Bremer et Grey)、红腹白灯蛾 *Spilarctia subcarnea* (Walker)、星白雪灯蛾 *Spilosoma menthastri* (Esper)、斜纹夜蛾 *Prodenia litura* (Fabricius)、甜菜夜蛾 *Laphygma exigua* (Hübner)、棉大卷叶螟 *Sylepta derogata* Fabricius、蓝角茎叶甲 *Gastrophysa atrocyanea* Mootschulsky、豆蚜 *Aphis craccivora* Koch、短额负蝗 *Atractomorpha sinensis* Bolivar、藜龟甲 *Cassida piperata* Hope、双线嗜黏液蛞蝓 *Philomyous bilmeatus*、野蛞蝓 *Agriolimax agriestis* Linnaeus、江西巴蜗牛 *Bradybaena kingsiensis* Martens (林冠伦等, 1990; 唐耀光, 1994; 曹华国等, 1997)。这些种类多为多食性农业害虫,对喜旱莲子草的控制作用则未有报道。

6. 病原微生物

在美国路易斯安那和佛罗里达州已发现当地的 *Alternaria alternantherae* Holcomb and *A. ramospoulus* (丝孢菌类 Hyphomycetes)可使喜旱莲子草形成紫红色斑点,造成落叶,但一直未广泛应用(Zettler and Freman, 1972; Holcomb, 1978)。在我国利用微生物进行防治目前尚处于筛选作用物的筛选阶段,目前已发现有一种链格孢病原菌(*Alternaria*

alternantherae)、假隔链格孢菌(*Nimbya alternantherae*)、炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)、立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)及链格孢(*Alternaria* sp.)等病原菌(林冠伦等, 1990; 向梅梅等, 2002a)。其中 *A. alternantherae*、*N. alternantherae* 较受重视, 其中 *N. alternantherae* 寄主专一性强, 对作物安全。该病菌主要作用于喜旱莲子草叶片, 造成叶片大量枯死脱落, 从而使杂草丰度大幅降低, 控制杂草蔓延危害, 削弱杂草在田间的竞争力, 是一种有开发潜力的喜旱莲子草生防真菌。此外, 该菌的培养滤液对喜旱莲子草产生致毒作用, 活性物质主要作用于喜旱莲子草叶片, 使叶片组织黄化或失水死亡, 使根变褐, 抑制根的生长, 对茎则无明显作用; 使它隆和农达与莲子草假隔链格孢混用防除喜旱莲子草也具有可能性, 农思它稍有抑菌作用, 盖草能、使它隆和农达均无抑菌作用; 使它隆和农达分别与莲子草假隔链格孢菌丝悬浮液等量混合比单纯使用除草剂或菌丝悬浮液的除草效果好(向梅梅和游明龙, 1999; 向梅梅等, 2002b)。万佐玺等(2001)发现另一种链格孢菌[*A. alternata* (Fr.) Keissler]的毒素对喜旱莲子草也有很强的致病作用。

最近在重庆和四川发现了一种对喜旱莲子草有效的镰刀菌(*Fusarium* sp.), 最适宜在温度为 23~31℃、pH 值为 6.7~7.0 环境下生长, 在温室条件下, 对喜旱莲子草有较强的控制作用(Tan *et al.*, 2002)。张陶等(2002)在喜旱莲子草上首次发现了莲子草柱隔孢 *Ramularia alternantherae*。值得关注的是在四川雅安还发现了一种根结线虫(*Meloidogyne* sp.), 该项研究, 尤其对于陆生型喜旱莲子草的防治将很有意义(龚国淑等, 2000)。

(三) 国内进展

我国喜旱莲子草的生物防治历经了可行性论证、越冬保种、大量繁殖、多点释放、效果评价及机理探讨等阶段。

1. 可行性论证

廖衍伦和叶能干(1984)首先提出应对恶性杂草喜旱莲子草加以重视, 并可借鉴美国等国家的生物防治经验。1985 年全国杂草生物防治会上, 林冠伦等植保工作者建议将喜旱莲子草作为我国杂草生防的工作重点, 1986 年王韧建议引进天敌, 通过开展喜旱莲子草生物防治的研究, 消化吸收国外杂草生防的成功经验和系统理论、技术(王韧, 1986)。

1986 年中国农业科学院通过中美两国农业部科技交流合作项目从美国佛罗里达引进了莲草直胸跳甲, 并在检疫条件下用具有重要经济价值的 21 个科 39 种植物进行了该叶甲的食性测验, 认为该种跳甲食性专一, 可在我国安全利用(王韧和王远, 1988)。

2. 越冬保种大量繁殖

1986 年开始, 由中国农业科学院生物防治研究所组织, 湖南省农业科学院植物保护研究所、中国农业科学院柑橘研究所、中国农业科学院水稻研究所等单位参加, 先后在湖南、重庆、江西等地开展了莲草直胸跳甲越冬保种和大量繁殖的研究, 获得成功(Wang, 1989; 李宏科和王韧, 1994; 李宏科和李萌, 1996; 杨子琦等, 1995; 张格成等, 1997)。1996~1997 年杨志华将莲草直胸跳甲引入上海郊区经田间多年自然繁殖越冬后, 该叶甲已成功定居沪郊并已建立了稳定的自然种群(杨志华等, 2002)。吴珍泉等利用野生喜旱莲子草能够大量繁殖莲草直胸跳甲, 并且建立了信息管理系统(吴珍泉, 1994; 吴珍泉等,

1994b), 目前福建、南宁和重庆已成为该虫良好的繁殖基地(吴珍泉等, 1994b; 邓国荣等, 1992; 张格成等, 1997), 此外广东也可成为良好的繁殖基地(吴浪明等, 2000)。

3. 释放技术与控制效果

中国农业科学院柑橘研究所张格成等(1997)报道了莲草直胸跳甲的引种与田间释放技术, 包括引虫工具、引虫方法、释放地的选择和释放地的管理、释放方法及人工助迁等。中国农业科学院生物防治研究所王韧(1989)报道了该虫在重庆、湖南长沙、福建福州、江苏扬州、浙江杭州等地进行大量繁殖释放的情况。

1988~1991 年中国农业科学院生物防治研究所与湖南省农业科学院植物保护研究所合作, 对湖南省 1500hm² 水域的喜旱莲子草进行生物防治。5 月初当喜旱莲子草正处于旺盛生长期, 开始释放莲草直胸跳甲, 每公顷 450 头, 连续释放 3 年后, 喜旱莲子草得到基本控制。如虫源充足, 提早在 4 月下旬释放, 除草效果更佳。仅从 1988~1994 年, 在湖南的长沙、常德、岳阳及临湘释放莲草直胸跳甲约 3.6 万公顷, 控草效果极为理想(李宏科和王韧, 1994)。中国农业科学院柑橘研究所于 1986~1995 年底, 在重庆 19 个县区 800 个村释放莲草直胸跳甲, 控制草害面积达 2 万公顷, 扩散面积 3.3 万公顷, 释放区植被演替良好。如四川长寿县于 1999 年 8 月释放 200 头成虫, 两年后即完全控制 14 余公顷的喜旱莲子草, 节约 1200 个工日, 节省人工费 4800 多元, 而且达到一劳永逸的效果(张格成等, 1997)。

1996~1997 年先后两次从江西将莲草直胸跳甲引入沪郊释放, 且经自迁、扩散, 现闵行区 370km² 范围内凡有喜旱莲子草生长处均有莲草直胸跳甲的分布, 且对喜旱莲子草产生明显防除效果(杨志华等, 2002)。

1986~1997 年期间, 通过大量繁殖, 先后在重庆、浙江、湖南、福建、云南、江西、广西、上海等地释放莲草直胸跳甲, 除江苏扬州外(Ma and Wang, 2001), 其余均已形成自然种群, 对水生型的喜旱莲子草普遍取得了很好的防治效果(Wang, 1989; 林冠伦等, 1990; 邓国荣等, 1992; 杨子琦等, 1995; 张格成等, 1997; 杨志华等, 2002)。防治成本仅相当于人工化学除草的 1/10, 共获经济效益 1000 多万元, 投入产出比 1:300。此外, 莲草直胸跳甲还扩散到广东省广州、湖北省荆州等地, 取得良好的控制效果(吴浪明等, 2000; 吴大椿和金响林, 1999)。目前正从事其应用基础理论的研究。

第八节 应用与基础研究及发展策略

一、喜旱莲子草的利用

人类曾利用喜旱莲子草的一些益处有①屏障: 草网成排, 可以消除风浪, 保护堤坝(林冠伦, 1986); ②饲料: 20 世纪 50~70 年代, 中国曾将喜旱莲子草作为猪、羊的优良饲料推广种植(王韧和王远, 1987, 1988); ③肥料: 喜旱莲子草含钾量高, 可堆沤绿肥(张运胜, 1989); ④净化污水(贾凤芝等, 1998; 夏汉平, 2000; 周长芳等, 2001; 刘建武等, 2002)等。但随着喜旱莲子草极强的繁殖能力与适应性, 其有害的一面远远超过了有益的一面。比较有价值的开发应用与基础研究主要有①药用: 清热解毒、凉血、利尿, 可缩短某些病毒感染性疾病的病程和减轻中毒症状(杨占秋和程丽, 1989; 曹勇等, 1990; 肖红等, 1996);

②食用：精制菜用水花生(顾克余等，2000)；③养殖：发展水生动物和植物生产，可作为鱼虾蟹类产卵的场所(林冠伦，1986)；④栽培：可用喜旱莲子草栽培出平菇、黑木耳(王德芝和张红军，1999，2000)。这些研究有利于喜旱莲子草的综合治理。

二、生物防治应用基础及其机理的研究

莲草直胸跳甲是喜旱莲子草最有效的天敌，其应用受到多因素的影响。莲草直胸跳甲不耐高温、不耐低温、抗逆力弱，对农药和除草剂敏感(张格成等，1997；黄大兴等，1996；李宏科和李萌，1996；田世尧等，1999)。由于我国地域广阔，有效利用地区相对扩大，应用时间相应延长。据张格成等(1997)初步报道，1月平均气温6℃下，年均温15℃的地区，该天敌有效利用期为4~10个月；1月均温6~7℃，年均温16~17℃的地区，利用期为3月~11月；1月均温8~9℃，年均温18~19℃的地区，利用期为2月下旬~12月上旬；1月均温10~12℃，年均温20℃以上的地区，全年可利用。1999~2000年中国农业科学院生物防治研究所又对全国22个省1000个县市做了函调，160个县区进行实地考察，喜旱莲子草至少分布我国18个省市自治区，该天敌至少已经扩散到14个省、市、自治区，并从生理生态角度提出了莲草直胸跳甲在中国的理论分布与有效利用的范围(Ma and Wang, 2001)。

莲草直胸跳甲对喜旱莲子草的控制在水域上获得成功，对陆生型有一定的抑制作用(马瑞燕等，2003a；马瑞燕和王韧，2004)。最近的研究表明，莲草直胸跳甲对不同生态型喜旱莲子草控制能力不同主要是由于其在不同生态型草上化蛹适应性不同。在水生型草上化蛹能力显著强于湿生型和旱生型，水生型草的直径大小不影响跳甲的化蛹能力，而在陆生型草上随着生长环境水分的降低，莲草直胸跳甲对直径较大的喜旱莲子草有选择性，在不同生态型草上的化蛹率与化蛹位置有关。不同的地理种群这种控制能力没有显著差异(马瑞燕等，2003a)。在进一步的研究的基础上从植物生态与解剖学角度解释了其机理：相关分析表明，莲草直胸跳甲的化蛹率与茎秆节间长、茎秆外直径、髓腔成简单正相关，与皮层薄壁细胞厚度(x_5)和密度(x_6)、维管束厚度(x_4)及髓腔薄壁细胞的厚度(x_3)成简单负相关；用逐步回归建立了化蛹率与形态和解剖结构特性的关系模型($y=1.5332-0.2483x_3-0.0512x_4-1.6349x_5-0.9577x_6$ ， $R^2=0.9999$)，认为影响莲草直胸跳甲控制效果的最关键因子并非是喜旱莲子草茎秆髓腔的大小，而是由于陆生型草的次生结构(马瑞燕和王韧，2004)。此外还利用分子标记 AFLP 和 GIS 等技术对莲草直胸跳甲引进中国后的生态适应性进行了系统全面的评价(Ma and Wang, 2001)。

三、喜旱莲子草综合治理的发展策略

通过近20年的科学研究与实践总结，我们提出如下建议。

(一) 推广成功经验

利用从原产地引入食性较专一的天敌来控制外来杂草是杂草生物防治的传统方式，也是目前行之有效的主要手段之一，具有保护环境、一劳永逸的效果。我国先后将紫茎泽兰 *Eupatorium adenophorum*、喜旱莲子草、豚草(*Ambrosia* spp.)、水葫芦 *Eichhornia crassipes* 4种恶性外来入侵杂草作为应用传统生物防治的目标。其中喜旱莲子草的生物

防治是我国首次引进国外的天敌昆虫进行防治的杂草，也是目前我国最成功的杂草生物防治项目(马瑞燕等，2003b)，其成功经验值得总结和推广。

(二) 开展“南虫北迁”工程治理北部重灾区

莲草直胸跳甲是目前控制喜旱莲子草最有效的天敌昆虫，但是喜旱莲子草在我国的分布范围较该天敌的适生范围广，比如，长江流域许多冬季气温较冷的地区喜旱莲子草能存活，而莲草直胸跳甲则不能。因此这些地区喜旱莲子草的防治仍然是个难题。美国曾针对温带地区喜旱莲子草生物防治从天敌原产地的高纬度地区引进叶甲的耐寒品系，也未能取得显著进展。莲草直胸跳甲对高温和低温的适应性限制了其大量繁殖，影响了生物防治的效果。我国迄今为止的研究与生物防治实践表明，在长江流域通过对该天敌的越冬、越夏保护，以及加强南亚热带虫源基地的建设，每年春季4~5月期间开展天敌的“南虫北迁”，可以将温带地区喜旱莲子草的生物防治有效期提早一个月，从而增加夏季莲草直胸跳甲的种群数量，达到有效控草的目的。

(三) 开发新的天敌资源防治陆生型喜旱莲子草

陆生型喜旱莲子草的防治是生物防治的首要难点。陆生型喜旱莲子草在许多国家的危害胜过水生型，由于陆生型喜旱莲子草的形态和结构限制了莲草直胸跳甲的化蛹能力。因而这种天敌只能起到一定的抑制生物总量的作用，必须积极引进和开发新的天敌资源。

(四) 加强微生物制剂应用基础与开发利用的研究

已经发现几种有潜力的微生物如病原菌及毒素、根结线虫等，但都处于基础研究阶段，应重视基础及应用研究，尤其应加快探索针对陆生型喜旱莲子草的微生物生防制剂的研究与应用。

(五) 开展以生物防治为主的综合治理工程

喜旱莲子草在我国的蔓延为害还在继续，尤其是对陆生型喜旱莲子草，目前仍没有真正经济有效的防治手段。对于这样的恶性外来入侵植物及其对生态环境和人类经济活动造成的影响和损失，首先应当引起各级政府的重视，在加强植物检疫、谨慎引种、防止扩散的同时，应尽快加强针对性的基础研究和以生物防治为主的综合治理示范与推广；其次，加强基础与应用基础的研究，建立完善的科学研究与教育培训体系，加大媒体宣传，提高普通民众生态保护意识，制定一系列自上而下的政策、法规、措施等，提高我国生物多样性保护的理论和实践水平。

(马瑞燕)

主要参考文献

- 曹华国, 李海生, 陈东华等. 1997. 南昌郊区取食空心莲子草昆虫种类调查. *江西植保*, 20(4): 23 [Cao H G, Li H S, Chen D H *et al.* 1997. Survey the insects feeding alligatorweed in the suburb of Nanchang. *Jiangxi Plant Protection*, 20(4): 23]

- 曹勇, 史琦, 董凤青. 1990. 凤眼莲与喜旱莲子草净化造纸废水的效果研究. 农村生态环境, (3): 58-61 [Cao Y, Shi Q, Dong F Q. 1990. Study on paper pulping wastewater treatment by *Eichhornia crassipes* and *Alternanthera philoxeroides*. *Country Ecology Environment*, (3): 58-61]
- 陈昌熙, 周永生. 1993. 青储水花生饲喂奶牛的初步尝试. 上海奶牛, (3): 15 [Chen C X, Zhou Y S. 1993. Preliminary study on feeding milch cow on silage alligatorweed. *Shanghai Milch Cow*, (3): 15]
- 邓国荣, 李伟群, 黄大兴等. 1992. 引放曲纹叶甲防治空心莲子草的研究初报. 广西植保, (4): 37-38 [Deng G R, Li W Q, Huang D X *et al.* 1992. Preliminary study on introducing *Agasicles hygrophila* to control alligatorweeds. *Guangxi Plant Protection*, (4): 37-38]
- 刁正俗. 1990. 中国水生杂草. 重庆: 重庆出版社 [Diao Z S. 1990. Chinese Aquatic Weeds. Chongqing: Chongqing Publishing Press]
- 福建省科学技术委员会, 福建植物志编写组. 1982. 福建植物志. 福州: 福建科学技术出版社 [The Committee of Fujian Science and Technology, The Edition Committee of Flora Fujianica. 1982. Flora Fujianica. Fuzhou: Fujian Sciencetech Press]
- 高仁表, 卢永治, 毛嘉正. 1997. 草甘膦灭杀河网水花生试验. 浙江水利科技, (4): 44-47 [Gao R B, Lu Y Z, Mao J Z. 1997. Glyphosate control alligatorweed in the river. *Zhejiang Water Conservancy Science and Technology*, (4): 44-47]
- 龚国淑, 张世熔, 蒋素蓉等. 2000. 四川雅安发现空心莲子草根结线虫病. 植物保护 21 世纪展望, 927 [Gong G S, Zhang S R, Jiang S R *et al.* 2000. A root knot nematode of *Alternanthera philoxeroides* in Ya'an, Shichuan. *In: The Expectation of Plant Protection in the 21 Century*. 927]
- 顾克余, 王伟义, 蒯训东等. 2000. 菜用水花生的开发和利用. 农牧产品开发, 10: 25-26 [Gu K Y, Wang W Y, Mao X D *et al.* 2000. Exploitation and utilization *Alternanthera philoxeroides* as a vegetable. *Agricultural and Stockbreeding Product Exploitation*, 10: 25-26]
- 胡国文, 唐健, 毛立新等. 1987. 喜旱莲子草在浙江的分布及为害调查. 农垦综防, 10: 25-26 [Hu G W, Tang J, Mao L X *et al.* 1987. Survey on the distribution and damage of *Alternanthera philoxeroides* in Zhejiang. *Journal of Agricultural IPC*, 10: 25-26]
- 淮虎银, 金银根, 张彪等. 2003. 外来植物空心莲子草分布的生境多样性及特征. 杂草科学, 1: 18-20 [Huai H Y, Jin Y G, Zhang B *et al.* 2003. Alien plant *Alternanthera philoxeroides* habitat diversity and characteristic. *Weed Science*, 1: 18-20]
- 黄大兴, 李伟群, 邓国荣等. 1996. 引入曲纹叶甲防治空心莲子草研究. 广西植保, (1): 1-4, 33 [Huang D X, Li W Q, Deng G R *et al.* 1996. Study on introducing *Agasicles hygrophila* to control alligatorweeds. *Guangxi Plant Protection*, (1): 1-4, 33]
- 贾凤芝, 谢平, 陈俊玲等. 1998. 水花生对城市污水净化能力的研究. 水处理技术, 24(5): 308-310 [Jia F Z, Xie P, Chen J L *et al.* 1998. Study on the ability of *Alternanthera philoxeroides* treating city sewage. *Technology of Water Treatment*, 24(5): 308-310]
- 李宏科, 李萌. 1996. 我省两种外来恶性杂草生物防治进展. 湖南农业科学, (6): 32 [Li H K, Li M. 1996. The Development of biological control two species of alien weeds in Hunan. *Hunan Agricultural Sciences*, (6): 32]
- 李宏科, 王韧. 1994. 空心莲子草叶甲的越冬保护和大量繁殖释放的研究. 生物防治通报, 10(1): 11-14 [Li H K, Wang R. 1994. Biological control of alligatorweed, in central China by inoculative releases of *Agasicles hygrophila* with artificial overwintering protection. *Chinese Journal of Biological Control*, 10(1): 11-14]
- 廖衍伦, 叶能干. 1984. 恶性杂草——空心莲子草的初步研究. 辽宁杂草科学, (3): 28-31 [Liao Y L, Ye N G. 1984. Preliminary study on noxious weed, *Alternanthera philoxeroides*, *Liaoning Weed Science*, (3): 28-31]
- 林冠伦, 杭三保, 杨益众等. 1987. 空心莲子草在江苏的分布和经济评价. 江苏农业科学, (3): 17-18 [Lin G L, Hang S B, Yang Y Z *et al.* 1987. Economic evaluation and distribution of *Alternanthera philoxeroides* in Jiangsu. *Jiangsu Agricultural Sciences*, (3): 17-18]
- 林冠伦, 孙进东, 王远等. 1988. 美国、澳大利亚空心莲子草的生物防治研究. 生物防治通报, 4(2): 94-96 [Lin G L, Sun J D, Wang Y *et al.* 1988. Biological control of alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides* in U. S. A. and Australia. *Journal of Chinese Biological Control*, 4(2): 94-96]
- 林冠伦, 杨益众, 胡进生. 1990. 空心莲子草及生物防治研究. 江苏农学院学报, 11(2): 57-63 [Lin G L, Yang Y Z, Hu J S. 1990. Biology and control of the alligatorweed. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 11(2): 57-63]
- 林冠伦. 1986. 空心莲子草的益害观. 杂草科学, 3: 10-11 [Lin G L. 1986. The advantages and disadvantages of *Alternanthera philoxeroides*. *Weed Science*, 3: 10-11]
- 刘建武, 林逢凯, 王郁. 2002. 水生植物净化萘污水能力的研究. 上海环境科学, 21(7): 412-415 [Liu J W, Lin F K, Wang Y. 2002. Study on purification ability of hydrophytes in naphthalene contaminated water. *Shanghai Environmental Sciences*, 21(7): 412-415]

- 娄远来, 邓渊玉, 沈纪冬等. 2002. 我国空心莲子草的研究现状. 江苏杂草科学, (4): 46~48. [Lou Y L, Deng Y Y, Shen J D et al. 2002. The research status of *Alternanthera philoxeroides* in China. *Jiangsu Weed Sciences*, (4): 46~48]
- 陆永进, 郑红, 周恒昌. 1996. 农达与使它隆复配防除水花生的效果. 杂草科学, (2): 28~35 [Lu Y J, Zheng H, Zhou H C. 1996. Effect of Roundup and Starane controlling *Alternanthera philoxeroides*. *Weed Science*, (2): 28~35]
- 马瑞燕, 丁建清, 李佰铜等. 2003. 莲草直胸跳甲在不同生态型空心莲子草上的化蛹适应性. 中国生物防治, 19(2): 54~58 [Ma R Y, Ding J Q, Li B T et al. 2003. The pupation adaptability of the flea beetle (*Agasicles hygrophila*) in different ecotypes alligatorweed. *Chinese Journal of Biological Control*, 19(4): 54~58]
- 马瑞燕, 王韧, 丁建清. 2003. 利用传统生物防治控制外来杂草. 生态学报, 23(12): 2677~2688. [Ma R Y, Wang R, Ding J Q. 2003b. Classical biological control of exotic weeds. *Acta Ecologica Sinica*, 23(12): 2677~2688]
- 马瑞燕, 王韧. 2004. 不同生态型的喜旱莲子草对莲草直胸跳甲化蛹能力的影响. 植物生态学报, 28(1) [Ma R Y, Wang R. 2004. Effect of morphological and physiological variations in the ecotypes of alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae) on the pupation rate of its biocontrol agent *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Acta Phytocologica Sinica*, 28(1)]
- 裴锴, 单人骅. 1952. 华东水生维管植物. 北京: 中国科学院出版社 [Pei K, Shan R H. 1952. Hydrophytic tracheophyte in East China. Beijing: Chinese Academy Sciences Publishing house]
- 谭万忠. 1994. 空心莲子草对几种作物损失的测定. 杂草学报, 8(1): 28~31 [Tan W Z. 1994. Determination the losing of several crops damaged by *Alternanthera philoxeroides*. *Journal of Weed Science*, 8(1): 28~31]
- 唐耀光. 1994. 虾钳菜披龟甲生物学的研究. 昆虫知识, 31(3): 158~160 [Tang Y G. 1994. Study on the bionomics of *Cassida piperata* Hope (Coleoptera: Cassididae). *Entomological Knowledge*, 31(3): 158~160]
- 田世尧, 陈阿妮, 纪海霞等. 1999. 10种杀虫剂对莲草直胸跳甲幼虫生物活性的测定. 仲恺农业技术学院学报, 12(4): 36~39 [Tian S Y, Chen A N, Ji H X et al. 1999. Bioassay of 10 kinds of insecticides against larva of *Agasicles hygrophila*. *Journal of Zhongkai Agrotechnical College*, 12(4): 36~39]
- 万佐玺, 强胜, 徐尚成等. 2001. 链格孢菌的产毒培养条件及其毒素的致病范围. 中国生物防治, 17(1): 10~15 [Wan Z X, Qiang S, Xu S C et al. 2001. Culture conditions for production of phytotoxin by *Alternaria alternata* and plant range of toxicity. *Chinese Journal of Biological Control*, 17(1): 10~15]
- 王德芝, 张红军. 1999. 利用水花生袋栽黑木耳高产技术研究. 信阳农业高等专科学校学报, 9(4): 10~12 [Wang D Z, Zhang H J. 1999. High yield technique culturing Jew's-ear using *Alternanthera philoxeroides*. *Journal of Xinyang Agricultural College*, 9(4): 10~12]
- 王德芝, 张红军. 2000. 水花生栽培平菇高产技术. 农村成人教育, (4): 45 [Wang D Z, Zhang H J. 2000. High yield technique culturing mushroom using *Alternanthera philoxeroides*. *Journal of Agricultural Adult Education*, 4: 45]
- 王韧, 王远, 张格成. 1988. 空心莲子草叶甲寄主专一性测验. 生物防治通报, 4(1): 14~17 [Wang R, Wang Y, Zhang G C. 1988. Host specificity tests for *Agasicles hygrophila*, a biological control agent of alligatorweed. *Chinese Journal of Biological Control*, 4(1): 14~17]
- 王韧, 王远. 1987. 我国南方生物防治空心莲子草的必要性评价. 农垦综防, 2: 32~44 [Wang R, Wang Y. 1987. Necessary valuation to biocontrol *Alternanthera philoxeroides* in south China. *Journal of Agricultural IPC*, 2: 32~44]
- 王韧, 王远. 1988. 我国南方水花生发生危害及生物防治可行性的调查论证. 杂草学报, 3(1): 36~40 [Wang R, Wang Y. 1988. The discussion on feasibility of biological control and occurrence of *Alternanthera philoxeroides* in the south China. *Journal of Weed Science*, 3(1): 36~40]
- 王韧. 1986. 我国杂草生防现状及若干问题的讨论. 生物防治通报, 2(4): 173~177 [Wang R. 1986. Current status and perspectives of biological control weeds in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 2(4): 173~177]
- 吴大椿, 金响林. 1999. 空心莲子草跳甲在荆州发生及生物学特性观察. 湖北植保, (6): 3~5 [Wu D C, Jin X L. 1999. Occurrence and bionomics of *Agasicles hygrophila* in Jingzhou Hubei. *Hubei Plant Protection*, (6): 3~5]
- 吴浪明, 田世尧, 王晓容等. 2000. 广东莲草直胸跳甲生物学的观察. 中国生物防治, 16(3): 144~146 [Wu L M, Tian S Y, Wang X R et al. 2000. Biological observation of *Agasicles hygrophila* in Guangdong. *Chinese Journal of Biological Control*, 16(3): 144~146]
- 吴珍泉, 蔡元星, 郭振铎等. 1994a. 温湿度对空心莲子草叶甲生长发育的影响. 福建农业大学学报(自然版), 23(1): 46~50 [Wu Z Q, Cai Y C, Guo Z X et al. 1994a. Effect of temperature and humidity on the development of *Agasicles hygrophila*. *Journal of Fujian Agricultural University (Natural Science Edition)*, 23(1): 46~50]
- 吴珍泉, 蔡元星, 郭振铎等. 1994b. 利用野生空心莲子草繁殖空心莲子草叶甲. 福建农业大学学报(自然版), 23(4): 421~425 [Wu Z Q, Cai Y C, Guo Z X et al. 1994b. Rearing *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) on alligatorweed,

Altemanthera philoxeroides. *Journal of Fujian Agricultural University (Natural Science Edition)*, 23(4): 421~425]

吴珍泉. 1994. 空心莲子草叶甲大量繁殖及其应用信息系统. *武夷科学*, 12: 102~106 [Wu Z Q. 1994. Mass reproduction and application information system of *Agasicles hygrophila*. *Wuyi Sciences*, 12: 102~106]

吴珍泉. 1997. 温度对空心莲子草叶甲生长发育的影响. *应用生态学报*, 8(2): 181~184 [Wu Z Q. 1997. Effect of temperature on the growth and development of *Agasicles hygrophila*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 8(2): 181~184]

武模戈, 陶令霞. 2000. 喜旱莲子草的生物学特性的观察和利用研究. *安阳师范学院学报*, (2): 43~44 [Wu M G, Tao L X. 2000. The biological observation and utilization of *Altemanthera philoxeroides*. *Journal of Anyang Normal College*, (2): 43~44]

夏汉平. 2000. 香根草和水花生对垃圾污水种 N, P, Cl 的吸收效果. *植物生态学报*, 24(5): 613~616 [Xia H P. 2000. Uptake efficiency of *Vetiveria zizanioides* and *Altemanthera philoxeroides* to N, P, Cl, in garbage leachates. *Acta Phytocologica Sinica*, 24(5): 613~616]

向梅梅, 游明龙. 1999. 几种除草剂与莲子草假隔链格孢混用防除空心莲子草的初步研究. *仲恺农业技术学院学报*, 12(4): 11~14 [Xiang M M, You M L. 1999. The preliminary study on alligatorweed control with mixture of herbicides and *Nimbya altermantherae*. *Journal of Zhongkai Agrotechnical College*, 12(4): 25~31]

向梅梅, 曾永三, 刘任等. 2002a. 莲子草假隔链格孢的寄主范围及对空心莲子草的控制作用. *植物病理学报*, 32(3): 286~287 [Xiang M M, Zeng Y S, Liu R *et al.* 2002a. Host range condition for conidium-producing and efficacy in alligatorweed control of *Nimbya altermantherae*. *Acta Phytopathologica Sinica*, 32(3): 286~287]

向梅梅, 曾永三, 刘任等. 2002b. 空心莲子草叶斑病原菌代谢产物除草活性. *中国生物防治*, 18(2): 87~89 [Xiang M M, Zeng Y S, Liu R *et al.* 2002b. Herbicidal activity of metabolite produced by *Nimbya ltemanthera*, a leafy spot pathogen of *Altemanthera philoxeroides*. *Chinese Journal of Biological Control*, 18(2): 87~89]

肖红, 杨占秋, 文莉等. 1996. 空心莲子草口服治疗乳鼠行流行性出血热病感染的研究. *中国病毒学*, 11(4): 348~351 [Xiao H, Yang Z Q, Wen L *et al.* 1996. Pharmacodynamics studies of *Altemanthera philoxeroides* Griseb, in oral for EHFV infection in suckling mice. *Virologica ltern*, 11(4): 348~351]

杨占秋, 程丽. 1989. 空心莲子草在体外对单纯疱疹病毒的抑制作用. *华西药学杂志*, 4(4): 217~220 [Yang Z Q, Cheng L. 1989. Inhibitory effect of *Altemanthera philoxeroides* Griseb, on herps simplex virus in cell cultures. *West China Journal of Pharmaceutical Sciences*, 4(4): 217~220]

杨志华, 何翠娟, 钱德明. 2002. 沪郊曲纹叶甲消长规律及对空心莲子草作用效果的初步观察. *上海农业学报*, 18(4): 79~83 [Yang Z H, He C J, Qian D M. 2002. A preliminary observation for population dynamic of *Agasicles hygrophila* Selman Vogt and its control effect on *Altemanthera philoxeroides* in the suburbs of Shanghai. *Acta Agriculturae Shanghai*, 18(4): 79~83]

杨子琦, 曹华国, 陈东华等. 1995. 曲纹叶甲越冬保种的研究. *江西农业大学学报*, 17(2): 200~203 [Yang Z Q, Cao H G, Chen D H *et al.* 1995. A study on the overwintering of leaf beetle (*Agasicles hygrophila*) in Nanchang region. *Acta Agricultural University Jiangxiensis*, 17(2): 200~203]

姚东瑞, 李贵, 陈杰等. 1997. 农达对水花生的防效试验报告. *杂草科学*, (4): 27~28 [Yao D R, Li G, Chen J *et al.* 1997. Experimental report controlling *Altemanthera philoxeroides* with Roundup. *Weed Science*, (4): 27~28]

尹仁国. 1992. 蔬菜地空心莲子草的发生及危害. *杂草科学*, (1): 13 [Yin R G. 1992. The occurrence and damage of *Altemanthera philoxeroides* in vegetable field. *Weed Science*, (1): 13]

张彪, 金银根, 淮虎银等. 2001. 两种生境条件下空心莲子草叶片解剖结构比较. *杂草科学*, 4: 6~8 [Zhang B, Jin Y G, Huai H Y *et al.* 2001. Comparison leafy anatomical structure of *Altemanthera philoxeroides* under two habitats. *Weed Science*, 4: 6~8]

张格成, 李继祥, 陈秀华. 1993. 空心莲子草主要生物学特性. *杂草科学*, 2: 10~12 [Zhang G C, Li J X, Chen X H. 1993. Primary biology of alligatorweed. *Weed Science*, 2: 10~12]

张格成, 李继祥, 陈秀华. 1997. 曲纹叶甲防除空心莲子草的应用研究. *中国南方果树*, 6(5): 47~49 [Zhang G C, Li J X, Chen X H. 1997. Applied study of *Agasicles hygrophila* controlling alligatorweed. *Chinese Southern Fruiter*, 6(5): 47~49]

张陶, 王英祥, 张中义. 2002. 柱隔孢属二新种. *菌物系统*, 21(2): 185~187 [Zhang T, Wang Y X, Zhang Z Y. 2002. Two new species of *Ramularia*. *Mycosystema*, 21(2): 185~187]

张运胜. 1989. 稻田施用空心莲子草效果好. *农村经济与科技*, (6): 37 [Zhang Y S. 1989. Good effect on fertilizing *Altemanthera philoxeroides* to rice paddy. *County Economy and Technology*, (6): 37]

张振祥, 郑克明, 黄永生. 2001. 水花生草的危害及其防除技术. *植保技术与推广*, 21(4): 26~27 [Zhang Z X, Zheng K M, Huang Y S. 2001. The damage and control technology of alligatorweed. *Plant Protection Technology and Extension*, 21(4): 26~27]

中国国家环境保护总局, 中国科学院. 2003. 关于发布中国第一批外来入侵物种名单的通知. 环发. 第 11 号. [State Environmental Protection Administration of China. 2003. The announcement about the first list of invasive species in China. 10th

Jan]

- 中国科学院中国植物志编辑委员会. 1979. 中国植物志. 北京: 科学出版社. 236~237 [The edition committee of Chinese Flora, Chinese Academy of Sciences. 1979. Chinese Flora. Beijing: Scientific Publishing House. 236~237]
- 周长芳, 吴国荣, 施国新等. 2001. 水花生抗氧化系统在抵御 Cu^{2+} 胁迫中的作用. 植物学报, 43(4): 389~394 [Zhou C F, Wu G R, Shi G X *et al.* 2001. The role of antioxidant system in Cu^{2+} stress resistance in *Alternanthera philoxeroides*. *Acta Botanica Sinica*, 43(4): 389~394]
- Brown J L, Spencer N R. 1973. *Vogelia malloi*, a newly introduced phycitine moth (Lepidoptera: Pyralidae) to control alligatorweed. *Environment Entomology*, 2: 519~523
- Buckingham G R. 1989. Macropterous adults of alligatorweed thrips, *Amynothrips andersonii* O'Neill, found in Florida. *Florida Entomology*, 72: 221~223
- Buckingham G R. 1994. Chapter 22. Biological control of aquatic weeds. In: Rosen D, Bennett F D, Capinera J L eds. Pest Management in the Subtropics; Biological Control —the Florida Experience. Intercept Ltd., Andover, Hampshire, United Kingdom. 413~479
- Buckingham G R. 1996. Biological control of alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides*, the world's first aquatic weed success story. *Castanea*, 61: 232~243
- Burkhalter A P, Curtis L M, Lazor R L *et al.* 1972. Aquatic Weed Identification and Control Manual. 41~42
- Cofrancesco A F. 1988. Alligatorweed survey of ten southern states. Vicksburg, Mississippi, Misc: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. 136
- Cordo H A, Deloach C J, Ferrer M. 1984. Biology and larval host range of the flea beetle *Disonycha argentinensis* (Coleoptera: Chrysomelidae) on alligatorweed in Argentina. *Entomological Society of America Annals*, 77: 134~141
- Coulson J R. 1977. Biological control of alligatorweed, 1959~1972; a review and evaluation. U. S., Department of Agriculture Technical Bulletin 1547. 98
- Garbari F, Pedulla M L. 2001. *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. (Amaranthaceae), a new species for the exotic flora of Italy. *Webia*, 56(1): 139~143
- Hockley J. 1974. Alligator weed spreads in Australia. *Nature*, 250: 704
- Holcomb G E. 1978. *Alternaria alternantherae* from alligatorweed also is pathogenic on ornamental Amaranthaceae species. *Phytopathology*, 68: 265~266
- Holm L, Doll J, Holm E *et al.* 1997. World weeds: natural histories and distributions. New York: John Wiley Sons Inc. 37~44
- Julien M H, Bourne A S, Low V H K. 1992. Growth of the weed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb (alligator weed) in aquatic and terrestrial habitats. *Plant Protection Quarterly*, 7: 102~108
- Julien M H, Broadbent J E. 1980. The biology of Australian weeds: 3 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. *The Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 46: 150~155
- Julien M H, Chan R R. 1992. Biological control of alligator weed: unsuccessful attempts to control terrestrial growth using flea beetles *Disonycha argentinensis* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Entomophaga*, 37: 213~221
- Julien M H, Griffiths M W. 1998. Biological control of weeds: a world catalogue of agents and their target weeds. 4th edition. Wallingford: CABI Publishing. 223
- Julien M H. 1981. Control of aquatic *Alternanthera philoxeroides* in Australia: another success for *Agasicles hygrophila*. In: Proceedings of the 5th International Symposium of Biological Control of Weed. 583~588
- Julien M H. 1995. *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. In: Groves R H, Shepherd R C H, Richardson R C eds. The Biology of Australian Weeds. 1~12
- Julien M H., Bourne A S. 1988. Alligator weed is spreading in Australia. *Plant Protection Quarterly*, 3: 91~96
- Julien M. H, Skarratt B, Maywald G F. 1995. Potential geographical distribution of alligator weed and its biological control by *Agasicles hygrophila*. *Journal of Aquatic Plant Management*, 33: 55~60
- Julien M H. 1999. The management of alligator weed, a challenge for the new millennium.. Ballina, Australia: The 10th Biennial Noxious Weeds Conference. 2~13
- Kelly S H, Haller W T. 1982. Evidence for the existence of distinct alligator weed biotypes. *Journal of Aquatic Plant Management*, 20: 37~41
- Kelly S H. 1992. Response of alligatorweed biotypes to Quinclorac. *Journal of Aquatic Plant Management*, 30: 35~40
- 莫林. 2001. 水花生对引入的生物控制剂, *Agasicles hygrophila*, 的适应性. 北京: 中国科学院农业研究所. Ph. D Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences. 132

- Maddox D M, Mayfield A. 1979. Biology and life history of *Amynothrips alternant*, a thrip for the biological control of alligatorweed. *Annals Entomological Society America*, 72: 136-140
- Maddox D M, Rensnik. 1969. Determination of host specificity of the alligatorweed flea beetle *Agasicles* n sp. with radioisotopes. *Journal of Economic Entomology*, 62(5): 996-999
- Maddox D M. 1968. Bionomics of an alligatorweed flea beetle, *Agasicles* sp. in Argentina. *Annals Entomological Society America*, 61: 1299-1305
- Maddox D M. 1970. The bionomics of a stem borer, *Vogtia malloi* (Lepidoptera: Phycitidae) on alligatorweed in Argentina. *Annals Entomological Society America*, 63: 1207-1273
- Napompeth B. 1991. Aquatic weed management by biological methods in Thailand. In: A Symposium on Aquatic Weed Management. Bogor, Indonesia: BIOTROP Special Publication. 51-61
- Parsons W T, Cuthbertson E G. 1992. Noxious weeds of Australia. Melbourne. Sydney: Indata Press. 154-157
- Sainty G R, McCorkelle G, Julien M H. 1998. Control and spread of alligator and weed, *Alternanthera philoxeroides*, in Australia: lesson for other regions. *Wetlands Ecology and Management*, 5: 195-201
- Sands D P A, Kassulke R C, Harley K L S. 1982. Host specificity of *Disonycha argentinensis* (Coleoptera: Chrysomelidae), an agent for the biological control of alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides* in Australia. *Entomophaga*, 27: 163-172
- Spencer N R, Coulson J R. 1976. The biological control of alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides*, in the United States of America. *Aquatic Botany*, 2: 177-190
- Stewart C A, Chapman R B, Frampton C M A. 2000. Growth of alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb (Amaranthaceae) and population development of *Agasicles hygrophila* Selman, Vogt (Coleoptera: Chrysomelidae) in northern New Zealand. *Plant Protection Quarterly*, 15(3): 95-101
- Stewart C A, Emberson R M, Syrett P. 1996. Temperature effects on the alligator weed flea-beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae): implications for biological control in New Zealand. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Biological Control of Weeds. 393-398
- Tan W Z, Li Q J, Qing L. 2002. Biological control of alligatorweed (*Alternanthera philoxeroides*) with a *Fusarium* sp. *BioControl*, 47(4): 463-479
- Vogt G B, McGuire J U J, Cushman A D. 1979. Probable evolution and morphological variation in South American disonychine flea beetles and their amaranthaceous hosts. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin 1593. 148
- Vogt G B, Quimby P C J, Kay S H. 1992. Effects of weather on the biological control of alligatorweed in the lower Mississippi Valley region, 1973-1983. USDA Tech. Bull. 1766. 143
- Wain R P, Haller W T, Martin D F. 1984. Genetic relationship among two forms of alligatorweed. *Journal of Aquatic Plant Management*, 22: 104-105
- Wang R. 1989. Biological control of weeds in China: a status report. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Biological Control of Weeds. 689-693
- Xu C Y, Zhang W J, Fu C Z *et al.* 2003. Genetic diversity of alligator weed in China by RAPD analysis. *Biodiversity and Conservation*, 12(4): 637-645
- Ye W H, Li J, Cao H, *et al.* 2003. Genetic uniformity of *Alternanthera philoxeroides* in South China. *Weed Research*, 43(4): 297-302
- Zeiger C F. 1967. Biological control of alligatorweed with *Agasicles* sp. in Florida. *Hyacinth Control Journal*, 6: 31-34
- Zettler F W, Freman T E. 1972. Plant pathogens as biocontrol of aquatic weeds. *Annual Review of Phytopathology*, 10: 455-470

第三十五章 薇甘菊

第一节 分布与起源	742	第五节 生物学特性	746
第二节 识别特征与早期诊断	742	第六节 预防与控制	748
第三节 传入途径与入侵成因	744	第七节 综合开发与应用	750
第四节 危害现状与生态经济影响	745		

摘要 薇甘菊 *Mikania micrantha* H. B. K. 是菊科 Compositae 假泽兰属 *Mikania* 植物, 原产热带南美洲和中美洲, 现已扩散至南亚、东南亚和太平洋一些国家和地区。目前, 已广泛蔓延至我国广东沿海和台湾地区, 特别是深圳、东莞、珠海等地和香港特别行政区, 成为严重为害森林植被、园林绿化及经济作物的外来入侵害草。

薇甘菊是多年生草质或稍木质藤本, 匍匐或攀缘, 喜光喜湿, 分枝能力极强, 扩散蔓延速度极快, 可达 1107m/a。在华南地区, 终年都可进行营养生长, 花期 9 至 10 月, 结实期 11 月至翌年 2 月, 开花数量大, 在 0.25m² 面积内有 136 548~201 188 朵小花, 自然条件下结实率 68%。果实(种子)细小又轻, 千粒重 0.0892g, 易藉风力或动物、昆虫以及人类活动而远距离传播。种子在 25~30℃ 条件下萌发率达 95% 以上, 5℃ 低温明显抑制种子萌发, 其萌发率仅为 0.33%, 40℃ 以上种子萌发率仅 1%, 而且很快死亡。光照不足和储存时间过长也能明显抑制种子萌发。薇甘菊具有较高的 CO₂ 固定能力, 正常阳光照射条件下, 净光合速率 21.56CO₂ μmol/(m²·s), 光合作用饱和点为 1002CO₂ μmol/(m²·s), 高于其周围伴生的草质藤本植物; 在光照极弱条件下, 其仍维持 2CO₂ μmol/(m²·s), 表明其既是喜阳植物, 又具适应阴生环境的能力和特性。这种持续生长、高生物量和高生产力为其蔓延扩散奠定了物质基础。薇甘菊具有他感作用, 根、茎、叶的抽提物能抑制某些杂草和其他植物的生长。此外, 其植物内的挥发油对某些昆虫有显著的触杀和产卵驱避作用, 表明薇甘菊在自然界繁殖蔓延如此迅速, 不但与其生物学特性有关, 而且与其向周围环境中释放化学他感物质抑制排斥其他种有关。薇甘菊在细胞学上产生异染色质的多态性分布现象, 而且其染色体数 $n=72$, 为 4 倍体, 并常有多余的 B 染色体存在, 这也是薇甘菊生存力极强的原因之一。

对薇甘菊的防除控制主要有手工防除、化学防除和生物防除三种方法。化学防除是目前最主要的方法之一, 除莠剂 2, 4-D、2, 4, 5-T、草甘膦(glyphosate)、2-甲-4-氯苯氧基乙酸(MCPA)、溴苯腈(ioxynil)、甲基砷酸钠(MSMA)、兰达(Roundup)、草霸王(Betazon)、毒莠定(TORODON101)、恶草灵(ROSTAR25)、百草枯(paraquat)、森泰(hexazinone)、森草净(sulfometuron methyl)等都不同程度上可以杀灭和控制薇甘菊的蔓延, 但大量使用会对环境造成一定污染。某些天然化学物质如氯化钠和乙酸也能有效杀灭和抑制薇甘菊, 而且这些物质对环境安全可靠, 但能否根除, 尚待深入研究。生物防治无疑是目前最理想的有效方法。目前, 在热带美洲已找到薇甘菊的 9 种主要天敌和 22

种次要天敌。在中国, 已发现小蓑蛾(*Acanthopsyche* sp.)和假泽兰瘤瘿螨 *Aceria mikaniae* 等2种昆虫是防除控制薇甘菊的天敌, 植物菟丝子(*Cuscuta chinensis*)也被证实可以把薇甘菊致死。但引入外来天敌要十分谨慎。

薇甘菊也有其潜在利用价值, 例如, 作为牛羊等畜禽饲料、药用植物、植物源杀虫剂和除莠剂等。

关键词 薇甘菊 生态学特性 生理学特性 化学控制 生物控制 利用

Chapter 35 Mile-a-minute Weed *Mikania micrantha* H. B. K.

Abstract: *Mikania micrantha* H.B.K. belongs to the genus *Mikania* (Compositae). It is native to tropical South and Central America and has spread to South Asia, Southeast Asia and Pacific region. It has dispersed to South China, including Guangdong province, Special Administrative Region of Hong Kong and Taiwan. It has become a serious weed in these regions and disturbed mainly in forests, plantation crops, horticulture and coastal vegetation.

M. micrantha is a perennial herbaceous vine, twinning counterclockwise on other plants or sprawling on the ground. It prefers open space with light, wet and rich organic soil. It has an extremely high ability to branch and to grow, with a growing rate of 1,107m per year. In South China, its white, somewhat fragrant flowers appear in Sep. to Oct. and the number of floret reaches 136 548~201 188 within 0.25m². The fruit / seed is small, which weighs 0.0892g per thousand ones. Seed germination rate reaches over 95% under 25~30°C. The germination can be inhibited under extremely low or high temperature, which is only 0.3% at 5°C and 1.0% at 40°C, and the germinated ones die soon in these cases. *M. micrantha* has a strong capacity for CO₂ fixation. Its net photosynthesis is 21.56μmolCO₂ · m⁻² · s⁻¹ and the light compensation point of photosynthesis is as high as 1 002μmolCO₂ · m⁻² · s⁻¹, which are higher than those of the accompanying plants. *Mikania micrantha* had allelopathic effects. The extracts from roots, stems and leaves of *Mikania* can inhibit growth of some weeds and plants. The volatile oil of *Mikania* is toxic to or has significant deterrent effect on oviposition of some insects.

The control measures of *M. micrantha* include biological control, chemical control and manual removal. Chemical control is the main measure at present. It has been reported that *M. micrantha* is moderately susceptible to the herbicides 2, 4-D, 2, 4, 5-T, glyphosate, MCPA, ioxynil, MSMA, Roundup, Betazon, TORODON, RONSTAR, paraquat, hexazinone, sulfometuron methyl, etc.. *M. micrantha* is also moderately susceptible to sodium chloride and acetic acid. But environment might be polluted by using large number of herbicides. Biological control is a potentially effective measure to control *M. micrantha*. Nine major natural enemy species and 22 others have been reported in the tropical America, which is the

native habitat of *Mikania. Acanthopsyche* sp. and *Aceria mikaniae* (Nalepa) are reported as natural enemies of *M. micrantha* in China. Dodder species (*Cuscuta* sp.) have been used to suppress the spread of *Mikania* in Assam, Sri Lanka and China. Although these natural enemies and some plant species may be used in biological control, there are still lots of deep researches to be carried out.

M. micrantha has the potential to be utilized as forage crops, herbaceous medicine and plant-based pesticides and herbicides etc..

Key words: *Mikania micrantha*, ecological characteristics, physiological characteristics, chemical control, biological control, utilization

第一节 分布与起源

薇甘菊 *Mikania micrantha* H. B. K. 是菊科 Compositae 假泽兰属 *Mikania* 植物。原产热带南美洲和中美洲，现已遍布于南亚、东南亚各国，包括印度、孟加拉、斯里兰卡、泰国、菲律宾、毛里求斯、印度尼西亚和太平洋岛屿国家包括斐济、库克岛、所罗门群岛、圣诞岛、新不列颠和新圭亚那等地，以及中国的香港、广东和台湾等省区(Holm *et al.*, 1977; 胡玉佳和毕培曦, 1994; 温达志等, 2000; Chiang *et al.*, 2002), 此外，澳大利亚昆士兰地区最近相继发现薇甘菊的蔓延并对该地区的自然资源影响显著，被列为昆士兰四大湿性恶草之首(Bebawi *et al.*, 2002)。

20 世纪 80 年代初，我国广东和香港已见薇甘菊分布。在香港，已遍布新界地区各郊野荒地。20 世纪 80 年代，在广东深圳首次采集到薇甘菊标本(孔国辉等, 2000a)。20 世纪 90 年代以后，深圳、东莞、珠海等地先后出现了薇甘菊的为害(冯惠玲等, 2002)。在我国，从水平分布看，薇甘菊主要集中分布在北纬 21°~24°(24°以北地区尚未发现)、东经 111°~117°地区。从垂直分布看，薇甘菊分布在海拔 0~600m 的地方，而主要分布在 50~200m 的低海拔地方，尤其是在山谷、河溪两侧的湿润地带(冯惠玲等, 2002; 王伯荪等, 2003)。在台湾地区，薇甘菊则主要分布在台湾岛内东部农用地上(Chiang *et al.*, 2002)。

目前，已知薇甘菊在广东境内已蔓延传播到 35 个县市地区，其分布地点集中在深圳、珠海、东莞、惠州、中山等地，并由这些地区继续向其他地区蔓延。调查结果表明，薇甘菊在我国的具体分布可通过分级表示。即 I 级：薇甘菊分布广泛，绝大多数区域可见，主要见于深圳、东莞、香港。II 级：分布较广泛，多数区域可见，主要见于珠海、澳门、中山、惠州、增城、博罗。III 级：分布不广泛，局部地区可见，主要见于广州、番禺、河源、顺德、惠东、海丰、陆丰、汕尾。IV 级：偶见有分布，主要见于惠东、丰顺、五华、揭阳、揭东、花县、电白、南海、阳东、肇庆、阳春、高要、佛山、封开、云浮、吴川、湛江、台山、饶平(王伯荪等, 2003)。

第二节 识别特征与早期诊断

薇甘菊作为一种外来植物，1985 年版的《中国植物志》还未收录(石铸, 1985)，对

其形态、分类等识别特征没有描述。后来，孔国辉等 (2000b) 根据 1984 年在我国深圳采集到的标本，进行了鉴定描述。薇甘菊是菊科多年生草质或稍木质藤本，茎细长，匍匐或攀缘，多分枝，被短柔毛或近无毛，幼时绿色，近圆柱形，老茎深褐色，具多条肋纹。茎中部叶三角状卵形至卵形，长 4~13cm，宽 2~9cm，基部心形，偶近戟形，先端渐尖，边缘具数个粗齿或浅波状圆锯齿，两面无毛，基出 3~7 脉；叶柄长 2~8cm，上部的叶渐少，叶柄亦短。头状花序多数，在枝端常排成复伞房花序状，花序梗纤细，顶部的头状花序花先开放，依次向下逐渐开放，头状花序长 4.5~6.0mm，含小花 4 朵，全为结实的两性花。总苞片 4 枚，狭长椭圆形，顶端渐尖，部分急尖，绿色，长 2.0~4.5mm，总苞基部有一线状椭圆形的小苞叶(外苞片)，长 1~2mm。花有香气；花冠白色，管状，长 3.0~3.5(4)mm，檐部钟状，5 齿裂。瘦果长 1.5~2.0mm，黑色，被毛，具 5 棱，被腺体，冠毛由 32~38(40)条刺毛组成，白色，长 2.0~3.5mm(图 35-1，图 35-2)。



图 35-1 薇甘菊 *Mikania micrantha* H.B.K.
(孔国辉等, 2000b)

1. 植株一部分；2. 头状花序 Head；3. 小苞叶(外苞片)；4. 总苞片；5. 两性花；6. 花冠展示雄蕊着；
7. 展开的雄蕊群；8. 瘦果；9. 冠毛及局部放大；
10. 瘦果横切面示棱及毛



图 35-2 薇甘菊 *Mikania micrantha* H.B.K.
(胡玉佳 摄)

薇甘菊是菊科假泽兰属植物，该属全世界约 273 种，主要产于热带美洲，2 种产于南非，2 种产于亚洲。我国目前分布有 2 种，一种是我国原产的假泽兰 *Mikania cordata* (Burm.) B.L. Robinson，一种是从外来种薇甘菊(孔国辉等, 2000a；王伯荪等, 2001)。在我国的这两种都是有害杂草，它们的营养体十分相似，不易区别，但其花和果实有较明显区别(表 35-1)。

表 35-1 薇甘菊与假泽兰的主要区别(Holm *et al.*, 1977)

种名	薇甘菊(<i>Mikania micrantha</i>)	假泽兰(<i>Mikania cordata</i>)
头状花序	4.5~6mm	6~9mm
总苞片长	2~4mm	5~6mm
小苞叶长	1~2mm	3mm
花冠颜色	白色	白色或微黄色
花冠长	2~3(4)mm	5mm
瘦果长	1.5~2mm	2~3mm
冠毛的刺毛数目	32~38(40)条	40~45 条
刺毛长	2~4mm	4mm
刺毛颜色	白色	成熟时带红色

第三节 传入途径与入侵成因

薇甘菊原产于新大陆热带中、南美洲,目前已广布于旧大陆热带地区以及我国香港、广东和台湾等省区的南亚热带地区,甚至蔓延至澳大利亚和新西兰。针对薇甘菊这一恶性杂草如何传播到旧大陆热带地区这一问题, Soerjani 等(1987)指出,早在 1949 年,印度尼西亚的茂物植物园从巴拉圭引种薇甘菊作为橡胶土壤覆盖物,1956 年薇甘菊又被用作垃圾填埋场的土壤覆盖物,到 1987 年传播到整个印度尼西亚。但是,印度尼西亚薇甘菊最早标本是在 1957 年采集到的。然而薇甘菊在旧大陆热带地区最早的记录凭证则是 1907 年采自斐济(王伯荪等, 2003; Holmes, 1982)。王伯荪等(2003)根据 Holmes(1982)的引证进一步提出薇甘菊在旧大陆热带其他地区最早标本的采集年代,依次是毛里求斯(1928 年)、马来西亚(1930 年)、菲律宾(1945 年)、新加坡(1949 年)、所罗门群岛(1954 年)、印度(1956 年)、泰国(1959 年)、马里亚纳群岛(1962 年)、纽埃岛(1965 年)、萨摩亚(1968 年)、斯里兰卡(1969 年),薇甘菊标本的采集情况或多或少反映着它的传播经历。由上述可见,薇甘菊在 20 世纪 50~60 年代广泛蔓延,在 20 世纪 70 年代已遍布于旧大陆。这种传播蔓延被认为是在第二次世界大战期间,由旧大陆热带地区的各种活动所促进。在此期间,美军在马来西亚、印度等南亚地区曾大量用薇甘菊做伪装及运输畜力骡马等的饲料,以及 1950 年后大地震引起大面积的河水泛滥等因素,致使薇甘菊遍及南亚地区(Choudhury, 1972; 王伯荪等, 2003),并导致薇甘菊进一步广泛出现于太平洋诸岛屿,以及大洋洲的巴布亚新几内亚、澳大利亚的昆士兰北部(Waterhouse, 1994; 王伯荪等, 2003)。

薇甘菊在中国最早发现于香港。早在 1884 年,香港植物园种植过薇甘菊(Melville, 1987),而作为外来杂草,1919 年便已在香港出现(咎启杰等, 2000; 孔国辉等, 2000a)。根据香港植物标本馆藏的香港最早薇甘菊标本是 1884 年 12 月采集的,它采自当时的香港植物园,记录表明是引种栽培种(但无引种地和引种年代),从而确定 19 世纪末薇甘

菊已引种栽培至香港。它足以证明香港的薇甘菊记录远早于 Holmes(1982)所引证发现于斐济的 1907 年的旧大陆最早记录整整提前 23 年。因此,可认为香港引种栽培的薇甘菊应是来自原产地中、南美洲,而非来自美洲或东南亚地区。传播到香港的薇甘菊不是经南亚或东南亚的自然散布,而是人为地直接由中、南美洲原产地引种栽培,从而驯化逸出而迅速蔓延(王伯荪等, 2003)。

薇甘菊在广东传播的最早记录是 1984 年 10 月在深圳银湖附近采集到的标本,这可能是中国大陆采集薇甘菊标本的最早记录,也可能是薇甘菊入侵中国大陆的第一站(孔国辉等, 2000a)。目前,已知薇甘菊在广东省境内已蔓延到 35 个县市区,其分布地点集中在深圳、珠海、东莞、惠州、中山等地,并由这些地区继续向其他地区蔓延。薇甘菊在广东的分布与危害,以距离香港最近的深圳市最为严重。薇甘菊在深圳市传播,显然是与紧邻香港新界地区的一些薇甘菊危害严重地区密切相关,或者说是源于香港地区。而广东地区的薇甘菊传播无疑是源于香港地区,深圳地区也应该是源头之一(王伯荪等, 2003)。

综上所述,薇甘菊由其原产地中、南美洲自然散布至太平洋岛屿,进而蔓延开来。印度尼西亚人为引种也是一个重要途径,并成为薇甘菊在南亚、东南亚热带地区传播的源头之一。薇甘菊入侵中国,首先是人为从中、南美洲引种栽培,以后驯化逸生,深圳成为薇甘菊入侵中国大陆的第一站,其传播源头是香港地区,以后不断蔓延至广东沿海各地。这就是说,薇甘菊的传入途径与入侵成因有自然扩散和人为扩散两种,且两者常常互相关联。薇甘菊的自然扩散是由于种子随风、水流等扩散,或许也与全球变化有关;人为扩散则是通过现代交通和频繁的人为活动或人工引种等携带扩散(邵婉婷等, 2002)。

第四节 危害现状与生态经济影响

薇甘菊生长迅速,茎节随时可以生根并繁殖,具有丰富的种子,能快速传播并覆盖生境,对森林、农田、经济作物甚至园林绿化产生巨大的危害。在马来西亚,由于薇甘菊的覆盖,使橡胶树的种子萌发率降低 27%,橡胶树的橡胶产量在早期 32 个月内减产 27%~29%(Waterhouse, 1994)。在东南亚地区,由于薇甘菊的喜攀缘习性,致使油棕、椰子、可可、茶叶、柚木等都受到覆盖,严重影响这些经济作物的生长,甚至受缠绕后枯死。

在我国广东沿海地区和香港特别行政区,薇甘菊的主要入侵对象是自然次生林、水源保护林、果园、耕荒地、海岸滩涂、红树林等。在深圳市,薇甘菊的存在度达 92%,东起南澳西冲,西至宝安沙井、松岗;南起内伶仃岛,北达平湖、坪地、横岗;市区内路边绿化带、公园、山坡等均有薇甘菊分布。全市受害面积已达 3000hm²,造成林木枯死面积达 243hm²。其中又以内伶仃岛的危害最重,该岛的东部、东北部、东南部 40%~60% 的灌木林被薇甘菊覆盖。该岛北部、西部的马占相思林、马尾松林的林缘地区也全被薇甘菊占据并进一步向林内发展。全岛 139hm² 的陆地面积,就有 40hm² 遭到薇甘菊不同程度的为害,有些林地甚至变成为单优的薇甘菊群落。此外,东莞市大岭山大片荔枝园受薇甘菊覆盖,珠海市郊大片次生林地,公路边缘以及该市淇澳岛红树林也受到薇甘菊严重危害(冯惠玲等, 2002; 王伯荪等, 2003)。在香港特别行政区,薇甘菊主要入侵于新

界郊野耕荒地、郊野公园林地边缘、以及米铺红树林缘,对森林植被、园林景观和红树林都造成严重危害(胡玉佳和毕培曦,1994)。据香港有关部门2001年统计,香港郊野公园及其临近地区,薇甘菊的覆盖面积已达9289 hm²(王伯荪等,2003)。

由于薇甘菊危害日益严重,使有关地区的经济受到巨大损失,其生态和经济损失目前仍无法评估。为了控制薇甘菊的蔓延,保护经济作物,许多国家和地区都投入巨大的财力和物力。如马来西亚,每年为保护经济作物而用于防除薇甘菊的费用为980万美元(张炜银等,2002)。

第五节 生物学特性

一、生物生态学特性

种子:薇甘菊种子(瘦果)长椭圆形,亮黑色,先端有一圈冠毛。种子细小,千粒重0.0892g,借风力可进行远距离散播。种子在25~30℃条件下6~8d内完全萌发,总萌发率95.3%,胚根胚茎发育良好。在温度5℃下几乎不能萌发,15℃下萌发率仅42.3%,胚根胚芽发育不良,在40℃下萌发率则降至1.0%,未萌发种子腐烂变质。然而5℃条件下储存52d后的种子重新置于25~30℃条件下,4d后其萌发率仍高达65.7%,胚根长2.5mm,胚芽长2.0mm,这说明薇甘菊种子具有忍受5℃以上低温的能力,但不能忍受40℃以上高温。萌发的最适温度是25~30℃。种子萌发需要光照,在完全黑暗条件下,萌发率为35.2%,胚根生长不良,而胚芽徒长;每天光照6h以上才能满足种子萌发需要,其萌发率72.7%以上。薇甘菊种子在萌发之前可能要有一个短暂的“后熟期”(period of after-ripening)。新鲜采摘后即播的种子萌发率不高;种子成熟后自然储存10~60d,萌发率较高,储存时间愈长,萌发率愈低(胡玉佳和毕培曦,1994)。

营养生长:薇甘菊幼苗初期生长缓慢,苗龄30d的幼苗高1.1cm,单株叶面积0.33cm²,以后随苗龄的增长而加快,光照不足会强烈抑制幼苗生长发育(胡玉佳和毕培曦,1994)。薇甘菊茎秆一个节,夏季一天可伸长20cm,每个节每年再萌生155个节,合计生长速度可达1107m/年(王勇军等,2003)

生殖生长:薇甘菊每年都可开花结实。小花从现蕾至盛开的时间为5d,开花后10~12d内种子成熟。种子成熟后在植株上存留7~10d,待冠毛完全舒展,借风或外力作用散播出去(胡玉佳和毕培曦,1994)。薇甘菊花的数量极大,在0.25m²内有34137~50297个头状花序,约合计136548~201188朵小花,占地上部分总生物量的38.4%~42.8%。薇甘菊小花在日中太阳光照最强的中午时开放,小花的花粉数量大,每朵小花花粉量高达1275~2377粒(胡玉佳和毕培曦,2000)。薇甘菊花的结实率与光照时间长短有密切关系。每天光照12h,其结实率高达68.4%,每天光照6h,结实率达36.9%,而光照3h,结实率仅14.2%(胡玉佳和毕培曦,1994)。

二、生理生化特性

谭达志等(2000)比较研究了薇甘菊及其主要伴生种的基本光合特性,结果表明,薇甘菊具有较高的CO₂固定能力,净光合速率21.56 CO₂ μmol/(cm²·s),高于伴生种的草质藤野葛 *Pueraria lobata* 和五爪金龙 *Ipomoea cairica*; 正午12:00时后薇甘菊净光合

速率和气孔导度出现一定程度的下降,降幅分别为30%和47%,下降的初始时间滞后于林下灌木,其光合作用光饱和点为 $1002\text{ CO}_2\ \mu\text{mol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$,这些表明薇甘菊是阳性植物。林内光照极低条件下,薇甘菊仍维持 $2\text{ CO}_2\ \mu\text{mol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 左右的净光合速率,且其光合作用光量子效率(QUE)仍较高,光补偿点则较低,证明薇甘菊具有适应阴生环境的能力和特性。

薇甘菊叶片、茎和根的残骸的提取物具有化学他感作用(allelopathy),能抑制某些杂草如紫鹤花 *Asystasia intrusa*、竹节草 *Chrysopogon aciculatus* 和两耳草 *Paspalum conjugatum* 等的种子萌发和生长,导致其高生长和幼苗鲜重下降,且抑制作用随浓度增加而增强(Ismail and Mah, 1993)。Hu and Wu(2003)研究也表明,薇甘菊根、茎、叶的水抽提液对萝卜 *Raphanus sativus*、绿豆 *Phaseolus aureus*、黄瓜 *Cucumis sativus*、番茄 *Lycopersicon esculentum* 4种受体植物的种子萌发和幼苗生长产生抑制作用。在薇甘菊根、茎、叶三种水抽提液中,产生抑制受体植物的他感作用由强到弱的顺序是叶>根>茎,即叶片的水抽提液的化学他感作用最强。邵华等(2003)分别用自然风干的薇甘菊根茎叶和凋落物的水、石油醚、乙醇和乙酸乙酯抽提液分别对萝卜、黑麦草 *Lolium multiflorum*、白三叶 *Trifolium repens* 以及对薇甘菊常见伴生种马占相思 *Acacia mangium*、马尾松 *Pinus massoniana*、大叶桉 *Eucalyptus robusta* 的种子和幼苗进行处理,结果发现,薇甘菊地上部分水抽提液能够显著影响受体植物生长,根水抽提液的抑制程度稍低,凋落物水提液基本无作用;薇甘菊地上部分的石油醚和乙醇提取物对受体植物幼苗生长表现出一定抑制作用,但是乙酸乙酯提取物的作用最强烈,可使种子发芽过程受阻,幼苗生长受抑制程度高达90%以上,显示薇甘菊的化感物质易溶解于乙酸乙酯。这些都表明薇甘菊在自然界中生长繁殖迅速,不但与其生物学特性有关,而且与其向周围环境中释放化学他感物质有密切关系。张茂新等(2003)还研究指出薇甘菊挥发油对萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 有一定的触杀毒力且随浓度的增加而加强;而薇甘菊挥发油对小菜蛾 *Plutella xylostella*、黄曲条跳甲 *Phyllotreta striolata* 和猿叶虫 *Phaedon brassicae* 有显著的产卵驱避作用,表明薇甘菊挥发油对昆虫不以毒杀方式显示活性,而是通过干扰昆虫的产卵驱避作用来减少昆虫的种群危害。薇甘菊挥发油主要是倍半萜及其醇和酮的衍生物,这些已有学者进行过研究,但都未能给出确切的结构,而且化学组分含量有较大差异(Nicollier and Thompson, 1981),表明薇甘菊在不同的生长地产生的挥发物有显著差异(张茂新等, 2003)。

薇甘菊对某些天然化学物质胁迫产生明显反应。Hu 和 Wu(2003)研究了薇甘菊种子、幼苗和成熟植株对天然化学物质乙酸(CH_3COOH)和氯化钠(NaCl)胁迫作用(stress)的反应。研究表明,薇甘菊种子萌发期对氯化钠胁迫并不敏感,只有较高浓度(0.5%)的氯化钠溶液才能明显抑制种子萌发,但这种抑制作用是可逆的,一旦解除氯化钠胁迫,种子即恢复吸水,重新萌发。薇甘菊种子萌发期对乙酸胁迫较为敏感,低浓度(0.08%)的乙酸溶液则明显抑制种子萌发,当浓度增至0.2%时,乙酸对薇甘菊种子萌发的抑制是不可逆的。随着乙酸和氯化钠浓度的增加,其对薇甘菊幼苗及成熟植株胁迫作用不断增强,当氯化钠浓度为2.5%或乙酸浓度为0.5%时,对苗龄15d和30d的幼苗胁迫作用最强。当氯化钠浓度增至10%时,乙酸浓度为7%时,对薇甘菊成熟植株胁迫作用最强,表现为植株的地上地下部分干枯死亡。

三、遗传学特性

对薇甘菊的遗传学，特别是分子遗传学的研究比较少，主要侧重于细胞染色体的研究。Ruas 和 Ruas(1987)对巴西采集的 12 个薇甘菊种群有丝分裂染色体使用 Feulgen 染色和 C-带观察发现，存在异染色质的多态性分布，而且可见到 1~14 个额外染色体或 B 染色体。Maffer 等(1999)对 12 个种群中的 6 个种群的 B 染色体进行监测，发现其大小、数量和结构在核型和同类种群分生组织细胞中均有变异。B 染色体也是异染色质的，表现了与 A 染色体相似的 C-带类型，暗示它们可能由 A 染色体衍生而来。Dortas(1998)对 3 个不同来源的薇甘菊种群的根尖有丝分裂中期细胞的核型研究发现，源自 Parana 和源自 Santa Catarina 的薇甘菊细胞核型表现为 $2n=4x=72$ 个染色体的四倍体；这两地以外的第 3 个薇甘菊细胞核型表现为 $2n=2x=36$ 个染色体的二倍体；除了染色体数目的不同外，3 个种群在染色体形态上都存在不同，源自 Parana 和 Santa Catarina 的薇甘菊的种群染色体核型公式分别为 $42m+24sm+6st$ 和 $38m+34sm$ 。Ruas and Aguiar(1997)对假泽兰属 6 个种进行的细胞学研究认为其染色体基数为 $n=18$ ，但薇甘菊为四倍体， $n=72$ 。以上研究表明，薇甘菊为多倍体，并常有多条的 B 染色体存在。

第六节 预防与控制

预防和控制薇甘菊的蔓延是当务之急。在那些尚未受薇甘菊蔓延为害的地区，要高度警惕，密切监测，一旦发现应立即采取措施予以控制或灭除。特别是农田、经济作物园、果园等要精耕细作，使薇甘菊难以入侵。在薇甘菊入侵的地方，则加以防除，防止其继续蔓延，加深危害。目前，对薇甘菊的控制一般采取人工、化学和生物防治三种方法。

一、人工防除

20 世纪 80 年代，曾用人工拔除和火烧方法防治过香港米埔地区的薇甘菊，结果是人工拔除只能局部有效；火烧则难以奏效，因为它根系很深，难以烧死，容易再生(Melville, 1987)。广东深圳市对内伶仃岛焦坑湾 $2000m^2$ 密布薇甘菊的样地进行过人工清除试验，用刀割除地上营养体部分并置于烈日下暴晒。3 个月后，试验样地内的薇甘菊 80%恢复生长，6 个月后 100%恢复。究其原因，是由于进行人工清除时正值雨季(7 月份)，水分充足，地下残存部分繁殖迅速，被除的茎节难以枯死，一遇雨水，地下残余部分及未干的茎节立即生根，新的植株很快生长。因此，对薇甘菊进行人工清除的时间选择、清除方式及清除后的土地恢复尚待以后深入探讨(咎启杰等，2000)。此外，由于薇甘菊可攀援至树冠，清除它也会伤害作物，同时，人工清除在大范围内应用成本很高(张炜银等，2002)。

二、化学防除控制

化学防除控制是指应用化学除莠剂或其他化学物质的防除控制，是目前控制薇甘菊的主要方法之一。Dutta(1961)早在 20 世纪 60 年代就开始采用 2, 4-D 和 MCPA 开展化

学控制茶园中薇甘菊的研究。Ipor and Tawan(1995)在薇甘菊的化学防治方面也做了大量工作,明确了薇甘菊对除莠剂的吸收及除莠剂的传导、分配和活性等情况。香港野生生物基金会利用除莠剂 2, 4-D、2, 4, 5-T 和草甘膦防除控制米铺地区的薇甘菊取得一定效果(Melville, 1987)。胡玉佳和毕培曦(1994)在实验条件下使用除莠剂“兰达”(Roundup)、“草霸王”(Betazon)、“毒莠定”(TORODON101)和“恶草灵”(ROUSTAR25)对薇甘菊的种子萌发、幼苗生长进行试验研究,结果表明,薇甘菊种子对较低浓度的这 4 种除莠剂都有一定的抵抗能力,较高浓度则能有效地杀伤种子,致使其完全丧失萌发能力;0.4%~1.5%的这 4 种除莠剂可分别完全杀灭薇甘菊不同苗龄的幼苗。这 4 种除莠剂中,以“草霸王”效果最好,“兰达”次之。咎启杰等(2001)使用“2, 4-D”、“草甘膦”(农达)、“森泰”和“森草净”等除莠剂对薇甘菊进行防除控制研究,结果表明,50~500 倍的 2, 4-D 和草甘膦只能杀灭薇甘菊的地上营养体,不能杀死根部;25%森泰水剂注射茎根,每株用量 0.1~0.3ml,可以在 5~6 个月内彻底杀灭薇甘菊;用毒草净水溶液喷洒薇甘菊茎叶,用量在 1~1000g/hm² 时,可在 2~3 个月内彻底杀灭薇甘菊。王勇军等(2003)用 0.01~0.1g/m² 的森草净(有效成分甲嘧磺隆-sulfometuron methyl)对深圳市内伶仃岛的薇甘菊进行大面积的喷洒灭除试验,认为森草净对薇甘菊有极好的杀灭效果,而对周围的大多数木本、藤本和草本植物较安全。然而,大量使用除莠剂防除控制薇甘菊可能会对其他植物(作物)及土壤造成不良影响,对环境也造成一定的污染,因此使用化学除莠剂需慎重。

化学防除控制除用化学除莠剂之外,尚可使用某些天然化学物质。Hu and Wu(2003)应用天然化学物质氯化钠(NaCl)和乙酸(CH₃COOH)溶液对薇甘菊种子、幼苗和大量成熟植株进行了系统试验研究。结果证明,使用 0.5%以上的氯化钠溶液或 0.2%以上的乙酸溶液可完全致使薇甘菊种子丧失萌发能力;2.5%以上的氯化钠溶液或 0.5%以上的乙酸溶液可以在 5d 内彻底杀灭不同苗龄的薇甘菊幼苗;17%的氯化钠溶液或 10%乙酸溶液可以在 7d 内彻底杀灭薇甘菊成熟植株。上述溶液对周围植物(作物)及环境安全可靠。乙酸在常温下很容易挥发,而氯化钠可专用于防除滩涂、红树林近缘的薇甘菊,两者对土壤没有影响。然而,如何提高这些天然化学物质防除控制薇甘菊的效果、降低浓度、减少用量等,并继续寻找更好的天然化学物质,尚待深入研究探讨。

三、生物防除

生物防除是应用昆虫天敌、真菌或某些植物的化学他感作用对薇甘菊进行防除控制。薇甘菊在原产地之所以没有成为有害杂草,是因为当地有许多自然天敌控制其生长。迄今为止,已有许多研究人员在寻找引进薇甘菊的天敌方面做了大量的工作。据 Cock(1982a, 1982b)和 Freitas(1991)研究,在薇甘菊的原产地热带美洲有 9 种主要天敌和 22 种次要天敌。这 9 种主要天敌是:缨翅目的假泽兰滑蓟马 *Liothrips mikaniae*、半翅目的网蝽(*Telenemia* sp.)、鞘翅目的 *Desmogamma conjuncta*、*Echoma marginata*、*E. fquadristillata*、*Physimerus pygmarus*、长喙小蝽 *Apion luterirostre* 和 *Pseudoderelomus baridiiformis* 以及螨类的下毛瘿螨(*Acalitus* sp.)。同时, Cock(1982a, 1982b)还对这 9 种主要天敌的分布、生活习性、取食为害及寄主范围和天敌等做了详细报道,为利用这些天敌对薇甘菊的生物防治提供了科学依据。目前,假泽兰滑蓟马已被引进南亚国家用于

防治薇甘菊，有一定效果，但尚不能起到防除目的(邵婉婷等，2002)。马来西亚曾于1989年从特立尼达引进假泽兰蓟马，但由于存在较多的捕食性天敌如蜘蛛、蚂蚁等，使假泽兰蓟马不能建立自然种群从而影响其大量使用(Waterhouse, 1994)。1987年，当时的香港政府渔农处对引进假泽兰蓟马感兴趣，并对此做了准备和评估，但考虑到种种因素而最后搁置(Melville, 1987)。

Barreto 和 Evans(1995)发现巴西南部地区有多种病原真菌可用于防治薇甘菊。经过田间试验，发现 *Basidiophora montana* 可用于亚热带国家和山地气候地区对薇甘菊进行生物防治。此外，锈菌 *Dietelia protoricensis* 也曾经被报道可作为薇甘菊潜在的生物防治因子(Romero and Carrion, 1998)。

中国学者近年来对薇甘菊的生物防治方面也做了许多工作，发现了一些很有希望的薇甘菊昆虫天敌。邵华等(2002)首次报道了在我国发现薇甘菊的天敌鳞翅目小蓟蛾科的小蓟蛾(*Acanthopsyche* sp.)，并具体描述了它的形态特征、生活习性、分布及其对薇甘菊防治控制效果的初步结果。邵婉婷等(2002)在海南的假泽兰植物 *M. cordatap* 中也发现了一种天敌假泽兰瘤瘿螨 *Aceria mikaniae*(Nalepa)，是我国的新记录种，有望成为控制薇甘菊的潜在生防因子。

某些植物对薇甘菊生长有控制作用。Melville(1987)报道过在印度阿萨姆邦(Assam)和斯里兰卡利用旋花科 Convolvulaceae 植物菟丝子(*Cuscuta* sp.)压制薇甘菊，阻止它从荒地茶园向蔓延。韩诗畴等(2002)进行了菟丝子 *C. chinensis* 寄生于薇甘菊的试验研究，结果证实菟丝子可在2个月内完全抑制薇甘菊的生长，最终把薇甘菊致死。但菟丝子是没有选择性的寄生植物，也可以对其他植物和农作物造成危害。

第七节 综合开发与应用

薇甘菊作为一种外来入侵植物，不断在我国热带、亚热带地区蔓延泛滥，对这些地区的生态安全造成一定的危害。然而，它在给我们带来危害的同时，亦具有潜在的利用价值，或许更值得人们去深入研究(邵华等，2001)。

一、牛、羊等畜禽饲料

在国外，薇甘菊是一种优良饲料，其口感鲜美，牛、羊都喜欢取食，即使有其他草类生长的环境中也会先选择薇甘菊，而将豆科植物最后食用(Arope *et al.*, 1985)。在我国南方，也有农民将薇甘菊作为猪的饲料。不过薇甘菊对禽畜的适口性、营养价值等作为牧草方面的特性尚未得到重视。

二、药用价值

在印度、孟加拉国、菲律宾和一些非洲国家，薇甘菊可用作传统医药成分。根据周晓梅等(2001)综合报道，在非洲的扎伊尔(Ziare)，薇甘菊被广泛作为当地治疗发热和疟疾的药物。在印度，薇甘菊的叶片被用作止痒和敷治伤口，其根抽提物具有消炎和抗溃疡作用。薇甘菊根抽提物还是有效的中枢神经系统抑制剂。从薇甘菊中分离出的鸡屎藤内酯能够很好地阻碍血液中的一些激活剂所引起的化学反应，从而有阻碍一些炎症介质的

作用。用薇甘菊根的抽提物对老鼠进行试验,发现能够提高老鼠肝和肝外组织中谷胱甘肽转移酶的活性,降低谷胱甘肽的含量,这种特性被认为有预防癌症的作用。

三、杀虫剂和除莠剂

邵华等(2001)报道薇甘菊花的挥发油含有 42 种化合物,其中 2 种(α -蒎烯和 β -蒎烯)具有防除天牛等昆虫的显著功效。张茂新等(2003)分析了薇甘菊挥发油对萝卜蚜有一定的触杀能力,且随着浓度的增加而加强;对小菜蛾和黄曲条跳甲和猿叶虫有显著的产卵驱避作用;并提出 2-丁胺和 α -长蒎烯以高含量存在于薇甘菊挥发油中值得注意。邵华(2001)还报道用薇甘菊的乙酸乙酯提取物可显著抑制严重为害荔枝果树的荔枝霸疫霉的生长。薇甘菊有很强的化学他感作用。它含有化学他感物质,对植物的生长有抑制作用。有学者(邵华等, 2001, 2003; Hu and Wu, 2003)已报道了薇甘菊不同部位的各种提取物对几种受体植物的种子萌发和生长有明显抑制作用。因此,薇甘菊可以成为生物杀虫剂和除莠剂的重要植物源。

由于薇甘菊许多特性还不为所知,因此,当前除了在薇甘菊蔓延泛滥的地区做好防除控制工作外,更为重要的是加快和深入研究和开发利用薇甘菊的活性物质,使薇甘菊“化害为利”,造福人民。

(胡玉佳)

主要参考文献

- 冯惠玲, 曹洪麟, 梁晓东等. 2002. 薇甘菊在广东的分布与危害. 热带亚热带植物学报, 10(3): 263~270 [Feng H L, Cao H L, Liang X D *et al.* 2002. The distribution and harmful effect of *Mikania micrantha* in Guangdong. *J Trop Subtr Bot*, 10(3): 263~270]
- 胡玉佳, 毕培曦. 1994. 薇甘菊生活史及其对除莠剂的反应研究. 中山大学学报(自然科学版), 33(4): 88~95 [Hu Y J, Paul P H But. 1994. A study on life cycle and response to herbicides of *Mikania micrantha*. *Acta Scien Natu Univ Sunyatseni*, 33(4): 88~95]
- 胡玉佳, 毕培曦. 2000. 薇甘菊花的形态结构特征. 中山大学学报(自然科学版), 39(6): 123~125 [Hu Y J, Paul P H But. 2000. Morphological and structure features of *Mikania micrantha* flower. *Acta Scien Natu Univ Sunyatseni*, 39(6): 123~125]
- 孔国辉, 吴七根, 胡启明等. 2000a. 外来杂草薇甘菊(*Mikania micrantha* H. B. K.) 在我国的出现. 热带亚热带植物学报, 8(1): 21 [Kong G H, Wu Q G, Hu Q M. 2000a. Exotic weed *Mikania micrantha* H. B. K. appeared in China. *J Trop Subtr Bot*, 8(1): 21]
- 孔国辉, 吴七根, 胡启明等. 2000b. 薇甘菊(*Mikania micrantha*)的形态、分类与生态资料补记. 热带亚热带植物学报, 8(2): 128~130 [Kong G H, Wu Q G, Hu Q M *et al.* 2000b. Further supplementary data on *Mikania micrantha* H. B. K. (Asteraceae). *J Trop Subtr Bot*, 8(2): 128~130]
- 邵华, 彭少麟, 刘运笑等. 2002. 薇甘菊的生物防治及其天敌在中国的新发现. 生态科学, 21(1): 33~36 [Shao H, Pen S L, Liu Y X *et al.* 2002. Biological control and the natural enemy of *Mikania micrantha* H. B. K. in China. *Ecol Sci*, 21(1): 33~36]
- 邵华, 彭少麟, 王继栋等. 2001. 薇甘菊的综合开发与利用前景. 生态科学, 20(1, 2): 132~135 [Shao H, Peng S L, Wang J D *et al.* 2001. The potential utilization and exploitation of *Mikania micrantha*. *Ecol Sci*, 20(1, 2): 132~135]
- 邵华, 彭少麟, 张弛等. 2003. 薇甘菊的化感作用研究. 生态学杂志, 22(5): 62~65 [Shao H, Pen S L, Zhang C *et al.* 2003. Allelopathic potential of *Mikania micrantha*. *Chinese Journal of Ecology*, 22(5): 62~65]
- 邵婉婷, 韩诗畴, 黄寿山等. 2002. 控制外来杂草薇甘菊的研究进展. 广东农业科学, 1: 43~45 [Shao W T, Han S C, Huang S S *et al.* 2002. Progress in the control study of exotic weed *Mikania micrantha*. *Agri Sci Gd*, 1: 43~45]
- 石铸. 1985. 中国植物志, 74 卷. 北京: 科学出版社. 69 [Shi Z. 1985. Flora of China, 74. Beijing: Science Press. 69]

- 王伯荪, 廖文波, 缪汝槐. 2001. 薇甘菊学名订正及其近源种的检索. 中山大学学报(自然科学版), 40(5): 72-75 [Wang B S, Liao W B, Miao R H. 2001. Revision of *Mikania* from China and the key of four relative species. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 40(5): 72-75]
- 王伯荪, 廖文波, 曾启杰等. 2003. 薇甘菊(*Mikania micratha*)在中国的传播. 中山大学学报(自然科学版), 42(4): 47-54 [Wang B S, Liao W B, Zan Q J *et al.* 2003. The spreads of *Mikania micratha* in China. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 42(4): 47-54]
- 王勇军, 曾启杰, 王彰九等. 2003. 入侵薇甘菊的化学防除. 生态科学, 22(1): 58-62 [Wang Y J, Zan Q J, Wang Z J *et al.* 2003. The research on chemical prevention on the invaded weed *Mikania micrantha* H. B. K. *Ecol Sci*, 22(1): 58-62]
- 温达志, 叶万辉, 冯惠玲等. 2000. 外来入侵杂草薇甘菊及其伴生种基本光合特性的比较. 热带亚热带植物学报, 8(2): 139-146 [Wen D Z, Ye W H, Feng H L *et al.* 2000. Comparison of basic photosynthetic characteristics between exotic invaded weed *Mikania micrantha* and its companion species. *J Trop Subtr Bot*, 8(2): 139-146]
- 曾启杰, 王勇军, 王伯荪等. 2000. 外来杂草薇甘菊的分布与危害. 生态学杂志, 19(6): 58-61 [Zan Q J, Wang Y J, Wang B S *et al.* 2000. The distribution and harm of the exotic *Mikania micrantha*. *Chinese Journal of Ecology*, 19(6): 58-61]
- 张茂新, 凌冰, 孔垂华等. 2003. 薇甘菊挥发油的化学成分及其对昆虫的生物防治. 应用生态学报, 14(1): 93-96 [Zhang M X, Ling B, Kong C H *et al.* 2003. Chemical componets of volatile oil from *Mikania micrantha* and its biological activity on insects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(1): 93-96]
- 张炜银, 王伯荪, 廖文波等. 2002. 外域恶性杂草薇甘菊研究进展. 应用生态学报, 13(12): 1684-1688 [Zhang W Y, Wang B S, Liao W B *et al.* 2002. Progress in the studies of an exotic vicious weed *Mikania micrantha*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(12): 1684-1688]
- 周晓梅, 黄炳球. 2001. 薇甘菊的发生及防治. 世界农业, 270: 42-43 [Zhou X M, Huang B Q. 2001. The origin and control of *Mikania micrantha*. *World Agriculture*, 270: 42-43]
- Arope A B, Ismial T B, Chong D T. 1985. Sheep rearing under rubber. *Planter*, 61(707): 70-77
- Bebawi F F, Campbell S D, Stanley T D. 2002. Priority lists for weed research in the wet- and dry-tropics of northern Queensland. *Plant Protection Quarterly*, 17(2): 67-73
- Chiang M Y, Hsu L M, Chen F Y. 2002. Continuation on the presence of *Mikania micrantha* Kouth in Taiwan. *Plant Protection Bulletin Taipei*, 44(1): 61-65
- Choudhury A K. 1972. Controversial *Mikania* (climber) - a threat to the forests and agriculture. *India Forester*, 178-183
- Cock M J W. 1982. Potential biological control agents for *Mikania micrantha* H. B. K. from the neotropical region. *Tropical Pest Management*, 28: 242-254
- Cock M J W. 1982. The biology and host specificity of *Liothrips mikaniae* (priesner) (Thysanoptera: phlaeothripidae), a potential biological control agent of *Mikania micrantha* (Compositae). *Bull Ent Res*, 72: 523-533
- Dortas M E M, Aparecida M M M, Ruas P M *et al.* 1998. Cytogenetic analysis in population of *Mikania micrantha* H. B. K. (Asteraceae) I. *Naturalia Rio Claro*, 23: 61-69
- Dutta S K, Sarkar S K, Barbora B C. 1968. Control of *Mikannia* in tea with 2, 4-D and M. C. P. A. *Two and Bul*, 15: 83-89
- Dutta S K. 1961. Chemical control of *Mikania micrantha*. *Two and Bul*, 8(2): 8-9
- Freitas A V L. 1991. Variation, life cycle and systematics of *Tegosa claudina* (Eschscholta) (Lepidoptera, Nymphalidae, Melitaeinae) in Sao Paulo State, Brazil (in Portuguese). *Revista Brasileira de Entomologia*, 35(2): 301-306
- Holm L G, Plucknett D L, Pancho J V. 1977. The world's worst weeds-distribution and biology. Homwaii University press, 609
- Holmes W C. 1982. Revision of the old world *Mikania* (Compositae). *Bot Jahrb Syst* 103(2): 211-246
- Hu Yujia, Wu Jianjun. 2003. Allelopathic effects and responses to two chemical substance stresses of *Mikania micrantha*. In: Proceedings of the International symposium on exotic pests and their control. Guangzhou: Zhongshan (Sun Yat-sen) University Press. 180-186
- Ipor I B, Tawan C S. 1995. The effect of shade on leaf characteristics of *Mikania micrantha* (Compositae) and their influence. *Agriculture Science*, 18(3): 163-168
- Ismail B S, Mah L S. 1993. Effects of *Mikania micrantha* H. B. K. on germination and growth of weed species. *Plant and Soil*, 157(1): 107-113
- Maffer Elian M D, Marin-Morales M A, Ruas P M. 1999. Chromosomal polymorphism in 12 populations of *Mikania micrantha* (Compositae). *Genet Moe. Biol*, 22(3): 433-434
- Melville D S. 1987. W WI-HK Appendix 2
- Nicollier G, Thompson A C. 1981. Essential oil of *Mikania micrantha*. *Phytochemistry*, 20: 2587-2588
- Romero A, Carron G. 1998. First record of *Dietelia portoricensis* (Uredinales) form Mexico. *Revista Mexicana de Micol*, 14(6):

- Ruas C F, Aguiar PMLR. 1997. Chromosome evolution in the genus *Mikania* (Compositae). *Amer J Bot*, 84(8): 1156-1163
- Ruas P M, Ruas C F. 1987. Karyotypes and chromosome morphology in the genus *Mikania* (Compositae). *Cytologia(Tokyo)*, 52(3): 551-558
- Soerjiani M, Kostermans A J G H, Tjitrosoepomo G. 1987. Weeds of rice in Indonesia. Jakarta; Balaipustaka. 732
- Waterhouse D F. 1994. The major arthropod pest and weeds of agriculture in Southeast Asia; distribution, importance and origin. Australian: Canerra ACT. 124-135

第三十六章 大 米 草

第一节 起源与分布	754	评估	755
第二节 识别特征	755	第五节 生物学特性	756
第三节 传入途径与入侵成因	755	第六节 生态学特性	758
第四节 危害现状与生态经济影响的		第七节 预防、根除与控制	759

摘要 大米草 *Spartina anglica* C.E. Hubb. 为多年生直立草本植物，是欧洲米草 *S. maritima* (Curtis) Fernald 和互花米草 *S. alterniflora* Loisel. 自然杂交形成的，20 世纪 60 年代传入我国，在促淤造陆方面发挥了作用，同时也对本地的生物多样性产生了不利的影 响。本章介绍了大米草的起源与分布、识别特征、入侵成因、危害现状、生物学特性和生态学特性。

关键词 大米草 外来入侵物种 起源 生物学特性 生态学特性

Chapter 36 Common Cordgrass *Spartina anglica* C. E. Hubb.

Abstract: *Spartina anglica* C.E. Hubb. is a perennial and erect herb which is a natural hybrid of *S. maritima* (Curtis) Fernald and *S. alterniflora* Loisel.. After its introduction to China in 1960's, *S. anglica* played important role in sediment accretion in the coastline, but it also had harmful impacts on the indigenous biodiversity. In this chapter, its origin, distribution, invasions, ecology and biology were reviewed.

Key words: *Spartina anglica*, alien invasive species, origin, biology, ecology

第一节 起源与分布

大米草 *Spartina anglica* C.E. Hubb., 英文名为 Common Cordgrass, 属被子植物门、单子叶植物纲、禾本科。大米草原产英国南海岸，是欧洲米草 *S. maritima* (Curtis) Fernald 和互花米草 *S. alterniflora* Loisel. 自然杂交形成的。欧洲米草和互花米草的杂交后代起初扩张速度缓慢，大约在 1890 年左右，其扩张速度加快，超出了南安普敦(Southampton) 水域的范围进入邻近海湾，引起了人们的关注，其扩张速度加快可能是由于欧洲米草和互花米草的杂交后代—可育的大米草发生演化导致的(Thompson, 1991)。至 1985 年，大

米草分布于温带沿海地区, 热带地区虽有多处引种, 但都未成功。1963~1964 年间, 南京大学先后从英国、丹麦引进四批大米草苗和种子, 1964 年在江苏射阳新洋农业试验站育种成功, 同年引种于浙江沿海各县(市), 1980 年引种到福建, 之后逐渐被其他沿海省市引种繁殖并取得成功。原国家科委先后召开了两次大米草科研现场会, 并成立了南京大学米草及海滩开发研究所, 希望进一步推动全国大米草的发展。1983 年, 在全国生态规划会议上, 审定了用大米草改造 1333hm² 沼泽地及江苏省滨海县废河口保滩护堤等工程, 主要进行大米草在保滩护堤方面的效果研究。1992 年大米草被引入贵州, 主要用于对生活污水处理方面的研究。经过近 40 年的种植和自然繁殖, 我国大米草的面积不断扩大, 据统计, 1963 年全国仅 700hm², 1979 年为 2106hm², 1983 年为 3.3 万 hm², 至今大米草已达数十万公顷, 其中江苏省沿海各地约占一半(张敏等, 2003)。

第二节 识别特征

大米草为多年生直立草本植物, 具根状茎。秆高 30~150cm, 叶舌为一圈密生的纤毛; 叶片狭披针形, 宽 7~15mm, 上面有密致的纵肋。总状花序直立或斜上举, (2~)3~6(~18) 枚, 呈总状排列, 长 7~10(~23)cm; 穗轴顶端延伸成刺芒状, 小穗狭披针形, 直立, 长 (14)18(26)mm, 含 1 小花, 脱节颖下; 颖及外稃均短柔毛, 第一颖短于外稃, 具 1 脉, 第二颖长于外稃, 具 1~6 脉, 外稃具 1~3 脉(见彩插 36-1)。该种与格兰马草属 *Bouteloua* 的区别为, 大米草的小穗无退化的不孕小花(中国科学院植物研究所, 1976)。

第三节 传入途径与入侵成因

由于大米草具有保滩护岸、促淤造陆的作用, 使其在全球各地被大规模引种, 致使大米草在全球范围迅速蔓延。大米草于 1963 年由南京大学仲崇信教授率先从英国引种, 在江苏省海涂试种并获得成功, 此后广泛引种到全国许多地区并先后建立了种群(张敏等, 2003)。

大米草在新地区建立种群可以分为两个阶段: ①在滩涂的低洼裸露地区, 通过幼苗和植株产生丛生的先锋种群, 并通过快速的辐射状扩张覆盖原先裸露的地表, 这些大米草植株中可能包含了其他物种; 在滩涂较高的地区, 单独丛生的大米草种群呈镶嵌状出现, 成为成熟盐沼的物种特征; ②大米草成功占据了空余的生态位, 建立了草原状优势种群, 并占领了潮间滩涂的大片地区(见彩插 36-2)(Thompson, 1991)。

第四节 危害现状与生态经济影响的评估

大米草的主要经济和生态效益表现在:

(1) 促淤造陆 促淤是指大米草、互花米草的庞大根系, 能固定滨海松软流动的受潮水间断浸渍的淤泥质土壤, 当其发育形成密集的植物群落后, 便具有消浪、缓流、拦截潮水带来的泥沙, 促进滩面淤积和增高, 进而为滨海光滩裸地植树种草或农田垦殖创造新的环境, 发挥促淤造陆的功能。

在英国布里斯托海峡有大米草种群的滩涂，每年淤积厚度为 8~10cm，在普尔(Poole)港，在大米草建立种群后 60 年里的淤积厚度为 70cm，而在没有大米草，仅有其他植被的欧洲西北海岸，淤积速度仅为每年 0.2~2.0cm。我国利用大米草从海洋得到的第一块陆地——浙江省温岭市东片农场，自 1964 年试种大米草成功后，1967~1968 年海涂种植面积 286hm²，1973 年围涂面积达 400 hm²，到 1985 年围涂面积已近 670 hm²。另据《慈溪水利志》记载，1965 年在浙江省慈溪市新浦镇海涂种植大米草 25 hm²，到 1979 年长成一片绿色草带，面积扩至 88.4hm²。1959~1965 年新浦海涂平均每年冲刷 0.13m，种植大米草后至 1979 年海涂每年淤积 0.19m，可见大米草促淤造陆效果明显。有大米草种植的海滩地带，其泥沙的淤积速度比相同海拔光滩上泥沙的淤积速度快 2~3 倍，滩面比未种大米草的光滩每年多淤高 10~20cm。

(2) 保滩护岸 大米草能促进海涂淤积，抬高滩面，同时以其庞大密集根系固结土粒以减小波浪的冲击，并且有抗冰凌的能力；粗壮的茎秆和浓密的叶冠层，能减小风力的侵蚀，具有防风、消浪功能。

(3) 防治污染 大米草是耐污、耐肥的植物，如在河北省南皮县，用污水灌溉的大米草仍能正常生长。大米草能大量吸收水中氮、磷元素，并在植冠的荫底下抑制蓝藻等藻类过剩繁殖，从而防止水体富营养化的发生。大米草不仅能耐高盐浓度海水的浸渍，还能忍受强碱海水的伤害。

(4) 经济价值 大米草可用做绿肥、饲料、饵料、燃料和造纸原料等(唐廷贵和张万钧，2003)。

大米草的危害表现在：①大面积、高密度的大米草与沿海滩涂本地植物竞争生长空间，致使原在海滩生长的大片红树林日趋退缩，有的已所剩无几甚至消失，威胁本地生物多样性；②侵占航道，淤塞港口，影响各类船只出入港，给海上渔业、运输业甚至国防带来不便；③破坏近海生物栖息环境，降低浮游和底栖生物量，使沿海贝类、蟹类、藻类、鱼类等各种生物窒息死亡，而双齿围沙蚕、褐革星虫等数量明显增加，滩涂生态系统生物多样性指数大大下降；④影响海水交换能力，易诱发赤潮，水质环境恶化；⑤争夺营养，使海带、紫菜等产量逐年下降(阮少江，2002；张敏等，2003)。大米草已于 2000 年被世界自然保护联盟(IUCN)列为世界 100 种恶性外来入侵物种之一。

大米草为害特点表现为：①抗逆性强、适应性广。由于大米草叶片上布满发达盐腺和气孔，其耐盐耐淹，在潮间带几乎均可生长，可在沿海滩涂大面积发生。②分蘖力和繁殖力强。大米草具有发达的地下茎，一般单株大米草一年内可发展到几十株，最高达上百株；种子量大，一株大米草可结种子几十甚至上百粒，成熟后的种子能随风浪海潮四处漂流，作远距离传播蔓延。③种群密度高、群落生物量大。种群密度为 150~2640 株/m²，群落生物量高达 4111g(dw)/m²(刘建等，2000)。

第五节 生物学特性

大米草营无性分蘖生殖及种子繁殖。每年 11 月份，叶片从外向内逐叶枯死，到次年 1 月上旬，每株仍有 1~2 片是青的，1 月底叶片基本上全部枯死；地下茎的腋芽在 10 月中旬形成，11 月初露出滩面，高 4cm，叶片 3~4 片，紫褐色，4 月初返青，4 月底前(13℃

左右)大部分返青。8、9月为生长旺盛期,此后地上茎秆生长开始缓慢,叶片逐渐枯死,但地下茎则继续生长并向外扩展,形成新芽,并穿出土面,如此年复一年反复变化。栽种后,第二年就开始抽穗开花。花期5~11月,7~8月为盛期。开花占全穗花朵数65%~90%,结实率只占花数24.6%。

大米草是C₄植物,叶片为花环型结构(Kranz type)。大米草光能利用率高,CO₂补偿点和光补偿点低,饱和点高,具有较低的光呼吸速率,净光合速率高,蒸腾系数低,能够充分利用光能、CO₂和水生产有机物。

大米草具支持根和呼吸根等根系,能在缺氧的土壤中呼吸和在松软的底质上固着生长。此外,大米草有拒盐和泌盐的代谢机制,使其具有高度耐盐、耐涝和适应周期性潮水淹没的生物学特性,即使其基部被泥沙淹没,基节上仍可生出新的不定根,因此大米草的根系发达,能吸收充足的养分,保证地上部分旺盛生长(高尚士,1994)。

大米草的出现是典型的通过异源多倍体演化新物种的过程,它的形成不需要种群的地理隔绝,分为两个步骤:①两个双倍体物种杂交产生双倍体染色体后代,由于父本和母本染色体不同,减数分裂期间未出现染色体配对,因此配子体不育;②染色体加倍,加倍的染色体在减数分裂期间能形成二价的染色体,因而产生可育的配子。当美洲的互花米草被无意引进到英格兰南安普顿水域时,以本地种欧洲米草为父本(2n=62)和互花米草为母本(2n=60)天然杂交形成了不育后代(2n=62),该种首次记录在1872年。后来,该不育种通过染色体加倍形成了可育形式(2n=120~124)。大约在70多年里,人们未能将不育种和可育种分清,笼统的称为*Spartina × townsendii* H. J. Groves,直到1968年,才由Hubbard将可育种大米草命名为*S. anglica* C.E. Hubbard(Thompson, 1991)。

大米草对海水浸泡具有很强的耐性(Thompson, 1991)。大米草种群在滩涂快速扩张能力源自其能在低洼的海湾建立种群,而其他植物不能,处于生长活跃期的大米草可以在水中淹没达6h,处于其他时期时可达9h,如泥沙含量较低,忍耐持续淹没的时间更长。为了克服长时间淹没在极高浓度Na⁺和Cl⁻海水中导致的细胞质渗透势严重不平衡,大米草具备了以下生理特征:①通过叶片上下表面的双细胞盐腺分泌多余的有害离子。大米草具有典型的双细胞盐腺,盐腺由1个较大的基细胞和1个小的圆顶状的帽细胞组成。腺体表面有1层角质层,但是基细胞肩部和底部与表皮细胞和叶肉细胞之间没有角质层隔开,角质层向外延伸越过帽细胞,在角质层和帽细胞之间形成一个腔,其顶部有一些小孔。基细胞与附近的叶肉细胞和帽细胞邻接的壁上有明显的胞间连丝。基细胞和帽细胞均具有浓稠的细胞质、细胞核、多数线粒体、一些小的液泡、游离核糖体、内质网、高尔基体和质体。基细胞具有遍布整个细胞的壁突起和折叠的隔膜系统将细胞质分离。帽细胞、基细胞及围绕它的4个表皮细胞共同组成盐腺复合体(刘志华,2003)。②阻止过量有害的离子进入根部。Spickett等(1993)采用核磁共振波谱法研究了玉米(*Zea mays* L. cv. LG11)和大米草根尖浸泡在0到500mmol/L NaCl溶液的反应,当NaCl溶液深度大于200mmol/L时,玉米细胞质pH值升高了0.1~0.2单位,液泡pH值变化较大,升高了0.6单位,相比之下,大米草根尖积累Na⁺的速度比玉米慢,细胞质pH值没有变化,液泡pH值变化相对较小,升高了0.3单位,这种现象被解释为大米草的耐盐作用部分来自其阻止NaCl净流入量的能力。③大米草聚集脯氨酸和甘氨酸甜菜碱,这些物质有助于调节离子平衡以及细胞质和细胞之间的渗透压平衡。④根具

有发达的通气组织,有利于在厌氧条件生活和氧气的扩散,氧气可以氧化有害的盐分。
⑤用水效率高,这在盐分浓度高的环境下很有优势。

此外,也有学者提出了其他的因素影响大米草的耐性。Lee(2003)检测了大米草根茎的代谢气体(O_2 、 H_2S 、 CO_2 和 NH_3)流量后发现,大米草加强了根茎和外界环境之间运输 O_2 和 H_2S 的生理机制,包括根茎向外界环境的方向和外界环境向根茎的方向;但在本地物种互花米草中未发现此现象,这个结果表明对缺氧和 H_2S 的耐性可能有助于大米草在水淹环境下广泛定殖,大米草加强淤泥的氧化作用可能用于被污染淤泥的植物修复,因为微生物降解有机污染物经常受到氧气可得性的限制。

在大米草的分子生物学方面,陈国祥等(1996)以盐生的大米草为实验材料,BBY法制备光系统II(PSII)颗粒,氧电极法测定其放氧活性,并通过SDS-PAGE及盐洗等手段对其多肽组分及特性进行了探索。结果显示:①大米草尽管生长在盐生的环境中,但其PSII放氧活性和菠菜接近,比分类地位较接近的小麦要高出1倍。②外加 $CaCl_2$ 后,大米草PSII放氧活性增加到 $114.20\mu mol O_2/(mgChl \cdot h)$,表明 Ca^{2+} 的数量和分布与放氧过程密切相关。③多肽组分分析表明,大米草PSII由13条多肽组成,比中生类型的植物增加了分子质量为67kDa和50kDa的两条多肽。④盐洗后,放氧活性降低,回加 $CaCl_2$,放氧活性得到一定程度的恢复。多肽组分分析显示盐洗后,分子质量为24kDa,18kDa及其他4条小分子多肽有不同程度丧失。这表明盐生大米草与放氧有联系的多肽和菠菜、小麦存在差异。张平宇等(1998)以大米草为材料,经盐胁迫后,发现在SDS-PAGE谱带上,出现了分子质量为27kDa的特异性谱带,同时分子质量为75kDa的蛋白质表达明显增强。在此基础上,构建了盐胁迫下大米草的cDNA文库,库容量为 3.25×10^6 ,可供进一步筛选与耐盐性有关的cDNA克隆。Abdul-Kareem等(2003)通过改进的DDRT-PCR技术,从大米草中分离和鉴定了盐诱导cDNA序列KD1。KD1核苷酸序列显示,5'端是一个含有444个核苷酸的开放阅读框架(ORF),3'端是富含AT的非转录区。其编码的氨基酸序列与类调渗蛋白和致病相关蛋白相比,分别有63%、34%同源。结果表明,KD1是从大米草中分离出的一个盐诱导新基因。

第六节 生态学特性

大米草独特的生态习性是其具有强大的促淤造陆能力,并在许多地区取得成功,其主要原因是:①大米草地下部分很强的伸展性可以减少侧面的侵蚀作用;②淤积的泥沙可以给大米草提供丰富的大量元素,促进植株生长和建立种群;③大米草具有很强的繁殖能力,在达维(Dovey)海湾的有机质滩涂中,其辐射状扩张速度可以达每年30cm,两年内盖度从3.5%增加到90%;④大米草具有发达的地下茎,当冬天地地上部分停止生长,地下茎可以继续生长,春天到来后,萌发大量幼苗,地下茎的扩张和萌发大大增强了大米草的在新的地点建立种群的能力;⑤土壤脱盐作用,大米草是一种强泌盐植物,生长在潮间带滩涂中,每天应有潮水浸渍7~8h,其根系大量吸收盐分,经过泌盐细胞分泌体外;⑥提高土壤肥力,大米草残落物是滩涂土壤有机质的主要来源(Thompson, 1991)。

Baumel等(2001)用RAPD、ISSR等不同的分子标记技术分析了法国大米草种群的遗传模式,结果显示法国的大米草种群基本由一种“主要的”多点基因型组成,这种基因

型与来自英格兰的 *Spartina townsendii* 杂交一代相同。在来自不列塔尼(Brittany)的一些种群中一些标记物丢失。在不列塔尼南部,大米草和欧洲米草共同出现的地区未发现大米草和欧洲米草的杂交后代。所有的法国大米草种群与其母本互花米草具有相同的叶绿体 DNA 序列。这些发现与由于物种的单一起源在物种形成时具有严重的遗传瓶颈(genetic bottleneck)的观点一致,所有亲代核序列都出现在异源多倍体种群中表明,对于所采用的标记物,这种“年轻的”物种没有发生广泛的变化。

但值得关注的是,营养繁殖虽然是大米草能在其他物种不能建立种群的地区取得成功的主要手段,但是这种繁殖方式对长期保持种群可能也有致命的弱点。如果遗传变异低,可能易遭到病虫害的侵袭。目前,已发现球壳目(Sphaeriales)真菌(*Claviceps purpurea* (Fr.) Tulasne)可以侵染大米草种子的胚导致种子不能萌发。此外,在英格兰南部海岸,经常可以观察到大米草枯梢现象和地下茎软腐导致的大片大米草生命力减弱和死亡。

大米草的亲本之一——引进的互花米草自然扩张范围从来没有超过引入地南安普顿水域,仅保留了单个的种群,而另一个亲本一本地的欧洲米草在 20 世纪的分布范围也大为缩减,显然,异源多倍体大米草和它的两个亲本相比有着更强的生命力和选择优势。首先,异源多倍体具有来自不同亲代的遗传多样性,丰富的遗传多样性是子代具有亲代不具备的生理功能的基础,有利于子代定殖;其次,大米草能将杂交优势结合起来,具备了新的、有利的基因,特别是增强了适应能力。连续入侵的大米草成熟种群和米草先锋种群相比,成熟种群有更高的秆和产生种子的能力,进一步的研究表明,在先锋种群之间形态更为相似。在相同环境条件下种植大米草先锋种群和成熟种群,两年后,成熟种群没有显示出原先具有的高秆优势,通过电泳观察它们的酶系统,没有发现变化。这些结果说明,大米草的等位基因变异水平是低的,影响大米草扩张能力的主要因素是米草植株个体对环境变化的响应能力。

第七节 预防、根除与控制

由于大米草的危害越来越突出,国外早就开展了大米草的防除研究,1997 年在华盛顿召开了第二届国际大米草研讨会,会议的中心议题就是讨论如何控制这一全球性恶性杂草。目前,根治大米草还存在技术上的问题,化学除草剂防治大米草的效果并不理想,生物防治技术尚在探索之中。总体而言,国外绝大部分研究都倾向于用对水生生物低毒的化学除草剂防治大米草,但至今尚未研究出一种安全有效的大米草除草剂(刘建等,2000)。

刘建等(2000)研制出的 BC-08 药剂,能够在 21d 内杀死大米草的地上部分,到 60d 内时,大米草的地下部分也全部腐烂。经检测 BC-08 低毒(LD₅₀>5000 单位)、且对环境无污染。Frid 等(1999)调查了物理干扰防治英国诺森伯兰郡的琳第斯法纳国家自然保护区(Lindisfarne National Nature Reserve)滩涂大米草的有效性,通过轻型履带车碾压滩涂淤泥直至将大米草掩埋入淤泥中,尽管滩涂植物区系发生了剧烈的变化,没有发现底栖动物受这种干扰的影响,表明通过轻型履带车碾压进行物理干扰可能是一种成本合理、环境风险低的防治方法。

(丁 晖 徐海根)

主要参考文献

- 陈国祥, 刘冬, 魏锦城. 1996. 盐生植物大米草 PS 颗粒的放氧活性及多肽组分. 南京师大学报(自然科学版), (19)4: 36~39
[Chen G X, Liu D, Wei J C. 1996. Study on the photosynthetic O₂- evolution activity and polypeptide composition of PS particles from halophyte *Spartina anglica*. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, (19)4: 36~39]
- 高尚士. 1994. 大花金鸡菊和小米草. 国土与自然资源研究, (2): 58~59 [Gao S S. 1994. *Corenpsis lanceolata* L. and *Spartina anglica* C E Hubb. *National Land and Natural Resources Research*, (2): 58~59]
- 刘建, 余振希, 吴国强等. 2000. 大米草的防除初探. 海洋通报, 19(5): 68~72 [Liu J, Yu Z X, Wang G Q et al. 2000. Primary study of weed-control on *Spartina anglica* C. E. Hubb. *Marine Science Bulletin*, 19(5): 68~72]
- 阮少江. 2002. 闽东外来生物入侵的初步研究. 宁德师专学报(自然科学版), 14(3): 196~198 [Ruan S J. 2002. Initial study if exotic biological invasion into east Fujian. *Journal of Ningde Teachers College (Natural Science)*, 14(3): 196~198]
- 唐廷贵, 张万钧. 2003. 论中国海岸带大米草生态工程效益与“生态入侵”. 中国工程科学, 5(3): 15~20 [Tang T G, Zhang W J. 2003. A discussion of ecological engineering benefits of *Spartina* spp. and its ecological invasion. *Engineering Science*, 5(3): 15~20]
- 张敏, 厉仁安, 陆宏. 2003. 大米草对我国海涂生态环境的影响. 浙江林业科技, 23(3): 16~19 [Zhang M, Li R A, Lu H. 2003. Effect of *Spartina anglica* on ecological environment in costal belt land in China. *J Zhejiang For Sci and Tech*, 23(3): 16~19]
- 张平宇, 王颖, 卢青等. 1998. 大米草盐胁迫蛋白的表达及 cDNA 文库的构建. 草业学报, 7(4): 67~73 [Zhang P Y, Wang Y, Lu Q et al. 1998. Construction of cDNA library from common cordgrass under salt stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 7(4): 67~73]
- 中国科学院植物研究所. 1976. 中国高等植物图鉴, 第五册. 北京: 科学出版社 [Institute of Botany, Chinese Academy of Science. 1976. *China higher plants figure*. Beijing: Science Press]
- Abdul-Kareem A R Al-K, Sheng C Z, Shi M et al. 2003. Isolation and characterization of a salt-induced transcript from halophyte *Spartina anglica* using DDRT-PCR. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 36(2): 8~14
- Baumel A, Ainouche M L, Levasseur J E. 2001. Molecular investigation in population of *Spartina anglica* C. E. Hubb. (Poaceae) invading coastal brittany (France). *Molecular Ecology*, 10: 1689~1701
- Frid C L J, Chandrasekara W U, Davey P. 1999. The Restoration of mud flats invaded by common cord-grass (*Spartina Anglica* C. E. Hubb.) using mechanical disturbance and its effects on the macrobenthic fauna. *Aquatic Conser vation*, 9: 47~61
- Lee R W. 2003. Physiological Adaptations of the invasive cordgrass *Spartina anglica* to reducing sediments: rhizome metabolic gas fluxes and enhanced O₂ and H₂S transport. *Marine Biology*, 143: 9~15
- Spickett C M, Smirnov N, Ratcliffe R C. 1993. An *in vivo* nuclear magnetic resonance investigation of ion transport in maize (*Zea mays*) and *Spartina anglica* roots during exposure to high salt concentrations. *Plant Physiol*, 102: 629~638
- Thompson J D. 1991. The biology of an invasive plant: what make *Spartina anglica* so successful? *Bioscience*, 41(6): 393~401

第三部分

农林外来入侵物种名录

第三十七章 农林外来入侵物种名录及其信息分析

一、中国主要农林外来入侵植物

(一) 中国主要农林外来入侵植物的种类构成

根据对大量文献资料的整理分析,目前我国主要农林外来入侵植物共有 188 种,隶属 38 科,其中水生植物 4 科 5 种(喜旱莲子草、互花米草、大米草、凤眼莲、水盾草),陆生植物 36 科 184 种(含水陆两栖植物 1 种,即喜旱莲子草)。其中,种数最多的科是菊科 50 种和禾本科 35 种,其他种数较多的科有:豆科 16 种、苋科 12 种、茄科 9 种、玄参科 6 种,十字花科 6 种,石竹科 5 种,旋花科 4 种,仙人掌科、葫芦科、大戟科、唇形科、锦葵科、伞形科各 3 种,藜科、柳叶菜科、车前科、马鞭草科各 2 种,其余 19 科均为 1 种。

表 37-1 中国主要农林外来入侵植物各类群的分布

科名	种类数	科名	种类数	科名	种类数
苋科 Amaranthaceae	12	大戟科 Euphorbiaceae	3	毛茛科 Ranunculaceae	1
落葵科 Basellaceae	1	牻牛儿苗科 Geraniaceae	1	木犀草科 Resedaceae	1
紫葳科 Bignoniaceae	1	唇形科 Labiatae	3	茜草科 Rubiaceae	1
紫草科 Boraginaceae	1	豆科 Leguminosae	16	玄参科 Scrophulariaceae	6
莼菜科 Cabombaceae	1	锦葵科 Malvaceae	3	茄科 Solanaceae	9
仙人掌科 Cactaceae	3	紫茉莉科 Nyctaginaceae	1	梧桐科 Sterculiaceae	1
大麻科 Cannabinaceae	1	柳叶菜科 Onagraceae	2	伞形科 Umbelliferae	3
石竹科 Caryophyllaceae	5	酢浆草科 Oxalidaceae	1	荨麻科 Urticaceae	1
藜科 Chenopodiaceae	2	西番莲科 Passifloraceae	1	马鞭草科 Verbenaceae	2
菊科 Compositae	50	商陆科 Phytolaccaceae	1	葡萄科 Vitaceae	1
旋花科 Convolvulaceae	4	胡椒科 Piperaceae	1	禾本科 Gramineae	35
十字花科 Cruciferae	6	车前科 Plantaginaceae	2	雨久花科 Pontederiaceae	1
葫芦科 Cucurbitaceae	3	马齿苋科 Portulacaceae	1		
					总计: 38 科 188 种

(二) 中国主要农林外来入侵植物的原产地分析

在 188 种主要农林外来入侵植物中,原产地是美洲的有 111 种,占原产地总频次(总频次为 210)的 52.9%;原产欧洲的有 46 种,占原产地总频次的 21.9%;原产亚洲的有 29 种,占总频次的 13.8%;原产非洲的有 17 种,占总频次的 8.1%;原产大洋洲的有 1 种,

占总频次的 0.5%；原产泛热带地区的有 3 种，占总频次的 1.4%；原产地不详的有 3 种，占总频次的 1.4%。

由此可见，我国外来入侵植物中，美洲起源的所占比例最大，占一半以上，表明美洲起源的植物较能适应中国的生境，美洲来源的植物成为中国外来入侵植物的可能性最大。因此，在以后的植物引种中，要特别注意来自美洲新大陆的植物，对其在我国的适生性范围进行分析和预测，一旦发现年际间能够自然延续种群的植物种类应谨慎引种和利用。

表 37-2 中国外来入侵植物原产地的分布

	单一地区	多地区							频次	百分比(%)
		1	2	3	4	5	6	7		
美洲	106	1	2	1	1				111	52.9
欧洲	32				1	9	3	1	46	21.9
亚洲	15	1			1	9	3		29	13.8
非洲	11		2				3	1	17	8.1
大洋洲				1					1	0.5
泛热带地区	3								3	1.4
不详	3								3	1.4
总计									210	100.0

(三) 中国主要农林外来入侵植物的生境类型分析

我国主要农林外来入侵植物的生境类型主要是农田生态系统，184 种主要外来入侵陆生植物中的 139 种可危害农田生态系统，占 75.5%以上。表明农田生态系统实际上是一个人工生态系统，由于受人为干扰大，容易受到外来物种的入侵。但其他生态系统，如森林、湿地、草原、岛屿、水域、自然保护区、城市生态系统等也同样遭受着外来入侵物种的危害，也应引起高度的重视。

陆生植物中 45 种非农田杂草包括：猫爪藤、梨果仙人掌、单刺仙人掌、缩刺仙人掌、苏门白酒草、大花金鸡菊、线叶金鸡菊、秋英、硫黄菊、春飞蓬、野茼蒿、菊芋、堆心菊、滨菊、伞房匹菊、万寿菊、肿柄菊、孔雀草、羽芒菊、三裂虻蜞菊、多花百日菊、五爪金龙、红瓜、齿裂大戟、蓖麻、金合欢、银合欢、刺槐、泡果苘、赛葵、紫茉莉、草胡椒、田野毛茛、黄木犀草、喀西茄、牛茄子、假烟叶树、印度蛇婆子、大黍、毛花雀稗、裂颖雀稗、象草、牧地狼尾草、棕叶狗尾草、香根草。

(四) 中国主要农林外来入侵植物的危害性质分析

在我国主要的农林外来入侵植物中，(区域性)恶性杂草 23 种，占外来入侵植物的 12.2%，包括：空心莲子草、猫爪藤、藿香蓟、豚草、三裂叶豚草、香丝草、小蓬草、苏门白酒草、紫茎泽兰、假臭草、飞机草、牛膝菊、薇甘菊、银胶菊、裸柱菊、三裂虻

蜈蚣、金合欢、少花蒺藜草、稗、铺地黍、假高粱、大米草、凤眼莲。有毒杂草 12 种(其中 2 种亦是恶性杂草), 占外来入侵植物的 6.4%, 包括: 麦仙翁、紫茎泽兰、金合欢、银合欢、曼陀罗、喀西茄、牛茄子、假烟叶树、马缨丹、毒麦、田毒麦、长芒毒麦。其他一般性杂草 155 种, 占外来入侵植物的 82.4%。

二、中国主要农林外来入侵节肢动物

(一) 中国主要农林外来入侵节肢动物的种类构成

大量文献资料的整理分析表明, 目前我国主要的农林外来入侵节肢动物有 49 种, 隶属 9 目 29 科。其中, 种类数最多的是鞘翅目 18 种, 占外来入侵节肢动物的 36.7%。其他种类较多的目有: 双翅目、同翅目各 8 种, 鳞翅目 7 种, 膜翅目 3 种, 蜚蠊目 2 种, 蜱螨目、等翅目、缨翅目各 1 种。种数较多的科有: 豆象科、象甲科各 5 种, 麦蛾科、潜蝇科、实蝇科各 3 种, 蜚蠊科、粉虱科、铁甲科、小卷叶蛾科、瘿蚊科、蚁科各 2 种, 其余科各 1 种。

表 37-3 中国主要农林外来入侵节肢动物各类群的分布

目	种类数	科名	种类数	科名	种类数
蜱螨目 Acarina	1	叶螨科 Tetranychidae	1	象甲科 Curculionidae	5
蜚蠊目 Blattoptera	2	蜚蠊科 Blattidae	2	皮蠹科 Dermestidae	1
等翅目 Isoptera	1	木白蚁科 Kalotermitidae	1	铁甲科 Hispidae	2
同翅目 Homoptera	8	蚧科 Coccidae	1	丽金龟科 Rutelidae	1
缨翅目 Thysanoptera	1	盾蚧科 Diaspididae	1	小蠹科 Scolytidae	1
鞘翅目 Coleoptera	18	珠蚧科 Margarodidae	1	灯蛾科 Arctiidae	1
鳞翅目 Lepidoptera	7	粉蚧科 Pseudococcidae	1	麦蛾科 Gelechiidae	3
双翅目 Diptera	8	瘿绵蚜科 Pemphigidae	1	辉蛾科 Hieroxestidae	1
膜翅目 Hymenoptera	3	根瘤蚜科 Phylloxeridae	1	小卷叶蛾科 Olethreutidae	2
		粉虱科 Pseudococcidae	2	潜蝇科 Agromyzidae	3
		蓟马科 Thripidae	1	瘿蚊科 Cecidomyiidae	2
		长角象科 Anthribidae	1	实蝇科 Tephritidae	3
		长蠹科 Bostrichus	1	广肩小蜂科 Eurytomidae	1
		豆象科 Bruchidae	5	蚁科 Formicidae	2
		叶甲科 Chrysomelidae	1		
				总计: 9 目 29 科 49 种	

(二) 中国主要农林外来入侵节肢动物的原产地分析

有些种类的外来入侵节肢动物为多地区起源。在调查到的 49 种主要农林外来入侵节肢动物中, 原产地是美洲的有 17 种, 占原产地总频次(总频次为 54)的 31.5%; 原产欧洲

的有 7 种, 占原产地总频次的 13.0%; 原产亚洲的有 15 种, 占总频次的 27.8%; 原产非洲的有 8 种, 占总频次的 14.8%; 原产大洋洲的有 1 种, 占总频次的 1.9%; 原产地不详的有 6 种, 占总频次的 11.1%。

由此可见, 我国外来入侵节肢动物中, 美洲起源(主要是北美洲)和亚洲起源的所占比例最大, 分别占 31.5% 和 27.8%, 表明美洲和亚洲起源的节肢动物较能适应中国的生境, 成为中国外来入侵节肢动物的可能性最大。因此, 在以后的植物检疫中, 要特别注意来自美洲和亚洲的植物(观赏植物、种苗、苗木、接穗、原木、果实等)、土壤、货物、包装物、交通工具等, 以免其携带外来节肢动物, 入侵我国生态系统。

表 37-4 中国外来入侵节肢动物原产地的分布

	单一地区	多地区					频次	百分比/%
		1	2	3	4	5		
美洲	17						17	31.5
欧洲	6	1					7	13.0
亚洲	11		1	1	1	1	15	27.8
非洲	4	1		1	1	1	8	14.8
大洋洲			1				1	1.9
不详	6						6	11.1
总计							54	100.0

(三) 中国主要农林外来入侵节肢动物的分布区域分析

对这些外来入侵节肢动物在国内分布的统计分析表明, 在我国 3 个以上农业区划区域(指东北、华北、华中、华东、华南、西北、西南等)分布的外来入侵节肢动物有 13 种, 分别是: 二斑叶螨、德国小蠊、美洲大蠊、烟粉虱、温室白粉虱、咖啡豆象、豌豆象、蚕豆象、马铃薯块茎蛾、棉红铃虫、蔗扁蛾、南美斑潜蝇、美洲斑潜蝇。在两个以上地区分布的有 7 种, 即日本松干蚧、苹果绵蚜、稻水象甲、美国白蛾、桃条麦蛾、高粱瘿蚊、蜜柑大实蝇。两者总计 20 种, 占外来入侵节肢动物总数的 10.6%。这 20 种节肢动物也是臭名昭著的外来入侵物种, 对农林业生产和人类健康极具威胁, 其为害报道较多, 且往往缺乏有效的治理措施。由此可见, 外来节肢动物一旦入侵我国, 其扩散蔓延的区域可能比较广泛, 造成的经济和生态影响也可能十分巨大。因此, 应加强外来节肢动物的检验和检疫, 预防与预警, 控制和管理, 以维护我国的生态和经济安全。

三、中国主要农林外来入侵植物病原微生物

(一) 中国主要农林外来入侵植物病原微生物的种类构成

大量文献资料的整理分析表明, 目前我国主要的农林外来入侵植物病原微生物有 42 种, 其中真菌 24 种, 占 57.1%, 细菌 4 种(9.5%), 病毒 6 种(14.3%), 线虫 8 种(19.0%)。

(二) 中国主要农林外来入侵植物病原微生物的原产地分析

在 24 种主要农林外来入侵植物病原真菌中, 原产地是美洲的有 10 种, 占原产地总频次(总频次为 24)的 41.7%; 原产欧洲的有 4 种, 占原产地总频次的 16.7%; 原产亚洲和大洋洲的各有 2 种, 分别占总频次的 8.3%; 原产非洲的有 1 种, 占总频次的 4.2%; 原产地不详的有 5 种, 占总频次的 20.8%。

在 4 种主要农林外来入侵植物病原细菌中, 原产地是美洲的有 3 种, 占原产地总频次的 75%; 原产亚洲的有 1 种, 占原产地总频次的 25.0%。

在 6 种主要农林外来入侵植物病毒中, 原产地是美洲的有 2 种, 占原产地总频次的 33.3%; 原产欧洲和亚洲的各有 1 种, 分别占原产地总频次的 16.7%; 原产地不详的有 2 种, 占总频次的 33.3%。

在 8 种主要农林外来入侵植物病原线虫中, 原产地是美洲的有 4 种, 占原产地总频次的 50.0%; 原产亚洲的有 1 种, 分别占总频次的 12.5%; 原产地不详的有 3 种, 占总频次的 37.5%。

在 42 种主要农林外来入侵植物病原微生物中, 原产地是美洲的有 19 种, 占原产地总频次(总频次为 42)的 45.2%; 原产欧洲和亚洲的各有 5 种, 分别占原产地总频次的 11.9%; 原产大洋洲的有 2 种, 分别占总频次的 4.8%; 原产非洲的有 1 种, 占总频次的 2.4%; 原产地不详的有 10 种, 占总频次的 23.8%。

表 37-5 中国外来入侵植物病原微生物原产地的分布

	美洲	欧洲	亚洲	大洋洲	非洲	不详	总计
真菌	10	4	2	2	1	5	24
细菌	3	0	1	0	0	0	4
病毒	2	1	1	0	0	2	6
线虫	4	0	1	0	0	3	8
总计	19	5	5	2	1	10	42

(三) 中国主要农林外来入侵植物病原微生物的生境类型分析

与外来入侵植物的生境类型分布相似, 我国主要农林外来入侵病原微生物的生境类型主要是农田生态系统, 42 种入侵病原微生物中的 31 种可危害农田生态系统, 占 73.8%; 12 种可危害林业生态系统(其中 1 种也可危害农田生态系统)。也表明, 较之林业生态系统, 农田生态系统由于受人干扰大, 更易受到外来物种的入侵。

表 37-6 中国外来入侵植物病原微生物的生境类型

生境类型	真菌	细菌	病毒	线虫	总计
农田生态系统	17	3	4	7	31
林业生态系统	7	1	3	1	12
总计	24	4	6	8	42

四、结论

我国外来有害生物入侵的形势十分严峻。一方面，农业外来入侵生物扩散蔓延，暴发成灾。另一方面，新的农业危险生物接连传入，疫情不断突发。外来有害生物的入侵已严重威胁我国的农业生产安全、经济安全和生态安全。我国急需建立国家外来入侵生物信息库，包括种类、起源与分布、生物学与生态学特性、风险分析与管理、有效的控制技术等；建立识别入侵生物的起源地与入侵途径的方法。我们针对农林外来入侵物种的种类调查和信息分析，不仅可为我国外来入侵生物信息库的构建提供基础，还可为制定外来入侵物种的控制技术与对策提供依据。

(郭建英 万方浩 谢丙炎 陈万权)

附录 1 中国主要农林外来入侵杂草名录

Appendix 1 List of Invasive Alien Weeds in Agriculture and Forestry

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	苋科 Amaranthaceae						
1.	空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.) Griseb.	水花生, 喜旱莲子草, 革命草, 水蓊菜, 空心苋	南美洲	几乎遍及我国黄河流域以南地区。天津近年也发现引化植物	恶性杂草	抗逆性强, 适应性强, 可生长于海拔 0-2 700m 间。发生区域除海潮河湖水域外, 还蔓延于旱地、菜园、苗圃和宅旁。主要在农田(包括水田和旱田)、空地、鱼塘、沟渠、河道等环境中生长危害, 表现在: ①阻塞航道, 影响水上交通; ②排挤其他植物, 使群落物种单一化; ③覆盖水面, 影响鱼类生长和捕捞; ④在农田危害作物, 使产量受损; ⑤田间沟渠内大量繁殖, 影响农田排灌; ⑥入侵湿地、草坪, 破坏景观; ⑦滋生蚊蝇, 危害人类健康	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种, 103; 李扬汉, 1998. 中国杂草志, 81~82
2.	刺花莲子草 <i>Alternanthera pungens</i> H. B. K.	地雷草	南美洲	四川西南部、云南、海南、香港、福建南部	一般性杂草	生于海边旷地、耕地边、河漫滩、路边荒地或干热河谷。花被片顶端变成刺后扎人, 伤害人畜	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种, 104
3.	白苋 <i>Amaranthus albus</i> L.		北美	黑龙江、河北、新疆	一般性杂草	常于瘠薄干旱的沙质土壤上生长, 于旱田、休闲地、路边及荒地常见, 危害中耕作物及牧草	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 83; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlres-ult.asp?exoid=9
4.	北美苋 <i>Amaranthus blitoides</i> S. Watson	美苋	北美	辽宁、河北	一般性杂草	生于田野、路旁及荒地上, 常在瘠薄干旱的沙质土壤上生长, 有时侵入中耕旱作物田及菜园危害, 但发生量很小, 不常见	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 84; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlres-ult.asp?exoid=10
5.	尾穗苋 <i>Amaranthus caudatus</i> L.	老枪谷	泛热带地区	我国各地	一般性杂草	生于路旁及山坡旷地。我国各地均有栽培, 有时逸为野生。常危害蔬菜、果树及茶树, 也生于田边及路旁, 但发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 85
6.	绿穗苋 <i>Amaranthus hybridus</i> L.		热带美洲	陕西、河南、安徽、江苏、浙江、江西、湖南、湖北、四川、贵州等省	一般性杂草	生于路边、荒地及山坡, 常于果园危害, 有时侵入旱田危害, 但发生量小, 不常见, 是一般性路旁杂草	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 86
7.	合被苋	泰山苋	加勒比海	山东、北京、安徽	一般性	生于海拔 500m 以下路边、荒地、宅旁或田间, 有	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	Basellaceae						
13.	落葵薯 <i>Amedera cordifolia</i> (Tenore) Steenis	马德拉藤, 藤七, 心叶 落葵薯	南美热带 地区	江苏、浙江、福建、四川、云南、北京	一般性 杂草	主要为人工栽培, 已逸为野生	中国植物志编辑委员会, 1996a. 中国植物志. 26 卷. 46
	紫葳科						
	Bignoniaceae						
14.	猫爪藤 <i>Macfadyena</i> <i>unguis-cati</i> (L.) A. Gentry		西印度群 岛及墨西哥、巴西、 阿根廷	广东、福建引入作观赏栽培, 在福建逸为野生	区域性 恶性杂 草	树叶覆盖树木, 使之生长不良或导致死亡, 老藤可 成为绞杀植物	中国植物志编辑委员会, 1990a. 中国植物志. 69 卷. 7-8; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵 种. 151
	紫草科						
	Boraginaceae						
15.	天芥菜 <i>Heliotropium</i> <i>europaeum</i> L.		欧洲	北京西郊、河南、西藏	一般性 杂草	适生于较湿润而肥沃的土壤, 为农田和果园的一般 杂草, 危害较轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 128-129
	莧菜科						
	Cabombaceae						
16.	水盾草 <i>Cabomba caroliniana</i> Gray	绿菊花草	美洲	浙江北部的杭嘉湖平原和宁 绍平原, 江苏南部的太湖流域 及上海西部淀山湖附近的河 网地带	一般性 杂草	分布的主要水域类型为一些水流缓慢、水位稳定的 小河道和中小型湖泊 在有些分布点, 已成为群落 的优势种, 有些刚刚定居. 在我国仍在进一步扩 散之中	丁炳扬等, 2003. 生物多样性, 11(3): 223-230; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqres-tul.asp?exoid=7
	仙人掌科						
	Cactaceae						
17.	梨刺仙人掌 <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller	仙桃	墨西哥	四川、贵州、云南、广西、广 东、福建、台湾、浙江	一般性 杂草	温室栽培, 南方栽培. 海拔 600~2 900m 的干热河 谷逸为野生	中国植物志编辑委员会, 1999a. 中国植物志. 52 卷第 1 分册. 278
18.	单刺仙人掌 <i>Opuntia monacantha</i> (Willd) Haw.	仙人掌, 扁 念刺, 绿仙 仙人掌	巴西, 巴 拉圭, 乌 拉圭, 阿 根廷	我国各省有引种栽培	一般性 杂草	生于海拔 3~2 000m 海边或山坡开旷地	中国植物志编辑委员会, 1999a. 中国植物志. 52 卷第 1 分册. 280

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
19.	箭刺仙人掌 <i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw. var <i>dillenii</i> (Ker-Gawl.) Benson, <i>Opuntia</i> <i>dillenii</i> (Ker-Gawl.) Haw	刺毛相扇 子、仙人掌	墨西哥东 海岸、美 洲南部及 东南部沿 海地区、 西印度群 岛和南美 洲北部	广东、广西南部和海南沿海地 区	一般性 杂草	南部沿海地区常见栽培,广东、广西南部和海南沿海地区逸为野生	中国植物志编辑委员会, 1999a. 中国植物志. 52 卷第 1 分册. 277
	大麻科 Cannabaceae						
20.	大麻 <i>Cannabis sativa</i> L.	线麻	中亚	我国各地	一般性 杂草	各地均有栽培, 常逸为野生, 成为旱作物地野生杂草, 危害玉米及大豆, 但发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 156
	石竹科 Caryophyllaceae						
21.	麦仙翁 <i>Agrostemma githago</i> L.	麦毒草	欧洲	东北、新疆、山东、青岛	有毒杂 草	常见于半干旱的草原地带, 生于麦田、路旁和草地, 为麦类作物田间的主要杂草。种子及茎叶对牲畜和人均有毒	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 161
22.	狗筋麦瓶草 <i>Silene venosa</i> (Gillb.) Aschers.		欧洲	黑龙江、内蒙古和西藏等省区	一般性 杂草	生于草甸、草地、山谷灌丛、路边、撂荒地及农田内, 常危害小麦、油菜、大豆、甘薯和谷子等作物, 但发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 176
23.	大爪草 <i>Spergularia arvensis</i> L.		欧洲	黑龙江、山东、福建、云南及西藏等省区	一般性 杂草	生于路边、荒地及农田边, 常侵入旱田, 危害麦类、玉米、马铃薯、烟草、豆类、绿肥、蔬菜, 麦田受害最重, 也危害果园	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 177
24.	小繁缕 <i>Stellaria apetala</i> Ucria		地中海地区	安徽、江苏、浙江、江西等省	一般性 杂草	常生长于路边、宅旁、荒地和农田。为蔬菜地危害较为严重的杂草, 主要于早春发生危害, 且发生量大	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 181
25.	王不留行 <i>Vaccaria segetalis</i> (Neck.) Garcke	麦蓝菜	欧洲	整个北方地区及西南高海拔地区, 华东、华中及台湾亦有分布	一般性 杂草	各国多引种栽培, 常逸生成杂草。温带地区麦田常见。在我国局部地区(如黄、淮海地区)对小麦危害较重, 也危害油菜	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 186
	藜科						

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	Chenopodiaceae						
26.	土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	鹅脚草, 臭草, 杀虫芥	热带美洲	北京、山东、陕西、上海、浙江、江西、福建、台湾、广东、广西、江苏、海南、重庆、贵州、云南、香港、澳门	一般性 杂草	生于村旁、旷野、田边、路旁和沟岸等处, 为路边常见杂草, 农田少见。该种含有毒的挥发油, 对他植物产生化感作用, 还是常见的花粉过敏源, 对人体健康可造成危害	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 206~207; 李振宇, 解炎, 2002. 中国外来入侵种. 101; 中国植物志编辑委员会, 1979a. 中国植物志. 25 卷第 2 分册. 82
27.	杂配藜 <i>Chenopodium hybridum</i> L.	大叶藜, 血见愁	欧洲及西亚	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、北京、山东、浙江、陕西、山西、宁夏、甘肃、湖北、四川、重庆、云南、青海、西藏、新疆	一般性 杂草	为常见的农业、园艺和蔬菜作物田中的杂草, 通常在阳光充足和灌溉良好的土壤上生长旺盛, 常见于林缘、山坡灌丛间、沟沿、旷野、荒地等处。在农田中与作物竞争水源, 降低产量	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 210; 李振宇, 解炎, 2002. 中国外来入侵种. 102; 中国植物志编辑委员会, 1979a. 中国植物志. 25 卷第 2 分册. 94
	菊科						
	Compositae						
28.	刺苞果 <i>Acanthospermum australe</i> (L.)O. Kuntze	热带南美洲	南美洲	云南、广西西部	一般性 杂草	生于平坡、河边、沟旁及路边; 常在幼龄果园、橡胶园及秋收作物(玉米及谷子)田中危害, 但发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 232~233 李振宇, 解炎, 2002. 中国外来入侵种. 154; 中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 333
29.	菁 <i>Achillea millefolium</i> L.	千叶菁, 欧菁, 铺草	欧洲及西亚	东北、内蒙古、陕西、甘肃和新疆等省区, 我国各地庭院常有栽培	一般性 杂草	生长于湿草地、水沟边、路旁、荒地及铁路沿线, 常在贫瘠的土壤上生长。常侵入草场、旱田及休闲田危害, 但发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 234~235; 中国植物志编辑委员会, 1983. 中国植物志. 76 卷第 1 分册. 10
30.	藜香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i> L.	胜红蓟	西印度群岛、墨西哥、中美洲和南美洲	华东、华中、华南、西南和台湾等省区	区域性 恶性杂草	常生于山谷、林缘、河边、林下、草地、田边和荒地上, 常侵入秋收作物, 如玉米、甘蔗和甘蔗田中危害, 发生量大, 危害重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 238; 李振宇, 解炎, 2002. 中国外来入侵种. 155; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志. 74 卷. 53
31.	熊耳草 <i>Ageratum houstonianum</i> Miller		墨西哥及邻近地区	黑龙江、山东、浙江、安徽、江苏、福建、广东、广西、云南、四川、贵州、海南和台湾等省区	一般性 杂草	适生于湿润环境, 常危害旱田作物, 对甘蔗、花生、大豆危害较大, 亦危害果园及橡胶园, 在荒地及路边也常见。发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 238~239; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志. 74 卷. 51; 李振宇, 解炎, 2002. 中国外来入侵

续表

序号	种名	别名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
32.	豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	艾叶破布草、普通豚草	北美	东北、内蒙古、河北、安徽、江苏、浙江、江西、湖南、湖北、四川、贵州和西藏等省区	区域性恶性杂草	适应性强,于路旁、渠道、河岸和院落、果园、旱地等处均能生长,尤耐贫瘠,于砂砾土壤生长亦盛。其危害表现在:(1)花粉是人类花粉过敏症(枯草热,也称花粉症)的主要致病原。(2)可混杂并侵入农作物田和管理不善的蔬菜地、果园、桑园、苗圃、牧场等,抑制栽培作物及野生植物的生长。(3)混杂于牧场,影响牛奶和奶制品的生产质量。(4)沿交通枢纽分布,易侵入人口密集区,造成巨大的景观破坏。(5)花和全株可感染甘蓝菌核病,并作为中间寄主感染甘蓝	种,155 李扬汉,1998.中国杂草志,240-241; 李振宇,解森,2002.中国外来入侵物种,156; 中国植物志编辑委员会,1979b.中国植物志,75卷,330
33.	三裂叶豚草 <i>Ambrosia trifida</i> L.	大破布草	北美	辽宁、黑龙江和河北等省	区域性恶性杂草	喜生长于肥沃的湿润土壤上,主要生长在公路两侧、河岸和荒处,可危害小麦、大麦、大豆及各种工艺术作物。危害基本同豚草	李扬汉,1998.中国杂草志,241-242; 中国植物志编辑委员会,1979b.中国植物志,75卷,330
34.	田春黄菊 <i>Anthemis arvensis</i> L.	刺甘菊	欧洲	吉林、辽宁	一般性杂草	田间、路边和铁路边	中国植物志编辑委员会,1983.中国植物志,76卷第1分册,7
35.	钻形紫菀 <i>Aster subulatus</i> Michx.		北美	河南、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、贵州、云南、四川、重庆、广西、广东、福建、台湾	一般性杂草	喜生长于潮湿含盐的土壤上,常见于沟边、河岸、海岸、路边及低洼地。危害秋收作物(棉花、大豆及甘薯)和水稻,也见于田边及路埂上,发生量小,危害轻,是常见杂草	李扬汉,1998.中国杂草志,265-266; 中国植物志编辑委员会,1985a.中国植物志,74卷,254; 李振宇,解森,2002.中国外来入侵物种,157
36.	大狼把草 <i>Bidens frondosa</i> L.	接力草、外国脱力草	北美洲	辽宁、吉林、河北、浙江、江苏等地及上海近郊	一般性杂草	适应性强,喜生长于湿润的土壤上,生于荒地、路边和沟边,在低洼的水湿处及稻田田埂上更多,在稻田缺水条件下,常侵入田中,大量发生。一般情况下,发生量小,危害轻	李扬汉,1998.中国杂草志,270; 中国植物志编辑委员会,1979b.中国植物志,75卷,372
37.	三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> L.	鬼针草,引线草	热带美洲	华北、华东、中南、西南	一般性杂草	喜湿润土壤,常生于荒地、路旁和疏林下,危害果、桑及茶园,也能危害其他旱田作物,但发生量小,危害轻,是常见杂草	李扬汉,1998.中国杂草志,272-273
38.	小高茎	蒿子秆	地中海	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙、	一般性	易生长于树荫或有部分光照的地方,潮湿的环境,	中国植物志编辑委员会,1983年,中

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	<i>Chrysanthemum carinatum</i> Schousb.		(摩洛哥)	河北、安徽	杂草	排水良好, 土质不需太肥沃	国植物志. 76 卷第 1 分册. 22
39.	茼蒿 <i>Chrysanthemum coronarium</i> L.	荆谷花, 春菊, 蓬蒿, 杆子蒿, 艾菜(海南)	地中海	河北、山西、山东、河南、安徽	一般性杂草	生长在河边、地头、路旁或山坡草处, 一般成片生长。喜冷凉, 17~20℃最适宜, 但适应性较广, 低于 12℃或高于 20℃, 生长缓慢或生长不良	中国植物志编辑委员会, 1983 年. 中国植物志. 76 卷第 1 分册. 22; 广东植物研究所, 1974. 海南植物志 (三). 413
40.	菊苣 <i>Cichorium intybus</i> L.		欧洲	河北、北京、黑龙江、辽宁、山西、陕西、河南、山东、安徽、新疆、江西、广东	一般性杂草	喜冷凉, 不耐高温, 发芽温度 15℃左右, 高温下不易发芽 属低温长日照作物 生长在海滨沙地、河边、水沟边、山坡、路边、草甸及牧场中。常危害夏收作物(玉米和油菜), 秋收作物(棉花、玉米和大豆)和果树, 也生于田边及路埂, 发生量小, 危害轻, 是常见杂草	中国植物志编辑委员会, 1997a. 中国植物志. 80 卷第 1 分册. 8; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 286~287; 黄浩平, 2000. 菊苣的栽培与利用. 云南农业科技, (6): 33~34
41.	香丝草 <i>Conyza bonariensis</i> (L.) Cronq.	野菊蒿, 葵衣草, 野地黄菊	南美洲	河北、陕西、甘肃、长江流域及其以南地区(安徽、江苏、浙江、江西、湖北、云南、台湾等省区)	区域性恶性杂草	生长于荒地、田边及路旁, 常于桑、茶及果园中危害, 路边阻碍交通, 农田影响作物生长 发生量大, 危害重, 是区域性恶性杂草, 也是路埂、宅旁及荒地发生数量大的杂草之一	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 294~295; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志. 74 卷. 350
42.	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.	小白酒草, 加拿大蓬飞草, 小飞蓬, 飞蓬	北美洲	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙、河北、山西、陕西、河南、山东、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、四川、贵州、云南和台湾等省区	区域性恶性杂草	多生于干燥、向阳的土地上, 多生于路边、田野、牧场、草原、河滩, 常形成大片草丛 路边阻碍交通, 对秋收作物田(甘薯和大豆)、果园和菜园危害重, 发生量也大, 也是路埂常见杂草, 并为棉铃虫和棉蚜象的中间寄主	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 295~296; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志. 74 卷. 348; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 159
43.	苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> (Ratz.) Walker		南美洲	云南、四川、重庆、湖北、贵州、广东、广西、海南、江西、浙江、福建、台湾	区域性恶性杂草	山坡草地、旷野、路旁、荒地、河岸、沟边	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 160
44.	大花金鸡菊 <i>Coreopsis grandiflora</i> Hogg.	大花波斯菊	美洲	云南	一般性杂草	适生于潮湿, 有光照的地方, 种子在土表和土层均可以出芽. 多分布于路边、荒野	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 364
45.	线叶金鸡菊 <i>Coreopsis lanceolata</i> L.	剑叶金鸡菊, 大金菊, 菊(口名)	北美洲	安徽、江苏、浙江、江西	一般性杂草	荒野、草坡	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 365

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
46.	蛇目菊 <i>Cocopsis tinctoria</i> Nutt.	两色金鸡菊	北美洲	我国各地	一般性 杂草	各地引种栽培供观赏,有时逸生于路边、田间和田边,常危害秋收作物和果树,也生于路埂。发生量小,危害不大	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 297; 中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 365
47	秋葵 <i>Cosmos bipinnata</i> Cav.	大波斯菊, 波斯菊	墨西哥	黑龙江、吉林、辽宁、云南、四川	一般性 杂草	荒野、草坡、田埂、溪岸,其中在云南、四川南部大面积归化	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 369
48.	峨嵋菊 <i>Cosmos sulphureus</i> Cav.	黄秋葵, 黄波斯菊	墨西哥至巴西	广东、云南	一般性 杂草	庭院栽培,有时逸为野生	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 369
49.	菊苣 <i>Erechtites valerianaeifolia</i> DC.		南美洲	台湾省	一般性 杂草	生于荒地及路边,常危害秋收作物棉花、甘薯和甘蔗,也侵入茶园和果园危害,但发生量小,危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 310~311
50.	一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	白顶飞蓬, 千层塔, 野蒿, 治疔草	北美洲	除新疆、内蒙古、宁夏、海南外,东北、华北、华中、华东、华南及西南等地	一般性 杂草	喜生于肥沃向阳的土地上,在干燥贫瘠的土壤亦能生长。常危害秋收作物麦类、果树、茶和桑等经济植物,亦能侵入草原、牧场及苗圃等处危害,且发生量大,危害重。又为地老虎的寄主	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 312; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 162; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志. 74 卷. 326
51.	春飞蓬 <i>Erigeron philadelphicus</i> L.		北美洲	安徽	一般性 杂草	路旁、旷野、山坡、林缘及林下普遍生长	安徽植物志编写组, 1986. 安徽植物志(四), 合肥: 安徽科技出版社. 536
52.	紫萁泽兰 <i>Eupatorium adenophorum</i> Spreng.	破坏草, 解放草, 细升麻, 北升麻	中美洲	云南、广西、贵州、四川(西南部)、台湾	恶性杂草 有毒杂草	生长于热带及亚热带地区,海拔 1000~2000m 广阔的山区,对土壤要求不严,是喜氮喜湿的阳性植物。常侵占草场,使优良牧草无力竞争而渐消失;牲畜误食茎、叶会腹泻及气喘;花粉及瘦果能引起眼睛及鼻腔糜烂流脓,甚至致死;森林采伐后的迹地很快被其侵占,而难于自然更新。还危害秋收作物(玉米、大豆、甘薯和甘蔗)、果树和茶树,发生量大,危害重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 313; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 163
53.	假臭草 <i>Eupatorium catartarium</i> Veldkamp		南美	香港、广东(南部)、澳门、福建(厦门)	恶性杂草	荒地、荒坡、滩涂、林地、果园	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 166

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
54.	飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> (L.)	先锋草, 占地方草, 香泽兰	中美洲	台湾、广东、香港、澳门、海南、云南、广西、贵州(西南部)	区域性恶性杂草	生于热带亚热带地区, 海拔 1 000m 以下的盆地边缘、田埂、河边、路边、林缘、林内旷地或撂荒地; 雨量 900~2 000mm, 相对湿度 70%~90%, 年均温度 19℃ 以上的地带, 是其适宜分布区。是我国热带亚热带地区的恶性杂草, 危害秋收作物(玉米、大豆、甘蔗和甘蔗)、果树及茶树, 发生量大, 危害重	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 165; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志. 74 卷. 56
55.	牛膝菊 <i>Galinsoega parviflora</i> Cav.	辣子草, 小米菊, 珍珠草, 向日葵, 铜锤草	南美洲、中美洲、墨西哥	除西北以外全国各地均有分布	恶性杂草	生于庭园、废地、河谷地、溪边、路边和低下农田, 在土壤肥沃而湿润的地带生长更多。危害秋收作物(玉米、大豆、甘蔗和甘蔗)、蔬菜、果树及茶树, 发生量大, 危害重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 317~318; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 166; 中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 384
56.	野苘蒿 <i>Gynura crepidioides</i> Benth.	野苘蒿, 野地黄菊, 草命菜, 安南菜	热带非洲	云南、四川、重庆、湖北、贵州、广东、广西、海南、江西、浙江、福建、台湾、香港、澳门、西藏、甘肃	一般性杂草	林下、旷野、路旁、荒地、水沟边	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 161; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 325
57.	菊芋 <i>Helianthus tuberosus</i> L.	洋姜, 菜姜, 鬼子姜, 五星草(广西), 番姜(广东)	北美洲	河南、山东、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广西、四川、贵州、云南	一般性杂草	菊芋适应性强, 在芭边、路边、地堰、河滩、荒山、沙丘等都可以生长	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 358~359
58.	堆心菊 <i>Helenium autumnale</i> L.		北美洲	安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广东、广西	一般性杂草	栽培观赏植物, 有时在路边逸为野生, 不常见	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 387
59.	滨菊 <i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.		欧洲	河南、甘肃、江西、江苏	一般性杂草	山坡、草地或河边	中国植物志编辑委员会, 1983. 中国植物志. 76 卷第 1 分册. 25
60.	薇甘菊 <i>Mikania micrantha</i> H.B.K.		中美洲	广东、香港、澳门	区域性恶性杂草	喜光好湿, 但不耐阴和土壤下瘠; 多发生在居民区附近的洼地、沟地、路旁、丢荒地等人为了干扰强烈之处和疏于管理的果园、圃地。在东南亚地区, 薇甘菊严重危害树木作物, 如油棕、椰子、可可、茶	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 173; 咎启杰, 王勇军, 王伯荪, 廖文波, 李鸣光, 2000. 生态学杂志, 19(6):

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
61	假眼菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> L.		美国南部及墨西哥北部	广东、广西、贵州(西南部)、云南(中部以南)、海南、香港、福建(南部)	恶性杂草	叶、橡胶、柚木等都是其主要危害对象。在我国的深圳沿海、广东沿海地区主要入侵对象是天然次生林、水源保护林、农田区、耕荒地、海岸滩涂、红树林林缘滩地等	58~61; 邵婉婷、韩诗琦、黄寿山, 2002. 广东农业科学, 1: 43~48; 蓝崇钰、王勇军、曾启杰, 2001. 广东内伶仃岛自然资源与生态研究, 中国林业出版社 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种, 168
62	假地胆草 <i>Pseudalephantiopus spicatus</i> (Juss. ex Aublet) Gleason		热带美洲和非洲	台湾和广东省	一般性杂草	生于砂土、砾土至壤土上, 耐旱、耐贫瘠。草地、荒地及路边常见, 危害旱田作物, 但发生量少, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 353~354; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志, 74卷, 47
63	伞房匹菊 <i>Pyrethrum parthenifolium</i> Willd.		亚洲中部	云南	一般性杂草	栽培观赏, 也有归化野生(云南)	中国植物志编辑委员会, 1983. 中国植物志, 76卷第1分册, 58
64	欧洲千里光 <i>Senecio vulgaris</i> L.		欧洲	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙、河北、山西、贵州、云南、四川、湖北、重庆、上海、西藏、新疆、陕西、安徽、江苏、浙江、江西、福建、香港、台湾	一般性杂草	生于草地、山坡及路边潮湿处。危害夏收作物(麦类和油菜)、果树和茶树, 也生于路埂, 但发生量少, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 364; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种, 169
65	水飞蓟 <i>Silybum marianum</i> Gaertn.	奶蓟, 老鼠筋, 水飞蓟	欧洲, 亚洲中部, 非洲, 地中海地区	辽宁、河北、江苏	一般性杂草	农田、荒地、路边、渠岸	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 371; 中国植物志编辑委员会, 1987a. 中国植物志, 78卷第1分册, 161
66	加拿大一枝黄花 <i>Solidago canadensis</i> L.	金棒草	加拿大和美国	我国各地作为花卉引种, 在浙江、上海、安徽、湖北、江苏、江西等地已有逸生	一般性杂草	我国各地引种栽培供观赏, 常逸生为杂草。生于潮湿和干燥开阔地、疏林下及路边。有时危害果树、茶及桑树, 发生量很小, 不常见, 为一般性路埂杂草	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 372; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种, 170; 中国植物志编辑委员会, 1985a. 中国植物志, 74卷, 76

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
67.	裸柱菊 <i>Soliva anthemifolia</i> R. Br.	落地菊	大洋洲及美洲	安徽、江西、福建、广东、海南、台湾等省	区域性恶性杂草	常生于荒地及田野。危害夏收作物(麦类和油菜)和蔬菜,是区域性恶性杂草,发生量大,危害较重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 373-374
68.	绞断菊 <i>Sonchus asper</i> (L.) Hill.	石白头, 花叶滇苦菜	欧洲	新疆、西藏、山东、江苏、安徽、浙江、江西、湖北、四川、云南等长江流域各省区	一般性杂草	生于路边和荒野处,为果、桑、茶园和路埂常见杂草,发生量小,危害一般	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 374-375; 中国植物志编辑委员会, 1997a. 中国植物志. 80 卷第 1 分册. 61; 江苏植物研究所, 1982. 江苏植物志 904
69.	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i> L.	苦苣, 滇苦菜, 滇苦苣菜	欧洲	从辽宁至华南各省区都有分布	一般性杂草	多生长于山坡、路边和荒野处或山谷林缘, 林下、平地田间或近水处, 为果、桑、茶园和路埂常见杂草, 发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 376-377; 中国植物志编辑委员会, 1997a. 中国植物志. 80 卷第 1 分册. 63; 江苏植物研究所, 1982. 江苏植物志. 903-904
70.	金腰箭 <i>Synedrella nodiflora</i> (L.) Gaertn.	黑点旧	美洲热带	广东、海南、台湾、云南、广西南部	一般性杂草	适生于湿润的环境, 多生于旷野, 路边, 宅旁, 害棉、玉米、大豆、甘薯、甘蔗、花生及蔬菜等作物, 开始人侵一些经济园林	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 379; 中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 363; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 173
71.	万寿菊 <i>Tagetes erecta</i> L.	臭芙蓉	墨西哥	广东、云南	一般性杂草	我国各地均有引种供观赏, 于广东及云南常逸生为路埂杂草, 生于路边和荒地	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 389; 安徽植物志编写组, 1986. 安徽植物志(四). 498
72.	肿柄菊 <i>Tithonia diversifolia</i> A. Gray	假向日葵	中美洲及墨西哥	广东、云南	一般性杂草	我国各地均有引种供观赏, 于广东及云南常逸生为路埂杂草, 生于路边和荒地	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 383 中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 356
73.	孔雀草 <i>Tagetes patula</i> L.	西番菊, 小万寿菊, 红黄草	墨西哥	四川、贵州、云南	一般性杂草	我国各地庭园常有栽培, 适应性强, 有时逸为野牛	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 387
74.	羽芒菊 <i>Tridax procumbens</i> L.		美洲热带	广东、海南、云南、台湾	一般性杂草	生长在沙土至壤土上, 耐贫瘠, 干旱, 属于路埂杂草, 出现在沙地、荒地、坡地、山边	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 384; 中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
75	二裂薹麒麟 <i>Wedelia trilobata</i> (L.) A. S. Hitchc		热带美洲	福建、广东、海南、香港、台湾	区域性 恶性杂草	路边 常成片生长, 侵占草地和湿地, 排挤本地植物	植物志. 75 卷. 385 李振宇, 解森, 2002. 中国外来入侵种. 174
76	刺苞耳 <i>Xanthium spinosum</i> L.		南美洲	河北、辽宁、河南、北京、安徽	一般性 杂草	路边、荒地、荒地、旱作物地	李振宇, 解森, 2002. 中国外来入侵种. 175
77	多花百日菊 <i>Zinnia peruviana</i> (L.) L.	五色梅(四川)、山菊花(河南)	墨西哥	河北、河南、陕西、甘肃、四川、云南	一般性 杂草	山坡、草地或路边, 海拔达 1 250m	中国植物志编辑委员会, 1979b. 中国植物志. 75 卷. 337
	旋花科 Convolvulaceae						
78	五爪金龙 <i>Ipomoea cairica</i> (L.) Sweet	藤叶牵牛, 番仔藤, 台湾牵牛花, 掌叶牵牛, 五爪龙	模式标本采自欧洲, 有的学者认为是美洲	台湾、广东、广西、云南(南部)、福建、海南、香港、澳门等地	一般性 杂草	多生于低海拔地区向阳处, 在围墙、屋檐、平地或山地路旁灌丛等地生长	李振宇, 解森, 2002. 中国外来入侵种北京: 中国林业出版社. 136.
79	变色牵牛 <i>Pharbitis indica</i> (Burm.) R. C. Fang		南美洲	台湾、广东、东沙群岛及其他沿海岛屿	一般性 杂草	多生于路旁、宅旁, 或为栽培 为常见杂草, 农田发生量少, 危害轻	中国植物志编辑委员会, 1979c. 中国植物志. 64 卷第 1 分册. 105; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 412
80	裂叶牵牛 <i>Pharbitis nil</i> (L.) Choisy		美洲热带	内蒙、河北、山西、陕西、河南、山东、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广东、广西、海南、台湾、四川、贵州、云南	一般性 杂草	生于路边、路旁、河谷、宅院、果园和山坡 适应性很广; 部分果园、苗圃受害较重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 413; 中国植物志编辑委员会, 1979c. 中国植物志. 64 卷第 1 分册. 103
81	圆叶牵牛 <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt		南美洲	我国各地	一般性 杂草	适应性很广, 多生于路边、路旁、平原、山谷和林地; 我国各地均有栽培, 供庭园观赏或作绿篱, 有时侵入农田(旱作物地)或果园危害	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 413
	十字花科 Cruciferae						

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
82.	田芥菜 <i>Brassica kaber</i> (DC.) L. Wheeler		欧洲	台湾	一般性 杂草	为田间、园圃和湿地杂草	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 429
83.	野油菜 <i>Brassica juncea</i> (L.) Czern. et Coss.	塘白菜, 芥 菜, 大芥, 多 裂叶芥, 雪里 红, 油菜菜, 皱皮芥菜, 大 叶芥	亚洲	全国各地均有分布	一般性 杂草	栽培作物, 有时逸生为野生杂草, 能在夏收作物田 中大量发生, 危害麦类、油菜等作物。多生于田野、 河边、湖边、路旁、山坡处林边、沟谷草丛等较湿 润的地方	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 428; 傅立国等, 2003. 中国高等植物. 5 卷. 青岛: 青岛出版社. 393
84.	臭芥 <i>Coronopus didymus</i> (L.) J. E. Smith	臭菠菜, 肾 果芥	南美洲	江苏各地普遍分布, 山东、浙 江、福建、安徽、台湾、广东、 香港、湖南、湖北、河南、云 南、江西等省也都有分布	一般性 杂草	生于路旁或荒地, 较耐寒, 为常见路埂杂草, 对农 作物危害轻	傅立国等, 2003. 中国高等植物. 5 卷. 青岛: 青岛出版社. 406~407; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 446~447
85.	绿独行菜 <i>Lepidium campestre</i> (L.)		欧洲, 亚 洲西部	黑龙江、辽宁、山东	一般性 杂草	为一般性路埂杂草, 发生量小, 危害轻	傅立国等, 2003. 中国高等植物. 5 卷. 青岛: 青岛出版社. 401
86.	密花独行菜 <i>Lepidium densiflorum</i> Schedr.		北美洲	东北地区及河北、山东、云南 等地	一般性 杂草	生于海滨、沙地、田边及路旁, 为一般性路埂杂草, 发生量小, 危害轻	傅立国等, 2003. 中国高等植物. 5 卷. 青岛: 青岛出版社. 405~406
87.	北美独行菜 <i>Lepidium virginicum</i> L.	独行菜, 小 团扇芥, 星 星菜, 辣椒 根, 小白浆	美洲	内蒙古、吉林、辽宁、江苏、 浙江、福建、湖北、山东、海 南、安徽、台湾、江西、湖南、 广东、广西、贵州、云南等地	一般性 杂草	多生于干燥地方、荒地及田边, 为果园、茶园和路 埂常见杂草, 发生量小, 危害轻	傅立国等, 2003. 中国高等植物. 5 卷. 青岛: 青岛出版社. 405; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵 种. 北京: 中国林业出版社. 115
88.	葫芦科 Cucurbitaceae 红瓜 <i>Coccinia grandis</i> (Linn.) Voigt	南瓜, 砲客 (西双版纳 傣语名)	东南亚和 印度	广东、云南、广西(溯洲岛)	一般性 杂草	常生于海拔 100~1 100 米的山坡灌丛及林中	许义凯等, 2003. 云南植物研究, 25(6): 680~686; 中国植物志编辑委员会, 1986. 中国 植物志. 73 卷第 1 分册. 263
89.	小马兜	马兜	非洲	山东、安徽、江苏	一般性	生于田边路旁	中国植物志编辑委员会, 1986. 中国

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	<i>Cucumis bisexualis</i> A. M. Lu et G. C. Wang ex Lu et Zhang				杂草		植物志. 73 卷第 1 分册. 203; http://weed.njau.edu.cn/exoword/sqlresult.asp?exoid=104
90	马地瓜(甜瓜的变种) <i>Cucumis melo</i> L. var. <i>agrestis</i> Naud.		非洲	我国南北各地普遍逸生	一般性杂草	我国南北各地有少许栽培, 普遍逸为野生	中国植物志编辑委员会, 1986. 中国植物志. 73 卷第 1 分册. 203; http://weed.njau.edu.cn/exoword/sqlresult.asp?exoid=132
	大戟科 Euphorbiaceae						
91	齿裂大戟 <i>Euphorbia dentata</i> Michx.	紫斑大戟	北美	北京	一般性杂草	生于杂草丛, 路旁及沟边	中国植物志编辑委员会, 1997b. 中国植物志. 44 卷第 3 分册. 68
92	飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i> L.	乳籽草, 飞翔草, 大飞扬草, 大奶汁草, 草芭花	热带地区	海南、广东、广西、湖南、云南、四川、贵州、江西、福建、台湾	一般性杂草	一般性旱地杂草, 适于向阳坡地或排水良好的平坦地, 早作物地, 荒地, 路旁常见, 多见于砂质土	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 500; 中国植物志编辑委员会, 1997b. 中国植物志. 44 卷第 3 分册. 42;
93	蓖麻 <i>Ricinus communis</i> L.	唐本草	可能为非洲东北部 的肯尼亚 或索马里	我国内陆大部分省区有栽培	一般性杂草	村旁疏林或河流两岸冲积地常有逸为野生	植物志编辑委员会, 1996b. 中国植物志. 44 卷第 2 分册. 88
	牻牛儿苗科 Geraniaceae						
94	野老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i> L.		美洲	山东、河南、安徽、江苏、江西、浙江、湖南、湖北、四川、云南	一般性杂草	喜生于平原和低山坡的荒地、路旁草丛中, 为夏收作物田中常见杂草. 对麦类及油菜等作物轻度危害	中国植物志编辑委员会, 1998c. 中国植物志. 43 卷第 1 分册. 29; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 519-520
	唇形科 Labiatae						
95	短柄吊球草 <i>Hyptis brevipes</i> Poit.		美洲墨西哥	海南和台湾	一般性杂草	生于草地、路旁, 为一般性果、茶园、胶园及路埂杂草, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 550
96	吊球草	石柳, 四俭	热带美洲	广东、广西、海南、香港、澳	一般性杂草	常生于山坡、林缘、旷野、村旁、开闢荒地, 为—	中国植物志编辑委员会, 1977 年. 中

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	<i>Hypis rhomboides</i> Mart. et Gal.	草, 蚂蚁刺, 四方骨, 假 走马风		门和台湾等省区	杂草	般性果、茶园及路埂杂草, 危害轻	国植物志. 66 卷. 408; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵 种. 140; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 551
97.	山香 <i>Hypis suaveolens</i> (L.) Poi.	假藿香, 毛 老虎, 山薄 荷, 药黄草, 蛇药子, 毛 胡香, 狗骨 消, 臭草	美洲热带 地区	广东、广西、海南、福建、香 港、澳门和台湾等省区	一般性 杂草	生于开阔荒地、草坡、林缘或路旁, 为一般性果、 茶园及路埂杂草, 危害轻	中国科学院中国植物志编辑委员会, 1977. 中国植物志. 66 卷. 406; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵 种. 141; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 551~552
	豆科 Leguminosae						
98.	金合欢 <i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	鸭皂树, 刺 球花, 消息 树, 牛角花	热带美洲	浙江南部、广东、海南、台湾、 云南、广西、福建、四川西南 部、重庆	恶性杂 草, 有 毒杂草	灌木或小乔木。多生长在光照好、温暖的地区。出 于金合欢含有毒的单宁酸, 牲畜食后可导致死亡, 具有极大的危害性	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵 种. 116
99.	含羞草决明 <i>Cassia mimosoides</i> L.	山扁豆, 决 明子, 望江 南	美洲热带	江西、福建、广东、广西、海 南、台湾、贵州、云南	一般性 杂草	半灌木状草本。生于旷野、山坡、林缘和路旁。对 局部地区的果园、幼林和苗圃有一定危害	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 599~600
100.	望江南 <i>Cassia occidentalis</i> L.	羊角豆, 野 扁豆, 喙白 草	美洲热带	河北、山东、安徽、江苏、福 建、广东、广西、台湾、云南、 湖南	一般性 杂草	灌木或半灌木。生于山坡或河边, 喜沙质土壤, 为园、 林杂草, 危害轻。有栽培。性喜高温, 但对低温有一 定抵御能力, 短期内低温不会对树体产生危害	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 601
101.	决明 <i>Cassia tora</i> L.		美洲热带	河北、山东、安徽、江苏、浙 江、福建、广东、广西、海南、 台湾、云南	一般性 杂草	半灌木状草本。适于山坡、河边、果园、苗圃及 农田可见	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 601~602
102.	银合欢 <i>Leucaena glauca</i> (L.) Benth.	白合欢	热带美洲	广东、海南、台湾、广西、福 建、香港、澳门、湖南、贵州、 四川西南部和云南	一般性 杂草	灌木或小乔木。常生于低海拔的荒地疏林中。通过 化感作用影响其他树种的生长, 而且汁液有弱毒 性, 牛羊啃食过量会导致皮毛脱落	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵 种. 117
103.	石脉根 <i>Lotus corniculatus</i> L.	牛角花, 五 叶草, 地羊 髯, 金花菜,	欧洲、中 亚及北非	湖北、湖南、四川、云南、贵 州、甘肃、陕西、广西	一般性 杂草	适于山坡草地, 田间湿润处, 为果园、苗圃及农 田杂草, 但危害不大	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 631

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
104	南苜蓿 <i>Medicago hispida</i> Gaertn.	黄花草 刺苜蓿, 刺 荚苜蓿, 黄 花苜蓿, 金 花菜, 母芥 头, 黄花草 子, 磨盘草 子, 肥田草, 草头	伊朗, 印 度	安徽、江苏、浙江、江西、湖 北、湖南	一般性 杂草	喜生于较肥沃的路旁、荒地, 较耐寒, 较适应路旁 生境, 为常见的路旁及草地杂草; 有时侵入农田, 危害小麦、油菜等夏收作物, 危害较轻。又为朝鲜 黑龟甲虫、小地老虎、棉实夜蛾、玉米夜蛾、苹果 叶螨的媒介; 炭疽病、白粉病和霜霉病的寄主, 造 成间接危害	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 633
105	紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	苜蓿	亚洲西部	辽宁、内蒙、河北、山西、陕 西、河南、山东、甘肃、宁夏、 青海、新疆、安徽、江苏、台 湾、西藏	一般性 杂草	多年生栽培植物, 常逸生为杂草。喜光, 耐寒, 耐 旱, 适生于中性和微酸性土壤。常逸生于路旁、草 地, 偶有侵入夏收作物田, 成为农田杂草。足叶斑 病、炭疽病、白粉病的寄主, 对作物有间接危害	中国植物志编辑委员会, 1998a. 中国 植物志. 42 卷第 2 分册. 324; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 637
106	白香草木犀 <i>Melilotus albus</i> Desr.		亚洲西部	东北、河北、陕西、山西、甘 肃、四川、云南、江苏、福建 等地	一般性 杂草	适生于湿润和半干燥气候, 常见于田边、路旁、山 坡草丛中, 有栽培, 有时逸生为野生杂草	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 638
107	含羞草 <i>Mimosa pudica</i> L.	知羞草, 怕 丑草, 怕羞 草, 感应草	美洲热带	广东、海南、台湾、云南、广 西、香港、澳门、福建(南部)	一般性 杂草	性喜温暖和湿润环境, 喜肥沃沙壤土, 喜阳光。稍 耐半阴, 怕寒冷。为秋熟旱作物地和果园杂草, 华 南及西南地区地区的旱地及果园发生数量大	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 642; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵 种. 118
108	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	槐树, 刺儿 梗, 刺槐花, 德国树, 洋 槐	美国东部	辽宁、内蒙古、河北、河南、 陕西、甘肃、山西、江苏、安 徽、浙江、江西、福建、湖南、 湖北、广东、广西、四川、贵 州、云南	一般性 杂草	各地引种作行道树或庭院栽培, 强阳性树种, 根深, 萌生力强, 耐贫瘠, 生长快, 衰老也快	中国植物志编辑委员会, 1994. 中国 植物志. 40 卷. 424
109	绛三叶 <i>Trifolium incarnatum</i> L.	绛车轴草, 地中海三叶 草	欧洲地中 海沿岸	黑龙江、吉林、辽宁、陕西、 河南、山东、安徽、江苏、浙 江、江西、湖北、湖南、福建、 广东、四川	一般性 杂草	为适应性强的牧草, 我国引种栽培, 有时逸为野生	中国植物志编辑委员会, 1998a. 中国 植物志. 42 卷第 2 分册. 338
110	红车轴草 <i>Trifolium pratense</i> L.	红三叶, 红 荷兰翘摇	欧洲中部	东北、华北、西南、安徽、江 苏、江西、浙江	一般性 杂草	生于田边、路旁湿地, 各地引种栽培, 后逸生为杂 草, 侵入旱作物田、果园和桑园, 危害不大	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 657~658; 中国植物志编辑委员会, 1998a. 中国 植物志. 42 卷第 2 分册. 338

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
111	白车轴草 <i>Trifolium repens</i> L.	白三叶, 白花苜蓿, 三消草	欧洲	黑龙江、吉林、辽宁、河南、江苏、江西、贵州、云南。在我国东北、华北、华东及西南都有引种栽培	一般性 杂草	适应性广, 抗寒抗寒性强, 可在酸性土壤中旺盛生长, 也可在砂质土中生长, 喜阳耐阴, 为栽培植物, 有时逸生为杂草, 侵入旱作物田, 危害不重, 对局部地区的蔬菜、幼林有危害	植物志. 42 卷第 2 分册. 339 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 658
112.	荆豆 <i>Ulex europaeus</i> L.		欧洲	我国常见栽培种, 重庆城口县有大片逸生种群	一般性 杂草	侵入山坡灌丛、草地, 对当地生态系统和景观造成不良影响	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 119; 中国植物志编辑委员会, 1998a. 中国植物志. 42 卷第 2 分册. 424
113.	长柔毛野豌豆 <i>Vicia villosa</i> Roth.	柔毛苕子, 毛苕子, 毛叶苕子	欧洲及中亚 伊朗	东北、华北、西北、西南、山东、甘肃、江苏、湖南、广东、云南等省区。栽培或逸为野生	一般性 杂草	为夏收作物田和路埂常见杂草, 对麦类和豆类危害较重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 667; 中国植物志编辑委员会, 1998a. 中国植物志. 42 卷第 2 分册. 241
	锦葵科 Malvaceae						
114.	泡果苘 <i>Abutilon crispum</i> (L.) Medicus		美洲热带及亚热带	广东、海南岛德陵水、崖县、昌江、东方等县	一般性 杂草	常见于海岸沙地、湿生草地或疏林中, 生于海滨附近的荒地或低海拔山地、路旁的灌丛中	中国植物志编辑委员会, 1984a. 中国植物志. 49 卷第 2 分册. 30-32
115.	野西瓜苗 <i>Hibiscus trionum</i> L.	香铃草, 黑芝麻, 火炮草, 山西瓜秧, 灯笼花, 打瓜花	非洲	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙、河北、山西、陕西、河南、山东、甘肃、宁夏、青海、新疆、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广东、广西、海南、台湾、四川、贵州、云南、西藏	一般性 杂草	旱作物地常见杂草, 路旁、荒坡上或旷野, 适生于较潮湿而肥沃的农田, 亦较耐旱	中国植物志编辑委员会, 1984a. 中国植物志. 49 卷第 2 分册. 86
116.	萹葵 <i>Mahoeastrum coromandelianum</i> (L.) Güreke	黄花草, 黄花棉	美洲	广东、广西、福建、台湾和云南各省区	一般性 杂草	散生于干热草坡。系我国归化植物, 为南方常见杂草, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 698-699; 中国植物志编辑委员会, 1984a. 中国植物志. 49 卷第 2 分册. 14
	紫茉莉科 Nyctaginaceae						

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
117	紫茉莉 <i>Mirabilis jalapa</i> L.	胭脂花, 粉豆花, 夜饭花, 状元花, 丁香叶, 苦丁香, 野丁香	热带美洲	我国南北各地常栽培	一般性 杂草	南北各地有栽培, 有时逸为野生	中国植物志编辑委员会, 1996a. 中国植物志, 26卷, 7
118	柳叶菜科 Onagraceae 光果小花山桃草 <i>Gaura parviflora</i> Douglas ex Hooker f. <i>glabra</i> Munz						
119.	月见草 <i>Oenothera erythrosepala</i> Borb.	待宵草, 夜来香	北美	山东、辽宁和长江以南各省 黑龙江、吉林、辽宁、河北、山东、安徽、江苏、浙江、江西、云南	一般性 杂草	在干旱沙质土壤上生长繁茂。我国引种栽培供观赏, 逸为杂草, 生长于田园、路边和荒地等处	李扬汉, 1998. 中国杂草志, 715 贺上元等, 1984. 北京植物志, 624
120.	酢浆草科 Oxalidaceae 铜锤草 <i>Oxalis corymbosa</i> DC.	红花酢浆草, 大酸味草	美洲热带地区	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙、河北、山西、陕西、河南、山东、甘肃、宁夏、青海、新疆、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、福建、广东、广西、海南、台湾、四川、贵州、云南、西藏、广东、湖南等	一般性 杂草	向阳的山坡荒地路旁河滩地, 生活力和适应性较强, 野生于荒草地、沙质地、山坡、林缘、河边、湖畔、田边、地角, 土质肥沃的地方植株较高, 土质贫瘠荒凉的地方也有, 但植株略矮	江苏植物研究所, 1982. 江苏植物志, 江苏科技出版社, (下卷), 382; 李扬汉, 1998. 中国杂草志, 731
121.	西番莲科 Passifloraceae 龙珠果 <i>Passiflora foetida</i> L.	天仙果, 野仙桃, 肉果, 龙珠草, 龙	西印度群岛	广东、广西、香港、台湾、海南、福建(南部)云南(南部)	一般性 杂草	常攀附其他植物生长, 形成大面积优势群落, 危害甘蔗等农作物, 破坏当地生态系统, 减少生物多样性, 常逸生于海拔120~500m的草坡路边	中国植物志编辑委员会, 1999b. 中国植物志, 第67卷第2分册, 111; 李振宇, 解森, 2002. 中国外来入侵

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
		须果, 龙眼果, 像花果, 假苦果					种. 129
	商陆科 Phytolaccaceae						
122.	美洲商陆 <i>Phytolacca Americana</i> L.	商陆, 美国商陆, 十蕊商陆, 垂序商陆	北美洲	河北、北京、天津、陕西、山西、山东、江苏、安徽、浙江、上海、江西、福建、台湾、河南、湖北、湖南、广东、广西、四川、重庆、云南、贵州	一般性 杂草	喜生于土壤肥沃的林缘、地边、房前屋后; 为茶、果园、竹林、油茶林、油桐林地杂草, 危害一般	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 747; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 110
	胡椒科 Piperaceae						
123.	草胡椒 <i>Peperomia pellucida</i> (L.) H.B.K.		中美洲、亚洲、印尼、墨西哥和 西印度	广东、广西、福建、云南各 区南部	一般性 杂草	生于林下湿地、土缝中或它舍墙脚下	中国植物志编辑委员会, 1982a. 中国植物志. 20 卷第 1 分册. 77
	车前科 Plantaginaceae						
124.	长叶车前 <i>Plantago lanceolata</i> L.	窄叶车前、披针叶车前	欧洲、北亚及中亚	辽宁、陕西、山东、江苏、浙江、江西、新疆、甘肃、云南及台湾等省	一般性 杂草	生于温湿的草地或路边。部分农田常见, 但数量不多, 危害不重, 是多种作物(甜菜、甘薯、番茄、芜菁、瓜类、烟草、蚕豆)上病害、害虫及病菌的寄主	江苏植物研究所, 1982. 江苏植物志, 江苏科技出版社, (下卷), 779-780; 中国植物志编辑委员会, 2002. 中国植物志. 70 卷. 338-339; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 750
125.	北美车前 <i>Plantago virginica</i> L.	毛车前	美国	江西、浙江、上海、江苏、安徽、福建、四川、江西、湖南、广东	一般性 杂草	果园、旱地和草坪杂草。生于铁路沿线地区的路边、田埂、它旁、疏林、果园、菜地、夏熟作物田和湖畔, 自然植被受破坏或其原生环境改变后, 北美车前入侵	中国植物志编辑委员会, 2002. 中国植物志. 70 卷. 332; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 152
	马齿苋科 Portulacaceae						
126.	土人参	水人参, 土	热带拉丁	我国中部和南部以至台湾省	一般性	适应性较强, 喜温暖湿润, 耐干旱、贫瘠, 但以较	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 北京;

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	<i>Talinum paniculatum</i> (Jacq.) Gaertn	洋参, 荷兰 毛茛科	美洲	均有栽培	杂草	肥沃疏松、排水良好的沙壤土生长为好。夏季菜地和苗圃地多有发生。	中国农业出版社, 811
127.	Ranunculaceae 田野仁蕈 <i>Ranunculus arvensis</i> L.		欧洲和亚洲西部共同发源地	湖北有逸生	一般性杂草	生于路边砂土地	中国植物志编辑委员会, 1980. 中国植物志. 28 卷. 328; http://weed.njau.edu.cn/exowort/exoflo-ra.htm
	木犀草科 Resedaceae						
128.	黄木犀草 <i>Reseda lutea</i> L.	细叶木犀草	欧洲, 亚洲西部, 非洲北部	辽宁省金县旅顺等地	一般性杂草	逸为野生, 常沿铁路边山坡生长, 或生于岛屿(旅顺野猫岛)	中国植物志编辑委员会, 1984b. 中国植物志. 34 卷第 1 分册. 21
	茜草科 Rubiaceae						
129.	阔叶丰花草 <i>Spermacoe latifolia</i> Aubl. (<i>Borreria latifolia</i> (Aubl.) K. Schum.)		南美洲热带地区	广东南部、海南、香港、台湾和福建南部	一般性杂草	华南地区常见杂草, 常生于红壤上, 见于 1000m 以下非墟、荒地、沟渠边、山坡路旁或为田园杂草; 入侵茶园、桑园、果园、咖啡园、橡胶园以及花生、甘蔗、蔬菜等旱作物地, 对花生危害尤为严重	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 153
	玄参科 Scrophulariaceae						
130.	野甘草 <i>Scoparia dulcis</i> L.	冰糖草	美洲热带	广东、广西、云南、福建、台湾、香港、澳门、海南、云南、上海	一般性杂草	一般性农田和荒草, 多生长于荒地、山坡、路旁, 喜生于湿润环境, 海岸沙地也能生长	中国植物志编辑委员会, 1979d. 中国植物志. 67 卷第 2 分册. 85; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 147; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 923
131.	独脚金 <i>Striga asiatica</i> (L.) O. Kuntze	干草, 矮脚子	亚洲热带, 非洲和大洋洲	云南、贵州、广西、广东、湖南、江西、福建、台湾等地	一般性杂草	生于庄稼地和荒草地, 寄生于作物的根部, 受害重	中国植物志编辑委员会, 1979 年. 中国植物志. 67 卷第 2 分册. 359; 李扬汉, 1998. 中国杂草志. 926

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
132.	直立婆婆纳 <i>Veronica arvensis</i> L.		热带地区 欧洲	安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、福建、贵州	一般性 杂草	生于海拔 2 000m 以下的路旁、田边及荒野草地，为夏收作物(麦类、油菜、蔬菜)田常见杂草，发生量小，危害轻	江苏植物研究所, 1982. 江苏植物志, 江苏科技出版社, (下卷), 761~762; 中国植物志编辑委员会, 1979d. 中国植物志. 67 卷第 2 分册. 282;
133.	睫毛婆婆纳 <i>Veronica hederaefolia</i> L.	常春藤婆婆纳	欧洲、非洲	江苏的南京、浙江的定海	一般性 杂草	喜温性杂草, 其 6 倍体和 2 倍体种多分布于受人为干扰的环境中, 4 倍体种耐荫能力强, 多生长于林下环境中, 也是麦田的重要杂草	李扬汉, 1998. 中国杂杂志. 931~932 郭水良, 李扬汉, 1996. 新外来杂草—常春藤婆婆纳. 杂草科学, 3: 6~7; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 148
134.	阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i> Poir.	波斯婆婆纳	西亚至伊朗	河北、安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、四川、贵州、新疆、西藏	一般性 杂草	生于宅旁、路旁, 也是旱地夏熟作物田杂草, 特别是麦田中, 对作物造成严重危害。在长江沿岸及其以南的西南地区旱性地发生较多, 有时成为优势种群, 危害较重, 防除较为困难	江苏植物研究所, 1982. 江苏植物志, 江苏科技出版社, (下卷), 760~761; 中国植物志编辑委员会, 1979d. 中国植物志. 67 卷第 2 分册. 285; 李扬汉, 1998. 中国杂杂志. 936~937; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 149
135.	婆婆纳 <i>Veronica polita</i> Fries (= <i>Veronica didyma</i> Tenore var. <i>lilacina</i> Yamazaki)		西亚	北京、河北、山东、河南、陕西、甘肃、青海、新疆、江苏、安徽、浙江、上海、江西、福建、湖北、四川、重庆、贵州、广西、云南	一般性 杂草	生于 2 200m 以下的荒地、林缘、路旁、田间常见杂草, 主要危害小麦、大麦、蔬菜和果树等	中国植物志编辑委员会, 1979. 中国植物志. 67 卷第 2 分册. 284~285; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 150
136.	洋金花 <i>Datura metel</i> L.	白花曼陀罗	印度	我国各地	一般性 杂草	生于荒地及路边, 菜地、庭院边亦有生长, 为路边一般性杂草, 发生量较小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂杂志. 940
137.	曼陀罗 <i>Datura stramonium</i> L.	醉仙桃, 醉心花	墨西哥	各省均有分布	有毒杂草	为旱地、果园和苗圃杂草, 或入侵林缘、路旁和草地。全株含生物碱, 对人、家畜、鱼类和鸟类有强烈的毒性, 其中果实和种子毒性较大	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 142
138.	假酸浆	冰粉, 鞭打	美洲	我国有栽培或逸为野生	一般性	生于田埂、路旁或农田常见, 但数量较少, 危害不重	李扬汉, 1998. 中国杂杂志. 945

序号	科名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境/主要危害	主要参考文献
	<i>Neanara physaloides</i> (L.) Gaertn.	绣球			杂草		
139	灯笼草 <i>Physalis angulata</i> L.	毛茛、苦 苣草、灯笼 泡、天泡草、 黄姑娘、朴 朴草、小酸 浆	美洲	华东、华中、华南及西南地区	一般性 杂草	常生于山坡林下或田边路旁,为秋收作物(棉花、玉米、大豆、甘薯、甘蔗、蔬菜)田和路埂常见杂草,发生量较大,危害较重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 947; 中国植物志编辑委员会, 1978. 中国植物志. 67 卷第 1 分册. 58
140	毛酸浆 <i>Physalis pubescens</i> L.	洋姑娘	美洲	黑龙江、吉林和辽宁三省有栽培,常逸为野生	一般性 杂草	喜生于湿润土壤,常见于路边、田头	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 948-949; 中国植物志编辑委员会, 1978. 中国植物志. 67 卷第 1 分册. 58-59
141	喀西茄 <i>Solanum aculeatissimum</i> Jacq. (<i>S. khasianum</i> Clarke)	苦颠茄、苦 天茄、刺天 茄	巴西	浙江(平阳)、福建、江西、湖南、广西、广东、云南、贵州、四川、重庆、西藏	有毒杂 草	沟边、灌丛、荒地、草坡或疏林中。具刺杂草,全株含有毒生物碱,未成熟果实毒性较大,人和家畜误食可引起中毒	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 143
142	牛茄子 <i>Solanum capsicoides</i> All.	番鬼茄、大 颠茄、颠茄 子、颠茄	巴西	福建、江西、广东、香港、海南、台湾、湖南、贵州、四川、云南	有毒杂 草	生于海拔 200~1 500m 的荒地、疏林或灌丛中。具刺杂草,植株及果含龙葵碱,误食后可导致人畜中毒	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 144
143	假烟叶树 <i>Solanum erianthum</i> D. Don	野烟叶、土 烟叶、茄树	热带美洲	福建、台湾、广东、海南、香港、澳门、广西、云南、贵州、四川、西藏	有毒杂 草	通常生于海拔 300~2 100m 的荒地及山坡灌丛中。全株有毒,果实毒性较大	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 145
144	水茄 <i>Solanum torvum</i> Swartz	刺茄、山颠 茄	美洲加勒比地区	西藏(墨脱)、云南(东南部、南部及西南部)、贵州、广西、广东、海南、香港、澳门、福建、台湾	一般性 杂草	喜生于路旁、荒地、山坡灌丛、河谷及村庄附近潮湿处,海拔 200~1 650m。具刺杂草,有时入侵旱作物地	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 146
	梧桐科 Sterculiaceae						
145	印度蛇蒴子 <i>Waltheria indica</i> L.		美洲热带	广东、广西、海南、香港、台湾、福建(南部)、云南等地	一般性 杂草	多生于山野间向阳草坡上,一般分布于北回归线以南的海边和丘陵区,未见侵入农田	中国植物志编辑委员会, 1984a. 中国植物志. 第 49 卷第 2 分册. 169; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	伞形科 Umbelliferae						种, 128
146.	芫荽 <i>Coriandrum sativum</i> L.	香菜, 胡荽	欧洲地中海地区	我国各地有栽培	一般性杂草	栽培蔬菜, 有时逸生为杂草。部分菜地、麦田、果园或路埂常见	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 979 中国植物志编辑委员会, 1979e. 中国植物志. 55 卷第 1 分册. 89
147.	野胡萝卜 <i>Daucus carota</i> L.		中亚西亚一带	全国各省(区)均有分布	一般性杂草	生于田边、路旁、渠岸、荒地、农田或灌丛中, 喜湿润, 较耐旱。果园、茶园、夏秋作物田常见, 部分作物受害较重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 980; http://www.hulu.com.tw/vsg/%E8%83%A1%E8%98%BF%E8%94.htm
148.	刺芹 <i>Eryngium foetidum</i> L.	假香荽, 野香草, 刺芹荽, 香信, 假荽, 洋荽, 节节花, 铺荽	加勒比海地区	广东、广西、云南、贵州	一般性杂草	生于林缘、或田中; 为果园和农田中常见杂草, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 981; 中国植物志编辑委员会, 1979e. 中国植物志. 55 卷第 1 分册. 64
	蓴麻科 Urticaceae						
149.	小叶冷水花 <i>Pilea microphylla</i> (L.) Liebm	透明草, 小叶冷水麻, 礼花草	南美洲热带地区	广东、广西、福建、江西、浙江、香港、澳门、海南、台湾	一般性杂草	常见的同属杂草, 常生于路边石缝和墙头阴湿处, 排挤本土的石生和附生草本植物, 对当地的生物多样性产生不良影响	中国植物志编辑委员会, 1995. 中国植物志. 23 卷第 2 分册. 148; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 100
	马鞭草科 Verbenaceae						
150.	马缨丹 <i>Lantana camara</i> L.	五色梅, 五彩花, 臭草, 如意草, 七变花	热带美洲	台湾、福建、广东、广西	一般性杂草, 有毒杂草	常生于海拔 80~1 500m 的海边海滩和空旷地区, 可侵犯牧场、林场、茶园和果园, 其全株和残体可产生强烈的化感物质, 严重破坏森林资源和环镜生态系统。植株有毒, 摄食叶片或果实可导致牛、马、绵羊及狗等动物及人类中毒	中国植物志编辑委员会, 1982b. 中国植物志. 65 卷第 1 分册. 17; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 138
151.	假马鞭 <i>Stachytarpheta</i>	假败酱, 倒团蛇, 玉龙鞭	中南美洲	福建、广东、广西、云西南部	一般性杂草	常生于海拔 300~580m 的山谷阴湿处草丛中	中国植物志编辑委员会, 1982b. 中国植物志. 65 卷第 1 分册. 20

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
	<i>Jamaicensis</i> (L.) Vahl	大神马鞭草, 大蓝草					
	葡萄科 Vitaceae						
152.	五叶地锦 <i>Parthenocissus quinquefolia</i> (L.) Planch.	五叶爬山虎	北美	东北、华北各地	一般性 杂草	东北、华北各地栽培, 可向南引种, 长江流域长势良好, 是优良的城市垂直绿化植物树种, 有时逸为野生	植物志编辑委员会, 1998b. 中国植物志. 48 卷第 2 分册. 20
	禾本科 Gramineae						
153.	节节麦 <i>Aegilops squarrosa</i> L. (<i>Aegilops squarrosa</i> auct. non Linn.)		亚洲西部	陕西、河南、山东、江苏	一般性 杂草	耐干旱, 喜生于旱作物田或草地, 为麦田一般性杂草, 发生量小, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1149
154.	野燕麦 <i>Avena fatua</i> L.	乌麦, 铃铛 麦	南欧地中海地区	我国南北各地均有分布	一般性 杂草	生长于荒芜田野或田间, 危害麦类、玉米、高粱、马铃薯、油菜、大豆、胡麻等作物; 同时种籽大量混杂于作物内, 降低作物的产品质量	李振宇, 解森, 2002. 中国外来入侵种. 176
155.	地稷草 <i>Axonopus compressus</i> (Swartz) Beauv.		美洲热带	我国南方各省区(引种)	一般性 杂草	我国引种栽培, 并已逸为野生杂草, 少有侵入农田, 危害小	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1170
156.	臂形草 <i>Brachiaria eruciformis</i> (J. E. Smith) Griseb.		泛热带地区	福建、云南	一般性 杂草	生长在轮作田、多年生作物田和水湿环境, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1175; http://weed.njau.edu.cn/exowort/exoflo ra.htm
157.	巴拉草 <i>Brachiaria mutica</i> (Forsk.) Stapf	钝头臂形草	西非	我国许多地区引种栽培	一般性 杂草	在我国许多地区引用栽培作牲畜材料, 可逸生于荒地、作物轮作地、多年生作物地、草地、湿地。危害不严重	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1176-1177; http://icgr.caas.net.cn/kp/%E5%B7%B4%E6%8B%89%E8%8D%89.htm http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqres-ult.asp?exoid=126
158.	扁穗雀麦 <i>Bromus catharticus</i> H.B.K.		南美秘鲁	江苏	一般性 杂草	喜生于山坡荫蔽处及溪沟边	

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
159.	蒺藜草 <i>Cenchrus echinatus</i> L.	刺蒺藜草	热带美洲	福建、台湾、广东、香港、广西、海南、云西南部	一般性 杂草	多生于荒地、牧场、田边、路旁、草地、沙丘、河岸和海滨沙地；耐干旱，耐反复修剪。危害谷物、甘蔗、棉花、大豆、花生、甘薯、紫花苜蓿、菠萝、咖啡、可可及果园、葡萄园等多种作物地和果园，有时危害较严重。侵入裸露的或未开垦土地，能很快扩充占领空隙；是热带牧场中的有害杂草，气刺苞壳可刺伤人和动物的皮肤，或混在饲料或牧草里刺伤动物的眼睛、口和舌头	李振宇，解焱，2002. 中国外来入侵种. 178; 李扬汉，1998. 中国杂草志. 1186
160.	小花蒺藜草 <i>Cenchrus pauciflorus</i> Benth	疏花蒺藜草、草狗子、草蒺藜	北美洲及热带沿海地区	辽宁	恶性杂草	比较适于沙质土壤，耐旱，耐贫瘠，抗寒，抗病虫害。在侵袭区高燥干旱沙质土壤的丘陵、沙岗、堤坝、道路、撂荒地、林间空地、甚至农田，形成点状、带状、片状分布	杜广明等，1995. 中国草地，(3): 71-73
161.	种 <i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv	稗子	欧洲和印度	全国水稻种植区均有分布	恶性杂草	喜温暖、潮湿环境，适应性强。为水稻田危害最严重的恶性杂草。与水稻的伴生性强，极难清除，亦发生于潮湿旱地，危害棉花、大豆等秋熟旱作物	李扬汉，1998. 中国杂草志. 1220
162.	芒麦草 <i>Hordeum jubatum</i> L.	芒颖大麦草	美洲，欧洲，亚洲寒温带	黑龙江、吉林、辽宁	一般性 杂草	生长于路旁和田野以及旱作物地。农田有生长，危害旱作物。我国东北有逸生者	李扬汉，1998. 中国杂草志. 1253-1254
163.	多花黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i> Lam.		欧洲	各地引种作牧草	一般性 杂草	田间杂草，多生于草地上。我国引种作牧草，为赤霉病和冠锈病的寄主	李扬汉，1998. 中国杂草志. 1267; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlres-ult.asp?exoid=24
164.	黑麦草 <i>Lolium perenne</i> L.	多年生黑麦草	欧洲	各地引种作牧草	一般性 杂草	田间杂草，生于草原、牧场、草坪和荒地。我国引种作牧草。为赤霉病和冠锈病寄主	李扬汉，1998. 中国杂草志. 1268; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlres-ult.asp?exoid=128
165.	波斯黑麦草 <i>Lolium periscium</i> Boiss.et Hohen.	欧毒麦	欧洲	青海、云南等地	一般性 杂草	我国有引种作牧草，青海、云南有逸生者，成为田间杂草	李扬汉，1998. 中国杂草志. 1268
166.	毒麦 <i>Lolium temulentum</i> L.	黑麦子，小尾巴麦子	欧洲	除华南外，全国各地均有分布	有毒杂草	田间杂草，一般混生于麦田中，为有毒杂草，籽粒含毒麦碱，对人、畜有毒。适应性及繁殖能力较小，麦强，形成排挤性危害，影响麦的质量和产量。毒	李扬汉，1998. 中国杂草志. 1269; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlres-ult.asp?exoid=26

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
167.	田毒麦 <i>Lolium temulentum</i> L. var. <i>arvense</i> Bab.		欧洲	青海、江苏、江西、贵州、云南	有毒杂草	麦未成熟时或多雨潮湿季节收获的种子毒力最强与毒麦相似	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1270; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlres-ult.asp?exoid=27
168.	长芒毒麦 <i>Lolium temulentum</i> L. var. <i>longiaristatum</i> Parnell		欧洲	青海、安徽、江苏、江西、贵州、云南	有毒杂草	麦田杂草。部分地区田块发生数量大。我国小麦种植区时有发生和危害,其子实皮与糊粉层之间有真菌寄生,产生毒麦碱,人畜和家禽食之,均会发生中毒	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1270; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlres-ult.asp?exoid=28
169.	大黍 <i>Panicum maximum</i> Jacq.	喀尼草, 普通大黍	热带东非	福建、广东、广西、海南、台湾、香港、云南(南部)	一般性杂草	在炎热、湿润、年降水量大于 1 000mm 的热带地区生长良好,但不耐寒。在荒野路旁归化。在台湾和香港已成为常见杂草	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 180
170.	铺地黍 <i>Panicum repens</i> L.	铺地黍, 硬骨草	巴西	华南、华东地区有记载	恶性杂草	多生长于海边或潮湿之处,常入侵旱作物地,是旱地恶性杂草。生长迅速,和犬根茎大量抢夺田间养分,地上部分则遮盖作物茎叶,使田间通风透光不良,影响作物生长发育。是稻纵卷叶螟的宿主,传播虫害。是草坪的主要害草之一,危害潜力高,难根除,目前无理想的除草剂可防治,应避免侵入	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 181
171.	两耳草 <i>Paspalum conjugatum</i> Bergius	叉仔草, 八字草	热带美洲	海南、广东、香港、福建、广西、云南、四川、贵州、西藏(东南部)、江西、湖南(南部)、台湾	一般性杂草	生长于田野潮湿之地,在海拔 2 000m 以下的林缘湿地常有成片生长。该种匍匐枝蔓延广,成片生长时大量消耗土壤养分,侵入农田和果园时,减少作物产量	李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 182
172.	毛花雀稗 <i>Paspalum dilatatum</i> Poir.		南美	上海、台湾、云南、浙江、湖北(武昌)、广州等地	一般性杂草	上海、台湾、云南、广州等地有引种。可逸生为杂草,生于路旁,适应性广,分布于全球热带和温暖地区	中国植物志编辑委员会, 1990b. 中国植物志. 第 10 卷第 1 分册. 294, 281, 289
173.	裂颖雀稗 <i>Paspalum fimbriatum</i> H.B.K.		台湾	台湾	一般性杂草	生于房前村边,为台湾归化植物	中国植物志编辑委员会, 1990b. 中国植物志. 第 10 卷第 1 分册. 295, 281
174.	象草 <i>Pennisetum purpureum</i> Schum.		非洲	江西、四川、广东、广西、云南等地有引种	一般性杂草	为优良饲料,我国引种栽培普遍,变异也较大,可逸生为杂草	中国植物志编辑委员会, 1990b. 中国植物志. 第 10 卷第 1 分册. 373, 361, 367

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
175.	牧地狼尾草 <i>Pennisetum setosum</i> (Swartz) Rich.		热带美洲及热带非洲	台湾及海南已引种而归化	一般性 杂草	常见于山坡草地	中国植物志编辑委员会, 1990b. 中国植物志. 第10卷第1分册. 365
176.	小蒺藜草 <i>Phalaris minor</i> Retz.	小蒺藜草	不详	云南	一般性 杂草	多生于荒地、轮作和多年生作物地, 危害小	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1297; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlresult.asp?exoid=32
177.	奇异蒺藜草 <i>Phalaris paradoxa</i> L.		不详	云南	一般性 杂草	多生于荒地、作物地等, 危害轻. 世界各大洲温暖地区均有分布	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1298; http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlresult.asp?exoid=33
178.	梯牧草 <i>Phleum pratense</i> L.	猫尾草	欧洲、亚洲西部	河北、山东、河南、甘肃、宁夏	一般性 杂草	野生物多见于海拔1800m之草原及林缘	中国植物志编辑委员会, 1987b. 中国植物志. 第9卷第3分册. 北京: 科学出版社. 258
179.	加拿大早熟禾 <i>Poa compressa</i> L.		欧洲	河北、山东、江西、安徽、江苏	一般性 杂草	适应于较干燥、凉爽的气候, 做为草坪引种后有逸生	http://weed.njau.edu.cn/exowort/sqlresult.asp?exoid=125
180.	普通早熟禾 <i>Poa trivialis</i> L.		欧洲	庐山有栽培	一般性 杂草	多生于潮湿的山坡草地或林下, 危害轻	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1310
181.	红毛草 <i>Rhynchosyrum repens</i> (Willd.) C.E. Hubb.		南非	广东、台湾等省有引种, 已归化	一般性 杂草	多生于河边、山坡草地. 未见进入农田	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1318
182.	棕叶狗尾草 <i>Setaria palmifolia</i> (Koen.) Stapf	斧叶草, 雏茅(海南), 棕叶草(广西)	非洲	浙江、江西、湖北、湖南、福建、台湾、广东、广西、四川、贵州、云南、西藏、海南	一般性 杂草	山坡或谷地林下明显处	中国植物志编辑委员会, 1990b. 中国植物志. 第10卷第1分册. 337
183.	假高粱 <i>Sorghum halepense</i> (L.) Pers.	石牙高粱, 宿根高粱, 阿拉伯高粱, 斑生草, 亚刺伯高粱	地中海	我国有引种	恶性杂草	为检疫杂草之一。多生湿润处、草地、旱作物地上, 危害轻。生长在轮作作物、多年生作物地, 对作物危害较严重。可通过生态位竞争使作物减产, 还是多种致病微生物和害虫的寄主, 此外可与同属其他种杂交	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1337; 李振宇, 解焱, 2002. 中国外来入侵种. 183
184.	苏丹草 <i>Sorghum sudanenses</i>	草高粱	非洲	中南、西南各省	一般性 杂草	中南、西南各省有引种, 危害小	李扬汉, 1998. 中国杂草志. 1339

续表

序号	种名	俗名	原产地	国内分布	性质	生境与主要危害	主要参考文献
185.	(Piper) Stapf 五花米草 <i>Spartina alterniflora</i> Loisel.		美国东南部海岸	上海(崇明岛)、浙江、福建、广东、香港	一般性杂草	多年生草本,生于潮间带。植株耐淹,抗风浪。原产地在美国东南部海岸;在美国西部和欧洲海岸归化	李振宇,解焱,2002.中国外来入侵种.184
186.	大米草 <i>Spartina anglica</i> C.E. Hubb.		英国	辽宁(锦西)至广东(电白)80多个县(市)	恶性杂草	多年生草本,生于潮间带。1963年引入我国,在辽宁(锦西)至广东(电白)共80多个县市种植,已归化,但未见有大面积扩散	李振宇,解焱,2002.中国外来入侵种.184
187.	香根草 <i>Petiveria zizanioides</i> L.	碧兰草,培地茅	地中海地区至印度	江苏、浙江、福建、台湾、广东、海南、四川	一般性杂草	喜生潮湿溪流旁和疏松黏壤土上。该种植物高大,常形成密丛,还能分泌化感物质,排挤当地植物	李振宇,解焱,2002.中国外来入侵种.186
	雨久花科 Pontederiaceae						
188.	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms.	水葫芦	美洲	南方各省普遍发生	恶性杂草	可在各种湿生环境中生长,包括湖泊、溪流、池塘、水渠等,水库、湖泊、池塘、沟渠、流速缓慢的河道等是其最为适宜的生境。在其发生区内,总是成片发生,覆盖大面积的水面,影响到水资源利用的各个方面。可堵塞河道、影响航运、阻碍排灌、降低水产品产量;可破坏本地水生生态系统,威胁本地生物多样性;可影响生活用水,孳生蚊蝇,威胁人体健康	李扬汉,1998年.中国杂草志.1388

(郭建英 万方浩)

主要参考文献

- 安徽植物志编写组, 1986. 安徽植物志(四), 安徽科技出版社 [Flora of Anhui province Edita. 1986. Flora of Anhui province, Volume 4. Hefei: Anhui Technology and Science Press]
- 丁炳扬, 于明坚, 金孝锋等. 2003. 水盾草在中国的分布特点和入侵途径. 生物多样性, 11(3): 223~230 [Ding B Y, Yu M J, Jin X F *et al.* 2003. The distribution characteristics and invasive route of *Cabomba caroliniana* in China. *Biodiversity Science*, 11(3): 223~230]
- 杜广明, 曹凤芹, 刘文斌等. 1995. 辽宁省草场的少花蒺藜草及其危害. 中国草地, (3): 71~73 [Du G M, Cao F Q, Liu W B *et al.* 1995. The distribution and harmfulness of *Cenchrus pauciflorus* Benth in Liaoning province. *Grassland of China*, (3): 71~73]
- 傅立国, 陈潭清, 郎楷永等. 2003. 中国高等植物. 5卷. 青岛: 青岛出版社 [Fu L G, Chen T Q, Lang K Y *et al.* 2003. Higher plants of China. Tomus 5. QingDao: QingDao Publishing House]
- 广东植物研究所, 1974. 海南植物志(三) [Institute of botany. 1974. Flora of Hainan province, Volume 3]
- 郭水良, 李扬汉. 1996. 新外来杂草——常春藤婆婆纳. 杂草科学. 3: 6~7 [Guo S L, Li Y H. 1996. A new invasive alien weed—*Veronica hederifolia* L. *Weed Science*, 3: 6~7]
- 贺士元, 邢其华, 尹祖棠, 江先甫. 1984. 北京植物志. 北京: 北京出版社. 624 [He S Y, Xing Q H, Yin Z T, Jiang X P. 1984. Flora of Beijing (Revised Edition). Volume I. Beijing: Beijing Publish House. 624]
- 黄浩平. 2000. 菊苣的栽培与利用. 云南农业科技, (6): 33~34 [Huang H P The cultivation and exploitation *Cichorium intybus* L. *Yunnan Agriculture Science*, 6: 33~34]
- 江苏植物研究所. 1982. 江苏植物志, 江苏科技出版社, (下卷), 903~904 [Jiangsu Institute of botany. 1982. Flora of Jiangsu province. Jiangsu Technology and Science Press. Volume 2. 903~904]
- 蓝崇钰, 王勇军, 笕启杰. 2001年. 广东内伶仃自然资源与生态研究, 中国林业出版社 [Lan C Y, Wang Y J, Zan Q J. 2001. The research of the natural resource and ecology in Guangdong Lingding. Beijing: China Forestry Publishing House]
- 李扬汉. 1998. 中国杂草志. 北京: 中国农业出版社 [Li Y H. 1998. Weeds of China. Beijing: Chinese Agriculture Press]
- 李振宇, 解焱. 2002. 中国外来入侵种. 北京: 中国林业出版社 [Li Z Y, Xie Y. 2002. Invasive alien species in China. Beijing: China Forestry Publishing House]
- 强胜. 2001. 杂草学, 中国农业出版社 [Qiang S. 2001. Weed Science. Beijing: Chinese Agriculture Press]
- 邵婉婷, 韩诗畴, 黄寿山. 2002. 控制外来杂草薇甘菊的研究进展. 广东农业科学, 1: 43~48 [Shao W T, Han S C, Huang S S. 2002. The research of control an invasive alien weed—*Mikania micrantha* H. B. K. *Guangdong Agricultural Science*, 1: 43~48]
- 许又凯, 刘宏茂, 刀祥生. 2003. 红瓜叶营养成分及作为野生蔬菜的评价. 云南植物研究, 25(6): 680~686 [Xu Y K, Liu H M, Dao X S. 2003. The nutritional contents of *Coccinia grandis* and its evaluation as a wild vegetable. *Acta Botanica Yunnanica*, 25(6): 680~686]
- 笕启杰, 王勇军, 王伯荪等. 2000. 外来杂草薇甘菊的分布及危害. 生态学杂志, 19(6): 58~61 [Zan Q J, Wang Y J, Wang B S *et al.* 2000. The distribution and harm of the exotic weed *Mikania micrantha*. *Chinese Journal of Ecology*, 19(6): 58~61]
- 中国科学院中国植物志编辑委员会. 1977. 中国植物志. 66卷 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. 1977. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Tomus 66. Beijing: Science Press]
- 中国植物志编辑委员会. 1978年. 中国植物志. 67卷第1分册. 北京: 科学出版社 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. 1978. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Tomus 67(1). Beijing: Science Press]
- 中国植物志编辑委员会. 1979a. 中国植物志. 25卷第2分册. 北京: 科学出版社 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. 1979a. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Tomus 25(2). Beijing: Science Press]
- 中国植物志编辑委员会. 1979b. 中国植物志. 75卷. 北京: 科学出版社 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. 1979b. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Tomus 75. Beijing: Science Press]
- 中国植物志编辑委员会. 1979c. 中国植物志. 64卷第1分册. 北京: 科学出版社 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. 1979c. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Tomus 64(1). Beijing: Science Press]
- 中国植物志编辑委员会. 1979d. 中国植物志. 67卷第2分册. 北京: 科学出版社 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. 1979d. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Tomus 67(2). Beijing: Science Press]
- 中国植物志编辑委员会. 1979e. 中国植物志. 55卷第1分册. 北京: 科学出版社 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. 1979e. Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Tomus 55(1). Beijing: Science Press]
- 中国植物志编辑委员会. 1980. 中国植物志. 28卷. 北京: 科学出版社 [Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae

附录 2 中国主要农林外来入侵节肢动物名录

Appendix 2 List of Invasive Alien Invertebrates in Agriculture and Forestry

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
	叶螨科 Tetranychidae						
1.	二斑叶螨 <i>Tetranychus urticae</i> Koch	二点叶螨, 叶锈螨, 棉 红蜘蛛, 普 通叶螨	不详	全国各地	蔬菜、大豆、花生、玉米、高粱、 苹果、梨、桃、杏、李、樱桃、 葡萄、柿、豆等多种作物和近百 种杂草	凭借风力、流水、高梁、昆 虫、鸟兽、人畜、各 种农具和花卉苗木 携带传播	蔡双虎和程立生, 2003. 热带农业科学, 23(2): 68-74; 程立生, 1998. 世界热带农业信息, 10: 11-12
	蜚蠊科 Blattidae						
2.	德国小蠊 <i>Blattella germanica</i> Linnaeus		欧洲	全国各地	工厂产品、店中商品、家中食物	主动扩散, 通过爬行 散布到不同场所。随 物品携带、运输而广 为扩散	蒋洪, 2003. 中华卫生杀虫药械, 9(3): 44-46
3.	美洲大蠊 <i>Periplaneta</i> <i>americana</i> (Linnaeus)	蟑螂、船 蟑、茶婆虫	非洲热带或 亚热带地区	全国各地, 尤其南方 地区	工厂产品、店中商品、家中食物、 通讯设备、电脑等	主动扩散, 通过爬行 或滑翔散布到不同 场所。被动扩散是随 物品的携带、运输而 广为扩散	李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种, 64
	木白蚁科 Kalotermitidae						
4.	小糙白蚁 <i>Incisitermes minor</i> (Hagen)	土木白蚁	美国加州南 部西海岸	浙江、上海、江苏、江 苏南京等地	木材、桥梁、电缆、图书、棉麻	随货物、纸张、木材 等传播	黄博严等, 1992. 华中农业大学学报, 11(2): 150-154; 李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种, 65
	蚱科 Coccidae						
5.	黑灰蚱 <i>Parasaissetia nigra</i> (Nieth.)		可能原产于 非洲	台湾、香港	多食性种类, 可危害 77 科植物, 特别是原产于热带的观赏植物。 如木槿、常春藤、鳄梨、毛叶番	自然扩散十分有限, 所有虫态可通过果 实和观赏植物或繁	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 159

续表

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
	盾蚧科 Diaspididae				荔枝、柑橘、咖啡、棉花、芭豆、番石榴、橡胶树、芒果、檀香树、泡桐树等	殖材料携带传播	
	松栎干蚧 <i>Membrurella pitiosophila</i> Takagi	松栎盾蚧	不详	广东、香港、澳门、台湾等地	松属植物,如马尾松、湿地松、黑松、湿地松、短叶松等	在初孵幼虫未进入固定阶段时,能随着风雨、流水、动物和人的生产活动,特别是随活苗木和新伐枝叶进行传播	中华人民共和国北京动植物园检疫局,1999.中国植物检疫性害虫图册.10; 中华人民共和国动植物园检疫局和农业部植物检疫实验所,1996.中国进境植物检疫有害生物选编.16; 中国植物保护学会植物检疫学分会,1993.植物检疫害虫彩色图谱.136
	珠蚧科 Margarodidae						
7.	日本松干蚧 <i>Matsucoccus matsumurae</i> (Kuwana.)	赤松干蚧,松干蚧,松干介壳虫	主要分布在日本、朝鲜、韩国,该地区可能是其原产地	辽宁、山东、江苏、浙江、安徽、上海等地	赤松、油松、马尾松、黑松、黄松、千头赤松、台湾松、重直赤松等	该虫自然扩散蔓延能力有限,主要随种苗、枝条、原木的运输进行远距离传播	中华人民共和国北京动植物园检疫局,1999.中国植物检疫性害虫图册.14; 中华人民共和国动植物园检疫局和农业部植物检疫实验所,1996.中国进境植物检疫有害生物选编.430; 萧刚柔,1991.中国森林昆虫.第二版.244~247
	粉蚧科 Pseudococcidae						
8.	湿地松粉蚧 <i>Oracella acutus</i> (Lobdell)	火炬松粉蚧	美国东南部	广东、广西、福建等地	湿地松、火炬松、长叶松等松属植物	初孵若虫可随气流自然向外扩散,也可借助苗木、球果、接穗的调运传播到它自身所难以到达的地方	汤才等,1995.森林病虫通讯.3:12~14; 李振宇和解焱,2002.中国外来入侵种.69; 徐家雄等.2002.广东林业科技,18(4):1~6
	瘿绵蚜科 Pemphigidae						
9.	苹果绵蚜 <i>Eriosoma lanigerum</i>	苹果绵虫,白毛虫,白絮虫,棉花	北美洲东部	山东、天津、河北、陕西、河南、辽宁、江苏、云南、西藏(拉萨)	以苹果为主,其次海棠、沙果、花红、山荆子等,在原产地还危害洋梨、山楂、花楸、美国榆等	在田间常有翅蚜自身爬行及迁飞,或借风力传播.附者在农	全国农业技术推广服务中心,2001.植物检疫性有害生物图鉴.244~245 中国植物保护学会植物检疫学分会,1993.植物检疫

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
	(Hausmann)	虫、血色蚜虫		萨)等地			害虫彩色图谱, 150; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册, 16
	根瘤蚜科 Phylloxera						
10.	葡萄根瘤蚜 <i>Viteus vitifolia</i> (Fitch)	葡萄根虱、根瘤蚜	北美洲西岸地区	山东烟台、辽宁及陕西三省局部地区有分布记载	单食性, 仅危害葡萄属植物(葡萄及野生葡萄)	主要随苗木传播, 亦可随表运耕耘工具、风力或若虫爬行或随灌溉水传播	中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 146; CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 250; 张军翔和李玉鼎, 2001. 中外葡萄与葡萄酒, 4: 27-29
	粉虱科 Pseudococcidae						
11.	烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius)	棉粉虱、什曹粉虱	烟粉虱首先报道于希腊, 真正起源还不确定。Gill 推断其起源于印度半岛、或非洲北部到中东地区	全国范围广布	寄主范围广, 据报道已超过 74 科 600 多种, 如菊科、旋花科、十字花科、葫芦科、大戟科、豆科、锦葵科、茄科等植物。除危害经济作物外, 还危害观赏植物及野生杂草	成虫随风或较强气流顺向远距离传播。各虫态都能随寄主植物的繁殖材料和切花异地传播	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 44; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 154; Gill R J, 1992. <i>Pan-Pacif. Entomol.</i> , 68: 144~152; Xu R M, 1996. In: <i>Bemisia</i> 1995: Taxonomy, Biology, Damage, Control and Management. 125~131
12.	温室白粉虱 <i>Tritaurodes vaporariorum</i> (Westwood)	小白蛾	巴西、墨西哥一带	我国的东北、华北、华东和西北各省普遍发生	寄主范围广, 据统计包括 47 科 900 余种植物, 包括多种蔬菜、花草、特用作物、牧草、木本植物等。偏嗜番茄、黄瓜和烟草等	因检疫不严, 通过苗木运输等人为因素而扩大传播区域	胡敦孝和吴杏霞, 2001. 植物保护, 27(5): 15~18; 李清西等, 1997. 新疆农业大学学报, 20(2): 22~29
	蓟马科 Thripidae						

纹表

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主危害	传播途径	主要参考文献
13.	西花蓟马 <i>Frankliniella occidentalis</i> (Perg.)	苜蓿蓟马	北美地区国家	北京于2003年有报道	寄主范围广泛, 可寄生66科200多种植物, 如: 杏、洋桃、李、玫瑰、甜豌豆、豌豆、番茄、辣椒、甜菜、胡萝卜、棉花、葡萄、洋葱、菜豆、菊花、草莓、石竹属、唐菖蒲属、扶郎花属、葫芦科作物等	主要是随植物原材料的进出口传播, 也可随气流进行长距离的扩散	全国农业技术推广服务中心, 2001. 植物检疫性有害生物图鉴, 326-327; 张友军等, 2003. 植物保护, 29(4): 58; Gaum W G <i>et al.</i> , 1994. Bulletin of Entomological Research, 84(2): 219-224. Genn C <i>et al.</i> , 1994. Journal of Applied Entomology, 118(4-5): 370-377
14.	长角象科 Anthribidae 咖啡象 <i>Araucoccus fasciculatus</i> De-Geer		不详	除西藏、内蒙古外均有发生	野外危害可可、咖啡、豆蔻种子。仓库内还危害咖啡豆、棉籽、玉米、姜下、薯干、干果、酒曲、植物性药材等	成虫飞翔自然扩散。随被害种子、果品调运, 包装器材和运输工具等远距离传播	中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 56; 中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编, 393-395
15.	长蠹科 <i>Bostrychus</i> 双钩异翅长蠹 <i>Heterobostrychus acqualis</i> (Waterhouse)		不详	广东、广西、云南、海南、香港、台湾	黑格、白栎、华榿、凤凰木、黄桐、橡胶树、木棉、翻白叶、琼楠、油楠、橄榄、菠萝、柳枝、乳香、合欢、洋椿、厚皮树、银合欢、洋椿、黄桫、龙竹、龙脑香、嘉榄、芒果、桑、紫檀、柚木、榆绿木、榄仁树、大沙叶、白榄、小叶胭脂、山荔枝等	随木材、包装木箱、藤枝及其运输工具传播	中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 122; 萧刚柔, 1991. 中国森林昆虫, 第二版, 417-418 陈志杰, 1990. 植物检疫, 4(4): 264-267; 马以桂, 王宏伟, 1995. 天津农林科技, (4): 47-48
16.	豆象科 <i>Bruchidae</i> 菜豆象 <i>Acanthoscelides obiectus</i> (Sag)	大豆象	中美和南美	台湾, 1991年在吉林省图门地区发现此虫危害。梧州、北海、温州、防城、深	主要危害菜豆属植物, 也危害豇豆、兵豆、鹰嘴豆、木豆、蚕豆和豌豆等多种食用及野生豆类, 但不危害大豆	主要通过被害种子的调运进行传播。卵、幼虫、蛹和成虫均可被携带	中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编, 1-6; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 38;

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主危害	传播途径	主要参考文献
17.	豌豆象 <i>Bruchus pisorum</i> (Linnaeus)		欧洲(地中海沿岸)	国内除黑龙江外,其他各地均有分布	豌豆、香豌豆、紫花豌豆及野豌豆属	随被害寄主种子的调运做远时离传播	中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 30 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱. 50; 李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种. 72; 中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编. 396 中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编. 399; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 52
18.	蚕豆象 <i>Bruchus rufimanus</i> Boheman	豆牛、豆乌龟、蚕豆红脚象	欧洲	西北、东北、华中、华南大部分地区	国内只见其危害蚕豆	主要随被害寄主的调运进行传播	中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 36
19.	野葛豆象 <i>Callosobruchus ademptus</i> Sharp		日本	台湾. 1987年在北京口岸从日本输入的葛藤种了检疫物中截获	野葛	主要随被害寄主的调运进行传播	中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 36
20.	四纹豆象 <i>Callosobruchus maculatus</i> (Fabricius)		东亚热带	广东、广西、云南、福建等省; 国内多个口岸多次截获	主要危害豇豆, 也危害赤豆、绿豆、鹰嘴豆, 稀危害大豆、豌豆, 不危害菜豆	主要随被害寄主的调运进行传播	中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱. 42; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 40
	叶甲科 Chrysomelidae						
21.	马铃薯甲虫 <i>Leptinotarsa decemlineata</i> (Say)	马铃薯叶甲	美国西部/墨西哥北部落基山脉东麓	已逼近我国	主要危害马铃薯, 也能危害其他茄科植物, 如番茄、烟草、辣椒、茄子、颠茄、曼陀罗、酸浆等	成虫可借气流或水流传播, 还可随马铃薯等农产品及交通运输工具远距离传播	中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编. 26-36; 李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种. 75; CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物. 129-135 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 66
	象甲科						

续表

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
	Curculionidae						
22	白藜叶象甲 <i>Hypera variabilis</i> Herbst.		不详	新疆	主要危害苜蓿和三叶草	随牧草调运进行远距离传播,成虫具有一定飞翔扩散能力	赵莉,刘芳政,1994.新疆农业科学,170-191,183
23	稻水象甲 <i>Inasorhopterus ornizophilus</i> Kuschel	稻水象,稻水象,稻象甲	北美大陆	河北、辽宁、吉林、天津、北京、山东、浙江、安徽、台湾等省、直辖市	以水稻为主的禾本科、莎草科、灯心草科、鸭跖草科、马蔺科、浮萍科等7科76种以上的植物	可随干、鲜稻草、稻谷、水稻秧苗、牧草、草屑植物、腐殖土、包装材料和其他充物,以及运输车、船等作远距离传播。成虫飞翔或借助风力、水流等途径也能传播	张莉等,1994.植物检疫,8(4):215-219; 张润杰和何新风,1997.生态科学,16(1):83-87; 中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验所,1996.中国进境植物检疫有害生物选编,246-253; 中华人民共和国北京动植物检疫局,1999.中国植物检疫性害虫图册,76
24	褐纹甘蔗象 <i>Rhathodocellus lineatocollis</i> (Heller)		菲律宾	1997年传入我国台湾,广东省一些棕榈苗木场现已发现危害	多种棕榈科经济或观赏植物(大王椰子、假槟榔等)、甘蔗	以卵、幼虫、蛹和成虫随棕榈苗木和甘蔗种苗远距离传播。发生地区内成虫可作短距离飞行扩散	张润杰等,2002.昆虫知识,39(6):471-472; 荆玉栋等,2003.昆虫知识,40(5):446-448
25	锈色棕榈象 <i>Rhynchophorus ferrugineus</i> (Olivier)	红棕榈甲	据报道1891年印度就有该虫发生危害	广东、广西、海南、云南、福建、香港、台湾	椰子、棕榈、槟榔、枣椰、糖棕、龙舌兰、甘蔗等	主要随寄主实生苗、吸芽、枝条及作包装用寄主材料进行远距离传播。成虫也可飞行逐渐扩散	中华人民共和国北京动植物检疫局,1999.中国植物检疫性害虫图册,72; 张润杰等,2003.中国森林病虫,22(2):3-6
26	谷象 <i>Sitophilus granaries</i> (L.)		欧洲地中海地区及南非和北非	新疆、甘肃、黑龙江省	小麦、大麦、燕麦、黑麦、稻米、稻谷、玉米、高粱、荞麦、橡实、栗子、薯干、豆类、花生、向日葵子、面粉、干果及中药材等	不能飞翔,只能随被寄主、包装材料、保管器材、交通工具等传播	中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验所,1996.中国进境植物检疫有害生物选编,450-454; 中国植物保护学会植物检疫学分会,1993.植物检疫害虫彩色图谱,94
	皮蠹科 Dermestidae						
27	谷斑皮蠹	卡巴甲虫,	印度、斯里	台湾 据1981年普	杂食性,危害多种植物性和动物	成虫有翅但不能飞,	中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
	<i>Trogoderma granarium</i> Evants	谷糠节虫, 谷粒虫, 椰子干核甲虫	兰卡和马来西亚	查, 云南与缅甸交界处有发生, 我国多个口岸多次截获	性产品, 如小麦、大麦、麦芽、燕麦、黑麦、玉米、高粱、稻谷、面粉、花生、干果、坚果、奶粉、鱼粉、血干、蚕茧、皮毛、丝绸等	以各种虫态随被侵染的动植物产品、包装材料 and 运载工具进行传播	所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编, 44~49; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册, 86; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 80; CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 243~248
	铁甲科 Hispidae						
28.	椰心叶甲 <i>Brontispa longissima</i> (Gestro)	椰棕扁叶甲, 椰子刚毛叶甲, 红胸叶虫	印度尼西亚和巴布新几内亚	台湾、香港、广东、海南	经济或观赏棕榈科植物, 如椰子、油椰、槟榔、棕榈、鱼尾葵、山葵、刺葵、蒲葵、散尾葵、雪棕、假槟榔等	各虫态苗木或其他方式进行远距离传播, 成虫也可飞行逐渐扩散	中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 108; 曾玲等, 2003. 华南农业大学学报(自然科学版), 24(4): 37~39; 全国农业技术推广服务中心, 2001. 植物检疫性有害生物图鉴, 93~95
29.	水椰八角铁甲 <i>Octodonta nipae</i> (Maulik)		分布于马来西亚	2001年海南省东方市江苗圃引进300株华盛顿棕榈袋状苗, 种植不久即发现有虫害, 经鉴定为水椰八角铁甲, 已扑灭	椰子树类, 西密棕, 水椰子等棕榈科植物	主要随苗木运输传播	孙江华等, 2003. 昆虫知识, 40(3): 286~287
	丽金龟科 Rutelidae						
30.	日本金龟子 <i>Popillia japonica</i> Newman	日本金龟, 日本甲虫, 日本弧金龟, 豆金龟	日本	有报道在局部地区(东北)有分布, 但可能是中华弧丽金龟(<i>P. quadrangulata</i>)的误报, 至1997年未发现; 我国多个口岸有截获记录	多食性, 成虫危害果树、蔬菜、大田作物、园林观赏树种、灌木及藤本植物、花卉及杂草等300余种植物; 幼虫在地下危害大量种类草根和蔬菜、苗木、花卉的根部	主要以卵、幼虫、蛹随植物和土壤进行远距离传播, 成虫随绿色植物、植物产品及运输工具进行远距离传播, 成虫还可通过飞行局部扩散	中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册, 102; 中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫头验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编, 178~182; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 124; 全国农业技术推广服务中心, 2001. 植物检疫性有害

续表

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
	小蠹科 Scolytidae						生物图鉴. 146~148
31	红脂大小蠹 <i>Dendroctonus valens</i> <i>D. valens</i>	臭大小蠹、 红脂大小蠹	美国、加拿大、墨西哥、危地马拉和洪都拉斯等北美洲地区	山西、陕西、河北、河南等地	在北美的高主树木包括松属、云杉属、黄杉属、冷杉属和落叶松属等针叶树。在我国危害油松、华山松和白皮松	可随带皮松材远距离传播。成虫具有极强的飞行能力,最远飞行距离可达16km以上,以此进行自然蔓延	李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种. 77; 田振旺等, 2001. 山西林业科技, 2001(1): 34~40
	灯蛾科 Arctiidae						
32	美国白蛾 <i>Hyphantria cunea</i> Drury	秋幕毛虫、 秋幕蛾、天 幕毛虫	北美洲	辽宁、河北、天津、陕西、山东等地	以幼虫危害多种果树、林木、灌木、农作物、蔬菜及野生植物等。计200多种, 主要危害阔叶树、嗜食桑、白蜡、胡桃、苹果、梧桐、槭树、李、樱桃、柿、榆和柳等	主要是各虫态随植物性货物、包装和填充物、交通运输工具等远距离传播。成虫具有一定的飞翔能力	李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种. 81; 张润杰和何新风, 1997. 生态科学, 16(1): 83~87; 中华人民共和国北京动植物检验检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 120; 全国农业技术推广服务中心, 2001. 植物检疫性有害生物图鉴. 132~133
	麦蛾科 Gelechiidae						
33.	桃条麦蛾 <i>Anarsia lineatella</i> Zeller		地中海地区	西北和华北	扁桃、杏、桃、李、沙枣、樱桃等果树。幼虫蛀害嫩梢和果实	成虫可在小范围内飞行。远距离传播主要随果实或寄主的繁殖材料或包装材料进行	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物. 13~15; 萧朝柔, 1991. 中国森林昆虫. 第二版. 749~751
34.	马铃薯块茎蛾 <i>Phthorimaea operculella</i> (Zeller)	烟草潜叶蛾、马铃薯麦蛾	中美、南美北部	四川、贵州、云南、广东、广西、湖北、湖南、江西、河南、陕西、山西、甘肃、安徽、台湾等10余个省、自治区	最嗜食烟草, 其次为马铃薯和番茄, 也危害番茄、辣椒、曼陀罗、枸杞、龙葵、辣椒、酸浆、刺藜、番茄、洋金花等茄科植物	远距离传播主要是通过其寄主植物如马铃薯、种烟、种苗及未经烤制的烟叶等的调运, 也可随交通工具、包装物、运载工具等传播。成虫	朱弘复, 1953. 昆虫学报, 3(2): 259~263; 中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编. 434~440; 桂富荣, 李正跃, 2003. 昆虫知识, 40(2): 187~189; 河南农业大学植保学院, 1996. 农业昆虫学. 270~272

续表

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
35.	棉红铃虫 <i>Platyedra gossypiella</i> (Saunders)	红铃虫, 红铃麦蛾, 红铃花虫, 红铃虫, 棉花蛆	1843年由Saunders首次发现, 被认为是起源于印度	除新疆、甘肃西北部的河西走廊及青海、宁夏等地区外, 遍及其他各、省区的棉区	多食性, 寄主包括锦葵科、山麻科、木棉科等8科77种以上的植物, 最嗜棉花和洋绿豆	可借风力扩散 借籽棉和棉籽传播	Saunders, 1843. <i>Trans. R. Entomol. Soc. London</i> , 3: 284~285; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 168; 河南农业大学植保学院, 1996. 农业昆虫学, 296~299
36.	蔗扁蛾 <i>Opogona sacchhari</i> (Bojer)	香蕉蛾, 香蕉谷蛾	非洲热带、亚热带地区	北京、广东、海南、福建、河南、新疆、四川、上海、江苏、浙江	寄主范围广, 已达28科87种8变种, 其中中国外已报导的为24科46种4变种, 我国已查到14科55种2变种, 且不断发现新的寄主植物 主要危害巴西木、荷兰铁、马拉巴栗、香蕉、甘蔗、马铃薯、竹子、玉米等经济作物、观赏植物及多种贮藏块茎	成虫田间可短距离飞行扩散。幼虫、蛹可随巴西木等寄主植物远距离传播。巴西木是一种危险的传播寄主, 盆栽巴西木足以保证蔗扁蛾完成其生活年史	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 153~156; 李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种, 81; 商晗武等, 2003. 外来害虫蔗扁蛾的寄主范围. 昆虫知识, 40(1): 55~59; 全国农业技术推广服务中心, 2001. 植物检疫性有害生物图鉴, 277~279
37.	小卷叶蛾科 <i>Olethreutidae</i> 苹果蠹蛾 <i>Cydia pomonella</i> L.	苹果小卷蛾, 食心虫	欧洲东南部	新疆、甘肃等地	苹果、沙果、海棠、温柑、山楂、桃、李、杏、胡桃、扁桃、野山柞、枣、石榴、各种梨以及栗属、无花果属和花楸属的某些植物	主要以幼虫随果品、运输工具、包装物及繁殖材料作远距离传播 成虫可近距离传播	张润杰和何新风, 1997. 生态科学, 16(1): 83~87; 李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种, 80; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册, 126; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱, 158
38.	杏小食心虫 <i>Cydia prunivora</i> (Walsh)	杏小食心虫	北美东部	东北部	山楂属、苹果、梅、櫻桃。桃、玫瑰、石榴属上有记载	以寄主果实中的幼虫或附在寄主植物繁殖材料的上壤中的蛹进行远距离传播, 成虫飞行可进行近距离传播	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 79~82; Bhardwaj S P, 1987. <i>India Agriculture, Ecosystems and Environment</i> , 19: 87~91

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主危害	传播途径	主要参考文献
	潜蝇科 <i>Agromyzidae</i>						
39.	南美斑潜蝇 <i>Liriomyza haitianensis</i> (Li)	拉美甜菜斑潜蝇, 拉美豌豆斑潜蝇, 黑腿斑潜蝇	阿根廷、巴西、秘鲁等南美国家	云南、贵州、青海、山东、河北、北京、四川、新疆(乌鲁木齐)、湖北等 20 多个省、直辖市、自治区	寄主植物达 41 科百余种, 包括豆科、茄科、葫芦科、菊科、十字花科、石竹科、伞形花科、藜科、天南星科、落葵科、大戟科、车前草科、锦葵科、萝藦科、酢浆科、禾本科的多种蔬菜、花卉及一些粮食作物、杂草等	随寄主植物的调运、进行远距离传播。切花也有传带该虫扩散的危险。成虫飞行能力有限	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 135~138; 陶澍和张智英, 1996. 植物保护, (1): 41~42; 屈娟, 1998. 中国进出口动植物检疫, (4): 35~36; 于音等, 1998. 植物保护, 24(5): 30; 杨华和马俊义, 2000. 新疆农业科学, (3): 120~123
40.	美洲斑潜蝇 <i>Liriomyza sativae</i> Blanchard	蔬菜斑潜蝇, 白带斑潜蝇, 艾甜瓜斑潜蝇	南美洲(巴西)	遍布全国除西藏以外的所有省、直辖市、自治区	寄主范围广, 可危害 13 个科 110 多种植物, 尤其喜欢豆科、葫芦科、茄科作物, 如芸豆、豆角、黄瓜、甜瓜、丝瓜、西葫芦、番茄、茄子等	随寄主植物的调运、进行远距离传播。切花也有传带该虫扩散的危险。成虫飞行能力有限	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 138~142; 杨翠云, 1998. 上海农业科技, (2): 44~45; 杨华和马俊义, 2000. 新疆农业科学, (3): 120~123; 胡长效和苏新林, 2003. 江西农业学报, 15(1): 48~54; 李振宇和解森, 2002. 中国外来入侵种, 78
41.	三叶草斑潜蝇 <i>Liriomyza trifolii</i> (Burgess)		北美洲	于 20 世纪 80 年代末侵入我国台湾省, 而大陆尚未有报道	可危害 25 科的植物, 最嗜寄主为菊科植物。重要寄主有: 紫萼属、甜菜根、鬼针草属、甘蓝、辣椒、旱芹、菊花、棉花、黄瓜、大丽花属、石竹属、大蒜、扶郎花属、石头花属、香豌豆属、豌豆、大豆、金甲豆、非菜、莴苣、苜蓿、甜瓜、洋葱、芹菜、马铃薯、菠菜、番茄、旱金莲属、豇豆属、西瓜、百日菊属等	随寄主植物的调运、进行远距离传播。切花也有传带该虫扩散的危险。成虫飞行能力有限	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 142~147; 全国农业技术推广服务中心, 2001. 植物检疫性有害生物图鉴, 274~276. 张惠杰和殷运虎, 1999. 植物检疫, 13(3): 46~47; 肖良, 1994. 中国进出口动植物检疫, (2): 39~40
	瘿蚊科 <i>Cecidomyiidae</i>						
42.	高粱瘿蚊 <i>Contarinia sorghicola</i>		可能是南亚、东非	华东和华南地区	主要危害高粱属的各种、变种和品种, 如高粱、甜高粱、带高粱、约翰生草、假高粱、苏丹草等	休眠期幼虫随种子、远距离传播	中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图版, 34; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物

续表

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
	(Coquillett)						检疫性害虫图谱, 132; CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 163~168;
43.	黑森癭蚊 <i>Mayetiola destructor</i> (Say)	黑森麦秆 蚊, 小麦癭 蚊, 黑森蚊	欧洲的幼发 拉底河流域 (现伊拉克) 和苏联高加 索地区	新疆北部	小麦、大麦、黑麦、梯牧草、匍 匐龙牙草属、冰草属、野麦属和 山羊草属植物	主要随有围蛹的麦 秆和各种寄主的茎 秆远距离传播; 还可 借混有围蛹的种子 传播; 某些观赏用的 禾本科植物可能带 虫传播; 成虫可随风 近距离传播	中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物 检疫性害虫图谱, 134; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫 害虫彩色图谱, 36; CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 253~257
	实蝇科						
	Tephritidae						
44.	番石榴果实蝇 <i>Bactrocera</i> (<i>Bactrocera</i>) <i>correcta</i> (Bezzi)		可能在印 度、尼泊尔、 斯里兰卡、 巴基斯坦、 泰国等现有 分布区内	云南	番石榴、芒果、桃、蒲桃、人心 果、枣、玫瑰蒲桃、热带扁桃、 柑橘类及辣椒等多种水果和蔬菜	以卵和幼虫随寄主 果实传播, 成虫具有 一定飞行扩散能力	中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物 检疫性害虫图谱, 150; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫 害虫彩色图谱, 8
45.	瓜实蝇 <i>Bactrocera</i> (<i>Zenagodacus</i>) <i>cucurbitae</i> (Coquillett)	黄瓜实蝇、 瓜小实蝇、 瓜大实蝇、 “钉蜂”、 瓜蛆	不详	广东、广西、福建、 云南、海南、台湾和 香港	葫芦科植物; 番木瓜、西番莲、 辣椒、番石榴、洋桃、梨、芒果、 番茄和豆类等 80 多种水果和蔬 菜	主要是以卵和幼虫 随寄主运转传播。成 虫具有一定飞行扩 散能力	中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫 害虫彩色图谱, 6; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物 检疫性害虫图谱, 184; CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物, 34~44
46.	蜜柑大实蝇 <i>Bactrocera</i> (<i>Tetradaeus</i>) <i>tsuneonis</i> (Miyake)		日本九州	四川、江苏、贵州、 广西、湖南、海南、 台湾	柑橘类, 主要有蜜柑、红橘、酸 橙、金橘等	主要以幼虫随被寄 果实和种子传播; 蛹 则可随果实的包装 物或结果寄主树木 所附土壤传播; 卵也 可随果实传播。成虫	中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检疫实验 所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编, 288~290; 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫 害虫彩色图谱, 30; 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物 检疫性害虫图谱, 180;

序号	学名	俗名	原产地	国内分布	寄主/危害	传播途径	主要参考文献
						具有一定飞行扩散能力	CABI 和 EPPO, 1996. 欧洲检疫性有害生物. 34~44
	广肩小蜂科 Eurytomidae						
47.	苜蓿籽蜂 <i>Bruch aphagus</i> <i>grubus</i> (Boehman)	苜蓿广肩小蜂	可能是北美洲	新疆	紫花苜蓿、三叶草、白花草木樨、天兰苜蓿、紫云英、百脉根、骆驼刺等豆科植物和醉马草等	随种籽同运而远距离传播	中华人民共和国动植物检疫局和农业部植物检验检疫所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编. 395~396
	蚁科						
	Formicidae						
48.	长角捷蚁 <i>Anoplolepis</i> <i>gracilipes</i> (Smith)	长足捷蚁	可能是热带非洲或亚洲热带地区	广东、广西、香港、云南、福建、台湾、海南和澳门等地	威胁入侵地物种, 如蚂蚁、蜘蛛和特有植物; 取食介壳虫分泌的蜜露, 间接保护害虫; 对人类居所产生影响, 特别是食物; 可捕食出生不久的家畜、家禽	随货物、包装和填充物、交通运输工具等远距离传播	李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种. 82; Haines I H, Haines J B, 1978. Bulletin of Entomological Research, 68: 627~638
49.	大头蚁 <i>Pheidole</i> <i>megacephala</i> (Fabricius)	褐大头蚁	非洲南部	广东、广西、福建、香港、台湾等地	威胁入侵地物种, 如蚂蚁、壁虎、蜥蜴; 取食蚜虫、介壳虫分泌的蜜露, 间接保护害虫; 出没于医院、害草茎等植物根系; 出没于医院、住宅等建筑物, 危害电线、电缆、水管和电话线等	随货物、包装和填充物、交通运输工具等远距离传播. 通过从母群体分出新群体的方式自然扩散传播	李振宇和解焱, 2002. 中国外来入侵种. 83; Fellows J R, 1999. The case of Hong Kong Aliens, 9: 5~6; Hoffmann B F <i>et al.</i> , 1999. Oecologia, 120:595~604; Kadoone Farm and Botanic Garden, 2002. South China Forest Biodiversity Report Series: No.7

(郭建英 万方浩)

主要参考文献

- 蔡双虎, 程立生. 2003. 二斑叶螨的研究进展. 热带农业科学, 23(2): 68~74 [Cai S H, Cheng L S. 2003. Review of the researches on *Tetranychus urticae* Koch. *Chinese Journal of Tropical Agricultural Sciences*, 23(2): 68~74]
- 陈志舜. 1990. 双钩异翅长蠹. 植物检疫, 4(4): 264~267 [Chen Z L. 1990. Oriental wood borer. *Plant Quarantine*, 4(4): 264~267]
- 程立生. 1998. 应高度重视二斑叶螨在中国的传播、发生和危害问题. 世界热带农业信息, 10: 11~12 [Cheng L S. 1998. More attention needed for the spread, occurrence and damage of *Tetranychus urticae* Koch. *Tropic Agricultural Information of the World*, 10: 11~12]
- 桂富荣, 李正跃. 2003. 用马铃薯人工饲养马铃薯块茎蛾的方法. 昆虫知识, 40(2): 187~189 [Gui F R, Li Z Y. 2003. A method for rearing the potato tuber moth *Phthorimaea operculella* on potato. *Entomological Knowledge*, 40(2): 187~189]
- 河南农业大学植保学院. 1996. 农业昆虫学 [Plant Protection Department of Henan Agriculture University. 1996. *Agricultural Entomology*]
- 胡长效, 苏新林. 2003. 我国美洲斑潜蝇发生及防治研究进展. 江西农业学报, 15(1): 48~54 [Hu C X, Su X L. 2003. Occurrence and prevention research progresses of *Liriomyza sativae* in China. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 15(1): 48~54]
- 胡敦孝, 吴杏霞. 2001. 烟粉虱和温室白粉虱的区别. 植物保护, 27(5): 15~18 [Hu DX, Wu XX. 2001. Differences between *Bemisia tabaci* and greenhouse whitefly. *Plant Protection*, 27(5): 15~18]
- 黄博严, 张学彦, 陶维强. 1992. 湖北省白蚁种类、分布及危害的调查. 华中农业大学学报, 11(2): 150~154 [Huang B Y, Zhang X Y, Tao W Q. 1992. Investigations on the species distribution and harmfulness termite in Hubei province. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 11(2): 150~154]
- 蒋洪. 2003. 德国小蠊防治研究进展. 中华卫生杀虫药械, 9(3): 44~46 [Jiang H. 2003. Research progresses in the control of *Blattella germanica*. *Chinese Journal of Hygienic Insecticide and Equipment*, 9(3): 44~46]
- 荆玉栋, 任立, 张润志. 2003. 褐纹甘蔗象在中国的适生区分析. 昆虫知识, 40(5): 446~448 [Jing Y D, Ren L, Zhang R Z. 2003. Predicting likely areas of invasion by the Asiatic palm weevil, *Rhabdoscelus lineaticollis* in China. *Entomological Knowledge*, 40(5): 446~448]
- 李清西, 赵莉, 张军等. 1997. 温室白粉虱生物学及其防治. 新疆农业大学学报, 20(2): 22~29 [Li Q X, Zhao L, Zhang J et al. 1997. Review of the biology and control of greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera, Aleyrodidae). *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 20(2): 22~29]
- 李振宇, 解焱. 2002. 中国外来入侵种. 中国林业出版社 [Li Z Y, Xie Y, 2002. *Invasive Alien Species in China*. China Forestry Publish House]
- 林小琳. 1990. 苹果实蝇. 动植物检疫, (2): 64~65 [Lin X L. 1990. Apple Maggot. *Animal and Plant Quarantine*, (2): 64~65]
- 刘昌芬译. 1995. 咖啡果小蠹的生物生态学及其防治. 云南热带科技, 18(2): 42~45 [Liu C F translated. 1995. Bio-ecology of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) and its control. *Yunan Tropical Crop Science and Technology*, 18(2): 42~45]
- 马以桂, 王宏伟. 1995. 双钩异翅长蠹. 天津农林科技, (4): 47~48 [Ma Y G, Wang H W. 1995. *Heterobostrychus aequalis* (Waterhouse). *Tianjin Agricultural and Forestry Science and Technology*, (4): 47~48]
- 苗振旺, 周维民, 霍履远等. 2001. 强大小蠹生物学特性研究. 山西林业科技, 2001(1): 34~40 [Miao Z W, Zhou W M, Huo L Y et al. 2001. Study on the biological characteristic of *Dendroctonus valensle*. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2001(1): 34~40]
- 屈娟. 1998. 拉美斑潜蝇. 中国进出口动植物检疫, (4): 35~36 [Qu J. 1998. *Liriomyza huidobrensis*. *Animal and Plant Quarantine during Importation and Exportation of China*, (4): 35~36]
- 全国农业技术推广服务中心. 2001. 植物检疫性有害生物图鉴. 中国农业出版社. 483 [National Agro-Technical Extension and Service Centre. 2001. *An Atlas of Plant Quarantine Pests*. Chinese Agriculture Press. 483]
- 商晗武, 祝增荣, 赵琳等. 2003. 外来害虫蔗扁蛾的寄主范围. 昆虫知识, 40(1): 55~59 [Shang H W, Zhu Z R, Zhao L et al. 2003. Host plants of an exotic insect pest, the banana moth, *Opogona sacchari*. *Entomological Knowledge*, 40(1): 55~59]
- 孙江华, 虞佩玉, 张彦周等. 2003. 海南省新发现的林业外来入侵害虫——水椰八角铁甲. 昆虫知识, 40(3): 286~287 [Sun J H, Yu P Y, Zhang Y J et al. 2003. A new invasive coconut pest in Hainan province. *Entomological Knowledge*, 40(3): 286~287]
- 汤才, 田明义, 庞雄飞. 1995. 湿地松粉蚧在新入侵区的种群数量消长初步研究. 森林病虫害通讯, 3: 12~14 [Tang C, Tian M Y, Pang X F. 1995. A preliminary study on the population fluctuation of *Oracella acutus* in newly-invasived areas. *Journal of the Forest Pests Communaction*, 3: 12~14]

- 陶滔, 张智英. 1996. 拉美斑潜蝇的发生与防治. 植物保护, (1): 41~42 [Tao T, Zhang Z Y. 1996. Occurrence and prevention of *Liriomyza huidobrensis*. *Plant Protection*, (1): 41~42]
- 王音, 雷仲仁, 问锦曾. 1998. 南美斑潜蝇的形态特征及危害特点. 植物保护, 24(5): 30 [Wang Y, Lei Z R, Wen J Z. 1998. Morphology and damaging characteristics of *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard). *Plant Protection*, 24(5): 30]
- 萧刚采. 1991. 中国森林昆虫. 第二版. 中国林业出版社 [Xiao G R. 1991. *Forest Insect of China*. China Forestry Publishing house]
- 肖良. 1994. 三叶草斑潜蝇. 中国进出境动植物检疫, (2): 39~40 [Xiao L. 1994. *Liriomyza Trifolii*. *Animal and Plant Quarantine during Importation and Exportation of China*, (2): 39~40]
- 徐家雄, 余海滨, 方天松等. 2002. 湿地松粉蚧生物学特性及发生规律研究. 广东林业科技, 18(4): 1~6 [Xu J X, Yu H B, Fang T S et al. 2002. A study of biological characteristics and the outbreak of pine meal bug *Oracella acuta*. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 18(4): 1~6]
- 杨翠云. 1998. 美洲斑潜蝇的发生与防治. 上海农业科技, (2): 44~45 [Yang C Y. 1998. Occurrence and prevention of *Liriomyza sativae*. *Shanghai Agricultural Sciences and Technology*, (2): 44~45]
- 杨华, 马俊义. 2000. 新疆已知斑潜蝇种类的识别. 新疆农业科学, (3): 120~123 [Yang H, Ma J Y. 2000. Xinjiang has known identification of the known *Liriomyza* species in Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Science*, (3): 120~123]
- 杨晓军, 安榆林. 2002. 进口辐射松原木截获长林小蠹的检疫鉴定. 植物检疫, 16(5): 288~289 [Yang X J, An Y L. 2002. Quarantine and determination of *Hylurgus ligniperda* Fabricius in the imported radiate pine log. *Plant Quarantine*, 16(5): 288~289]
- 姚文国, 陈洪俊. 2000. 地中海实蝇与植物检疫. 昆虫学报, 43(增刊): 191~194 [Yao W G, Chen H J. 2000. Mediterranean fruit fly and plant quarantine. *Acta Entomologica Sinica*, 43(suppl.): 191~194]
- 曾玲, 周荣, 崔志新等. 2003. 寄主植物对椰心叶甲生长发育的影响. 华南农业大学学报(自然科学版), 24(4): 37~39 [Zeng L, Zhou R, Cui Z X et al. 2003. Effect of host plants on development and survival of *Bronitisa longissima* (Gestro). *Journal of South China Agricultural University* (Natural Science Edition), 24(4): 37~39]
- 张慧杰, 段运虎. 1999. 三叶草斑潜蝇和美洲斑潜蝇汉译名的演变. 植物检疫, 13(3): 46~47 [Zhang H J, Duan Y H. 1999. Translation evolution of *Liriomyza sativae* and *Liriomyza trifolii*. *Plant Quarantine*, 13(3): 46~47]
- 张军翔, 李玉鼎. 葡萄根瘤蚜(Phylloxera), 2001. 中外葡萄与葡萄酒, 4: 27~29 [Zhang J X, Li Y D. 2001. *Viteus vitifoliae* (Phylloxera). *Sino-Overseas Grapevine and Wine*, 4: 27~29]
- 张莉, 于虎勇, 徐志新. 1994. 稻水象甲与植物检疫(一). 植物检疫, 8(4): 215~219 [Zhang L, Yu H Y, Xu Z X. 1994. Rice water weevil and plant quarantine (1). *Plant Quarantine*, 8(4): 215~219]
- 张润杰, 何新风. 1997. 昆虫生态地理学与入侵危险性害虫控制. 生态科学, 16(1): 83~87 [Zhang R J, He X F. 1997. Insect ecological geography and the control of invasive pestful insects. *Ecology Science*, 16(1): 83~87]
- 张润志, 任立, 孙江华等. 2003. 椰子大害虫——锈色棕桐象及其近缘种的鉴别. 中国森林病虫, 22(2): 3~6 [Zhang R Z, Ren L, Sun J H et al. 2003. Morphological differences of the coconut pest insect, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier), and its related species (Coleoptera: Curculionidae). *Chinese Forest Disease Insect*, 22(2): 3~6]
- 张润志, 任立, 曾玲. 2002. 警惕外来危险性害虫褐纹甘蔗象入侵. 昆虫知识, 39(6): 471~472 [Zhang R Z, Ren L, Zeng L. 2002. Precaution of an alien pest invasion: Asiatic palm weevil, *Rhabdoscelus lineaticollis*. *Entomological Knowledge*, 39(6): 471~472]
- 张友军, 吴青君, 徐宝云等. 2003. 危险性外来入侵生物——西花蓟马在北京发生危害. 植物保护, 29(4): 58 [Zhang Y J, Wu Q J, Xu B Y et al. 2003. Dangerous alien invasive species—occurrence and damages of *Frankliniella occidentalis* in Beijing. *Plant Protection*, 29(4): 58]
- 赵莉, 刘芳政. 1994. 苜蓿叶象甲发育起点温度和有效积温的研究. 新疆农业科学, 170~191, 183 [Zhao L, Liu F Z. 1994. Studies on the threshold temperature and effective temperature sum of alfalfa weevil *Hypera variabilis*. *Xinjiang Agricultural Science*, 170~191, 183]
- 中国植物保护学会植物检疫学分会, 1993. 植物检疫害虫彩色图谱. 科学出版社. 201 [Academic Committee of Plant Quarantine, China Society of Plant Protection, 1993. A Color Atlas of Plant Quarantine Pests. Science Press. 201]
- 中华人民共和国北京动植物检疫局, 1999. 中国植物检疫性害虫图册. 中国农业出版社. 261 [Beijing Animal and Plant Quarantine Bureau, 1999. An Atlas of Plant Quarantine Pests to China. Chinese Agriculture Publishing House. 261]
- 中华人民共和国动植物检疫局, 农业部植物检疫实验所, 1996. 中国进境植物检疫有害生物选编. 中国农业出版社. 551 [The Administration of Animal and Plant Quarantine of China and Plant Quarantine Institute of MOA, 1996. Selected Pests of Quarantine Significance to China. Chinese Agriculture Press. 551]
- 朱弘复. 1953. 烟草叶蛾. 昆虫学报, 3(2): 259~263 [Zhu H F. 1953. Tobacco splitworm. *Acta Entomologica Sinica*, 3(2): 259~263]

- Bhardwaj S P. 1987. Investigations on the response of lepidopteran sex pheromones of temperate fruit pests in Himachal Pradesh. India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 19: 87~91
- CABI 和 EPPO. 1996. 欧洲检疫性有害生物. 中国农业出版社. 747 [CABI and EPPO. 1996. Quarantine Pests For Europe. Chinese Agriculture Publishing House. 747]
- Fellowes J R. 1999. Exotic ants in Asia: is the main land at risk? *The case of Hong Kong Aliens*, 9: 5~6
- Gaum W G, Giliomee J H, Pringle K L. 1994. Life history and life tables of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae), on English cucumbers. *Bulletin of Entomological Research*, 84(2): 219~224
- Gerin C, Hance T, Impe G van, van Impe G. 1994. Demographical parameters of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera, Thripidae). *Journal of Applied Entomology*, 118(4~5): 370~377
- Gill R J. 1992. A review of the sweetpotato whitefly in southern California. *Pan-Pacif. Entomol*, 68: 144~152
- Haines I H, Haines J B. 1978. Pest status of the crazy ant, *Anoplolepis longipes* (Jerdon) (Hymenoptera: Formicidae), in the Seychelles. *Bulletin of Entomological Research*, 68: 627~638
- Hoffmann B F, Andersen A N, Hill G J E. 1999. Impact of an introduced ant on native rain forest invertebrates: *Pheidole megacephala* in monsoonal Australia. *Oecologia*, 120: 595~604
- Kadoorie Farm and Botanic Garden, 2002. Report of rapid biodiversity assessments at Dinghushan Biosphere Reserve, Western Guangdong, China, 1998 and 2000. *South China Forest Biodiversity Report Series: No.7*. KFBG, Hong Kong SAR, ii+25
- Saunders W W. 1843. Description of a species of moth destructive to the cotton crops in India. *Trans. R. Entomol. Soc. London.*, 3: 284~285
- Xu R M. 1996. The occurrence and distribution of *Bemisia* in China. In: *Bemisia 1995: Taxonomy, Biology, Damage, Control and Management* (Gerling, D. eds). Intercept, Andover. UK, 125~131

附录3 中国主要农林外来入侵植物病原微生物名录

Appendix 3 List of Invasive Alien Plant Disease Pathogens in Agriculture and Forestry

序号	名称	原产地	国内分布	主要危害	主要参考文献
	真菌				
1.	甘薯长喙壳菌 <i>Ceratocystis fimbriata</i>	美国	全国各甘薯产区	主要侵害薯苗、薯块 不仅造成烂薯、死苗,而且病薯块含毒质,人吃了会头晕,耕牛食后会发生气喘病,甚至死亡。	舒晓燕, 2003. 畜禽业, (11): 62; 卢方林, 1999. 江西农业科技, 4: 42; 张满良, 1997. 农业植物病理学, 175-178
2.	大豆疫霉病菌 <i>Phytophthora sojae</i>	美国 东北、印第安那州	东北、北京、山东、安徽、内蒙古	主要侵染大豆的根、茎、叶和部分豆荚,引起根腐、茎腐、植株矮化、枯萎和死亡;在感病品种上可造成损失 25%-50%以上,个别高感品种损失可高达 100%	CABI & EPPO, 1997. 中国-欧洲联盟农业技术中心译. 欧洲检疫性有害生物, 450-453; 周肇惠, 严进, 2001. 粮食储藏, (6): 3-6
3.	马铃薯癌肿病菌 <i>Synchytrium endobioticum</i> (Schilbersky) Percival	匈牙利	四川、云南、贵州	主要危害地地下部 被害块茎或块茎由于病菌刺激寄主细胞不断分裂,形成大大小小花菜头状的瘤,表皮常龟裂,瘤组织前期呈黄色,后期变黑褐色,松软,易腐烂并产生恶臭	CABI & EPPO 主编, 中国-欧洲联盟农业技术中心译. 欧洲检疫性有害生物, 472-475; 王云月等, 2002. 云南农业大学学报, 17(4): 430-431
4.	甘蔗指霜霉病菌 <i>Peronosclerospora sacchari</i> (Miyake) Shaw	不详	云南、广西、四川、江西、台湾	是热带、亚热带地区的毁灭性植物病害,专性寄生禾本科植物。为玉米与甘蔗的严重病害,玉米最易感病。在玉米上由局部病斑导致系统侵染,叶片正反面及叶鞘、苞叶上均可生霉层。病株畸形,有许多小而饱满的果穗及不正常雄穗	宋佐衡, 1998. 新农业, (3): 23; 中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所, 1997. 中国进境植物检疫有害生物选编, 76-77
5.	玉米霜霉病菌 <i>Peronosclerospora sorghi</i> (Weston & Uppal) Shaw	美国 得克萨斯州	台湾、广西、云南、四川、河南、新疆、宁夏、辽宁、江苏、湖北、山东、甘肃已有发生	是一种毁灭性的病害,一旦发生很难控制 寄主植物包括玉米、高粱、须芒草属、双花草属、假蜀黍属、黄茅属、黍属、狼尾草属、高粱属、菅草属、玉蜀黍属 主要危害叶片、雄穗、雌穗等部位。导致植株矮化,节间缩短,使茎节、腋芽、雌穗、穗柄褐变坏死	戴明丽, 2002. 农业与技术, (5): 55-56; 何兴全和何永宏, 2000. 云南农业大学学报, 15(3): 285-286; 中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所, 1997. 中国进境植物检疫有害生物选编, 75-76
6.	棉花萎蔫病菌 <i>Fusicillium dahliae</i> Kleb. <i>Fusicillium alboarum</i> Reinke et Berth	美国 弗吉尼亚州	20 世纪 80 年代末,发病遍及 18 个省(市、自治区)的 478 个县(市), 1993 年发病面积达 270 余万公顷	寄主范围很广,大约有 660 种寄主植物,其中包括十字花科 23 种,蔷薇花科 54 种,茄科 37 种,唇形花科 23 种,菊科 94 种。其中农作物为 184 种,占 28%;观赏植物 323 种,占 49%;杂草植物为 153 种,占 23%。重病棉田病株率在 80%以上,其中落叶成光杆的病株,有的高达 52%, 1993 年损失皮棉达 1 亿公斤左右	杜威进等, 2002. 植物学报, 14(5): 311-317; 石磊岩, 1995. 棉花学报, 7(4): 243-245

续表

序号	名称	原产地	国内分布	主要危害	主要参考文献
7.	苜蓿黄萎病菌 <i>Verticillium albo-atrum</i> Reinke & Rerthold	瑞典	尚未发现,但存在严重隐患	苜蓿被感染后表现黄化、矮缩、萎凋等症,第二年产量降低15%~50%,第二年后期至第三年初期植株陆续衰弱死亡,缩短了产草期,导致严重的苜蓿产量损失,大大缩短了苜蓿草地的使用寿命,影响苜蓿干草及种子出口	王春林等, 2003. 植物检疫, 17(1): 57-59; 中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所, 1997. 中国进境植物检疫有害生物选编, 105-109
8.	小麦矮腥黑粉菌 <i>Tilletia controversa</i> Kühn	捷克	尚未发现	主要感染禾本科的18属65种植物,主要寄主有黑麦、大麦、小麦、燕麦等。造成植株极端矮化,分蘖增多,形成黑粉症穗	崔良刚和程义美, 2003. 吉林农业, (2): 22-23
9.	小麦印腥黑粉菌 <i>Tilletia indica</i> Mitra	印度	尚未传入	影响小麦产量,降低小麦品质,发病率只需达3%以上,该小麦制成的产品将会因其带有浓烈的鱼腥味而不适宜人类食用	白章红等, 1997. 植物检疫, 11(6): 331-334
10.	桉树焦枯病菌 <i>Cylindrocladum scoparium</i> Morgan Hodges	澳大利亚	广东、广西、海南、福建、云南和四川等省份	严重危害桉树幼苗及幼树。除危害20多种桉树外,还能侵害相思树、丁香、橡胶树、番石榴、柑橘、南美番荔枝、杜鹃花、腰果树和木薯。1993年广东雷州、江门、惠州等市县的苗圃地和幼林地严重发生,造成幼苗大量落叶和枯梢;1996年广西钦州和东门林场则造成幼苗大量枯死	李尔军等, 1997. 山东林业科技, (1): 10-13; 庞联东等, 2001. 植物检疫, 15(5): 273-275
11.	香石竹枯萎病菌 <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>dianthi</i> (Prill. Et Del) Snyder et Hans.	不详	上海、广东	叶片或枝条有银绿、枯萎、垂萎及植株节间干枯纵裂,茎内组织白色干枯,维管束横切面呈稻草或褐色	李尔军等, 1997. 山东林业科技, (1): 10-13
12.	油橄榄孔雀斑病菌 <i>Spilocaea oleaginea</i> (Cast.) Hugh	不详	云南(昆明、玉溪市、临沧地区)	仅危害油橄榄,主要感染果实和嫩枝,病情严重时,引起叶片早落,造成严重减产。20世纪90年代经普查,在云南省全省发生面积近30hm ² ,均为轻度危害	冯士明, 2000. 植物检疫, 14(2): 86-88
13.	落叶松枯梢病菌 <i>Bostryphocera laricina</i> (Sawada) Shang	日本北海	内蒙古、河北、山东、山西、陕西等9省区50多市县	主要危害长白落叶松、兴安落叶松、华北落叶松、朝鲜落叶松、海林落叶松、日本落叶松。被害林木造成枯梢,重者树冠变形甚至整株枯死	赵经周等, 1995. 林业科技, 20(5): 23-25; 汪志红和姜海燕, 2000. 辽宁林业科技, 2: 22-24
14.	松针红斑病菌 <i>Mycosphaerella pinii</i> E. Rostrup	不详	内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、云南	可危害云南松、加刺松、湿地松、火炬松,主要危害叶片。在云南南良县的危害面积达12hm ² ,其中轻度危害2hm ² ,中度危害3hm ² ,重度危害7hm ²	冯士明, 2001. 中国森林病虫, 4: 31-33
15.	松褐斑病菌 <i>Scirrhia acicola</i> (Deam) Siggers	美国	福建、广东、浙江、江西、安徽、广西等省,发病面积呈逐年增长态势	危害松属植物,可导致松树整株枯死。主要危害湿地松,在湿地松成熟的针叶上,病叶最初出现褐色小斑点,有逐渐扩大的趋势,病害自树冠基部开始发生,逐渐向上扩展,病重的松树只有顶部两三轮枝条的梢头保存部分绿叶,不久,整株枯死	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所, 1997. 中国进境植物检疫有害生物选编, 502-505; 廖太祥等, 2004. 植物检疫, 18(2): 94-97

续表

序号	名称	原产地	国内分布	主要危害	主要参考文献
16.	松疱锈病菌 <i>Cronartium ribicola</i> J. C. Fischer ex Rabenhorst	不详	河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、安徽、山东、河南、湖北、四川、贵州、云南、陕西、宁夏、青海、甘肃、新疆	主要寄主为红松、五针松、赤松、黑松等，引起枝干肿大并有裂纹，从中生生长黄白至橘黄色的疱囊	李东军等, 1997. 山东林业科技, (1): 10-13; 中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检验检疫实验所, 1997. 中国进境植物检验检疫有害生物选编, 476-479
17.	马铃薯晚疫病 <i>Phytophthora infestans</i> (Mont.) de Bary	墨西哥	所有马铃薯产区	主要引起马铃薯的晚疫病, 20世纪50-60年代初, 华北、东北和西北曾几次发生晚疫病大流行, 使马铃薯生产损失过半; 80年代后, 全国范围内晚疫病几乎每年都普遍发生, 薯块产量损失达到20%-80%, 晚疫病导致的产量损失每年平均达10亿美元左右	李先平等, 2001. 中国马铃薯, 15(5): 290-295
18.	烟草霉病 <i>Peronospora hyoscyami</i> de Bary f. sp. <i>tubacina</i> (Adam) Skalicky	美国加利福尼亚州	口岸多次截获	主要危害栽培烟草, 除红花烟草、黄花烟草外, 也可感染其他易于感病的烟草及某些茄科植物, 是一种高度危险性的病原, 一旦传入新区, 当环境条件适宜并具备了广泛栽种的易感寄主植物时, 足以造成重大危害。主要危害不同生育期的叶片, 严重时可导致系统性侵染, 病株枯死, 多数情况导致生长缓慢, 发育不良, 烟草品质低劣	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检验检疫实验所, 1997. 中国进境植物检验检疫有害生物选编, 80-87; 章正等, 1996. 中国烟草学报, 3(1): 1-7
19.	栗疫病菌 <i>Cryphonectria parasitica</i> (Murr.) Barr	1904年在美国纽约首次发现	国内发生普遍	栗疫病在欧美各国都很严重, 美国于1904-1922年有一半栗树林被毁, 至1940年病害扫荡了全境的栗园。我国栗疫病发生普遍, 局部地区严重, 有的栗园发病率达80%以上。新嫁接的幼树常成片发病, 引起树皮腐烂甚至全株枯死, 造成很大损失	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检验检疫实验所, 1997. 中国进境植物检验检疫有害生物选编, 479-482; 周而勋等, 1999. 果树科学, 16(1): 66-71
20.	芦笋枯萎病菌 <i>Fusarium oxysporum</i> (Schlecht.) f. sp. <i>asparagi</i> Cohen & Heald	美国	有发现	是芦笋的一种危险性病害, 它常和芦笋冠腐病一起造成芦笋严重减产, 老芦笋无法更新, 初期仅见田间个别植株变黄后萎蔫, 病情发展后全株枯死。实生苗染病, 地上部变黄矮化, 甚至萎凋、落叶或枯死。幼笋染病, 生长细小或无法出土	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检验检疫实验所, 1997. 中国进境植物检验检疫有害生物选编, 485-487; 宋君柳和吴长友, 2004. 农业知识, (5)
21.	棉花枯萎病菌 <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>vasinfectum</i> (Atk.) Snyder & Hansen	美国亚拉巴马州	1931年华北地区有发生, 目前各产棉省均有该病发生和危害	是一种专化性较强、寄主范围较窄的病菌, 除危害棉花外只能危害秋葵和决明。棉花枯萎病在幼苗期即可发病, 严重时造成大量死苗, 缺苗、断垄, 甚至毁种。发病轻的棉株虽能存活, 但棉株生育受到阻碍, 导致过早落叶, 蕾铃脱落, 铃重下降, 产量降低, 品质变劣	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检验检疫实验所, 1997. 中国进境植物检验检疫有害生物选编, 487-490
22.	香蕉黑条叶斑病菌 <i>Mycosphaerella fijiensis</i> Morelet	斐济	台湾	主要危害芭蕉属植物, 此病造成香蕉植株叶片提早干枯, 减少植株的功能叶, 如在抽蕾前严重发病则病株不能正常抽蕾; 抽蕾期严重发病长出的果实不饱满或很小, 商品价值低; 果实发育期严重发病	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检验检疫实验所, 1997. 中国进境植物检验检疫有害生物选编, 492-495

续表

序号	名称	原产地	国内分布	主要危害	主要参考文献
23.	剑麻斑马纹病菌 <i>Phytophthora nicotianae</i> Breda de Hann	坦桑尼亚	我国70年代后在广东、广西、海南省等植麻区相继发生	的植株果实味淡,甚至在植株上软熟而降低果实质量 叶片、麻茎、叶轴均受感染,引起叶片坏死、茎腐和轴腐,进而导致整株死亡。此病在坦桑尼亚造成极大经济损失	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所,1997.中国进境植物检疫有害生物选编,496-498
24.	杨树大斑溃疡病菌 有性型 <i>Cryptodiaporthe populea</i> (Sacc.) Butin; 无性型 <i>Dothichiza populea</i> Sacc. et Br	法国	辽宁、山东	是一种世界性的杨树病害,发病严重时,树皮坏死,引起整株死亡。一般林内受害轻于林边缘,树干阴面重于阳面。该病还危害毛白杨	许文力等,1997.江苏林业科技,24(4):40~47
25.	番茄细菌性溃疡病菌 <i>Clavibacter michiganensis</i> (Smith) Davis et al., subsp. <i>michiganensis</i> (Smith) Davis et al.	美国密执安州	北京、河北、内蒙古、辽宁、吉林、新疆、山西、山东和上海等9个省市的28个城市或地区	番茄溃疡病可使番茄产量损失25%~75%,发病后果实品质变劣,外观受损,商品性差,对番茄加工影响也非常大	小廖,1998.警惕番茄溃疡病传入广西.广西植保,3:33-35
26.	水稻条纹病菌 <i>Xanthomonas oryzae</i> Ishiyama Swing et al. pv. <i>oryzicola</i> (Fang et al.) Swing et al.	菲律宾	我国南方的福建、广西等12个省市	仅危害稻属的水稻和野生稻	曾建敏和林文雄,2003.分子植物育种,1(2):257-263; 郭亚辉和许志刚,2001. 河北邯郸农业高等专科学校学报,18(4):19-21
27.	番茄溃疡病 <i>Clavibacter michiganense</i> subsp. <i>michiganense</i>	美国	北京、河北、山东、山西、上海、内蒙古、辽宁、黑龙江、新疆相继报道发现此病	除感染番茄外,还感染辣椒、龙葵、裂叶茄及其他番茄属植物,主要危害叶片、茎秆和果实,造成大面积减产,并且果实上带有病斑而失去商品价值	李春等,1994.植物保护,4:53-54; 魏亚东,1996.天津农林科技,(4):42-43
28.	梨火疫病 <i>Erwinia amylovora</i> (Burrill) Winslow et al.	美国纽约州	国内尚无分布	梨火疫病是梨、苹果、山楂、火棘和柯子等植物最具毁灭性的病害之一。病菌能感染蔷薇科40余属的220多种植物,严重感染的树和灌木外形通常被烧毁,有些甚至会被该病致死;受感染的花、枝条和叶片变黑,像被火烧过一样	胡白石和许志刚,1999.植物检疫,13(3):6-10; 胡白石等,2003.南京农业大学学报,26(4):41-45
	病毒				

续表

序号	名称	原产地	国内分布	主要危害	主要参考文献
29.	烟草环斑病毒 <i>Vepovirus</i> sp.	1927年首次报道在美国弗吉尼亚的烟草上	福建、湖南、湖北、云南、贵州、四川、安徽、河南、陕西、辽宁、黑龙江、河北、山东	烟草环斑病毒整个生育期均可发生,造成叶片下陷,品质下降。其寄主范围很广,可侵染54科246种植物,自然侵染寄主有豆类、瓜类、薯类、花卉和果树等。可导致大豆减产50%以上,烟草种子减产27%,菜豆为30%~50%,茄子达50%~70%。烟草感染IRSV后,植株矮化,叶片小而质次,烟草种子收获大减	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所,1997.中国进境植物检疫有害生物选编,351~353; 王劲波等,1999.中国烟草科学,(1):34~35
30.	烟草坏死环斑病毒 <i>Funus necrotic ringspot virus</i> (PNRSV)	不详	陕西等地个别发生	该病毒寄主范围广,能自然和人工侵染的寄主达21个科的双子叶植物,180多种重要的果树、蔬菜、花卉作物,重要的寄主有苹果、李子、桃、杏、樱桃、玫瑰、月季、啤酒花、烟草、黄瓜、西瓜、甜瓜、南瓜、西葫芦、菜豆、豇豆、扁豆、草棉、葛苣和向日葵等,引起植株坏死斑、落叶、黄化,甚至全株枯死。特别在苗期中发生会造成严重损失	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所,1997.中国进境植物检疫有害生物选编,347~349; 阮小凤等,1998.山东农业大学学报,29(3):277~282; 魏宁生和吴云峰,1989.云南农业大学学报,4(4):302~308
31.	杨树花叶病毒 <i>poplar mosaic virus</i> (PMV)	不详	北京、天津、河北、江苏、山东、河南、湖北、湖南、四川、陕西、甘肃、青海	杨树花叶病毒是一种世界性病害,发病后很难防治。病叶较正常叶短1/2,且氮、磷、钾含量明显降低。幼苗高,粗生长受阻,幼树生长量至少降低30%。严重发病的植株木材比重和强度降低,木材结构也发生异常	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所,1997.中国进境植物检疫有害生物选编,544~546; 李东军等,1997.山东林业科技,(1):10~13; 周茂建,2004.植物检疫,18(3):164~168
32.	番茄环斑病毒 <i>tomato ringspot virus</i>	美国东部 新泽西	中国台湾	寄主范围广,可侵染35科105属157种以上单子叶和双子叶植物。自然界多发生在观赏、木本和半草本植物。常见的自然寄主有葡萄、桃、李、樱桃、苹果、榆树等及果园杂草	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所,1997.中国进境植物检疫有害生物选编,537~540
33.	泡桐丛枝病 <i>mycoplasma-like organism</i> (MLO)	日本	山东、河南、河北、陕西、安徽、江苏、北京、天津等	一般苗木的发病率5%~15%,1~3年生幼树发病率为10%~50%,4年生以上的成树发病率多在50%以上。重病区可达100%	中华人民共和国动植物检验检疫局和农业部植物检疫实验所,1997.中国进境植物检疫有害生物选编,537~540
34.	甜菜坏死黄脉病毒 <i>Beet necrotic yellow vein furovirus</i>	意大利	新疆、宁夏、甘肃、黑龙江、吉林、辽宁	部分坏死细根的不正常增生形成丛根,丛根病的发生可以造成严重危害,使甜菜根的重量可以减少50%~70%,含糖量减少2%~4%	CABI & EPO, 1997. 欧洲检疫性有害生物,656~660; 李大伟等,1999.生物工程学报,15(4):461~465
35.	松材线虫 <i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	北美	江苏、浙江、安徽、山东、广东、湖北、上海	是松材线虫寄生在松树体内取食营养而导致树木迅速死亡的一种毁灭性病害,主要危害黑松、赤松、白皮松、湿地松、火炬松、油	李东军等,1997.山东林业科技,(1):10~13; 黄可辉和郭琼霞,2002.福建农业科技,(6):

序号	名称	原产地	国内分布	主要危害	主要参考文献
	(Steimer et Bührer)		台湾、香港	松、千头赤松等 57 种松属树木, 还可对雪松属、冷杉属、云杉属、落叶松属和黄杉属等非松属植物进行危害	51
36.	香蕉穿孔线虫 <i>Radopholus similis</i> (Cobb) Thorne	美国佛罗里达	尚未侵入我国	不仅直接危害寄主, 造成损失, 而且也为其他次生微生物创造了有利的寄主环境。例如, 由于该线虫的影响, 香蕉枯萎病发病率增加了一倍, 发病时间显著缩短	陈勇和李增华, 1995. 植物检疫, 9(2): 91~118
37.	马铃薯金线虫 <i>Globodera rostochiensis</i> (Wollenweber)	南美洲的安地斯山脉	尚无分布	是温带地区马铃薯作物的重要病害, 每公顷马铃薯减产 2000kg, 连年重茬种植可减产 80%, 甚至绝产	于恒纯等, 2003. 中国马铃薯, 17(5): 313~314
38.	马铃薯白线虫 <i>Globodera pallida</i> (Stone)	南美洲的安地斯山脉	尚无分布	与马铃薯白线虫相近	
39.	鳞球茎茎线虫 <i>Ditylenchus dipsaci</i> (Khn) Filipjev	不详	我国尚未被证实有此线虫发生	是温带地区发生严重的植物寄生线虫之一, 寄主范围极广, 破坏性极强, 不仅自身可危害观赏球茎花卉、粮食作物、经济作物、蔬菜和中草药等, 还可加重其他病原微生物的危害, 或与其他病原构成复合感染, 大发生年代可使寄主植物减产 60%~80%, 甚至颗粒无收。主要取食植物茎、鳞球茎的薄壁细胞, 不但造成田间植株死亡, 而且在贮藏期中也危害鳞球茎类植物	封立平, 2001. 植物检疫, 15(3): 160~161; 李浩等, 1998. 植物检疫, 12(5): 305~306
40.	大豆胞囊线虫 <i>Heterodera glycines</i> Ichinohe	日本? 北美洲?	辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古、北京、河北、河南、山东、山西、陕西、安徽、江苏	是亚洲及美国大豆上的主要有害生物。在日本产量损失估计为 10%~75%, 美国仅 5 个州损失就高达 8500 万美元	CABI & EPPO, 1997. 欧洲检疫性有害生物, pp. 278~281; 刘维志等, 1994. 沈阳农业大学学报, 25(2): 164~167
41.	剪股颖线虫 <i>Anguina agrostis</i> (Steinbuch) Filipjev	不详	内蒙古自治区	主要危害寄主植物的花序, 致使病株的种子和地上部产量下降。在广泛种植饲料用剪股颖的地区可对生产构成严重的威胁。此外剪股颖线虫在紫羊茅和黑麦草寄主上形成的虫瘿对牛、羊、马等有毒害作用, 从而对牲畜形成间接的危害	CABI & EPPO, 1997. 欧洲检疫性有害生物, 464~468; 葛建军, 1997. 剪股颖线虫, 中国进出口动植物检, (3): 36~37
42.	水稻干尖线虫 <i>Aphelenchoides besseyi</i> Christie	1915 年最早在日本九州发现	浙江、江苏、安徽、广东、广西、湖北、湖南、四川、河北、天津、云南、贵州等 22 个省区	水稻感病种子是初侵染源。线虫不侵入到稻米粒内。侵入后水稻叶尖形成特有的白化, 随后坏死、旗叶卷曲变形, 包围花序。花序变小, 谷粒减少。自 20 世纪初, 报道该线虫在日本及部分美国地区对水稻造成严重的经济损失	CABI & EPPO, 1997. 欧洲检疫性有害生物, 257~259; 桑维钧等, 1999. 山地农业生物学报, 18(3): 200~201

(谢丙炎 陈万权)

主要参考文献

- 白章红, 周国梁, 钱天荣, 蒋樟法. 1997. 小麦印度腥黑穗病菌在中国适生性的初步研究. 植物检疫, 11(6): 331~334
- 陈勇, 李增华. 1995. 香蕉穿孔线虫研究概况(一). 植物检疫, 9(2): 91~118
- 崔良刚, 程义美. 2003. 小麦矮腥黑穗病的发生及防治. 吉林农业, (2): 22~23
- 戴明丽. 2002. 植物检疫病害——玉米霜霉病. 农业与技术, (5): 55~56
- 杜威进, 杜雄明, 马峙英. 2002. 棉花黄萎病抗性遗传和分子生物学研究进展. 植物学报, 14(5): 311~317
- 封立平. 2001. 进口大蒜中鳞球茎线虫的检疫处理和防治对策. 植物检疫, 15(3): 160~166
- 冯士明. 2000. 云南省补充的森林植物检疫对象发生及危险性评价. 植物检疫, 14(2): 86~88
- 冯士明. 2001. 云南省森林植物检疫对象发生及危险性评估. 中国森林病虫害, 4: 31~33
- 葛建军. 1997. 剪股颖颗粒线虫. 中国进出境动植检, (3): 36~37
- 郭亚辉, 许志刚. 2001. 水稻条斑病菌致病力分化研究进展. 河北邯郸农业高等专科学校学报, 18(4): 19~21
- 何兴全, 何永宏. 2000. 一种新病原引起的玉米霜霉病研究初报. 云南农业大学学报, 15(3): 285~286
- 胡白石, 卢玲, 刘凤权等. 2003. 利用间接免疫荧光染色和协同凝集技术检测梨火疫病病菌. 南京农业大学学报, 26(4): 41~45
- 胡白石, 许志刚. 1999. 梨火疫病的分布、传播及检测技术研究进展. 植物检疫, 13(3): 6~10
- 黄可辉, 郭琼霞. 2002. 加强危险性有害生物松材线虫的检验检疫. 福建农业科技, (6): 51
- 李春, 金潜, 彭刚. 1994. 新疆发生番茄溃疡病. 植物保护, 4: 53~54
- 李大伟, 于嘉林, 韩成贵等. 1999. 中国甜菜坏死黄脉病毒 RNA5 的检测及其核苷酸序列分析. 生物工程学报, 15(4): 461~465
- 李东军, 秦绪兵, 邵文惠. 1997. 35 种森林植物检疫对象简介. 山东林业科技, (1): 10~13
- 李浩, 沈培银, 季健清等. 1998. 亟待加强进境种球花卉上鳞球茎线虫的检疫工作. 植物检疫, 12(5): 305~306
- 李先平, 何云昆, 赵志坚等. 2001. 马铃薯抗晚疫病育种研究进展. 中国马铃薯, 15(5): 290~295
- 廖太林, 叶建仁, 李百胜等. 2004. 浅述林木病媒昆虫检疫的重要性. 植物检疫, 18(2): 94~97
- 刘维志, 刘晔, 段玉玺等. 1994. 中国大豆胞囊线虫的形态学观察. 沈阳农业大学学报, 25(2): 164~167
- 卢方林. 1999. 甘薯黑斑病及其防治. 江西农业科技, 4: 42
- 庞联东, 庞万伟, 曾伟琼等. 2001. 桉树焦枯病防治试验. 植物检疫, 15(5): 273~275
- 阮小凤, 杨勇, 马书尚等. 1998. 甜樱桃病毒病的 ELISA 检测研究. 山东农业大学学报, 29(3): 277~282
- 桑维钧, 熊继文, 杨昌达等. 1999. 毕节市大面积发生水稻干尖线虫病简报. 山地农业生物学报, 18(3): 200~201
- 石磊岩. 1995. 我国棉花黄萎病研究进展. 棉花学报, 7(4): 243~245
- 舒晓燕. 2003. 黑斑病甘薯中毒. 畜禽业, (11): 62
- 宋君柳, 吴长友. 2004. 芦笋枯萎病的发生与防治. 农业知识, (5)
- 宋佐衡. 1998. 植物检疫病害——玉米霜霉病. 新农业, (3): 23
- 汪志红, 姜海燕. 2000. 落叶松枯梢病预测预报方法. 辽宁林业科技, 2: 22~24
- 王春林, 吴立峰, 王雪薇等. 2003. 加拿大、美国苜蓿黄萎病发生控制情况及我国对策. 植物检疫, 17(1): 57~59
- 王劲波, 王凤龙, 钱玉梅等. 1999. 山东烟区烟草环斑病毒病(TRSV)发生和病原鉴定. 中国烟草科学, (1): 34~35
- 王云月, 马俊红, 朱有勇. 2002. 云南省马铃薯薯肿病发生现状. 云南农业大学学报, 17(4): 430~431
- 魏宁生, 吴云峰. 1989. 花卉病毒病害的鉴定(II). 云南农业大学学报, 4(4): 302~308
- 魏亚东. 1996. 番茄溃疡病. 天津农林科技, (4): 42~43
- 小廖. 1998. 警惕番茄溃疡病传入广西. 广西植保, 3: 33~35
- 许文力, 徐克勤, 吴玉斌等. 1997. 杨树溃疡病. 江苏林业科技, 24(4): 40~47
- 于恒纯, 马金荣, 闫明宇. 2003. 高度重视马铃薯金线虫的入境检验. 中国马铃薯, 17(5): 313~314
- 曾建敏, 林文雄. 2003. 水稻细菌性条斑病及其抗性研究进展. 分子植物育种, 1(2): 257~263
- 张满良主编. 1997. 农业植物病理学. 世界图书出版公司. 175~178
- 章正, 李怡珍, 戚龙君等. 1996. 贮藏期烟霜霉病病原的活性检测研究. 中国烟草学报, 3(1): 1~7
- 赵经周, 于文喜, 王乃玉. 1995. 落叶松枯梢病国内外研究的现状. 林业科技, 20(5): 23~25
- 中华人民共和国动植物检疫局, 农业部植物检疫实验所编. 1997. 中国进境植物检疫有害生物选编. 北京: 中国农业出版社. 75~79
- 周而勋, 于克荣, 陆家云. 1999. 栗疫病研究进展. 果树科学, 16(1): 66~71
- 周茂建. 2004. 我国检疫性森林有害生物发生现状及其分析(续). 植物检疫, 18(3): 164~168
- 周肇蕙, 严进. 2001. 大豆疫病种子带菌和传病研究. 粮食储藏, (6): 3~6
- CABI & EPPO 主编. 1997. 中国-欧洲联盟农业技术中心译. 欧洲检疫性有害生物. 北京: 中国农业出版社

图 2-1 B 型烟粉虱危害状

B 型烟粉虱危害西葫芦引起的银叶状（左）；
B 型烟粉虱传播的番茄双生病毒病症状（右）

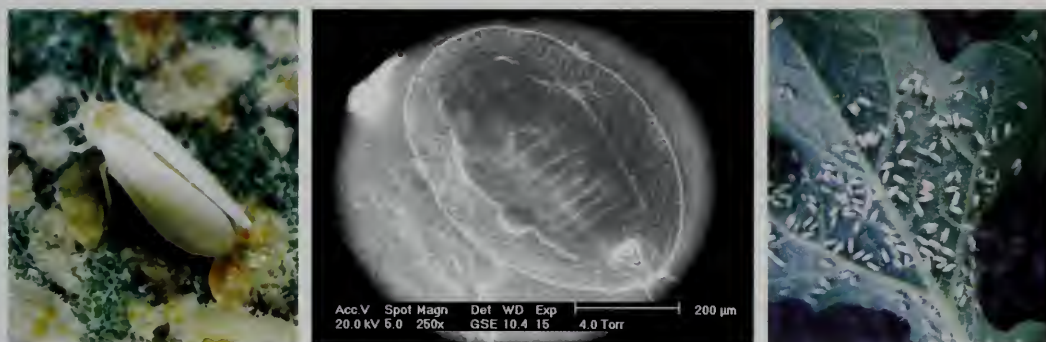


图 2-2 B 型烟粉虱

成虫及若虫（左）；伪蛹（中）；西葫芦上的 B 型烟粉虱，示聚集为害及分泌的蜜露（右）

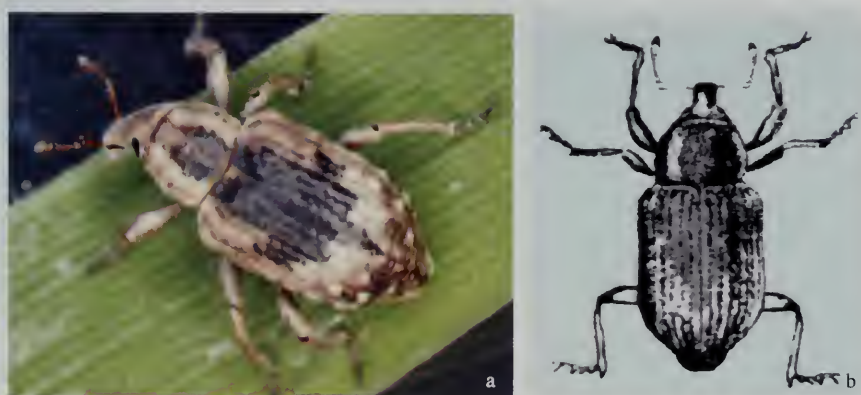


图 3-2 稻水象甲成虫

a. 在水稻叶面爬行（祝增荣，2003）； b. 在水中向前游泳（Hix *et al.*, 2000）

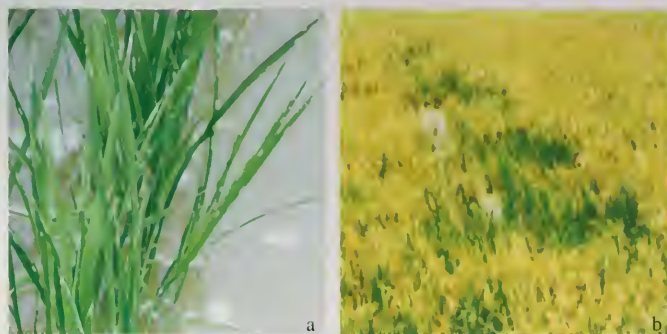


图 3-6 稻水象甲田间为害状
（商晗武摄）

a. 成虫在水稻叶片上的取食斑；
b. 中间绿色部分为受害后的水稻植株，生育期明显推迟



图 4-1 美洲斑潜蝇幼虫
(雷仲仁 供)



图 4-2 美洲斑潜蝇蛹和为害状
(雷仲仁 供)



图 4-3 美洲斑潜蝇成虫
(雷仲仁 供)



图 5-1 南美斑潜蝇成虫、卵、幼虫、蛹和为害状 (雷仲仁 供)



图 6-1 马铃薯甲虫及其为害状

A. 卵 (W.Granshaw 摄) B. 幼虫 (G.Brust 摄) C. 成虫 (W.Granshaw 摄) D. 为害状 (W.Granshaw 摄)

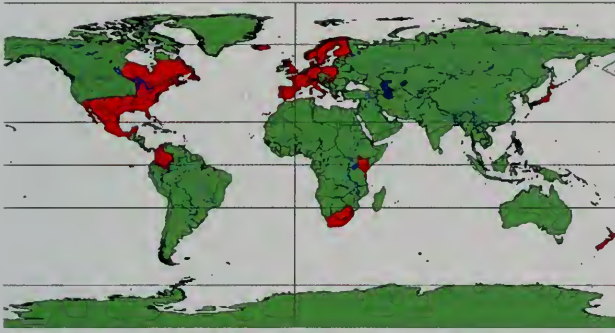


图 7-1 西花蓟马世界分布图 (根据现有资料绘制)
深色区域表示西花蓟马分布区



图 8-1 红铃虫成虫



图 8-2 红铃虫幼虫



图 9-1 美国白蛾及受害状

1. 雌蛾及其所产之卵; 2. 雄蛾 (越冬代); 3. 泡桐树受害状; 4. 法桐树上的美国白蛾 2 龄幼虫网幕; 5~6. 农田防护林被美国白蛾严重危害; 7. 白蜡树受害状; 8. 美国白蛾 5 龄幼虫



图 10-2 红脂大小蠹成虫

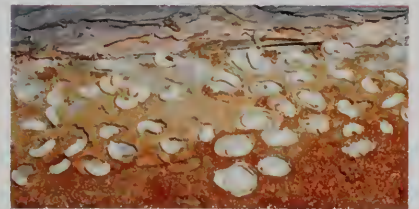


图 10-3 红脂大小蠹老熟幼虫

图 10-4 红脂大小蠹危害状



图 11-1 松突圆蚧寄生在松针上 (陈沐荣 供)

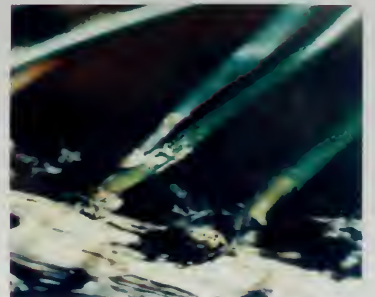




图 11-2 松突圆蚧危害状 (黄焕华 摄)



图 11-5 花角蚜小蜂雌成虫 (陈沐荣 供)



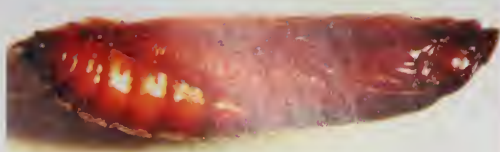
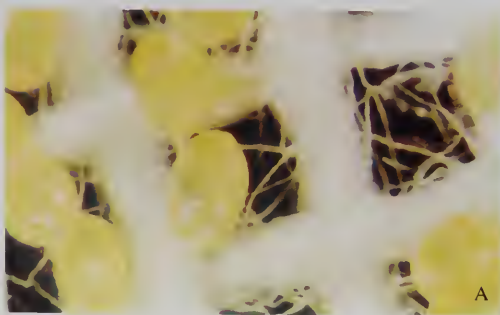
图 12-1 湿地松粉蚧成虫 (陈沐荣 供)



图 12-2 湿地松粉蚧寄生在松针上 (蔡卫群 摄)



图 12-3 湿地松粉蚧危害状 (徐家雄 摄)



C

D

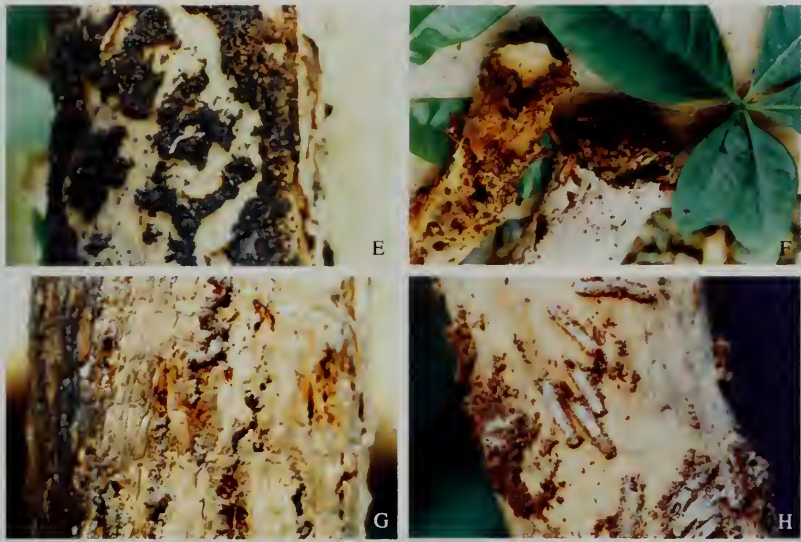


图 13-1 蔗扁蛾的不同发育阶段、寄主植物被害状及生物防治效果
A. 卵; B. 幼虫; C. 蛹; D. 成虫; E. 巴西木被害状; F. 发财树被害状; G. 巴西木树干上的茧; H. 施用线虫 72h 后死亡的幼虫



图 14-2 苹果蠹蛾特征
1. 成虫; 2. 后翅脉相; 3. 幼虫; 4. 幼虫体节; 5. 幼虫头部; 6. 蛹; 7. 雌蛹腹末



图 15-1 椰心叶甲成虫形态
(曾玲 摄, 2000)
a. 雌、雄成虫背面; b. 雌成虫腹面



图 15-2 椰心叶甲雌、雄成虫交配状
(陆永跃 摄, 2002)



图 15-3 椰心叶甲卵
(陆永跃 摄, 2002)



图 15-6 椰心叶甲幼虫和蛹
(曾玲 摄, 2000)
1. 幼虫; 2. 蛹腹面; 3. 蛹背面

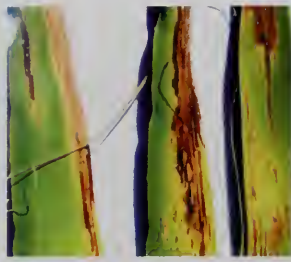


图 15-7 大王椰子心叶受椰心叶甲为害状
(曾玲 摄, 2000)



图 15-10 椰心叶甲群集于大王椰子心叶内 (曾玲 摄, 2002)



图 15-8 老人葵受椰心叶甲为害状
(曾玲 摄, 2000)



图 15-9 大王椰子叶片严重受椰心叶甲为害状
(曾玲 摄, 2002)



图 16-1 锈色棕榈象分布区域 (深色区域为发生分布区)

图 16-2 锈色棕榈象不同类型成虫及腹面
(陆永跃 摄, 2002)



图 16-3 锈色棕榈象幼虫 (陆永跃 摄, 2002)



图 16-4 锈色棕榈象蛹茧 (陆永跃 摄, 2002)



图 16-5 叶柄中锈色棕榈象幼虫钻蛀的孔洞 (图片来自 <http://www.redpalmweevil.com/intoallRPW.htm>)



图 16-6 海枣被锈色棕榈象为害后心叶枯死 (图片来自 <http://www.redpalmweevil.com/intoallRPW.htm>)



图 16-7 棕榈叶被锈色棕榈象为害状 (图片来自 <http://www.redpalmweevil.com/intoallRPW.htm>)



图 16-11 向孔道内释放病原线虫



图 17-1 褐纹甘蔗象卵 (曾玲摄, 2002)



图 17-2 褐纹甘蔗象幼虫 (曾玲摄, 2002)



图 17-3 褐纹甘蔗象蛹 (曾玲摄, 2002)



图 17-4 褐纹甘蔗象成虫 (曾玲摄, 2002)



图 17-5 褐纹甘蔗象蛹虫 (曾玲摄, 2002)



图 17-6 褐纹甘蔗象在椰子茎表面的蛀孔 (曾玲摄, 2002)



图 17-7 大王椰子受褐纹甘蔗象为害后茎表面的流胶 (曾玲摄, 2002)



图 17-8 大王椰子茎基部受褐纹甘蔗象为害状 (曾玲摄, 2002)



图 18-1 大瓶螺成螺 (引自 http://www.informationblast.com/Imagepomacea_canalicula)

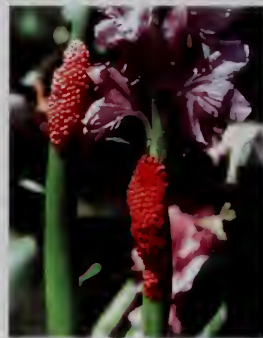


图 18-2 大瓶螺卵块 (引自《非洲大蜗牛及其检疫》, 2002)



图 19-1 小麦矮腥黑穗病苗期症状 (Blair J Goates, 1996)
左: 病株; 右: 健株



图 19-2 小麦矮腥黑穗病苗期病叶上的褪绿斑纹症状 (Blair J Goates, 1996)



图 19-3 小麦成株期由矮腥黑穗病引起的矮化多分蘖病株 (示“二层楼现象”) (陈万权, 未发表资料)



图 19-4 小麦矮腥黑穗病受感染小花及菌瘿 (Blair J Goates, 1996)
左: 受感染小花; 右: 菌瘿



图 19-5 小麦矮腥黑穗病病穗与健穗比较
(陈万权, 未发表资料)

左: 病穗 (深绿色, 颖壳外张); 右: 健穗 (淡绿色, 颖壳正常)



图 19-6 小麦矮腥黑穗病成株期病粒胀破、冬孢子外溢症状 (陈万权, 未发表资料)



图 19-7 小麦收割时黑粉病菌形成的孢子云 (摄自美国科罗拉多州立大学)

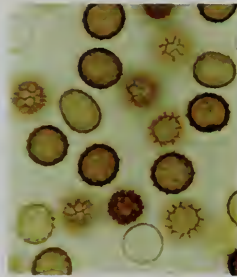


图 19-8 小麦矮腥黑粉菌冬孢子和不育孢子 (Blair J Goates, 1996)

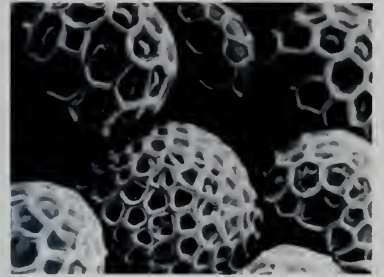


图 19-9 小麦矮腥黑粉菌冬孢子外部形态 (Blair J Goates, 1996)

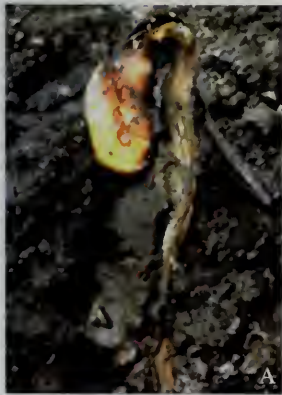


图 20-1 大豆疫霉引起的出苗前腐烂 (A) 和茎基部腐烂 (B)



图 20-2 大豆疫霉危害的大田症状



图 20-3 大豆疫霉的孢子囊和游动孢子（未标记）
A. 孢子囊；B. 游动孢子；C. 游动孢子正在释放

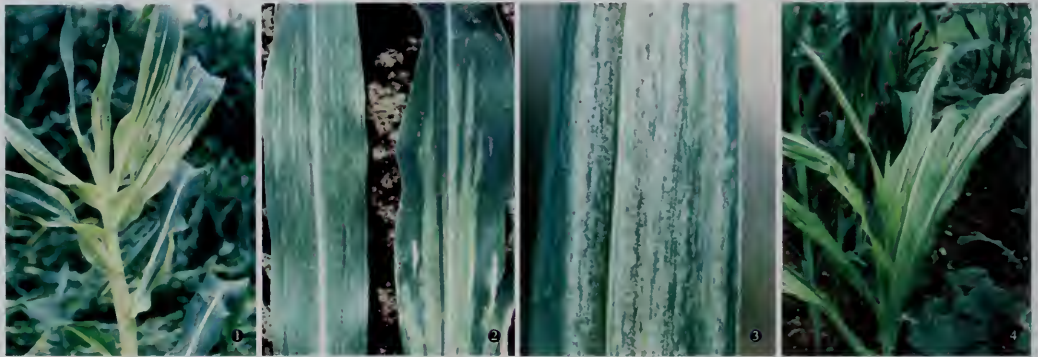


图 21-1 玉米霜霉病

1. 玉米霜霉病植株表现的系统症状；
2. 感病叶片上形成的淡绿色至苍白色条纹斑；
3. 叶背面形成的白色霉层；
4. 幼苗感病后表现为节间缩短，植株矮化



图 22-1 苜蓿黄萎病在田间的症状
叶片逐渐黄化或呈紫红色，严重时叶片变枯白色，表现整株萎焉症状



图 22-2 比较病、健株茎的横切面，可见病株茎的横切面维管束变褐

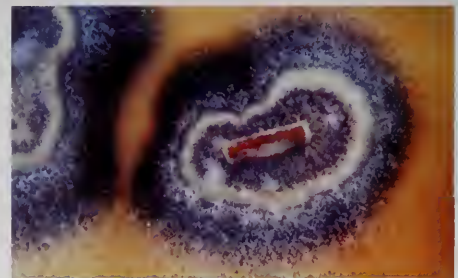


图 22-3 苜蓿黄萎病菌 *Verticillium albo-atrum* 在 PDA (马铃薯葡萄糖琼脂培养基) 平板上，菌落白色至浅灰色绒毛状，后期菌落变黑褐色

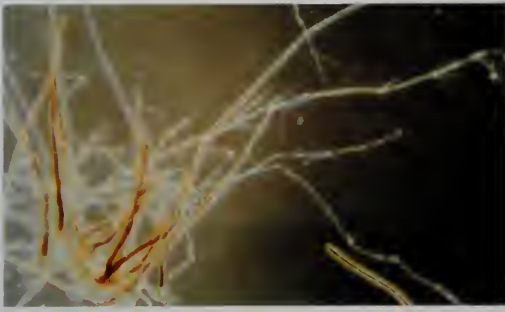


图 22-4 苜蓿黄萎病菌菌丝及分生孢子梗

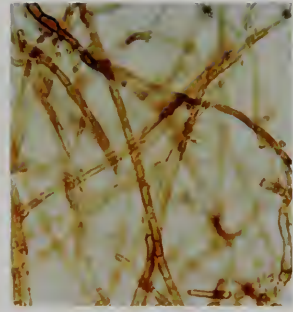


图 22-5 苜蓿黄萎病菌形成的休眠菌丝

图 23-1 小麦印度腥黑穗病病穗和病粒 (Fuentes-Davila, 1996)
左: 病穗 右: 病粒和健粒



图 23-2 小麦印度腥黑粉菌冬孢子和不育孢子 (Fuentes-Davila, 1996)

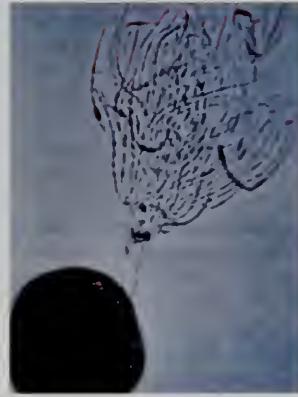


图 23-3 小麦印度腥黑粉菌冬孢子萌发产生先菌丝和初生担孢子 (Fuentes-Davila, 1996)



图 24-1 梨火疫为害症状



图 24-2 梨火疫病菌菌体



图 30-2 香蕉穿孔线虫病为害症状
(Marin *et al.*, 1998)

a. 香蕉发病根症状, 发黑; b. 香蕉发病根纵剖面症状;
c. 发病香蕉根系



图 31-1 紫苏泽兰



图 32-1 普通豚草 (万方浩 供)

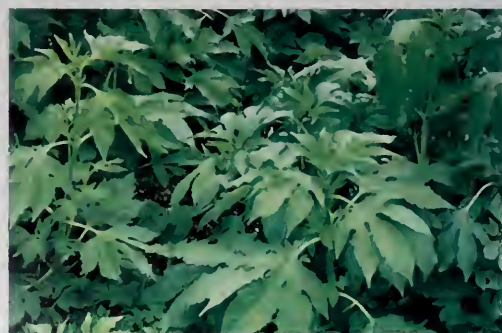


图 32-2 三裂叶豚草植株 (万方浩 摄, 2003)

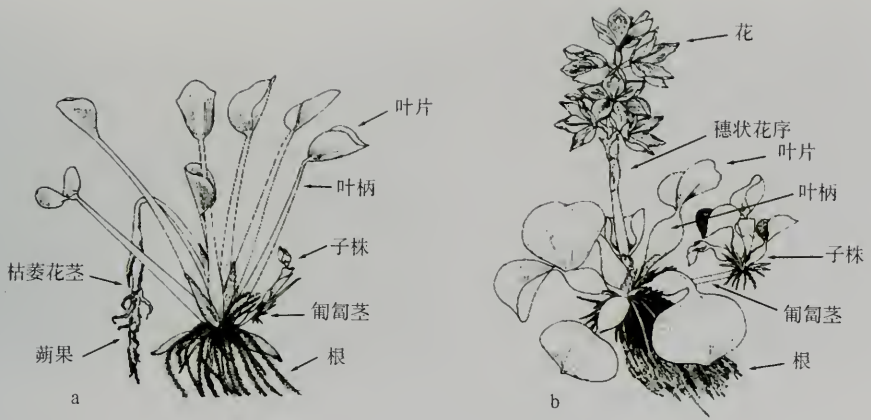


图 33-1 水葫芦全株图 (Julien, 1999)
(a. 花后; b. 花期)



图 33-2 水葫芦象甲生活史 (Julien, 1999)



图 34-3 水生型喜旱莲子草 (左) 和果园里陆生型喜旱莲子草 (右)
(安徽巢湖, 马瑞燕 摄, 1999)



图 34-6 莲草直胸跳甲成虫（左）及其在释放点控制喜旱莲子草状况（右）
（浙江杭州，唐健 摄，1999）



图 35-2 薇甘菊 *Mikania micrantha* H.B.K.(胡玉佳 摄)



图 36-1 大米草花穗
(引自 <http://www.habitas.org.uk/flora/species.asp?item=2680>)



图 36-2 大米草大面积发生
(引自 <http://www.habitas.org.uk/flora/species.asp?item=0002100>)



收到期	2003年4月29日
来源	孙志华赠
书价	150.00元
单据号	20036725
	2001年4月29日

中科院植物所图书馆



S0003916

(Q-1492.0101)



生物入侵——理论与实践 徐汝梅 叶万辉

生物入侵——数据集成、数据分析与预警 徐汝梅

● 重要农林外来入侵物种的生物学与控制 万方浩 郑小波 郭建英

《生物多样性公约》热点研究：外来物种入侵·生物安全·遗传资源

徐海根 王健民 强 胜 王长永

生物入侵生态学与管理 李 博

害虫生物防治的原理与方法 庞 义

森林植被防灾学 吴增志 陈东来 许中旗 吴杨哲

转基因植物的生物安全性 彭于发

重大动物疫病及其风险分析 夏红民

生物安全 刘 谦

生物技术和安全评估（翻译） 林忠平

SARS与突发公共卫生事件应对策略 郑 力

SARS医学中的物理热学方法与应用 刘 静

传染性非典型肺炎病原学检测与诊断 康熙雄 高 星

ISBN 7-03-014409-0



9 787030 144096 >

生命科学编辑部

联系电话：010-64012500

<http://www.lifescience.com.cn>

e-mail: info@lifescience.com.cn

ISBN 7-03-014409-0

定价：150.00 元

销售分类建议：生物医学/生物科学/生态学