

中文核心期刊 中国科学引文数据库来源期刊 中国科技核心期刊

Vol.33 No.3 Aug. 2024
第33卷 第3期 2024年8月

ISSN 2095-1787
CN 35-1307/Q

生物安全学报 (中英文)

JOURNAL OF BIOSAFETY



ISSN 2095-1787



08>

9 772095 178247



主 办
Sponsored by

中国植物保护学会
China Society of Plant Protection
福建省昆虫学会
Entomological Society of Fujian

JBS

www.jbscn.net
中国·福州
Fuzhou, China



办刊宗旨

面向国际, 共同应对国际生物安全的挑战, 关注自然和人类社会健康发展中的生物安全焦点与热点(生物入侵、农业转基因生物、农用化学品、新技术等带来的生物安全科学问题), 引领国际生物安全领域的研究与发展前沿, 主导国际生物安全领域的科技潮流, 及时刊载生物安全科学研究的新理论、新技术与新方法, 全面报道生物安全领域最新的高端研究成果。坚持百花齐放与百家争鸣、科学提升与知识普及相结合的方针, 办成具备科学与技术于一体的国际主流学术刊物(中英文)。

刊载内容

《生物安全学报(中英文)》致力于涉及生物安全领域的学科发展, 聚焦于生物安全领域各学科的前沿性与前瞻性原创性研究论文和综述论文, 重点刊载: (1) 入侵生物学学科发展的新理论与新假设; 外来有害生物入侵的特性与特征、入侵的生态过程与后果、入侵种与本地种的相互作用关系; 生态系统对生物入侵的响应过程与抵御机制; 生物入侵的预防预警、检测监测、根除扑灭、生物防治与综合治理的新技术与新方法。(2) 农业转基因生物的生态与社会安全性, 安全性评价的理论体系, 定性定量评估的技术与方法, 安全交流与安全管理。(3) 农用化学品对生物急性 / 慢性毒性累加过程与效应, 生物对农用化学品的抗性与适应性机制, 毒性缓解、抗药性治理与调控技术。(4) 高端新技术(如生物改良技术、物理纳米技术、生化辐射技术等) 产品潜在危害的识别与判定、安全性评价方法与技术指标。

《生物安全学报(中英文)》同时开辟学术聚焦、科技论坛、政策通讯、科技书评等栏目, 快速报道生物安全领域的新思想与新发现, 鼓励针对学术新观点的辨析与讨论, 提倡新思想的及时交流与沟通, 发表科技著作的评述, 交流生物安全的科技政策与行政管理措施。

Aims and Scope:

The Journal of Biosafety is a quarterly peer-reviewed scientific international journal focusing on important biosafety issues concerning human-dominated and natural ecological systems. It aims to publish papers on global biosafety problems related to biological invasions, transgenic organisms, application of chemicals and new biotechniques.

A goal of Journal of Biosafety is to provide a forum to exchange information and promote sound biosafety and biosecurity initiatives connected to sustainable development; publish new research in biosafety; provide information on best biosafety practices and pertinent policy issues and to provide a forum for biosafety and biosecurity information exchange in China and abroad.

Manuscripts in all areas pertinent to biosafety will be considered, including:

- New theories and hypotheses in biological invasions, the characteristics, ecological processes as well as the consequences of invasions in all kinds of ecosystems, interactions between alien and native species, reactions and mechanisms of ecosystems to invasion, new technologies of early warning, monitoring and integrated management of biological invasions;

- Risk assessment and management of new organisms in agriculture, generated by transgenic or other means, the communication and management of risk assessment theory, methodology, systematic analysis on risk assessment;

- Acute as well as chronic toxicity of agro-chemicals, resistance mechanisms in pests (insofar as it touches on biosafety aspects), and the technologies for safe environmental use of agro-chemicals;

- Risk assessment theory and biosafety procedures of the new technologies, including biotechnology, nanotechnology and radiation technology.

JBS will consider manuscripts of the following types:

- Review Articles
- Research Articles
 - ◆ Biological Invasions
 - ◆ Agricultural Transgenic Organisms
 - ◆ Agro-chemicals
 - ◆ Biosafety of New Technologies
- Scientific Focus
- Technical Communication
- Policy Forum
- Book Reviews

Occasionally, the journal will consider comments, and letters to the editor. If relevant, the authors of articles commented on will be invited to reply. Comments to articles published in other journals will not normally be considered.

生物安全学报(中英文)

第 33 卷 第 3 期 2024 年 8 月

目次

◎ 论坛

- 209 我国外来入侵物种名录分析及制修订探讨 陆轶青, 李飞飞, 姜培, 王聪, 潘绪斌
215 英国国家植物生物安全治理路径研究 姜丽华, 沈晓青, 贾涛, 邱明慧, 张宏斌

◎ 生物入侵

- 222 构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果及主要引诱成分分析 贾平凡, 张潇钰, 李清娥
229 不同寄主对南亚果实蝇生长发育和繁殖的影响 赵常伟, 李传仁, 杨玉婷, 安维彬, 王在凌
236 12 种双棘长蠹属昆虫(鞘翅目:长蠹科)的鉴定特征 王新国, 王俊峰, 黄艳, 邓雪华, 华展义, 赵菊鹏, 江志海
243 *Bdfor* 对橘小实蝇联系性颜色学习的影响 杨浩存, 魏冰冰, 张桂健, 邱辰旭, 郭彤, 牛长缨
250 北京外来入侵植物的演变、分布特征及影响因素 胡璐祯, 张渊媛, 原雪姣, 杨峥, 钟震宇, 白加德, 桑卫国
260 惠州西湖外来鱼类入侵与鱼类群落状况研究 余梵冬, 韦慧, 徐猛, 房苗, 舒璐, 汪学杰, 胡隐昌, 顾党恩

◎ 农用化学品

- 267 番茄潜叶蛾对不同类型杀虫剂的敏感性 张治科, 李媛, 张宁
274 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生物酶活性及田间发育动态的影响 杨春林, 胡强, 李洪浩, 席亚东

◎ 风险评估

- 285 黄星菊在中国的适生性分析及风险评估 袁淑珍, 龙阳, 李凯兵, 徐晗, 虞赞, 袁俊杰

◎ 植物保护

- 291 横坑切梢小蠹幼虫触角与口器化学传感器的超微结构 鲁国艳, 朱海迪, 杨培, 杨斌, 李宗波

◎ 研究简报

- 300 进境植物检疫性有害生物无花果蜡蚧在海南首次报道及其风险分析 吕朝军, 芮凯, 钟宝珠
305 海南首次发现入侵害虫七角星蜡蚧 胡馨予, 李彩凤, 魏久锋, 王芳

◎ 其他

- 310 征订启事

封面照片: 马尾茧蜂。提供人: 刘长明(福建农林大学)。

Front cover photo: *Euurobracon* sp. Provided by LIU Changming (Fujian Agriculture and Forestry University).

CONTENTS

Forums

209 Analysis, development and revision of the national list of invasive alien species LU Yiqing, LI Feifei, JIANG Pei, WANG Cong, PAN Xubin

215 Study on the national plant biosafety governance pathways in the UK JIANG Lihua, XIAN Xiaoqing, JIA Tao, QIU Minghui, ZHANG Hongbin

Biological invasions

222 Analysis of the attractant effect and main attractant compounds of *Broussonetia papyrifera* on females of *Zeugodacus tau* JIA Pingfan, ZHANG Xiaoyu, JI Qing'e

229 Effect of different host plants on the growth, development and fecundity of *Zeugodacus tau* (Walker) ... ZHAO Changwei, LI Chuanren, YANG Yuting, AN Weibin, WANG Zailing

236 Identification and key characteristics of 12 species of *Sinoxylon* (Coleoptera: Bostrichidae) WANG Xinguo, WANG Junfeng, HUANG Yan, DENG Xuehua, HUA Zhanyi, ZHAO Jupeng, JIANG Zhihai

243 Effects of *Bdfor* on associative color learning of *Bactrocera dorsalis* YANG Haocun, WEI Bingbing, ZHANG Guijian, QIU Chenxu, GUO Tong, NIU Changying

250 Evolution, distribution characteristics and influencing factors of alien invasive plants in Beijing HU Luyi, ZHANG Yuanyuan, YUAN Xuejiao, YANG Zheng, ZHONG Zhenyu, BAI Jiade, SANG Weiguo

260 Study on alien fish invasion and fish community status in Huizhou West Lake YU Fandong, WEI Hui, XU Meng, FANG Miao, SHU Lu, WANG Xuejie, HU Yinchang, GU Dang'en

Agro-chemicals

267 Toxicity of various insecticides against *Tuta absoluta* ZHANG Zhike, LI Yuan, ZHANG Ning

274 Effects of sublethal doses of chlorantraniliprole on the enzyme activity and field development dynamics of *Lissorhoptrus oryzophilus* YANG Chunlin, HU Qiang, LI Honghao, XI Yadong

Risk assessment

285 Adaptability analysis and risk assessment of *Centaurea solstitialis* in China YUAN Shuzhen, LONG Yang, LI Kaibing, XU Han, YU Yun, YUAN Junjie

Plant protection

291 Ultrastructure of chemical sensilla on the antennae and mouthparts of the larvae of *Tomicus minor* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) LU Guoyan, ZHU Haidi, YANG Pei, YANG Bin, LI Zongbo

Research notes

300 The first report and risk analysis of the imported plant quarantine pest *Ceroplastes rusci* in Hainan Province, China LÜ Chaojun, RUI Kai, ZHONG Baozhu

305 First report of invasive pest of *Ceroplastes stellifer* in Hainan Province, China HU Xinyu, LI Caifeng, WEI Jiufeng, WANG Fang

我国外来入侵物种名录分析及制修订探讨

陆轶青¹, 李飞飞², 姜培³, 王聪^{4*}, 潘绪斌^{4*}

¹生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035; ²北京市植物园管理处, 北京 100093;

³全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; ⁴中国检验检疫科学研究院, 北京 100176

摘要: 制定外来入侵物种名录是进行外来入侵物种管理的重要手段之一。当前我国已经制定并发布了多个与外来入侵物种相关的名单/名录, 包括《中国外来入侵物种名单》《我国主要外来林业有害生物名单》《国家重点管理外来入侵物种名录》(第一批)和《重点管理外来入侵物种名录》等。在《中华人民共和国生物安全法》和《外来入侵物种管理办法》相继施行的管理框架下, 有必要开展我国已有外来入侵物种名录的梳理与分析, 并与相关名录如检疫性有害生物名录进行比较。在此基础上, 本文还就未来外来入侵物种名录的制修订方法进行了讨论, 针对名录的管理和应用提出了具体建议。

关键词: 检疫性有害生物; 风险评估; 制修订; 名录管理



开放科学标识码
(OSID 码)

Analysis, development and revision of the national list of invasive alien species

LU Yiqing¹, LI Feifei², JIANG Pei³, WANG Cong^{4*}, PAN Xubin^{4*}

¹Foreign Environmental Cooperation Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China;

²Beijing Botanical Garden, Beijing 100093, China; ³National Agro-Tech Extension and Service Center,

Beijing 100125, China; ⁴Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100176, China

Abstract: Listing invasive alien species is an important tool in their management. Currently, China has established four editions of the *List of Invasive Alien Species of China*, *Main Alien Forestry Pest List of China*, *National List of Key Invasive Alien Species for Management* (1st), and *List of Key Invasive Alien Species for Management*. Under the framework of the *Biosafety Law of the People's Republic of China* and the *Management of Invasive Alien Species*, the list of invasive alien species in China should be analyzed and compared with related lists, such as the list of quarantine pests. This study discusses the methods of establishment and revision of future list of invasive alien species and provides specific suggestions for the management and application of the list.

Key words: quarantine pests; risk assessment; establishment and revision; list management

制定外来入侵物种名录是进行外来入侵物种管理的重要手段之一。2021年4月15日起施行的《中华人民共和国生物安全法》第十八条明确规定“国家建立生物安全名录和清单制度。国务院及其有关部门根据生物安全工作需要, 对涉及生物安全的材料、设备、技术、活动、重要生物资源数据、传染病、动植物疫病、外来入侵物种等制定、公布名录或者清单, 并动态调整。”2022年8月1日起施行的《外来入侵物种管理办法》第六条明确规定“农业农村部会同有关部门制定外来入侵物种名录, 实行动

态调整和分类管理, 建立外来入侵物种数据库, 制修订外来入侵物种风险评估、监测预警、防控治理等技术规范。”因此, 开展外来入侵物种名录梳理和制修订方法研究, 有助于更好地依据法律法规开展外来入侵物种管理, 有效防范和应对外来入侵物种危害。

爱知生物多样性目标纲要目标第九条明确提出: 到2020年, 明确外来入侵物种(潘绪斌等, 2015)。据统计, 草地生境现有外来入侵植物183种(曹婧等, 2020), 林业外来入侵昆虫种类共计

收稿日期(Received): 2023-08-16 接受日期(Accepted): 2023-12-29

基金项目: 全球环境基金(9874); 国家重点研发计划(2021YFC2600403)

作者简介: 陆轶青, 女, 副研究员。研究方向: 环境政策、生物多样性保护。E-mail: lu.yiqing@fecomee.org.cn

* 通信作者(Author for correspondence), 王聪, E-mail: wangcong_alice@outlook.com; 潘绪斌, E-mail: Xubin.Hu.Pan@gmail.com

116 种,全国所有省(自治区、直辖市)均有外来入侵生物发生(宋昱东等,2022)。针对我国已有的外来入侵物种已经开展了一系列调查研究,如国家林业和草原局 2014—2017 年开展的全国林业有害生物普查(以下简称“普查”)工作,发现我国发生的外来林业有害生物有 45 种,与 2006 年普查结果相比,新发现 13 种外来林业有害生物。

在开展有害生物调查的基础上,我国制定了多个与外来入侵物种相关的名单/名录,包括《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》《中华人民共和国进境动物检疫疫病名录》《全国林业检疫性有害生物名单》《全国林业危险性有害生物名单》等。同时,针对外来入侵物种本身,相关部门制定了“五名单两名录”。本文拟通过梳理我国已发布的各类外来入侵物种名单/名录现状并开展比较研究,总结和拓展外来入侵物种名单/名录制修订方法的思路并对其进行管理和应用提出建议。

1 我国已发布的外来入侵物种名单/名录

自 2003 年以来,生态环境部会同中国科学院,先后于 2003、2010、2014、2016 年发布了 4 批外来入侵物种名单,共包括 71 种外来入侵物种。截至 2020 年 8 月,根据生态环境部发布的《2019 中国生态环境状况公报》显示,全国已发现 660 多种外来入侵物种。67 个国家级自然保护区外来入侵物种调查结果表明,215 种外来入侵物种已入侵国家级自然保护区,其中 48 种外来入侵物种被列入《中国外来入侵物种名单》。

全国林业有害生物普查(以下简称“普查”)统计,本次普查共发现对林木、种苗等林业植物及其产品造成危害的林业有害生物种类 6179 种,在此基础上形成了包含 45 种物种的《我国主要外来林业有害生物名单》。

2013 年,原农业部制定了《国家重点管理外来入侵物种名录(第一批)》,52 种外来入侵物种被收录其中。2022 年农业农村部会同自然资源部、生态环境部、住房和城乡建设部、海关总署和国家林草局组织制定并发布了《重点管理外来入侵物种名录》。《名录》包含植物、昆虫、植物病原微生物、植物病原线虫、软体动物、鱼类、两栖动物、爬行动物等 8 个类群 59 种,其所列物种是当前和今后一个时期外来入侵物种防控的重点所在,该名录自 2023 年 1 月 1 日起正式施行。

除了国家名单/名录,各省或地区根据各自的生物安全、生态安全与粮食安全保障需求制定和发布了地方性名单/名录。如《云南省外来入侵物种名录(2019 版)》收录了云南省境内发现的外来入侵物种共计 441 种及 4 变种,《江苏省外来入侵物种名录(第一批)》包含外来入侵物种 32 种,其中 I 级重点管控物种 8 种,II 级一般管控物种 24 种。

2 当前相关名单/名录比较分析

世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)在 2000 年发布并在 2004 年更新了《世界 100 种恶性外来入侵物种》(Lowe *et al.*, 2000)。该名单主要考虑物种对生物多样性和人类产生的影响和物种类群的广泛性,每个属只选 1 个种。在《世界 100 种恶性外来入侵物种》中,除我国本土物种外,在我国已分布的外来入侵物种有 32 种(冼晓青等,2022)。这 32 种中未进入“五名单两名录”的物种有 22 种,包括谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* Everts、细足捷蚁 *Anoplolepis gracilipes* (Jerdon)、烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius)、大果柏大蚜 *Cinara cupressi* Annand、广大头蚁 *Pheidole megacephala* Fabricius、新几内亚扁虫 *Platydemus manokwari* De Beauchamp、屋顶鼠 *Rattus rattus* (Linnaeus)、河狸鼠 *Myocastor coypus* (Molina)、蟾胡子鲶 *Clarias batrachus* L.、巴西红耳龟 *Trachemys scripta elegans* Wied、南美蟛蜞菊 *Sphagneticola trilobata* (L.) Pruski、缩刺仙人掌 *Opuntia stricta* (Haw.) Haw.、白茅 *Imperata cylindrica* (L.) P. Beauv.、黑荆 *Acacia mearnsii* De Wild.、东方紫金牛 *Ardisia elliptica* Thunb.、五脉白千层 *Melaleuca quinquenervia* (Cav.) S.T.Blake、大米草 *Spartina anglica* C. E. Hubb.、裙带菜 *Undaria pinnatifida* Suringar、板栗疫病菌 *Cryphonectria parasitica* (Murrill) M. E. Barr、蛙壶菌 *Batrachochytrium dendrobatidis*、变形藻丝囊霉 *Aphanomyces astaci* Schikora、香蕉束顶病毒 *Banana bunchy top virus*。

我国海关、农业和林业主管部门也根据各自的管理权限和工作需要,制定了相应的植物检疫性有害生物的名单/名录,这些名单/名录与以上关于外来入侵物种的“五名单两名录”也密切相关。农业农村部与海关总署 2021 年修订并发布了《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》,其中共包含 446 种(属)有害生物,“五名单两名录”中有

24 种出现在该名录中。农业农村部依据《植物检疫条例》制定了《全国农业植物检疫性有害生物名单》，并在此基础上发布了《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录》。以上名单/名录均在定期修订更新中，前者最新修订时间为 2020 年 11 月，后者最新修订时间为 2023 年 8 月。2013 年原国家林业局修订并发布了《全国林业检疫性有害生物名单》(14 种)和《全国林业危险性有害生物名单》(190 种)。在这 2 个名单中,存在于“五名单两名录”中的有 18 种。这些有害生物名单/名录的制

定,在一定程度上对外来入侵物种起到了管理和防控作用。同时,因为其与制定部门的工作权限和关注重点更为相关,在制修订外来入侵物种名单/名录时常被作为参考。通过对不同名单/名录的对比可知(表 1),这些名单/名录中与“五名单两名录”均有不同程度的重合。应持续关注检疫性有害生物,研究这些物种从进入我国到成为外来入侵物种的发生和扩散趋势,从而更好地通过检疫手段防控外来入侵物种。

表 1 我国现有外来入侵物种和检疫性有害生物名单/名录对比
Table 1 Comparison between the lists of invasive alien species and quarantine pests

种 Species	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
紫茎泽兰 <i>Eupatorium adenophomm</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
薇甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes
空心莲子草 <i>Alternanthera poloxeroides</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No
毒麦 <i>Lolium temulentum</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	否 No	否 No	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
飞机草 <i>Chromolaena odorata</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No
凤眼莲 <i>Eichhomia crassipes</i>	第一批 The first batch (2003)	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No
假高粱 <i>Sorghum halepense</i>	第一批 The first batch (2003)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
蔗扁蛾 <i>Opogona sacchati</i>	第一批 The first batch (2003)	否 No	否 No	否 No	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
湿地松粉蚧 <i>Omcella acuta</i>	第一批 The first batch (2003)	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	是 Yes
红脂大小蠹 <i>Dendroctonus valens</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
美国白蛾 <i>Hyphantria cunea</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
非洲大蜗牛 <i>Achatina fulica</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No
福寿螺 <i>Pomacea canaliculata</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No
美洲牛蛙 <i>Rana catesbeiana</i>	第一批 The first batch (2003)	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No
马缨丹 <i>Lantana camara</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No
三裂叶豚草 <i>Ambrosia trifida</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
大蓼 <i>Pisda stratiots</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
加拿大一枝黄花 <i>Solidago canadensis</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	是 Yes
蒺藜草 <i>Cnchrus echinatus</i>	第二批 The second batch (2010)	否 No	否 No	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No
银胶菊 <i>Parthenium hystrophorus</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
黄顶菊 <i>Flaveria bidentis</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No
土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i>	第二批 The second batch (2010)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
落葵薯 <i>Anredera cordifolia</i>	第二批 The second batch (2010)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
桉树枝瘿姬小蜂 <i>Leptocybe invasa</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	是 Yes
稻水象甲 <i>Lissorhoptrus oryzophilus</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No
红火蚁 <i>Solenopsis invicta</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes
克氏原螯虾 <i>Procambams clarkia</i>	第二批 The second batch (2010)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
苹果蠹蛾 <i>Cydia pomonella</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	是 Yes	是 Yes
三叶草斑潜蝇 <i>Linbmyza trifolii</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
松材线虫 <i>Bursaphelenchus xyloplfflus</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
松突圆蚧 <i>Hemiberlesia pitysophila</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
椰心叶甲 <i>Brontispa longissima</i>	第二批 The second batch (2010)	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
钻形紫菀 <i>Aster subulatus</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
苏门白酒草 <i>Erigeron sumatrensis</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No

续表 1

种 Species	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	第三批 The third batch (2014)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
刺苍耳 <i>Xanthium spinosum</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
圆叶牵牛 <i>Ipomoea purpurea</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
长刺蒺藜草 <i>Cenchrus longispinus</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
巴西龟 <i>Trachemys scripta elegans</i>	第三批 The third batch (2014)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
豹纹脂身鲇 <i>Pterygoplichthys pardalis</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
红腹锯鲑脂鲤 <i>Pygocentrus nattereri</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	第三批 The third batch (2014)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
红棕象甲 <i>Rhynchophorus ferrugineus</i>	第三批 The third batch (2014)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No
悬铃木方翅网蝽 <i>Corythucha ciliata</i>	第三批 The third batch (2014)	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	是 Yes
扶桑绵粉蚧 <i>Phenacoccus solenopsis</i>	第三批 The third batch (2014)	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	是 Yes	是 Yes	是 Yes
刺桐姬小蜂 <i>Quadrastichus erythrinae</i>	第三批 The third batch (2014)	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
长芒苋 <i>Amaranthus palmeri</i>	第四批 The fourth batch (2016)	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
光荚含羞草 <i>Mimosa bimucronata</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
五爪金龙 <i>Ipomoea cairica</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	是 Yes
喀西茄 <i>Solanum aculeatissimum</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
黄花刺茄 <i>Solanum rostratum</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
刺梨瓜 <i>Sicyos angulatus</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
大狼把草 <i>Bidens frondosa</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
野燕麦 <i>Avena fatua</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
水盾草 <i>Cabomba caroliniana</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No
美洲大蠊 <i>Periplaneta Americana</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
德国小蠊 <i>Blattella germanica</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
无花果蜡蚧 <i>Ceroplastes rusci</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No
枣实蝇 <i>Carpomya vesuviana</i>	第四批 The fourth batch (2016)	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes	否 No	是 Yes
椰子织蛾 <i>Opisina arenosella</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No
松树蜂 <i>Sirex noctilio</i>	第四批 The fourth batch (2016)	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No
假苍耳 <i>Cyclachaena xanthiifolia</i>	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No
毒莴苣 <i>Lactuca serriola</i>	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No
马铃薯甲虫 <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No
美洲斑潜蝇 <i>Liriomyza sativae</i>	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No
日本松干蚧 <i>Matsucoccus matsumurae</i>	否 No	否 No	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No
草地贪夜蛾 <i>Spodoptera frugiperda</i>	否 No	否 No	是 Yes	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No

I :《中国外来入侵物种名单》(四批次); II :《国家重点管理外来物种名录(第一批)》(2012, 52 种); III :《重点管理外来入侵物种名录》(2022, 59 种); IV :《我国主要外来林业有害生物名单》(2019, 45 种); V :“世界 100 种恶性外来入侵物种”; VI :《进境植物检疫性有害生物名录》[2021, 446 种(属)]; VII :《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录》(2022, 31 种); VIII :《全国林业检疫性有害生物名单》(14 种)和《全国林业危险性有害生物名单》(190 种)。是:在名单中;否:不在名单中。

I : *List of Alien Invasive Species in China* (Four Batches); II : *List of Alien Species Released by the Ministry of Agriculture* (the first batch) (2012, 52 species); III : *List of Key Managed Alien Invasive Species* (2022, 59 species); IV : *List of Major Exotic Forest Pests in China* (2019, 45 species); V : "List of 100 worst alien invasive species in the world"; VI : *List of Quarantine Pests for Imported Plants* (2021, 446 species/genus); VII : *Distribution of Agricultural Plant Quarantine Pests by the Ministry of Agriculture* (2022, 31 species); VIII : *National List of Quarantine Pests in Forestry* (14 species) and the *National List of Hazardous Pests in Forestry* (190 species). Yes: On the list; No: Not on the list.

3 未来外来入侵物种名单/名录制修订建议

3.1 加快中国外来入侵物种名单/名录更新

随着全球化进一步发展和全球环境变化,我国外来入侵物种不断增加。近 10 年来新发生的入侵

物种有 56 种,是 20 世纪 90 年代新增入侵物种数的 30 多倍(陈宝雄等,2020)。从各个名单的更新周期来看,平均 3~5 年有关部门会制定或更新外来入侵物种名单/名录,但更新/制定的速度与实际工

作的需要不能完全匹配。外来入侵物种名单或名录的制修订和发布通常由官方主管部门开展,应具有及时性和科学性,以指导相关防控工作并成为制定防控外来有害生物入侵政策的科学依据(孙佩珊等,2017;王聪等,2014)。因此有必要对外来入侵物种名单/名录的更新速度和周期进行更全面的评估,有规律地定期更新外来入侵物种的名称和相关信息,以保证其具备及时性。同时,为了保证名单或名录的科学性,应加强对外来入侵物种持续调查,及时获知外来入侵物种的发生和危害情况,据此经风险评估对相关名单或名录进行制修订(孙佩珊等,2017;王聪等,2014)。2021年2月,农业农村部、自然资源部、生态环境部、海关总署和国家林草局发布的《关于印发进一步加强外来物种入侵防控工作方案的通知》,要求开展外来入侵物种普查和监测预警,“以我国初步掌握的外来入侵物种为基础,在农田、渔业水域、森林、草原、湿地等各区域,启动外来入侵物种普查,通过3年左右的时间,摸清我国外来入侵物种的种类数量、分布范围、危害程度等情况”。本次普查结束后,外来入侵物种名单应根据普查结果进行调整和更新,规范各名录/名单的使用场景,发挥名单/名录应有的查询、警示和防控意义。

3.2 开展外来入侵物种风险评估

《中华人民共和国生物安全法》明确规定“为确定监督管理的重点领域、重点项目,制定、调整生物安全相关名录或者清单”“有关部门应当及时开展生物安全风险调查评估,依法采取必要的风险防控措施”。2022年8月1日起施行的《外来入侵物种管理办法》第十八条也明确规定“省级以上人民政府农业农村、自然资源(海洋)、生态环境、林业草原等主管部门和海关应当加强外来入侵物种监测信息共享,分析研判外来入侵物种发生、扩散趋势,评估危害风险,及时发布预警预报,提出应对措施,指导开展防控”。外来入侵物种风险评估是外来入侵物种防控体系中不可或缺的重要环节。在名单/名录的制修订过程中,应加强和完善对外来入侵物种的风险研判(潘绪斌,2020)。

对外来入侵物种来说,并不是简单的列入名单/名录即完成管控,对中国已分布或未来有可能分布的外来入侵物种应开展风险评估。在进行风险评估时,可参考对检疫性有害生物的评估过程,

整合外来物种截获数据、生物多样性调查数据以及“公众科学”数据等(王聪等,2014),判断其适生性区域、危害程度,并提出有针对性的管理措施,再进行名单/名录的更新和调整。同时,名单/名录本身应与分级管控有效结合,不同的名单/名录对应不同的管理场景和防控手段,特别是对于不可接收风险等级的物种,才有必要列入国家或省级外来入侵物种重点管理名单/名录。

3.3 名单/名录制修订流程更新建议

针对外来入侵物种名单/名录,应规范定期与不定期名单/名录制修订条件和流程。对定期更新的外来入侵物种名单/名录列表和不定期更新名单/名录可依次经过风险评估、专家评审、机构审核和公众反馈四步骤,分别形成名单/名录初表(参考项)、备选名单/名录(备选项)、公开初表(公开项)和公开终表(修订项),从而完成名单/名录的制修订。还可充分利用数据挖掘技术评估定殖可能性和口岸截获及边境调查信息确定进入可能性,对自主集成的全球有害生物数据库中的有害生物分布数据分类别进行初筛,减少后续风险评估和专家评审工作量,从而为外来入侵物种名单/名录制修订提供理论基础和技术支持。专家组的组成对于名单/名录的形成起着至关重要的作用,应包括分类学专家、风险分析专家以及植保防控专家。名单/名录的发布机构应注重对评估结果的把关和关注社会、生态多种信息进行综合评定,从而更好地确定发布和修订的时间节点。同时,在名单/名录的公示阶段和实施阶段应注重对公众反馈信息的搜集和汇总,宣传和应用阶段应统一进行流程化的全周期管理。

3.4 相关名单/名录借鉴

我国的外来入侵物种名单/名录的制修订也应该借鉴国际国内相关名单/名录的内容。如,欧洲及地中海植物保护组织(European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO)制定了外来入侵植物名单(EPPO list of invasive alien plants)和观察名单(EPPO observation list of invasive alien plants)(https://www.eppo.int/ACTIVITIES/invasive_alien_plants/iap_lists);美国根据区域(regional lists)和州(state lists)进行了分级管理(<https://www.invasivespeciesinfo.gov/subject/lists>)。因此,在名单/名录的制修订过程中,可梳理各国家、组织已

制定的外来入侵物种名单/名录的方法,参考类似名单的分类方法,调整我国外来入侵物种名单/名录的系统组成。同时,国内外检疫性有害生物名录已成体系,主要国家和地区的制修订方法也应该被借鉴到外来入侵物种名单/名录制定流程中(王瑞等,2022)。并加快与国际外来入侵物种监管的技术方法接轨,加强同国际相关外来入侵物种防控第三方的合作。名单/名录的制定作为构建全球外来入侵物种防控体系的首要环节,能促进形成有效的国际联防联控机制。同时,以此作为对我国生物多样性保护的路径探索手段,也能有利于提升我国在外来入侵物种管控领域内的话语权和国际地位,促进达成符合我国多种生物安全保障需求的外来入侵物种管控战略。

4 外来入侵物种名单/名录的管理与应用

《中华人民共和国生物安全法》和《外来入侵物种管理办法》均明确规定了农业农村主管部门与其他有关部门应制定外来入侵物种名单/名录和管理办法。名单/名录将对外来入侵物种防控起到方向标的作用。因此需要跟踪名录的应用情况,根据实际情况可进行定期评估和适时修订。可参考国家标准《限定性有害生物名录指南》(GB/T 37801—2019)制定相应的标准来规定制定、维护和公开外来入侵物种名单/名录的程序。

为了提高外来入侵物种名单/名录的使用效率,各部门之间应进行分工合作,建立合理的外来入侵物种管理体系,完善名单/名录体系框架建设。同时梳理外来入侵物种同检疫性有害生物的关系,避免重复工作造成资源浪费,并充分利用相关数据来源做参考,完善和丰富名单/名录的制修订方法,对海量数据进行筛选分析,保障名单/名录的科学性和有效性。同时加强科普宣传,积极拓展外来入侵

物种名单/名录的公众认知,从而提高全民防控外来入侵物种的意识,使得名单/名录能够在外来入侵物种防控中发挥积极作用。

参考文献

- 曹婧,徐晗,潘绪斌,戎郁萍,2020. 中国草地外来入侵植物现状研究. *草地学报*, 28(1): 1–11.
- 陈宝雄,孙玉芳,韩智华,黄宏坤,张宏斌,李垚奎,张国良,刘万学,2020. 我国外来入侵生物防控现状、问题和对策. *生物安全学报*, 29(3): 157–163.
- 潘绪斌,严进,李志红,张祥林,叶军,朱水芳,2015. 爱知生物多样性目标框架下生物入侵的检疫防控. *植物检疫*, 29(5): 39–41.
- 潘绪斌,2020. 有害生物风险分析. 北京: 科学出版社.
- 宋昱东,丁子玮,王聪,潘绪斌,曹传旺,2022. 中国林业外来入侵昆虫名录及分析. *植物检疫*, 36(5): 1–12.
- 孙佩珊,刘明迪,严进,李志红,潘绪斌,2017. 植物检疫性有害生物名单相互关系研究. *植物检疫*, 31(4): 15–21.
- 王聪,郑明慧,王振华,秦誉嘉,周贤,龚国祥,李志红,潘绪斌,2014. 植物检疫性有害生物名单发展综述与制订方法探讨. *植物检疫*, 28(3): 1–7.
- 王瑞,黄宏坤,张宏斌,张艳萍,薛琳,陈宝雄,杨念婉,郭建英,刘万学,万方浩,2022. 中国外来入侵物种防控法规和管理机制空缺分析. *植物保护*, 48(4): 2–9.
- 洗晓青,王瑞,陈宝雄,张宏斌,李垚奎,万方浩,张桂芬,刘万学,2022. “世界 100 恶性外来入侵物种”在我国大陆的入侵现状. *生物安全学报*, 31(1): 9–16.
- LOWE S, BROWNE M, BOUDJELAS S, DE POORTER M, 2000. 100 of the world's worst invasive alien species a selection from the global invasive species database. New Zealand: Hollands Printing Ltd.

(责任编辑:郭莹)

英国国家植物生物安全治理路径研究

姜丽华¹⁺, 洗晓青²⁺, 贾涛³, 邱明慧¹, 张宏斌^{3*}

¹中国农业科学院农业信息研究所/农业农村部农业大数据重点实验室, 北京 100081; ²中国农业科学院植物保护研究所/植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193;
³农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125

摘要: 植物病虫害疫情是全球粮食生产安全的重大威胁。英国较重视植物安全治理, 较早开始布局相关政策, 构建风险防控体系, 取得了良好成效。本文采用文献调研、分析与综合、比较研究等方法, 围绕英国面临的植物安全的严峻形势, 分析了英国在战略规划、治理体系、制度建设、技术研发、国际合作等方面的经验与做法。英国政府把植物生物安全纳入国家安全战略, 统筹植物生物安全组织体系, 制定国际先进水平的安全制度, 构建有生物安全保障的植物供应链, 推进产学研深度融合, 大力开展全民科学, 对我国生物安全建设具有重要借鉴意义。纵观英国植物生物安全治理体系建设的做法, 本文对我国植物生物安全体系建设提出了相应建议, 以期对相关领域研究者和政策制定者提供参考。

关键词: 植物生物安全; 英国生物安全; 植物健康; 生物安全治理



开放科学标识码
(OSID 码)

Study on the national plant biosafety governance pathways in the UK

JIANG Lihua¹⁺, XIAN Xiaoqing²⁺, JIA Tao³, QIU Minghui¹, ZHANG Hongbin^{3*}

¹Institute of Agricultural Information, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Big Data, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; ²Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Beijing 100193, China; ³Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China

Abstract: Healthy plants are the foundation of life on earth, and plant diseases and pests are major threats to global food production and security. The UK attaches great importance to plant safety management and has started laying out relevant policies earlier, making good progress in building a risk prevention and control system. In this study, we conducted an in-depth analysis of the UK's experience and practices in strategic planning, governance systems, institutional construction, technology research and development, and international cooperation using literature review, analysis, synthesis, and comparative research. The UK government has incorporated plant biosecurity into its national security strategy, coordinated the system of plant biosecurity organizations, developed internationally advanced safety systems, constructed a plant supply chain with biosecurity guarantees, promoted deep integration of industry, academia, and research, and vigorously developed national science, which is an important reference for China's biosecurity construction.

Key words: plant biosafety; biosafety in the UK; plant health; biosafety governance

近年来, 沙漠蝗虫 *Schistocerca gregaria* Forsk.、草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)、小麦矮腥黑穗病、梨火疫病等植物病虫害大范围入侵全球多个粮食主产国, 加上洪灾、旱灾等气候不利

因素, 全球植物生物安全形势严峻(洗晓青等, 2022)。据粮农组织估计, 若不加以防治, 病虫害每年将造成全球粮食产量损失近 40%, 损失超 2200 亿美元(中华人民共和国农业农村部, 2022)。2022

收稿日期(Received): 2023-08-18 接受日期(Accepted): 2023-10-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2600400)

作者简介: 姜丽华, 女, 研究员。研究方向: 外来入侵物种监测预警。E-mail: jianglihua@caas.cn; 洗晓青, 女, 副研究员。研究方向: 外来入侵物种风险评估与早期预警。E-mail: xianxiaqing@caas.cn

+ 同等贡献作者(The two authors contribution equally to this work)

* 通信作者(Author for correspondence), 张宏斌, E-mail: zhanghongbin@caas.cn

年 3 月 29 日,联合国大会审议将 5 月 12 日定为“国际植物健康日”,其目的是倡导各方重视植物病虫害导致的大规模减产及对全球饥饿造成的重大影响,提升植物病虫害监测预警和可持续治理水平(FAO,2022)。

英国政府高度重视植物健康工作,植物生物安全的国家战略地位突出,并建立了跨部门的组织管理体系;制定了国际先进水平的安全制度,强化国际合作;注重主动型风险预警,建立了有生物安全保障的植物供应链;强化了植物健康与科学研究能力,充分利用创新技术以应对不断变化的威胁;大力发展全民科学,提高公众参与,构建了从政府到民众协同合作的防控体系。我国是农林业大国,面临严重的植物安全问题,2022 年累计实施农作物重大病虫害防治面积达 3.48 亿公顷次,常见病虫害达 1600 种,其中有 100 多种能造成大面积作物产量损失(农民日报,2022)。因此,深入分析英国的植物安全治理体系,对我国植物安全体系建设具有重要的借鉴意义。本文围绕英国面临的植物安全的严峻形势,分析了英国在战略规划、治理体系、制度建设、技术研发、国际合作等方面的经验与做法,以期对相关领域研究者和政策制定者提供参考。

1 英国植物安全面临的严峻形势

英国本土的岛屿地理特点与全球第六大经济体的国际地位,是其遭受外来入侵物种威胁严重的原因。据统计,1971(首次发现荷兰榆树病)—2021 年(发现腐霉、疫霉)间,新发病虫害呈加速上升态势。前 30 a 间发生重大病虫害疫情 5 起,后 20 a 发生重大病虫害疫情 19 起。其中,2012 年白蜡树梢枯病疫情最为严重,对英国本地白蜡树 *Fraxinus chinensis* Roxb. 产生致命危害,据估计,白蜡树枯梢病在英国造成的生态破坏导致 150 亿英镑的损失。此次入侵彻底改变了公众对植物安全重要性的认知,最终促使英国政府在 2014 年出台《英国植物生物安全战略》(UK Plant Biosecurity Strategy)。

随着世界贸易的频繁、人类活动的拓展,加之全球气候变暖,为病虫害的传播提供了更多途径,导致英国植物健康面临的威胁日益增加。

1.1 病虫害种类繁多

当前,英国政府已通过实施植物健康风险登记机制,对 1200 多种有害生物和病原体进行评估,并将对 700 多种有害生物和病原体开展进一步研究

并确定其潜在威胁。这 1200 多种有害生物和病原体中,有 85 种病虫害威胁苹果树的健康,160 种病虫害威胁番茄生产,130 种病虫害危及英国的玫瑰产业,90 种病虫害威胁着橡树的健康,165 种病虫害威胁马铃薯生产。欧洲和地中海植物保护组织(European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO)的全球数据库中记录了 90000 余种与农业、林业和植物保护有关的物种,包括昆虫、细菌、真菌、病毒和线虫,但仍存在大量物种未被记录在内。同时,气候变化和贸易全球化等因素也将影响英国的植物病虫害数量以及微生物病害的进化(冼晓青等,2022)。

1.2 风险的传入途径日益增多

不列颠群岛的生物地理环境导致有害生物和病原体可以通过空气传播轻易穿越海峡。在英国暴发的白蜡树枯梢病,就是由真菌传入英国并扩散蔓延引起的。据估计,英国白蜡树枯梢病造成的经济破坏,相当于英国植物进出口贸易经济的 50 倍,同时较 2001 年英国暴发口蹄疫病时造成的经济破坏高出 1/3。

有害生物和病原体可以通过多种方式在国家之间传播,包括贸易中的活体植物或植物产品、从国外入境的行李、土壤及各种包装等。全球贸易的增长意味着每年约有 1860 万 t 植物和栽培材料进口到英国,这也成为病虫害传播的首要因素。在英国,每年有大约 100 起通过这类途径传播的病虫害(包括在偏远内陆地区截获的病虫害)。通常情况下,其中大约有 5 起病虫害需引起高度重视(Government Office for Science & Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2015)。由于英国本土的生产无法满足需求,导致植物和栽培材料的贸易不可或缺,英国实行以风险为基础的监管制度,维持生物安全。近年来,植物和植物产品的网上交易规模大幅增加,大大增加了植物安全风险隐患。

1.3 气候变化加剧病虫害蔓延

气候变化加剧了病虫害传播的速度和范围,为有害生物和特定植物病害在新的地区定殖创造了有利条件。2021 年,联合国粮食及农业组织(FAO)发布的一份关于气候变化对植物健康影响的科学综述指出,气候变化已经扩大了一些有害生物的寄主范围和地理分布,如红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus* F.、草地贪夜蛾、实蝇、沙漠蝗和白蜡窄吉

丁 *Agrilus planipennis* Fairmaire, 并可能进一步增加有害生物传入新地区的风险, 呼吁各国加强国际合作, 制定统一的植物保护战略, 并开展更多研究 (FAO, 2022)。伯明翰大学投资 1500 万英镑新成立的林业研究中心专门研究揭示气候变化和害虫入侵对森林的影响。英国埃克塞特大学等机构研究人员调查了 600 余种病虫害在过去 50 a 的全球分布情况, 结果发现, 赤道地区常见的病虫害正以平均每年约 2.7 km 的速度向南北更高纬度方向扩散, 这一扩散趋势与全球变暖有密切关系 (Barford, 2013)。同时研究揭示, 病虫害可导致全球粮食减产 10%~16%, 仅有害病菌造成的减产就可养活约 6 亿人 (Fisher, 2012)。气候变化使许多病菌和害虫的生存范围得以扩大, 如不加以应对, 将严重影响全球粮食安全。

2 英国植物安全治理体系

英国政府高度重视植物生物安全, 把植物生物安全上升为国家战略, 先后制定了一系列关于植物生物安全相关政策, 不断完善国家植物生物安全体系, 将植物生物安全作为国家安全的重要组成部分进行系统性防护。

2.1 英国植物安全治理战略

2014 年 6 月, 英国环境、食品和农村事务部 (Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra) 发布《英国植物生物安全战略》(Plant Biosecurity Strategy for Great Britain), 通过跨部门的合作, 为作物、树木和其他植物提供有力的保护计划, 特别是植物病虫害防治 (Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2020)。Defra 对 1200 多种植物病虫害给英国带来的风险进行评级, 汇编成《英国植物健康风险登记册》(UK Plant Health Risk Register), 成为英国风险分析专家、政策制定者和行业从业者之间沟通植物病虫害风险的重要工具 (Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2017)。

2014 年 12 月 18 日, 英国政府科学办公室 (GO-Science) 及环境、食品和农村事务部发布了英国首个动植物健康领域战略报告《英国动植物健康: 建设科学能力》(Government Office for Science & Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2014)。报告重点强调了在该领域科学能力建设, 国家层面的整体协调合作 (包括国家布局、科研

工作、基础设施等方面) 具有重要意义。

2016 年发布的《英国动植物健康研究到 2020 年的远景和高水平战略》(The Vision and High Level Strategy for UK Animal and Plant Health Research to 2020) 希望能够创造并利用新的研究知识和技术, 实现实时系统地预测、发现和了解当前英国主要的动植物健康问题和新出现的威胁, 并做出迅速响应 (吴晓燕和陈方, 2020)。

2018 年 7 月, 英国发布《英国国家生物安全战略》(UK Biological Security Strategy), 该战略要求重点加强了解生物安全风险、防止生物安全风险、检测生物安全风险、应对生物安全风险等 4 个方面的能力建设, 积极应对生物风险 (Home office, 2018)。

2021 年英国国家研究与创新署 (UK Research and Innovation, UKRI) 发布面向未来 10 年的植物科学研究战略 (UK Plant Science Research Strategy A Green Roadmap for the Next Ten Years), 旨在为植物科学研究与创新设定明确目标, 提出通过遥感、生物干预和植物免疫, 建立监测、防控和阻断植物病虫害的积极主动机制 (UK, 2021)。

2.2 英国植物安全治理组织结构

英国植物生物安全由英国植物健康服务局 (UK Plant Health Service, PHS) 负责, 该机构由英国环境、食品和农村事务部、苏格兰政府、威尔士政府、北爱尔兰农业、环境和农村事务行政部和林业委员会构成。英国植物健康服务局负责制定植物健康框架, 确保在全英国范围内采用保护植物健康的通用规则。同时, 英国植物健康服务局也尊重潜在的差异, 并赋予地方政府在技术上合理的前提下, 采取不同举措。英国动植物卫生署 (UK Animal and Plant Health Agency, APHA) 负责农业和园艺领域的相关管理。

在英格兰, 英国环境、食品和农村事务部负责战略监导、政策制定、立法、建立组织架构提供国家公共资源, 并负责协调英国各地的风险评估和政策制定。

在威尔士, 威尔士政府负责管理植物健康管理, 并提供战略政策咨询、制定法律、实施管控植物和树木健康的官方措施以及植物种子的鉴定工作。英国动植物卫生署负责农业和园艺领域的相关管理。威尔士自然资源部和林业委员会负责林业领域的植物健康管理。

在苏格兰,苏格兰林业局负责森林领域的政策制定和相关业务。苏格兰自然部(Nature Scot)负责自然环境的管理,苏格兰农业科学局(Scottish Agricultural Science Agency, SASA)是苏格兰政府农业和农村经济局(Bureau of Agriculture and Rural Economics, ARE)的下属机构,负责农业和园艺领域的相关管理。

林业委员会负责英国的植物健康(林业领域)和与林木育种材料有关的事务。英国国务大臣在英国环境、食品和农村事务部和林业委员会的指导和支持下制定林业和林地政策。林业委员会还代表英国政府、苏格兰政府和威尔士政府履行跨境植物健康管理(林业领域)职能。

3 植物安全治理成效

3.1 国际先进水平的植物生物安全制度

植物病虫害传入英国之后,其根除成本远大于预防成本。据以往暴发的病虫害疫情显示,根除小规模暴发的亚洲长角甲 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) 花费了 200 万英镑,而管控白蜡树枯梢病的暴发,预计英国将在未来几十年内花费 150 亿英镑。因此,英国高度重视植物生物安全制度建设,在边境防控、境内贸易监管、病虫害暴发应对等方面取得积极成效,有效预防和应对了有害生物与病原体的入侵扩散(尹志欣和朱姝,2021)。

在边境防控方面,英国政府完善进出口管制,建立贸易伙伴,开展互联网贸易合作,同时加强边境控制检查,预防有害生物和病原体传播。英国政府通过制定和实施严格的植物检疫措施,禁止或管制进口高危病虫害植物、其他栽培材料、植物产品、木材及木制品(包括柴火),保护植物资源,促进植物商品的安全国际贸易。脱欧之后,英国政府对植物生物安全进行重新审查和规划,采取了更为严格的入境、边境、内陆交易上的法律和措施。2021 年 1 月,英国实施了一项新的进口制度,旨在解决英国(而非欧盟)面临的植物健康风险,并根据新收集的信息和风险分析持续更新。2021 年 9 月,英国通过 WTO 发布了 G/SPS/N/GBR/11 号通报,修订了(EU)2019/2072 号实施条例中部分有害生物的管制措施(福建省标准化研究院,2021)。在内陆贸易监管上,英国采取植物护照制度,确保在英国境内流动的受管制的植物和植物产品处在全程监测中,且可确保其良好的健康状况。在病虫害暴发防备

工作上,英国环境、食品和农村事务部建立了一个病虫害暴发防备组织,由英国植物健康暴发防备委员会和 5 个工作组组成,以监测应对病虫害暴发的需求并填补防备工作中的任何缺口。2017 年,英国政府制定了《通用植物健康应急处置方案》,2022 年对其进行修订,并公布了 35 个针对特定病虫害暴发的应对方案,其中包括针对叶缘焦枯病菌和白蜡窄吉丁的应对方案(UK Legislation,2022)。

3.2 前沿科技支撑植物安全治理

充分利用现有的创新科学技术,及时了解不断变化的植物健康威胁类型,提高植物生物安全治理能力。自 2014 年发布《英国植物生物安全战略》以来,英国政府投入大量资金用于植物健康研究和开发,已投资超过 1 亿英镑用于植物健康研究和开发,包括投资 1900 万英镑的“细菌性植物病原体计划”和投资 1450 万英镑的“英国树景未来计划”。

基因组学的最新进展已经彻底改变了植物健康科学,科研人员已为许多寄主、有害生物和病原体建立了基因组序列。脱氧核糖核酸(DNA)诊断技术迅速发展,能检测栽培材料样品中病原微生物的毒力因子,识别单个分离株,并了解病虫害暴发的流行病学。第 3 代测序技术可实现更快的检出率,科研人员正尝试应用于入境点快速诊断现场。这些技术确保人类能够在更多环境和检查站的贸易货物中识别难以用肉眼检测的病毒和细菌物种。其主要研究领域包括:风险评估和水平扫描——了解有害生物和病原体的危害方式、风险因素和传入途径、气候建模和寄主的弱点;检查、诊断和监测——建立有害生物和病原体的分布和传播模型,开发并优化监测、检测的方法和诊断工具;管控主要病虫害——包括制定自然为本的解决方案,如生物防治、综合防治,以及为农民提供指导意见、工具包和数据管理工具;抗灾能力和适应性——研究植物对病虫害耐受性的遗传变异和遗传基础,揭示抗病性的本质,合理利用抗病性,从而达到控制病害的目的;植物健康行为——了解个人和群体保护植物健康的动机和限制因素,弥合知识到行动的差距,并量化树木和森林的社会与文化价值;政策评估——制定评估框架、指标和衡量标准,帮助评估政府制定的植物健康政策是否成功。

英国政府植物安全治理科学研究部门由各类公共、商业和非营利机构组成,涉及林业、园艺、农

业和环境领域,由政府投资,其产出科研成果为全社会共享。例如,费拉科学有限公司是由英国政府和 Captia 公司共建的合资企业,该公司成立于 2015 年,主要为政府提供服务;环境、食品及农村事务部近期出资为萨里森林研究中心建造了价值 500 万英镑的新霍尔特检疫实验室;苏格兰政府建立了植物健康中心,并继续资助苏格兰农业科学与建议部通过实验室诊断病虫害、开展科学咨询、培训以及开发新方法及技术的形式为政府提供支持。

英国积极开展实物标本管理和数据收集活动。英国皇家植物园拥有世界上规模最大、种类最多的植物和真菌收藏,所收藏的 850 万件藏品囊括了大约 95% 的维管植物属和 60% 的已知真菌属。此外,自 1964 年以来,由洛桑研究中心开展的昆虫调查一直在英国各地进行。森林研究所则拥有英国最全面、最详细和时间跨度最长的林业数据集,所收集的关于树木、林地和森林的数据可以追溯到 20 世纪 20 年代,并且该研究中心拥有近 2000 个实验基地以开展全国范围的森林实验 (Hall *et al.*, 2017)。

3.3 全面科普服务提高全民科学素养

提高公众对保护植物健康行动的认识,对预防病虫害的传入和阻止病虫害的扩散具有明显的效果。从 2020 年开始,英国将每年 5 月 12 日的“国际植物健康日”所在的一周指定为“全国植物健康周”,开展了一系列运动,提高人们对植物健康和生物安全重要性的认识。英国开展全民科学活动,对民众进行科学普及 (Schou *et al.*, 1993)。“观察树” (Observatree) 是基于全民科学的树木健康预警系统,建立了一个训练有素的全英国志愿者网络,旨在调查树木健康并对 22 种重点病虫害的发生情况进行报告 (Forestry Commission, 2015)。在 6 a 间,“观察树”系统的志愿者完成了近 14000 项调查,包括发布了 2489 份重点病虫害报告,为支持政府决策提供了宝贵的信息。在教育上,英国政府在中小学阶段,采取不同措施培养学生们对植物保护的兴趣和认知。植物疾病学作为传染病学的一部分,被纳入英国普通中等教育证书考试和英国高级水平考试课程,如白蜡树枯梢病。哈珀·亚当斯大学还专门设置了植物病理学硕士学位和植物健康与生物安全研究生证书课程。

3.4 广泛的国际合作

英国政府在《科学与创新增长规划》中将“积极

参与全球科学与创新合作”列为 2021 年英国科学与创新五大工作之一 (刘小玲等, 2019)。2022 年 10 月,英国研究与创新署发布国际合作战略框架,指出国际合作是 UKRI 战略的重要组成部分。英国致力于积极参与加强全球植物生物安全的国际组织,包括世界卫生组织 (WHO)、联合国粮农组织 (FAO)、澳大利亚集团 (AG)、欧洲和地中海植物保护组织 (EPPO) 等,加强对植物健康问题和新出现的风险的国际监管和认识,例如通过国际植物哨兵网络 (International Plant Sentinel Network) 进行植物检疫风险评估。英国在国际植物健康保护方面发挥着领导作用,并在许多国际机构中享有代表权,推动世界各国采取更佳的植物生物安全举措。在植物生物安全风险识别方面,英国与国际合作伙伴共享信息并进行评估,增强国际伙伴合作能力,共同应对风险;在预防风险方面,加强国际多边合作,以边境为干预点,通过加强有害生物和病原体检查以及立法来增强防御能力;在检测风险方面,与国际监测系统合作,提升鉴别风险的能力;在应对风险方面,财政资助与 WHO 全球疫情警报和反映网络 (global outbreak alert and response network, GOARN) 合作,支持国际应急物资储备协议,建立强有力的防御、恢复能力 (吴晓燕和陈方, 2020)。

通过全球合作,英国在国际植物健康方面的话语权得到增强,同时确保植物健康技术能力的即时、多边共享。了解其他国家的病虫害特征有助于英国科学家和从业人员了解可以从哪些方面吸取教训,以加强英国的生物安全和应急响应能力。不仅如此,英国的研究机构也参与到提高其他国家技术能力的项目中,从而为建设全球植物生物安全体系做出贡献。英国通过参加植物健康时代网络 (一个由 50 多个国家组成的植物检疫研究网络),为植物检疫研究的协调与合作提供支持;通过参加欧洲和地中海植物保护组织小组和《国际植物保护公约》专家工作组,能够确保区域和国际诊断协议的即时性与适用性;参加由国际植物园保护联盟所牵头的国际植物哨点监测网络,分享世界各地不同宿主的病虫害全球分布信息及进行早期预警 (刘小玲等, 2019)。

4 思考与启示

纵观英国植物生物安全治理体系建设的做法,可以发现,英国政府突出植物生物安全国家战略地

位,全面构建治理体系,尤为值得我国学习与借鉴的是:构建权利下放的植物安全治理框架、健全相互协调合作的植物安全治理体系、重视并构建“健康植物”社会、建立生物安全保障的植物供应链等,全方位保障国家植物安全治理。

(1) 权利下放的植物安全治理框架

植物安全治理是英国政府、苏格兰政府和威尔士政府的首要任务。病虫害不分国界,全英国就植物安全治理达成共识,各方均恪守承诺,在应对植物生物安全保护问题上相互协作,并承认应对植物安全挑战和保护植物和树木是共同责任。根据植物健康通用框架的规定,植物安全治理是一个权力下放事项,各政府主管部门可以酌情采取不同的办法处理特定的有害生物和病原体。英国政府、苏格兰政府和威尔士政府同时与英国农业、环境和农村事务部通力合作,确保尽可能为整个英国地区提供最全面的保护,同时也承认与爱尔兰共和国密切合作的重要性,加强对该岛生物安全的保护。

(2) 相互协调合作的植物安全治理体系

植物安全治理是社会责任,需要全社会通力合作,确保植物安全方面的良好行为规范,保护植物免受病虫害威胁。英国的植物安全治理充分发挥了政府机构、非政府组织、科学界、企业及社会公众的积极作用,构建了产学研良好互动的合作关系。在战略规划制定方面,注重政策协同,将一些现行框架和战略纳入考虑范围,包括《25 年环境改善规划》《树木健康恢复战略》和《苏格兰植物健康战略》等,密切合作基础上厘清各方边界和责任。全民科学的树木健康预警系统“观察树”,就是政府和英国森林研究所、费拉科学有限公司、英国林地信托基金会和英国国家信托基金会等机构共同开发的,旨在调查树木并对 22 种重点病虫害的发生情况。威尔士政府在 2019 年与英国动植物卫生署和威尔士各地的 22 个公园与花园合作,启动了威尔士植物健康哨点监测网络。

(3) 构建重视植物生物安全的社会

植物健康不但需要各级政府关注,也需要每一个公民的积极参与。英国政府致力于构建重视健康植物的社会,通过提高公众认识、开展全民科学、完善教育、组织培训等方面让公众了解植物和树木正在遭受的威胁,并采取行动捍卫植物安全。在过去 10 a 中,政府开展了一系列活动,提高人们对植

物健康和生物安全重要性的认识。从 2021 年 4 月—2022 年 3 月,英国森林研究所通过“树木警报”收到的病虫害报告达到了前所未有的数量。调查总数连续 2 a 上升,从 2020—2021 年的 3063 次上升至 2021—2022 年的 3790 次,增加了近 25%,上报最多的害虫和疾病分别是栎列队蛾和白蜡树枯梢病。

(4) 建立有生物安全保障植物供应链

英国政府全面、系统性地保障植物供应链,包括从源头上减少进口、增加国内产量,在供应链条上提高安全标准以及提高供应链的情报监测能力等(吴晓燕和陈方,2020)。英国政府投资改善本土树木、种子和树苗供应的质量、数量和多样性,采用先进的生物育种技术,提高种子的抗病虫害的能力,努力增加国内供给,减少进口植物带来的风险。在植物供应链上,与植物健康联盟合作,推广“植物健康认证计划”,该计划旨在提高所有部门及其供应链的植物健康管理标准;鼓励在树木生产和管理方面采取生物安全举措,减少病虫害的内部传播;对进口风险较高的树木开展种植后检查,以帮助发现潜在的病虫害。在情报监测方面,英国专家对世界各国公布的科学报告和相关研究成果等进行监测,并对所搜集的信息进行系统检查,从而识别潜在的威胁。通过这种方式,每个月大约有 4 种有害生物经过识别和评估,并最终被登记在植物健康风险登记系统中。同时强化英国动植物卫生署下属互联网交易部门的职能,加强对互联网交易和社交媒体网站的监控,提高对生物安全要求的认知。

5 结论

相较于其他国家,英国在植物生物安全治理上走在了世界前沿,无论是制度建设还是相关治理部门之间沟通协同和职能履职,都有着较为周全的设计。尤其是英国在脱欧之后,更是建立世界级生物安全制度。相较于英国在植物生物安全治理体系的建设与发展,我国在这一领域存在一定的不足。对此,我国应该充分借鉴英国方法,构建植物生物安全法律法规体系、制度体系,走依法防控、依法治理的路径;二是构建一体化的植物安全治理机构和队伍体系,强化能力建设;三是提升我国植物安全治理的国际治理能力和话语权;四是大力发展全民科学,提高公众参与,构建从政府到民众协同合作的防控体系。

参考文献

- 刘小玲, 徐进, 任真, 2019. 英国国家科研与创新署的国际合作战略与政策及其启示. 世界科技研究与发展, 41(4): 439-446.
- 福建省标准化研究院, 2021. 英国修订部分有害生物的管理措施. (2021-09-21) [2023-06-02]. <http://fjhz.org.cn/ESacGov/WebSite/NewsView.aspx?ArticleID=13329>.
- 农民日报, 2022. 2022年全国农作物重大病虫害防控成效显著. (2022-12-31) [2023-06-02]. https://szb.farmer.com.cn/2022/20221231/20221231_003/20221231_003_8.htm.
- 吴晓燕, 陈方, 2020. 英国国家生物安全体系建设分析与思考. 世界科技研究与发展, 42(3): 265-275.
- 洗晓青, 王瑞, 陈宝雄, 张宏斌, 李垚奎, 万方浩, 张桂芬, 刘万学, 2022. “世界100种恶性外来入侵物种”在我国大陆的入侵现状. 生物安全学报, 31(1): 9-16.
- 尹志欣, 朱姝, 2021. 英国生物安全立法与管理对我国的启示. 科技中国, 282(3): 40-42.
- 中华人民共和国农业农村部, 2022. 联合国宣布设立“国际植物健康日”. (2022-05-12) [2023-06-02]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202205/t20220512_6398984.htm.
- BARFORD E, 2013. Crop pests advancing with global warming. *Nature*. DOI: 10.1038/nature.2013.13644.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2017. *UK plant health risk register*. (2017-03-22) [2023-06-02]. <https://planthealthportal.defra.gov.uk/pests-and-diseases/uk-plant-health-risk-register/downloadEntireRiskRegister.cfm>.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2020. *Plant biosecurity strategy for Great Britain*. (2020-03-01) [2023-06-02]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/307355/pb14168-plant-health-strategy.pdf.
- FAO, 2022. *First ever international day of plant health: no food security without healthy plants*. (2022-05-12) [2023-06-02]. <https://www.fao.org/newsroom/detail/first-international-day-of-plant-health-no-food-security-without-healthy-plants-120522/zh>.
- FISHER M, HENK D, BRIGGS C, BROWNSTEIN J, MADOFF L, MCCRAW S, GURR S, 2012. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*, 484: 186-194.
- Forestry Commission, 2015. Observatree an early warning system for tree health. *Forestry Journal*, 21(6): 50-51.
- Government Office for Science, Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2014. *Animal and plant health in the UK: building our science capability*. (2014-12-18) [2023-06-02]. <https://www.gov.uk/government/publications/animal-and-plant-health-in-the-uk-building-our-science-capability>.
- Government Office for Science, Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2015. *The Great Britain invasive non-native species strategy*. (2015-08-19) [2023-06-02]. <https://www.gov.uk/government/publications/the-great-britain-invasive-non-native-species-strategy>.
- HALL C, RAUM S, MORRIS J, O'BRIEN L, 2017. *Observatree: key lessons qualitative study of the 'Observatree' citizen science project*. Wales: Forest Research.
- Home Office, Department of Health and Social Care and Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2018. *UK biological security strategy*. (2018-07-30) [2023-06-02]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/730213/2018_UK_Biological_Security_Strategy.pdf.
- SCHOU S, HOLMSTRUP P, REIBEL J, JUHL M, HJØRTING-HANSEN E, KORNMAN K S, 1993. Ligature-induced marginal inflammation around osseointegrated implants and ankylosed teeth: stereologic and histologic observations in cynomolgus monkeys (*Macaca fascicularis*). *Journal of Periodontology*, 64(6): 529-537.
- UK Legislation, 2022. *The phytosanitary conditions (amendment) regulations 2022*. [2023-06-02]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2022/114/regulation/4/made/data.pdf>.
- UK, 2021. *UK plant science research strategy a green roadmap for the next ten years*. [2023-06-02]. <https://www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/03/BBSRC-120321-Plant-ScienceStrategy.pdf>.

(责任编辑: 郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.03.003

构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果及主要引诱成分分析

贾平凡^{1,2,3,4}, 张潇钰^{1,2,3,4}, 季清娥^{1,2,3,4*}
¹福建农林大学生物防治研究所, 福建 福州 350002; ²联合国粮农组织/国际原子能机构实蝇防控中国合作中心, 福建 福州 350002; ³教育部生物农药与化学生物学重点实验室, 福建 福州 350002; ⁴闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福建 福州 350002

摘要:【目的】南亚实蝇被多个国家列为检疫性害虫,其雌虫在野外被发现取食构树果实。本研究拟初步明确构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果及其主要引诱成分。【方法】通过室内诱捕试验,测试构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果;采用气质联用仪(GC-MS)与Y型嗅觉仪,测定构树果实中引起南亚实蝇雌虫行为反应的成分。【结果】构树果实对南亚实蝇雌虫的诱捕率高达81.11%;从构树果实气味中测定出29种挥发性成分,其中,0.500 mg·mL⁻¹的2-正戊基呋喃,0.005 mg·mL⁻¹的反-2-己烯醛和0.050 mg·mL⁻¹的正庚醛能显著引起南亚实蝇雌虫的趋向行为。【结论】构树果实具有作为南亚实蝇雌虫食诱剂的潜力,构树果实中的2-正戊基呋喃、反-2-己烯醛和正庚醛可能是引诱南亚实蝇雌虫的主要成分。
关键词: 南亚实蝇; 构树; 诱捕率; 食诱剂



开放科学标识码
(OSID 码)

Analysis of the attractant effect and main attractant compounds of *Broussonetia papyrifera* on females of *Zeugodacus tau*

JIA Pingfan^{1,2,3,4}, ZHANG Xiaoyu^{1,2,3,4}, JI Qing'e^{1,2,3,4*}
¹Biological Control Research Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; ²The Joint FAO/IAEA Division Cooperation Center for Fruit Fly and Control in China, Fuzhou, Fujian 350002, China; ³Key Laboratory of Biopesticide and Chemical Biology Ministry of Education, Fuzhou, Fujian 350002, China; ⁴State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract:【Aim】*Zeugodacus tau* has been listed as a quarantine pest in many countries. The females feed on the polythalamie fruits of *Broussonetia papyrifera*. The aims of the study were to determine the attractant effect and main attractant compounds of *B. papyrifera* fruit to *Z. tau* females.【Method】Trapping bioassays were used to determine the attractant effect of *B. papyrifera* fruits on *Z. tau* females. GC-MS (gas chromatography-mass spectrography) and Y-tube olfactometry were used to identify and determine the compounds in *B. papyrifera* fruits that induce behavioral responses in *Z. tau* females.【Result】*B. papyrifera* fruit could attract *Z. tau* females effectively, and the attractive rate was up to 81.11%. Twenty-nine compounds were identified and isolated from *B. papyrifera* fruit odor. Among these, 2-pentyl-furan (0.500 mg·mL⁻¹), (E)-2-hexenal (0.050 mg·mL⁻¹), and heptanal (0.050 mg·mL⁻¹) were effective at inducing attractive behavioral responses in *Z. tau* females.【Conclusion】*B. papyrifera* has the potential to be used as a female attractant for controlling *Z. tau* females. 2-Pentyl-furan, (E)-2-hexenal, and heptanal may be the main components attracting female flies.
Key words: *Zeugodacus tau*; *Broussonetia papyrifera*; attractive rate; food lure

南亚实蝇 *Zeugodacus tau* (Walker), 亦称南瓜实蝇、南亚果实蝇、南亚寡鬃实蝇, 隶属于双翅目 Diptera 实蝇科 Tephritidae 锉果实蝇属 *Zeugodacus*, Walker 1849 年首次报道于中国福建, 现广泛分布于亚洲和大洋洲各个国家, 是多食性果蔬害虫, 被日本、韩国、印度尼西亚、巴基斯坦、约旦、美

国等多个国家列为检疫性对象(张艳和陈俊谕, 2018; Jaleel *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2022)。南亚实蝇以雌虫产卵与幼虫取食的方式危害瓜果, 直接造成果实损伤及脱落(张艳和陈俊谕, 2018)。已有研究表明, 南亚实蝇严重为害葫芦科 Cucurbitaceae、桑科 Moraceae、桃金娘科 Myrtaceae、山榄科 Sapotaceae、茄科 Solanaceae、番木瓜科 Caricaceae、西番莲科 Passifloraceae 等 16 科 80 余种作物果实(张艳和陈俊谕, 2018; Jaleel *et al.*, 2018)。开发雌虫引诱剂是未来最有潜力的有效控制实蝇类害虫的方式之一, 目前, 已经筛选出对苹果绕实蝇 *Rhagoletis pomonella* (Walsh)、地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Wiedemann)、橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel、番石榴实蝇 *B. correcta* (Bezzi)、昆士兰实蝇 *B. trynoui* (Forggatte)、瓜实蝇 *Z. cucurbitae* (Coquillett)、柑橘大实蝇 *B. minax* (Enderlein)、墨西哥按实蝇 *Anastrepha ludens* (Loew) 等多种实蝇雌虫有引诱作用的化合物(林嘉等, 2021; Jaleel *et al.*, 2019; Mas *et al.*, 2020)。由此开发出的引诱剂分别在苹果绕实蝇、瓜实蝇、地中海实蝇、枣实蝇等实蝇的田间诱捕中取得了较好的引诱效果(梁萌等, 2020; 林嘉等, 2021)。

构树 *Broussonetia papyrifera* (Linn.) 是一种适生能力强、生长迅速的多年生桑科 Moraceae 落叶乔木, 主要分布在中国、泰国、缅甸、波利尼西亚和美国等国家(Li *et al.*, 2014; Niu *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2011)。构树可作为造纸、中药、牲畜饲料的原料以及应用于生态修复等方面; 用构树果加工制成的引诱剂被用于室外诱捕淡色库蚊 *Culex pipiens pallens* Coquillett, 此外, 未见构树应用于其他害虫防控的报道(Ding *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2022; Nong *et al.*, 2023)。但在野外调查过程中, 常能发现大量南亚实蝇雌虫聚集取食构树成熟果实的现象。明确构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果及其果实气味中引诱南亚实蝇雌虫的有效成分, 可为南亚实蝇雌虫引诱剂的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

供试南亚实蝇雌虫, 来源于实验室建立的室内稳定种群。各虫态饲养方法及条件参照潘靖等(2013)。因为产卵期的南亚实蝇雌虫危害最显著, 根据南亚实蝇的习性, 选择羽化后 26 d 处于产卵高

峰期的雌虫进行试验(张艳和陈俊谕, 2018)。试验在(26±1)℃、RH(65±10)%、L:D=12 h:12 h 条件下进行。

1.2 供试构树果实

成熟的构树果采集自福建农林大学校园。试验前, 使用无菌水将果实冲洗 3 遍。使用电子天平称取 100 g 构树果置入小型果汁机(九阳牌)中, 加入 100 mL 无菌水, 打制 1 min 即获得混合均匀的果浆, 用于后续试验。

1.3 供试化合物

试验用化合物主要为反式-2-己烯醛、正庚醛、2-正戊基呋喃、反-2-辛烯醛、壬醛、反, 顺-2, 6-壬二烯醛、反式-2-壬烯醛、液体石蜡, 所有化合物纯度均大于 95%, 除液体石蜡来自 Macklin®, 其余均来自 Aladdin®。

1.4 构树果实引诱南亚实蝇雌虫

采用室内诱捕法测试构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果, 试验方法参照 Jia *et al.* (2023)。取 45 头 26 d 南亚实蝇雌虫, 置于亚克力试验笼(30 cm×30 cm×30 cm)中。称取 1.2 中的构树果实果浆 10 g, 放入自制诱捕器中; 同时, 量取 10 mL 无菌水加入另一个自制诱捕中, 作为对照。自制诱捕器为直径 5.7 cm 容量 250 mL 的塑料瓶, 在 2 cm 高度处的瓶壁上开一个进虫孔, 塞入一个去掉底部 1/3 长度的 2 mL 离心管(直径 1.0 cm)作为进虫通道(防止进入后的成虫逃逸); 照此操作, 于该孔位置的对面上部 3 cm 处, 设置另一个进虫孔与进虫通道, 在瓶盖中央设置第三个进虫孔与进虫通道。将盛有构树果浆和无菌水的诱捕器分列于试验笼内两侧。放置 8 h (9:00-17:00)后取出, 同时, 盖上离心管的盖子, 于冰柜中冷冻 2 h 后取出, 计数各诱捕器中诱捕的南亚实蝇雌虫数, 计算诱捕率(诱捕率%=诱捕雌虫数/供试雌虫总数×100)。每处理 6 个重复。

1.5 构树果实挥发性气味测定与成分分析

采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术对构树果实果浆气味进行挥发性成分鉴定和定量分析, 方法主体步骤参照 Jia *et al.* (2023)。精确称取 1.2 中打制的构树果实果浆 5.0 g, 放入 40 mL 顶空进样瓶中, 并用硅橡胶垫密封, 在 40℃恒温水浴中平衡 10 min, 使用固相微萃取纤维头萃取吸附 50 min。色谱条件: Shimadzu GCMS-QP2020NX 气质联用仪, Rtx-5MS (30 m×0.25 mm ID, 0.25 μm) 色谱柱; 氮

气为载气,分流比例 2:1,流速 $1\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;程序升温:初始温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,保留 5 min,以 $3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保留 3 min,再以 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,最后以 $15\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,保留 5 min。质谱条件:进样口温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;检测器温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;MSD 温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。EI 电离源,电子能量 70 eV;离子源温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$;扫描范围 35~550 amu。四极杆温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对质谱图用计算机 NIST 2017 谱库检索,结合软件进行人工解析、色谱保留指数和标准化合物比对鉴定。采用相应质谱图计算机检索方法进行检索确定挥发物成分,并采用面积归一法计算相对含量。

1.6 南亚实蝇雌虫对挥发性成分的嗅觉行为反应

使用改进后的 Y 型嗅觉仪筛选引起南亚实蝇雌虫行为反应的挥发性成分。Y 型嗅觉仪主体框架及试验方法主要步骤参照林嘉等(2019)。Y 型嗅觉仪系统包括气泵、活性炭瓶、蒸馏水瓶、流量计、味源瓶、Y 型玻璃管、连接用硅胶管、自制释放器以及环境隔离罩。Y 型玻璃管主臂长 20 cm,两侧臂长 20 cm,夹角 60° ,内径 3 cm。环境隔离罩为白色聚丙烯塑料中空板制作的长方体(长 80 cm,宽 28 cm,高 30 cm)。Y 型玻璃管和味源瓶被笼罩在环境隔离罩内,以隔绝周围环境不均衡对产卵雌虫选择行为的干扰。在味源瓶与硅胶管连接处插入一层无菌医用纱布($2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$),防止雌虫穿过味源瓶进入硅胶管,干扰气流。在环境隔离罩外部,味源瓶摆放位置的正上方,放置一个 30 W 荧光灯,保证光线能够透过隔离罩板均匀照射在 Y 型玻璃管的两侧臂。自制释放器由体积为 10 和 50 mL 的 2 个离心管组成,10 mL 离心管自中间剪去底部,插入 50 mL 离心管的盖子中间,用于自饲养笼中抓取每组所需数量的雌虫,50 mL 离心管底部开透气用条纹,便于气流通畅,释放时,打开 50 mL 该释放器的盖子,接入 Y 型管主臂,使雌虫进入主臂进行后续的选择。每次试验前,Y 型嗅觉仪系统通气 5 min,空置味源瓶不加试剂或者溶剂,释放一组供试雌虫(20 头),以测定系统组装正确并且 2 侧臂气流平衡。每组雌虫在试验前均放置于试验环境 30 min 以适应环境。嗅觉行为试验在 9:00–17:00 的黑暗环境中进行。每种化合物使用液体石蜡稀释成 4 个浓度梯度的试剂(5.000 、 0.500 、 0.050 、 $0.005\text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$),以液体石蜡作对照。

用移液器分别吸取 $200\text{ }\mu\text{L}$ 试剂和溶剂分别滴加在味源瓶中的滤纸($2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$)上,5 min 后释放南亚实蝇供试雌虫,观察 30 min 内雌虫的行为反应。南亚实蝇雌虫向 Y 型管主臂移动 3 cm 视为反应雌虫,进入某一侧臂 3 cm 持续 30 s 视为做出有效选择。分别在 10、20、30 min 时持续观察 30 s 并记录 2 侧臂及主臂上雌虫的数量。将 3 次观察的平均值作为该组处理的有效值,并依此计算做出不同选择雌虫的百分比(反应率% = 反应雌虫数/雌虫总数 $\times 100$;选择率% = 有效选择数/雌虫总数 $\times 100$;趋向率% = 处理臂的有效选择虫数/雌虫总数 $\times 100$;忌避率% = 对照臂的有效选择虫数/雌虫总数 $\times 100$)。每组试验中的雌虫只使用一次,每次试验后的 Y 型玻璃管和味源瓶用无水乙醇清洗干净,置于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱内干燥 20 min,冷却后备用。一组试验完毕后,更换干净的 Y 型玻璃管和味源瓶,并将试剂和溶剂的滴加位置对调,以尽可能排除位置偏差的影响。每种浓度的试剂重复 4 次。

1.7 数据处理与分析

使用 Excel 整理数据,用 IPM SPSS 21.0 软件进行数据分析。使用 Origin version 8 绘制相对离子强度图,使用 Inkscape 软件绘制装置示意图。使用 GraphPad Prism version 8 将统计分析后数据绘制成图。构树果实气味引诱南亚实蝇雌虫试验与 Y 型嗅觉仪行为反应试验数据使用配对卡方(χ^2)检验(McNemar's)。

2 结果与分析

2.1 构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果

构树果实制成的果浆对南亚实蝇雌虫的引诱率高达 81.11%,显著高于对照组的 4.44% ($\chi^2 = 68.710$, $p = 0.000$)。可知,构树果实对南亚实蝇产卵雌虫具有强烈的吸引力。

2.2 构树果实挥发性气味成分

如表 1 和图 1 所示,采用 GC-MS 从构树果实果浆挥发性气味鉴定出 29 种化合物,其中醛类物质种类最丰富(10 种),相对含量最高(58.46%);醇类物质(8 种),相对含量 17.61%;烯烃(2 种)种类数量低于烷烃类(3 种),但烯烃相对含量(13.64%)高于烷烃类(3.94%);2 种酯类物质的相对含量(1.42%)低于仅 1 种的杂环类物质(2.13%);酮类和酚类各有 1 种,酮类相对含量(2.52%)高于酚类(0.28%)。

表 1 构树果实挥发性化合物成分及其相对含量

Table 1 The compositions and relative content of volatile compounds from the fruits of <i>B. papyrifera</i>					
序号 No.	保留时间 Retention time /min	CAS 编号 CAS number	化合物 Compounds	保留指数 Retention index	相对含量 Relative content/%
1	5.48	66-25-1	正己醛 Hexanal	871	23.87
2	7.68	6728-26-3	反-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal	940	1.84
3	8.52	111-27-3	正己醇 1-Hexanol	966	1.69
4	10.19	111-71-7	正庚醛 Heptanal	1014	3.52
5	13.67	18829-55-5	反-2-庚烯醛 (E)-2-Heptenal	1102	1.75
6	15.04	3391-86-4	1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	1137	1.85
7	15.27	106-68-3	3-辛酮 3-Octanone	1143	2.52
8	15.47	3777-69-3	2-正戊基呋喃 2-Pentyl-furan	1148	2.13
9	15.72	10405-85-3	反-4-壬烯 (E)-4-Nonene	1154	0.48
10	15.88	105-31-7	1-己炔-3-醇 1-Hexyn-3-ol	1159	2.01
11	16.13	124-13-0	正辛醛 Octanal	1165	0.61
12	17.22	61142-36-7	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯 3-Ethyl-2-methyl-1,3-hexadiene	1193	13.16
13	17.30	470-82-6	桉叶油醇 Eucalyptol	1195	3.79
14	17.79	122-78-1	苯乙醛 Benzene acetaldehyde	1208	0.42
15	18.04	16747-50-5	1-乙基-1-甲基环戊烷 1-Ethyl-1-methyl-cyclopentane	1215	3.25
16	18.51	2548-87-0	反-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	1228	13.32
17	18.98	17699-16-0	(E) 桉烯水合物 (E)-Sabinene hydrate	1241	0.59
18	19.97	83212-30-0	6-甲基庚烯-4-醇 6-Methyl-hept-2-en-4-ol	1268	4.29
19	20.19	78-70-6	芳樟醇 Linalool	1274	1.76
20	20.36	124-19-6	壬醛 Nonanal	1279	4.72
21	21.66	29803-82-5	反-1-甲基-4-(1-甲基乙基)-2-环己烯醇 (Z)-Para-2-menthen-1-ol	1316	0.15
22	22.04	557-48-2	反,顺-2,6-壬二烯醛 (E,Z)-2,6-Nonadienal	1327	1.02
23	22.30	18829-56-6	反式-2-壬烯醛 (E)-2-Nonenal	1334	7.39
24	23.45	10482-56-1	alpha-松油醇 L-alpha-terpineol	1368	1.48
25	28.13	62016-37-9	2,4,6-三甲基-辛烷 2,4,6-Trimethyl-octane	1521	0.23
26	34.74	16387-18-1	新戊酸 2-乙基己酯 2-Ethylhexyl pivalate	2313	1.28
27	35.93	104-66-5	1,2-二苯氧乙烷 1,2-Diphenoxyethane	2534	0.46
28	36.37	84-69-5	邻苯二甲酯 Diisobutyl phthalate	2616	0.14
29	38.76	80-07-5	双酚 A Bisphenol A	3058	0.28

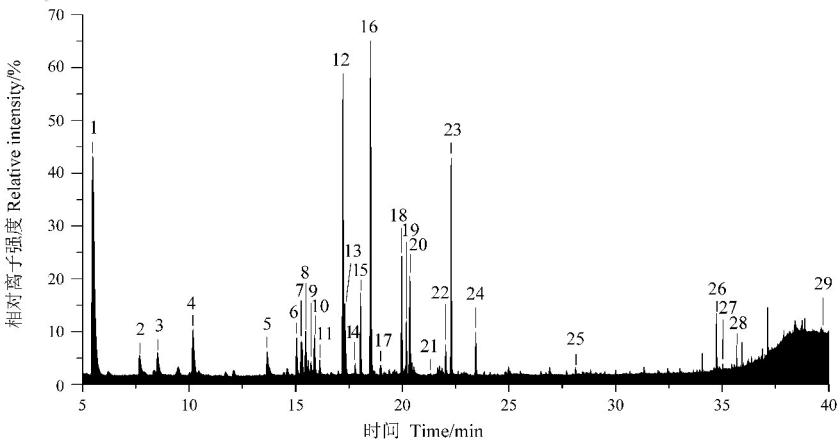


图 1 构树果实挥发性成分相对离子强度图

Fig.1 Relative intensit ychromatogram of volatile compounds of from the fruits of *B. papyrifera*

离子峰图上数字编号对应的物质与表 1 中序号对应的物质一致。

The number on the peak chromatogram represents the compound consistent with the number in Table 1.

2.3 南亚实蝇雌虫对 7 种挥发性成分的行为反应

如图 2 所示,采用 Y 型嗅觉仪测试了 7 种具有特征香气的挥发性成分对南亚实蝇雌虫行为反应

的影响,结果表明,反,顺-2,6-壬二烯醛、2-正戊基呋喃、反-2-己烯醛和正庚醛能显著引起南亚实蝇雌虫的嗅觉行为反应。其中,5.000 mg · mL⁻¹的反,

顺-2,6-壬二烯醛能够引起南亚实蝇雌虫的忌避行为反应($\chi^2 = 12.414$, $p = 0.001$); $0.500 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 2-正戊基呋喃、 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的反-2-己烯醛与

$0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的正庚醛均能引起南亚实蝇雌虫趋向行为反应($\chi^2 = 9.104$, $p = 0.004$; $\chi^2 = 5.032$, $p = 0.033$; $\chi^2 = 5.785$, $p = 0.024$)。

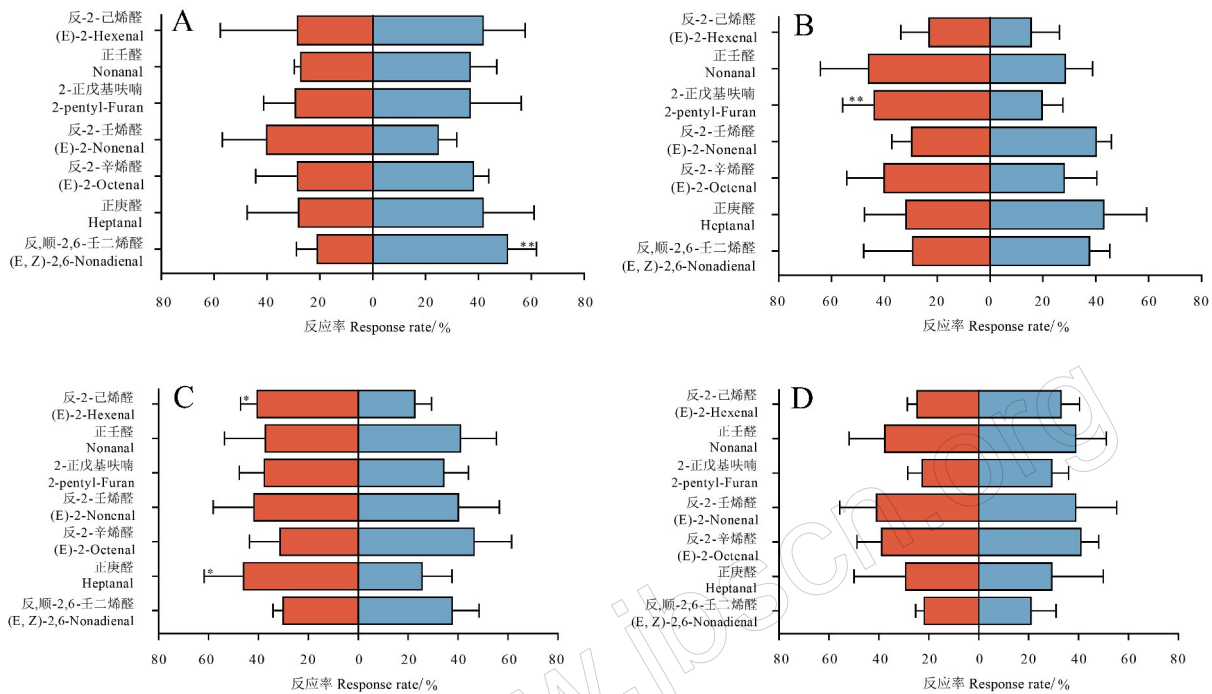


图 2 南亚实蝇雌虫对 7 种化合物的嗅觉行为反应
Fig.2 Olfactory-behavior responses of *Z. tau* females to seven compounds

A: $5.000 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; B: $0.500 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; C: $0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; D: $0.005 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$. 图中数据为平均值±标准偏差。橙色柱子表示选择处理组的南亚实蝇雌虫百分数,蓝色柱子表示选择对照组的南亚实蝇雌虫百分数。*表示反应率经卡方(χ^2)检验在 $p < 0.05$ 水平上差异显著, **表示反应率经卡方(χ^2)检验在 $p < 0.01$ 水平上差异显著。*与**所在组南亚实蝇雌虫总反应率超过 65%。
A: $5.000 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; B: $0.500 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; C: $0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; D: $0.005 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$. Data presented as mean±SE. Dark orange bars showed the percentage of *Z. tau* females in selected treatment group, blue bars showed the percentage of *Z. tau* females in selected control group.
*: The significant difference in response rates at 0.05 level by Chi-square tested; **: The significant difference in response rates at 0.01 level by Chi-square tested. The total response rates of gravid female *Z. tau* were more than 65% in * and ** group.

3 讨论与结论

实蝇雌虫通常选择将卵产在最适宜其子代生长发育的寄主植物上,而植物气味是实蝇识别与定位寄主的关键因素 (Benitez-Herrera *et al.*, 2023)。因此,在缺乏有效的雌虫引诱剂的情况下,可将黄瓜 *Cucumis sativus* L.、葡萄 *Vitis vinifera* L.、番石榴 *Psidium guajava* L.等实蝇寄主果实初步加工成果汁或者果浆,利用其散发出的独特气味可诱捕到靶标实蝇雌虫 (Cornelius *et al.*, 2000; Mangan & Thomas, 2014)。本研究发现,构树的果实对南亚实蝇雌虫具有显著引诱效果,较之空白对照,构树果实诱捕南亚实蝇雌虫的诱捕率超过 80%,因此,构树果实具有作为南亚实蝇雌虫田间诱饵的潜力。

实蝇依靠嗅觉进行远距离的植物识别与定位,依靠视觉进行近距离的植物判断与选择 (Wang *et*

al., 2022)。当颜色与气味交互作用时,实蝇对单一因素的偏好表现并不显著 (Brévault & Quilici, 2009)。研究表明,南亚实蝇雌虫偏好在黄绿色的寄主上产卵 (Khan *et al.*, 2011)。但研究人员发现,在野外大量的南亚实蝇雌虫取食构树成熟的红色果实,这种差异是否为气味与颜色的交互作用造成的,仍需进一步研究。

能引起实蝇电生理或者行为反应的植物气味中的化学成分,被认为是实蝇识别植物的关键线索 (林嘉等, 2021)。具有这些特定化学成分的植物,多具有能够满足实蝇成虫或幼虫生长发育所需的营养成分 (Shamshir & Wee, 2019)。通常,实蝇的雌虫引诱剂成分主要从寄主植物的挥发性成分中筛选,来源于天然食物源植物的化合物能有效诱捕实蝇雄虫 (林嘉等, 2021)。石豆兰属 *Bulbophyllum*

植物中的诱蝇醚 Methyl eugenol (ME)、覆盆子酮 Raspberry ketone (RK)与姜酮 Zingerone (ZN)被发现能促进实蝇雄虫的交配竞争力,从而引起橘小实蝇、瓜实蝇等实蝇雄虫强烈的趋向反应,被用于雄虫的诱捕(汪恩国等,2013; Shamshir & Wee, 2019)。南亚实蝇雌虫长期取食的天然食物源植物较少报道,因而从这类植物的挥发性气味中筛选能引起南亚实蝇雌虫行为反应的化合物的研究较少(Jaleel *et al.*,2018)。本研究从构树的果实挥发性气味中鉴定出29种化合物,其中,反,顺,-2,6-壬二烯醛、反-2-壬烯醛等化合物具有南亚实蝇寄主——黄瓜的香气特征。因此,仅选择反,顺,-2,6-壬二烯醛等7种具有果蔬香气特征的物质进行了嗅觉行为反应试验。本研究从嗅觉行为反应试验中发现了4种能够引起南亚实蝇雌虫行为反应的化合物,其中包括3种能引起南亚实蝇雌虫趋向反应的化合物。研究表明,南亚实蝇的天然食物源植物中存在的引起南亚实蝇雌虫趋向行为反应的化合物,或许是南亚实蝇雌虫识别该类食物源植物的特征化合物。尽管如此,构树果实挥发性气味中其他化合物是否也能显著影响南亚实蝇雌虫的行为反应,需要后续试验进行验证。

在高浓度情况下,反,顺,-2,6-壬二烯醛引起了南亚实蝇雌虫的忌避行为反应;但低浓度时,并未显著引起南亚实蝇雌虫的趋向行为反应,说明该物质可能并不是南亚实蝇雌虫识别构树果实的特征化合物。Webster *et al.* (2009)研究表明,将10种能够引起黑豆蚜 *Aphis fabae* (Scopoli)忌避行为的化合物混合,反而对黑豆蚜具有很好的引诱效果。同时,反,顺,-2,6-壬二烯醛并不是构树果实挥发性气味中相对含量较高的成分,这或许是反,顺,-2,6-壬二烯醛并未干扰南亚实蝇雌虫取食构树果实的原因。与反,顺,-2,6-壬二烯醛不同,反-2-己烯醛、2-正戊基呋喃、正庚醛能够引起南亚实蝇雌虫的趋向行为,说明3种物质可能是南亚实蝇雌虫识别构树果实的特征化合物。反-2-己烯醛能够引起横线尾夜蛾 *Chlumetia transverse* (Walker)和绿盲蝽 *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür)的触角电位反应,且能明显诱发雌性绿盲蝽的趋向行为反应,并能显著诱集雌性绿盲蝽(田厚军等,2012;张尚卿等,2011)。在橘小实蝇雌虫的植物源引诱剂中,添加反-2-己烯醛也能显著提升橘小实蝇雌虫触角电位

活性值(刘奕来等,2018)。2-正戊基呋喃对斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* (Matsumura)产生驱避作用(Cha *et al.*,2021),而在筛豆龟蜡 *Megacopta cribraria* (Fabricius)取食大豆的过程中却发挥引诱取食的作用(Lahiri *et al.*,2020)。

化合物引起不同昆虫的行为反应差异,或许更有利于开发针对特定靶标害虫的驱避剂或引诱剂。低浓度的正庚醛能够促进马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella* (Zeller)产卵,而高浓度时会使马铃薯块茎蛾产生忌避反应(Ma & Xiao,2013)。将正庚醛与桉树醇或印楝素组合使用,能够调控马铃薯块茎蛾的行为,获得害虫防治的“推-拉”效果(Ma & Xiao,2013)。本研究中4种化合物引起南亚实蝇雌虫的行为反应不同,为南亚实蝇雌虫的驱避剂与引诱剂的研发提供了参考。若能组合4种化合物调控南亚实蝇雌虫的行为,并结合有效的南亚实蝇诱集植物,构建出“推-拉”效果,或许能有效降低南亚实蝇雌虫对瓜果的危害。

参考文献

- 梁萌,阿不都瓦哈·艾再孜,阿地力·沙塔尔,2020. 枣实蝇对枣果挥发物的选择行为. 林业科学研究, 33(2): 145-153.
- 林嘉,蔡普默,张贺贺,宋学森,张琪文,仪传冬,敖国富,杨建全,季清娥,2019. 橘小实蝇雌虫对其肠道共生菌发酵液的嗅觉行为反应. 中国生物防治学报, 35(6): 891-899.
- 林嘉,杨德庆,郝旭兴,蔡普默,季清娥,2021. 实蝇引诱剂研究进展. 环境昆虫学报, 43(6): 1398-1407.
- 刘奕来,陶芳怡,翟啸雨,吴慧明,2018. 橘小实蝇雌蝇的植物源引诱剂筛选. 浙江农业科学, 59(8): 1429-1431.
- 潘靖,洪静芳,季清娥,陈家骅,2013. 南亚实蝇幼虫人工饲料研究. 武夷科学, 29: 198-202.
- 田厚军,陈艺欣,魏辉,邱良妙,刘其全,石妍,占志雄,2012. 芒果不同部位挥发物及横线尾夜蛾对其触角电位反应. 生物安全学报, 21(2): 142-147.
- 汪恩国,王永才,余山红,王会福,2013. 临海柑橘园橘小实蝇种群数量消长规律. 生物安全学报, 22(2): 91-96.
- 张尚卿,高占林,党志红,李耀发,潘文亮,2011. 绿盲蝽对四种挥发性物质的触角电位和行为反应. 华北农学报, 26(3): 189-194.
- 张艳,陈俊瑜,2018. 南亚果实蝇国内研究进展. 热带农业科学, 38(11): 70-77.
- BENITEZ-HERRERA L N, CRUZ-LÓPEZ L C, MALO E A, ROMERO-LÓPEZ A A, ROJAS J C, 2023. Olfactory responses of *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae) to

- mango fruits as influenced by cultivar and ripeness stages. *Environmental Entomology*, 52(2): 210–216.
- BRÉVAULT T, QUILLICI S, 2009. Oviposition preference in the oligophagous tomato fruit fly, *Neoceratitis cyaneescens*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 133: 165–173.
- CHA D H, ROH G H, HESLER S P, WALLINGFORD A, STOCKTON D G, PARK S K, LOEB G M, 2021. 2-Pentylfuran: a novel repellent of *Drosophila Suzukii*. *Pest Management Science*, 77(4): 1757–1764.
- CORNELIUS M L, DUAN J J, MESSING R H, 2000. Volatile host fruit odors as attractants for the oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 93(1): 93–100.
- DING Y M, HU Y, YU B T, MO X C, MO J C, 2016. Laboratory evaluation of differential attraction of *Culex pipiens pal-lens* to fruit-based sugar baits. *Acta Tropica*, 163: 20–25.
- JALEEL W, LU L H, HE Y R, 2018. Biology, taxonomy, and IPM strategies of *Bactrocera tau* Walker and complex species (Diptera: Tephritidae) in Asia: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(20): 19346–19361.
- JALEEL W, HE Y R, LÜ L H, 2019. The response of two *Bactrocera* species (Diptera: Tephritidae) to fruit volatiles. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 22(3): 758–765.
- JIA P F, ZHANG X Y, WANG B, JI Q E, 2023. Evaluation of the attractant effect of *Solanum muricatum* (Solanales: Solanaceae) on gravid female adults of *Zeugodacus tau* (Diptera: Tephritidae) and screening of attractant volatiles. *Insects*, 14(7): 591.
- KHAN M, TAHIRA-BINTE-RASHID, HOWLADER A J, 2011. Comparative host susceptibility, oviposition, and colour preference of two polyphagous tephritids: *Bactrocera cucurbitae* (Coq.) and *Bactrocera tau* (Walker). *Research Journal of Agriculture & Biological Sciences*, 7(3): 343–349.
- LAHIRI S, REISIG D D, DEAN L L, REAY-JONES F P F, GREENE J K, CARTER T E, MIAN R, FALLEN B D, 2020. Mechanisms of soybean host-plant resistance against *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae). *Environmental Entomology*, 49(4): 876–885.
- LI Y, SHANG X Y, NIU W N, XU C L, QIN C G, 2014. Inhibitory activity of the extract from *Broussonetia papyrifera* fruits to cellular lipid peroxidation *in vitro*. *Asian Journal of Chemistry*, 26(1): 201–204.
- LIU H, WANG X Y, CHEN Z H, LU Y Y, 2022. Characterization of cold and heat tolerance of *Bactrocera tau* (Walker). *Insects*, 13(4): 329.
- MA Y F, XIAO C, 2013. Push-pull effects of three plant secondary metabolites on oviposition of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella*. *Journal of Insect Science*, 13(1): 128.
- MANGAN R L, THOMAS D B, 2014. Comparison of torula yeast and various grape juice products as attractants for Mexican fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(2): 591–600.
- MAS F, MANNING L A, SINGLET M, BUTLERR, MILLE C, SUCKLING D M, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of Queensland fruit fly females to fruit odors. *Journal of Chemical Ecology*, 46(2): 176–185.
- NIU K M, KHOSRAVIC S, WANG Y F, ZHAI Z Y, WANG R X, LIU J P, CAI L C, LI J X, DENG L P, WU X, 2022. Multi-omics-based functional characterization of hybrid fermented *Broussonetia papyrifera*: a preliminary study on gut health of laying hens. *Fermentation*, 8(10): 547.
- NONG H J, LIU J, CHEN J Z, ZHAO Y L, WU L, TANG Y C, LIU W S, YANG G Y, XU ZH G, 2023. Woody plants have the advantages in the phytoremediation process of manganese ore with the help of microorganisms. *Science of the Total Environment*, 863: 160995.
- SHAMSHIR R A, WEE S L, 2019. Zingerone improves mating performance of *Zeugodacus tau* (Diptera: Tephritidae) through enhancement of male courtship activity and sexual signaling. *Journal of Insect Physiology*, 119: 103949.
- SUN J, ZHANG C S, YU L N, JIE B, LIU S F, FENG Z, YANG Q L, 2011. Chemical composition of *Broussonetia Papyrifera* flowers. *Advanced Materials Research*, 1267 (236/237/238): 2581–2585.
- WANG Y H, FANG G Q, XU P H, GAO B L, LIU X J, QI X W, ZHANG G J, CAO S, LI Z H, REN X M, WANG H R, CAO Y H, PEREIRA R, HUANG Y P, NIU C Y, ZHAN S, 2022. Behavioral and genomic divergence between a generalist and a specialist fly. *Cell Reports*, 41(7): 111654.
- WEBSTER B, BRUCE T, PICKETT J, HARDIE J, 2009. Volatiles functioning as host cues in a blend become nonhost cues when presented alone to the black bean aphid. *Animal Behaviour*, 79(2): 451–457.

不同寄主对南亚果实蝇生长发育和繁殖的影响

赵常伟^{1,2}, 李传仁^{1,2}, 杨玉婷^{1,2}, 安维彬³, 王在凌^{1,2*}

¹长江大学农学院, 湖北 荆州 434025; ²湖北省农林病虫害预警与调控工程技术研究中心, 湖北 荆州 434025; ³随州市曾都区农业局, 湖北 随州 441300

摘要:【目的】探究葫芦科和茄科寄主果实对南亚果实蝇生长、发育和繁殖的影响。【方法】构建南亚果实蝇在南瓜、黄瓜、冬瓜和西红柿上的种群生命表, 评价南亚果实蝇在 4 种寄主上的适应性。【结果】南亚果实蝇在南瓜上的成虫前期存活率(87.96%)和繁殖力(361.26 粒·雌⁻¹)均显著高于南亚果实蝇在黄瓜(80.00%和 288.34 粒·雌⁻¹)、冬瓜(72.03%和 84.80 粒·单雌⁻¹)和西红柿(69.69%、76.55 粒·单雌⁻¹)上的成虫前期存活率和繁殖力。以南瓜为寄主的南亚果实蝇的内禀增长率(0.10)和净增值率(90.63)显著高于以黄瓜(0.08 和 74.37)、冬瓜(0.07 和 35.62)和西红柿(0.07 和 26.03)为寄主的南亚果实蝇内禀增长率和净增值率。【结论】南亚果实蝇在 4 种寄主上均能完成世代周期, 但是南瓜是南亚果实蝇最适宜的寄主。
关键词: 南亚果实蝇; 寄主适应性; 两性生命表



开放科学标识码
(OSID 码)

Effect of different host plants on the growth, development and fecundity of *Zeugodacus tau* (Walker)

ZHAO Changwei^{1,2}, LI Chuanren^{1,2}, YANG Yuting^{1,2}, AN Weibin³, WANG Zailing^{1,2*}

¹College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China; ²Forewarning and Management of Agricultural and Forestry Pests, Hubei Engineering Technology Center & College of Agriculture, Jingzhou, Hubei 434025, China; ³Agricultural Bureau of Zengdu District, Suizhou City, Suizhou, Hubei 441300, China

Abstract: 【Aim】The objective of this study was to investigate the impact of cucurbit family and Solanaceae on the growth, development, and reproduction of *Zeugodacus tau*. 【Method】To construct a two-sex life table of *Z. tau* on *Cucurbita moschata*, *Cucumis sativus*, *Benincasa hispida*, and *Solanum lycopersicum* and assess the adaptability of *Z. tau* to these four host plants. 【Result】The pre-adult survival rate (87.96%) and fecundity (361.26 eggs · female⁻¹) of *Z. tau* fed on *C. moschata* were significantly higher than those fed on *C. sativus* (80.00% and 288.34 eggs · female⁻¹, respectively), *B. hispida* (72.03% and 84.80 eggs · female⁻¹, respectively), and *S. lycopersicum* (69.69% and 76.55 eggs · female⁻¹, respectively). Moreover, the intrinsic growth rate (0.10) and net reproductive rate (90.63) of *Z. tau* on *C. moschata* were significantly higher than those on *C. sativus* (0.08 and 74.37, respectively), *B. hispida* (0.07 and 35.62, respectively), and *S. lycopersicum* (0.07 and 26.03, respectively). 【Conclusion】*Z. tau* was able to complete its generation cycle in all four host fruits. However, *C. sativus* was the most suitable host for *Z. tau*.

Key words: *Zeugodacus tau*; host adaptability; two-sex life table

南亚果实蝇 *Zeugodacus tau* (Walker) 属双翅目 Diptera 实蝇科 Tephritidae, 是我国一种非常重要的检疫性实蝇害虫(王奕婷等, 2022)。南亚果实蝇主要分布在中国、日本、越南、菲律宾等亚热带及温带

国家和地区(李春苑等, 2012)。中国最早于 1849 年在福建沿海地区发现其踪迹(汪兴鉴, 1996)。因南亚果实蝇具有极强迁飞能力, 且属于“r-对策”昆虫, 种群数量快速扩增, 现已在中国海南、广东、贵

收稿日期(Received): 2023-06-24 接受日期(Accepted): 2023-07-19

基金项目: 湖北省植保总站委托研究项目(J202107026)

作者简介: 赵常伟, 男, 硕士研究生。研究方向: 农业害虫与综合防治。E-mail: zhaochangwei0515@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 王在凌, E-mail: 13554596516@163.com

州、广西、重庆、湖北、湖南等 16 个省市区发生危害(王奕婷等,2022)。

南亚果实蝇寄主范围广,可危害葫芦科、茄科、番木瓜科和西番莲科等 16 科 80 多种寄主植物,充足的食物资源为南亚果实蝇种群的快速定殖提供了生存和繁殖基础(张艳和陈俊谕,2018)。南亚果实蝇以幼虫在果实内部取食,造成果实腐烂,提前脱落,导致严重减产。调查发现,南亚果实蝇对南瓜 *Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duchesne ex Poir. 的感染率最高,可达 73.1%(李小珍,2007),每年仅对南瓜产业造成的潜在经济损失可达 3 千万~2 亿元(方焱等,2015)。

多食性昆虫对寄主的寻找和取食过程主要受寄主植物营养成分、挥发性气味成分的影响,因而对寄主产生不同嗜好性(卢伟,2007;钦俊德,1996)。不同寄主间、同一寄主植物不同年份和不同季节间以及不同立地环境之间的基础营养与次生代谢物质等组分上均存在明显差异,继而影响昆虫的发育进度、存活及繁殖能力(Heindl *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023)。因此,昆虫对不同寄主的适应性差异是影响昆虫种群数量的重要因素,直接影响植食性昆虫的生长发育、成虫寿命和繁殖能力(钦俊德,1996)。

目前,南亚果实蝇在不同寄主植物上的适应性研究主要集中于葫芦科的冬瓜 *Benincasa hispida* (Thunb.) Cogn.、南瓜等寄主植物,在茄科植物上的研究较少。湖北地区瓜果类、茄科类蔬菜产量分别占总蔬菜产量的 11.08%、10.66%,是湖北省非常重要的经济果蔬(胡世霞,2016)。因此,本试验选取葫芦科植物南瓜、黄瓜 *Cucumis sativus* L.、冬瓜和茄科植物西红柿 *Solanum lycopersicum* L. 为试验材料,通过两性生命表技术评价南亚果实蝇在不同寄主植物上的存活率和繁殖力,明确南亚果实蝇在不同寄主上的繁殖优势,为江汉平原地区田间寄主植物种植结构的调整及绿色防治提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试昆虫

南亚果实蝇采集自湖北省荆州市长江大学西校区(112°23'74"N,30°35'75"E)南瓜田中。将有南亚果实蝇幼虫的南瓜放置于温度(25±1)℃、相对湿度(75±5)%、光周期 12 L:12 D 的恒温培养箱(GZX-400BS-III,宁波赛福实验仪器有限公司)中。

待蛹羽化为成虫并准确鉴定后,分别以南瓜、黄瓜、冬瓜和西红柿饲养 3 代以上。

1.2 供试寄主

长江大学西校区附近菜市场采购新鲜且成熟的南瓜、黄瓜、冬瓜和西红柿。采购回来的南瓜、黄瓜、冬瓜和西红柿使用去离子水清洗 3 遍后,置于 4℃冰箱保存,待后续试验使用。

1.3 南亚果实蝇室内种群试验

将不同寄主饲养的第 3 代南亚果实蝇成虫分别放入 4 个饲养笼(40 cm×40 cm×40 cm)中,每个饲养笼中约 20 对南亚果实蝇成虫。将南瓜、黄瓜、冬瓜和西红柿切成长约 10 cm,宽约 5 cm 的小块,每小块果肉切开 4~5 条深度为 1~2 cm 的裂缝后,放入装有相应寄主的饲养笼中,供南亚果实蝇成虫产卵。2 h 后拿出带有南亚果实蝇卵粒的果肉,置于温度(25±1)℃、相对湿度(75±5)%、光周期 12 L:12 D 的恒温培养箱(GZX-400BS-III)中。待卵孵化后用细毛笔随机挑选 100 头活跃初孵化幼虫至一次性培养皿(直径 4 cm、高 1 cm)中单头饲养,每天更换寄主食物,在体视镜下观察并记录龄期(幼虫龄期以蜕皮为标准)和存活情况。

幼虫发育至 3 龄老熟幼虫时(频繁上下跳动为老熟幼虫的标志),将老熟幼虫置于厚度 2.5 cm、相对湿度(75±5)%的灭菌沙表面,供老熟幼虫化蛹。待老熟幼虫入土后第 4 天,取出所有的蛹,使用软毛刷清除周围沙粒后用卫生纸将蛹表面的水分擦干。在千分之一天平(OHAUS-AX224ZH/E)称重后放回塑料杯中,盖上 0.5~1.0 cm 厚的沙粒。

南亚果实蝇蛹羽化后,将同种寄主饲养的雌雄成虫进行配对,并置于放有 10%蜂蜜水的饲养笼中,分别使用长约 10 cm、宽约 5 cm 的南瓜块、冬瓜块、西红柿块和黄瓜块引诱南亚果实蝇产卵,每天记录产卵量、卵孵化率和成虫存活情况。

1.4 种群生命表的构建及种群动态预测

参照 Chi & Liu (1985)及 Chi & Getz (1988)提出的年龄-阶段两性生命表研究方法,建立南亚果实蝇在 4 种寄主寄主植物上的种群生命表。 s_{xj} 表示南亚果实蝇在年龄 x 、阶段 j 的存活率, l_x 为忽略龄期的情况下种群在年龄 x 的存活率(齐心等,2019; Chi *et al.*, 2020)。两者之间的关系为:

$$l_x = \sum_{j=1}^k s_{xj}$$

种群特征繁殖力 m_x 是指所有存活的南亚果实蝇在年龄 x 、阶段 j 时的平均产卵量, 年龄-阶段特征繁殖力 (f_x) 是指在年龄 x 、阶段 j 时所有存活雌虫的平均产卵量。二者之间的计算公式为:

$$m_x = \frac{\sum_{j=1}^k s_{xj} f_{xj}}{\sum_j s_{xj}}$$

净增长率 R_0 是南亚果实蝇种群个体从出生到死亡的存活率 (l_x) 与种群特征繁殖力 (m_x) 乘积之和:

$$R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x$$

内禀增长率 r 的计算公式:

$$\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1$$

周限增长率 λ 的计算公式:

$$\lambda = e^r$$

1.5 数据处理和分析

使用年龄-龄期两性生命表软件 TWOSEX-MS-Chat (Chi, 2020a) 分析和计算南亚果实蝇在 4 种寄主植物上的年龄-龄期存活率 (s_{xj})、年龄特征存活率 (l_x)、年龄特征繁殖力 (f_x)、种群特征繁殖力 (m_x)、种群特征净增值率 ($l_x m_x$)、内禀增长率 r 、周限增长率 λ 、净增值率 R_0 和平均世代周期 T 。TIME-MSChat 软件 (Chi, 2020b) 预测南亚果实蝇在 4 种寄主上发育 140 d 后的种群数量。南亚果实蝇在 4 种寄主植物上的发育历期、成虫寿命、繁殖力等生活史参数的标准误均选择 Bootstrap 重复 100000 次进行计算, 通过 Paired bootstrap test (5%) 对南亚果实蝇在 4 种寄主上的生活史参数进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 寄主食物对南亚果实蝇发育历期、蛹重和存活率的影响

南亚果实蝇在冬瓜上的 1 龄 (2.41 d)、2 龄 (2.58 d) 和 3 龄 (3.22 d) 幼虫的发育历期以及整个幼虫期 (8.49 d) 均显著长于在南瓜、黄瓜和西红柿上的发育历期。南亚果实蝇 1、2、3 龄幼虫的发育历期以及整个幼虫期在南瓜、黄瓜和西红柿上无显著差异。在 4 种寄主上的蛹期无显著差异。取食西红柿的蛹重 (16.28 mg) 显著高于取食其他 3 种寄主, 取食冬瓜的蛹重 (10.78 mg) 显著低于取食其他 3 种寄主食物。南亚果实蝇在 4 种寄主植物上的成虫前期存活率存在显著差异, 其中, 在南瓜上成虫前期存活率最高 (87.96%), 显著高于取食其他 3 种寄主植物的成虫前期存活率 (表 1)。

2.2 寄主食物对南亚果实蝇成虫生活史参数的影响

幼虫取食冬瓜, 产卵前期 (25.24 d) 和总产卵前期 (41.37 d) 显著长于寄主食物为南瓜 (20.71 d、36.77 d) 和黄瓜 (21.20 d、36.58 d) 的产卵前期和总产卵前期。幼虫取食南瓜, 产卵期 (50.25 d)、雌虫寿命 (101.36 d)、雄虫寿命 (141.89 d) 显著长于取食其他 3 种寄主植物的产卵期、雌虫寿命和雄虫寿命。幼虫取食南瓜, 其成虫的产卵量 (361.26 粒) 显著高于取食其他 3 种寄主寄主的成虫产卵量。卵孵化率在南瓜 (80.81%) 和黄瓜 (79.21%) 之间无显著差异, 但显著高于取食冬瓜 (67.61%) 和西红柿 (72.58%) 的卵孵化率 (表 2)。

表 1 南亚果实蝇在 4 种寄主上的发育历期、蛹重和存活率
Table 1 Developmental period, pupal weight and survival rate of *Z. tau* on four hosts

寄主 Host	1 龄 1st instar /d	2 龄 2nd instar /d	3 龄 3rd instar /d	幼虫期 Total larval stage/d	蛹期 Pupal stage/d	蛹重 Pupa weight /mg	成虫前期 存活率 Pre-adult survival rate/%
南瓜 <i>Cucurbita moschata</i>	2.10±0.04b	2.08±0.10b	2.71±0.07b	6.74±0.10b	8.31±0.06a	14.59±0.54b	87.96±3.23a
黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	2.12±0.06b	2.14±0.04b	2.84±0.11b	6.98±0.15b	8.39±0.03a	13.75±0.47b	80.00±4.00b
冬瓜 <i>Benincasa hispida</i>	2.41±0.10a	2.58±0.05a	3.22±0.03a	8.49±0.09a	8.42±0.17a	10.78±0.83c	72.03±4.47c
西红柿 <i>Solanum lycopersicum</i>	2.14±0.02b	2.14±0.02b	2.98±0.06b	7.16±0.04b	8.29±0.04a	16.28±0.34a	69.69±4.62d

表中数据为平均值±标准误, 同一列数据后不同小写字母表示使用 bootstrap (B=100000) 程序检验在 0.05 水平差异显著。
Data are mean±SE. The different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level (paired bootstrap test, B=100000).

表 2 南亚果实蝇在 4 种寄主上的寿命和繁殖力
Table 2 Longevity and fecundity of *Z. tau* on four hosts

寄主 Host	产卵前期 Adult preoviposition period/d	总产卵前期 Total preoviposition period/d	产卵期 Oviposition period/d	雌成虫寿命 Female longevity/d	雄成虫寿命 Male longevity/d	产卵量/粒 Fecundity	卵孵化率 Hatching rate/%
南瓜 <i>Cucurbita moschata</i>	20.71±1.23b	36.77±1.05b	50.25±6.06a	101.36±15.23a	141.89±10.22a	361.26±23.11a	80.81±0.27a
黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	21.20±1.76b	36.58±2.57b	44.13±8.04b	70.78±18.55b	84.61±9.55b	288.34±23.56b	79.21±0.16a
冬瓜 <i>Benincasa hispida</i>	25.24±1.59a	41.37±2.17a	32.76±7.38c	43.08±8.22c	57.53±8.42c	84.80±11.01c	67.61±0.18b
西红柿 <i>Solanum lycopersicum</i>	23.75±1.01ab	39.75±0.68ab	34.64±6.42c	47.92±12.66c	39.31±7.17d	76.55±9.64c	72.58±0.19b

表中数据为平均值±标准误,同一列数据后不同小写字母表示使用 bootstrap ($B=100\ 000$) 程序检验在 0.05 水平差异显著。

Data are mean±SE. The different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level (paired bootstrap test, $B=100\ 000$).

2.3 寄主对南亚果实蝇年龄-龄期存活率的影响

南亚果实蝇在南瓜、黄瓜、冬瓜和番茄上的幼虫期年龄-龄期存活率分别是 0.88%、0.86%、0.74%和 0.81%,但南亚果实蝇在南瓜(0.85%)、黄瓜(0.78%)、冬瓜(0.72%)和番茄(0.69)上的成虫最高年龄-龄期存活率 s_{xy} 均低于同种寄主食物下幼虫期的年龄-龄期存活率(图 1、2)。南亚果实蝇取食南瓜,其整个生命周期(卵期+幼虫期+蛹期+成虫期)最长的可达 208 d,而南亚果实蝇取食冬瓜和

西红柿,其成虫的最长生命周期仅有 128 和 109 d (图 1、2)。取食南瓜的南亚果实蝇雌雄虫的存活率在 30~130 d 时缓慢下降,而在 130 d 后,南亚果实蝇雌雄虫的存活率急剧下降,且雌虫存活率的下降速率快于雄虫存活率的下降速率。取食黄瓜和西红柿的南亚果实蝇成虫存活率在 30 d 后快速下降,同时雌虫的死亡速度与雄虫的死亡速度相当。且取食西红柿的南亚果实蝇成虫存活率下降速率快于取食黄瓜的南亚果实蝇(图 1、2)。

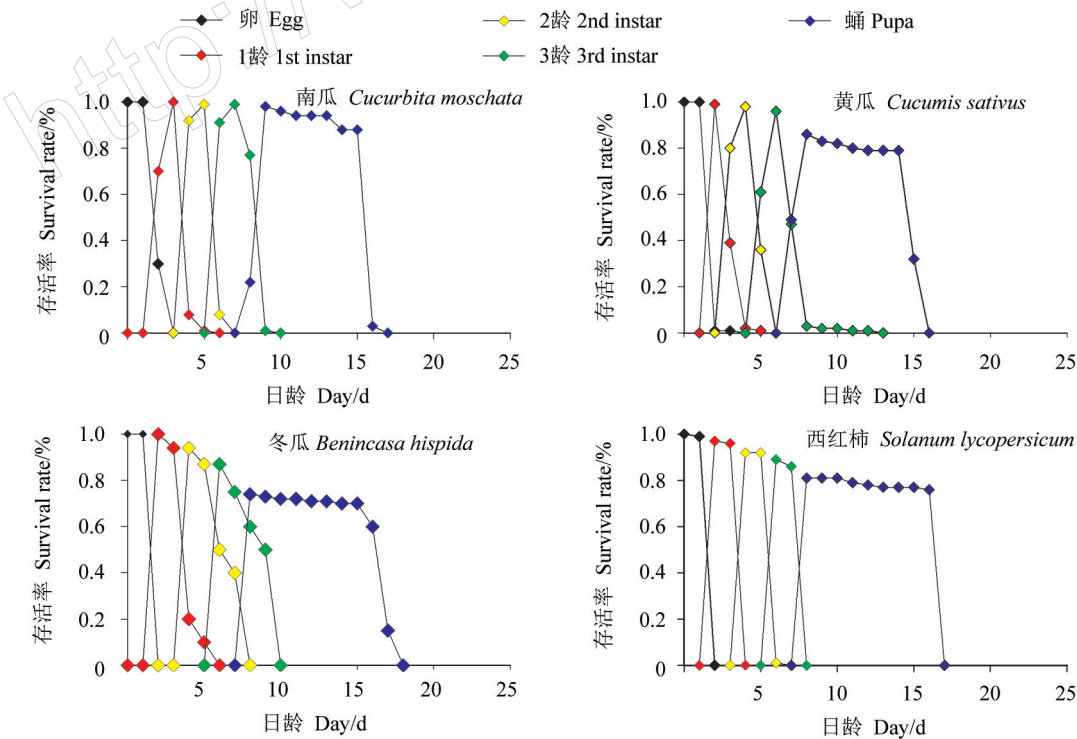


图 1 南亚果实蝇卵、幼虫和蛹在 4 种寄主上的年龄-龄期存活曲线

Fig.1 Age-age survival curves (s_{xj}) of egg, larvae and pupae of *Z. tau* on four hosts

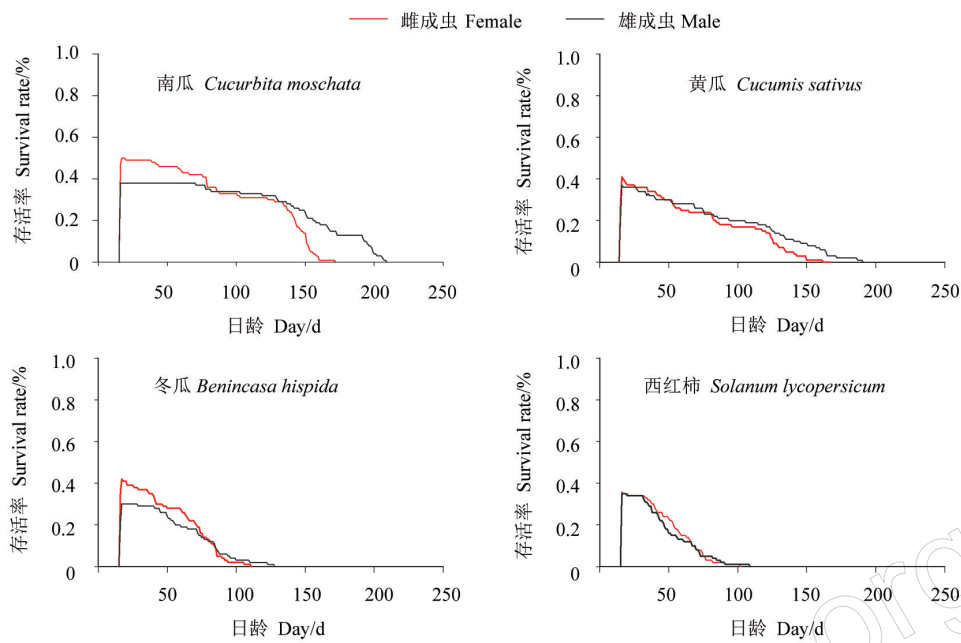


图 2 南亚果实蝇雌雄虫在 4 种寄主上的年龄-龄期存活曲线
Fig.2 Age-age survival curves (s_{ij}) of female and male of *Z. tau* on four hosts

2.4 寄主对南亚果实蝇繁殖力的影响

南亚果实蝇在 4 种寄主果实上的年龄-龄期特征存活率(l_x)、年龄-龄期特征繁殖力(f_x)和种群特征繁殖力(m_x)如图 3 所示。南亚果实蝇的繁殖力曲线由多个不连续的高低峰接连而成,且存在间断不产卵的情况。南亚果实蝇幼虫取食南瓜,其成虫

的年龄-龄期特征繁殖力(14.03)在 43 d 时达到最高,高于取食黄瓜(10.26)、西红柿(10.09)和冬瓜(9.78)的的年龄-龄期特征繁殖力。南亚果实蝇在 4 种寄主上的年龄-龄期特征存活率 l_x 随着龄期的增长逐渐下降。

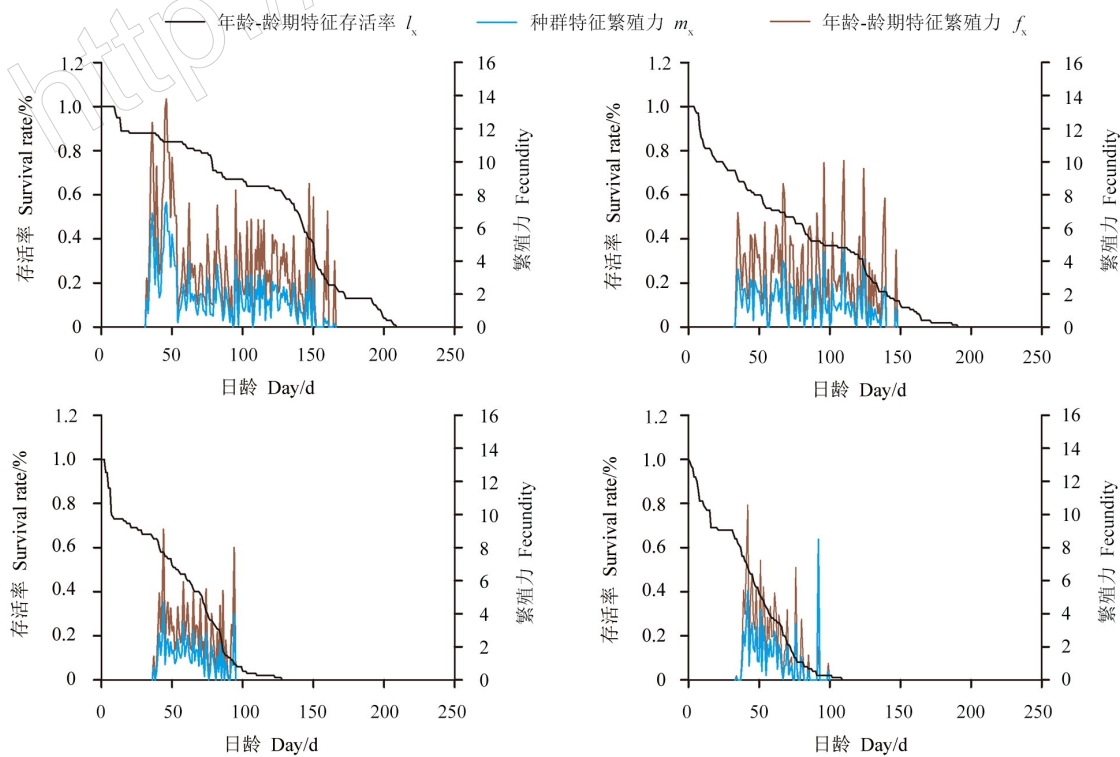


图 3 南亚果实蝇在 4 种寄主上的年龄-特征存活率和种群繁殖力
Fig.3 Age-specific survival rate and fecundity of *Z. tau* on four hosts

2.5 南亚果实蝇在 4 种寄主上的种群动态参数

南亚果实蝇在 4 种寄主上的种群参数如表 3 所示。南亚果实蝇在南瓜上的内禀增长率(0.10)和净增值率(90.63)显著高于在黄瓜(0.08、74.37)、冬瓜(0.07、35.62)和西红柿上(0.07、26.03)的内禀增长率和净增值率。南亚果实蝇在 4 种寄主上的周限增长率无显著差异。南亚果实蝇在黄瓜(54.50 d)和冬瓜(56.92 d)的平均世代周期显著长于在西红柿(48.41 d)上的平均世代周期。

2.6 南亚果实蝇在 4 种寄主上的种群动态预测

南亚果实蝇在 4 种寄主植物上发育 140 d 的种

群预测数量和种群预测动态如图 4 所示。南亚果实蝇在南瓜上饲养的第二代新生卵的种群数量高于其他 3 种寄主饲养的新生卵数量。在 140 d 时南亚果实蝇在南瓜上的种群数量指数最高(5.72),其次为黄瓜(4.36),最低为冬瓜(3.56)和西红柿(3.42)。以南瓜和黄瓜为寄主饲养的南亚果实蝇在 85 d 后可以发育第 3 代成虫,而以冬瓜和西红柿饲养需 95 d 才能与羽化出第 3 代。在 140 d 时,以南瓜和黄瓜饲养的南亚果实蝇第 4 代成虫已经开始羽化,而以冬瓜和西红柿饲养的第 3 代成虫还未完全羽化。

表 3 南亚果实蝇在 4 种寄主果实上的种群参数
Table 3 Mean of population parameters of *Z. tau* fed on four hosts

寄主 Host	内禀增长率 Intrinsic rate of increase	净增值率 Net reproductive rate	周限增长率 Finite rate of increase	世代平均周期 Mean generation time/d
南瓜 <i>Cucurbita moschata</i>	0.10±0.01a	90.63±8.25a	1.10±0.02a	49.89±2.24ab
黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	0.08±0.01b	74.37±4.47b	1.08±0.01a	54.50±4.51a
冬瓜 <i>Benincasa hispida</i>	0.07±0.00b	35.62±6.21c	1.06±0.05a	56.92±2.05a
西红柿 <i>Solanum lycopersicum</i>	0.07±0.00b	26.03±6.88c	1.06±0.01a	48.41±1.07b

表中数据为平均值±标准误,同一列数据后不同小写字母表示使用 bootstrap ($B=100000$) 程序检验在 0.05 水平差异显著。
Data are mean±SE. The different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level (paired bootstrap test, $B=100000$).

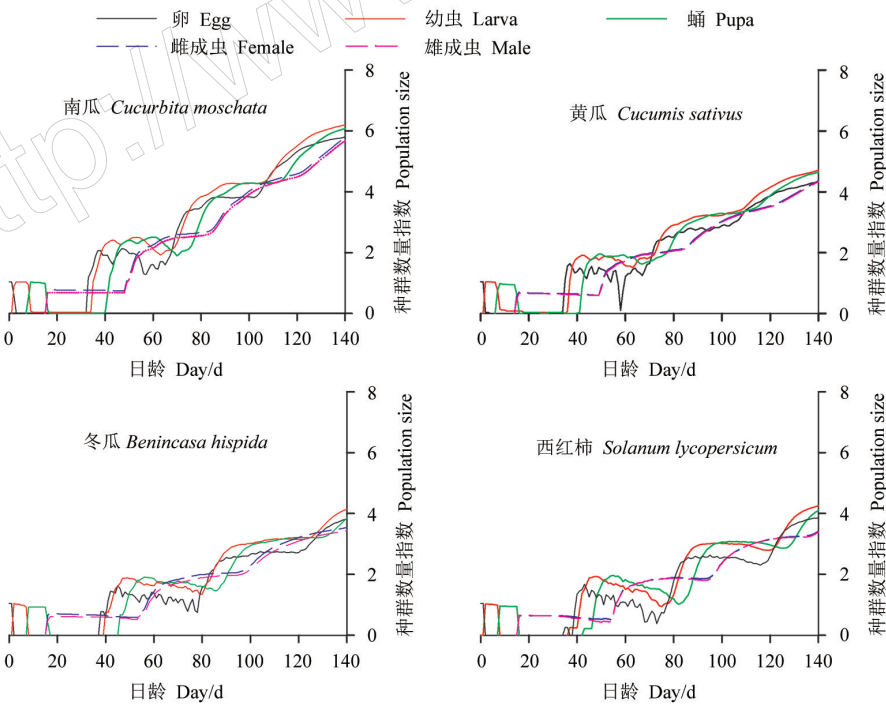


图 4 南亚果实蝇在 4 种寄主上繁殖的种群动态预测
Fig.4 Prediction of population dynamics of *Z. tau* fed on four hosts

3 讨论

与传统生命表相比,年龄-龄期两性生命能更清楚地反映种群在不同环境、不同寄主条件下的种

群生长发育差异,是评价昆虫种群寄主适应性及对未来种群数量预测的重要方法。周波(2005)通过传统生命表记录南亚果实蝇在南瓜和黄瓜上的幼

虫发育历期和存活率,与本试验结果接近,但在南瓜和黄瓜上的单雌产卵量仅为 84.67 和 99.56 粒,显著低于本试验结果。该差异可能是由于周波(2005)使用 3% 的蜂蜜水饲喂成虫,成虫期的营养不足,从而导致成虫产卵量显著下降。

南亚果实蝇在南瓜、黄瓜和西红柿上幼虫的发育历期无显著差异,但是以西红柿为寄主的蛹重(16.28 mg)显著高于取食冬瓜和南瓜的蛹重。李丽丽(2009)发现橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel) 幼虫取食碳水化合物和蛋白质的比例和含量显著影响幼虫生长发育和蛹重的大小。由此推测,西红柿中碳水化合物和蛋白质含量可能更有利于南亚果实蝇幼虫的生长发育。

南亚果实蝇在武汉地区的发生高峰期为 6—9 月,此阶段为寄主果实逐渐成熟的时期且温度较高,利于其存活和繁殖(张振宇等,2018)。本试验中南亚果实蝇在 4 种寄主上的总产卵前期无显著差异,均在 20 d 后繁殖下一代。在无外界条件限制下,预测 140 d 后以南瓜为寄主的雌成虫数量可达 50 万头,以西红柿为寄主的雌成虫数量仅有 2682 头。因此,在田间应调整种植结构,避免南亚果实蝇危害葫芦科的冬瓜、黄瓜后,转移危害茄科作物。

本试验首次使用两性生命表技术评价南亚果实蝇在 4 种寄主上的适合度,确定南瓜是南亚果实蝇最适宜的寄主,同时明确南亚果实蝇可以在冬瓜、黄瓜和西红柿上完成整个世代周期。本试验南亚果实蝇成虫各阶段发育历期、产卵高峰期等生物学参数可为江汉平原地区南亚果实蝇的防治提供生物学依据。

参考文献

方焱,李志红,秦萌,吴志刚,赵守歧,吴立峰,赵中华,陈克,秦誉嘉,王聪,赵谈, 2015. 南亚果实蝇对我国南瓜产业的潜在经济损失评估. 植物检疫, 29(3): 28-33.

胡世霞, 2016. 湖北省蔬菜产业竞争力研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.

李春苑,吴佳教,胡学难,刘海军, 2012. 南亚果实蝇各虫态发育历期及有效积温研究. 生物安全学报, 21(2): 105-108.

李丽丽, 2009. 橘小实蝇大量饲养技术优化. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.

李小珍, 2007. 南亚果实蝇种群特征及其对食料和热胁迫的生理调控机制. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.

卢伟, 2007. 植物营养对烟粉虱行为、发育和种群参数的影

响. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.

钦俊德, 1996. 昆虫与寄主植物的适应性及协调进化. 生物学通报, 31(1): 1-3.

齐心,傅建炜,尤民生, 2019. 年龄-龄期两性生命表及其在种群生态学与害虫综合治理中的应用. 昆虫学报, 62(2): 255-262.

王奕婷,白强,陈红松,田震亚,高旭渊,周忠实, 2022. 瓜实蝇和南亚果实蝇在我国的分布差异. 环境昆虫学报, 44(5): 1170-1175.

汪兴鉴, 1996. 果实蝇属重要害虫的厘订名录和分亚属及种检索表(双翅目:实蝇科:寡鬃实蝇亚科). 植物检疫, 10(2): 95-103.

张艳,陈俊谕, 2018. 南亚果实蝇国内研究进展. 热带农业科学, 38(11): 70-77.

张振宇,李亮,邓义,焦丽,凌霄霞,张宏宇, 2018. 湖北武汉果实蝇害虫种群动态调查. 华中农业大学学报, 37(5): 52-58.

周波, 2005. 南亚实蝇生物学特性及不同食料对其种群增长的影响. 硕士学位论文. 重庆: 西南农业大学.

CHI H, 2020a. TWSEX-MSChart: a computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. [2023-05-13]. <http://140.120.197.173/Ecology/>.

CHI H, 2020b. TIMING-MSChart: a computer program for the timing of pest management. [2023-05-13]. <http://140.120.197.173/Ecology/>.

CHI H, LIU H, 1985. Two new methods for the study of insect population ecology. *Academia Sinica*, 24(2): 225-240.

CHI H, YOU M, ATLIHAN R, SMITH C, KAVOUSHI A, ÖZGÖKCE M, GUNCAN A, TUAN S J, FU J W, XU Y Y, 2020. Age-stage, two-sex life table: an introduction to theory, data analysis, and application. *Entomologia Generalis*, 40(2): 102-123.

CHI H, GETZ W M, 1988. Mass rearing and harvesting based on an age-stage, two-sex life table: a potato tuberworm (Lepidoptera: Gelechiidae) case study. *Environmental Entomology*, 17(1): 18-25.

HEINDL M R, BÖTTCHER-FRIEBERTSHÄUSER E, 2023. The role of influenza-A virus and coronavirus viral glycoprotein cleavage in host adaptation. *Current Opinion in Virology*, 58: 101303.

ZHAO J S, YAO Y F, DONG M M, XIAO H T, XIONG Y, YANG S Z, XU H L, 2023. Diet and high altitude strongly drive convergent adaptation of gut microbiota in wild macaques, humans, and dogs to high altitude environments. *Frontiers in Microbiology*, 14: 1067240.

12种双棘长蠹属昆虫(鞘翅目:长蠹科)的鉴定特征

王新国^{1*}, 王俊峰¹, 黄艳¹, 邓雪华¹, 华展义¹, 赵菊鹏², 江志海¹,
¹黄埔海关技术中心, 广东 广州 510730; ²广州海关技术中心, 广东 广州 510730

摘要:【目的】双棘长蠹属 *Sinoxylon* (非中国种) 是我国禁止进境的检疫性有害生物。双棘长蠹属昆虫不同种类在形态上十分相似, 往往难以准确鉴定。为解决双棘长蠹检疫鉴定中缺少形态特征图的困难, 本文开展了有关双棘长蠹鉴定特征的研究, 以期对这些双棘长蠹的检疫鉴定提供参考依据。【方法】选取我国口岸截获和国内采集的 12 种双棘长蠹属昆虫, 即黑双棘长蠹、相似双棘长蠹、红角双棘长蠹、苏丹双棘长蠹、折缘双棘长蠹、小横双棘长蠹、阔齿双棘长蠹、角豆双棘长蠹、三胝双棘长蠹、粗双棘长蠹、萨西双棘长蠹和椴子双棘长蠹作为研究对象, 从虫体体长、侧面观、触角形态、鞘翅斜面上的双棘、刚毛、侧缘瘤突及其他鉴定特征等方面对这 12 种双棘长蠹进行比较分析。【结果】12 种双棘长蠹成虫体长从 4.0~8.6 mm 变化较大; 图显示了成虫侧面观; 这些双棘长蠹的触角可根据触角棒长度与棒节第二节宽度的比例分为三指型和三叶型; 斜面上双棘形态和位置变化多样; 鞘翅斜面上的刚毛可分为倒伏型、直立型和无毛型; 结合体长和其他特征, 列出了这 12 种双棘长蠹的检索表。【结论】双棘长蠹触角的类型、斜面上的双棘形态、位置和斜面上刚毛类型可作为主要的鉴定分类特征。

关键词: 双棘长蠹属; 形态特征; 检疫鉴定; 长蠹科



开放科学标识码
(OSID 码)

Identification and key characteristics of 12 species of *Sinoxylon* (Coleoptera: Bostrichidae)

WANG Xinguo^{1*}, WANG Junfeng¹, HUANG Yan¹, DENG Xuehua¹,
HUA Zhanyi¹, ZHAO Jupeng², JIANG Zhihai¹

¹Technology Center of Huangpu Customs, Guangzhou, Guangdong 510730, China;
²Technology Center of Guangzhou Customs, Guangzhou, Guangdong 510730, China

Abstract: 【Aim】 *Sinoxylon* spp. (non-Chinese), considered quarantine pests in China, are prohibited from entering the country. However, species of *Sinoxylon* are morphologically similar and often difficult to identify accurately. This study seeks to address the difficulty arising from a lack of images that document the morphological features of these beetles to facilitate their quarantine identification, in order to serve as a reference for their quarantine identification. 【Method】 This paper analyzes 12 species intercepted from imported logs and collected in China, including *Sinoxylon unidentatum*, *S. anale*, *S. ruficorne*, *S. sudanicum*, *S. epipleurale*, *S. transvaalense*, *S. divaricatum*, *S. ceratoniae*, *S. senegalense*, *S. crassum*, *S. succisum*, and *S. tignarium*. The analysis focused on the effects of the length of the body, side profile, shape of the antenna, dual teeth, setae, and marginal tubers on elytron declivity, among other key characteristics. 【Result】 The body length of 12 species of beetles was found to vary significantly, ranging from 4.0–8.6 mm. Herein, the lateral view of an adult is presented. The antennae of these beetles can be categorized into three-fingered and trilobite types, based on the ratio of the club length to the width of the second segment. The morphology and position of the two spines also varied. The setae on the elytra declivity can be classified into three types, namely bowed, erect, or hairless. Combined with their body length and other features, this work provides a key for the identification of these 12 beetle species. 【Conclusion】 The antennae types of the *Sinoxylon* beetles, the morphology and location of the double spine, and the types of setae on the slope can serve as the primary characteristics of these beetles.

Key words: *Sinoxylon* spp.; character; quarantine and identification; Bostrichidae

双棘长蠹属 *Sinoxylon* (鞘翅目:长蠹科) 昆虫是一类对树木危害较为严重的昆虫,全世界记述约 50 种(Lesne,1906)。我国记录的双棘长蠹属昆虫有 4 种(Hua,2002),其中的 2 种即相似双棘长蠹 *Sinoxylon anale* Lesne 和日本双棘长蠹 *S. japonicum* Lesne,对包括葡萄 *Vitis vinifera* L.、柿 *Diospyros kaki* Thunb.、酸枣 *Ziziphus jujuba* Mill var *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow、核桃 *Juglans regia* L.、国槐 *Sophora japonica* L.、栎树 *Koelreuteria paniculata* Laxm.等多种树木危害严重(王建华等,2013; 吴万超和郭松波,2008; 许永娟和许晓娟,2019; 张辉元等,2012; 赵杰,2005)。双棘长蠹类昆虫不仅危害活树,也可在伐倒木上生存,甚至可长时间存活在已加工的板材中。因此,双棘长蠹类昆虫易于随木材贸易及木质包装进行远距离传播(陆军等,2008; 吴剑光等,2008)。由于对果树和绿化树的严重危害,我国于 2007 年将双棘长蠹属(非中国种)列入进境植物检疫性有害生物名录。

我国对外来双棘长蠹属昆虫检疫鉴定的研究相对较晚。李今中和陈寿玲(1989)最先报道了截获的芒果双棘长蠹 *S. mangiferae* Chujo;随后,陈寿玲和李今中(1992)报道了口岸截获的 4 种双棘长蠹属昆虫,包括 *S. anale*、*S. sexdentatum*、*S. conigerum*(=*S. unidentatum*,下同)和 *S. japonicum*;陈志舜(1992,1993,1994,1995,2000,2001,2003)在对截获的外来长蠹的检疫鉴定中,报道了我国口岸截获的多种长蠹,其中涉及的双棘长蠹属有相似

双棘长蠹 *S. anale*、黑双棘长蠹 *S. conigerum*、三胫双棘长蠹 *S. senegalense*、拟双棘长蠹 *S. flabrarius* 和红角双棘长蠹 *S. ruficorne*;我国首部长蠹类专著《长蠹科害虫检疫鉴定》(陈志舜,2011)参考 Lesne (1906)的著作,描述了 38 种双棘长蠹,提供了 13 种双棘长蠹的彩色特征图,其中 8 种来自网络。朱宏斌和李艳华(2006)对 Lesne 著作中 38 种双棘长蠹属分种检索表的翻译,类似的检索表后来也出现在有关该属昆虫研究的多个文献中(陈乃中,2009; 陈志舜,2011)。

近年来,我国口岸每年截获大量的双棘长蠹属昆虫,仅 2018 年全国口岸就截获双棘长蠹属昆虫 14 种 1213 种次。然而,目前的资料难以满足口岸检疫实践的需求。Lesne 的资料著于 100 多年前,除了文字描述外,仅有一些简单的手绘线条图;一些资料中对部分形态特征的翻译不够准确和直观;由于部分双棘长蠹之间的差别细微,仅根据百年前的简单手绘图难以准确鉴定。因此,本文在对 12 种双棘长蠹属昆虫形态观察的基础上,拍摄了 12 种昆虫的整体照片及鉴别特征照片(其中 3 种为国内首次报道),以期为口岸外来双棘长蠹属昆虫的鉴定提供更加直观可靠的依据。

1 材料与方法

1.1 供试标本

供试标本见表 1,主要为黄埔海关植检实验室历年来截获标本的积累。

表 1 供试双棘长蠹属昆虫标本
Table 1 The specimen of *Sinoxylon* beetles in the study

序号 No.	种类 Species	来源 Source	数量/头 Quantity	截获日期 Collection date
1	黑双棘长蠹 <i>S. unidentatum</i>	加纳 Ghana	8	2017-01-09
2	相似双棘长蠹 <i>S. anale</i>	印度尼西亚 Indonesia	9	2009-12-23
3	红角双棘长蠹 <i>S. ruficorne</i>	塞拉利昂 Sierra Leone	9	2018-05-09
4	苏丹双棘长蠹 <i>S. sudanicum</i>	印度 India	2	2006-07-16
5	折缘双棘长蠹 <i>S. epipleurale</i>	坦桑尼亚 Tanzania	4	2014-07-22
6	小横双棘长蠹 <i>S. transvaalense</i>	坦桑尼亚 Tanzania	3	2018-06-09
7	阔齿双棘长蠹 <i>S. divaricatum</i>	塞拉利昂 Sierra Leone	4	2018-11-22
8	角豆双棘长蠹 <i>S. ceratoniae</i>	多哥 Togo	1	2014-03-28
9	三胫双棘长蠹 <i>S. senegalense</i>	冈比亚 Gambia	1	2012-07-22
10	粗双棘长蠹 <i>S. crassum</i>	老挝 Laos	4	2020-12-08
11	萨西双棘长蠹 <i>S. succisum</i>	加纳 Ghana	1	2018-11-07
12	椴子双棘长蠹 <i>S. tignarium</i>	中国贵州 Guizhou, China	3	2019-05-20

1.2 仪器和设备

德国蔡司 Stereo V8 立体显微镜(带 CCD 和测微尺);镊子;解剖针等。

1.3 形态学观察

将标本置于纯净石英砂表面上,在立体显微镜下观察和测量,记录各部位结构特征,统计差异,重

要特征拍照保存。对于标本数量较多的种类,每种测量标本 5 头,对于标本数量少于 5 头的,测量全部标本,并取其平均值。

2 结果与分析

2.1 体型大小

双棘长蠹类的体型大小主要体现在体长(背面观从头部至鞘翅端部的长度)上:黑双棘长蠹 4.3~5.5 mm,平均 4.88 mm;相似双棘长蠹 4.2~5.5 mm,平均 4.81 mm;红角双棘长蠹 5.6~7.1 mm,平均 6.25 mm;苏丹双棘长蠹 4.5~4.8 mm;折缘双棘长蠹 7.1~7.8 mm;小横双棘长蠹 5.0~5.1 mm;阔齿双棘长蠹 4.5 mm;角豆双棘长蠹 4.0~4.4 mm;三胝双棘长蠹 7.0 mm;椴子双棘长蠹 4.3~4.8 mm;萨西双棘长蠹 4.6 mm;粗双棘长蠹 7.0~8.6 mm。

根据体型,12 种双棘长蠹大致可分为 2 类:大型种,体长普遍大于 5.6 mm,如粗双棘长蠹、红角双棘长蠹、三胝双棘长蠹和折缘双棘长蠹;小型种,体型普遍在 5.5 mm 以下,如黑双棘长蠹、相似双棘长蠹等其他 8 种。

2.2 12 种双棘长蠹属昆虫的侧面观

从侧面观察,12 种双棘长蠹属昆虫除大小区别明显外,前胸背板最高点也不同,但这个特征往往由于标本头胸部与腹部的接合情况在个体间有变化;侧面观也可看到双棘的形状和指向变化。在某些标本完整且姿势较佳的侧面图中,可以观察到触角

的形状。

结合背面观和侧面观,双棘长蠹具有独特的截断状斜面,其两侧缘形成一条明显的棱(图 1C);斜面侧缘完全没有瘤突或几乎看不到瘤突的有 5 个种,即黑双棘长蠹(图 1B)、角豆双棘长蠹(图 1F)、阔齿双棘长蠹(图 1E)、苏丹双棘长蠹(图 1I)和萨西双棘长蠹(图 1K);另外 4 个种有或强或弱的瘤突:红角双棘长蠹有 3 个瘤突,较明显,3 个瘤突大小一致(图 1A);三胝双棘长蠹(图 1D)、折缘双棘长蠹(图 1G)和椴子双棘长蠹也有 3 个瘤突,虽较弱,但清楚可见;小横双棘长蠹仅有 2 个较弱的瘤突(图 1H);粗双棘长蠹斜面侧缘上形成了 2 个十分明显的纵脊,大小几乎与缝棘相当(图 1J)。



图 1 十二种双棘长蠹成虫侧面观

Fig.1 Lateral view of 12 species of *Sinoxylon* adult

A: 红角双棘长蠹; B: 黑双棘长蠹; C: 相似双棘长蠹; D: 三胝双棘长蠹; E: 阔齿双棘长蠹; F: 角豆双棘长蠹; G: 折缘双棘长蠹; H: 小横双棘长蠹; I: 苏丹双棘长蠹; J: 粗双棘长蠹; K: 萨西双棘长蠹; L: 椴子双棘长蠹。
A: *S. ruficorne*; B: *S. unidentatum*; C: *S. anale*; D: *S. senegalense*; E: *S. divaricatum*; F: *S. ceratoniae*; G: *S. epipleurale*; H: *S. transvaalense*; I: *S. sudanicum*; J: *S. crissum*; K: *S. succisum*; L: *S. tignarium*.

2.3 双棘长蠹属昆虫触角类型

对触角形态进行观察可知,双棘长蠹属昆虫柄节粗短,梗节较长,鞭节前 6 节短小紧密,后 3 节强烈向一侧加宽呈鳃片状,形成明显的触角棒;根据双棘长蠹类触角棒节的长宽比例,可将这些触角大致可分为三指型和三叶型 2 种类型。相似双棘长蠹、黑双棘长蠹、角豆双棘长蠹、阔齿双棘长蠹、苏丹双棘长蠹和萨西双棘长蠹触角棒属于三指型,而红角双棘长蠹、三胝双棘长蠹、折缘双棘长蠹、小横双棘长蠹、粗双棘长蠹和缘子双棘长蠹触角棒属于三叶型。

三指型触角棒各节一般宽长比(b/a)明显大于 3 (图 2A),3 个棒节形状比较近似,棒节 2 的宽度 b 大于 3 节棒节的总长 c (棒节沿纵轴方向为长),棒节整体形状类似 3 根手指,表面比较光滑;而三叶型触角棒节宽长比一般小于 2.5 (图 2B),棒节 2 宽度小于棒节总长;3 个棒节形状各异:棒节 1 三角形,棒节 2 楔形,棒节 3 豆瓣状;棒节表面具浓密倒伏的细毛。

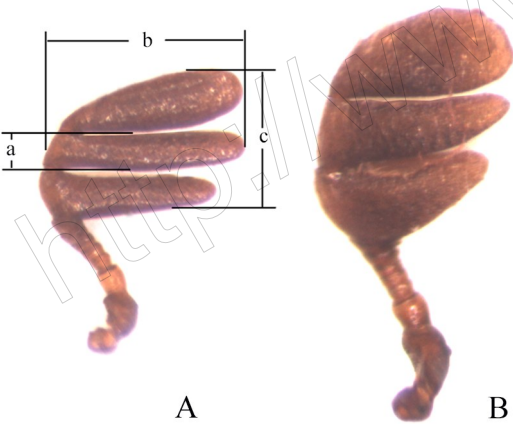


图 2 双棘长蠹属昆虫触角类型

Fig.2 Two types of antennae of *Sinoxylon* beetles

A: 三指型; B: 三叶型。a: 棒 2 节长度;
b: 棒 2 节宽度; c: 触角棒总长。

A: Three-finger shape; B: Trilobal shape. a: Length of 2nd segment of club; b: Width of 2nd segment of club; c: Total length of the club.

2.4 鞘翅斜面上双棘形态

双棘长蠹属昆虫鞘翅近端部会突然向下倾斜,形成一个斜的平面或半球面,称之为鞘翅斜面。通过对双棘的观察,发现双棘形态和位置变化最多,比其他特征更能体现种间的差异。12 种长蠹的双棘形态如图 3。

双棘长蠹属昆虫鞘翅斜面上的双棘变化丰富,按照形态大致可分类 3 类:第一类为片状,棘侧面

观呈三角形,即棘体附着于斜面的一边等于或长于棘体下缘。背面观双棘侧扁,包括粗双棘长蠹(图 3a)、苏丹双棘长蠹(图 3b),红角双棘长蠹(图 3c)和椴子双棘长蠹(图 3l)。但四者又有区别,其中粗双棘长蠹双棘十分接近,其他 3 种则较远离。红角双棘长蠹棘端直,而苏丹双棘长蠹则稍向下弯。椴子双棘长蠹附着部与底部边近相等;第二类为扁锥状,其棘体整体呈锥状,背面观则稍侧扁,包括小横双棘长蠹(图 3d)、三胝双棘长蠹(图 3e)、折缘双棘长蠹(图 3f)、角豆双棘长蠹(图 3g)和萨西双棘长蠹(图 3k)。其中小横双棘长蠹双棘背面观呈“八”字状向外倾斜,其余 3 种双棘近平行。三胝双棘长蠹和折缘双棘长蠹十分相似,棘体粗壮且侧面观端部稍向下弯。角豆双棘长蠹双棘纤细且侧面观端部较直。萨西双棘长蠹与角豆双棘长蠹较为类似,但其棘体更粗壮;第三类为锥状,棘体由基部到端部渐变细,背面观棘体不侧扁,包括黑双棘长蠹(图 3h)、双棘长蠹(图 3i)和阔齿双棘长蠹(图 3j)。黑双棘长蠹棘体基部具粗糙颗粒,相似双棘长蠹棘体光滑,阔齿双棘长蠹棘体十分粗短,背面观棘轴显著向两侧倾斜呈“八”字形。

2.5 斜面上刚毛形态

双棘长蠹类昆虫斜面上刚毛形态也是种的重要鉴定特征之一。12 种双棘长蠹斜面上刚毛特征可分为三大类:第一类刚毛较长,以弧形倒伏于体壁,一般与体壁有 2 个接触点;第二类刚毛较短,直立于体壁之上;第三类斜面光滑,几无刚毛可见。

12 种双棘长蠹中,斜面刚毛直立的有角豆双棘长蠹、阔齿双棘长蠹、三胝双棘长蠹、萨西双棘长蠹和折缘双棘长蠹;斜面刚毛倒伏的有相似双棘长蠹、黑双棘长蠹、红角双棘长蠹、苏丹双棘长蠹、粗双棘长蠹和椴子双棘长蠹;小横双棘长蠹斜面上十分光滑,几乎看不到刚毛。

2.6 其他一些重要的形态特征

12 种双棘长蠹中,部分种类具有一些其他种类所不具有的特征,依据这些特征容易将这些种类与其他近似种类区分开来。相似双棘长蠹:鞘翅斜面呈横截状,即斜面与鞘翅前部有明显的分界线。鞘翅斜面双棘以下的缝脊两侧呈明显的锯齿状,其齿高达到缝脊宽度的一半左右(图 4A);折缘双棘长蠹:鞘翅在斜面底部的边缘显著加宽并向上翻卷,背面观可以看到边缘前有一明显的沟(图 4B);小

横双棘长蠹:鞘翅斜面靠近底部时,斜面两侧形成一条明显的隆起横脊,向内延伸达鞘翅的 2/3 宽。背面观时这条隆脊常会遮挡住下部的鞘翅边缘(图 4C)。

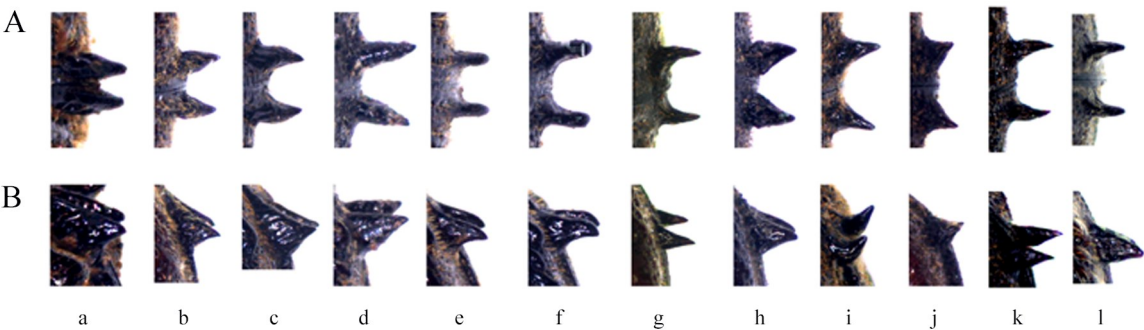


图 3 12 种双棘长蠹的双棘形状

Fig.3 The shape of dual teeth on the elytron declivity of 12 species of *Sinoxylon*

A: 背面观;B: 侧面观。a~l 分别为粗双棘长蠹、苏丹双棘长蠹、红角双棘长蠹、小横双棘长蠹、三脉双棘长蠹、折缘双棘长蠹、角豆双棘长蠹、黑双棘长蠹、双棘长蠹、阔齿双棘长蠹、萨西双棘长蠹、橡子双棘长蠹。
A: Dorsal view; B: Lateral view. a~l: *S. crussum*, *S. sudanicum*, *S. ruficorne*, *S. transvaalense*, *S. senegalense*, *S. epipleurale*, *S. ceratoniae*, *S. unidentatum*, *S. anale*, *S. divaricatum*, *S. succisum*, *S. tignarium*.

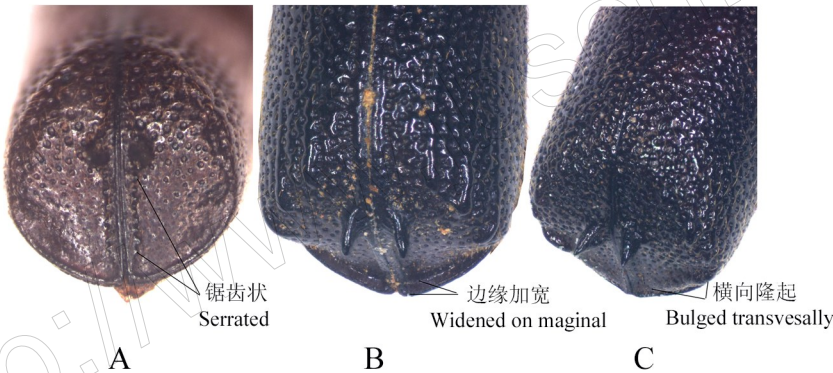


图 4 3 种双棘长蠹鞘翅斜面上的特征

Fig.4 The feature of elytron declivity of three species of *Sinoxylon*

A: 相似双棘长蠹;B: 折缘双棘长蠹;C: 小横双棘长蠹。
A: *S. anale*; B: *S. epipleurale*; C: *S. transvaalense*.

2.7 双棘长蠹属 3 种常见种类的形态简述

在多年的出入境检疫鉴定之中,有 3 种双棘长蠹截获频次最高,即相似双棘长蠹、黑双棘长蠹和红角双棘长蠹,截获种次占到所有双棘长蠹的 80% 以上。这 3 种双棘长蠹在形态上又各具有代表性:相似双棘长蠹鞘翅斜面为横截状,黑双棘长蠹触角为三指型,红角双棘长蠹触角为三叶型。因此,特别挑选这 3 种最为常见的双棘长蠹属昆虫简要描述,可为鉴定其他双棘长蠹种类提供参考。

相似双棘长蠹:体长(4.81±0.40) mm,宽(2.15±0.20) mm;前胸背板和鞘翅基部为黑色,鞘翅中后部为锈红色,触角三指型;双棘细锥状,多数从中部向上弯曲,少数双棘中轴端直;斜面缝脊两侧的锯齿十分明显,齿高达到缝脊单侧宽度的 1/3~1/2。

黑双棘长蠹:体长(4.88±0.36) mm,宽(2.21±0.18) mm;与双棘长蠹相比,黑双棘长蠹的体色更黑;触角三指型;双棘呈圆锥状,基部 1/3 表面生有多个小瘤突,呈肿胀状,上部光滑;双棘中轴线向外倾斜,呈“八”字状,端部直,不向任何方向弯曲;缝脊相当平滑,仅有个别个体上有微弱的锯齿状;斜面刚毛或密或疏,弧状倒伏于体壁上。

红角双棘长蠹:体长(6.25±0.48) mm,宽(2.73±0.21) mm;黑色或深红色;触角三叶型,表面有较明显的倒伏细毛,暗红色;双棘侧面观近似于直角三角形:棘顶到斜面下方为短直角边,而棘顶上方与缝脊间则以一引桥连接,形成斜边,斜边长度约为短直角边的 2 倍;双棘内侧光滑,有较浅的内凹,外侧稍隆突,上面常有纵沟纹;斜面侧瘤 3 个,大小

近似;斜面上毛或密或稀。在个别个体中,发现鞘翅缝角腹面有一钩状结构,Lesne (1906)的相关描述中也记述了这种形态变化。

2.8 双棘长蠹属 12 种分种检索表

根据以上研究结果,给出 12 种双棘长蠹属昆虫的简明特征检索表。

表 1 12 种双棘长蠹属昆虫的简明特征检索表
Table1 Key to 12 species of *Sinoxylon*

1 鞘翅斜面截断状;触角三指型;斜面上缝脊两侧明显锯齿状	相似双棘长蠹 <i>S. anale</i>
1 鞘翅斜面非截断状	2
2 触角三指型	3
触角三叶型	7
3 斜面上部刚毛短而直立,体型小	4
斜面上部刚毛长而倒伏	5
4 双棘侧扁,棘轴平行	角豆双棘长蠹 <i>S. ceratoniae</i>
双棘短锥状,棘轴强烈外斜,呈“八”字形	阔齿双棘长蠹 <i>S. divaricatum</i>
5 双棘锥状,棘基部生满粗糙颗粒;背面观双棘中轴呈“八”字形	黑双棘长蠹 <i>S. unidentatum</i>
双棘侧扁,棘基部无粗糙颗粒	6
6 双棘侧面观呈长三角形;双棘顶之间距小于棘高	苏丹双棘长蠹 <i>S. sudanicum</i>
双棘侧面观呈锐刺状;双棘顶之间距大于棘高	萨西双棘长蠹 <i>S. succisum</i>
7 双棘着生于斜面缝脊之上,基部几乎相接触	粗双棘长蠹 <i>S. crassum</i>
双棘不着生于斜面缝脊之上,基部明显分开	8
8 斜面上部十分光滑,几无刚毛;斜面下部有一横肋,几达缝脊	小横双棘长蠹 <i>S. transvaalense</i>
斜面上部明显有刚毛	9
9 斜面上部刚毛倒伏	10
斜面上部刚毛直立	11
10 体长一般大于 5.5 mm,双棘内侧向外倾斜;分布于非洲	红角双棘长蠹 <i>S. ruficorne</i>
体长一般小于 5.0 mm,双棘内侧近平行;分布于亚洲南部	椴子双棘长蠹 <i>S. tignarium</i>
11 斜面底部边缘明显加宽并内折,在斜面端部形成一沟槽	折缘双棘长蠹 <i>S. epipleurale</i>
斜面底部边缘不加宽,缘边只略突出于斜面	三胫双棘长蠹 <i>S. senegalense</i>

3 讨论与结论

3.1 双棘长蠹属昆虫的触角特征

在对未知双棘长蠹属昆虫进行鉴定时,常常会用到世界双棘长蠹属种类最早的检索表译文(陈志舜,2011;朱宏斌和李艳华,2006)。在这个检索表中,其第 2 条、第 5 条、第 11 条、第 16 条、第 20 条和第 24 条中都有“棒 2 节宽长比最大”和对应的“棒 2 节宽长比不为最大”的描述,但是在检疫鉴定过程中,却发现所有的样品都表现为“棒 2 节宽长比最大”。经过对相关标本仔细观察和测量,无论是检索表条目“棒 2 节宽长比最大”后所指向的粗双棘长蠹、苏丹双棘长蠹和黑双棘长蠹,还是“棒 2 节宽长比不为最大”对应的小横双棘长蠹、椴子双棘长蠹、红角双棘长蠹和日本双棘长蠹,其触角棒第 2 节的宽长比在 3 个棒节中都为最大,并无“不为最大”的特征。后来的一些文献中双棘长蠹检索表也有类似描述(陈乃中,2009;陈志舜,2011)。为进一步核实该特征的原始记录,笔者查询了该检索表的原始文献,发现原文为“le second article dépassant

en largeur la longueur totale de la massue”,实际含义为“棒 2 节宽度超过棒节总长”,而对应条文则为“棒 2 节宽度不超过棒节总长”。按照此新的含义,再对照以上常见的双棘长蠹如粗双棘长蠹、椴子双棘长蠹、苏丹双棘长蠹、黑双长蠹长蠹和红角双棘长蠹的特征,则检索表描述特征与相关种类的完全一致。随后,经对 12 种双棘长蠹触角形态做进一步研究,发现其不仅仅表现为“棒 2 节宽度是否超过棒节总长”一个特征上,而是呈现为形态上的多个特征的综合,故此将其分为“三指型”和“三叶型”2 个类型,这样更准确体现了 2 类触角形态结构的区别。

3.2 双棘长蠹属分类的其他问题

目前,全世界已记录双棘长蠹约 50 种,已知分布于非洲的双棘长蠹有 18 种(陈乃中,2009)。据已有资料(Lesne,1906),双棘长蠹属昆虫外形十分相似,一些近似种之间往往只有一些细微差别。而以往的双棘长蠹种类描述资料中(陈乃中,2009;陈志舜,2011),多数仅给出一些百年前的简易手绘

特征图,加上翻译的描述;另有相当多的种类并没有提供图像,仅有引用的文字描述。这些资料中有些在翻译过程中对部分概念理解有误,有些描述晦涩难懂,较难理解相关特征描述的准确含义。

Lesne (1906) 对双棘长蠹属昆虫检索表第 17 项中所列举的 5 个种 (*S. ceratoniae*、*S. doliolum*、*S. succisum*、*S. rufobasale* 和 *S. divaricatum*) 进行了特别说明,认为这个小群中的种类之间极其相似,仅能靠一些微小的差异进行区分,故而认为这些种类目前还处于不完全明确状态。本文涉及到其中的 2 个种,即角豆双棘长蠹 *S. ceratoniae* 和阔齿双棘长蠹 *S. divaricatum*。从形态学来看,这 2 个种之间的确仅有双棘形态上的明显差别,其他方面极其相似。因此,对这 5 个种的相关分类情况仍有待进一步研究。

参考文献

- 陈乃中, 2009. 中国进境植物检疫性有害生物——昆虫卷. 北京: 中国农业出版社.
- 陈寿玲, 李今中, 1992. 双棘长蠹属昆虫. 植物检疫, 6(2): 128-129.
- 陈志舜, 1992. 从东南亚进口木材中截获的长蠹害虫. 植物检疫, 16(6): 451-454.
- 陈志舜, 1993. 拟双棘长蠹的发现及各虫期的观察. 植物检疫, 7(2): 85-87.
- 陈志舜, 1994. 植物检疫中常见的长蠹科害虫. 植物检疫, 8(4): 209-215.
- 陈志舜, 1995. 双棘长蠹属——中国新记录种. 昆虫学报, 38(1): 82.
- 陈志舜, 2000. 检疫截获的长蠹科害虫. 植物检疫, 14(3): 153-157.
- 陈志舜, 2001. 进口非洲木材截获的长蠹科害虫. 植物检疫, 15(6): 355-357.
- 陈志舜, 2003. 在进口非洲木材截获的长蠹科害虫的分类. 昆虫知识, 40(2): 154-159.
- 陈志舜, 2011. 长蠹科害虫检疫鉴定. 北京: 中国农业出版社.
- 李今中, 陈寿玲, 1989. 福州所在进口木质包装箱中发现芒果双棘长蠹. 植物检疫, 3(3): 196.
- 李天宝, 黄萍, 张录璐, 孙小冰, 2021. 我国首次截获有害生物小楔双棘长蠹. 生物安全学报, 30(3): 195-199.
- 陆军, 周培, 刘领军, 2008. 张家港口岸从进境原木中截获圆双棘长蠹. 植物检疫, 22(3): 147.
- 王建华, 李敏, 刘强, 2013. 日本双棘长蠹对不同危害程度的国槐和刺槐的趋性分析. 山西师范大学学报(自然科学版), 27(1): 67-70.
- 吴剑光, 刘晓莹, 陈捷先, 2008. 广东省汕头口岸进境截获的几种双棘长蠹. 广西植保, 21(1): 40-42.
- 吴万超, 郭松波, 2008. 双棘长蠹的生物学特性及防治技术. 河南林业科技, 28(2): 25.
- 许永娟, 许晓娟, 2019. 日本双棘长蠹危害及综合防治. 陕西林业科技, 47(5): 118-120.
- 张辉元, 顾军, 王玉安, 张坤, 2012. 葡萄双棘长蠹生物学特性及防治. 北方园艺(10): 161-162.
- 赵杰, 2005. 一种值得注意的害虫——日本双棘长蠹. 植物检疫, 19(4): 222-224.
- 朱宏斌, 李艳华, 2006. 双棘长蠹属的鉴定. 华东昆虫学报, 15(2): 83-88.
- HUA L Z, 2002. *List of Chinese insects: vol. II*. Guangzhou: Zhong Shan University Press.
- LESNE P, 1906. Révision des Coléoptères de la famille des Bostrychides. 5e Mémoire. *Annales De La Societe entomologique De France*, 75: 445-561.

(责任编辑:郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.03.006

Bdfor 对橘小实蝇联系性颜色学习的影响

杨浩存, 魏冰冰, 张桂健, 邱辰旭, 郭彤, 牛长缨*

华中农业大学植物科学技术学院, 湖北 武汉 430070

摘要:【目的】从橘小实蝇中鉴定 *Bdfor* 基因, 研究其对橘小实蝇联系性颜色学习的影响, 解析昆虫联系性颜色学习的内在机制。【方法】根据黑腹果蝇 *Dmfor* 基因, 结合橘小实蝇基因组和 NCBI 数据库, 筛选出橘小实蝇 *Bdfor* 基因序列, 并进行生物信息学分析和克隆测序验证; 同时, 对橘小实蝇进行联系性颜色学习试验, 利用 RNAi 技术靶向沉默 *Bdfor* 基因后, 观察其对橘小实蝇联系性颜色学习的影响。【结果】成功筛选出橘小实蝇 *Bdfor*, 其编码的 for 蛋白与 3 种实蝇科昆虫辣椒实蝇、橄榄实蝇、地中海实蝇的 for 蛋白聚为一族, 含有 1 个 STKs 结构域和 2 个 CAP-ED 结构域。此外, 橘小实蝇具备一定的联系性学习能力, 当以绿色或蓝色为条件刺激和蔗糖配对, 进行奖励学习时, 橘小实蝇可将绿色或蓝色和蔗糖相联系, 进行颜色学习, 改变自身趋性。当以黄色为条件刺激和奎宁配对, 进行惩罚学习时, 橘小实蝇也可将黄色和奎宁相联系, 同样进行颜色学习并改变趋性。然而, 在靶向沉默 *Bdfor* 后, 这种学习能力便消失或减弱。【结论】*Bdfor* 影响橘小实蝇联系性颜色学习行为, 这一结果为进一步开发害虫防治新技术提供了依据。

关键词: 橘小实蝇; *Bdfor* 基因; 联系性颜色学习; RNA 干扰



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of *Bdfor* on associative color learning of *Bactrocera dorsalis*

YANG Haocun, WEI Bingbing, ZHANG Guijian, QIU Chenxu, GUO Tong, NIU Changying*

College of Plant Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract: 【Aim】 In this study, the *Bdfor* was identified to further explore the effects on associative color learning of *Bactrocera dorsalis*. 【Method】 Based on *Drosophila melanogaster* gene *Dmfor*, the *Bdfor* was screened out from *B. dorsalis* genomics and transcriptomics database in NCBI and then performed bioinformatics analysis. Meantime, the behavioral bioassay on associative color learning of *B. dorsalis* adults as well as RNAi silence experiments were carried out. 【Result】 The *B. dorsalis* *Bdfor*, which contains a STKs protein domain and two CAP-ED protein domains, was screened out successfully and the amino acid sequence of this gene was similar with that of *B. latifrons*, *B. oleae*, and *Ceratitis capitata*. In addition, the results showed that *B. dorsalis* has the ability of associative color learning. After pairing green or blue with sucrose, and yellow with water in petri dishes for reward learning, the tendency of *B. dorsalis* to green or blue was significantly increased. Meanwhile, pairing yellow with quinine and green or blue with water in petri dishes for punitive learning, the yellow preference of *B. dorsalis* decreased significantly. However, this ability of associative color learning in *B. dorsalis* was significantly reduced or disappeared by RNAi experiments. 【Conclusion】 Silencing *Bdfor* impaired the color learning in the flies which offers evidence for developing new management against insect pests.

Key words: *Bactrocera dorsalis*; *Bdfor* gene; associative color learning; RNAi

昆虫在应对复杂多变的环境条件时, 可根据之前的取食和寄生经历改变之后的行为, 即表现出学习行为(Nielsen *et al.*, 2018)。昆虫的学习行为主要包括习惯性反应、厌恶性学习、敏感性反应、嗜好性诱导和联系性学习 5 种(Papaj & Prokopy, 1989)。其中, 联系性学习行为是昆虫最高等、最复杂的行为, 即通过同时持续给予昆虫一种条件刺激(conditioned stimulus)和一种非条件刺激(unconditioned stimulus)后, 在只感受到条件刺激后不需要非条件刺激就可以引发非条件反射的行为(Pearce

收稿日期(Received): 2023-12-03 接受日期(Accepted): 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(32272529、31661143045、31972270); 云南省果蔬花入侵害虫防控国际联合实验室专项(202303AP140018)

作者简介: 杨浩存, 男, 硕士研究生。研究方向: 昆虫生理生化及分子生物学。E-mail: yhcb707@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 牛长缨, E-mail: niuchangying@mail.hzau.edu.cn

& Bouton, 2001; Wasserman & Miller, 1997)。

Foraging (简称 *for*) 基因最早在黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* (Meigen) 中被发现 (Belle *et al.*, 1989), 具有功能多效性, 包括调控觅食行为、社会行为、睡眠、营养吸收及学习和记忆等 (Anreiter & Sokolowski, 2019)。其中, *for* 通过编码昆虫大脑神经通路 NO-cGMP-PKG 信号级联中的 cGMP 依赖性蛋白激酶 (PKG), 调控昆虫的学习行为 (Mery *et al.*, 2007)。如黑腹果蝇成虫将电击刺激与气味相耦合后, 可将辛醇和甲基环己醇与电击相联系, 进而在 T 型迷宫中选择正确的方向以避免电击, 而果蝇成虫中嗅觉学习能力较差的个体可通过过表达 *for* 提高学习能力 (Mery *et al.*, 2007)。

橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel), 又名东方果实蝇, 属双翅目 Diptera 实蝇科 Tephritidae 果实蝇属 *Bactrocera*, 是一种多食性害虫, 危害 250 余种果蔬 (Jayanthi & Verghese, 2011)。其在寄主果实内产卵, 幼虫孵化后于果实内取食为害 (刘奎等, 2016)。橘小实蝇分布范围广泛, 起源于南亚, 已入侵扩散到非洲、欧洲和太平洋等地区, 据报道, 目前橘小实蝇已入侵我国 22 个省 (王雁楠等, 2020)。其世代周期短、寄主范围广、扩散能力强、防治困难, 给全球果蔬市场造成了严重损失 (Clarke *et al.*, 2005)。Wang *et al.* (2022) 在研究实蝇类昆虫颜色偏好中发现, 在非偏好颜色区域中加入最适寄主植物的气味能影响偏好颜色对橘小实蝇的吸引。但目前对橘小实蝇颜色学习调控机制的研究甚少, 本研究通过筛选橘小实蝇 *Bdfor* 基因序列, 对其进行生物信息学分析; 同时通过橘小实蝇行为学试验, 探究橘小实蝇的联系性颜色学习行为及 *Bdfor* 基因在其中的作用, 以期丰富昆虫联系性颜色学习的内在机制, 为探索橘小实蝇新的防治方法提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

橘小实蝇由华中农业大学植物科技学院昆虫生理生化实验室提供, 为已连续稳定饲养 50 代左右的室内种群。成虫饲养于纱制昆虫笼 (30 cm × 30 cm × 40 cm) 中, 使用人工饲料喂养 (酵母粉: 胰蛋白胨: 蔗糖质量比为 1.0 : 1.5 : 6.0), 饲养温度 25~27 °C, 相对湿度 60%~80%, 光周期 12L : 12D。

1.2 橘小实蝇 *Bdfor* 的筛选与生物信息学分析

利用实验室已建立的橘小实蝇基因组数据库,

结合 NCBI 数据库, 比对模式昆虫黑腹果蝇的 *for* 基因 *Dmfor*, 筛选相似度最高的 mRNA 序列, 记为 “*Bdfor*”。同时, 利用 NCBI 数据库, 根据氨基酸序列相似度筛选出适宜物种的 *Dmfor* 基因的同源序列, 分析它们与 *Bdfor* 基因表达蛋白之间的亲缘关系。采用 MEGA 7.0 软件进行建树分析, 首先使用 ClustalW 法对原始蛋白序列进行比对分析, 删除含空位较多的序列, 然后使用邻域连接法构建系统发育树, Bootstrap 取样值为 1000。并将相对亲缘关系近的物种以及 *Dmfor* 蛋白序列和 *Bdfor* 蛋白序列进行多重比对分析。

1.3 橘小实蝇 *Bdfor* 的克隆与 dsRNA 的合成

分别对橘小实蝇雌雄成虫进行总 RNA 提取, 具体操作见 TaKaRa 公司的总 RNA 提取说明书, 核酸蛋白分析仪 NanoDrop 2000 测定其浓度和质量。依照反转录试剂盒 (ReverAid First Stand cDNA Synthesis Kit, Thermo) 说明书进行反转录合成 cDNA。

通过 Primer 5 软件设计引物, 以 cDNA 为模板, 进行 PCR 扩增, 反应程序为 98 °C 5 min, 98 °C 10 s, 55 °C 30 s, 72 °C 40 s, 30 个循环, 72 °C 10 min。扩增产物用 TaKaRa 公司的 pMD 18-Tvector 进行连接-转化试验。对菌液进行测序 (北京擎科生物科技公司), 并返还质粒, 使用 BioEdit 软件将测序结果和预选目的基因 *Bdfor* 进行比对, 若无差异或个别碱基有差异则进行下一步试验。

以测序正确的菌液作为 DNA 模板进行 PCR 扩增, 合成 T7-DNA, 使用 T7 Polymerase (Thermo Scientific) RNA 聚合酶合成 dsRNA 并纯化, 然后用核酸蛋白分析仪 NanoDrop 2000 测定其浓度, 最终定容至 1000 ng · μL⁻¹。

1.4 橘小实蝇联系性颜色学习

黄色是橘小实蝇趋向性最强的颜色, 而绿色和蓝色趋向性较次 (Li *et al.*, 2017)。参照 Wu *et al.* (2007), 使用直径 15 cm、高 2 cm, 并打有小孔的圆形培养皿为试验装置, 在培养皿底部分别贴上黄色与绿色、黄色与蓝色的纸 (图 1), 彩纸使用 Adolbe 红-绿-蓝 (red-green-blue, RGB) 色彩模式数值和青-洋红-黄-黑 (cyan-magenta-yellow-black, CMYK) 印刷色彩模式数值 (表 1)。在橘小实蝇羽化 4 d 取食量最大的时候进行试验。先进行奖励性颜色训练, 分别取 15 头橘小实蝇雌性和雄性成虫放入 50 mL 离心管中, 并在盖子上打 1 小孔, 用橡胶管连接装有

CO₂的气体钢瓶。气体钢瓶释放少量 CO₂进入离心管中,并将橘小实蝇成虫眩晕 5 s 后放入圆形培养皿中,15 min 后观察其停在不同颜色区域内的比例并统计结果,记为“训练前”。

试验组分别以绿色和蓝色为条件刺激,以蔗糖奖励为非条件刺激,黄色为对照颜色。分别吸取 100 μL 的 1 mol · L⁻¹的蔗糖溶液滴在试验装置蓝色/绿色的部分并用细毛刷涂匀,在黄色部分滴入 100 μL 无菌水并涂匀;对照组在绿色/蓝色部分以及黄色部分分别滴入 100 μL 无菌水并涂匀。将橘小实蝇聚集在培养皿中绿色/蓝色部分,取食蔗糖,训练 5 min 后用 CO₂将其眩晕,并重复奖励试验,连续进行 5 次训练。最后将橘小实蝇眩晕并转移到一个不添加水和蔗糖的试验装置正中央,15 min 后

统计橘小实蝇位于不同颜色区域内的数量,记为“训练后”。2 种条件刺激各重复 10 次。

奎宁 (CAS 登录号:130-95-0) 为苦味物质。以 2.16×10⁻² mol · L⁻¹奎宁溶液为非条件刺激验证橘小实蝇惩罚学习,具体试验步骤同上述奖励试验,将其中试验组的非条件刺激更改为奎宁溶液,非黄色部分喷水,对照组处理与奖励试验对照组相同 (Zrelec *et al.*,2013)。

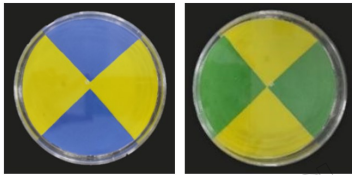


图1 试验所用装置
Fig.1 Experimental setup

表1 试验装置所用颜色参数
Table 1 Color parameters for experimental apparatus

颜色 Colour	虚拟波长 Virtual wavelength/nm	红-绿-蓝色彩模式数值 RGB color model figure	青-洋红-黄-黑印刷色彩模式数值 CMYK color model figure
黄色 Yellow	580	255, 255, 0	10, 0, 83, 0
绿色 Green	520	54, 255, 0	59, 0, 100, 0
蓝色 Blue	440	0, 0, 255	92, 75, 0, 0

1.5 RNA 干扰 *for* 对橘小实蝇联系性颜色学习的影响

取橘小实蝇雌雄成虫分别用显微注射仪 (WPI USA, Nanoliter2010) 注射 dsRNA (单头注射量 1 μL) 于成虫前翅基部,以注射 1 μL dsGFP 为对照组。2 d 后在试验组和对照组中各取 10 头,提取头部 RNA 进行 RT-qPCR 检验沉默效率,每个处理 3 个重复,反应程序为 95 ℃ 30 s,95 ℃ 5 s,55 ℃ 30 s,72 ℃ 31 s,40 个循环。以 α -tub (登录号:CP115864.1) 作为内参基因,利用文献所列引物序列进行引物合成 (表 2) (Shen *et al.*,2010)。

在橘小实蝇 *Bdfor* 被沉默后第 2 天,再次进行与沉默前相同的奖励学习和惩罚学习试验。试验

组使用靶向沉默 *Bdfor* 的橘小实蝇雌雄虫进行试验。对照组试验装置处理同试验组一致,使用注射 dsGFP 的橘小实蝇雌雄虫进行试验。分别统计各组橘小实蝇停在不同颜色区域内的比例。

1.6 数据处理与分析

RT-qPCR 试验采用 CT 值相对定量法,使用 2^{- $\Delta\Delta C_t$} 法进行数据处理得出 dsRNA 沉默效率。使用 IBM SPSS 20.0 软件进行显著性分析,试验数据使用独立样本 *t* 检验。使用 Tukey HSD 法进行多重比较。使用 GraphPad Prism 8 软件绘图,显示数据为平均值±标准误,显著水平 *P*<0.05。

表2 试验所用引物及其序列
Table 2 Sequence of primers in this experiment

引物用途 Primer application	引物名称 Primer name	引物序列 (5'–3') Sequence of primers (5'–3')
基因克隆 Gene cloning	Bdfor-F	GTGTAGCAACCGCAGATTC
	Bdfor-R	TTGTTCAACCACTCCCAGAT
实时荧光定量 PCR Quantitative real-time PCR	q-Bdfor-F	CACCAACTTCGATGCCTAT
	q-Bdfor-R	ACTCCCACTTGTAGAACTCC
	q- α -tub-F	CGCATTTCATGGTTGATAACG
	q- α tub-R	GGGCACCAAGTTAGTCTGGA
dsRNA 合成 dsRNA synthesis	T7-GFP-F	TAATACGACTCACTATAGGGAGACAGTTCTTGTGTAATTAGATG
	T7-GFP-R	TAATACGACTCACTATAGGGAGATTTGGTTTGTCTCCCATGATG
	T7-Bdfor-F	TAATACGACTCACTATAGGGAGAGTGTAGCAACCGCAGATTC
	T7-Bdfor-R	TAATACGACTCACTATAGGGAGATTGTTCAACCACTCCCAGAT

2 结果与分析

2.1 Bdfor 筛选与同源性比对

利用生物信息学分析,PCR 克隆和测序验证,成功筛选出橘小实蝇 *Bdfor*, 通过对该基因和其他 13 个物种 *for* 表达的氨基酸序列进行建树分析(图 2),橘小实蝇 *Bdfor* 蛋白与其他 3 种实蝇科昆虫[辣椒实蝇 *B. latifrons* (Hendel)、橄榄实蝇 *B. oleae* (Gmelin)、地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Wiedemann)]的 *for* 蛋白聚类在一起,说明四者的亲缘关系更为接近,且与双翅目 6 个物种共同聚集在较大的分支上,而与其他物种亲缘关系较远。

2.2 橘小实蝇 Bdfor 蛋白保守性分析和功能预测

使用 *Bdfor* 蛋白序列与辣椒实蝇、地中海实蝇及黑腹果蝇 2 种剪接体编码的 *for* 蛋白序列(PKG)进行多重比对分析(图 3),橘小实蝇和辣椒实蝇、地中海实蝇以及黑腹果蝇的 *for* 蛋白高度保守,同源性分别为 96%,93% 和 87%,均含有 1 个 serine/threonine kinases (SKTs) 结构域和 2 个 effector domain of the catabolite activator protein (CAP-ED) 结构域。这 2 个结构域承担的作用是联系性学习的必要条件。以上结果表明,筛选出的橘小实蝇 *Bdfor* 是黑腹果蝇 *Dmfor* 的同源基因。

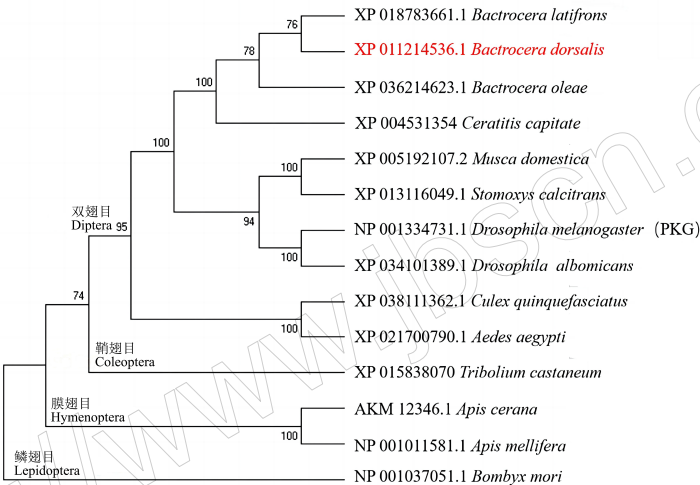


图 2 14 种昆虫的 *for* 蛋白进化关系

Fig.2 Evolutionary relationships of *for* protein in 14 insects

数字代表 bootstrap 1000 个循环的置信度(只显示 70% 及以上)。

The numbers represent the percentage of 1000 bootstrap replications (above 70% showed).

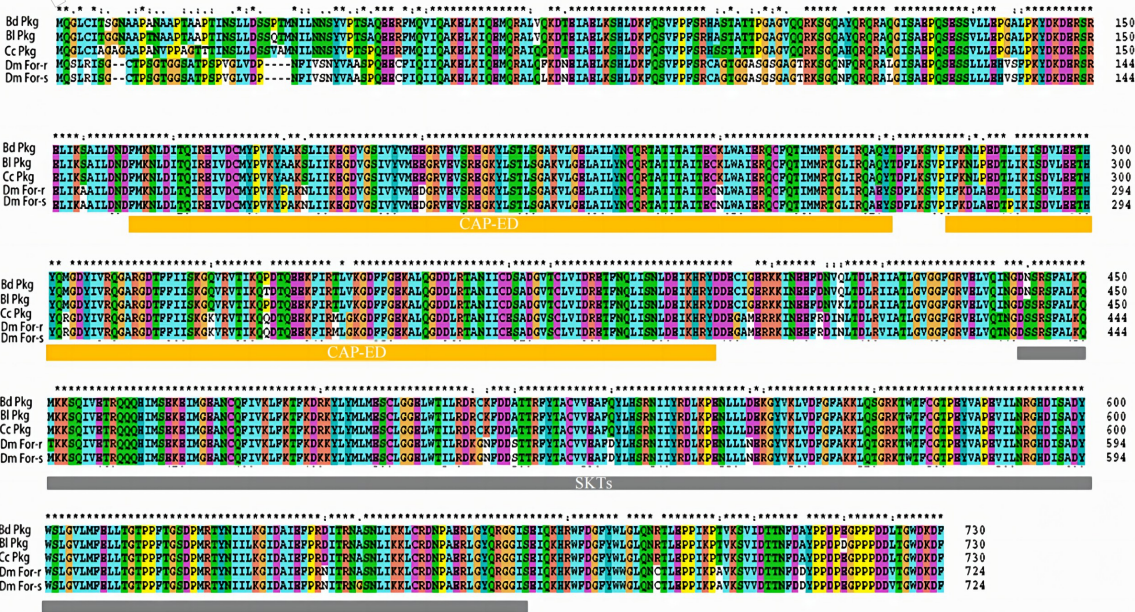


图 3 Bdfor 蛋白序列的多重比对

Fig.3 Multiple alignment of *Bdfor* protein sequences

2.3 橘小实蝇联系性颜色学习

以绿色为条件刺激,进行奖励性颜色学习的结果见图 4A。水训练组,无显著性差异;蔗糖组训练前,橘小实蝇对绿色的选择率为 34.00%,颜色学习训练后对绿色的趋性显著上升,达到 58.00%。

以橘小实蝇趋性较差的颜色(蓝色)为条件刺激,进行奖励性颜色学习的结果见图 4B。蔗糖训练组,橘小实蝇在训练后对蓝色表现出较高的趋性,达

到 53.00%,显著高于训练前的 37.00% ($P<0.05$);水训练组在训练前后对蓝色的选择率均无显著差异(训练前37.00%,训练后33.90%, $P>0.05$)。

以黄色为条件刺激,奎宁为非条件刺激,二者配对后进行惩罚性颜色学习试验,试验结果见图 4C。对照组训练前后无显著差异,5 次训练后试验组橘小实蝇对黄色的选择率为60.70%,显著低于训练前的 69.86% ($P<0.05$)。

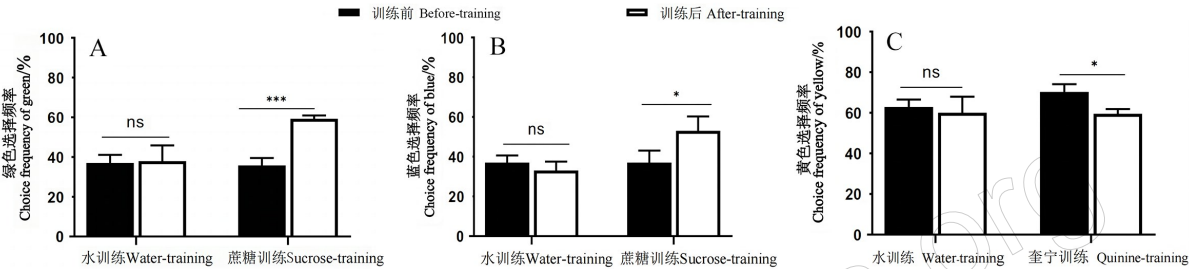


图 4 奖励学习中橘小实蝇对绿色 (A) 和蓝色 (B) 选择率以及惩罚学习中橘小实蝇对黄色 (C) 的选择率

Fig.4 Choice frequency of green (A) and blue (B) in *B. dorsalis* during reward learning, as well as Choice frequency of yellow (C) in *B. dorsalis* during punitive learning

ns: 无显著性差异; * : $P<0.05$; *** : $P<0.001$ 。

ns: No significant difference; * : $P<0.05$; *** : $P<0.001$ 。

2.4 *Bdfor* 对橘小实蝇联系性颜色行为影响

dsfor 注射 2 d 后利用 RT-qPCR 检测靶标基因 *Bdfor* 的相对表达量,结果表明,相比于注射 *dsGFP* 的对照组,注射 *dsfor* 的橘小实蝇雌雄虫 *Bdfor* 显著下调(图 5)。

注射 *dsRNA* 沉默 *Bdfor* 后,对橘小实蝇进行奖励性颜色学习试验,结果表明,对照组中,橘小实蝇在训练后对绿色的趋性显著上升,试验组中,橘小实蝇在训练前后对绿色的选择率无显著差异(图 6A)。在以蓝色为条件刺激的颜色学习试验中,与对照组相比,沉默 *Bdfor* 后橘小实蝇在训练前后对蓝色的选择率无显著差异(图 6B)。

沉默 *Bdfor* 后,对橘小实蝇进行惩罚性颜色学习试验,结果表明,在注射 *dsGFP* 的对照组中,橘小实蝇在训练后对黄色的选择率显著降低,而在沉默 *Bdfor* 的试验组训练前后,对黄色的选择率无显著差异(图 6C)。

3 讨论

针对昆虫颜色学习的研究多集中在蜜蜂、蝴蝶等传粉昆虫,目前,有关农林害虫是否具备联系性颜色学习行为尚不清楚 (Anreiter & Sokolowski, 2019)。昆虫的 NO-cGMP-PKG 信号级联是构成学

习行为的生理基础 (Hasebe & Yoshino, 2016)。for 蛋白中的 CAP-ED 结构域可作为信号分子 cGMP 受体,而 STKs 结构域则参与级联中磷酸化基团的转移 (Rout *et al.*, 2018; Werel *et al.*, 2023)。本文筛选出橘小实蝇的 *Bdfor* 基因,发现其编码蛋白含有 1 个 STKs 结构域和 2 个 CAP-ED 结构域,与前人的研究一致 (Osborne *et al.*, 1997)。且该蛋白序列与辣椒实蝇、地中海实蝇及黑腹果蝇 for 蛋白序列高度保守,同源性大于 87 %,说明该基因为橘小实蝇 *Bdfor*,其编码的 PKG 蛋白可能在橘小实蝇的学习行为中发挥作用。

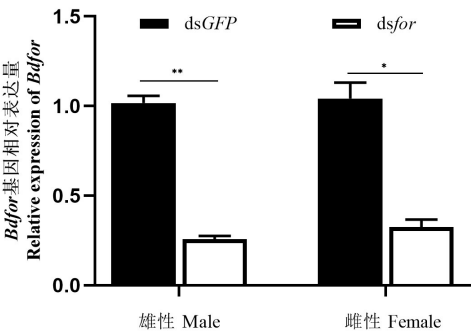


图 5 *dsRNA* 干扰后橘小实蝇 *Bdfor* 基因相对表达量

Fig.5 The relative expression of *Bdfor* after dsRNA treatment

* : $P<0.05$; ** : $P<0.01$ 。

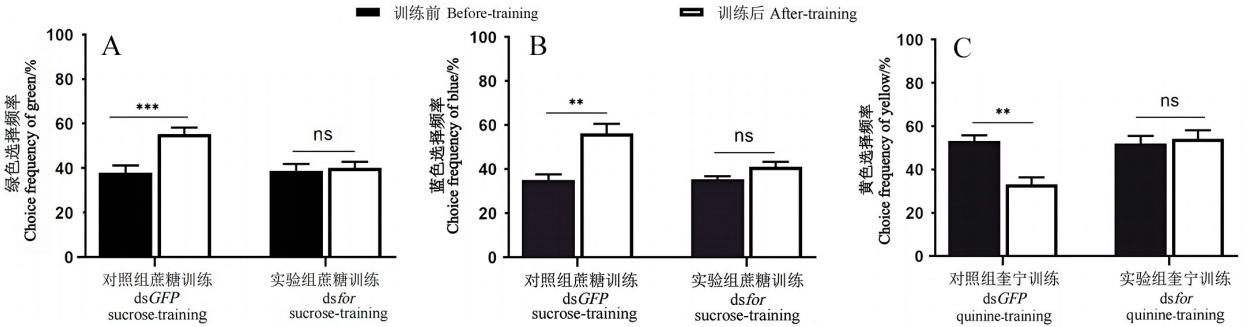


图 6 RNAi 处理后奖励学习中橘小实蝇对绿色 (A) 和蓝色 (B) 的选择率以及惩罚学习中橘小实蝇对黄色 (C) 的选择率

Fig.6 Choice frequency of green (A) and blue (B) in *B. dorsalis* during reward learning, as well as choice frequency of yellow (C) in *B. dorsalis* during punitive learning after RNAi

ns: 无显著性差异; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

ns: No significant difference; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

昆虫的视觉可以进行联系性学习, Dobrin *et al.* (2012) 通过将蓝光与蔗糖配对, 对西方蜜蜂 *Apis mellifera* (Linnaeus) 进行训练后, 可以显著增强其对颜色刺激的反应。本研究通过行为学试验表明, 橘小实蝇可以将颜色与蔗糖/奎宁进行配对, 从而改变自身趋性, 这与上述结果类似, 说明橘小实蝇具备联系性颜色学习的潜力。

此外, 昆虫的学习行为受到 *for* 基因的影响, 如调控黑腹果蝇成虫联系性嗅觉学习能力, 提高其对嗅觉线索醋酸丙酯的选择 (Kaun *et al.*, 2007)。而本文发现利用 RNAi 沉默 *Bdfor* 后, 可以使橘小实蝇联系性颜色学习能力显著减弱或消失, 表明 *Bdfor* 对橘小实蝇联系性颜色学习具有重要作用。

本研究发现, 橘小实蝇具有一定的颜色学习能力, 然而目前尚不清楚橘小实蝇能否在野外自然条件下进行联系性学习, 因此, 接下来还应探究橘小实蝇在野外自然生态栖境中的联系性学习行为。同时, 学习成效的保留时长, 即记忆时间也会影响颜色学习在害虫防治中的应用, 但目前对于橘小实蝇颜色学习的记忆保留时间并不清楚, 未来可对此进行进一步的探究。此外, 通过 RNAi 证明 *Bdfor* 可能和橘小实蝇的联系性颜色学习相关, 但 *Bdfor* 在颜色学习中的神经调控及相关通路尚不明确。对 *Bdfor* 在昆虫联系性颜色学习作用机制的探究以及如何用于害虫防治将是下一步的研究重点。

参考文献

刘奎, 唐良德, 邱海燕, 付步礼, 2016. 海南儋州地区橘小实蝇成虫数量动态. 生物安全学报, 25(1): 23-26.

王雁楠, 张玉, 赵紫华, 2020. 六种外来入侵昆虫在我国分布范围及自然越冬北界的预测. 植物保护学报, 47(5): 1155-1156.

ANREITER I, SOKOLOWSKI M B, 2019. The foraging gene and its behavioral effects: pleiotropy and plasticity. *Annual Review of Genetics*, 53(17): 373-392.

BELLE J S, HILLIKER A J, SOKOLOWSKI M B, 1989. Genetic localization of *foraging* (*for*): a major gene for larval behavior in *Drosophila melanogaster*. *Genetics*, 123(1): 157-163.

CLARKE A R, ARMSTRONG K F, CARMICHAEL A E, MILNE J R, RAGHU S, RODERICK G K, YEATES D K, 2005. Invasive phytophagous pests arising through a recent tropical evolutionary radiation: the *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies. *Annual Review of Entomology*, 50(13): 293-319.

DOBRIN S E, FAHRBACH S E, 2012. Visual associative learning in restrained honey bees with intact antennae. *PLoS ONE*, 7(6): e37666.

HASEBE M, YOSHINO M, 2016. Nitric oxide/cGMP/PKG signaling pathway activated by M1-type muscarinic acetylcholine receptor cascade inhibits Na^+ -activated K^+ currents in Kenyon cells. *Journal of Neurophysiology*, 115(6): 3174-3185.

JAYANTHI P D K, VERGHESE A, 2011. Host-plant phenology and weather based forecasting models for population prediction of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* Hendel. *Crop Protection*, 30(12): 1557-1562.

KAUN K R, HENDEL T, GERBER B, SOKOLOWSKI M B, 2007. Natural variation in *Drosophila* larval reward learning and memory due to a cGMP-dependent protein kinase. *Learning & Memory*, 14(5): 342-349.

LI L, MA H B, NIU L M, HAN D Y, ZHANG F P, CHEN J

Y, FU Y G, 2017. Evaluation of chromatic cues for trapping *Bactrocera tau*. *Pest Management Science*, 73(1): 217–222.

MERY F, BELAY A T, SO A KC, SOKOLOWSKI M B, KAWECKI T J, 2007. Natural polymorphism affecting learning and memory in *Drosophila*. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 104 (32): 13051–13055.

NIELSEN M E, LEVIN E, DAVIDOWITZ G, PAPAJ D R, 2018. Colour plasticity alters thermoregulatory behaviour in *Battus philenor* caterpillars by modifying the cue received. *Science Direct*, 140(11): 93–95.

OSBORNE K A, ROBICHON A, BURGESS E, BUTLAND S, SHAW R A, COULTHARD A, PEREIRA H S, GREENSPAN R J, SOKOLOWSKI M B, 1997. Natural behavior polymorphism due to a cGMP-dependent protein kinase of *Drosophila*. *Science*, 277: 834–836.

PAPAJ D R, PROKOTY R J, 1989. Ecological and evolutionary aspects of learning in phytophagous insects. *Annual Review of Entomology*, 34(14): 315–350.

PEARCE J M, BOUTON M E, 2001. Theories of associative learning in animals. *Annual Review of Psychology*, 52(5): 111–139.

ROUT A K, DEHURY B, MAHARANA J, NAYAK C, BAISVAR V S, BEHERA B K, DAS B K, 2018. Deep insights into the mode of ATP-binding mechanism in Zebrafish cyclin-dependent protein kinase-like 1 (zCDKL1): a molecular dynamics approach. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 81: 175–183.

SHEN G M, JIANG H B, WANG X N, WANG J J, 2010. Evaluation of endogenous references for gene expression profiling in different tissues of the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *BMC Molecular Biology*, 11(76): 1471–2199.

WANG Y, FANG G, XU P, GAO B, LIU X, QI X, ZHANG G, CAO S, LI Z, REN X, WANG H, CAO Y, PEREIRA R, HUANG Y, NIU C, ZHAN S, 2022. Behavioral and genomic divergence between a generalist and a specialist fly. *Cell Reports*, 41(7): 111654.

WASSERMAN E A, MILLER R R, 1997, What's elementary about associative learning? *Annual Review of Psychology*, 48(20): 573–607.

WEREL L, FARMANI N, KROL E, SERRANIA J, ESSEN L O, BECKER A, 2023. Structural basis of dual specificity of *Sinorhizobium meliloti* Clr, a cAMP and cGMP receptor protein. *Genetics and Molecular Biology*, 14(2): e0302822.

WU W Y, CHEN Y P, YANG E C, 2007. Chromatic cues to trap the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*. *Journal of Insect Physiology*, 53(5): 509–516.

ZRELEC V, ZINI M, GUARINO S, MERMOUD J, OPPLIGER J, VALTAT A, ZEENDER V, KAWECKI T J, 2013. *Drosophila* rely on learning while foraging under semi-natural conditions. *Ecology and Evolution*, 3(12): 4139–4148.

(责任编辑:陈晓雯)



一个纸箱一棵树
倡导绿色包装 节约生态资源

北京外来入侵植物的演变、分布特征及影响因素

胡璐祎^{1,2}, 张渊媛^{2,3*}, 原雪姣¹, 杨 峥^{2,3}, 钟震宇^{2,3}, 白加德^{2,3}, 桑卫国^{1*}

¹中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; ²北京生物多样性保护研究中心, 北京 100076;

³北京麋鹿生态实验中心, 北京 100076

摘要:【目的】北京外来入侵植物问题尤其突出,但其入侵和扩散的时空规律、影响因素尚不清楚,给制定相关管理措施带来挑战。本研究旨在厘清入侵植物在北京的动态规律及社会经济影响因素,为制定应对措施,有效防治外来入侵植物侵害提供信息和技术支撑。【方法】基于已有文献、专著和相关数据库信息,重新构建了北京外来入侵植物数据库,分析北京外来入侵植物的构成特征、入侵特点及危害,采用GIS、SPSS 相关软件分析外来入侵植物的时间演变、空间分布特点,并与社会经济变量进行相关性分析。【结果】(1)北京外来入侵植物共 101 种,菊科植物最多;以一年生草本植物为主;原产地主要是美洲;主要入侵途径是人类活动造成的有意和无意引入;传播扩散活动多数依赖结实量大的特点;均会挤占本地种生态位;超过 1/5 属于国家重点关注防控的外来入侵植物;(2)不同时间阶段年均植物入侵数量具有极显著差异,经历了低、高和稳定 3 个阶段,入侵植物累计种数与历史事件累计次数、人口、货运量等社会经济因素呈极显著正相关;(3)空间分布格局中丰富度分布和密度分布的热点地区不同,入侵植物密度与常住人口密度、绿化覆盖率呈极显著相关。【结论】北京入侵植物的演变和分布特征除了受其自身入侵性的限制外,还受到社会经济发展及城市化等人类活动因素的影响,应预防、控制、消灭三管齐下,综合治理。

关键词: 北京; 外来入侵植物; 时空动态; 驱动因素; 对策



开放科学标识码
(OSID 码)

Evolution, distribution characteristics and influencing factors of alien invasive plants in Beijing

HU Luyi^{1,2}, ZHANG Yuanyuan^{2,3*}, YUAN Xuejiao¹, YANG Zheng^{2,3},
ZHONG Zhenyu^{2,3}, BAI Jiade^{2,3}, SANG Weiguo^{1*}

¹College of Life and Environment Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China; ²Beijing Biodiversity Conservation Research Center, Beijing 100076, China; ³Beijing Milu Ecological Research Center, Beijing 100076, China

Abstract: 【Aim】Invasion by alien plants is a prominent phenomenon in Beijing. However, the spatial and temporal patterns of this invasion and the factors influencing the diffusion of invasive plants in Beijing remain unclear, which poses a challenge to the formulation of relevant management measures. This study aimed to clarify the dynamic rules and socioeconomic factors characterizing invasive plants in Beijing to gain informational and technical insights with which to formulate countermeasures to effectively prevent and control invasive plants. 【Method】Based on the existing literature, monographs, and related database information, a database of alien invasive plants in Beijing was constructed, from which we analyzed the composition, invasion characteristics, and negative effects of each alien invasive plants. Furthermore, the temporal pattern and spatial distribution were examined and analyzed for correlations with social and economic variables influencing invasiveness using the GIS and SPSS software. 【Result】A total of 101 species of alien invasive plants in Beijing were found and analyzed. Compositae was the dominant family, with most specimens being annual herbs native to the America. The main routes of invasion were found to be either intentional or accidental introductions caused by human activities. Propagation and diffusion activities mostly depended on the abundance of seeds and the wind dispersal of seeds beyond human control. The specimens were found to compete by occupying the niches of local species. More than one-fifth of the alien invasive plants were the focus of national prevention and control. 【Conclusion】The changes and distribution of invasive plants in

收稿日期(Received): 2023-06-30 接受日期(Accepted): 2024-01-09

基金项目: 北京市财政项目(11000022T000000440602)

作者简介: 胡璐祎, 女, 硕士研究生。研究方向: 入侵生态学。E-mail: huluyi1011@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 张渊媛, E-mail: zyy@milupark.org.cn; 桑卫国, E-mail: swg@muc.edu.cn

Beijing were not only found to be limited by their own invasive characteristics, but were also markedly affected by human activities related to social and economic development and urbanization. These findings underlie the importance of preventing further introductions and either eliminating or controlling established invasions in a more comprehensive manner.

Key words: Beijing; alien invasive species; spatial-temporal dynamics; driving factor; countermeasures

外来生物入侵已被公认为是造成全球生物多样性丧失的第二大因素(Keane & Crawley, 2002), 成为 21 世纪五大全球性环境问题之一(李惠茹等, 2022)。绝大多数国家, 如美国(Fantle-Lepczyk *et al.*, 2022)、澳大利亚(黄波等, 2022)、日本(Watari *et al.*, 2021), 包括中国(陈宝雄等, 2020; 洗晓青等, 2022; 中华人民共和国生态环境部, 2022)在内都受到严重的外来生物入侵影响, 对当地的经济、社会、生物多样性及人类健康构成严重威胁。研究表明, 各个国家或地区的入侵生物种类中, 入侵植物的数量均为最高(Pysek *et al.*, 2020)。北京是中国对外交往的窗口, 且与天津和河北省的沿海城市接壤, 是外来生物到达的前沿口岸, 外来植物入侵问题尤其突出。全国尺度的生物入侵相关研究表明, 除了东南沿海等生物入侵多发地外, 北京市入侵植物形势最为严峻(闫小玲等, 2012, 2014)。

近年来, 关于北京入侵植物的研究主要集中在两方面: 一是调查和分析外来入侵植物的种类组成、原产地等信息, 并在此基础上划分入侵级别(崔夏等, 2022)、总结入侵途径和危害(石青等, 2017)、讨论防治对策(王惠惠等, 2014); 二是研究外来入侵植物分布特征及影响因素, 包括对北京 10 个区县入侵植物分布的研究(海云瑞等, 2020), 结合海拔梯度, 分析北京郊区 12 区县入侵植物的水平分布格局、变化规律及影响因子(王苏铭等, 2012)。

目前, 结合入侵时间对北京入侵植物的时间动态分析的研究较少, 对北京市入侵植物时空动态及其驱动因素的分析也较模糊, 这为制定有针对性的外来入侵植物防治措施带来挑战。为厘清北京入侵植物的构成特征、入侵特点及危害、时空动态规律及其影响因素, 本研究调查了北京外来入侵植物种的种类、生活型、原产地、入侵途径、入侵扩散特性及危害, 并关注防控程度、入侵时间、空间分布等信息, 归纳入侵植物的共性特征, 同时结合社会经济影响因子探究入侵植物的时空动态及其驱动因素, 为防控外来入侵植物扩散、保护北京生物多样性、维护区域生态安全提供理论依据和信息支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于 39°28′—41°05′N, 115°20′—117°30′E, 地处华北平原北端, 全市总面积 16400 km², 山区面积 10200 km², 约占总面积的 62%, 整体地势西北高、东南低。属于暖温带半湿润半干旱季风气候, 四季分明, 年度降水集中在夏季, 气候条件适于多种植物生长, 是外来植物的入侵和扩散适合区域(海云瑞等, 2020; 石青等, 2017)。土地利用类型上, 林地集中在西部, 建筑用地等集中在中部, 耕地集中在东部。

1.2 数据调查与处理

在中国知网(<https://www.cnki.net/>)、万方(<https://www.wanfangdata.com.cn/>)、维普(<http://www.cqvip.com/>)和 Web of Science (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>)等数据平台以“外来入侵植物”或“入侵植物”“北京”或“京津冀”为检索词, 搜集近 20 a 来关于北京外来入侵植物的文献资料, 汇总文献中明确提及为“入侵植物”的植物种及已知的分布地区、原产地和入侵途径信息。由《中国植物志》(www.iplant.cn/frps)、《中国外来入侵植物志》(马金双, 2020)获取植物种的科、属和生活型信息, 对原产地、入侵途径、入侵扩散特性及危害等信息进行补充和校对; 由生态环境部(<https://www.mee.gov.cn/>)获取国家林业和草原局、农业农村部、自然资源部、生态环境部、住房和城乡建设部、海关总署六部门共同发布的《重点管理外来入侵物种名录》(以下简称《重点名录》)、“中国外来入侵物种名单”(共四批)(以下简称“四批名单”)对外来入侵植物的关注防控程度进行调查; 结合中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn>)、中国植物图像库(<http://ppbc.iplant.cn>)对分布区信息进行补充。

入侵植物种的确定: 鉴于部分文献中植物种仅记录了中文名, 根据“中国外来入侵物种信息系统”中入侵植物的中文名和俗名进行统一。同时, 为确保汇总的入侵植物种无重复项, 以学名为筛选重复

物种的唯一依据。对于同一物种的“入侵”定性可能存在争议,有学者将其归为入侵种(刘全儒等, 2002),另有学者将其归为归化种或逸生植物(崔夏等, 2022; 肖翠等, 2022),对照《北京植物志》(贺士元等)、《中国外来入侵植物名录》(马金双和李惠茹, 2018)、《中国外来入侵植物志》(马金双, 2020),若其中有记载,非中国原产或建议排除类,且表现出一定的入侵性的,则予以保留。茼蒿 *Glebionis coronaria* (L.) Cass. ex Spach、蛇目菊 *Sanvitalia procumbens* Lam.、孔雀草 *Tagetes patula* L.、野牛草 *Buchloe dactyloides* (Nutt.) Engelm.) 梯牧草 *Phleum pratense* L.、黑麦 *Secale cereale* L.、凤仙花 *Impatiens balsamina* L.、紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn. 经考证偶有逸生或归化,未发现入侵现象;黑心金光菊 *Rudbeckia hirta* L.、苦苣菜 *Sonchus oleraceus* L.、天芥菜 *Heliotropium europaeum* L. 的定性存在争议,上述 3 类植物视为非入侵植物,本文不予统计。

生活型分类方法参照林秦文等(2022),结合本研究实际物种共分为 7 类:一年生草本、多年生草本、藤本植物、肉质植物、灌木、乔木和水生植物。

原产地划分为美洲、欧洲、亚洲、地中海地区和非洲 5 个地区,对于美洲起源的划分参照崔夏等(2022)的三分方法,分为北美洲、南美洲及热带美洲起源,另鉴于地中海地区是欧洲、非洲和亚洲大陆之间的一块区域,因此将其单独划分。

入侵途径按照引入方式分为自然扩散、无意引进和有意引进 3 种方式。

入侵植物危害参照 Hao & Ma (2023) 的研究,结合北京入侵植物实际情况,分为 7 类:竞争;杂交;疾病传播;具毒性;生物污染;对生态系统的物理、化学或结构影响;减少农业产量和危害景观。

入侵植物的入侵时间:按照明确记载的引入时间、最早的文献记载时间、最早的标本采集时间(采集地在中国境内)等 3 个时间标准搜集入侵时间信息。其中,对于明确记载的入侵种引入时间在地方志、地方报道等材料中进行考证并录入;无明确记载引入时间的入侵种,比较其最早的文献记载时间和标本采集时间,择早录入。汇总不同入侵时间的入侵植物种数,得到入侵种数随时间的变化情况。

入侵时间阶段:入侵时间追溯到公元 100 年,并按照重要历史事件年限节点进行划分,共分为 7 个阶段:①古代(—1022 年),入侵时间超过 1000

a;②古代(1022—1840 年),入侵时间不超过 1000 a;③近代后(1840—1911 年);④民国后(1911—1949 年);⑤建国后(1949—1979 年);⑥改革开放后(1979—2000 年);⑦21 世纪后(2000 年—)。为便于对不同阶段入侵植物种数进行量化对比,将未记载植物入侵的年份入侵植物种数近似视为 0。

入侵植物在北京的空间分布:按照行政区划进行空间划分,共计 16 个区,即海淀区、延庆区、房山区、密云区、门头沟区、丰台区、怀柔区、昌平区、顺义区、东城区、朝阳区、平谷区、大兴区、通州区、西城区和石景山区。因资料记录不完整未能给出具体分布区,仅说明在北京有分布,记录为无具体分布地点。统计分布区明确植物种的分布信息,得到北京各区入侵植物种数及密度。

驱动因素:时间尺度上,近代之前的社会经济数据较难获得,且准确性难以保证,故选择③~⑦阶段的年历史事件次数、年历史事件累计次数、人口、产业产值和货运量等社会经济因素指标进行相关性分析。空间尺度上,选择北京 16 个区的人口、地区生产总值、耕地面积等指标进行相关性分析。数据来源于北京市统计局北京统计年鉴(<http://tjj.beijing.gov.cn/>)。

1.3 统计分析

共对入侵植物种的 9 项信息进行分析。在 Excel 中分析北京外来入侵植物种类、生活型、原产地、入侵途径、入侵扩散特性、危害及重点防控物种的构成比例,绘制入侵植物种数随时间变化趋势的曲线,统计各区入侵植物种类及单位面积入侵植物种数。在 SPSS 26 中对不同时间段的入侵植物种数进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用 SNK 多重比较检验差异的显著性;计算时间动态及空间动态与影响因素的皮尔逊(Pearson)相关系数,分析其相关性强弱,并检验显著性。

2 结果与分析

2.1 北京外来入侵植物构成特征及入侵危害

2.1.1 构成特征 北京 101 种外来入侵植物隶属于 27 科 63 属(扫描本文 OSID 码,查看附表),其中菊科、苋科、禾本科共占外来入侵植物总数的 48.51%,另外有 15 个科仅有 1 种入侵植物(表 1)。

北京外来入侵植物中共有草本植物 89 种,占比 88.12%,且多为一年生草本植物(66 种, 65.35%),其次是多年生草本(22 种, 21.78%)、藤

本植物(6种,5.94%)、水生植物(3种,2.97%)、乔木(2种,1.98%)、肉质植物(1种,0.99%)和灌木(1种,0.99%)种类最少。

北京外来入侵植物中有70种植物属美洲起源,占植物总数的69.13%,其中又以原产北美的植物种数最多,为38种;其次是原产热带美洲和南美洲的植物,为30种;有2种植物原产地仅记录为美洲,无具体起源地;原产欧洲和亚洲的植物种数次之,均为18种,分别占比15.38%;其次是原产地为非洲的入侵植物,有8种,占比6.84%;原产地中海

地区的植物种数最少,为3种,占比2.56%;其中27种植物有多个原产地。

101种外来入侵植物中有意引进的植物种数有51种,占总数的50.50%,9种出于多用途目的引入,其中27种作为观赏植物引入,13种作为绿肥或饲料引入,9种作为蔬菜引入,8种作为药用植物引入,2种作为麻类织物原料引入,1种作为油脂作物引入;无意引进的有46种,占总数的45.54%;自然扩散进入的4种,占总数的3.96%。

表1 外来入侵植物科分布
Table 1 Distribution of invasive alien plant families

科 Family	种数 Number of species	比例 Percentage/%	科 Family	种数 Number of species	比例 Percentage/%
菊科 Asteraceae	28	27.72	竹芋科 Marantaceae	1	0.99
苋科 Amaranthaceae	11	10.89	雨久花科 Pontederiaceae	1	0.99
禾本科 Gramineae	10	9.90	荨麻科 Urticaceae	1	0.99
大戟科 Euphorbiaceae	8	7.92	仙人掌科 Cactaceae	1	0.99
豆科 Leguminosae	7	6.93	石竹科 Caryophyllaceae	1	0.99
茄科 Solanaceae	5	4.95	商陆科 Phytolaccaceae	1	0.99
十字花科 Cruciferae	4	3.96	桑科 Moraceae	1	0.99
旋花科 Convolvulaceae	3	2.97	伞形科 Umbelliferae	1	0.99
玄参科 Scrophulariaceae	3	2.97	千屈菜科 Lythraceae	1	0.99
柳叶菜科 Onagraceae	3	2.97	漆树科 Anacardiaceae	1	0.99
藜科 Chenopodiaceae	2	1.98	葡萄科 Vitaceae	1	0.99
锦葵科 Malvaceae	2	1.98	落葵科 Basellaceae	1	0.99
酢浆草科 Oxalidaceae	1	0.99	葫芦科 Cucurbitaceae	1	0.99
紫茉莉科 Nyctaginaceae	1	0.99			

2.1.2 入侵扩散特点及危害 101种外来入侵植物入侵特性中96种都具有结实量大的特征,占比95.05%;50种植物的种子小且轻,占比49.50%;21种可以进行营养繁殖,占比20.79%;15种植物能产生具刺或刚毛覆盖的种子或果实,占比14.85%。

101种外来入侵植物危害中,所有种均与本地种存在种间竞争,92种入侵植物具多种危害后果。其中,72种会导致农作物减产,造成严重的农业和经济损失,占总数的71.28%;50种会对生态系统的结构和功能造成影响,占比49.51%;37种会对人畜健康造成威胁,占比36.63%;13种可作为病原菌的寄主传播疾病;占比12.87%;6种可降低水质或造成生物污染,占比5.94%;3种可与本地植物杂交形成“超级杂草”,占比2.97%。

101种外来入侵植物中,26种为国家重点关注防控的外来入侵植物,其中25种处于“四批名单”中,占总数的24.75%;18种处于六部门共同发布的《重点名录》中,占总数的17.82%。

2.2 北京外来入侵植物时间动态

2.2.1 入侵时间历程及阶段比较 入侵植物种数随时间变化情况见图1。纵观整个入侵历史,近代之后,外来入侵植物的入侵数量显著提高。对比每个时间阶段,①、②阶段时间跨度最长,植物入侵数量较为平稳,基本保持在低数量水平;第③阶段之后,时间跨度缩小,植物入侵数量不减反增;⑦阶段新的入侵植物较少,入侵植物总数稳定。

单因素方差分析结果表明,不同阶段入侵植物种数组间具有极显著差异($F=73.548, p<0.01$),每个阶段的年平均入侵植物种数,差异极显著(图2)。结果显示,④阶段年平均外来入侵植物种数($0.71\text{种}\cdot\text{年}^{-1}$)显著高于其他阶段,③($0.41\text{种}\cdot\text{年}^{-1}$)、⑤($0.30\text{种}\cdot\text{年}^{-1}$)、⑥($0.43\text{种}\cdot\text{年}^{-1}$)阶段年平均外来入侵植物种数显著较高,第①($0.01\text{种}\cdot\text{年}^{-1}$)、②($0.02\text{种}\cdot\text{年}^{-1}$)、⑦($0.09\text{种}\cdot\text{年}^{-1}$)阶段次之。整体而言,1840—2000年是外来入侵植物入侵的高峰期。

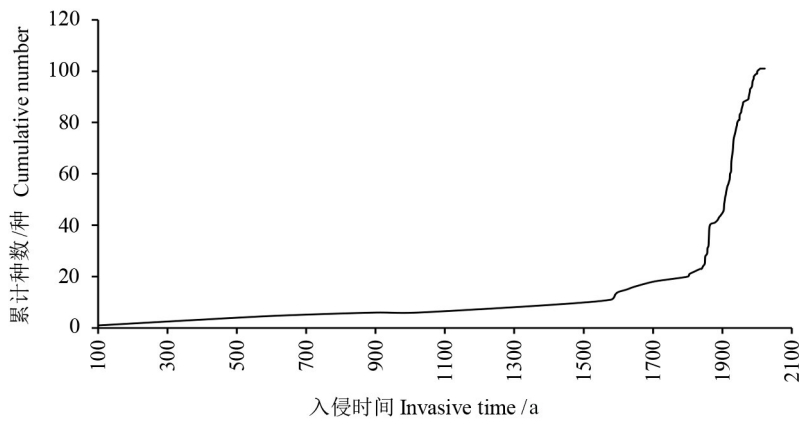


图 1 外来入侵植物累计种数随入侵时间变化情况

Fig.1 The cumulative number of invasive alien plants changed with the invasion time

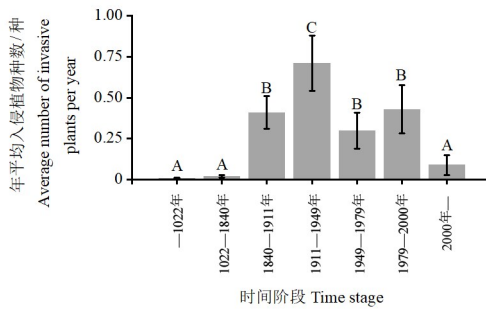


图 2 不同时间阶段年平均入侵植物种数

Fig.2 The annual average number of invasive plant species in different time stages

不同字母表示差异显著($\alpha=0.01$)。

Different letters indicate significant difference ($\alpha=0.01$).

2.2.2 入侵时间驱动因素相关性分析 相关性分析结果(表 2)显示,北京的入侵植物时间动态与历史事件次数呈极显著弱正相关,与历史事件累计次数、常住人口、城镇人口、常住人口密度、地区生产总值、第一产业生产总值、第二产业生产总值、第三产业生产总值、进出口总额、货物运输量、铁路货运量、公路货运量、水运货运量、民用航空货运量、管道货运量、铁路营业里程、公路里程、国际航线线路长度、管道输油(气)里程呈极显著强正相关,与农林牧渔业总产值比上年增长呈极显著弱负相关。

表 2 入侵植物累计种数与各类影响因子的相关性

Table 2 The correlation between the cumulative number of invasive plants and various influencing factors

变量 Variables	Pearson 相关性 Pearson Correlation	变量 Variables	Pearson 相关性 Pearson Correlation
历史事件次数 Number of historical events	0.253 **	货物运输量/万 t Cargo transport volume	0.808 **
历史事件累计次数 Cumulative number of historical events	0.987 **	铁路货运量/万 t Railway freight volume	0.892 **
常住人口/万人 Permanent population	0.843 **	公路货运量/万 t Road freight volume	0.804 **
城镇人口/万人 Urban population	0.871 **	水运货运量/万 t Water freight volume	0.732 **
乡村人口/万人 Rural population	-0.857 **	民用航空货运量/万 t Civil air cargo volume	0.732 **
常住人口密度/(人·km ⁻²) Density of permanent population	0.839 **	管道货运量/万 t Pipeline freight volume	0.904 **
地区生产总值/亿元 Regional gross domestic product	0.670 **	铁路营业里程/万 km Railway operating mileage	0.930 **
第一产业生产总值/亿元 GDP of primary industry	0.923 **	公路里程/万 km Highway mileage	0.783 **
第二产业生产总值/亿元 GDP of secondary industry	0.734 **	内河航道里程/万 km Inland waterway mileage	-0.109
第三产业生产总值/亿元 GDP of tertiary industry	0.653 **	国际航线线路长度 International route length/km	0.786 **
进出口总额/亿元 Total import and export	0.654 **	管道输油(气)里程/万 km Pipeline oil (gas) mileage	0.773 **
农林牧渔业总产值比上年增长 The total output value of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery increased by compared with the previous year/%	-0.460 **		

** :相关极显著($p<0.01$) ; * :相关显著($p<0.5$) 。
** : Extremely significant correlation ($p<0.01$) ; * : Significant correlation ($p<0.5$) .

2.3 北京外来入侵植物空间动态

2.3.1 空间分布格局 101 个入侵植物在北京的空间分布如表 3 所示。其中,外来入侵植物丰富度

为各区入侵植物种数,外来入侵植物密度为各区单位面积上的入侵植物种数。不同种类的外来入侵植物主要分布地一是海淀区,二是延庆区、密云区、

房山区等与河北相接的区域,丰富度分布格局整体展现出外围多、中间少,中西部多、东南部少的特征。此外,外来入侵植物单位面积种数较大的区集中在东城区、西城区、海淀区及石景山区等靠中部的小面积区,与丰富度分布热点地区不同,密云区、房山区的受威胁程度明显降低。

在 101 种植物中,30 种 (29.70%) 仅在单一区分布,71 种植物在多区 (≥ 2) 分布。

跨区分布的外来入侵植物中,28 种在 2~4 个

区分布,占跨区分布物种数的 39.44%;14 种在 5~8 个区有分布,占跨区分布物种数的 19.72%;高达 29 种在 9 个及以上区有分布,占跨区分布物种数的 40.85%。跨行政区域最多的是菊科(9 种)、苋科(5 种)、豆科(3 种)和茄科(2 种)植物。在半数以上区域有分布的 29 个植物种中,9 种为国家重点关注防控地外来入侵植物,仍以一年生草本居多,主要是菊科植物,原产地均为美洲,跨区分布的强入侵性外来入侵植物在北京表现出了较强的扩散性。

表 3 北京外来入侵植物物种空间分布
Table 3 Spatial distribution patterns of invasive plant species in Beijing

区 District name	外来入侵植物 丰富度/种 Richness of alien invasive plant	外来入侵植物 密度/(种·km ⁻²) Density of alien invasive plant	区 District name	外来入侵植物 丰富度/种 Richness of alien invasive plant	外来入侵植物 密度/(种·km ⁻²) Density of alien invasive plant
昌平区 Changping District	37	0.03	门头沟区 Mentougou District	41	0.03
朝阳区 Chaoyang District	34	0.07	密云区 Miyun District	52	0.03
大兴区 Daxing District	26	0.03	平谷区 Pinggu District	29	0.03
东城区 Dongcheng District	30	0.71	石景山区 Shijingshan District	23	0.27
房山区 Fangshan District	54	0.03	顺义区 Shunyi District	30	0.03
丰台区 Fengtai District	45	0.15	通州区 Tongzhou district	27	0.03
海淀区 Haidian District	68	0.17	西城区 Xicheng District	30	0.61
怀柔区 Huairou District	37	0.15	延庆区 Yanqing District	52	0.03

2.3.2 空间动态驱动因素相关性分析 相关性分析结果(表4)显示,各区入侵植物密度与常住人口密度呈极显著强正相关,与绿化覆盖率呈极显著强

负相关,与耕地面积、园地面积、城镇村及工矿用地面积、交通运输用地呈显著中度负相关。

表 4 入侵植物密度与各类影响因子的相关性
Table 4 Correlation between invasive plant density and various impacting factors

变量 Variables	Pearson 相关性 Pearson Correlation	变量 Variables	Pearson 相关性 Pearson Correlation
人口/万人 Population	0.295	耕地面积 Cultivated land area/hm ²	-0.556 *
常住人口/万人 Permanent population	-0.121	农林牧渔业总产值/亿元 Total output value of agri-	-0.472
常住外来人口/万人 Permanent migrant population	-0.256	culture, forestry, animal husbandry and fishery	
常住人口密度/(人·km ⁻²) Density of resident population	0.934 **	园地 Garden land/hm ²	-0.546 *
地区生产总值/亿元 Regional gross domestic product	0.353	林地 Forest land/hm ²	-0.556 *
绿地面积 Green area/hm ²	-0.303	草地 Grassland/hm ²	-0.317
绿化覆盖率 Green coverage/%	-0.823 **	城镇村及工矿用地 Land for towns, villages and	-0.529 *
农作物播种面积 Crop sown area/hm ²	-0.463	mines/hm ²	
交通运输用地 Transportation land/hm ²	-0.595 *	水域及水利设施用地 Waters and water conservancy	-0.480
		facilities land/hm ²	

** : 相关极显著 ($p<0.01$) ; * : 相关显著 ($p<0.5$) 。
** : Extremely significant correlation ($p<0.01$) ; * : Significant correlation ($p<0.5$) .

3 讨论

3.1 北京外来入侵植物特征及入侵危害

菊科、禾本科和苋科不仅在北京,在全国甚至亚洲到全球范围内都是外来入侵植物的主要构成种类 (Pysek, 1998; Wu *et al.*, 2010)。菊科多为一

年生草本,种子数量多,个体小,容易随风扩散,可通过休眠度过环境恶劣时期,抵抗环境干扰,如豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L. 和三裂叶豚草 *Ambrosia trifida* L. (刘延等, 2019; 王志西等, 1999)。禾本科植物多为一年生草本,种子个体小,易随贸易活动

实现跨地区传播,植株一般具有很强的适应性,生长速度快。苋科植物种子产量高、寿命长,萌发时期较广,易适应多种生境而成为广布性入侵杂草(魏莹等,2020)。就生活型而言,草本植物种子数量多且个体小,容易扩散,其中一年生、两年生草本植物具有较短的生活史,能更快完成对环境的适应,并在竞争中取得优势,所以外来入侵植物中草本植物尤其是一年生草本占极大比重。

美洲是外来入侵植物的主要原产地,一是气候因素是影响外来入侵植物分布格局的关键因素(赵彩云等,2022),物种更能适应气候条件与本土气候条件相似的生境,美洲与亚洲处于相同的纬度范围,气候条件相似,且新生境中缺少天敌和竞争者,这些植物一旦获得在新的生境生存的机会,就能快速适应,以极高的数量大面积繁殖,排挤入侵地的本地物种,成功入侵当地生态系统。二是近年来美洲与我国的进出口贸易往来频繁,为美洲植物入侵到中国提供了传播途径。非洲和大洋洲位于赤道附近,以热带、亚热带气候为主,与北京气候环境相差较大,这可能是来自两大洲入侵植物种类很少的原因所在,同时也说明环境的差异性越大,成功入侵的几率越小。

人类活动是外来入侵物种入侵途径的主要因素。有意引进是最广泛、最普遍的传播途径,主要为人工引种外来植物作绿化植物、观赏植物、药用植物、牧草饲料、经济作物,因有些物种具有极强的适应性,易逃逸发展为入侵种,如凤眼莲 *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms、加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L. 本作为观赏植物引进,却发展到最难控制的外来入侵植物行列中,造成严重危害(闫小玲,2012)。无意引进主要是随人类活动引种、国际农产品和货物输入以及随交通工具传播进入,对于这类外来入侵植物,难以有效监管,往往暴发后才关注,导致几乎无法彻底清除(Mack *et al.*, 2000)。

外来入侵植物的入侵特性与其自身的繁殖性、传播性及适应性密不可分(Maron, 2006)。几乎所有外来入侵植物都具备结实量大这一特性,能产生大量繁殖体,为新环境选择提供机会(王德艳等, 2017)。小而轻的种子可随风、水流传播扩散,扩大传播扩散范围。营养繁殖则可以促进局域入侵植物种群的快速增长,进而入侵扩散(钟林光和王朝晖, 2010)。具刺或刚毛覆盖的种子或果实还可借

助刺萼扎入动物皮毛及人的衣物扩大传播扩散区域(Del Vitto & Petenatti, 2015)。

外来入侵植物的危害性往往涉及社会、经济、生态等多方面。最主要也最为普遍的危害是入侵植物能在与本地植物的竞争中取得优势,挤占本地植物的生态位。绝大多数入侵植物主要入侵农田等受人类干扰强烈的生态系统,通过化感作用、资源争夺等方式排挤本地植物,造成单优种群,一方面严重降低作物产量,造成大量农业和经济损失,另一方面降低生物多样性,危害生态系统的结构和功能(王小飞等, 2023; 袁美丽等, 2016)。此外,少部分入侵植物作为多种病虫、病原菌的中间寄主传播疾病(周全来等, 2023),或富含硝酸盐等物质导致家畜中毒(李芳念等, 2017)。

外来入侵植物重点防控的一个主要依据即是《重点名录》及“四批名单”。这 2 份名录中的入侵植物是当前和今后一个时期内国家防控的重点所在,此类入侵植物均具备强烈的入侵性和严重的危害性。结合名录,针对入侵植物实际情况,在风险研判和入侵趋势分析基础上制定入侵性等级划分体系(汪远等, 2015; 严靖等, 2017),是关注防控入侵植物的重要依据。

3.2 北京外来入侵植物时空动态及影响因素

入侵时间常被认为与入侵成功性有关(Castro *et al.*, 2005),入侵时间越久,外来植物越有可能在入侵地扩散而产生大范围危害。历史事件、人口、经济水平、进出口贸易、交通工具类因素所表现出的极高相关性,说明目前的外来入侵植物很大程度上是历史社会经济导致的入侵债务(Essl *et al.*, 2011)。纵观整个历史,外来入侵植物的入侵速度经历了低、高、稳定 3 个阶段,与华东地区、西部地区归化植物的引入时间动态相似(李龙沁等, 2022; 严靖等, 2021)。从起源于西汉的丝绸之路至 1840 年这段时期,入侵植物的缓慢入侵大概率受当时社会发展水平低的影响,人类活动造成的无意带入和有意入侵是主要入侵方式,原始的驿站交通极大限制了人类流动的速度和跨区域活动的频率(李鲁奇等, 2020)。在 19 世纪中期到 20 世纪,入侵植物数量增长最迅速,究其历史原因,主要是 1840 年第一次鸦片战争后,中国开放了 52 个口岸,贸易、传教、科学家科考等人类活动增强,加之 1979 年后,中国进入改革开放新时期,对外开放不断扩大,经济水

平进一步提高,以上均极大促进了外来入侵植物的入侵。2000年后入侵速度变缓,可能是由于这段时间传入的外来植物从引入阶段到入侵阶段存在一个“时滞”(Essl *et al.*, 2011),需要几十年甚至上百年才会展现出对当地社会经济生态的强烈危害性,并且相应的法制建设不断完善,《植物检疫条例》《进出境动植物检疫法》等均已出台,管理力度的加强使得相较于上一时间段内,外来植物入侵得到控制(王瑞等,2022)。

北京外来入侵植物空间分布格局中,外来入侵植物在北京各区的丰富度分布主要有2个热点区域:一是延庆区、密云区、房山区等大范围与河北接壤地,跨省人类活动频繁,这些区域面积较大,随着建设用地发展重点转移到远郊区,生境破碎化较为严重,生态系统处于易被入侵状态,且外来入侵植物因其强适应生长快的特性,特别是入侵杂草类,容易在此处定殖扩散(张楠等,2018);二是海淀区此类高度城市化的区域,人类活动是主要因素(赵云峰等,2022),人口密度及生产总值常年位于北京各区前列,人类活动更为频繁,伴随的外来入侵植物的入侵情况也更为严峻(Wang *et al.*, 2011)。几种相关因素中,代表人类活动的因素呈显著相关性,与北京入侵植物在部分区分布的研究结果一致(海云瑞等,2020;王苏铭等,2012),而入侵植物种数量最高的区为海淀区,则与其研究结果不同,可能是因为人类活动因素在本研究中影响程度较大,且科研人员对于各地区入侵物种资源调查的强度会放大该种影响所导致的结果。密度分布格局受威胁中心发生偏移,转移至中部东城区西城区,与王国欢等(2017)所做全国范围内的入侵植物分布格局结果有相似之处,区域面积会影响入侵种丰富度与密度的格局,尤其是本研究中的密云区、房山区与中部各区相比较面积差异较大。该结果说明不应忽视小面积区域内的植物扩散和定殖,面积小可能反而导致了更快的扩散,影响区域内的整体生态安全。林地等土地利用属性可以从一定程度上抵御入侵植物的入侵(李岚曦等,2023;Urbanowicz *et al.*, 2018)。林地和草地等绿地主要分布在西部面积较大的区域,入侵植物密度高的东城区、西城区等中部区域绿化覆盖率相对较低,可以从提高绿化覆盖角度规划中部区的景观格局,进而降低其入侵植物密度。

入侵植物可通过不可逆地取代原生植被,阻止新的演替形成,破坏保护区的保护功能(Ren *et al.*, 2021)。由北京入侵植物分布可以看出,北京市自然保护地的空间分布密度与入侵植物的分布较吻合,延庆区、房山区、门头沟区和密云区是保护地数量和出现交叉重叠现象最多的辖区(冯达等,2020)。人类活动极可能将这些对保护区本地植物有潜在危害的外来植物带入其中,进而对保护区内的受保护物种、甚至是珍稀濒危植物及其栖息地造成不利影响。

3.3 北京入侵植物防治的对策建议

引入或传入、定殖、种群建立及扩散是植物入侵的基本阶段(Theoharides & Dukes, 2007)。相应对于外来入侵植物的防治可以从预防、消灭、控制3个角度考虑。

预防是防控外来入侵种最有效的手段,而实现预防预警离不开严格的检验检疫环节。北京出入境检验检疫局、北京海关应做好进境生物材料企业备案管理,完善《进境植物繁殖材料检疫审批单备案办事指南》,加强对分布区货物、运输工具等携带的入侵植物子实的监控,尤其是出于引种目的从温带地区人为引进的菊科、禾本科和苋科植物。可与相关科研机构合作,提升外来入侵植物筛查技术力量,最大限度地从源头降低入侵风险。

加强外来入侵植物本底调查与监测,特别是在海淀区、延庆区、密云区、房山区等入侵植物丰富度较高的区及在东城区、西城区、石景山区等入侵植物密度较高的区,调查入侵植物具体的分布点位,有助于建立相互联系的数据网络,对其潜在的伤害风险进行预估,制定更有针对性的防控措施,实现精准防控。

构建针对北京的外来入侵植物入侵性等级划分体系,基于各外来入侵植物在北京的危害程度和潜在危害性进行科学评估,形成因地制宜的等级划分标准,配置相关资源和技术力量开展分级防控。

加强科普宣传,积蓄防治外来植物的社会力量。外来植物入侵事关区域粮食安全、生物安全和生态安全。然而,普通市民的辨识能力有限,相关专业知识的缺乏,往往一些无意识的放生、丢弃行为可能辅助了外来植物入侵,因此需加强宣传力度,让更多市民了解外来植物入侵的风险。可利用北京众多的公园、科普教育基地、生态文明基地进行

相关宣传,例如可在国家自然博物馆、中国海关博物馆增设展板,陈列入侵植物标本,介绍其特征、传播途径和危害;可利用高校、科研院所的专家资源,在国家植物园、颐和园等游客较集中的公园开展志愿宣讲活动,向公众科普入侵植物相关知识,让市民了解入侵植物的特点和造成的严重危害,提高人们对外来入侵植物的警惕,形成防治外来植物的自觉意识,形成全社会参与防控的氛围。

参考文献

- 陈宝雄,孙玉芳,韩智华,黄宏坤,张宏斌,李垚奎,张国良,刘万学,2020.我国外来入侵生物防控现状、问题 and 对策. *生物安全学报*, 29(3): 157-163.
- 崔夏,刘全儒,吴超然,何宇飞,马金双,2022.京津冀外来入侵植物. *生物多样性*, 30(8): 151-160.
- 冯达,胡理乐,陈建成,2020.北京市自然保护地空间分布格局与交叉重叠特征. *生态学杂志*, 39(10): 3421-3429.
- 海云端,马菁,姜广辉,2020.北京主要外来入侵植物分布特征及其影响因素分析. *宁夏农林科技*, 61(8): 54-57, 52.
- 黄波,李天娇,李烨,丁蛟龙,张落桐,周莉,2022.澳大利亚生物多样性保护经验及其对我国的启示. *农业资源与环境学报*, 39(1): 65-71.
- 李芳念,杨春玉,梁有发,2017.贵州省雷公山国家级自然保护区主要外来入侵植物危害现状及防控对策. *现代农业科技* (15): 121-122.
- 李惠茹,严靖,杜诚,闫小玲,2022.中国外来植物入侵风险评估研究. *生态学报*, 42(16): 6451-6463.
- 李岚曦,何荣晓,杨帆,陈俊,曹凌仪,2023.海口城市空间差异对外来入侵植物分布格局的影响. *生物安全学报*, 32(3): 235-242.
- 李龙沁,许光耀,高越,莫训强,李洪远,2022.中国西部地区归化植物时空分布特征研究. *广西植物*, 42(3): 429-439.
- 李鲁奇,吴启焰,刘可文,梁双波,钱超峰,2020.历史视角下亚欧大陆海陆交通可达性空间格局演化. *地理学报*, 75(4): 804-819.
- 林秦文,肖翠,马金双,2022.中国外来植物数据集. *生物多样性*, 30(5): 110-117.
- 刘全儒,于明,周云龙,2002.北京地区外来入侵植物的初步研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 38(3): 399-404.
- 刘延,董合干,刘彤,王寒月,王瑞丽,马倩倩,赵文轩,李秋霞,2019.豚草和三裂叶豚草不同植株部位种子萌发与入侵扩散关系. *生态学报*, 39(24): 9079-9088.
- 马金双,李惠茹,2018.中国外来入侵植物名录.北京:高等教育出版社.
- 马金双,2020.中国外来入侵植物志.上海:上海交通大学出版社.
- 石青,陈雪,罗雪晶,陈凤新,任晓鸿,2017.京津冀外来入侵植物的种类调查与分析. *生物安全学报*, 26(3): 215-223.
- 汪远,李惠茹,马金双,2015.上海外来植物及其入侵等级划分. *植物分类与资源学报*, 37(2): 185-202.
- 王德艳,张大才,胡世俊,闫晓慧,2017.云南菊科入侵植物入侵机制及其利用研究进展. *生物安全学报*, 26(4): 259-265.
- 王国欢,白帆,桑卫国,2017.中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素. *植物科学学报*, 35(4): 513-524.
- 王惠惠,刘晶岚,张容,刘佳凯,邹瑀琦,邹大林,南海龙,张振明,2014.北京外来入侵植物研究. *农学学报*, 4(6): 49-52, 58.
- 王瑞,黄宏坤,张宏斌,张艳萍,薛琳,陈宝雄,杨念婉,郭建英,刘万学,万方浩,2022.中国外来入侵物种防控法规和管理机制空缺分析. *植物保护*, 48(4): 2-9.
- 王苏铭,张楠,于琳倩,赵容慧,郝鹏,李景文,姜英淑,沙海峰,刘义,张志翔,2012.北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素. *生态学报*, 32(15): 4618-4629.
- 王小飞,王涛,王琦,尹爱国,杨晓绒,岳茂峰,2023.白花鬼针草入侵对植物群落结构及物种多样性的影响. *生物安全学报*, 32(4): 384-392.
- 王志西,刘祥君,高亦珂,祖元刚,1999.豚草和三裂叶豚草种子休眠规律研究. *植物研究*, 19(2): 39-44.
- 魏莹,李倩,李阳,毛祝新,王宇超,岳明,2020.外来入侵植物反枝苋的研究进展. *生态学杂志*, 39(1): 282-291.
- 洗晓青,王瑞,陈宝雄,张宏斌,李垚奎,万方浩,张桂芬,刘万学,2022.“世界 100 种恶性外来入侵物种”在我国大陆的入侵现状. *生物安全学报*, 31(1): 9-16.
- 肖翠,刘冰,吴超然,马金双,叶建飞,夏晓飞,林秦文,2022.北京维管植物编目和分布数据集. *生物多样性*, 30(6): 5-13.
- 闫小玲,2012.观赏植物引种与外来入侵种研究. *园艺与种苗* (8): 41-45.
- 闫小玲,刘全儒,寿海洋,曾宪锋,张勇,陈丽,刘演,马海英,齐淑艳,马金双,2014.中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析. *生物多样性*, 22(5): 667-676.
- 闫小玲,寿海洋,马金双,2012.中国外来入侵植物研究现状及存在的问题. *植物分类与资源学报*, 34(3): 287-313.
- 严靖,闫小玲,李惠茹,杜诚,马金双,2021.华东地区归化植物的组成特征、引入时间及时空分布. *生物多样性*, 29(4): 428-438.
- 严靖,闫小玲,王樟华,李惠茹,马金双,2017.安徽省外来入侵植物的分布格局及其等级划分. *植物科学学报*, 35(5): 679-690.
- 袁美丽,李韶霞,王宁,2016.5种外来入侵植物对小麦的

- 化感作用. 贵州农业科学, 44(12): 58–62.
- 张楠, 董丽, 王骢, 王阔, 2018. 北京城市生态廊道草本植物组成及分布格局. 中国园林, 34(6): 94–99.
- 赵彩云, 柳晓燕, 李飞飞, 朱金方, 郭朝丹, 李俊生, 2022. 我国国家级自然保护区主要外来入侵植物分布格局及成因. 生态学报, 42(7): 2532–2541.
- 赵云峰, 赵彩云, 朱金方, 李飞飞, 杨秀清, 郭朝丹, 2022. 北京市典型公园外来入侵植物分布格局. 生态学报, 42(9): 3656–3665.
- 中华人民共和国生态环境部, 2022. 2021 年中国生态环境状况公报(摘录). 环境保护, 50(12): 61–74.
- 钟林光, 王朝晖, 2010. 外来物种婆婆纳生物学特性及危害的研究. 安徽农业科学, 38(19): 10113–10115.
- 周全来, 曹伟, 张悦, 金永焕, 王永翠, 马瑛培, 陈辉, 崔雪, 2023. 外来入侵植物刺萼龙葵的入侵特征与防治策略. 生物安全学报, 32(4): 314–322.
- CASTRO S A, FIGUEROA J A, MUNOZ-SCHICK M, JAKSIC F M, 2005. Minimum residence time, biogeographical origin, and life cycle as determinants of the geographical extent of naturalized plants in continental Chile. *Diversity and Distributions*, 11(3): 183–191.
- DEL VITTO L A, PETENATTI E M, 2015. On the presence of *Solanum rostratum* (Solanaceae) in South America: a toxic neophyte with great potential as a weed. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(2): 109–121.
- ESSL F, DULLINGER S, RABITSCH W, HULME P E, HULBER K, JAROSIK V, KLEINBAUER I, KRAUSMANN F, KUHN I, NENTWIG W, VILA M, GENOVESI P, GHERARDI F, DESPREZ-LOUSTAU M L, ROQUES A, PYSEK P, 2011. Socioeconomic legacy yields an invasion debt. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(1): 203–207.
- FANTLE-LEPCZYK J E, HAUBROCK P J, KRAMER A M, CUTHBERT R N, TURBELIN A J, CRYSTAL-ORNELAS R, DIAGNE C, COURCHAMP F, 2022. Economic costs of biological invasions in the United States. *Science of the Total Environment*, 806: 151318.
- HAO Q, MA J S, 2023. Invasive alien plants in China: an update. *Plant Diversity*, 45(1): 117–121.
- KEANE R M, CRAWLEY M J, 2002. Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(4): 164–170.
- MACK R N, SIMBERLOFF D, LONSDALE W M, EVANS H, CLOUT M, BAZZAZ F A, 2000. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, 10(3): 689–710.
- MARON J L, 2006. The relative importance of latitude matching and propagule pressure in the colonization success of an invasive forb. *Ecography*, 29(6): 819–826.
- PYSEK P, 1998. Is there a taxonomic pattern to plant invasions? *Oikos*, 82(2): 282–294.
- PYSEK P, HULME P E, SIMBERLOFF D, BACHER S, BLACKBURN T M, CARLTON J T, DAWSON W, ESSL F, FOXCROFT L C, GENOVESI P, JESCHKE J M, KUHN I, LIEBHOLD A M, MANDRAK N E, MEYERSON L A, PAUCHARD A, PERGL J, ROY H E, SEEBENS H, VAN KLEUNEN M, VILA M, WINGFIELD M J, RICHARDSON D M, 2020. Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews*, 95(6): 1511–1534.
- REN J L, CHEN J S, XU C L, VAN DE KOPPEL J, THOMSEN M S, QIU S Y, CHENG F Y, SONG W J, LIU Q X, XU C, BAI J H, ZHANG Y H, CUI B S, BERTNESS M D, SILLIMAN B R, LI B, HE Q, 2021. An invasive species erodes the performance of coastal wetland protected areas. *Science Advances*, 7: eabi8942.
- THEOHARIDES K A, DUKES J S, 2007. Plant invasion across space and time: factors affecting nonindigenous species success during four stages of invasion. *New Phytologist*, 176(2): 256–273.
- URBANOWICZ C, HUTYRA L R, STINSON K A, 2018. The effects of urbanization and land use on ragweed distribution. *Ecosphere*, 9(12): e02512.
- WANG H F, LOPEZ-PUJOL J, MEYERSON L A, QIU J X, WANG X K, OUYANG Z Y, 2011. Biological invasions in rapidly urbanizing areas: a case study of Beijing, China. *Biodiversity and Conservation*, 20(11): 2483–2509.
- WATARI Y, KOMINE H, ANGULO E, DIAGNE C, BALLESTEROS-MEJIA L, COURCHAMP F, 2021. First synthesis of the economic costs of biological invasions in Japan. *Neobiota*, 67: 79–101.
- WU S H, SUN H T, TENG Y C, REJMANEK M, CHAW S M, YANG T Y A, HSIEH C F, 2010. Patterns of plant invasions in China: taxonomic, biogeographic, climatic approaches and anthropogenic effects. *Biological Invasions*, 12(7): 2179–2206.

惠州西湖外来鱼类入侵与鱼类群落状况研究

余梵冬^{1,2}, 韦 慧^{1,2}, 徐 猛^{1,2}, 房 苗^{1,2}, 舒 璐^{1,2}, 汪学杰^{1,2}, 胡隐昌^{1,2}, 顾党恩^{1,2*}

¹中国水产科学研究院珠江水产研究所/农业农村部外来入侵水生生物防控重点实验室, 广东 广州 510380; ²中国水产科学研究院外来物种与生态安全重点实验室, 广东 广州 510380

摘要:【目的】摸清惠州西湖鱼类群落组成和外来鱼类入侵现状。【方法】2023年2月,在惠州西湖主湖区开展鱼类资源调查,运用 Jaccard 相似性指数、相似性分析、非度量多维尺度排序法等方法分析外来鱼类物种组成、丰度差异、分布格局、群聚结构和群落相似性。【结果】共捕获鱼类 21 种,包括鲤、鲫和鲢等 16 种土著鱼类以及豹纹翼甲鲇、齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、伽利略罗非鱼和露斯塔野鲮 5 种外来鱼类。外来鱼类质量和数量分别占总渔获物的 45.36% 和 44.18%。豹纹翼甲鲇和齐氏罗非鱼在 5 种外来鱼类中质量和数量占比相对较高,表明外来种群资源量具有一定规模;相似性分析结果表明,西湖平均 Jaccard 相似性指数处于相似等级(数值为 0.62),表明惠州西湖鱼类群落空间分布相似度高;聚类分析结果表明,在 78.73% 的相似性水平时,惠州西湖鱼类群落可分为 4 组,但它们之间的差异未达到生态学意义上的差异显著($P>0.05$)。【结论】惠州西湖各站点鱼类群落较为相似,豹纹翼甲鲇和齐氏罗非鱼在各个站点均有出现,入侵较为严重,亟需采取相应的防控措施。

关键词: 外来鱼类; 空间分布; 群落相似性; 豹纹翼甲鲇; 齐氏罗非鱼



开放科学标识码
(OSID 码)

Study on alien fish invasion and fish community status in Huizhou West Lake

YU Fandong^{1,2}, WEI Hui^{1,2}, XU Meng^{1,2}, FANG Miao^{1,2}, SHU Lu^{1,2},
WANG Xuejie^{1,2}, HU Yinchang^{1,2}, GU Dang'en^{1,2*}

¹Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of Prevention and Control for Aquatic Invasive Alien Species, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou, Guangdong 510380, China;

²Key Laboratory of Alien Species and Ecological Security (CAFS), Chinese Academy of Fisheries Science, Guangzhou, Guangdong 510380, China

Abstract:【Aim】To understand the species composition and alien fish invasion of Huizhou West Lake, a fish resource survey was conducted in February 2023.【Method】The Jaccard similarity index, similarity analysis, and non-metric multidimensional scaling (NMDS) were utilized to analyze the species composition, abundance differences, distribution patterns, community structure, and community similarity of alien fish in Huizhou West Lake.【Result】A total of 21 fish species were captured in this survey. Sixteen native fish species were found, including *Cyprinus carpio*, *Carassius auratus*, and *Hypophthalmichthys harmandi*. Five alien fish species were recorded, namely *Pterygoplichthys pardalis*, *Tilapia zillii*, *Oreochromis niloticus*, *Sarotherodon galilaeus*, and *Labeo rohita*. Alien fish species accounted for 45.36% of the total catch weight and 44.18% of the total catch tail. Additionally, *Pterygoplichthys pardalis* and *Tilapia zillii* were observed in relatively high proportions in terms of weight and quantity among the five alien fish species, suggesting the establishment of a significant population scale. The similarity analysis results showed that the average Jaccard similarity index value of Huizhou West Lake is 0.62, which is the "similarity" level, indicating that the fish communities are relatively similar at various stations. The clustering analysis results showed that at a similarity level of 78.73%, the fish community of Huizhou West Lake can be divided into four groups; however, statistically significant differences did not exist be-

收稿日期(Received): 2023-05-13 接受日期(Accepted): 2023-09-30

基金项目: 国家大宗淡水鱼产业技术体系(CARS-45); 广州市科技计划(202102020817, 202201010257); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2023KJ134); 中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD17); 中国水产科学院所级基本科研业务费(2024SJRC11)

作者简介: 余梵冬, 男, 助理研究员。研究方向: 外来鱼类入侵与鱼类生态学。E-mail: yufd666@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 顾党恩, E-mail: gudangen@163.com

tween these four groups ($P>0.05$). 【Conclusion】 Overall, the fish communities at each site of Huizhou West Lake are relatively similar. Huizhou West Lake has been invaded by *Pterygoplichthys pardalis* and *Tilapia zillii*, which appeared at each analyzed site. Therefore, corresponding prevention and control measures are urgently required.

Key words: alien fish; spatial distribution; community similarity; *Pterygoplichthys pardalis*; *Tilapia zillii*

外来物种泛指非土著原产的外域物种,即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物种、亚种(万方浩等,2009)。外来物种入侵作为影响生态系统结构和功能的重要因素,被列为全球环境面临的三大问题之一(Gozlan *et al.*, 2008; Rahel & Olden, 2008)。据统计,全球最具威胁的100种外来入侵物种包括25种水生生物,有8种为鱼类,其中6种为淡水鱼类(Lowe *et al.*, 2000; Ottinger *et al.*, 2016)。在过去的半个世纪,由于水产养殖、观赏鱼贸易、增殖放流、休闲渔业、垂钓等方面的需要,越来越多的淡水鱼类被人类有意或无意地引入新的自然水域(Gu *et al.*, 2019; Strayer, 2010)。这些外来鱼类为水产带来新的经济增长点,也给生态系统安全带来了隐患(全国水产技术推广总站和中国水产学会,2020)。

广东省气候温暖湿润,适宜生长的物种相对较多,是我国生物多样性最高的地区之一。相对频繁的进出口贸易和对外交流也使得广东成为我国遭受外来物种入侵最严重的地区之一(Radhakrishnan *et al.*, 2011)。惠州西湖(23°06′24″—23°04′43″N, 114°22′44″—114°24′03″E)位于广东省惠州市中心区,湖泊面积1.48 km²,是典型的城市浅水湖泊(陈光荣等,2008; 苗滕等, 2013)。惠州西湖作为5A级国家风景名胜区,不仅对城市形象、旅游、人文、生态、环保等影响深远,还是多种鸟类和水生生物的理想栖息地。因此,保护惠州西湖生态环境和水生生物多样性有着重要意义。陈光荣等(2008)、高红婷等(2008)对有关惠州西湖浮游动植物、沉水植物等开展了相关的研究;陈炳辉(2012)开展了关于鱼类对生物调控的影响研究,但目前鲜有关于惠州西湖外来鱼类及水生生物保护方面的研究。

在此背景下,本研究于2023年2月对惠州西湖最大湖区——平湖的外来鱼类物种组成、丰度差异、分布格局、群聚结构和群落相似性等进行调查分析,旨在完善惠州西湖鱼类多样性和外来鱼类资源现状资料,为鱼类资源保护、外来鱼类防控和水域生态环境修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置和采样方法

惠州西湖由平湖、丰湖、南湖、菱湖和鳄湖5个湖区组成,其中平湖位于西湖的中心位置,也是其中最大的湖区。本研究根据实际可操作性,在平湖设置6个采样点,均匀覆盖了平湖各个水域。实地调查时间为2023年2月(珠江流域禁渔期之前)。通过专业渔民采集和自主采集相结合的方式收集鱼类样本。调查期间多种采样技术、工具相结合:手划式小型渔船,户外便携式遥控拉网船(EWITGO, 24 V, 续航3 h),在每个采样点使用2个三层定制刺网(网目:12 cm+5 cm+3 cm;长、宽规格:100 m×2 m)作业12 h,5个地笼(网长规格:15 m)作业12 h;运用手抄网、饵料钩等方式进行补充采样,其中手抄网沿岸作业30 min,垂钓作业30 min。

1.2 物种的鉴定、组成和丰度差异

参照《珠江鱼类志》(郑慈英,1989)、《广东淡水鱼类志》(中国水产科学研究院珠江水产研究所等,1991)、《中国常见外来水生动植物图鉴》(全国水产技术推广总站和中国水产学会,2020)和《中国外来水生动植物》(李家乐等,2007)等专著对采集到的所有鱼类标本当场进行种类鉴定,逐尾测量全长(精确至1 mm)、体长(精确至1 mm)和质量(精确至0.1 g)等生物学指标,对未能当场鉴定种类的鱼类个体,用10%福尔马林溶液保存固定,以便带回实验室进一步鉴定。

将外来鱼类按照目、科、属和种进行统计和归类,分析各采样点外来鱼类种类的组成差异;统计各采样点每种外来鱼类的尾数,分析它们之间的丰度差异。运用Excel 2007软件对数据进行整理与分析,利用SPSS19、Adobe Illustrator CS5软件绘图。

1.3 Jaccard 相似性指数

本研究运用Jaccard相似性指数对西湖各采样点外来鱼类群落进行比较分析,探究外来鱼类群落的相似性,公式如下: $CJ = a / (a + b + c)$ 。其中CJ表示Jaccard相似性指数, a 表示2个采样区域共有的鱼类种数, b 为仅在其中一个采样区域的

鱼类种数, c 为仅在另一个采样区域的鱼类种数(程瑞春等, 2020)。根据 Jaccard 相似性原理, $0 < CJ < 0.25$ 为不相似; $0.25 \leq CJ < 0.50$ 为中等相似; $0.50 \leq CJ < 0.75$ 为相似; $0.75 \leq CJ < 1.00$ 为极相似(戈昕宇等, 2018)。

1.4 鱼类群落聚类 and 分布

本研究运用鱼类丰度数据来分析西湖外来鱼类群聚特征。先运用相似性分析检验不同采样点之间的差异,再使用相似性百分比分析方法确定造成采样点之间相似性差异的主要物种,这些物种被认为是样点组的典型物种(Liu *et al.*, 2020)。采用聚类分析(cluster analysis, CA)和非度量多维尺度排序法(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)来确定外来鱼类在西湖的空间格局。上述分析操作均在 PRIMER 5 软件包执行。

2 结果与分析

2.1 鱼类物种组成

调查期间共计捕获鱼类 71.93 kg、507 尾、

21 种,隶属于 4 目 6 科 18 属(表 1)。土著鱼类包括鲤 *Cyprinus carpio* Linnaeus、鲫 *Carassius auratus* Linnaeus、鲢 *Hypophthalmichthys harmandi* Cuvier et Valenciennes、鳊 *Cirrhina molitorella* Cuvier et Valenciennes、黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco* Richardson 和七丝鲚 *Coilia grayi* Richardson 等 16 个物种。外来鱼类共 5 种,其尾数和质量依次分别为:豹纹翼甲鲇 *Pterygoplichthys pardalis* Castelnau 150 尾、22.77 kg,齐氏罗非鱼 *Tilapia zillii* Gervais 47 尾、2.01 kg、尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* Linnaeus 5 尾、0.59 kg,伽利略罗非鱼 *Sarotherodon galilaeus* Linnaeus 19 尾、6.05 kg 和露斯塔野鲮 *Labeo rohita* Hamilton 3 尾、1.21 kg,共计 32.63 kg、224 尾,外来鱼类质量占总渔获质量的 45.36%,外来鱼类尾数占总渔获尾数的 44.18%。其中,豹纹翼甲鲇 22.77 kg、150 尾,其质量占总鱼获质量的 31.66%,尾数占总渔获尾数的 29.59%(图 1)。

表 1 惠州西湖鱼类名录
Table 1 List of fish in Huizhou West Lake

目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species
鲱形目 Clupeiformes	鲱科 Engraulidae	鲱属 <i>Coilia</i>	七丝鲚 <i>Coilia grayi</i>
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	棒花鱼属 <i>Abbottina</i>	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>
		餐鲮属 <i>Hemiculter</i>	餐 <i>Hemiculter leucisulus</i>
		鲫属 <i>Carassius</i>	鲫 <i>Carassius auratus</i>
		鲤鱼 <i>Cyprinus</i>	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>
		鳊属 <i>Aristichthys</i>	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>
		鲢属 <i>Hypophthalmichthys</i>	鲢 <i>Hypophthalmichthys harmandi</i>
		鲂属 <i>Megalobrama</i>	广东鲂 <i>Megalobrama terminalis</i>
		红鲮属 <i>Erythroculter</i>	海南红鲮 <i>Erythroculter recurviceps</i>
		鲮属 <i>Culter</i>	红鳍原鲮 <i>Culter erythropterus</i>
			翘嘴鲮 <i>Culter alburnus</i>
		鲮属 <i>Xenocypris</i>	黄尾鲮 <i>Xenocypris Davidi</i>
		鳊属 <i>Cirrhinus</i>	鳊 <i>Cirrhina molitorella</i>
		野鲮属 <i>Labeo</i>	露斯塔野鲮 <i>Labeo rohita</i>
		麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>
		泥鳅属 <i>Misgurnus</i>	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>
鲈形目 Perciformes	鳅科 Cobitidae		
	丽鱼科 Cichlidae	非鲫属 <i>Tilapia</i>	伽利略罗非鱼 <i>Sarotherodon galilaeus</i>
			尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>
鲇形目 Siluriformes	甲鲇科 Loricariidae		齐氏罗非鱼 <i>Tilapia zillii</i>
		下口鲇属 <i>Hypostomus</i>	豹纹翼甲鲇 <i>Pterygoplichthys pardalis</i>
	鲿科 Bagridae	黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>

2.2 外来鱼类资源量差异分析

由图 2 可知,惠州西湖 6 个采样点 S1~S6 的 5 种外来鱼类生物量差异较为明显:豹纹翼甲鲇生物量在 S5 出现最高值,为 5.79 kg,最低值出现在 S4,

为 1.06 kg;齐氏罗非鱼生物量在 S2 出现最高值,为 0.74 kg,最低值出现在 S3,为 0.13 kg;尼罗罗非鱼生物量在 S3 出现最高值,为 0.29 kg,而 S6 尚未调查到尼罗罗非鱼;伽利略罗非鱼生物量在 S1 出现

最高值,为 1.87 kg,最低值出现在 S6,为 0.60 kg;露斯塔野鲮生物量在 S6 出现最高值,为 0.90 kg,而 S1、S2、S3 和 S5 均未调查到露斯塔野鲮。

由图 3 可知,豹纹翼甲鲃丰度在 S2 出现最高值,为 36 尾,最低值出现在 S4,为 9 尾;齐氏罗非鱼丰度在 S2 出现最高值,为 19 尾,最低值出现在 S3,为 3 尾;尼罗罗非鱼丰度在 S1-S5 相同,为 1 尾,而 S6 尚未调查到尼罗罗非鱼;伽利略罗非鱼丰度在 S1 出现最高值,为 6 尾,在 S3、S5 和 S6 均为 2 尾;露斯塔野鲮丰度在 S4 出现最高值,为 2 尾,而 S1、S2、S3 和 S5 均未调查到露斯塔野鲮。

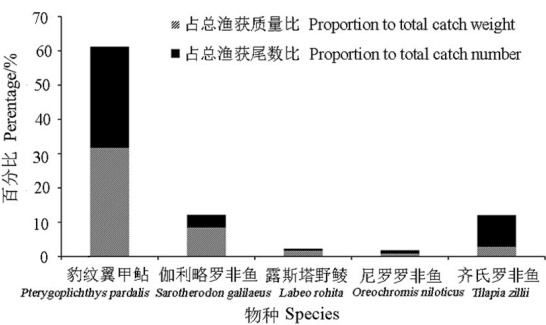


图 1 惠州西湖外来鱼类质量、尾数占比
Fig.1 Weight and tail number of alien fish in Huizhou West Lake

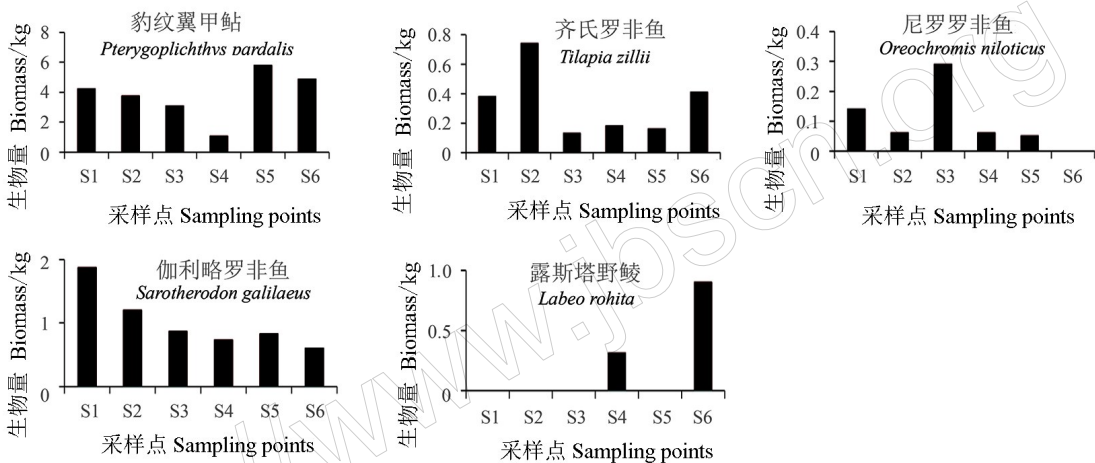


图 2 惠州西湖外来鱼类生物量差异
Fig.2 Differences in biomass of alien fish in Huizhou West Lake

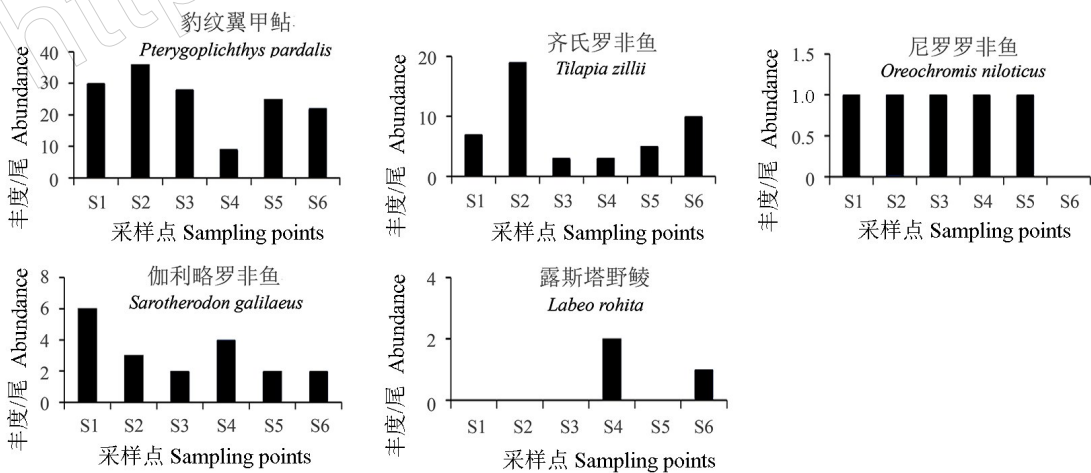


图 3 惠州西湖外来鱼类丰度差异
Fig.3 Differences in the abundance of exotic fish in Huizhou West Lake

2.3 鱼类群落相似性

由表 2 可知,西湖 6 个采样点的 Jaccard 相似性指数介于 0.37~0.77,包含了中等相似、相似和极为相似 3 个等级。其中平均 Jaccard 相似性指数值

为 0.62,为相似等级,这表明西湖水体鱼类群落较为相似。S1 和 S3 的 Jaccard 相似性指数最高 (0.77),这表明它们之间鱼类群落最为相似。S6 和其他采样点的 Jaccard 相似性指数值较低,平均值

0.53, 低于总体平均水平, 但仍保持在相似等级。值 S2 和 S6 之间, 为中等相似等级。得一提的是, 最低的 Jaccard 相似性指数值出现在

表 2 各样点组鱼类群落相似性
Table 2 Similarities of fish communities in various point groups

样点组 Sample point group	样点组前者特有物种数 The only number of species in the former	样点组后者特有物种数 The only number of species in the latter	两者共有物种数 Number of shared species	Jaccard 相似性指数 Jaccard similarity index
S1 & S2	2	3	10	0.67
S1 & S3	1	2	10	0.77
S1 & S4	3	6	9	0.50
S1 & S5	2	4	10	0.63
S1 & S6	3	4	9	0.56
S2 & S3	3	2	10	0.67
S2 & S4	3	5	10	0.56
S2 & S5	2	3	11	0.69
S2 & S6	6	6	7	0.37
S3 & S4	1	4	11	0.69
S3 & S5	1	3	11	0.73
S3 & S6	3	4	9	0.56
S4 & S5	3	2	12	0.71
S4 & S6	4	2	11	0.65
S5 & S6	5	4	9	0.50

2.4 鱼类群聚结构

根据等级聚类分析可知, 在 78.73% 的相似性水平上, 西湖鱼类群落可分为 4 组: 组 1 (S1 和 S2), 组 2 (S3), 组 3 (S6), 组 4 (S4 和 S5)。非度量多维尺度排序的胁迫系数 (stress) 小于 0.1, 说明吻合较好, 结果较为可信。应用相似性分析进行显著性检验, 结果为 $R=1, P>0.05$, 表明 4 个组之间鱼类群落的差异并未达到生态学意义上的差异显著 (图 4)。

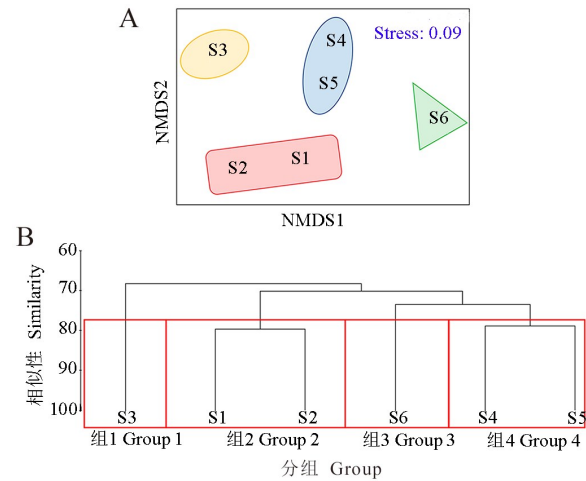


图 4 惠州西湖鱼类群聚的聚类图 (A) 和排序图 (B)

Fig.4 Cluster plot (A) and ranking plot (B) of fish community in Huizhou West Lake

3 讨论

3.1 鱼类群落组成及其群聚结构

调查表明, 西湖鱼类资源丰富, 共分布有鱼类 21 种, 隶属于 4 目 6 科 18 属, 鱼类组成表现出以鲤形目的鲤科占明显优势 (占总种类的 61.91%)、随后依次为鲇形目和鲈形目鱼类, 这与华南地区湖泊乃至整个珠江流域水系的鱼类区系组成相似 (郑慈英, 1989; 中国水产科学研究院珠江水产研究所等, 1991)。西湖鱼类生物量较高的鱼类依次有: 豹纹翼甲鲇、鲫、鲢、伽利略罗非鱼和鲤、鲮、翘嘴鲇 *Culter alburnus* Basilewsky、齐氏罗非鱼和七丝鲚等; 而丰度排名靠前的鱼类依次有: 豹纹翼甲鲇、七丝鲚、齐氏罗非鱼、鲫、鲤、鲢、伽利略罗非鱼、麦穗鱼 *Pseudorasbora parva* Temminck & Schlegel 和翘嘴鲇等。由此可见, 惠州西湖以典型的喜缓流或静水鱼类为主, 如翘嘴鲇、鲤、鲫、鲢等, 也有典型江湖洄游鱼类七丝鲚, 同时这也遵循南方湖泊鱼类组成的一般规律 (陈炳辉, 2012; 王震, 2018)。

从空间分布来看, 惠州西湖各采样点鱼类群落较为相似, 总体为相似等级, 尚未发现鱼类群落为不相似等级的采样点, 这可能与鱼类群落在湖泊的连通性和流动性有关。虽然各采样点鱼类群落较为相似, 但在 78.73% 的聚类相似性水平上, 西湖鱼类群落可分为 4 组, 各组间存在着一定的差别: 组 1

的优势鱼类为豹纹翼甲鲇、鲫、鲤;组2的优势鱼类为豹纹翼甲鲇、伽利略罗非鱼、鲫和翘嘴鲇;组3的优势鱼类为豹纹翼甲鲇、鲫、鲢;组4的优势鱼类为豹纹翼甲鲇、鲢、鲫、鲤。由此可以发现,各采样点均以个别外来鱼类和喜缓流鱼类为主,各组间仅个别优势鱼类不同以及丰度不同。今后应对惠州西湖鱼类群落组成季节性变化、及其与环境因子相互间关系等开展进一步的研究。

3.2 惠州西湖外来鱼类入侵现状

调查发现,西湖外来鱼类共计5种:包括豹纹翼甲鲇、齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、伽利略罗非鱼和露斯塔野鲮;所有外来鱼类的生物量和丰度均约占总渔获物的50%,它们的种群数量不容小觑。其中,豹纹翼甲鲇的生物量和丰度都位居所有物种的首位,约占30%,是西湖外来物种中风险最高的物种。此外,伽利略罗非鱼和齐氏罗非鱼的种群数量也不在少数。同时,最近农业农村部、自然资源部、生态环境部等6部门联合组织制定的《重点管理外来入侵物种名录》就包含了豹纹翼甲鲇和齐氏罗非鱼(顾党恩等,2023),它们既对粮食安全造成影响,也危及了生态安全,属于首要关注的高风险外来鱼类。

豹纹翼甲鲇俗称清道夫,又称垃圾鱼,隶属于鲇形目、甲鲇科、下口鲇属。原产于南美亚马孙河流域,作为观赏鱼类引进(李家乐等,2007)。目前豹纹翼甲鲇在广东多地已建立自然种群并形成入侵,成体的豹纹翼甲鲇不止啃食青苔等藻类,还会以其他鱼类的鱼卵为食,一天可以吃掉数千粒鱼卵,甚至吞食鱼苗,对其他鱼类种群造成巨大冲击,危害较大。此外,豹纹翼甲鲇的环境适应能力强,可以在水质较差的水体生存和繁殖(全国水产技术推广总站和中国水产学会,2020;韦慧等,2022)。此外,豹纹翼甲鲇经济价值低,体被盔甲,长相丑陋,是华南地区渔民厌恶的“魔鬼鱼”。

齐氏罗非鱼又称红腹罗非鱼,原产于非洲,最初作为养殖鱼类引进我国。齐氏罗非鱼已在长江以南地区形成入侵,是目前扩散速度最快、危害最大的罗非鱼种类。高红婷等(2008)研究表明,罗非鱼加快了水体的富营养化进程,罗非鱼的存在影响悬浮物的沉降。Gu et al.(2019)研究表明,齐氏罗非鱼大量取食水草,对水生植物和水生生态系统造成了致命威胁,导致了部分水草型湖泊

生态系统的崩溃和水质的下降。同时,齐氏罗非鱼因体型上限较小,经济价值较低,并非理想的养殖对象,其自然种群越来越庞大。

西湖遭受豹纹翼甲鲇和齐氏罗非鱼的入侵严重,一方面,惠州西湖与东江有直接相通的水体交换区域,容易引起湖泊和河流外来鱼类的相互交换,使其栖息地多样化并适应更多的水域环境,不利于外来鱼类的后续治理;另一方面,虽然本次调查到的外来鱼类种类数不多,但这并不代表西湖里不存在其他外来鱼类。已有研究表明,广东地区遭受多种外来鱼类的入侵,如:尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、伽利略罗非鱼、豹纹翼甲鲇、麦瑞加拉鲮 *Cirrhinus mrigala* Hamilton、革胡子鲇 *Clarias lazera* Linnaeus、条纹鲮脂鲤 *Prochilodus scrofa* Steindachner 等(顾党恩等,2012;朱赟杰等,2016;Gu et al., 2018; Yu et al., 2019)。针对惠州西湖外来鱼类入侵现状,应及时开发针对豹纹翼甲鲇和齐氏罗非鱼的有效防控技术,定期捕捞清除,抑制其种群进一步扩大;进一步加强对惠州西湖的全面监测调查。

参考文献

陈炳辉, 2012. 南方浅水湖泊浮游动物结构: 鱼类和生物调控的影响. 硕士学位论文. 广州: 暨南大学.

陈光荣, 钟萍, 张修峰, 谢贻发, 李传红, 2008. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系. 湖泊科学, 20(3): 351-356.

程瑞春, 张占海, 惠建平, 赵明月, 宋显宇, 2020. 内蒙古蝶类物种多样性分析. 安徽农学通报, 26(5): 32-40.

高红婷, 柴夏, 刘从玉, 2008. 罗非鱼对浅水型湖泊生态系统营养水平的影响. 江苏环境科技, 21(S1): 29-31.

戈昕宇, 洪雪萌, 马方舟, 刘波, 李俊兰, 2018. 内蒙古赛罕乌拉自然保护区蝶类群落多样性. 生态学杂志, 37(8): 2376-2383.

顾党恩, 罗刚, 黄宏坤, 贾涛, 张弛, 沈禹羲, 陈熹贤, 徐猛, 韦慧, 房苗, 余梵冬, 舒璐, 汪学杰, 胡隐昌, 2023. 农业农村部等六部门发布《重点管理外来入侵物种名录》. 中国水产(1): 8-11.

顾党恩, 牟希东, 罗渡, 李莹莹, 汪学杰, 宋红梅, 罗建仁, 胡隐昌, 2012. 广东省主要水系外来水生动物初步调查. 生物安全学报, 21(4): 272-276.

李家乐, 董志国, 李应森, 王成辉, 2007. 中国外来水生动物. 上海: 上海科学技术出版社.

- 苗滕, 高健, 陈炳辉, 刘正文, 2013. 惠州西湖生态修复对浮游甲壳动物群落结构的影响. *生态科学*, 32(3): 324-330.
- 全国水产技术推广总站, 中国水产学会, 2020. 中国常见外来水生动植物图鉴. 北京: 中国农业出版社.
- 万方浩, 郭建英, 张峰, 2009. 中国生物入侵研究. 北京: 科学出版社.
- 王震, 2018. 长江上游干流鱼类早期资源多样性和时空格局. 硕士学位论文. 武汉: 中国科学院大学.
- 韦慧, 刘超, 胡隐昌, 汪学杰, 牟希东, 顾党恩, 徐猛, 房苗, 2022. 基于外来水生生物风险筛选工具评估外来观赏鱼在中国的入侵风险: 以甲鲶科鱼类为例. *生态与农村环境学报*, 38(4): 494-503.
- 郑慈英, 1989. 珠江鱼类志. 北京: 科技出版社.
- 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 华南师范大学, 暨南大学, 湛江水产学院, 上海水产大学, 1991. 广东淡水鱼类志. 广州: 广东科技出版社.
- 朱赞杰, 顾党恩, 韦慧, 牟希东, 罗建仁, 胡隐昌, 2016. 华南地区外来鱼类革胡子鲶的建群状况. *淡水渔业*, 46(1): 109-112.
- GOZLAN R E, NEWTON A C, HULME P E, 2008. Biological invasions: benefits versus risks. *Science*, 324: 1015-1016.
- GU D E, YU F D, YANG Y X, XU M, WEI H, LUO D, MU X D, HU Y C, 2019. *Tilapia* fisheries in Guangdong Province, China: socio-economic benefits, and threats on native ecosystems and economics. *Fisheries Management and Ecology*, 26(2): 97-107.
- GU D E, HU Y C, XU M, WEI H, LUO D, YANG Y X, YU F D, MU X D, 2018. Fish invasion in the river systems of Guangdong Province, South China: several possible indicators of their success. *Fisheries Management and Ecology*, 25(1): 44-53.
- LIU F, WANG J W, ZHANG F B, LIU H Z, 2020. Spatial organization of fish assemblages in the Chishui River, the last free-flowing tributary of the upper Yangtze River, China. *Ecology of Freshwater Fish*, 30(1): 1-13.
- LOWE S, BROWNE M, BOUDJELAS S, 2000. 100 of the world's worst invasive alien species. *Aliens*, 12: 1-12.
- OTTINGER M, CLAUSS K, KUENZER C, 2016. Aquaculture: relevance, distribution, impacts and spatial assessments—A review. *Ocean and Coastal Management*, 119(6): 244-266.
- RADHAKRISHNAN K V, LAN Z J, ZHAO J, QING N, HUANG X L, 2011. Invasion of the African sharp-tooth catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) in South China. *Biological Invasions*, 13(8): 1723-1727.
- RAHEL F J, OLDEN J D, 2008. Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology*, 22(3): 521-533.
- STRAYER D L, 2010. Alien species in fresh waters: ecological effects, interactions with other stressors, and prospects for the future. *Freshwater Biology*, 55(S1): 152-174.
- YU F D, GU D E, TONG Y N, LI G J, WEI H, MU X D, XU M, YANG Y X, LUO D, LI F Y, HU Y C, 2019. The current distribution of invasive mrigal carp (*Cirrhinus mrigala*) in Southern China, and its potential impacts on native mud carp (*Cirrhinus molitorella*) populations. *Journal of Freshwater Ecology*, 34(1): 603-616.

(责任编辑: 郑姗姗)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.03.009

番茄潜叶蛾对不同类型杀虫剂的敏感性

张治科*, 李媛, 张宁

宁夏农林科学院植物保护研究所, 宁夏植物病虫害防治重点实验室, 宁夏银川 750002

摘要:【目的】番茄潜叶蛾是一种对番茄具有毁灭性危害的世界入侵害虫,本研究测定了不同类型药剂对入侵害虫番茄潜叶蛾的毒力活性及防治效果,为生产中科学防治番茄潜叶蛾提供理论依据。【方法】采用室内毒力测定方法,计算各药剂对不同龄期幼虫的毒力回归方程;采用田间防效评价方法,得出药后1~21 d各药剂对幼虫的防效,综合比较分析不同类型药剂对番茄潜叶蛾的控制作用。【结果】室内毒力测定结果表明,植物源杀虫剂印楝素和抗生素类杀虫剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对番茄潜叶蛾的毒性相对最强,其中印楝素对1龄幼虫的毒力最强,其 LC_{50} 为 $3.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对2~4龄幼虫的毒力最强,其 LC_{50} 分别为 7.1046 、 7.5663 和 $4.375\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;其次是苯甲酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺和合成杀虫剂乙基多杀菌素;拟除虫菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯、昆虫生长调节剂类杀虫剂甲氧虫酰肼对番茄潜叶蛾也有较好的毒杀作用;新烟碱类杀虫剂吡虫啉、噻虫嗪、烯啶虫胺对番茄潜叶蛾的毒性相对较弱。田间防效结果表明,抗生素类杀虫剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐的防效相对最高、持效性最好,药后第7、14和21天防效分别为74.11%、71.42%和60.03%;其次是苯甲酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺、合成杀虫剂乙基多杀菌素和拟除虫菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯;植物源杀虫剂印楝素的持效性较好,药后第7~21天的防效均高于50%;昆虫生长调节剂类杀虫剂甲氧虫酰肼以及新烟碱类杀虫剂吡虫啉、噻虫嗪、烯啶虫胺对番茄潜叶蛾的田间防效相对较弱。【结论】抗生素类杀虫剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、苯甲酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺和合成杀虫剂乙基多杀菌素可作为生产中防治番茄潜叶蛾的首选药剂,具有较好的应用前景,植物源杀虫剂印楝素和拟除虫菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯可作为交替使用药剂。

关键词: 番茄潜叶蛾; 杀虫剂; 毒力测定; 田间防效

Toxicity of various insecticides against *Tuta absoluta*

ZHANG Zhike*, LI Yuan, ZHANG Ning

Ningxia Key Laboratory of Plant Diseases and Pests Control, Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China

Abstract:【Aim】*Tuta absoluta* is a type of worldwide invasive pest that causes destructive damage to tomatoes. To provide a theoretical basis for the scientific control of *T. absoluta* production, we determined the toxicity and control effect of various pesticides against *T. absoluta* larvae.【Method】The toxicity regression equation of each pesticide on different instar larvae was calculated using toxicity measurements. The efficacy of each pesticide on larvae was determined from 1 to 21 days after treatment via field efficacy evaluation. The control effects of various types of pesticides on tomato leaf miner were comprehensively analyzed. Further the control effects of various insecticides on *T. absoluta* were compared and analyzed using indoor toxicity tests and field trials.【Result】The results of indoor toxicity tests showed that the sensitivities of azadirachtin and emamectin benzoate were the strongest toward *T. absoluta*. Azadirachtin exhibited the strongest toxicity against the 1st instar larvae, with an LC_{50} value of $3.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The toxicity of emamectin benzoate was strongest against the 2nd~4th instar larvae, with LC_{50} values of 7.1046 , 7.5663 , and $4.375\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. This was followed by chlorphenamide and ethyl polybactericide. Beta-cypermethrin and methoxyfenozide also exhibited high toxicity against *T. absoluta*. The sensitivities of imidacloprid, thiamethoxam, and nitenpyram against *T. absoluta* were relatively weak. The results of the field control showed that emamectin benzoate had the best control effect and persistence, with control effects of 74.11%, 71.42%, and 60.03% on the 7th, 14th, and 21st days after treatment, respectively, followed by chloramphenicol, ethyl polybactericide, and beta-cypermethrin. Azadirachtin exhibited good persistence, and the control effect of azadirachtin was greater

收稿日期(Received): 2023-02-14 接受日期(Accepted): 2023-11-26

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(2022FRD05037); 银川市农业园区科技人才服务团队项目

作者简介: 张治科,男,博士,研究员。研究方向: 昆虫生态与综合防治

* 通信作者(Author for correspondence), 张治科, E-mail: zhangzhike98@163.com

than 50%, 7–21 days after treatment. Methoxyfenozide, imidacloprid, thiamethoxam, and nitenpyram exerted relatively weak effects on *T. absoluta*. 【Conclusion】 Emamectin benzoate, chloramphenicol benzamide, and ethyl polybactericide, which have good application prospects, could be used as the first choice of pesticides to control *T. absoluta* in production. Azadirachtin and beta cyhalothrin could be used alternatively.

Key words: *Tuta absoluta*; pesticides; toxicity; field efficacy

番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* Meyrick, 又名番茄麦蛾、番茄潜麦蛾, 隶属于鳞翅目 Lepidoptera 麦蛾科 Gelechiidae, 起源于南美洲, 2006 年在西班牙发现, 随后迅速传入欧洲、亚洲和非洲 (Ibrahim *et al.*, 2019; Mateus *et al.*, 2017; Reihaneh *et al.*, 2018)。迄今为止, 全球已有 100 多个国家和地区出现相关报道 (陆永跃, 2021; 吴圣勇等, 2022), 该虫已成为番茄 *Solanum lycopersicum* L. 等茄科作物上重要害虫。我国西北和西南接壤的俄罗斯、哈萨克斯坦、印度和尼泊尔等国家均已发现该虫入侵 (Izhevsky *et al.*, 2011; Viraktamath *et al.*, 2015)。2017 年 8 月, 我国首次在新疆伊犁地区发现番茄潜叶蛾 (李晓维等, 2022), 2018 年 3 月在云南临沧地区害 (张桂芬等, 2020), 其后在湖南、四川、广西、宁夏等地相继发现 (张治科等, 2022; Mateus *et al.*, 2017)。番茄潜叶蛾可以危害包括茄科、豆科、菊科、十字花科以及禾本科在内的近 40 余种植物, 尤其嗜食番茄 (李晓维等, 2019; 张桂芬等, 2019)。番茄潜叶蛾以幼虫通过潜入叶片、嫩芽、顶梢、果实危害, 造成番茄品质和产量下降 (Nicolas *et al.*, 2010), 受害果实丧失经济价值 (王文倩等, 2022)。若防治不当, 可造成 80% ~ 100% 的损失 (Nicolas *et al.*, 2010), 严重制约番茄产业的高质量发展。

化学防治是目前生产中防治番茄潜叶蛾的主要手段之一 (Mateus *et al.*, 2017), 见效快, 可有效控制番茄潜叶蛾的扩散。但由于番茄潜叶蛾的世代周期短、繁殖能力强、易暴发成灾, 且该虫主要在幼虫期危害 (王俊等, 2021), 幼虫个体较小、危害隐蔽, 加之大量化学药剂的不科学使用导致的“3R”问题 (Ingegno *et al.*, 2019), 因此, 筛选理想的药剂进行针对性的防治至关重要。目前, 关于宁夏地区番茄潜叶蛾的抗药性及化学药剂应用尚未见到相关报道。本研究通过选择生产中常用的不同类型化学药剂, 对番茄潜叶蛾幼虫的 4 个虫龄分别进行室内毒力测定, 随后开展田间防效试验验证, 筛选出防治效果较好的药剂, 以期为宁夏地区及周边省份的番茄潜叶蛾有效控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试药剂

25% 噻虫嗪水分散粒剂 (河北国欣诺生物技术有限公司), 200 g · L⁻¹ 氯虫苯甲酰胺悬浮剂 (美国富美实公司), 6% 鱼藤酮微乳剂 (北京三浦百草绿色植物制剂有限公司), 20% 阿维 · 杀虫单微乳剂 (山东省烟台科达化工有限公司), 5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐水分散粒剂 (江西众和化工有限公司), 5% 阿维菌素乳油 (河北冠龙农化有限公司), 0.3% 印楝乳油 (成都绿金生物科技有限责任公司), 4.5% 高效氯氰菊酯乳油 (江苏华裕农化有限公司), 20% 烯啶虫胺水分散粒剂 (陕西华戎凯威生物有限公司), 60 g · L⁻¹ 乙基多杀菌素悬浮剂 [中农立华 (天津) 农用化学品有限公司], 240 g · L⁻¹ 甲氧虫酰肼悬浮剂 [中农立华 (天津) 农用化学品有限公司], 70% 吡虫啉可湿性粉剂 (江苏克胜集团股份有限公司)。

1.2 供试虫源

于 2022 年 4—5 月将宁夏银川市西夏区芦花乡设施番茄中带有番茄潜叶蛾幼虫的叶片带回室内, 放入 RXZ-430C 智能人工气候箱 (温度 23 ℃, 光周期 14 L : 10 D, 相对湿度 65% ± 5%), 及时补充新鲜叶片, 选择同龄期健康的番茄潜叶蛾开展毒力测定试验。

1.3 室内毒力测定

在预试验的基础上, 在室内将供试药剂用水按照体积比稀释成不同有效成分含量梯度: 噻虫嗪 500.000、250.000、125.000、62.500、31.250、15.630、7.813 mg · L⁻¹, 氯虫苯甲酰胺 100.00、50.00、25.00、12.50、6.25 mg · L⁻¹, 鱼藤酮 30.000、15.000、7.500、3.750、1.875 mg · L⁻¹, 阿维 · 杀虫单 100.00、50.00、25.00、12.50、6.25 mg · L⁻¹, 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 25.000、12.500、6.250、3.125、1.560、0.780、0.390 mg · L⁻¹, 阿维菌素 100.000、50.000、25.000、12.500、6.250、3.125 mg · L⁻¹, 印楝 24.000、12.000、6.000、3.000、1.500、0.750、0.375 mg · L⁻¹, 高效氯氰菊酯

45.000、22.500、11.250、5.625、2.813 mg · L⁻¹, 烯啶虫胺 100.00、50.00、25.00、12.50、6.25 mg · L⁻¹, 乙基多杀菌素 30.000、15.000、7.500、3.750、1.875 mg · L⁻¹ 甲氧虫酰肼 480.0、240.0、120.0、60.0、30.0、15.0、7.5 mg · L⁻¹, 吡虫啉 1400.00、700.00、350.00、175.00、87.50、43.75 mg · L⁻¹。

采用浸叶法(王伟等, 2023), 挑选带有 1~2 头相同龄期幼虫的叶片, 分别浸入不同浓度供试药液 10 s 后取出, 用滤纸吸去叶片上多余药液, 自然晾干后移入培养皿中, 用封口膜封口。每处理 20 头, 重复 3 次, 设清水对照。48 h 后检查试虫存活情况(用小毛笔笔峰轻触虫体, 无明显反应视为死亡)。依据张治科等(2022)判断番茄潜叶蛾幼虫龄期。

1.4 田间防效评价

2022 年 6—7 月在番茄潜叶蛾发生较重的宁夏银川市西夏区芦花乡花期的设施番茄大棚内划分试验小区, 随机区组排列, 开展各药剂对番茄潜叶蛾的田间防效试验。根据室内毒力测定结果, 将各药剂的有效成分质量浓度分别设为 60 g · L⁻¹ 乙基多杀菌素悬浮剂 40 mg · L⁻¹、20% 阿维 · 杀虫单微乳剂 200 mg · L⁻¹、5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐水分散粒剂 25 mg · L⁻¹、5% 阿维菌素乳油 200 mg · L⁻¹、240 g · L⁻¹ 甲氧虫酰肼悬浮剂 120 mg · L⁻¹、200 g · L⁻¹ 氯虫苯甲酰胺悬浮剂 50 mg · L⁻¹、6% 鱼藤酮微乳剂 30 mg · L⁻¹、0.3% 印楝素乳油 24 mg · L⁻¹、25% 噻虫嗪水分散粒剂 500 mg · L⁻¹、20% 烯啶虫胺水分散粒剂 200 mg · L⁻¹、70% 吡虫啉可湿性粉剂 700 mg · L⁻¹、4.5% 高效氯氰菊酯乳油 45 mg · L⁻¹, 另设清水作对照, 共 13 个处理。每处理防治面积 30 m², 90 株番茄, 用药量 2.7 L, 采用高压喷雾器进行喷施。每个处理或对照均重复 3 次。分别于施药前及施药后 1、3、7、14 和 21 d 调查幼虫数量, 随机 3 点取样, 每个样点随机选择一株番茄, 统计幼虫数量。

1.5 数据处理及分析

采用 Excel 2016、DPS、Origin 软件分析数据, 拟合毒力回归方程, 计算致死中浓度 LC₅₀ 及其 95% 置信限、田间虫口减退率和校正虫口减退率, 评价供试药剂对番茄潜叶蛾的毒力及防治效果。依据不同药剂 LC₅₀ 95% 置信限是否有重叠判断不同药剂毒力差异显著性; 单因素方差分析数据, Duncan 新

复极差法比较田间防效差异显著性($P<0.05$)。

虫口减退率和校正虫口减退率计算公式为:

$$Q/\% = \frac{a-e}{a} \times 100 \text{ 和 } p_r/\% = \frac{P_e - P_{ck}}{1 - P_{ck}} \times 100$$

式中, a 为上次调查各处理平均虫量, e 为本次调查各样点平均虫量, P_e 为防治区虫口减退率, P_{ck} 为对照区虫口减退率。

2 结果与分析

2.1 不同药剂对番茄潜叶蛾幼虫的室内毒力

不同药剂对番茄潜叶蛾不同龄期幼虫的毒力测定结果见表 1, 对 1 龄幼虫, 印楝素的毒力相对最强, LC₅₀ 为 3.22 mg · L⁻¹, 其次是甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、氯虫苯甲酰胺、乙基多杀菌素和高效氯氰菊酯, 其余药剂的毒力相对较低; 对 2 龄幼虫, 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐的毒力相对最强, LC₅₀ 为 7.1046 mg · L⁻¹, 其次是氯虫苯甲酰胺、印楝素、甲氧虫酰肼和高效氯氰菊酯, 其余药剂的毒力相对较低; 对 3 龄幼虫, 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐的毒力相对最强, LC₅₀ 为 7.5663 mg · L⁻¹, 其次是印楝素、氯虫苯甲酰胺、乙基多杀菌素和鱼藤酮, 其余药剂的毒力相对较低; 对 4 龄幼虫, 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐的毒力相对最强, LC₅₀ 为 4.375 mg · L⁻¹, 其次是印楝素、乙基多杀菌素和氯虫苯甲酰胺, 其余药剂的毒力相对较低。

从 LC₅₀ 变化趋势来看, 大多供试药剂的毒力与番茄潜叶蛾幼虫的虫龄呈明显负相关, 如噻虫嗪对番茄潜叶蛾 1~4 龄幼虫的 LC₅₀ 依次为 104.7476、224.7317、296.4312 和 471.1952 mg · L⁻¹, 氯虫苯甲酰胺的依次为 8.9753、10.0619、17.4159 和 26.3359 mg · L⁻¹, 印楝素的依次为 3.2206、11.6335、14.4862 和 20.0996 mg · L⁻¹, 高效氯氰菊酯的依次为 11.295、20.2797、35.1626 和 35.6681 mg · L⁻¹。

从杀虫剂的类型比较分析, 抗生素类杀虫剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、植物源杀虫剂印楝素、苯甲酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺、合成杀虫剂乙基多杀菌素对番茄潜叶蛾的毒力较强, 拟除虫菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯、昆虫生长调节剂类杀虫剂甲氧虫酰肼对番茄潜叶蛾也有较好的毒杀作用, 新烟碱类杀虫剂吡虫啉、噻虫嗪、烯啶虫胺对番茄潜叶蛾的毒力相对较弱。

表 1 不同类型药剂对番茄潜叶蛾幼虫室内的毒力
Table 1 Toxicity of different kinds od insecticides against *T. absoluta* larvae

药剂 Insecticide	虫龄 Insect age	毒力回归方程 Toxic regression equation	相关系数 Correlation coefficient	χ^2 Chi- square	致死中浓度 LC ₅₀ / (mg · L ⁻¹)	95%置信区间 95% confidence interval/(mg · L ⁻¹)
噻虫嗪 Thiamethoxam	1	Y=0.8852X+3.2118	0.9301	1.7497	104.7476	46.1684~398.6150
	2	Y=0.6519X+3.4670	0.9260	0.9231	224.7317	75.4049~555.0928
	3	Y=0.9244X+2.1749	0.9127	1.6913	296.4312	123.2525~308.9589
	4	Y=0.8705X+2.6729	0.9261	1.2517	471.1952	167.9854~756.6555
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	1	Y=1.3836X+3.6815	0.8158	1.7885	8.9753	0.4390~18.1736
	2	Y=1.2158X+3.7810	0.9173	1.0562	10.0619	0.5592~20.6587
	3	Y=0.9234X+3.8541	0.9563	0.4859	17.4159	0.0069~56.14464
	4	Y=0.9200X+3.6931	0.9470	0.5253	26.3359	2.8683~50.0619
鱼藤酮 Rotenone	1	Y=0.8235X+3.8483	0.9800	0.1323	25.0377	9.5428~99.0403
	2	Y=1.0380X+3.4850	0.9609	0.4621	28.8084	11.2968~56.2358
	3	Y=1.0307X+3.6545	0.9541	0.5582	20.2069	8.6748~98.1462
	4	Y=0.9845X+3.2862	0.9595	0.3277	55.0467	13.7811~70.0382
阿维·杀虫单 Abamectin monosultap	1	Y=1.0124X+3.0624	0.9856	0.1549	81.9914	32.8304~158.3475
	2	Y=1.2157X+2.7138	0.9630	0.4816	75.9597	34.8606~105.7750
	3	Y=1.5397X+1.9236	0.8490	1.6434	99.5381	46.9472~284.0512
	4	Y=1.3277X+2.2501	0.8113	1.9449	117.8162	49.2356~564.0458
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	1	Y=0.9219X+4.3488	0.9370	1.1052	5.0859	1.6831~21.5049
	2	Y=1.2493X+3.9362	0.8200	2.2873	7.1046	3.8549~21.5546
	3	Y=0.9656X+4.1513	0.9900	0.0993	7.5663	2.0695~34.2270
	4	Y=0.8625X+4.4471	0.9795	0.4166	4.3750	1.8180~14.5973
阿维菌素 Avermectin	1	Y=0.7099X+3.7712	0.9429	1.0605	53.8209	18.6407~88.3737
	2	Y=0.9366X+3.5098	0.9293	1.3659	38.9945	17.188~116.5487
	3	Y=1.7160X+1.9332	0.8477	2.0201	61.2595	34.0497~331.5993
	4	Y=0.5645X+3.8457	0.9055	0.8957	110.8632	26.3303~208.2589
印楝 Azadirachtin	1	Y=0.4786X+4.7569	0.9724	0.2033	3.2206	0.4931~10.3987
	2	Y=0.5228X+4.4428	0.9172	0.9000	11.6335	3.1378~25.3687
	3	Y=1.2285X+3.5738	0.8152	1.6678	14.4862	6.7144~185.8483
	4	Y=1.1844X+3.4565	0.8254	2.2124	20.0996	8.1275~92.1658
高效氯氟菊酯 Beta-cypermethrin	1	Y=0.8519X+4.1030	0.8937	1.5070	11.2950	3.8056~123.3229
	2	Y=1.2543X+3.3605	0.9314	1.1443	20.2797	10.0082~48.8718
	3	Y=1.3719X+2.8790	0.8200	1.2598	35.1626	17.4347~62.6171
	4	Y=0.5925X+4.0803	0.9374	0.4742	35.6681	8.481~196.1311
烯啶虫胺 Nitenpyram	1	Y=1.0605X+2.8735	0.7517	3.1043	101.2232	40.852~278.5815
	2	Y=1.0572X+2.9657	0.9700	0.3263	83.9847	36.1086~237.6525
	3	Y=0.4774X+4.1501	0.9520	0.1254	60.2735	17.2055~83.4949
	4	Y=0.6213X+3.6034	0.7979	1.2904	176.9722	32.8954~398.9212
乙基多杀菌素 Spinetoram	1	Y=0.8761X+4.0892	0.9148	0.8972	10.9568	3.5208~69.8903
	2	Y=0.9139X+3.7505	0.9316	0.8056	23.2939	9.5739~65.7559
	3	Y=0.9213X+3.8199	0.8975	1.0837	19.0957	7.3736~67.5871
	4	Y=0.9811X+3.6597	0.9120	1.1365	23.2395	9.8221~88.3771
甲氧虫酰肼 Methoxyfenozide	1	Y=1.4879X+2.7338	0.8249	2.1720	33.3518	1.6817~69.3978
	2	Y=0.9965X+3.8698	0.7878	1.7657	13.6210	1.2923~31.4030
	3	Y=0.9213X+3.8199	0.8975	1.0837	19.0957	7.3736~68.1489
	4	Y=1.1790X+2.7623	0.9914	0.1401	79.0760	17.0198~162.8675
吡虫啉 Imidacloprid	1	Y=0.4515X+3.8472	0.8992	0.5101	357.3110	158.5905~409.2790
	2	Y=0.8413X+2.5021	0.9747	0.3759	931.7463	540.0797~1858.3579
	3	Y=0.4957X+3.3327	0.9048	0.3387	2308.2707	867.0396~9687.2090
	4	Y=0.5213X+3.3563	0.9797	0.0667	1423.3786	329.5764~2158.3678

2.2 田间防治效果

不同药剂对番茄潜叶蛾的田间防治效果存在一定的差异(表 2), 抗生素类杀虫剂甲氨基阿维菌

素苯甲酸盐的防效相对最高, 药后第 7、14 天防效分别为 74.11%和 71.42%, 第 21 天为 60.03%, 表明甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对番茄潜叶蛾具有很好

的持效性,且药后 7 d 的防效除氯虫苯甲酰胺和乙基多杀菌素外,显著高于其他药剂;其次是苯甲酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺,药后第 7、14 天防效分别为 67.55%和 61.83%,第 21 天的防效高于 50%,表现出较好的防效和持效性;合成杀虫剂乙基多杀菌素和拟除虫菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯也表现出较好的田间防治效果,药后第 7 天的防效分别为

69.64%和 56.55%;植物源杀虫剂印楝素的速效性相对较弱,但药后第 7、14 和 21 天的防效均高于 50%,持效性较好,且药后第 14 和 21 天的防效与本次田间防效表现最好的药剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐差异不显著;昆虫生长调节剂类杀虫剂甲氧虫酰肼以及新烟碱类杀虫剂吡虫啉、噻虫嗪、烯啶虫胺对番茄潜叶蛾的田间防效相对较弱。

表 2 不同类型杀虫剂对番茄潜叶蛾的田间防效
Table 2 The field efficacy of different kinds of pesticides against *T. absoluta*

供试药剂 Insecticides	药后 1 天 1 d after application		药后 3 天 3 d after application		药后 7 天 7 d after application	
	虫口减退率 Decreased rate/%	防效 Control efficacy/%	虫口减退率 Decreased rate/%	防效 Control efficacy/%	虫口减退率 Decreased rate/%	防效 Control efficacy/%
噻虫嗪 Thiamethoxam	26.39±6.94abc	32.61±5.33a	7.87±3.96defg	29.54±3.47efg	-9.72±5.01cd	45.83±2.08cd
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	21.30±2.45abc	27.02±7.98a	48.15±1.85a	60.23±2.86a	34.72±1.39ab	67.56±2.65ab
鱼藤酮 Rotenone	-1.39±8.45d	5.84±12.61ab	-5.56±5.56fg	19.32±4.30fg	-37.50±15.77de	32.44±5.75e
阿维.杀虫单 Abamectin monosultap	34.72±1.39a	39.28±7.44a	30.56±2.78abc	46.97±1.51abcd	-9.72±5.01cd	45.83±2.08cd
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	7.87±3.96bcd	14.76±8.66ab	43.06±9.72a	56.06±8.44ab	48.15±1.85a	74.11±2.87a
阿维菌素 Avermectin	3.70±3.70cd	11.43±5.95ab	21.30±2.45bcd	39.77±2.86bcde	-14.81±9.80cd	43.45±3.62de
印楝素 Azadirachtin	-14.81±9.80d	-6.42±13.56b	-1.39±8.45efg	22.35±7.20fg	12.04±7.23bc	56.55±3.62bc
高效氯氰菊酯 Beta cypermethrin	30.56±2.78ab	35.94±5.55a	34.72±1.39ab	49.99±2.62abc	12.04±7.23bc	56.55±3.62bc
烯啶虫胺 Nitenpyram	-14.81±9.80d	-6.42±13.56b	-9.72±5.01g	16.29±1.89g	-63.43±11.24e	19.64±0.89f
乙基多杀菌素 Spinetoram	25.46±6.23abc	30.35±10.87a	34.72±1.39ab	49.99±2.62abc	38.89±5.56ab	69.64±3.72a
甲氧虫酰肼 Methoxyfenozide	-1.39±8.45d	5.84±12.61ab	16.20±11.12bcde	35.61±9.49cdef	-19.91±18.08cd	41.07±7.70de
吡虫啉 Imidacloprid	-1.39±8.44d	5.84±12.61ab	12.04±7.23cdef	32.57±6.47defg	-5.56±5.56cd	47.92±2.08cd
CK	-10.19±10.92d	-	-31.02±4.56h	-	-103.70±16.14f	-

供试药剂 Insecticides	药后 14 天 14 d after application		药后 21 天 21 d after application	
	虫口减退率 Decreased rate/%	防效 Control efficacy/%	虫口减退率 Decreased rate/%	防效 Control efficacy/%
噻虫嗪 Thiamethoxam	-94.44±14.70d	30.20±0.88e	-183.33±25.46ef	14.77±3.58g
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	-5.56±5.56ab	61.84±2.42ab	-64.35±18.57abc	50.56±3.60bc
鱼藤酮 Rotenone	-64.35±18.57cd	40.78±5.78de	-108.80±20.61bcd	37.24±2.54def
阿维.杀虫单 Abamectin monosultap	-68.52±15.82cd	39.33±4.37de	-103.70±16.14bcd	38.68±0.22def
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	21.30±2.45a	71.42±2.38a	-32.41±8.83a	60.03±1.19a
阿维菌素 Avermectin	-50.00±9.62bcd	46.02±1.59cd	-121.30±17.74cd	33.39±1.31f
印楝素 Azadirachtin	-14.81±9.80ab	58.50±3.72abc	-55.09±14.26ab	53.29±2.29ab
高效氯氰菊酯 Beta cypermethrin	-19.91±18.08abc	56.61±6.64bc	-63.43±11.24abc	50.72±0.72bc
烯啶虫胺 Nitenpyram	-98.61±16.02d	28.75±1.59e	-161.57±22.46de	21.35±1.13g
乙基多杀菌素 Spinetoram	-10.65±13.23ab	59.95±5.07ab	-87.04±24.50 abc	43.81±5.02cd
甲氧虫酰肼 Methoxyfenozide	-41.67±12.73bc	48.92±4.02bcd	-112.96±18.79bcd	35.95±1.26ef
吡虫啉 Imidacloprid	-64.35±18.57cd	40.78±5.78de	-90.28±14.50abc	42.70±0.39de
CK	-179.17±24.41e	-	-232.41±27.51f	-

同列数据不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。
Different lowercase letters indicated significant difference at 0.05 level.

3 讨论与结论

国内外已有相关的不同药剂对番茄潜叶蛾的药效评价,涉及到的药剂主要有乙基多杀菌素、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、阿维菌素、四唑虫酰胺、氯

虫苯甲酰胺、呋虫胺、茚虫威、高效氯氰菊酯、溴虫腈等(阿米热·牙生江等,2020;李晓维等,2022;庾琴等,2022)。本研究供试药剂中,植物源杀虫剂印楝素对番茄潜叶蛾 1~4 龄幼虫的毒力较强,其毒力与番茄潜叶蛾幼虫的虫龄呈明显的负相关,这可

能与番茄潜叶蛾幼虫的发育有关,与低龄幼虫相比,高龄幼虫的表皮较厚(海永强和刘媛,2022),印楝素不易穿透,致使高龄幼虫对其敏感度相对较低。文吉辉等(2008)报道,印楝素对烟粉虱低龄若虫的毒力比高龄若虫更强。本研究田间防效结果发现,印楝素的速效性相对较弱,但药后第 7、14 和 21 天的防效均高于 50%,持效性较好,印楝素是 21 世纪很有发展前景的植物源农药之一(徐德进等,2005),它被系统传导到植株各个部位,增强了控制害虫的潜力(徐德进等,2011; Coudriet *et al.*, 1985),且对天敌昆虫毒力低,有利于天敌昆虫种群的增长(Sabiiti & Muzeyi,2005),可作为交替使用药剂在农业生产中防治番茄潜叶蛾。

抗生素类杀虫剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐具有低成本、低毒(制剂近无毒)、无公害等生物农药的特点,在农业上可用于多种害虫防治(樊宗芳等,2021; 刘向蕊等,2014; 王龙龙等,2015; 王志平等,2010; 徐德进等,2011)。本研究中,甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对番茄潜叶蛾的毒力很高,在供试药剂中对 2~4 龄幼虫的毒力最强,其 LC_{50} 分别为 7.1046、7.5663 和 4.375 $mg \cdot L^{-1}$,且田间防效及持效性相对最好,药后第 7、14 和 21 天防效分别为 74.11%、71.42%和 60.03%;有研究报道,甲维盐、溴虫腈、多杀菌素、茚虫威、氯虫苯甲酰胺和高效氯氰菊酯 6 种杀虫剂中,对番茄潜叶蛾毒力最高的是甲维盐(李晓维等,2022);另有研究报道,甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对番茄潜叶蛾 2~3 龄幼虫的 LC_{50} 为 0.057 $mg \cdot L^{-1}$ (庾琴等,2022),与本研究结果差异较大,这可能与试验方法以及供试虫源的抗药程度不同有关。

此外,本研究还发现,苯甲酰脲类杀虫剂氯虫苯甲酰胺、合成杀虫剂乙基多杀菌素和拟除虫菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯对番茄潜叶蛾的室内毒力较强,且表现出较好的田间防效和持效性,在生产中可与印楝素、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐等药剂交替使用,降低番茄潜叶蛾对某类杀虫剂产生的抗药性。本研究室内毒力测定发现,昆虫生长调节剂类杀虫剂甲氧虫酰肼对番茄潜叶蛾也有较好的毒杀作用,但田间防治效果较低;另外,供试药剂中新烟碱类杀虫剂吡虫啉、噻虫嗪、烯啶虫胺对番茄潜叶蛾的毒力以及田间防治效果相对均较弱,究其原因还需进一步研究分析。

本研究表明,抗生素类杀虫剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、苯甲酰脲类杀虫剂氯虫苯甲酰胺和合成杀虫剂乙基多杀菌素可作为生产中防治番茄潜叶蛾的首选药剂,植物源杀虫剂印楝素和拟除虫菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯可作为交替使用药剂。生产中具体应用各种药剂时,还应综合考虑用药成本、对环境造成的风险等诸多因素,从而科学合理地使用杀虫剂,有效阻止番茄潜叶蛾的进一步传播扩散,降低或延缓番茄潜叶蛾对某类杀虫剂产生的抗药性,为促进番茄产业的高质量发展奠定基础。

参考文献

- 阿米热·牙生江,阿地力·沙塔尔,付开赞,丁新华,何江,吐尔逊·阿合买提,郭文超,2020. 9 种杀虫剂对番茄潜叶蛾的防治效果评价. *新疆农业科学*, 57(12): 2291-2298.
- 樊宗芳,宋洁蕾,桂富荣,和淑琪,2021. 5 种杀虫剂对西花蓟马和花蓟马的毒力及其生理酶活性的影响. *生物安全学报*, 30(3): 206-212.
- 海永强,刘媛,2022. 番茄潜叶蛾的形态特征和生物学习性. *中国植保导刊*, 42(8): 24-28.
- 李晓维,李栋,郭文超,吕要斌,2019. 番茄潜叶蛾对 4 种茄科植物的适应性研究. *植物检疫*, 33(3): 1-5.
- 李晓维,马琳,吕要斌,2022. 新疆和云南番茄潜叶蛾种群对六种杀虫剂的敏感性及其与解毒酶活性的关系. *昆虫学报*, 65(8): 1010-1017.
- 刘向蕊,吕宝乾,金启安,温海波,阎伟,彭正强,冯雨艳,2014. 5 种杀虫剂对入侵害虫椰子织蛾的室内毒力测定. *生物安全学报*, 23(1): 13-17.
- 陆永跃,2021. 警惕番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick) 在我国持续扩散入侵. *环境昆虫学报*, 43(2): 526-528.
- 王俊,高建诚,管辉,2021. 番茄潜叶蛾在新疆的发生情况与防控建议. *中国植保导刊*, 41(12): 83-84.
- 王龙龙,刘钰,崔蕊蕊,庄治国,薛超彬,庄占兴,2015. 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐研究开发现状与展望. *农药*, 54(6): 394-399.
- 王文倩,常吕恕,杨金睿,杨韵,杜广祖,肖关丽,陈斌,2022. 番茄潜叶蛾与马铃薯块茎蛾形态特征及为害症状的比较. *植物保护*, 48(4): 245-251.
- 王伟,黄秋实,袁海滨,张瑜,梁革梅,2023. 亚致死浓度氟啶虫胺腈对棉蚜生物学特性及生长发育基因的影响. *植物保护学报*, 50(3): 812-822.
- 王志平,倪雪荣,袁振亚,2010. 甲维盐等药剂对甜菜夜蛾田间药效试验简报. *上海农业科技*, 2(2): 130-131.

- 文吉辉, 侯茂林, 卢伟, 黎家文, 2008. 印楝素不同处理方法对烟粉虱的室内毒力测定. 中国农业科学, 41(4): 1242-1247.
- 吴圣勇, 张起恺, 张烨, 刁红亮, 张治科, 唐良德, 张田园, 张晓明, 雷仲仁, 2022. 番茄潜叶蛾综合防控技术研究进展. 植物保护, 49(2): 1-9.
- 徐德进, 常燕, 万晓泳, 张宏, 祝树德, 2005. 0.3%印楝素乳油对水稻褐飞虱的生物活性. 现代农药, 4(4): 25-29, 33.
- 徐德进, 季英华, 顾中言, 徐广春, 许小龙, 董玉轩, 2011. 10种杀虫剂对南京地区Q型烟粉虱的室内毒力测定. 江西农业学报, 23(12): 79-82.
- 庾琴, 郭晓君, 封云涛, 杜恩强, 刘新, 张润祥, 郝赤, 2022. 6种杀虫剂对南美番茄潜叶蛾的毒力及田间防效. 生物安全学报, 31(4): 345-350.
- 张桂芬, 冼晓青, 张毅波, 张蓉, 马德英, 刘万学, 高有华, 王俊, 杨子林, 李庆红, 王玉生, 薛延韬, 万方, 2020. 警惕南美番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick) 在中国扩散. 植物保护, 46(2): 281-286.
- 张桂芬, 马德英, 刘万学, 王玉生, 付文君, 王俊, 高有华, 万方浩, 2019. 中国新发现外来入侵害虫——南美番茄潜叶蛾(鳞翅目: 麦蛾科). 生物安全学报, 28(3): 200-203.
- 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁, 2022. 宁夏地区新发农业入侵生物番茄潜叶蛾的发生危害及防控. 中国瓜菜, 35(11): 111-116.
- COUDRIET D L, PRABHAKER N, MEYERDIRK D E, 1985. Sweetpotato whitefly (Homoptera: Aleyrodidae): effects of neem-seed extract on oviposition and immature stages. *Environmental Entomology*, 14(6): 776-779.
- IBRAHIM B, MUHAMMAD M M, HABEEB K S, NASIRU A, SULAIMAN S I, 2019. Determination of insecticide susceptibility of field populations of tomato leaf miner (*Tuta absoluta*) in Northern Nigeria. *Agriculture*, 9(1): 7-20.
- INGEGNOB L, MESSELINK G J, BODINO N, ILIADOU I A, DRISS L, WOELKE J B, LEMAN A, TAVELLA L, 2019. Functional response of the mirid predators *Dicyphus boliviari* and *Dicyphus errans* and their efficacy as biological control agents of *Tuta absoluta* on tomato. *Journal of Pest Science*, 92(4): 1457-1466.
- IZHEVSKY S S, AKHATOV A K, SINYOV S Y, 2011. *Tuta absoluta* has been detected in Russia. *Zashchita I Karantin Rastenii*: 40-44.
- MATEUS R C, ANTONIO B, ABHIJIN A, RAUL N C G, NICOLAS D, 2017. From the Western Palaearctic region to beyond: *Tuta absoluta* 10 years after invading Europe. *Journal of Pest Science*, 90(3): 787-796.
- NICOLAS D, ERIC W, KRIS A G W, GIOVANNI B, SALVATORE A, CONSUELO A, NARVA'EZ V, JOEL G, DIANA C R, ELISABETH T, JACQUES F, JEANNINE P, CHRISTINE P, TOMA'S C, ALBERTO U, 2010. Biological invasion of European tomato crops by *Tuta absoluta*: ecology, geographic expansion and prospects for biological control. *Journal of Pest Science*, 83(3): 197-215.
- REIHANEH B, MIR J H, SEYED A M, 2018. Insecticide susceptibility in *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) and metabolic characterization of resistance to diazinon. *Journal of Economic Entomology*, 111(4): 1-7.
- SABIITI S, MUZEYI BEKELE J, 2005. Effects of botanicals, a synthetic insecticide and an insect growth regulator on survival and development of the parasitoid wasp *Cotesia flavipes* parasitising the stem-boring moth *Chilo partellus*. *International Journal of Pest Management*, 51(1): 25-30.
- VIRAKTAMATH A C, KALLESHWARASWAMY, C M, MURTHY M S, VIRAKTAMATH C A, KUMAR N K K, 2015. Occurrence of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) in the malnad and hyderabad-karnataka regions of Karnataka, India. *Florida Entomologist*, 98(3): 970-971.

(责任编辑: 郭莹)

亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生物酶活性及田间发育动态的影响

杨春林¹, 胡 强², 李洪浩³, 席亚东^{4*}

¹乐山市植保植检站, 四川 乐山 614000; ²乐山师范学院竹类病虫害防控与资源开发四川省重点实验室, 四川 乐山 614000; ³四川省农业科学院, 四川 成都 610066; ⁴四川省农业科学院植物保护研究所/蔬菜品种改良与种质创新四川省重点实验室, 四川 成都 610066

摘要:【目的】了解氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的亚致死效应,为水稻生产中使用氯虫苯甲酰胺科学高效防治稻水象甲提供参考。【方法】以越冬代稻水象甲成虫为试虫,通过测定不同种群(RW-Js、RW-Gy、RW-Mz、RW-Zy、RW-Lc)稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性,确定氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的致死中浓度(LC₅₀)和亚致死剂量(LC₂₅);分别采用室内测定和田间调查的方法,研究亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲体内多种生物酶活性及田间发育动态的影响。【结果】不同来源稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性差异较大,RW-Js种群的LC₅₀值为RW-Gy种群的13.45倍,达到中等抗性水平;解毒酶抑制剂胡椒基丁醚(piperomyl butoxide, PBO)对氯虫苯甲酰胺的协同增效作用明显高于磷酸三苯酯(triphenyl phosphate, TPP)和顺丁烯二酸二乙酯(diethyl maleate, DEM);抗性种群RW-Js体内3种解毒酶活性较敏感种群RW-Gy显著增高($P<0.05$),其中多功能氧化酶(mixed function oxidase, MFO)变化最为明显。稻水象甲成虫经氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后,虫体内几种生物酶活性总体呈先升高后降低的趋势,具明显的时间效应,其中MFO活性在整个测定周期内均显著高于对照处理($P<0.05$);氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量对稻水象甲各虫态的田间始见期、发生高峰期和发生末期均产生不同程度的影响。【结论】解毒酶活性可能与稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性有关,MFO是稻水象甲对氯虫苯甲酰胺解毒代谢过程中最重要的酶,在抗性形成中起主要作用;亚致死剂量氯虫苯甲酰胺可延缓稻水象甲幼虫、蛹和一代成虫的生长发育,缩短成虫寿命、加快田间成虫消亡。

关键词: 稻水象甲; 氯虫苯甲酰胺; 亚致死剂量; 生物酶活性; 解毒酶抑制剂; 发育动态



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of sublethal doses of chlorantraniliprole on the enzyme activity and field development dynamics of *Lissorhoptrus oryzophilus*

YANG Chunlin¹, HU Qiang², LI Honghao³, XI Yadong^{4*}

¹Leshan Plant Protection and Quarantine Station, Leshan, Sichuan 614000, China; ²Bamboo Diseases and Pests Control and Resources Development Key Laboratory of Sichuan Province, Leshan Normal University, Leshan, Sichuan 614000, China;

³Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China; ⁴The Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Vegetable Germplasm Innovation and Variety Improvement Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610066, China

Abstract:【Aim】This study aimed to understand the sublethal effect of chlorantraniliprole on rice water weevil (*Lissorhoptrus oryzophilus* Kusehel) and to provide reference for the scientific and efficient control of *L. oryzophilus* Kusehel using chlorantraniliprole in rice production.【Method】Using the overwintering *L. oryzophilus* adults as test insects, the median lethal concentration (LC₅₀) and sublethal dose (LC₂₅) of chlorantraniliprole to populations RW-Js, RW-Gy, RW-Mz, RW-Zy, and RW-Lc were determined by

收稿日期(Received): 2023-10-24 接受日期(Accepted): 2024-01-25

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFYZ0021); 四川省农业科学院科技成果中试熟化与示范转化项目(2023ZSFXD02); 国家现代农业产业技术体系四川创新团队项目(川农函[2019]472号); 乐山市重点科技计划项目(14NZD141)。

作者简介: 杨春林, 男, 高级农艺师。研究方向: 农作物病虫害绿色防控。E-mail: myone23456789@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 席亚东, E-mail: xiyadong2002@126.com

measuring the sensitivity of *L. oryzaophilus* to chlorantraniliprole. The effects of sublethal doses of chlorantraniliprole on the activities of various biological enzymes and field development dynamics of *Lissorhoptrus oryzaophilus* were studied using indoor measurements and field investigations, respectively. 【Result】 Significant differences were noted in the sensitivity of different *L. oryzaophilus* populations to chlorantraniliprole, with the LC₅₀ value of RW-Js population being 13.45 times that of RW-Gy population, reaching a moderate resistance level. The synergistic effect of the detoxification enzyme inhibitor PBO on chlorantraniliprole was significantly greater than that of TPP and DEM. The activities of the three detoxifying enzymes in the resistant population, RW-Js, were significantly higher than those in the sensitive population, RW-Gy ($P<0.05$), with the most significant change observed in multifunctional oxidase (MFO). The activities of several biological enzymes in the *L. oryzaophilus* treated with LC₂₅ dose of chlorantraniliprole increased first and then decreased, and the activity of MFO was significantly higher than that of the control treatment throughout the entire measurement period ($P<0.05$). The LC₂₅ dose of chlorantraniliprole had a certain degree of impact on the initial, peak, and final stages of *L. oryzaophilus* occurrence in the field. 【Conclusion】 The activity of detoxification enzyme is possibly related to the sensitivity of *L. oryzaophilus* to chlorantraniliprole. MFO is the most important detoxification enzyme in the metabolism of chlorantraniliprole in *L. oryzaophilus*, and plays a major role in the development of resistance. Sublethal doses of chlorantraniliprole can delay the growth and development of *L. oryzaophilus* larvae, pupae, and first-generation adults, shorten their lifespan, and accelerate their extinction in the field.

Key words: *Lissorhoptrus oryzaophilus*; chlorantraniliprole; sublethal dose; biological enzyme activity; detoxifying enzyme inhibitors; developmental dynamics

外来入侵物种对当地生物多样性造成严重影响,是人类面临最严重的生态威胁之一,已经在全世界范围内造成巨大的经济损失(王蝉娟等, 2023)。稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzaophilus* Kusehel 属鞘翅目象甲科害虫,是全国农业植物检疫性有害生物(中华人民共和国农业农村部, 2020),被认为是世界最具威胁的 100 种外来入侵生物之一(Tindallkv & Stout, 2003)。稻水象甲起源于美国密西西比河流域,在美洲、欧洲、亚洲等水稻 *Oryza sativa* L. 种植区均有发生(Mohammad-amir & Godfrey, 2014)。稻水象甲成虫取食危害水稻叶片,幼虫蛀食水稻根部,影响水稻分蘖并造成生长缓慢、生育期延长(王小武等, 2018),可引起水稻严重减产,部分地区已成为仅次于稻飞虱 *Sogatella furcifera* Horvath 的水稻第二大害虫(孙文鹏, 2006)。稻水象甲具有扩散能力强、适生范围广、蔓延速度快等特点(丁新华等, 2017),防治难度大,一旦入侵很难根除。我国于 1988 年首次在河北省唐海县发现疫情(齐国君等, 2012),截至 2023 年 6 月底,全国 25 个省(自治区、直辖市),492 个县(市、区、旗)均有稻水象甲分布(中华人民共和国农业农村部, 2023)。

目前,我国稻水象甲防控以化学防治为主(王小武等, 2017),农业农村部登记用于稻水象甲防治的农药主要有氯虫苯甲酰胺、醚菊酯、三唑磷等 9 个化学农药品种,其中氯虫苯甲酰胺由于具有较好的内吸性和持效性等优点,是水稻生产上应用最多

的化学杀虫剂之一。氯虫苯甲酰胺(chlorantraniliprole)是新一代双酰胺类超高效广谱性杀虫剂,其通过激活鱼尼丁受体,引起靶标昆虫细胞内钙离子过度释放,使肌肉细胞不能收缩,进而导致害虫瘫痪抽搐、停止进食(唐振华和陶黎明, 2008; Teixeira & Andaloro, 2013)。氯虫苯甲酰胺对鳞翅目、鞘翅目、双翅目、半翅目等多种害虫有较好的防控效果(何发林等, 2019),随着二化螟 *Chilo suppressalis* (Walker)、稻水象甲等害虫常年多发、高发,水稻生产上施用氯虫苯甲酰胺的频率越来越高,增加了靶标害虫抗性风险(Sial & Brunner, 2010)。目前,已有一些重要农业害虫如卷叶蛾、二化螟、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hiibner、小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.) 等对氯虫苯甲酰胺产生了不同水平的抗性(胡虢等, 2017; 尹飞等, 2022; 支昊宇等, 2021; Lai et al., 2011a)。

杀虫剂施于田间后,其毒力随时间的增长逐渐递减并达到不足以杀死昆虫个体的亚致死剂量(李会仙等, 2005),该剂量能影响昆虫的生长发育、抗药性发展,改变昆虫对杀虫剂的代谢能力(梁炜博等, 2017; Vojoudi et al., 2011),了解杀虫剂对害虫的亚致死效应是评价其药效和评估农药风险管理的关键(Desneux et al., 2007)。与植物机体的防御策略相对应,昆虫也进化出系列防御机制来适应各种不利因素,其中解毒酶系统和保护酶系统是最重要的适应方式(刘建业等, 2014)。亚致死剂量的杀

虫剂或植物次生物质会对昆虫体内的保护酶系和解毒酶系产生诱导或抑制作用,从而为害虫抗药性进化提供持续的选择压力(高希武等,1997)。保护酶系和解毒酶系在维持昆虫正常的生理生化功能及抗药性的形成等方面发挥着重要作用,常被用作生物群体生理、生化状态改变的度量指标(Zhu-salzman & Zeng, 2015),通过监测其活性变化来探讨某一类杀虫剂对害虫的亚致死效应,进而预测害虫的种群动态变化规律是毒理学研究的重要内容(尹显慧等,2008)。已有很多亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对农业害虫生物酶活性及生长发育影响的研究(陈羿渠等,2017;韩文素等,2022;马冲等,2012;尹飞等,2014),研究对象主要集中在鳞翅目害虫,未见亚致死剂量氯虫苯甲酰胺影响稻水象甲体内生物酶活性或发育进度的相关研究。本研究在毒力测定的基础上,以亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理稻水象甲成虫,分析其体内保护酶和解毒酶活性变化及种群田间发育进度,旨在阐明氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的亚致死效应机制,为科学合理地使用氯虫苯甲酰胺防治稻水象甲、降低抗药性、减少农药使用量提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试药剂 200 g · L⁻¹氯虫苯甲酰胺悬浮剂(美国富美实公司);胡椒基丁醚(piperomyl butoxide, PBO)、磷酸三苯酯(triphenyl phosphate, TPP)、顺丁烯二酸二乙酯(diethyl maleate, DEM);98%毒扁豆碱、98%乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、98%牛血清蛋白、99%十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS);Triton X-100、 α -萘酚、 α -萘酚-1-氯-2,4-二硝基苯(chlorodinitrobenzene, CDNB)、固蓝B盐、对硝基苯甲醚;考马斯亮蓝 G250、丙三醇、NaH₂PO₄、Na₂HPO₄、NaOH、85%磷酸、37%盐酸;二硫苏糖醇(dithiothreitol, DTT)、苯甲基磺酰氟(phenylmethylsulfonyl fluoride, PMSF)、还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)、还原型辅酶Ⅱ(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH)。

1.1.2 供试虫源 室内毒力测定供试稻水象甲成虫于2023年4月15—20日采自四川省乐山市五通桥区金山镇(RW-Js种群)、五通桥区冠英镇(RW-Gy种群)、市中区牟子镇(RW-Mz种群)、井研县竹

园镇(RW-Zy种群)、犍为县罗城镇(RW-Lc种群)。于19:00—21:00在揭膜3 d以上的水稻苗床,以网捕法采集越冬代稻水象甲成虫,置于50 mL离心管中,同时采集未施用任何农药的水稻秧苗,带回实验室于温度(26±1)℃、光周期L:D=14:10、相对湿度70%±2%饲养备用(王小武等,2017)。

1.2 生物测定

根据预试验结果,将氯虫苯甲酰胺用丙酮配制成1 g · L⁻¹的母液,用0.1% TritonX-100稀释成梯度浓度,工作浓度分别为1.25、2.50、5.00、10.00、20.00、40.00 mg · L⁻¹,以0.1% TritonX-100为空白对照,每个浓度处理稻水象甲成虫30头·皿⁻¹,每处理3次重复,共90头。解毒酶抑制剂测定时,先将酶抑制剂PBO、TPP和DEM以丙酮配制成10 g · L⁻¹的母液,再用0.1% TritonX-100稀释成100 mg · L⁻¹的工作液,以酶抑制剂工作液为溶剂将氯虫苯甲酰胺配制成所需的梯度工作浓度,使酶抑制剂在所有药液中的浓度为100 mg · L⁻¹。

采用浸渍法(马冲等,2012;尹飞等,2014)进行室内毒力测定:将长度5 cm的新鲜秧叶在药液中浸泡渍10 s后取出晾干(25℃,2 h),放入置有保湿滤纸的培养皿中;将试虫在相应浓度的药液中浸渍3 s后置于吸水纸上吸去多余的药液,然后放入上述培养皿于人工气候箱[温度(26±1)℃、光周期L:D=14:10、相对湿度70%±2%]饲养48 h后统计各处理虫口死亡数,并计算不同处理的稻水象甲死亡率和校正死亡率。其中,死亡率/%=(死亡虫数/处理总虫数)×100;校正死亡率/%=[(处理死亡率-空白对照死亡率)/(1-空白对照死亡率)]×100。

1.3 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生物酶活性的影响

1.3.1 解毒酶活力测定 羧酸酯酶(carboxylesterase, CarE)活性测定:分别以亚致死剂量氯虫苯甲酰胺、酶抑制剂+亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理稻水象甲成虫3、12、24、48、72、96 h,将试虫用液氮速冻后放入-80℃冰箱保存备用。羧酸酯酶的测定参照陈羿渠等(2017)的方法,取冷冻处理的稻水象甲成虫置于玻璃匀浆器中,加入1 mL预冷磷酸缓冲液(0.04 mol · L⁻¹, pH=7.0)在冰浴条件下迅速充分匀浆,4℃,10000 r · min⁻¹离心10 min,上清液作为待测酶液冰浴备用。每个试管中分别加入0.45 mL磷酸缓

冲液、50 μL 待测酶液、1.8 mL α-NA 溶液 (3×10^{-4} mol · L⁻¹, 含 0.3 mmol · L⁻¹ 毒扁豆碱), 混匀后于 30 ℃ 温育 15 min, 加入 0.9 mL 显色液 (1% 固蓝 B 盐溶液 : 5% SDS 溶液 = 2 : 5, 体积比, 现配现用), 对照组在显色反应终止后补加 50 μL 酶液, 分光光度计测定 D_{600} 值, 每处理 3 次重复, 每重复平行测定 3 次。制作 α-萘酚标准曲线并得出 α-萘酚生成量, 测定酶液蛋白质含量, 计算 CarE 酶比活力, 以酶催化反应体系中每毫克组织蛋白每分钟生成 1 mmol α-萘酚对应的酶量为一个酶活力单位 (U · mg⁻¹)。

谷胱甘肽 S-转移酶 (glutathione S-transferase, GST) 活性测定: 参照 Wu & Miyata (2005) 的方法, 取冷冻处理的稻水象甲成虫置于玻璃匀浆器中, 加入 2 mL 预冷磷酸缓冲液 (pH = 7.0, 含 1.0 mmol · L⁻¹ EDTA) 在冰浴条件下迅速充分匀浆, 于 4 ℃, 10000 r · min⁻¹ 离心 10 min, 上清液作为待测酶液冰浴备用。以 CDNB 为底物, 向显色皿中依次加入 2.4 mL 磷酸缓冲液 (66 mmol · L⁻¹)、0.3 mL GSH (50 mmol · L⁻¹)、0.1 mL CDNB (0.03 mol · L⁻¹)、0.2 mL 待测酶液, 立即混匀, 在 27 ℃ 水浴条件下反应 5 min, 分光光度计测定 D_{340} 值, 对照组以 0.2 mL 磷酸缓冲液替代酶液, 每处理 3 次重复, 每重复平行测定 3 次。根据 D_{340} 值和酶液蛋白质含量计算 GST 酶比活力, 以酶催化反应体系中每毫克组织蛋白每分钟使 D_{340} 值变化 0.01 对应的酶量为一个酶活力单位 (U · mg⁻¹)。

多功能氧化酶 (mixed function oxidase, MFO) 活性测定: 参照 Yu & Nguyen (1992) 的方法, 取冷冻处理的稻水象甲成虫置于玻璃匀浆器中, 加入 2.5 mL 预冷磷酸缓冲液 (0.1 mol · L⁻¹, pH = 7.8; 含 1 mmol · L⁻¹ EDTA、1 mmol · L⁻¹ DTT、1 mmol · L⁻¹ PMSF、1 mmol · L⁻¹ PTU、10% 甘油), 冰浴匀浆, 4 ℃, 15000 r · min⁻¹ 离心 20 min, 上清液用磷酸缓冲液稀释 10 倍作为待测酶液冰浴备用。试管中依次加入 0.2 mL 对硝基苯甲醚 (4 mmol · L⁻¹)、0.8 mL 磷酸缓冲液 (pH=7.8)、1 mL NADPH (0.5 mmol · L⁻¹)、1 mL 待测酶液, 以不加 NADPH 为对照。于 37℃ 恒温水浴 30 min 后加入 1 mL HCl (1 mol · L⁻¹) 终止反应; 加入 5 mL 氯仿萃取 10 min, 移取氯仿层 3.5 mL 到另一试管内, 加入 3.5 mL NaOH (0.5 mol · L⁻¹) 再次萃取 10 min, 取 3 mL NaOH 溶液层用分光光度计测定 D_{405} 值, 每处理 3 次重复, 每重复平行测定 3

次。制作对硝基苯酚标准曲线并得出对硝基苯酚生成量, 测定酶液中蛋白质含量, 计算 MFO 比活力, 以酶催化反应体系中每毫克组织蛋白每分钟生成 1 pmol 对硝基苯酚对应的酶量为一个酶活力单位 (U · mg⁻¹)。

1.3.2 保护酶比活力测定 试虫处理方法同 1.3.1, 过氧化氢酶 (catalase, CAT)、过氧化物酶 (peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性使用南京建成生物研究所生产的检测试剂盒进行测定, 硫氧还蛋白还原酶 (thioredoxin reductase, TrxR) 活性使用北京索莱宝科技有限公司生产的检测试剂盒测定, 测定方法按照检测试剂盒说明书进行。CAT 活性单位定义为每毫克组织蛋白每秒钟分解 1 μmol 的 H₂O₂ 所需酶量为一个酶活力单位 (U · mg⁻¹); POD 活性单位定义为每毫克组织蛋白每分钟催化 1 μg 底物所需酶量为一个酶活力单位 (U · mg⁻¹); SOD 活性单位定义为每毫克组织蛋白在 1 mL 反应液中抑制率达 50% 时所需酶量为一个酶活力单位 (U · mg⁻¹); TrxR 活性单位定义为每毫克组织蛋白每分钟生成 1 nmol TNB 所需酶量为一个酶活力单位 (U · mg⁻¹)。

1.3.3 蛋白质含量测定 蛋白质含量测定方法参照 Bradford (1976) 采用考马斯亮蓝法: 取一支具塞试管, 加入 0.1 mL 待测酶液、0.9 mL 蒸馏水、5 mL 考马斯亮蓝 G250 试剂, 充分混合后静置 2 min, 在 595 nm 波长下测定吸光度值, 以牛血清蛋白为标准蛋白制作标准曲线, 求出待测酶液蛋白含量。

1.4 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲田间发育动态的影响

1.4.1 试验处理 试验在四川乐山市井研县千佛镇瓦子坝“百里粮油走廊”水稻病虫绿色防控示范基地进行, 试验地为冬闲田 (前茬水稻秸秆全部还田泡冬), 水稻品种为宜香优 2115, 2023 年 3 月 15 日播种, 4 月 21 日移栽, 宽窄行 (33.3+16.7) cm × 16.7 cm, 单株栽插。于 4 月 27 日以氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量喷雾处理约 1 hm² 移栽后返青水稻, 以不施药田块为对照, 5 月 1 日开始每天调查田间稻水象甲各虫态虫口数量, 直到 8 月田间所有虫态完全消亡或迁出稻田。

1.4.2 调查方法 采用双对角线取样法 (杨春林等, 2020), 每个处理选取 5 个样点, 每个样点调查 15 丛水稻, 观察叶片及稻丛下部, 统计大田内稻水

象甲成虫数;挖取稻丛及周边 5 cm 半径内泥土,放入 40 目网筛中进行漂洗,记录附着在根须上的幼虫、土茧及漂浮在水中的幼虫数量。

1.5 数据分析处理

采用 DPS 数据处理系统对生物测定数据进行 *F* 检验并计算毒力回归方程、*LC*₁₀、*LC*₂₅、*LC*₅₀ 及相关系数,生物酶活测定数据使用 Duncan 氏新复极差法进行方差分析,采用 Microsoft Excel 2007 软件进行简单运算和图表制作。

2 结果与分析

2.1 氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的亚致死剂量

不同稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性

差异较大,稻水象甲 RW-Gy 种群对氯虫苯甲酰胺最为敏感,*LC*₁₀、*LC*₂₅、*LC*₅₀ 值分别为 0.0406、0.1914、1.0728 mg · L⁻¹,RW-Js 种群对氯虫苯甲酰胺抗性较强,*LC*₁₀、*LC*₂₅、*LC*₅₀ 值分别为 6.5499、9.5244、14.4378 mg · L⁻¹,氯虫苯甲酰胺对 RW-Js 种群的 *LC*₅₀ 值是 RW-Gy 种群的 13.45 倍;其余 3 个稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性相差不大,*LC*₅₀ 值范围为 4.3543~5.8624 mg · L⁻¹。经反向验证,即用含氯虫苯甲酰胺 6.5499、9.5244、14.4378 mg · L⁻¹ 的药液分别处理稻水象甲 RW-Js 种群成虫 48 h 后,各处理校正死亡率分别为 10.56%、24.44%、48.89%,分别接近 10%、25%、50% (表 1)。

表 1 氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的毒力
Table 1 Toxicity of chlorantraniliprole to *L. oryophilus*

种群 Population	毒力回归方程 Toxicity regression equation	相关系数 Correlation coefficient	<i>LC</i> ₁₀ /(mg · L ⁻¹)	<i>LC</i> ₂₅ /(mg · L ⁻¹)	<i>LC</i> ₅₀ /(mg · L ⁻¹)	<i>F</i>	<i>P</i>
RW-Zy	<i>y</i> = 4.1374 + 1.3500 <i>x</i>	0.9861	0.4893	1.3781	4.3543	141.2752	0.0003
RW-Mz	<i>y</i> = 3.7542 + 1.7758 <i>x</i>	0.9853	0.9547	2.0977	5.0300	133.2483	0.0003
RW-Lc	<i>y</i> = 3.6192 + 1.7978 <i>x</i>	0.9916	1.1356	2.4712	5.8624	235.7657	0.0001
RW-Gy	<i>y</i> = 4.9725 + 0.9012 <i>x</i>	0.9939	0.0406	0.1914	1.0728	327.0120	0.0001
RW-Js	<i>y</i> = 0.6711 + 3.7334 <i>x</i>	0.9505	6.5499	9.5244	14.4378	37.4005	0.0036

2.2 解毒酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用

酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺协同增效结果及对稻水象甲的毒力差异见图 1。结果表明,不同酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺均有明显的协同增效作用。3 种酶抑制剂处理后氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的 *LC*₅₀ 值均大幅下降,酶抑制剂对 RW-Js 种群 (抗性种群) 的增效作用最强,TPP、DEM 和 PBO 的增效倍数分别为 3.56、4.43 和 5.50 倍;对 RW-Gy 种群 (敏感种群) 的增效作用最弱,增效倍数分别为 1.

31、1.73 和 2.53 倍;对 RW-Zy、RW-Mz 和 RW-Lc 等 3 个种群增效倍数分别为 2.14~3.76 倍,种群间差异不大。酶抑制剂 TPP 对 5 个稻水象甲种群的增效倍数分别为 1.31~3.56 倍,DEM 对不同种群的增效倍数分别为 1.73~4.43 倍,PBO 的增效倍数分别为 2.53~5.50 倍,表明同一种酶抑制剂对不同种群的增效作用存在明显差异,其中 PBO 与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用明显高于 TPP 和 DEM。

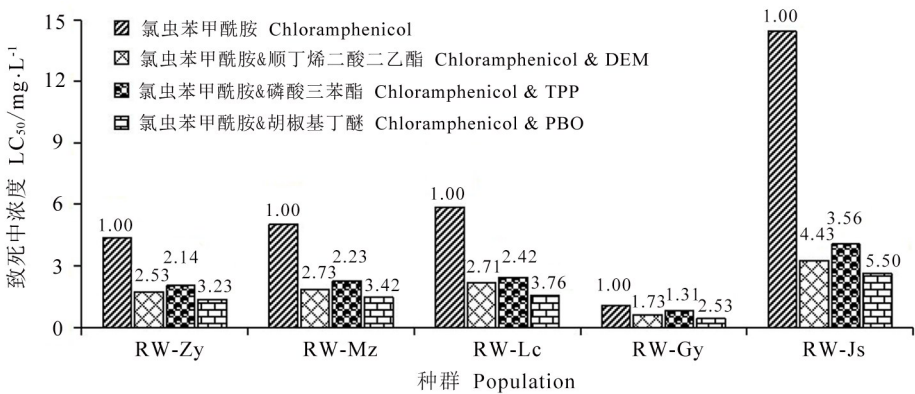


图 1 酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用

Fig.1 Synergistic effect of enzyme inhibitors and chloramphenicol

柱状图顶部的数字表示每个种群不同酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺的协同增效倍数。

The numbers on the top of the bar chart mean the synergistic effect of different enzyme inhibitors and chlorantraniliprole for each population.

2.3 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲解毒酶活性的影响

解毒酶活性测定结果(表2)表明,RW-Js种群体内3种解毒酶活性较RW-Gy种群显著增高($P<0.05$),其中MFO活性变化最为明显,增长1倍以上,提示种群间对氯虫苯甲酰胺敏感性的差异跟解毒酶活性正相关。RW-Js种群稻水象甲成虫经氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后,CArE活性随处理时间总体呈上升趋势,在3~48 h内显著高于对照($P<0.05$),处理后72、96 h增长趋势放缓,与对照差异不显著($P>0.05$);GST活性随时间的增加呈先

上升后下降的趋势,处理后3、12 h酶活显著高于对照($P<0.05$),24 h后与对照差异不显著($P>0.05$),48~96 h后比对照低,且差异达显著水平($P<0.05$);多功能氧化酶活性在3~48 h内呈上升趋势,72、96 h后逐渐下降,但仍显著高于对照($P<0.05$)。以酶抑制剂+氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后,RW-Js种群稻水象甲成虫体内3种解毒酶活性较单一氯虫苯甲酰胺处理显著降低,且随着时间增加降幅逐渐减小,其中多功能氧化酶活性下降最多,降幅达33.78%~63.60%。

表2 不同处理稻水象甲体内解毒酶比活力
Table 2 The specific activity of detoxifying enzymes in *L. oryophilus* under different treatments

处理 Treatment	羧酸酯酶 CArE					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	0.381±0.022c	0.595±0.032c	0.442±0.027c	0.573±0.020c	0.647±0.021b	0.527±0.032b
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	0.518±0.019b	0.751±0.036b	0.663±0.047b	0.807±0.012b	0.924±0.048a	0.734±0.014a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chlorantraniliprole	0.874±0.020a	1.210±0.050a	0.922±0.019a	0.891±0.012a	0.963±0.035a	0.797±0.041a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺+羧酸酯酶抑制剂 RW-Js+chlorantraniliprole+carboxylesterase inhibitor TTP	0.420±0.021c	0.574±0.031c	0.530±0.040c	0.641±0.033c	0.712±0.051b	0.445±0.031b

处理 Treatment	谷胱甘肽 S-转移酶 GST					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	10.69±0.32c	6.81±0.21d	8.98±0.74b	10.94±0.09b	9.88±0.34b	10.58±0.37b
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	12.55±0.67b	10.55±0.67b	12.48±0.53a	15.96±0.59a	14.78±0.27a	15.05±0.39a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chlorantraniliprole	15.77±0.55a	13.12±0.41a	11.16±0.33a	9.82±0.39c	7.43±0.39c	6.57±0.18c
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺+谷胱甘肽 S-转移酶抑制剂 RW-Js+chlorantraniliprole+glutathione S-transferase inhibitor DEM	11.35±0.32c	8.77±0.09c	7.77±0.55b	6.78±0.25d	5.71±0.32d	6.94±0.38c

处理 Treatment	多功能氧化酶 MFO					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	1.09±0.02c	1.11±0.06c	1.04±0.07d	1.13±0.06c	1.18±0.09d	1.21±0.08d
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	2.28±0.06b	2.34±0.07b	2.51±0.17b	2.38±0.11b	2.60±0.18b	2.52±0.13b
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chlorantraniliprole	2.83±0.03a	3.19±0.09a	3.59±0.12a	4.38±0.12a	3.52±0.12a	2.96±0.16a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺+多功能氧化酶抑制剂 RW-Js+chlorantraniliprole+multifunctional oxidase inhibitor PBO	1.03±0.03c	1.25±0.05c	1.78±0.13c	2.11±0.08b	1.96±0.09c	1.96±0.09c

表中数据为平均值±标准误,同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Dates show as means±SE. The data in the same column with the same letters mean significant differences ($P<0.05$).

2.4 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲保护酶活性的影响

解毒酶活性测定结果(表3)表明,RW-Js种群稻水象甲体内4种保护酶活性与RW-Gy种群无显著差异($P>0.05$);RW-Js种群稻水象甲成虫经氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后3、12 h CAT活性分别提

高17.99%、26.45%,与对照差异显著($P<0.05$),处理后72、96 h比对照下降26.59%、37.83%,表现为先激活后抑制;POD活性在氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后12、24 h显著高于对照($P<0.05$),其余时间段与对照之间无显著差异($P>0.05$);SOD活性在氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后3~24 h内比对照提

高 3.25%~7.92%,达显著差异 ($P<0.05$), 48~96 h LC_{25} 剂量处理的稻水象甲 TrxR 活性在整个测定周内与对照差异不显著 ($P>0.05$); 氯虫苯甲酰胺 期内与对照无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 不同处理稻水象甲体内保护酶比活力
Table 3 The specific activity of protective enzymes in *L. oryzaephilus* under different treatments

		单位 Unit: U · mg ⁻¹					
处理 Treatment	过氧化氢酶 CAT						
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h	
RW-Gy 种群 RW-Gy population	11.23±0.47c	10.83±0.33b	12.73±0.35ab	11.50±0.32a	10.84±0.10a	12.08±0.46a	
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	11.67±0.41c	11.57±0.43b	13.77±0.57a	10.09±0.49b	11.47±0.38a	12.82±0.23a	
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	13.77±0.49b	14.63±0.52a	13.07±0.61ab	9.22±0.49bc	8.42±0.26b	7.97±0.17b	
处理 Treatment	过氧化物酶 POD						
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h	
RW-Gy 种群 RW-Gy population	6.71±0.46b	6.92±0.20bc	7.11±0.17b	7.30±0.21a	6.52±0.32a	6.81±0.16a	
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	6.89±0.29b	7.25±0.13b	6.93±0.09b	7.17±0.18a	6.81±0.20a	7.09±0.12a	
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	6.58±0.17b	8.28±0.21a	8.96±0.15a	7.34±0.29a	6.97±0.17a	7.23±0.15a	
处理 Treatment	超氧化物歧化酶 SOD						
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h	
RW-Gy 种群 RW-Gy population	79.39±0.98c	82.07±1.47b	78.43±1.65bc	79.71±0.56bc	81.33±1.04a	83.24±1.04a	
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	78.67±1.37c	81.88±0.94b	80.47±0.98b	81.47±0.83ab	82.25±1.19a	81.25±1.20a	
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	81.23±1.48b	85.63±0.55a	86.84±1.18a	82.84±0.95a	83.52±1.28a	82.52±1.28a	
处理 Treatment	硫氧还蛋白还原酶 TrxR						
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h	
RW-Gy 种群 RW-Gy population	0.767±0.027a	0.780±0.017a	0.823±0.023a	0.803±0.012a	0.746±0.023a	0.743±0.019a	
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	0.746±0.030a	0.773±0.030a	0.847±0.038a	0.813±0.012a	0.697±0.047a	0.830±0.023a	
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	0.753±0.021a	0.850±0.021a	0.850±0.046a	0.793±0.052a	0.843±0.027a	0.767±0.030a	

表中数据为平均值±标准误,同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Dates show as means±SE. The data in the same column with the same letters mean significant differences ($P<0.05$).

2.5 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲田间发育动态的影响

由图 2 可知,氯虫苯甲酰胺处理稻水象甲各虫态的始见期、发生高峰期和发生末期与对照有一定的差异。氯虫苯甲酰胺处理对稻水象甲越冬代成虫高峰期无影响,但对越冬代成虫寿命影响较大,田间比对照提前 9 d 查不见成虫(图 2A);稻水象甲幼虫始见期比对照延迟 3 d,幼虫高峰期和发生末期均比对照延迟 6 d 左右(图 2B);稻水象甲蛹的始见期、发生高峰期和发生末期均比对照延迟 6 d(图 2C);稻水象甲一代成虫始见期、发生高峰期比对照延迟 6 d,发生末期无明显差异(图 2D)。

调查结果显示,氯虫苯甲酰胺 LC_{25} 剂量处理稻水象甲不同虫态的高峰期虫口数较对照减少 30.20%~35.05%,各虫态田间总计虫口数峰值为 8.707 头 · 丛⁻¹,比对照 13.227 头 · 丛⁻¹减少 34.17%;

氯虫苯甲酰胺 LC_{25} 剂量处理田块的越冬代成虫、幼虫、蛹及一代成虫高峰期虫口数占田间总虫口数的比例分别为 89.81%、84.12%、59.84%和 55.89%,与对照无明显差异 ($P>0.05$)。结果表明,亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理可不同程度延缓稻水象甲幼虫、蛹和成虫的生长发育,并具有缩短成虫寿命、加快田间成虫消亡进度的作用。

3 讨论

3.1 稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性

2011 年首次在四川省乐山市、内江市等地发现稻水象甲入侵(何春兰和何军,2013)以来,氯虫苯甲酰胺及其复配药剂一直是该地区稻水象甲防控的主推药剂(刘可等,2012;刘学英,2020)。氯虫苯甲酰胺长期大量使用导致稻水象甲一直处在高压的选择条件下,增加了抗药性形成风险。

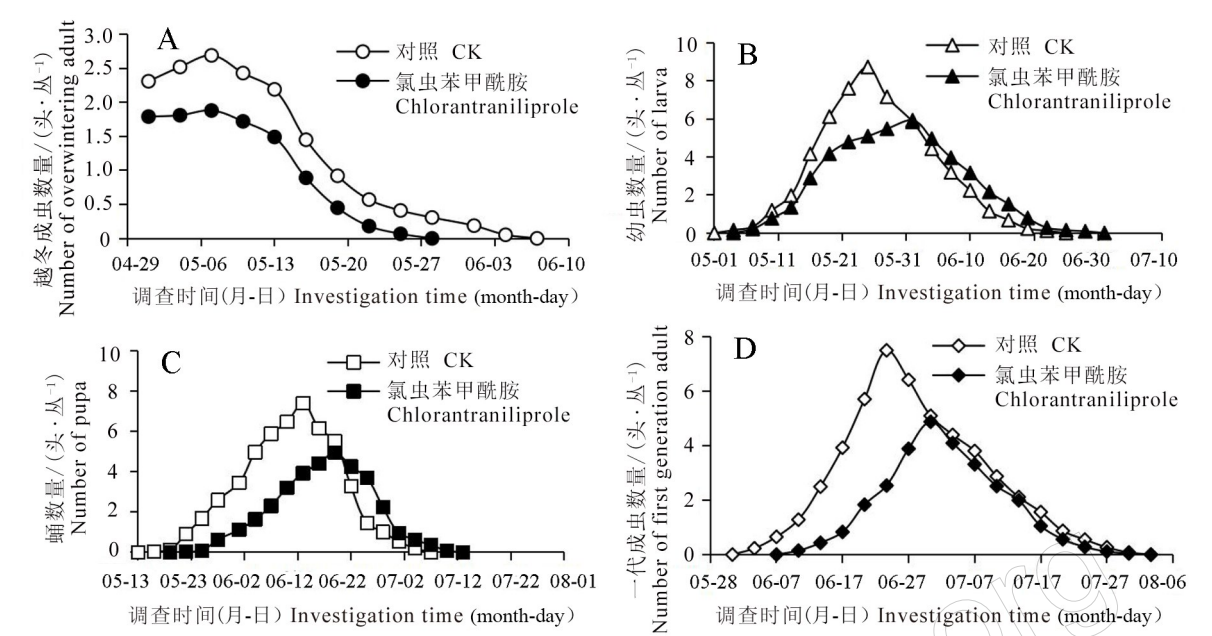


图2 稻水象甲田间发育动态

Fig.2 Development dynamics of *L. oryophilus* in the field

A: 越冬成虫; B: 幼虫; C: 蛹; D: 一代成虫。

A: Overwintering adult; B: Larva; C: Pupa; D: First generation adult.

笔者调查发现,近年来四川省内不同稻区使用氯虫苯甲酰胺防控稻水象甲时,用药剂量和施用频率均有较大区别。由于不同地理区域用药水平和用药习惯的不同,害虫对杀虫剂的敏感性、抗药性发展程度产生较大差异(姜兴印等,2000)。苏欣等(2011)测定了氯虫苯甲酰胺对辽阳地区稻水象甲3个田间种群的毒力,发现该药剂对不同种群的LD₅₀值相差4倍以上;刘秀红等(2018)测定了新疆主要稻区不同稻水象甲地理种群对常用杀虫剂的抗药性,北疆伊犁河谷稻区察布查尔县稻水象甲种群和乌鲁木齐稻区五家渠市种群对氯虫苯甲酰胺的抗性倍数均高于5.92倍,表明这2个稻区稻水象甲种群已对氯虫苯甲酰胺产生了低水平抗性。

本研究结果显示,不同稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性差异较大,RW-Gy种群对氯虫苯甲酰胺最敏感,RW-Js种群对氯虫苯甲酰胺敏感性最差,其中RW-Js种群的LC₅₀值为RW-Gy种群的13.45倍,已经达到中等抗性水平。在目前以化学药剂为主要防控手段的背景下,应及时对不同地区稻水象甲的抗性水平进行系统监测,以便制定有效的抗性治理措施,延缓其对药剂的抗性形成。由于未能在稻水象甲发生早期建立不同杀虫药剂的敏感基线,本研究通过比较不同种群对氯虫苯甲酰胺LC₅₀值的差异判定其抗性的变化(苏欣等,2011)。此

外,敏感种群RW-Gy采自五通桥区冠英镇,该稻区于2023年首次发现稻水象甲,其对氯虫苯甲酰胺的较高敏感性表明该地区稻水象甲可能由氯虫苯甲酰胺使用水平较低的稻区迁入。

3.2 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生物酶活性及抗药性的影响

CarE、GST和MFO是昆虫体内重要的解毒酶系,其主要功能是代谢机体内的有毒物质以适应逆境胁迫(Tiwari & Pelz-stelinskil, 2011)。CAT、POD和SOD是昆虫体内重要的保护酶系,其主要作用是维持昆虫机体内活性氧及生理代谢平衡(Lozinskaya *et al.*, 2004)。昆虫体内生物酶活性与外界刺激强度及昆虫自身的耐药性和抗逆性有关(王宏民等,2013),亚致死剂量杀虫剂可诱导昆虫体内解毒酶和保护酶活性变化以调节虫体对杀虫剂的解毒代谢能力(贾变桃等,2016)。已有研究表明,亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对小菜蛾(尹飞等,2014)、甜菜夜蛾(陈羿渠等,2017;马冲等,2012)、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner (欧善生等,2012)、蜂巢小甲虫 *Aethina tumida* Murray (韩文素等,2022)等昆虫体内解毒酶和保护酶活性具有刺激或抑制作用。TrxR是硫氧还蛋白系统主要的功能蛋白,广泛存在于从原核生物到哺乳动物等多个物种之中,是一种间接的抗氧化酶

(孟飞等, 2012), 能够在氧化胁迫下通过维持硫氧还蛋白(thioredoxin, Trx)的还原性来减缓氧化胁迫的压力, 是机体调节各种氧化应激损伤的重要途径, 对昆虫调节代谢和繁殖等生命活动有着不可替代的作用(秦馨等, 2018), 目前未见亚致死剂量杀虫剂胁迫影响昆虫体内硫氧还蛋白还原酶相关报道。

本研究结果显示, 抗性种群 RW-Js 体内 3 种解毒酶(CarE、GST、MFO)活性较敏感种群 RW-Gy 显著增高, 其中多功能氧化酶变化最为明显, 增长 1 倍以上; 种群间 3 种保护酶(CAT、POD、SOD)及 TrxR 活性无显著差异, 提示种群间对氯虫苯甲酰胺敏感性的差异跟解毒酶活性正相关, 而与保护酶活性无相关性。RW-Js 种群稻水象甲经氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量处理后, 体内多种生物酶活性总体呈先升高后降低的趋势, 具明显的时间效应, 其中 MFO 活性在测定时间内显著高于对照。解毒酶抑制剂 PBO、TPP 和 DEM 常用于间接探索昆虫 MFO、CarE、GST 等昆虫体内解毒酶活性与抗药性的关系(王敏等, 2023)。试验以酶抑制剂+氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量处理稻水象甲成虫, 结果表明 3 种解毒酶活性较单一氯虫苯甲酰胺处理显著降低, 其中 MFO 活性下降最多。此外, 酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺协同增效结果显示, PBO 与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用明显高于 TPP 和 DEM, 说明降低 MFO 活性是增加稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性效率最高的方式。害虫解毒酶活性的增强是其产生抗药性的主要机制之一(Sial *et al.*, 2011), 根据昆虫抗药性机理, MFO 可能是稻水象甲对氯虫苯甲酰胺代谢过程中最重要的解毒酶, 并与稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的抗性形成或基因表达有关(Li *et al.*, 2007)。本研究对上述生物酶活性的测定都是在抗性水平较低或亚致死剂量杀虫剂短期胁迫下进行的, 结论存在一定局限性, 要明确某种解毒酶与稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的抗性形成的关系, 需进行系统性研究。

3.3 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲田间发育动态的影响

亚致死剂量杀虫剂对不仅影响昆虫的抗药性形成, 还不同程度影响其生殖力、生长发育、行为等生物学特性(Desneux *et al.*, 2007)。杀虫剂亚致死剂量对不同靶标昆虫种群的增长存在有利和不利

两方面的影响, 陈羿渠等(2017)研究表明, 甜菜夜蛾经过连续 6 代亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理, 各虫龄阶段的存活率与雌成虫繁殖力明显下降; Han *et al.* (2012)用氯虫苯甲酰胺 LC₁₀、LC₂₅ 剂量处理小菜蛾, 其发育历期明显增长, 雌成虫产卵量降低; 余慧灵等(2015)用亚致死剂量溴氰虫酰胺处理甜菜夜蛾 3 龄幼虫, 显著抑制甜菜夜蛾的生长发育和繁殖; 杨洪等(2012)用氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量处理白背飞虱, 雌成虫寿命明显缩短; 宋月芹等(2013)用氯虫苯甲酰胺 LC₁₀ 剂量处理亚洲玉米螟, 其成虫寿命变长且雌成虫寿命明显延长; Lai *et al.* (2011b)采用亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理甜菜夜蛾幼虫后, 其成虫寿命没有显著变化。本研究发现, 氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量对稻水象甲各虫态的田间始见期、发生高峰期和发生末期均有一定的影响, 不同程度延缓稻水象甲幼虫、蛹和成虫的生长发育, 并具有缩短成虫寿命、加快田间成虫消亡的作用。亚致死剂量氯虫苯甲酰胺虽然增加了稻水象甲的抗性形成压力, 一定程度提高抗性个体在药剂选择压力下的存活率, 但由于药剂的持续胁迫使得害虫的生存繁殖力下降, 以至抗性种群与敏感种群相比并没有明显生存竞争优势(陈羿渠等, 2017)。本研究通过稻水象甲田间发育动态来探讨亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生长发育的影响, 比传统的实验室饲养观察法更符合实际生理、生态条件, 研究结论更具实践指导价值。

参考文献

- 陈羿渠, 向兴, 贡常委, 王学贵, 2017. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾主要解毒酶活性与生长繁殖的影响. 中国农业科学, 50(8): 1440-1451.
- 丁新华, 王小武, 吐尔逊·阿合买提, 付开赞, 何江, 关志坚, 付文君, 郭文超, 2017. 新疆荒漠绿洲稻区稻水象甲危害损失及防治阈值研究. 生物安全学报, 26(1): 63-67.
- 高希武, 董向丽, 郑炳宗, 陈青, 1997. 棉铃虫的谷胱甘肽 S-转移酶(GSTs): 杀虫剂和植物次生物质的诱导与 GSTs 对杀虫药剂的代谢. 昆虫学报, 40(2): 122-127.
- 韩文素, 李健, 高景林, 钟义海, 王释婕, 赵珊, 2022. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫解毒酶和保护酶活性的影响. 农药, 61(10): 726-730.
- 何春兰, 何军, 2013. 稻水象甲普查与防控技术措施. 四川农业科技(9): 40-41.

- 何发林, 乔治华, 姚向峰, 于灏泳, 孙石昂, 李向东, 张吉旺, 姜兴印, 2019. 低致死剂量氯虫苯甲酰胺对沟金针虫食物利用和相关生理生化指标的剂量和时间效应. 昆虫学报, 62(8): 948-959.
- 胡虢, 王晓辉, 孙刚忠, 周莉, 潘渝, 刘守德, 李青, 金海燕, 尹飞, 李振宇, 湛爱东, 谢圣华, 刘华梅, 2017. 氯虫苯甲酰胺、阿维菌素与苏云金芽胞杆菌桶混对不同地区抗性小菜蛾的防治效果. 中国生物防治学报, 33(6): 732-738.
- 贾变桃, 洪珊珊, 张雨超, 曹永伟, 2016. 维菌素对半闭弯尾姬蜂保护酶系和解毒酶系的影响. 环境昆虫学报, 38(5): 990-995.
- 姜兴印, 王开运, 仪美芹, 2000. 不同地区小菜蛾对杀虫剂的抗性差异. 农药学学报, 2(4): 44-48.
- 李会仙, 郝赤, 王利英, 魏波, 2005. 高效氯氰菊酯和溴氰菊酯对棉铃虫的亚致死效应. 山西农业大学学报, 25(3): 231-233.
- 梁炳博, 向兴, 王学贵, 杨群芳, 罗家栋, 2017. 噻虫啉亚致死剂量对斜纹夜蛾解毒酶系活性与生长繁殖的影响. 昆虫学报, 60(10): 1187-1197.
- 刘建业, 钱蕾, 蒋兴川, 和淑琪, 李正跃, 桂富荣, 2014. CO₂ 浓度升高对西花蓟马和花蓟马成虫体内解毒酶和保护酶活性的影响. 昆虫学报, 57(7): 754-761.
- 刘可, 郭迪金, 吴志平, 2012. 四川稻水象甲防控要点浅析及药剂推荐. 四川农业与农机(3): 35-36.
- 刘秀红, 王小武, 丁新华, 付开赞, 吐尔逊·阿合买提, 何江, 郭文超, 2018. 新疆主要稻区不同稻水象甲地理种群对常用杀虫剂抗药性测定. 新疆农业科学, 55(10): 1847-1853.
- 刘学英, 2020. 浅谈井研县丘区稻水象甲的发生规律及防治策略. 四川农业科技(3): 37-38.
- 马冲, 路兴涛, 刘震, 马士仲, 张田田, 2012. 氯虫苯甲酰胺、毒死蜱亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育和繁殖力的影响. 植物保护, 38(4): 38-41.
- 孟飞, 胥保华, 郭兴启, 2012. 中华蜜蜂重要生物学特性相关功能基因研究进展. 应用昆虫学报, 49(5): 1338-1344.
- 欧善生, 梁沛, 宋敦伦, 史雪岩, 高希武, 2012. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对棉铃虫生长发育和解毒酶活性的影响. 植物保护, 38(4): 1-8.
- 齐国君, 高燕, 黄德超, 吕利华, 2012. 基于 MAXENT 的稻水象甲在中国入侵扩散动态及适生性分析. 植物保护学报, 39(2): 129-136.
- 秦馨, 李锴, 张静, 张爽, 武卫华, 陆合, 2018. 硫氧还蛋白还原酶对弓形虫速殖子增殖的影响. 中国病原生物学杂志, 13(12): 1368-1371.
- 宋月芹, 董钧锋, 孙会忠, 2013. 亚致死浓度氯虫苯甲酰胺可降低亚洲玉米螟的种群增长. 昆虫学报, 56(4): 446-451.
- 苏欣, 于娜, 梁沛, 高希武, 2011. 辽阳地区稻水象甲对六种杀虫剂的敏感及解毒酶活性测定. 农药学学报, 13(6): 581-585.
- 孙文鹏, 2006. 稻水象甲 (*Lissorhoptrus oryzophilus* Kusche) 的生物防治. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学.
- 唐振华, 陶黎明, 2008. 新型二酰胺类杀虫剂对鱼尼丁受体作用的分子机理. 昆虫学报, 51(6): 645-651.
- 王蝉娟, 陆浩磊, 赵志森, 鲁仙, 韩浩宇, 张饮江, 2023. 2 种中草药对福寿螺的杀灭效果及对肝脏影响. 生物安全学报, 32(1): 63-67.
- 王宏民, 张奂, 郝赤, 张仙红, 2013. 玫烟色棒束孢对小菜蛾幼虫体内不同酶活性的影响. 菌物学报, 32(2): 269-276.
- 王敏, 王新溪, 王圣印, 2023. 橘小实蝇对甲氨基阿维菌素苯甲酸盐的抗性机制及对其他药剂的交互抗性. 植物保护, 49(1): 278-284.
- 王小武, 丁新华, 付开赞, 吐尔逊·阿合买提, 黄红梅, 木拉提·塔里木别克, 何江, 郭文超, 2018. 小型植保无人机超低量喷雾防治稻水象甲. 生物安全学报, 27(3): 216-223.
- 王小武, 丁新华, 吐尔逊·阿合买提, 付开赞, 何江, 付文君, 郭文超, 2017. 不同生物药剂对稻水象甲的毒力、拒食活性及防效分析. 生物安全学报, 26(1): 68-74.
- 杨春林, 李洪浩, 牟成君, 王锐, 席亚东, 2020. 水稻生育期对稻水象甲成虫种群空间格局影响及抽样技术. 生物安全学报, 29(3): 181-190.
- 杨洪, 王召, 金道超, 2012. 氯虫苯甲酰胺对白背飞虱实验种群的亚致死效应. 昆虫学报, 55(10): 1161-1167.
- 尹飞, 冯夏, 李振宇, 林庆胜, 胡珍娣, 张德雍, 陈焕瑜, 2014. 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对小菜蛾体内活性酶的影响. 植物保护, 40(2): 66-69.
- 尹飞, 李振宇, SAMINA SHABBIR, 林庆胜, 2022. P450 基因在氯虫苯甲酰胺不同抗性品系小菜蛾中的表达及功能分析. 中国农业科学, 55(13): 2562-2571.
- 尹显慧, 吴青君, 李学锋, 张友军, 徐宝云, 2008. 多杀菌素亚致死浓度对小菜蛾解毒酶系活力的影响. 农药学报, 10(1): 28-34.
- 余慧灵, 向兴, 袁贵鑫, 陈羿渠, 王学贵, 2015. 溴氰虫酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育及体内解毒酶活性的影响. 昆虫学报, 58(6): 634-641.
- 支昊宇, 丁新华, 陈萍, 叶茂林, 闫阳阳, 姜卫华, 2021. 氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟解毒酶活性及生长发育的影响. 南京农业大学学报, 44(1): 89-96.
- 中华人民共和国农业农村部, 2020. 中华人民共和国农业部公告第 351 号. (2020-11-10) [2023-09-23]. <http://www.>

- moa.gov.cn/xw/bmdt/202011/t20201110_6356064.htm.
- 中华人民共和国农业农村部, 2023. 全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录. (2023-11-01) [2023-09-23]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2023/202310/202311/t20231101_6439586.htm.
- BRADFORD M M, 1976. A rapid sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of proteindye binding. *Analytical Biochemistry*, 72 (1/2): 248–254.
- DESNEUX N, DECOURTYE A, DELPUECH J M, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52(1): 81–106.
- HAN W S, ZHANG S F, SHEN F Y, LIU M, REN C C, GAO X W, 2012. Residual toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Management Science*, 68(8): 1184–1190.
- LAI T C, LI J, SU J Y, 2011a. Monitoring of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to chlorantraniliprole in China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 101(3): 198–205.
- LAI T C, SU J A, 2011b. Effects of chlorantraniliprole on development and reproduction of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner). *Journal of Pest Science*, 84(3): 381–386.
- LI X C, SCHULER M A, BERENBAUM M R, 2007. Molecular mechanisms of metabolic resistance to synthetic and natural xenobiotics. *Annual Review of Entomology*, 52(1): 231–253.
- LOZINSKAYA Y L, SLEPNEVA I A, KHRAMTSOV V V, GLUPOV V V, 2004. Changes of the antioxidant status and System of generation of free radicals in hemolymph of *Galleria mellonella* larvae at microsporidiosis. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 40(2): 119–125.
- MOHAMMAD-AMIR A, GODFREY L D, 2014. A century of *Lissorhoptrus oryzophilus* Kusehel (Coleoptera: Curculionidae): a history of research and management with an emphasis on the United States. *Journal of Integrated Pest Management*, 5(4): 1–14.
- SIAL A A, BRUNNER J F, 2010. Assessment of resistance risk in obliquebanded leafroller (Lepidoptera: Tortricidae) to the reduced-risk insecticides chlorantraniliprole and spinetoram. *Journal of Economic Entomology*, 103(4): 1378–1385.
- SIAL A A, BRUNNER J F, GARCZYNSKI S F, 2011. Biochemical characterization of chlorantraniliprole and spinetoram resistance in laboratory-selected obliquebanded leafroller, *Choristoneura rosaceana* (Harris) (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 99(3): 279–284.
- TEIXEIRA L A, ANDALORO J T, 2013. Diamide insecticides: global efforts to address insect resistance stewardship challenges. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 106(3): 76–78.
- TINDALLKV, STOUT M J, 2003. Use of common weeds of rice as hosts for the rice water weevil (Coleoptera Curculionidae). *Environmental Entomology*, 32(5): 1227–1233.
- TIWARI S, PELZ-STELINSKI L, 2011. Effect of *Candidatus Liberibacter asiaticus* infection on susceptibility of Asian citrus psyllid, *Diaphrina citri*, to selected insecticides. *Pest Management Science*, 67(1): 94–99.
- VOJOUDI S, SABER M, HEJAZI M J, TALAEI-HASSAN-LOUI R, 2011. Toxicity of chlorpyrifos, spinosad and abamectin on cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* and their sublethal effects on fecundity and longevity. *Bulletin of Insectology*, 64(2): 189–193.
- WU G, MIYATA T, 2005. Susceptibilities to methamidophos and enzymatic characteristics in 18 species of pest insects and their natural enemies in crucifer vegetable crops. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 82(1): 79–93.
- YU S J, NGUYEN S N, 1992. Detection and biochemical characterization of insecticide resistance in the diamondback moth. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 44(1): 74–81.
- ZHU-SALZMAN K, ZENG R S, 2015. Insect response to plant defensive protease inhibitors. *Annual Review of Entomology*, 60(1): 233–252.

(责任编辑:郑姗姗)

黄星菊在我国的适生性分析及风险评估

袁淑珍¹, 龙 阳², 李凯兵³, 徐 晗⁴, 虞 赟⁵, 袁俊杰^{2*}

¹二连海关技术中心, 内蒙古 二连浩特 012600; ²湛江海关技术中心, 广东 湛江 524000; ³佛山海关, 广东 佛山 528000; ⁴中国检验检疫科学研究院, 北京 100000; ⁵福州海关技术中心, 福建 福州 350003

摘要:【目的】黄星菊是一种极具危险性的杂草,在美国和澳大利亚等地区被列为有毒有害杂草并加以控制。目前我国新疆等局部区域,已发现有黄星菊的定殖,且呈蔓延危害加剧的趋势。对黄星菊进行适生性分析及风险评估,可为该有害生物的预警防控提供理论依据。【方法】利用 MaxEnt 模型对黄星菊在我国的潜在适生区进行预测,并采用多指标赋值运算,对其入侵的风险进行定量分析。【结果】黄星菊在我国的潜在适生区达 32.96%,其中高度适生区、中度适生区和低度适生区的面积分别为 11.21 万、34.16 万、272.28 万 km²。其危险性综合评估风险值 R 为 2.01,为高度危险。【结论】我国很多区域均属于黄星菊的适生区,需要高度重视,其预测结果为建立黄星菊长效预警与防控机制提供必要的理论基础。

关键词: 黄星菊; 潜在适生区; MaxEnt; 风险评估



开放科学标识码
(OSID 码)

Adaptability analysis and risk assessment of *Centaurea solstitialis* in China

YUAN Shuzhen¹, LONG Yang², LI Kaibing³, XU Han⁴, YU Yun⁵, YUAN Junjie^{2*}

¹Erlian Customs Technology Center, Erlianhaote, Neimenggu 012600, China; ²Zhanjiang Customs Technology Center, Zhanjiang, Guangdong 524000, China; ³Foshan Customs, Foshan, Guangdong 528000, China; ⁴Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100000, China; ⁵Fuzhou Customs Technology Center, Fuzhou, Fujian 350003

Abstract: 【Aim】*Centaurea solstitialis* L. is a very dangerous weed that is classified and controlled as a noxious weed in areas such as the United States and Australia. At present, the colonization of *C. solstitialis* has been found in Xinjiang which shows a tendency to spread. The purpose of this study is to provide theoretical basis for early warning and control by Adaptability analysis and risk assessment of *C. solstitialis* in China. 【Method】MaxEnt model was used to predict the potential geographic distribution of *C. solstitialis* in China, and multi-index assignment was used to to conduct quantitative analysis for the risk of invasion. 【Result】The potential habitat area of *C. solstitialis* in China reached 32.96%, of which the areas of high, medium and low habitat were 11.21×10^4 km², 34.16×10^4 km² and 272.28×10^4 km², respectively. The comprehensive risk assessment value of this weed was 2.01, belongs to highly dangerous. 【Conclusion】*C. solstitialis* could occur at many areas of our country. The results provide the necessary theoretical basis for establishing a long-term early warning and control mechanism of *C. solstitialis*.

Key words: *Centaurea solstitialis*; potential geographic distribution; MaxEnt; risk assessment

黄星菊 *Centaurea solstitialis* L. 为菊科 Asteraceae 矢车菊属 *Ambrosia* 杂草,原产于欧洲南部地中海地区和欧亚大陆西部。黄星菊具有很强的竞争优势,密集发生可取代牧草和农作物,对牲畜放牧和饲料收获造成重大经济损失。其代谢产生的毒素可引起马的黑质苍白球脑软化病 (nigropallidal en-

cephalomalacia), 或称“咀嚼病” (Callihan *et al.*, 1982; DiTomaso, 1998; Kingsbury, 1964)。目前,黄星菊在美国和加拿大等地区被列为有毒有害杂草并被加以控制 (Rice, 2003)。近些年来,我国各口岸经常在进口粮食及入境旅客行李中截获黄星菊杂草种子,且在我国新疆局部地区,已经发现黄星

收稿日期 (Received): 2023-07-28 接受日期 (Accepted): 2023-12-30

基金项目: 海关总署科研项目 (2022HK120)

作者简介: 袁淑珍, 女, 正高级农艺师。研究方向: 植物检疫。E-mail: elyuansz@163.com

* 通信作者 (Author for correspondence), 袁俊杰, E-mail: 253348110@qq.com

蓟并呈现蔓延危害加剧的趋势,潜在风险不可忽视(杨永刚等,2017)。

有害生物潜在地理分布是有害生物风险评估中最重要的一环,通过潜在地理分布预测,能够确定有害生物入侵、定殖和扩散的地理范围,是有害生物定量风险评估的前置工作。目前,世界范围内用于预测物种分布的生态位模型主要有基于 Gower 距离 DOMAIN 模型(the domain model)、基于规则集生成的遗传算法 GARP 模型(the genetic algorithm for rule-set production)、基于物种对环境因子生态响应函数的 CLIMEX 模型以及基于最大熵的 MaxEnt 模型(maximum entropy species prediction model)等(郭彦龙等,2020; Carpenter *et al.*, 1993; Hirzel *et al.*, 2002; Phillips *et al.*, 2006)。其中,MaxEnt 因操作简便、运行结果稳定和所需样本量小等特点在业内得到广泛认可,已被广泛应用于入侵物种风险评估等研究领域,仅 2006—2013 年间,利用 MaxEnt 软件的研究成果已超千篇(Merow, 2013)。国内学者也使用 MaxEnt 模型开展了多种有害生物的潜在地理分布研究,涉及病原物、害虫和杂草,如菜豆象 *Acanthoscelides obtectus* Say、栎方翅网蝽 *Corythucha arcuate* (Say)、栎树猝死病菌 *Phytophthora ramorum* Werres, De Cock & Man、皱叶果芥 *Rapistrum rugosum* (L.) All. 等,被称作是预测物种地理分布最可靠的 3 种技术之一(贺水莲等, 2015; 谭谋和汪洋, 2021; 汤思琦等, 2023; 王亚锋等, 2022; 徐养诚等, 2021)。因此,本研究通过 MaxEnt 模型对黄星蓟在我国的潜在分布区进行预测,以期对黄星蓟的预警防控工作提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 基于 MaxEnt 的适生性分析

1.1.1 分布数据 黄星蓟的分布数据主要来源于国内外公开发表的文献资料及权威数据库(杨永刚等, 2017; CABI, 2021; GBIF, 2022; Maddox *et al.*, 1985; Uygur *et al.*, 2004), 去除重复项、错误项等后,共收集得到分布数据 11238 条。将上述数据导入到 ArcMap 10.6 软件中,利用其 Create fishnet 工具生成 1×1 的格网数据,分析每个格网中的分布数据,当一个格网中存在多条分布数据时仅随机保留一条,以排除空间关联性较大造成的过拟合模拟的影响,最终保留 769 条分布数据用于适生性分析。

1.1.2 环境气候数据 用于分析的 19 个生物气候

变量来源于 Worldclim 网站,空间分辨率为 5 minute。环境变量之间存在着较高的空间相关性,为提高模型的精确性,降低模型预测过程中可能引入的复杂且无用的信息,对上述生物气候变量进行筛选。利用 MaxEnt 3.4.4 软件中的刀切法检验各变量对模型预测贡献的大小,以剔除贡献值较低的变量。用 SPSS 软件对贡献较大的变量进行 Pearson 相关分析,以检验环境因子变量之间的多重共线性,对于 $|r| \geq 0.8$ 的环境变量仅保留贡献值较高的。最终保留 bio11 最冷季平均温度、bio19 最冷季降水、bio6 最冷月份最低温度、bio4 温度季节性、bio18 最暖季降水、bio12 年降水量等 6 个生物气候变量用于适生性分析。

1.1.3 MaxEnt 模型设置 随机选取 25% 的分布点作为测试集,剩余的 75% 分布点作为训练集,重复训练次数(replicates)设置为 10,重复运行模式选择“Bootstrap”;创建响应曲线(create response curves)、绘制变量重要性刀切图(djackknife to measure variable importance),预测结果使用“Logistic”格式和“asc”文件类型输出。

1.2 黄星蓟传入风险的评估方法

根据有害生物危险性评价的指标体系(蒋青等,1995),对黄星蓟的国内分布状况 P_1 、潜在危害性 P_2 、受害对象的经济重要性 P_3 、传播的可能性 P_4 和管理难度 P_5 共 5 个一级指标以及其下的 15 个二级指标进行量化赋分,以评估其入侵我国的风险等级。

入侵风险等级(R)的计算公式为 $R = \sqrt[5]{P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5}$,其中, $P_1 = P_1$, $P_2 = 0.6P_{21} + 0.2P_{22} + 0.2P_{23}$, $P_3 = \text{Max}(P_{31}, P_{32}, P_{33})$, $P_4 = \sqrt[5]{P_{41} \times P_{42} \times P_{43} \times P_{44} \times P_{45}}$, $P_5 = (P_{51} + P_{52} + P_{53})/3$ 。划分标准: $2.5 \leq R < 3.0$, 极高危险; $2.0 \leq R < 2.5$, 高危险; $1.5 \leq R < 2.0$, 中危险; $1.0 \leq R < 1.5$, 低危险(徐瑛等, 2023)。

2 结果与分析

2.1 潜在适生区预测结果

以受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)下的面积(area under curve, AUC)对模型结果的优劣进行评价,AUC 取值范围是 0~1,数值越大说明环境变量与预测的物种地理分布之间的相关性越大,模型判断力越强,预测

效果越好。如图 1 所示,预测模型 AUC 均值高达 0.932 ,预测结果较好,可信度较高。

黄星菊在我国的潜在适生区预测结果如图 2 所示。其在我国西藏、四川、甘肃、陕西、宁夏、山西、河南、河北部分区域高度适生,在上述区域以外的云南、湖南、福建、安徽、江苏、青海、上海等区域中度适生,在新疆、内蒙古、辽宁、贵州、重庆、湖北、广西、广东、江西、浙江等部分区域低度适生。总之,黄星菊在我国适生区域较广,其中高、中和低适生区的面积占比分别为1.16%、3.54%和 28.25% ,一旦入侵,可能会对我国的生态、经济等造成较大的经济损失。

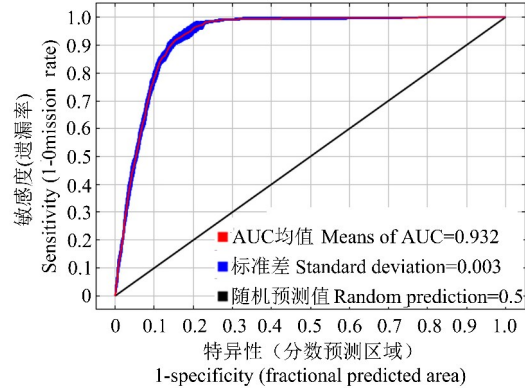


图 1 受试者工作曲线(ROC)及曲线下面积(AUC)
Fig.1 Receiver operating characteristic (ROC) curve and area under the curve (AUC)

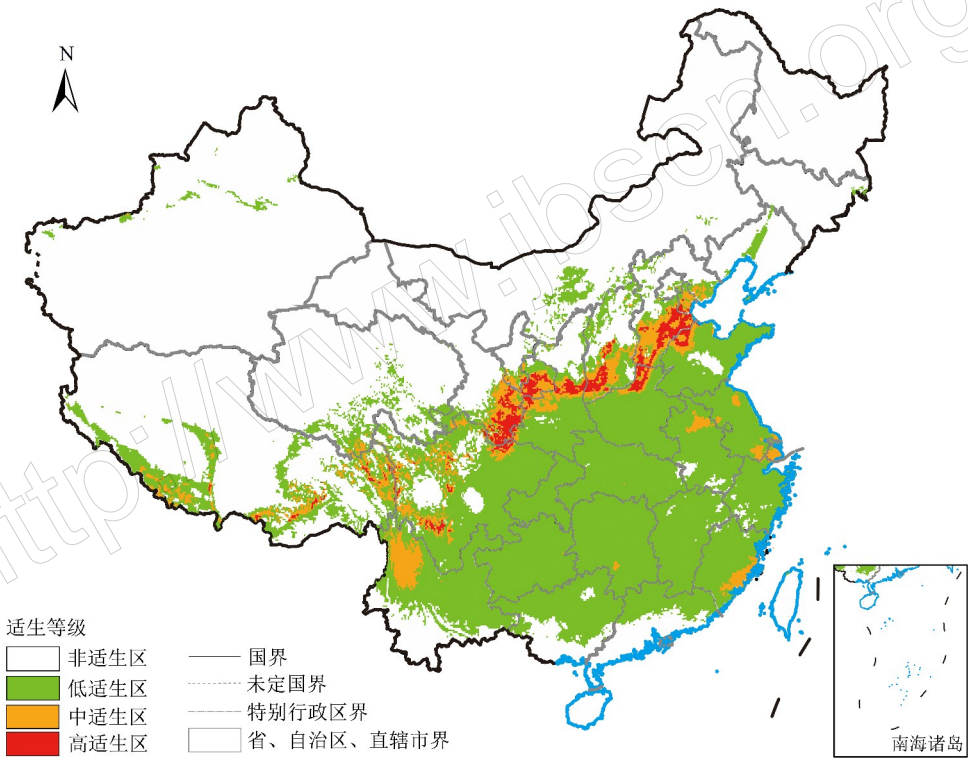


图 2 黄星菊在我国的潜在适生区[审图号:GS(2024)0646号]
Fig.2 Prediction of potential geographical distribution of *C. solstitialis* in China

2.2 黄星菊传入的风险评估

2.2.1 分布情况(P_1) 根据国内外公开发表的文献资料及权威数据库,黄星菊在全球 67 个国家或地区有分布报道记录,我国目前仅在新疆有报道 1 例。按照蒋青等(1995)赋值标准,其国内有分布,但分布面积小于 20%, P_1 赋值为 2 分。

2.2.2 潜在危害性(P_2) 黄星菊为雌雄同株,通常自交不亲和且依赖传粉者。每株可产种子 700 ~ 10000 粒,平均每个头状花序产生 38 ~ 45 粒种子 (Maddox, 1981)。种子库的密度可达 29000 粒 ·

m^{-2} ,大多数种子在 1 a 内发芽,但有些可以在土壤中持续 10 a 或更长时间 (Callihan *et al.*, 1993; Lani-ni *et al.*, 1995; Thomsen *et al.*, 1996)。黄星菊具有很强的竞争优势,在侵入地容易形成密生的灌丛,部分植株冠幅是植株自身高度的 2 倍之多 (杨永刚等, 2017),在它侵入的任何地方,现有植被都会被取代。黄星菊可以通过完全的生态位控制 (例如耗尽土壤水分) 来阻止本地植物生长 (Spencer *et al.*, 2011),据估计,加州每年因水资源枯竭造成的损失为 1600 万 ~ 5600 万美元 (DiTomaso, 2001)。同时,

黄星薊会导致马黑苍白脑软化症或“咀嚼病”,马中毒后嘴唇、面部和舌头的肌肉僵硬和肿胀,无法进食或饮水,最终导致永久性脑损伤,严重受影响的动物会死于口渴和饥饿。综合考虑, P_{21} (潜在的经济危害)赋值 3 分。

目前,暂无黄星薊为我国某种检疫性有害生物传播媒介的相关报道。 P_{22} (是否为其他检疫性有害生物的传播媒介)赋值 0 分。

黄星薊在加拿大、韩国、印度以及我国的台湾地区被列入检疫对象(Onzpr, 2023)。 P_{23} (国外重视程度)赋值 1 分。

2.2.3 受害对象的经济重要性(P_3) 黄星薊通常作为苜蓿 *Medicago sativa* L.、大麦 *Hordeum vulgare* L.等农作物中的污染物出现,受污染的产品可能影响动物健康及国际贸易(Hassannejad & Ghafarbi, 2014; Pala, 2020),还可能威胁 *Baccharis vanessae* R.M.Beauch.等 10 余种濒危动植物(CABI, 2021)。 P_{31} (受害植物的种类)赋值 3 分。

根据农业农村部数据,2021 年我国大麦种植面积为 54.2 万 hm^2 ,苜蓿种植面积为 42.33 万 hm^2 ,低于 150 万 hm^2 。 P_{32} 赋值 1 分。

我国是粮食进口大国,因此其对农产品出口创汇方面的影响不作计算。 P_{33} (受害作物的出口经济价值)赋值为 0。

2.2.4 传播的可能性(P_4) 我国曾从口岸入境旅客行李中截获黄星薊种子。 P_{41} (截获频率)赋值 1 分。

研究发现,黄星薊种子可以在土壤中存活 10 a 或更长时间(Callihan *et al.*, 1993)。 P_{42} (运输中有害生物的存活率)赋值 3 分。

根据我国外交部数据,截至 2023 年 7 月,黄星薊在全球 67 个国家有分布记录,占全部国家的 34%。 P_{43} (国外分布)赋值 2 分。

黄星薊的耐寒性、广泛的气候特征和丰富的种子产量使其在其引入的任何地方都具有潜在的入侵性。适生性分析结果显示,黄星薊在我国适生面积达到 32.96%。 P_{44} (国内的适生范围)赋值 2 分。

黄星薊的扩散可分为自然散布(非生物)和媒介传播(生物)。除自然传播外,有冠毛的种子粘在动物毛皮和人类衣服上,可通过短距离到中距离传播。野鸡、鹌鹑、家雀和金翅雀等鸟类以黄色星薊种子为食,也能够进行长距离传播(Roche, 1992)。黄星薊种子的长距离传播通常与人类活动直接相

关,并通过牲畜、车辆、设备和受污染的干草和农作物种子的传播扩散(DiTomaso, 2001)。中国海关已从口岸入境旅客行李中截获黄星薊种子,且该植株在我国局部地区已定殖,这说明黄星薊可通过人员或货物在国际间作物种子贸易活动而远距离传播。 P_{45} (传播力)赋值 3 分。

2.2.5 管理难度(P_5) 黄星薊一般通过种子进行传播,但其种子容易干瘪,冠毛容易脱落,会给鉴定工作带来一定的困难, P_{51} (检验鉴定的难度)赋值 1 分。

黄星薊的总苞和瘦果易混入谷物、干草饲料随交通工具进行传播,可通过过筛的方式进行清除,对于含有黄星薊总苞和瘦果的杂质或废料,可采取下脚料加热、粉碎或焚烧处理。但难以避免在装卸、储运和加工过程中的撒漏,因此无法保证完全杀灭。 P_{52} (除害处理的难度)赋值 1 分。

黄星薊被认为是美国西部最严重的杂草之一。自 1850 年传入美国加利福尼亚州后蔓延迅速,至 2002 年的估计发生面积已达 560 万 hm^2 (印丽萍, 2018)。在美国加利福尼亚州发现燃烧处理可使黄星薊的覆盖率减少 50%,配合种植多年生牧草可减少 99% 的土壤种子储备(Hastings & DiTomaso, 1996)。但火烧一方面影响环境,另一方面可能导致其他有害生物通过风传播快速入侵。 P_{53} (根除难度)赋值 2 分。

2.2.6 定量分析结果及风险等级的确定 根据上述分析结果,计算得出黄星薊的一级风险指标值 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 ,并最终获得黄星薊入侵我国的综合风险值 R 。计算过程如下:

$$P_1 = 3$$

$$P_2 = 0.6 + 0.2 + 0.2 = 2$$

$$P_3 = \text{Max}((3, 1, 0)) = 3$$

$$P_4 = \sqrt[5]{1 \times 3 \times 2 \times 2 \times 3} = 2.05$$

$$P_5 = (1 + 1 + 2) / 3 = 1.33$$

$$R = \sqrt[5]{2 \times 2 \times 3 \times 2.05 \times 1.33} = 2.01$$

本次风险评估结果表明,黄星薊传入我国的风险等级 $R = 2.01$,为高度危险。

3 讨论与结论

黄星薊在全球广泛分布,除原产地欧洲南部、地中海地区和欧亚大陆西部,还包括北美洲、南美洲、非洲和大洋洲的部分国家和地区。其中与我国贸易往来较频繁的部分国家和地区,如美国、欧盟、

澳大利亚等分布面积较广。黄星菊的种子极有可能通过藏匿于货物或者运输工具等进入我国。黄星菊适应生境广、生长速度快、繁殖能力强,具有很强的竞争优势,在其原产国家和入侵国家均表现出对农业生产的巨大危害性,一旦传入,对我国畜牧业、农业的潜在影响巨大。目前,该有害生物仅在我国新疆的局部区域有报道,根据潜在适生区预测结果,黄星菊在我国的潜在适生区达 32.96%,远未达到其潜在分布范围,仍有继续扩增的可能,应提高警惕。

黄星菊种子产量大,在土壤中持续存活时间长,科学防除尤为重要。目前常用的防除方式有放牧管理、栽培管理、化学防除、机械拔除、火烧、生物防治、综合控制等方式(印丽萍,2018; DiTomaso, 2001; Hastings & DiTomaso, 1996; Maddox *et al.*, 1991; Woo *et al.*, 1999)。不同侵入区域环境不同,需要采取的防除措施也会存在差异。建议针对不同区域,因地制宜,通过监测、生物控制、适度放牧、轮作、覆盖、修剪、生物防治和补种竞争植被等综合方法对黄星菊进行控制。

针对上述现状提出以下几方面的建议:一是建议将黄星菊增补进入我国进境植物检疫性有害生物名录,或列入重点监控名单,为我国口岸检疫机构为防范该杂草入侵我国采取的措施提供政策依据;二是加强风险预警管理,在口岸加大对相关国家进口货物尤其是进口粮食饲料的检疫力度,从源头上控制黄星菊侵入我国;三是针对黄星菊已入侵的区域,应采取科学合理的措施对其进行防除,防止其进一步扩散。对于暂未发现入侵的潜在适生区域,应做好普查监测工作,及时清除;四是加强科普宣传工作,引导民众参与到该有害生物的防除工作中。

参考文献

郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新, 2020. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. 地球科学进展, 35(12): 1292-1305.

贺水莲, 孟静, 洪明伟, 李源, 张洵, 杨扬, 2015. 基于 MaxEnt 软件的忍冬与灰毡毛忍冬的适生分布区预测. 云南农业大学学报(自然科学版), 30(5): 777-783.

蒋青, 梁忆冰, 王乃扬, 姚文国, 1995. 有害生物危险性评价的定量分析方法研究. 植物检疫, 9(4): 208-211.

谭谋, 汪洋, 2021. 栎方翅网蝽 *Corythucha arcuate* (Say) 在中国的潜在适生区预测. 生物安全学报, 30(2): 137-142.

汤思琦, 武扬, 梁定东, 郭恺, 2023. 未来气候变化下栎树猝死病菌在中国的适生性分析. 生态学报, 43(1): 388-397.

王亚锋, 付志玺, 郭云霞, 陶振华, 马蓓, 郑跃鸣, 2022. 入侵性杂草皱果芥在中国的适生区预测及分析. 生物安全学报, 31(4): 356-363.

徐养诚, 刘孝贤, 王婷, 李东育, 高桂珍, 2021. 基于 Max-Ent 模型的菜豆象全球潜在适生区预测. 生物安全学报, 30(3): 213-219.

徐瑛, 赵雷, 方亦午, 张吉红, 李修鹏, 2023. 双雄雀麦传入中国的风险评估. 生物安全学报, 32(1): 51-55.

杨永刚, 吴世明, 陈梦, 程晓甜, 成东辉, 吴仪, 2017. 外来植物黄色星菊识别及传播风险分析. 中国森林病虫, 36(3): 36-37.

印丽萍, 2018. 中国进境植物检疫性有害生物: 杂草卷. 北京: 中国农业科技出版社.

CABI, 2021. *Centaurea solstitialis* (yellow starthistle). (2021-11-16) [2023-07-25]. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompium.12043>.

CALLIHAN R H, SHELEY R L, THILL D C, 1982. *Yellow starthistle, identification and control*. Moscow: Current Information Series No. 634, University of Idaho Cooperative Extension Service.

CALLIHAN R H, PRATHER T S, NORTHAM F E, 1993. Longevity of yellow starthistle (*Centaurea solstitialis*) achenes in soil. *Weed Technology*, 7(1): 33-35.

CARPENTER G, GILLISON A N, WINTER J, 1993. DO-MAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, 2(6): 667-680.

DITOMASO J M, 1998. Biology and impact of yellow starthistle // HODDLE M S. *Innovation in biological control research*. Berkeley: University of California: 82-84.

DITOMASO J M, 2001. *Yellow starthistle information*. Davis, CA: University of California, Weed Research and Information Center.

GBIF, 2022. *Centaurea solstitialis* L. in GBIF secretariat. *GBIF backbone taxonomy. Checklist dataset*. [2023-07-25]. <https://www.gbif.org/species/3128888>.

HASTINGS M, DITOMASO J M, 1996. The use of fire for yellow starthistle (*Centaurea solstitialis*) management and the restoration of native grasslands at Sugarloaf Ridge State Park. *California Exotic Pest Plant Council News*, 4: 4-6.

HASSANNEJAD S, GHAFARBI S P, 2014. Weed flora survey in alfalfa (*Medicago sativa* L.) fields of Shabestar (north-

- west of Iran). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60 (7): 971–991.
- HIRZEL A H, HAUSSEER J, CHESSEL D, PERRIN N, 2002. Ecological niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 83(7): 2027–2036.
- KINGSBURY J M, 1964. *Poisonous plants of the United States and Canada*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- LANINI W T, THOMSEN C, PRATHER T S, SMITH M J, TURNER C E, ELMORE C L, VAYSSIÉRES M, WILLIAMS W A, 1995. *Yellow starthistle*. Oakland: University of California Division of Agriculture and Natural Resources.
- MADDOX D M, 1981. Introduction, phenology and density of yellow starthistle in coastal, intercoastal and central valley situations in California. *USDA Agricultural Research Results*, 20: 33.
- MADDOX D M, MAYFIELD A, PORITZ N H, 1985. Distribution of yellow starthistle (*Centaurea solstitialis*) and Russian knapweed (*Centaurea repens*). *Weed Science*, 33(3): 315–327.
- MADDOX D M, JOLEY D B, MAYFIELD A, MACKEY B E, 1991. Impact of *Bangasternus orientalis* (Coleoptera: Curculionidae) on achene production of *Centaurea solstitialis* (Asterales: Asteraceae) at a low and high elevation site in California. *Environmental Entomology*, 20(1): 335–337.
- MEROW C, SMITH M J, SILANDER JR J A, 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10): 1058–1069.
- ONZPR, 2023. *Official new zealand pest register*. (2023–07–25) [2023–07–25]. <https://pierpestregister.mpi.govt.nz/pests-of-concern/pest-details?id=88620>.
- PALA F, 2020. Observation of weed species, frequency and density in common barley (*Hordeum vulgare* L.) fields of Diyarbakir, Turkey: a case study. *Tarim Bilimleri Dergisi*, 26(2): 164–172.
- PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231–259.
- RICE P M, 2003. *INVADERS database system*. Missoula: Division of Biological Sciences, University of Montana.
- ROCHE B F J, 1992. Achene dispersal in yellow starthistle (*Centaurea solstitialis* L.). *Northwest Science*, 66(2): 62–65.
- SPENCER D, ENLOE S, LIOW P S, KSANDER G, CARRUTHERS R, 2011. Does superior competitive ability explain yellow starthistle's (*Centaurea solstitialis*) successful invasion of annual grasslands in California? *Invasive Plant Science and Management*, 4(3): 284–295.
- THOMSEN C D, WILLIAMS W A, VAYSSIÉRES M P, TURNER C E, LANINI W T, 1996. *Yellow starthistle biology and control*. Oakland, CA: University of California, Division of Agriculture and Natural Resources.
- UYGUR S, SMITH L, UYGUR F N, CRISTOFARO M, BALCIUNAS J, 2004. Population densities of yellow starthistle (*Centaurea solstitialis*) in Turkey. *Weed Science*, 52(5): 746–753.
- WOO I, SWIADON L, DRLIK T, QUARLES W, 1999. Integrated management of yellow starthistle. *IPM Practitioner*, 21(7): 1–10.

(责任编辑:郭莹)

横坑切梢小蠹幼虫触角与口器化学传感器的超微结构

鲁国艳¹, 朱海迪¹, 杨培², 杨斌¹, 李宗波^{1*}

¹西南林业大学生物多样性保护学院/云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 云南 昆明 650224;

²云南中医药大学, 云南 昆明 650500

摘要:【目的】了解横坑切梢小蠹幼虫触角和口器上化学传感器的类型、数量和分布。【方法】应用扫描电子显微镜观察了横坑切梢小蠹末龄幼虫头部形态及触角和口器上的化学传感器。【结果】横坑切梢小蠹幼虫触角仅有1节,着生有2类6种传感器,分别为锥形感器1~2和末梢锥形感器1~4;下颚须和下唇须均为2节,共发现有3类5种传感器,包括锥形感器3、指形感器、末梢锥形感器2、4和5。锥形感器1~3表面具多孔,为典型的嗅觉器官;末梢锥形感器顶端具孔,应为味觉感器;指形感器为下颚须特有,每侧仅有1个,光滑、无孔表面可能意味其具有声音感知功能。【结论】横坑切梢小蠹末龄幼虫头部化学传感器数量少,分布模式简单,且集中分布在触角、下颚须和下唇须的端部,研究将为深入理解横坑切梢小蠹幼虫取食及其相关行为提供科学依据。

关键词: 横坑切梢小蠹; 幼虫; 触角; 口器; 化学感器; 超微结构



开放科学标识码
(OSID 码)

Ultrastructure of chemical sensilla on the antennae and mouthparts of the larvae of *Tomicus minor* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae)

LU Guoyan¹, ZHU Haidi¹, YANG Pei², YANG Bin¹, LI Zongbo^{1*}

¹Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province, College of Biodiversity Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; ²Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract: 【Aim】 To investigate the type, number, and distribution of chemical sensilla on the antennae and mouthparts of the larvae of *Tomicus minor* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). 【Method】 Chemical sensilla on the larval head of the last instar *T. minor* was examined using scanning electron microscopy. 【Result】 The larval antennae of *T. minor* have only one segment that bears six types of sensilla, including sensilla basiconica 1–2 and sensilla twig basiconica 1–4. Both the maxillary and labial palps consist of two segments with five sensory organ types. These were identified as sensilla basiconica 3, sensilla digitiformia, and sensilla twig basiconica 2, 4, and 5. Sensilla basiconica 1–3 with multiple surface pores may play a typical role in odor sensing of chemicals in the larval gallery. Sensilla twig basiconica with tip pores should be interpreted as having a gustatory function. Sensilla digitiformia with a smooth and nonporous surface were presumed to be sensible to sound production in Scolytinae because only one sensilla digitiformia was found on the lateral view of the maxillary palp. 【Conclusion】 Chemical sensilla on the larval head of the last instar of *T. minor* exhibited a low abundance, a simple distribution pattern, and an unchanged concentration on the tips of the antennae, maxillary, and labial palp. The findings of this study are expected to provide further scientific data for a deeper understanding of the feeding and related behaviors of the larvae of *T. minor* under bark.

Key words: *Tomicus minor*; larvae; antennae; mouthpart; chemical sensilla; ultrastructure

收稿日期(Received): 2023-06-21 接受日期(Accepted): 2023-08-30

基金项目: 云南省基础研究重点项目(202101AS070009, 2018FG001-010); 云南省林业领域重点研发计划项目(202302AE090017); 兴滇英才支持计划(YNWR-QNBJ-2018-131)

作者简介: 鲁国艳, 女, 硕士研究生。研究方向: 森林昆虫学。E-mail: luyg@swfu.edu.cn

* 通信作者(Author for correspondence), 李宗波, E-mail: lizb@swfu.edu.cn

横坑切梢小蠹 *Tomicus minor* Hartig 隶属于鞘翅目 Coleoptera 象虫科 Curculionidae 小蠹亚科 Scolytinae 切梢小蠹属 *Tomicus*, 主要分布于欧亚大陆, 可危害分布区内的所有松属植物, 尤其偏爱于苏格兰松 *Pinus sylvestris* L. 和欧洲黑松 *P. nigra* J. F. Arnold, 造成了严重的生态和经济损失 (Vega & Hofstetter, 2015)。在我国西南地区, 横坑切梢小蠹与云南切梢小蠹 *T. yunnanensis* Kirkendall & Faccoli、短毛切梢小蠹 *T. brevipilosus* (Eggers) 共同危害云南松 *P. yunnanensis* Franch., 并具有相似的生活史 (叶辉, 2011; Liu *et al.*, 2019), 即每年的 4 月下旬—5 月上旬, 横坑切梢小蠹的成虫会陆续迁飞到邻近云南松嫩枝上 (蛀梢期), 蛀食嫩梢髓部, 补充营养, 使得嫩枝枯黄, 降低树木的生长势和生物量; 11 月下旬—翌年 4 月, 发育成熟的成虫则会陆续蛀入树干 (蛀干期), 开始产卵、繁殖后代, 这一过程通常由一对雌、雄成虫配合完成, 雌成虫负责构筑母坑道, 雄成虫则负责将雌成虫产生的木屑排出坑道 (高艳飞等, 2012; 叶辉, 2011)。横坑切梢小蠹的主坑道为横向、双臂状, 长度 8~20 cm, 雌成虫将卵产在主坑道的上下两侧, 卵经历 14~21 d 即可孵化, 孵化后幼虫沿着与主坑道垂直的一侧进行取食, 形成与母坑道垂直的子坑道, 子坑道会随着幼虫龄期的增大而逐渐增宽, 约经历 0.5~1.0 月, 幼虫发育至老熟, 在子坑道末端化蛹, 羽化为成虫后开始新的生活史循环 (叶辉, 2011)。可见, 在整个发育过程中, 横坑切梢小蠹克服树木抗性, 包括成虫和幼虫, 就成为其种群生存和繁衍的重要条件, 而前者直接与寄主初级引诱、小蠹虫聚集信息素和共生微生物 (如蓝变真菌、细菌) 相关 (Vega & Hofstetter, 2015; Werle *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2019), 这也是小蠹虫灾变机制研究及其害虫生态调控过程中关注的重点 (戈峰, 2020); 而后者则需要适应和降解寄主植物产生的有毒有害物质, 进而获取营养并完成幼虫的发育 (Vega & Hofstetter, 2015)。但相较于成虫, 全头无足型幼虫的移动能力不足, 加之在坑道内生活和取食的时间长, 意味着其感知外界环境中的各种信息因子, 特别是各种化学信息, 并做出相应的协调行为, 将直接影响并决定幼虫的存活率。这也是探索和完善横坑切梢小蠹综合治理途径所不可或缺的环节 (戈峰, 2020; Vega & Hofstetter, 2015)。

与成虫类似, 幼虫的化学感受器官也主要集中在头部, 特别是触角、下颚须和下唇须, 是幼虫与外界环境进行化学通讯的基本单位, 其在幼虫的许多相关行为上具有重要作用, 如蛀坑、取食、避让等 (Alekseev *et al.*, 2006; Eilers *et al.*, 2012; Morrison *et al.*, 2019; Vega & Hofstetter, 2015; Zacharuk & Shields, 1991)。目前, 关于小蠹亚科或者象虫科昆虫幼虫头部感器的研究, 仅见到落叶松八齿小蠹 *Ips subelongatus* Motschulsky 和云杉八齿小蠹 *I. typographus* Linnaeus (Shi *et al.*, 2020)、杨干象 *Cryptorrhynchus lapathi* L. (Yang *et al.*, 2019)、沟眶象 *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* Motschulsky 和臭椿沟眶象 *E. brandti* (Harold) (Yang *et al.*, 2017) 以及苜蓿叶象甲 *Hypera postica* (Gyllenhal) (Bland, 1983) 等。尽管这些幼虫在钻蛀、生活习性、栖境上有一定的相似性, 但他们的幼虫头部感器仍存在诸多差异。如, Alekseev *et al.* (2006) 发现一种齿小蠹 *Ips* sp. 的头部分布有嗅觉锥 (olfactory cone)、毛形感器、锥形感器和腔锥形感器, 且多数集中在附肢的末端, 数量仅有 21 个; 而 Shi *et al.* (2020) 发现, 落叶松八齿小蠹和云杉八齿小蠹均分布有毛形感器、锥形感器、末梢锥形感器和板形感器, 数量上有 88 和 89 个, 但末梢锥形感器 3 (0 vs 14) 和末梢锥形感器 4 (4 vs 18) 有明显不同。考虑到横坑切梢小蠹的母坑道可深入到木质部外缘处, 其初孵幼虫即可直接取食木材纤维, 又可取食韧皮部与边材中的淀粉纤维, 这与目前已知的齿小蠹及其他树皮小蠹均不相同, 可能预示其在坑道内的取食及信息感知方式有独特性 (Liu *et al.*, 2019; Vega & Hofstetter, 2015)。因此, 本文利用扫描电子显微镜观察了横坑切梢小蠹末龄幼虫的触角、下颚须和下唇须上着生的各类化学感器, 以期为深入理解其幼虫的取食及信息感知提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试虫来源与鉴定

试验样地设于云南省曲靖市沾益九龙山林场 (103°47'44"E, 25°39'52"N), 样地内的横坑切梢小蠹主要位于树干的中下部。根据横坑切梢小蠹蛀干繁殖的生活习性, 于 2022 年 2—3 月将受害的云南松树干中下部带回实验室, 从横向坑道内剖取幼虫。根据幼虫头壳的宽度 (张梦蝶等, 2021), 将横坑切梢小蠹幼虫分为 3 个龄数: 1 龄 0~0.59 mm, 2

龄 0.60~0.90 mm, 3 龄 0.91~1.28 mm, 选取头壳宽度大于 0.91 mm 的幼虫作为末龄幼虫, 即为研究对象, 临时放入 4 ℃ 冰箱保存、待用。

1.2 样品制备与观察

将末龄幼虫从冰箱内取出, 放置在有湿润滤纸的培养皿内, 让其自由爬行 2 h, 除去体表粘黏的杂质, 随后将整体放入 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷酸缓冲液中 (pH7.2~7.4) 进行超声波清洗, 清洗 3 次, 每次 1 min, 结束后即置入 2.5% 戊二醛多聚甲醛的固定液中, 4 ℃ 冰箱中过夜。过夜后, 进行酒精梯度脱水 (30%、50%、60%、70%、80%、90%、无水乙醇), 每一梯度脱水一次, 每次 30 min。最后, 在体视镜下摘取幼虫头部, 并将其黏在电镜样品台上, 用全自动 Gressington 108 离子溅射仪 (英国) 镀金 100 s, 接着利用蔡氏 Sigma300 电子扫描显微镜 (德国) 进行观察和拍照, 共观察 12 头, 加速电压为 7 kV。

1.3 感器命名与数据分析

参考感器的外部形态特征进行分类, 并依据 Zacharuk (1985)、Yang *et al.* (2019)、Shi *et al.*, (2020) 的方法命名。由于幼虫触角、下颚须和下唇须分布的感器数量少, 分布位置稳定, 各感器的数量直接从其分布位置进行计数和累加, 感器的长与基部宽均使用 Image J (Version 1.53c, <https://imagej.nih.gov/ij>) 进行测量, 每种感器至少进行 10 次生物学重复。所有图片处理均在 Adobe Photoshop CC 2018 中进行, 所有数据计算和分析均使用 R 软件 (Version 4.2.2, <https://cran.r-project.org/>)。

2 结果与分析

2.1 幼虫头部形态及其感觉附肢

横坑切梢小蠹幼虫头部呈椭圆形, 上有一隐约可见的“Y”形蜕裂线, 具有较为清晰的额唇基沟和少量长度不等的刚毛, 有一对触角, 但没有单眼 (图 1A)。幼虫头式为下口式, 咀嚼式口器, 由上唇、上颚、下唇、下颚、下颚须和下唇须等构成。上唇位于头部的中央, 是一个衔接于唇基前缘并覆盖在上颚前面的双层薄片, 表面光滑, 基部至末端稀疏分布着 3 行毛形感器, 数量依次为 4、4 和 2 根, 而下唇末端则着生 12 根刺形感器, 刺的大小由中心位置向两侧依次增大, 上唇可在一定范围内进行前后运动, 具有防止食物遗漏的作用。上颚一对, 位于上唇之后, 呈三角形锥状、坚硬, 前部为切齿叶, 分化出顶齿、次顶齿、中齿和磨齿, 主要用于切断和撕裂

食物; 臼齿叶位于基部, 表面有 2 根刺形感器, 可用于感知上颚的开闭及磨碎食物。下颚一对, 位于上颚和下唇之间, 包括茎节、轴节、外颚叶、内颚叶和下颚须 5 部分, 内颚叶外缘有 9~11 根强壮的板状齿, 下颚须 2 节, 端部聚集分布有锥形感器和末梢锥形感器, 具有协助取食的作用。下唇一个, 位于下颚之后, 腹面除了分布有少量的毛形感器和刺形感器外, 近乎光滑, 下唇须 2 节, 其端部也聚集分布着锥形感器和末梢锥形感器, 主要有托挡食物的作用。由于毛形感器和刺形感器均被视作典型的机械感器, 与本文研究范畴关系不大, 因此本文着重关注横坑切梢小蠹幼虫的触角、下颚须和下唇须端部集中分布的不同类型和数量的化学感器。

2.2 幼虫触角与口器上的化学感器

根据感器的外部形态及其表面孔的数量和位置, 将触角、下颚须和下唇须着生的感器分为 3 类: 锥形感器 (sensilla basiconica, Sb)、末梢锥形感器 (sensilla twig basiconica, Stb) 和指形感器 (sensilla digitiformia, Sdi) (图 1C~E)。其中, 触角上有 2 类 6 种感器, 分别为锥形感器 1~2 和末梢锥形感器 1~4; 下颚须有 3 类 5 种感器, 分别为锥形感器 3、指形感器以及末梢锥形感器 2、4 和 5; 下唇须有 2 类 4 种感器, 包括锥形感器 3 以及末梢锥形感器 2、4 和 5。由此可见, 末梢锥形感器 2 和末梢锥形感器 4 是触角、下颚须和下唇须上共有的感器类型, 各感器类型、形态、分布及其数量的详细特征如下。

锥形感器: 形似锥体, 直立, 可分为锥形感器 1 (Sb.1)、2 (Sb.2) 和 3 (Sb.3)。Sb.1 直接从触角表面突起, 基部略微收缩, 随后膨大, 向端部处逐渐变小, 至末端处通常出现双向分叉, 每一分叉的顶端较为钝圆。感器表面粗糙, 随机散布大量的微孔和数量不等的分泌孔, 微孔类似一个凹刻刺穿感器表面, 孔径为 $(32.0 \pm 8.4) \text{ nm}$, 分泌孔则类似一洞穴嵌入感器表面, 且穴外缘处常有圆柱形或乳突状的分泌物, 孔径 $(156.3 \pm 50.7) \text{ nm}$ 。该感器仅位于触角中心位置, 明显高于其他类型感器, 每一触角恒定为一个 (图 1C、图 2A)。Sb.2 位于一个窄的圆形凹槽内, 从基部至端部逐渐变细, 无分叉。感器表面有大量的微孔和一个分泌孔, 前者孔径 $[(42.8 \pm 8.1) \text{ nm}]$ 与 Sb.1 的孔径类似, 而后者 $[(404.2 \pm 72.0) \text{ nm}]$ 则为 Sb.1 的 2.5 倍。该感器位于 Sb.1 的外缘, 也仅分布在触角, 每个触角有一个 (图 1C、图

2B);Sb.3 外形与 Sb.2 类似,短粗,表面粗糙,基部无凹槽,端部更为钝圆,且随机分布着数十个微孔孔径 $[(28.9\pm6.7)\text{ nm}]$ 和一个分泌孔 $[(269.0\pm74.8)\text{ nm}]$ 。该传感器仅见于下颚须和下唇须端部的中心位置,每一个触须上仅有一个(图 1D~E、图 2C)。

末梢锥形感器:外形似锥子,但锥体末端形态变化大,可据此将其分末梢锥形感器 1 (Stb.1)、2 (Stb.2)、3 (Stb.3)、4 (Stb.4) 和 5 (Stb.5)。Stb.1 着生在一个阔的圆形凹槽内,感器表面光滑无孔,但其顶端有一明显凹陷,凹陷中心处似有一微孔。该感器仅分布在触角端部,紧邻 Sb.1,且位于 Sb.1 的内侧(图 1C、图 2D);Stb.2 的基部凹槽不明显,感器表面光滑、无孔,末端具有一圆形的内陷孔,孔边缘则呈现乳突状,分布于触角、下颚须和下唇须的端部,每一着生位置的数量较为恒定,依次为 2、4 (或 5) 和 3 个(图 1C~E、图 2E);Stb.3 坐落于一个阔的圆形凹槽内,感器主轴 2/3 处向内侧略微弯曲,端部钝圆,侧面可见到一似孔的凹刻。该感器

仅见于触角端部,Sb.1 的最内侧,每一触角的数量恒定为一个(图 1C、图 2F);Stb.4 外形似一乳突坐落在一个锥体上,乳突端部中心处有一微孔,外缘处则有一列微孔围绕着中心孔,整体上呈现套筒状,集中分布在下颚须和下唇须端部的最外侧和触角上,呈环状包围着 Sb.3、Stb.2、Stb.4 和 Stb.5。下颚须通常有 14~16 个,下唇须有 14~17 个,是下颚须和下唇须和触角上高度最低的传感器类型(图 1D~E、图 2G);Stb.5 外形似圆柱状,但端部突然收缩、钝圆,且分布有纵向沟槽,沟槽在端部中心处汇集在一起,内陷成一凹槽,凹槽中心又有一明显低于凹槽的锥状突起。该感器是下颚须和下唇须端部最强壮的感器,并与 Stb.2 混合分布,一起环绕着 Sb.3,每个唇须上的数量有 3~4 个(图 1D~E、图 2H)。

指形感器:外形似指形或板状,平附在一个深的狭长凹槽内,感器长 $(26.9\pm1.5)\text{ }\mu\text{m}$,基部宽 $(2.6\pm0.3)\text{ }\mu\text{m}$,仅分布下颚须端部的内侧面,每一颚须上仅有一个(图 1D、图 2I)。

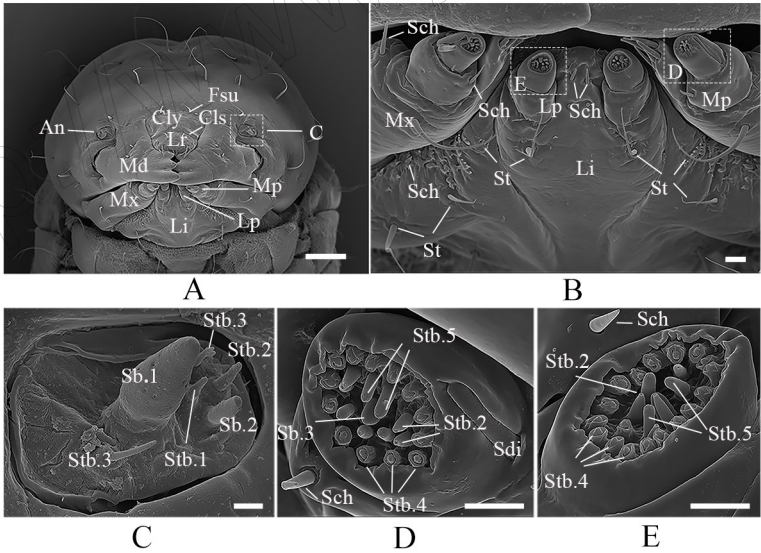


图 1 横坑切梢小蠹幼虫头部及其附肢

Fig.1 Front view of the head and its sensory appendage of the last instar larvae of *T. minor*
A: 头部整体; B: 颚和下唇; C: 触角; D: 下颚须端部; E: 下唇须端部。An: 触角; Cls: 唇基沟; Cly: 唇基; Fsu: 额唇基沟; Li: 唇; Lp: 下唇须; Lr: 上唇; Md: 上颚; Mp: 下颚须; Mx: 下颚; Sb.1~3: 锥形感器 1~3; Sch: 刺形感器; Sdi: 指形感器; St: 毛形感器; Stb.1~5: 末梢锥形感器 1~5; 虚线框指对应区域的放大图。比例尺: A=100 μm ; B=10 μm ; C~E=5 μm 。
A: Front view of the whole head; B: Front view of maxillae and labium; C: Front view of whole antennae; D: Front view of the tip of maxillary palp; E: Front view of the tip of labium palp; An: Antennae; Cls: Clypeal sulcus; Cly: Clypeus; Fsu: Frontoclypeal sulcus; Li: Labium; Lp: Labial palp; Lr: Labrum; Md: Mandible; Mp: Maxillary palp; Mx: Maxilla; Sb.1~3: Sensilla baciconica 1~3; Sch: Sensilla chaetica; Sdi: Sensilla digitiformia; St: Sensilla trichodea; Stb.1~5: Sensilla twig basiconica 1~5; The dashed boxes show the magnified area in the labelled letter in the followed figure. Scale bar: A=100 μm ; B=10 μm ; C~E=5 μm .

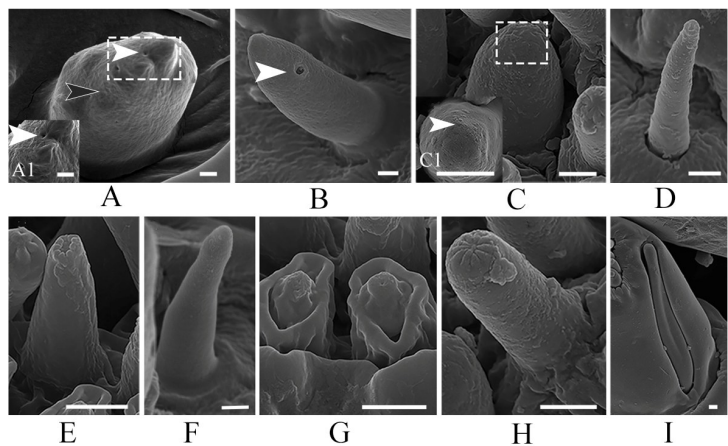


图 2 横坑切梢小蠹幼虫触角和口器传感器的超微结构

Fig.2 Ultrastructures of the sensilla on the antennae and mouthpart of the last instar larvae of *T. minor*

A: 锥形感器 1, A1 示该位置的放大图; B: 锥形感器 2; C: 锥形感器 3, C1 示该位置的放大图; D: 末梢锥形感器 1; E: 末梢锥形感器 2; F: 末梢锥形感器 3; G: 末梢锥形感器 4; H: 末梢锥形感器 5; I: 指形感器; 白色箭头表示感器表面的分泌孔, 黑色箭头表示表面孔。
Sb.1~2: 锥形感器 1~2; Sdi: 指形感器; Stb.1~4: 末梢锥形感器 1~4。比例尺 = 1 μm。
A: Sensilla basiconica 1, A1 shows themagnified view from the white-dashed box; B: Sensilla basiconica 2; C: Sensilla basiconica 3, C1 shows the magnified view from the white-dashed box; D: Sensilla twig basiconica 1; E: Ssensilla twig basiconica 2; F: Sensilla twig basiconica 3; G: Sensilla twig basiconica 4; H: Sensilla twig basiconica 5; I: Sensilla digitiformia; The black and white arrowhead shows the secreted and surface pores on the sensilla surface, respectively. Scale bar = 1 μm.

2.3 幼虫触角和口器传感器的个体差异

横坑切梢小蠹幼虫触角和口器上共分布 3 类 9 种感器, Sb.1、Stb.2、Stb.4 和 Stb.5 存在明显的形态或者数量不同(图 3)。在触角上, Sb.1 和 Stb.2 的数量和着生位置恒定, 几乎不发生改变, 但两者的形态则出现显著不同。其中, Sb.1 的端部变化最大, 有不分叉(图 3A)、双分叉(图 3B)和多分叉(图 3C)3 种, 三者依次占比为 66.7%、16.7%和 16.7%; Stb.2 的端部则会出现非对称的“V”型分叉, 较为罕

见, 仅在 12 个样品中发现一例, 占比 8.3%。在下颚须和下唇须上, Stb.2、Stb.4 和 Stb.5 的形态和分布上几乎没有变化, 但三者数量上存在变动, 变动范围依次在 17~20、55~65 和 14~18 个, 数量越多, 各感器排列的越为紧密, 数量较少则较为稀疏(图 3A、B、C)。另外, 在同一个体的左、右下颚须和上唇须端部上, Stb.2、Stb.4 和 Stb.5 的数量也不对称, 常会出现多 1 或 2 个现象, 但整体数量保持相对稳定(表 1)。

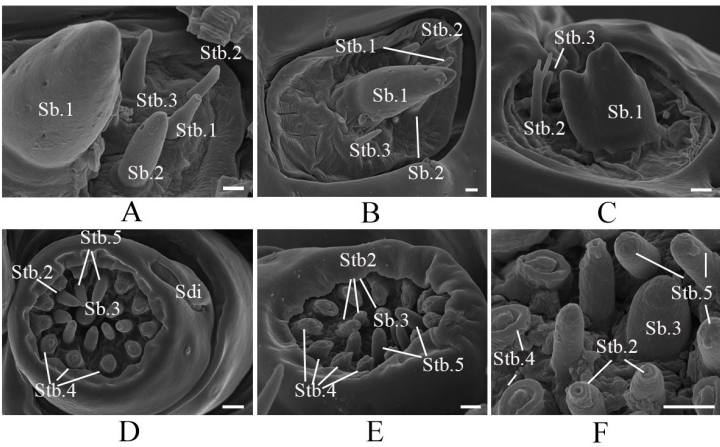


图 3 横坑切梢小蠹幼虫触角和口器传感器的个体差异

Fig.3 Individual variations of the sensilla on the antennae and mouthpart of the last instar larvae of *T. minor*

A~C: 触角端部及其感器类型; D: 下颚须端部及其感器; E: 下唇须端部及其感器; F: 位于额须端部不同感器的超微形态。
Sb.1~3: 锥形感器 1~3; Stb.1~5: 末梢锥型感器 1~5; Sdi: 指形感器。比例尺 = 2 μm。
A~C: Front view of antennal tip and its sensilla; D: Front view of maxillary palp and its sensilla; E: Front view of labial palp and its sensilla. Sb.1~3: sensilla basiconica 1~3; Stb.1~5: Sensilla twig basiconica 1~5; Sdi: Sensilla digitiformia. Scale bar = 2 μm.

表 1 横坑切梢小蠹幼虫触角和口器感器的类型、形态及其数量

Table 1 Types, morphology, and quantity of the sensilla on the antennae and mouthpart of the last instar larvae of *T. minor*

感器类型 Types	形态 Shape	分布 Site	表面 Surface	微孔 Porosity	端部 Tip	基部凹槽 Basal socket	数量 /个 Quantity	长度 Length /μm
锥形感器 1 Sensilla basiconica 1	锥状,直立 Coniform, straight	触角 Antennae	粗糙 Rough	多孔 Multiparous	两分叉 Bifurcate	不明显 Unobvious	2	16.5±2.3
锥形感器 2 Sensilla basiconica 2	锥状,直立 Coniform, straight	触角 Antennae	粗糙 Rough	多孔 Multiparous	钝 Blunt	圆形,窄 Circular, shallow	2	9.0±0.7
锥形感器 3 Sensilla basiconica 3	锥状,直立 Coniform, straight	下颚须、下唇须 Maxillae, labrum	粗糙 Rough	多孔 Multiparous	钝 Blunt	圆形,阔 Circular, wide	4	4.2±0.5
末梢锥形感器 1 Sensilla twig basiconica 1	锥状,直立 Coniform, straight	触角 Antennae	光滑 Smooth	顶孔 Uniporous	凹陷 Concave	圆形,阔 Circular, wide	2	6.1±0.3
末梢锥形感器 2 Sensilla twig basiconica 2	锥状,直立 Coniform, straight	触角、下颚须、 下唇须 Antennae, maxillae, labrum	光滑 Smooth	顶孔 Uniporous	乳突形凹陷 Capitate concave	不明显 Unobvious	19±1	4.5±0.7
末梢锥形感器 3 Sensilla twig basiconica 3	锥状,直立 Coniform, straight	触角 Antennae	光滑 Smooth	侧面单孔 Uniporous, lateral	钝 Blunt	圆形,阔 Circular, wide	4	4.5±0.8
末梢锥形感器 4 Sensilla twig basiconica 4	锥状,直立 Coniform, straight	触角、下颚须、 下唇须 Antennae, maxillae, labrum	光滑 Smooth	顶孔 Uniporous	圆形凹陷 Circular concave	不明显 Unobvious	57±4	1.3±0.3
末梢锥形感器 5 Sensilla twig basiconica 5	锥状,直立 Coniform, straight	下颚须、下唇须 Maxillae, labrum	光滑 Smooth	顶孔 Uniporous	纵向沟槽 Longitudinal groove	不明显 Unobvious	16±1	4.3±0.5
指形感器 Sensilla digitiformia	指形或板状, 平附 Finger or platelike, flat	下颚须 Maxillae, labrum	光滑 Smooth	略凹陷 Concave	光滑 Smooth	狭长,宽 Microscler, wide	2	26.9±1.5

所有的数值均为均值±标准差。
All values are mean±standard deviation.

3 讨论

化学信号是联系昆虫与植物之间最为古老的一种通讯方式,也是引导植食性昆虫定向行为,如取食、交配、产卵、筑巢等的主要因素,亦在害虫治理方面具有重要意义(戈峰,2020; Vega & Hofstetter,2015; Visser,1988)。研究表明,多数昆虫幼虫主要通过触角、下颚须和下唇须上着生的各类化学感器来感知化学信号,这些感受器与幼虫取食及其相关行为联系密切(Zacharuk & Shields,1991)。应用扫描电子显微技术,本研究对横坑切梢小蠹末龄幼虫头部进行了详细的形态观察,发现其幼虫头部共有 3 类 9 种化学感器,触角上有锥形感器 1~2 和末梢锥形感器 1~4,下颚须有锥形感器 3、指形感器和末梢锥型感器 2、4 和 5,下唇须上有锥形感器 3 和末梢锥形感器 2、4 和 5,这些感器的类型、形态和分布与落叶松八齿小蠹(Shi *et al.*,2020)、云杉八齿小蠹(Shi *et al.*,2020)、杨干象(Yang *et al.*,2019)、

米象 *Sitophilus oryzae* (Linnaeus) (Speirs *et al.*,1986)、沟胫天牛亚科[光肩星天牛、星天牛 *A. chinensis* (Forster)、松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope、蓝墨天牛 *M. guerryi* Pic、桑天牛 *Apriona rugicollis* Chevrolat、锈色粒肩天牛 *A. swainsoni* (Hope) 和云斑白条天牛 *Batocera lineolata* Chevrolat](徐丽丽,2016; Xu *et al.*,2017)、沟眶象(Yang *et al.*,2017)、臭椿沟眶象(Yang *et al.*,2017)、苜蓿叶象甲(Bland,1983)等亲缘关系较近的鞘翅目昆虫幼虫较相似(McKenna *et al.*,2019),仅数量上存在略微不同。例如,S.tb.4 在横坑切梢小蠹的每个唇须有 12~18 个,而在杨干和光肩星天牛(被称为 S.tb.6)、落叶松八齿小蠹和云杉八齿小蠹(被称为 S.t.b.5)上仅有 1~2 个。但是,对于亲缘关系较远和生活习性差别较大鞘翅目昆虫幼虫,如步甲科(Giglio *et al.*,2003)、拟步甲科(Behan & Ryan,1978; Ruschioni *et al.*,2019)、穴甲科(韩潇等,2021)、金龟甲

科(Eilers *et al.*, 2012)等则有很大的差异。例如, Giglio *et al.* (2003)观察了10族16属22种步甲科幼虫后发现,步甲幼虫头部仅着生2种化学感器,分别为指形感器和锥形感器,前者不仅分布在下颚须,也在下唇须处分布,数量上分别为1~32和0~61个;锥形感器同样广泛分布在下颚须和下唇须上,数量分别为0~106和6~190个。整体来看,营钻蛀性的昆虫幼虫头部的感器的数量较少,分布模式简单,且化学感器集中分布,这可能与其在树干内拥有相对稳定的环境有关,也说明坑道内的有限信息感知对其取食及其相关行为是不可或缺的(Yang *et al.*, 2017; Zacharuk & Shields, 1991)。

一般来说,感器表面孔的数量、位置以及基部是否有凹槽可用来推断该感器的功能,如表面具有多孔的感器是典型的嗅觉器官,而端部具单孔或少量微孔的,则为味觉器官。当然,也可能兼具机械、CO₂、湿热等功能(Altner *et al.*, 1981; Keil, 1996; Zacharuk & Shields, 1991)。对于横坑切梢小蠹来说,其幼虫的触角、下颚须和下唇须分布有8种表面具孔的感器(锥形感器1~3和末梢锥形感器1~5)和1中表面光滑无孔的感器(指形感器)。其中, Sb.1和Sb.2共同分布在触角上,这与多数的象虫科和天牛科昆虫幼虫触角上仅有Sb.1一种锥形感器不同,且这些Sb.1表面均没有分泌孔,考虑到分泌孔外缘的分泌物可能有利于与坑道内松脂类物质结合,加之多孔的表面以及直接从触角表皮突起, Sb.1可能兼具嗅觉、味觉和机械感知的功能, Sb.2可能为嗅觉和味觉器官。Sb.3仅见于下颚须和下唇须的端部,且高度低于Stb.2和Stb.5,形态上又与落叶松八齿小、云杉八齿小蠹、沟眶象、光肩星天牛等高度相似,其作为嗅觉器官应没有异议。Stb仅见于触角上,因其表面光滑以及顶端似有凹陷孔,形态上与沟眶象和臭椿沟眶象的S.tb.2、杨干象的S.t.b.3、光肩星天牛的S.t.b.1相似,推测其可能具有触觉和味觉功能,能对坑道内的糖、盐等食物信息做出反应(Eilers *et al.*, 2012; Zacharuk, 1980); Stb2和Stb4既存在于触角中,又分布于下颚须和下唇须的端部,前者端部具有花瓣状凹陷,直立于触角、下颚须和下唇须上,可以直接与坑道接触,而后者端部具有多个微孔,且环绕排列在下颚须和下唇须的端部,也是所有下颚须和下唇须上的最短感器类型,且与沟眶象、臭椿沟眶象、落叶松

八齿小蠹、云杉八齿小蠹的S.t.b.5、杨干象和光肩星天牛的S.t.b.6相似, Stb2可能为味觉器官, Stb4为嗅觉器官。Stb5的顶端有11条纵沟, Fernández *et al.* (1999)认为,纵沟可能是由众多的微孔构成的,但在高放大倍数下,本研究没有观察到微孔的存在。Stb.5外形与欧洲鳃金龟 *Melolontha melolontha* L.额须上的刺形感器4(S4)类似, TEM观察发现, S4有4~5个外部树突和一个管胞体(Eilers *et al.*, 2012)。考虑到Stb.5明显高于其他感器类型,推测Stb5可能具有机械和味觉的双重功能。Sdi也被称为板形感器,几乎分布于所有鞘翅目昆虫的下颚须上,包括雌、雄成虫,数量为1~61个(Beutel & Yavorskaya, 2019; Giglio *et al.*, 2003)。Zacharuk *et al.* (1977)用透射电镜观察,发现其没有典型的化学感受器应具有的多孔毛角质孔,且淋巴腔内仅有一个末端分支的树突,这是典型触觉机械感器的特征。随后的电生理研究证实,该感器对氨基酸、糖、盐和水没有反应,但是对接触和振动刺激有反应。考虑到横坑切梢小蠹幼虫生活在坑道内,加之小蠹亚科昆虫普遍存在摩擦震动通讯(Hofstetter *et al.*, 2019),推测Sdi应作为一种机械震动感器,对声信号具有感知能力。

幼虫头部感器的数量和形态亦存在个体间的差异,感器数量上主要体现在下颚须和下唇须上的Stb.2、Stb.4和Stb.5上,在每个唇须上的波动范围在1~2个,也包括同一个体的左、右唇须上。自然环境压力,包括温度、种群密度、食物质量、光周期等,能够引起昆虫表型发生改变,进而促使生物个体逐渐适应多变的环境因子(Diehl & Bush, 1984),使得每个唇须上的末梢锥形感器的数量增加或减少,很可能是横坑切梢小蠹应对外部环境的一种适应性进化(Glendinning, 2008)。在感器形态上,很少见到在同一位置出现不同形态的感器(徐丽丽, 2016; Altner *et al.*, 1981; Yang *et al.*, 2017, 2019; Zacharuk, 1980; Zacharuk & Shields, 1991),正如触角上的Sb.1和Stb.2。一般认为,化学感器的延伸、增粗、末端分支有利于提高其比表面积,进而提高感器的灵敏度(李宗波等, 2014),幼虫个体出现分支型的Sb.1很可能具有这样的功能,以利于其感知坑道内的不同的气味。另外,小蠹类昆虫的物种鉴定比较困难,且常常会出现错误,如分布于地中海沿岸的地中海切梢小蠹 *T. destruens* Woll和云南地

区的云南切梢小蠹,最初均被认为是纵坑切梢小蠹 *T. piniperda* (L.),后来用分子技术以及进一步的形态检查才确定为新物种。并且,在一些广泛分布的小蠹虫中,常常存在地理居群或者种团(species complex)。考虑横坑切梢小蠹分布范围广,加之云南地形地势复杂,海拔高度落差大,横坑切梢小蠹很可能会分化出不同的种团。若这种推测合理,一方面可以解释末端分叉的 Sb.1 占比较高的结果(占比 1/3),另一方面也意味着下一步可结合 DNA 标记和测序技术(如 SSR、COI、EF-1 α 和 28S)来验证横坑切梢小蠹是否存在种团,以期为实现个性化害虫区域性生态调控(area-wide pest management, AWPM)奠定科学基础。

参考文献

- 高艳飞,张英,张真,吴伟,2012.切梢小蠹蛀食云南松枝梢行为研究.东北林业大学学报,40(6):81-84.
- 戈峰,2020.论害虫生态调控策略与技术.应用昆虫学报,57(1):10-19.
- 韩潇,段彦丽,李秀芬,王志勇,张翌楠,乔鲁芹,2021.花绒寄甲 1 龄幼虫触角及口器传感器的超微结构.林业科学研究,34(2):180-184.
- 李宗波,杨培,赵健,杨大荣,2014.传粉榕小蜂雌蜂多孔板形感器的形态与适应进化.应用昆虫学报,51(4):1086-1097.
- 徐丽丽,2016.沟胫天牛亚科七种天牛不同虫态触角、下颏须和下唇须的感器研究.硕士学位论文.北京:北京林业大学.
- 叶辉,2011.云南切梢小蠹.昆明:云南科技出版社.
- 张梦蝶,钱路兵,泽桑梓,杨斌,李宗波,2021.云南切梢小蠹幼虫表皮碳氢化合物与龄数的相关性.林业科学,57(5):151-159.
- ALEKSEEV M A, SINITSINA E E, CHAIKA S Y, 2006. Sensory organs of the antennae and mouthparts of beetle larvae (Coleoptera). *Entomological Review*, 86(6):638-648.
- ALTNER H, ROUTIL C, LOFTUS R, 1981. The structure of bimodal chemo-, thermo-, and hygroreceptive sensilla on the antenna of *Locusta migratoria*. *Cell and Tissue Research*, 215(2):289-308.
- BEHAN M, RYAN M F, 1978. Ultrastructure of antennal sensory receptors of *Tribolium larvae* (Coleoptera: Tenebrionidae). *International Journal of Insect Morphology and Embryology*, 7(3):221-236.
- BEUTEL R G, YAVORSKAYA M, 2019. Structure and evolution of mouthparts in Coleoptera // KRENN H W. *Insect mouthparts: form, function, development and performance*. Cham: Springer International Publishing: 387-418.
- BLAND R G, 1983. Sensilla on the antennae, mouthparts, and body of the larva of the alfalfa weevil, *Hypera postica* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae). *International Journal of Insect Morphology and Embryology*, 12(5):261-272.
- DIEHL S R, BUSH G L, 1984. An evolutionary and applied perspective of insect biotypes. *Annual Review of Entomology*, 29(1):471-504.
- EILERS E J, TALARICO G, HANSSON B S, HILKER M, REINECKE A, 2012. Sensing the underground-ultrastructure and function of sensory organs in root-feeding *Melolontha melolontha* (Coleoptera: Scarabaeinae) larvae. *PLoS ONE*, 7(7):e41357.
- FERNÁNDEZ M M F, ALONSO J A P, COSTAS J M S, 1999. Oviposition and development of the immature stages of *Tomicus minor* (Coleoptera, Scolytidae). *Agricultural and Forest Entomology*, 1(2):97-102.
- GIGLIO A, FERRERO E A, PERROTTA E, TRIPEPI S, BRANDMAYR T Z, 2003. Ultrastructure and comparative morphology of mouth-part sensilla in ground beetle larvae (Insecta, Coleoptera, Carabidae). *Zoologischer Anzeiger*, 242(3):277-292.
- GLENDINNING J I, 2008. Insect gustatory systems // MASLAND R H, ALBRIGHT T D, ALBRIGHT T D, MASLAND R H, DALLOS P, OERTEL D, FIRESTEIN S, BEAUCHAMP G K, BUSHNELL M C, BASBAUM A I, KAAS J H, GARDNER E P. *The senses: a comprehensive reference*. New York: Academic Press: 75-95.
- HOFSTETTER R W, AFLITTO N, BEDOYA C L, YTURRELLE K, DUNN D D, 2019. Vibrational behavior in bark beetles: applied aspects // HILL P S M, LAKES-HARLAN R, MAZZONI V, NARINS P M, VIRANT-DOBERLET M, WESSEL A. *Biotremology: studying vibrational behavior*. Cham: Springer International Publishing: 415-435.
- KEIL T A, 1996. Sensilla on the maxillary palps of *Helicoverpa armigera* caterpillars: in search of the CO₂-receptor. *Tissue and Cell*, 28(6):703-717.
- LIU F, WU C, ZHANG S, KONG X, ZHANG Z, WANG P, 2019. Initial location preference together with aggregation pheromones regulate the attack pattern of *Tomicus brevipilosus* (Coleoptera: Curculionidae) on *Pinus kesiya*. *Forests*, 10(2):156.
- MCKENNA D D, SHIN S, AHRENS D, BALKE M, BEZA-BEZA C, CLARKE D J, DONATH A, ESCALONA H E, FRIEDRICH F, LETSCH H, LIU S, MADDISON D, MAYER C, MISOF B, MURIN P J, NIEHUIS O, PETERS R S,

- PODSIADLOWSKI L, POHL H, SCULLY E D, YAN E V, ZHOU X, ŚLIPŃSKI A, BEUTEL R G, 2019. The evolution and genomic basis of beetle diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(49): 24729–24737.
- MORRISON W R, GROSIDIER R F, ARTHUR F H, MYERS S W, DOMINGUE M J, 2019. Attraction, arrestment, and preference by immature *Trogoderma variabile* and *Trogoderma granarium* to food and pheromonal stimuli. *Journal of Pest Science*, 93: 135–147.
- RUSCHIONI S, LORETO N, ISIDORO N, RIOLO P, 2019. Sensory structures on maxillary and labial palps of *Tenebrio molitor*. *Bulletin of Insectology*, 72(2): 309–316.
- SHI X, SHEN J C, ZHANG S F, LIU F, XU F Y, WANG G L, ZHANG Z, KONG X B, 2020. Comparative analysis of the type and number of larval sensilla on the antennae and mouthparts of *Ips typographus* and *Ips subelongatus* using SEM. *Zoologischer Anzeiger*, 289: 18–25.
- SPEIRS R D, WHITE G D, WILSON J L, 1986. SEM observations of rice weevil larvae, *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 59(2): 390–394.
- VEGA F E, HOFSTETTER R W, 2015. *Bark beetles: biology and ecology of native and invasive species*. San Diego: Academic Press.
- VISSER J H, 1988. Host-plant finding by insects: orientation, sensory input and search patterns. *Journal of Insect Physiology*, 34(3): 259–268.
- WERLE C T, RANGER C M, SCHULTZ P B, REDING M E, ADDESSO K M, OLIVER J B, SAMPSON B J, 2019. Integrating repellent and attractant semiochemicals into a push-pull strategy for ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Applied Entomology*, 143(4): 333–343.
- WU C X, LIU F, ZHANG S F, KONG X B, ZHANG Z, 2019. Semiochemical regulation of the intraspecific and interspecific behavior of *Tomicus yunnanensis* and *Tomicus minor* during the shoot-feeding phase. *Journal of Chemical Ecology*, 45(3): 227–240.
- XU L, ZHANG L, YANG Y, REN L, WANG T, ZONG S, 2017. Morphology of antennal, maxillary palp and labial palp sensilla in different larval instars of the Asian long-horned beetle, *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Zoologica*, 98(1): 20–31.
- YANG Y, REN L, WANG T, XU L, ZONG S, 2017. Comparative morphology of sensilla on antenna, maxillary palp and labial palp of larvae of *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* (Olivier) and *E. brandti* (Harold) (Coleoptera: Curculionidae). *Acta Zoologica*, 98(4): 400–411.
- YANG Y, REN L, XU L, WANG T, ZONG S, 2019. Comparative morphology of sensilla on the antennae, maxillary and labial palps in different larval instars of *Cryptorrhynchus lapathi* (Linnaeus) (Coleoptera: Curculionidae). *Zoologischer Anzeiger*, 283: 93–101.
- ZACHARUK R Y, ALBERT P J, BELLAMY F W, 1977. Ultrastructure and function of digitiform sensilla on the labial palp of a larval elaterid (Coleoptera). *Canadian Journal of Zoology*, 55(3): 569–578.
- ZACHARUK R Y, 1980. Ultrastructure and function of insect chemosensilla. *Annual Review of Entomology*, 25(1): 27–47.
- ZACHARUK R Y, 1985. Antennae and sensilla// KERKUT G A, GILBERT L I. *Comprehensive insect physiology, biochemistry and pharmacology*. Oxford: Pergamon: 1–69.
- ZACHARUK R Y, SHIELDS V D, 1991. Sensilla of immature insects. *Annual Review of Entomology*, 36(1): 331–354.

(责任编辑:郭莹)

进境植物检疫性有害生物无花果蜡蚧 在海南首次报道及其风险分析

吕朝军¹, 芮 凯², 钟宝珠¹

¹中国热带农业科学院椰子研究所, 海南 文昌 571339;

²海南省农业科学院植物保护研究所, 海南 海口 571100

摘要: 无花果蜡蚧为我国进境植物检疫性有害生物。2023年3月,在海南省三亚市南滨农场首次发现无花果蜡蚧暴发危害槟榔。为明确该虫在海南的风险性等级,本研究从定性和半定量角度开展无花果蜡蚧在海南的风险分析。结果表明,无花果蜡蚧在海南的风险性综合评价值 R 为2.56,属特别危险有害生物,应迅速开展积极防治和监测预警,制定和启动防控应急预案。根据林业有害生物风险分析准则和无花果蜡蚧在海南风险性分析结果,提出了相应风险管理措施。

关键词: 无花果蜡蚧; 海南省; 风险分析



开放科学标识码
(OSID 码)

The first report and risk analysis of the imported plant quarantine pest *Ceroplastes rusci* in Hainan Province, China

LÜ Chaojun¹, RUI Kai², ZHONG Baozhu¹

¹Coconut Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wenchang, Hainan 571339, China;

²Institute of Plant Protection, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: *Ceroplastes rusci* (Linnaeus) is a quarantine pest for import plants in China. In March 2023, an outbreak of *C. rusci* in an *Areca catechu* (a species of palm) plantation in Nanbin farm, Sanya City, was studied, which was the first discovery of this insect in Hainan Province. To elucidate the risk analysis level of this insect in Hainan, qualitative and semi-quantitative analysis methods were performed to understand the risk of *C. rusci* in Hainan. The results indicated that the R -value of *C. rusci* in Hainan is 2.56, classifying it as a particularly harmful pest. Based on the analysis results, active prevention and monitoring and early warning systems should be implemented promptly, and emergency plans for prevention and control should be formulated and initiated. Based on the risk analysis criteria of forestry pests and the risk analysis results of *C. rusci* in Hainan, suitable risk management measures have been determined.

Key words: *Ceroplastes rusci*; Hainan Province; risk analysis

无花果蜡蚧 *Ceroplastes rusci* (Linnaeus) 隶属半翅目 Hemiptera 蚧科 Coccidae 蜡蚧属 *Ceroplastes*, 原产于非洲地中海沿岸, 现已分布于近 60 个国家和地区, 其中以热带、亚热带及暖温带为主, 是我国进境植物检疫性有害生物(陈乃中, 2009), 我国黄河以南地区均为该虫的适生区(李海斌和武三安, 2013)。2012年, 我国在广东茂名市和四川攀枝花市发现无花果蜡蚧危害, 目前在广东、四川、云南均有分布(王戌勃等, 2022; 王颖等, 2014)。该虫通过吸食寄主枝

干、叶片等组织汁液造成树势衰弱和减产, 同时, 其分泌的蜜露还可诱发煤污病, 影响植株光合作用, 降低寄主的观赏价值(Fetykó & Kozár, 2012; Rainato & Pellizzari, 2010; Shabana & Ragab, 1997; Vu *et al.*, 2006), 其分泌的蜜露还可为红头丽蝇 *Calliphora vicina* Rob-Des. 和棕尾别麻蝇 *Boettcherisca peregrina* Rob-Des. 等卫生害虫提供蜜源(黄永辉等, 2022)。

近年来, 在海南新报道的有害生物数量呈上升趋势, 如青梅山天牛 *Massicus venustus* Pas. (杜尚嘉

收稿日期(Received): 2023-06-08 接受日期(Accepted): 2023-08-24

基金项目: 海南省重大科技计划项目(zdkj201817); 海南省院士创新平台(槟榔黄化病综合防控院士团队创新中心)资金

作者简介: 吕朝军, 男, 副研究员, 博士研究生。研究方向: 热带害虫生态防控技术。E-mail: Lej5783@126.com

* 通信作者(Author for correspondence), 钟宝珠, E-mail: baozhz@163.com

等,2022)、橘绵粉虱 *Aleurothrixus floccosus* Mas.(虞国跃等,2019)、椰子织蛾 *Opisina arenosella* Walker(黄山春等,2017)。本研究首次在海南三亚崖州区发现无花果蜡蚧暴发危害槟榔 *Areca catechu* L.,为该虫在海南的首次记录。为明确其在海南的风险性等级,本研究开展了无花果蜡蚧在海南的风险性分析,以期为该虫的防控技术制定提供依据。

1 无花果蜡蚧对海南槟榔的危害症状

2023年3月,作者在海南省三亚市崖州区南滨农场(18°22'17"N,109°10'46"E)面积为2 hm²、树龄为10~13 a的槟榔园开展调查。在所有调查到的槟榔

植株上均发现一种蜡蚧危害,单株虫口数量从几只到数千只不等。2023年5月17日,北京林业大学武三安教授对其进行形态学鉴定,确认为无花果蜡蚧。

如图1所示,无花果蜡蚧可危害槟榔叶片、茎干、叶柄、叶鞘等,同时引发严重的煤烟病,导致树势衰弱。部分植株的叶腋部位由于无花果蜡蚧危害导致干枯,致使叶片无法脱落,影响花絮的正常开放,对产量影响严重。无花果蜡蚧在槟榔园内存在世代重叠现象,不同龄期若虫和成虫共同危害,并可与其他害虫(红蜘蛛,椰圆蚧 *Aspidiotus destructor* Sig.等)共存。

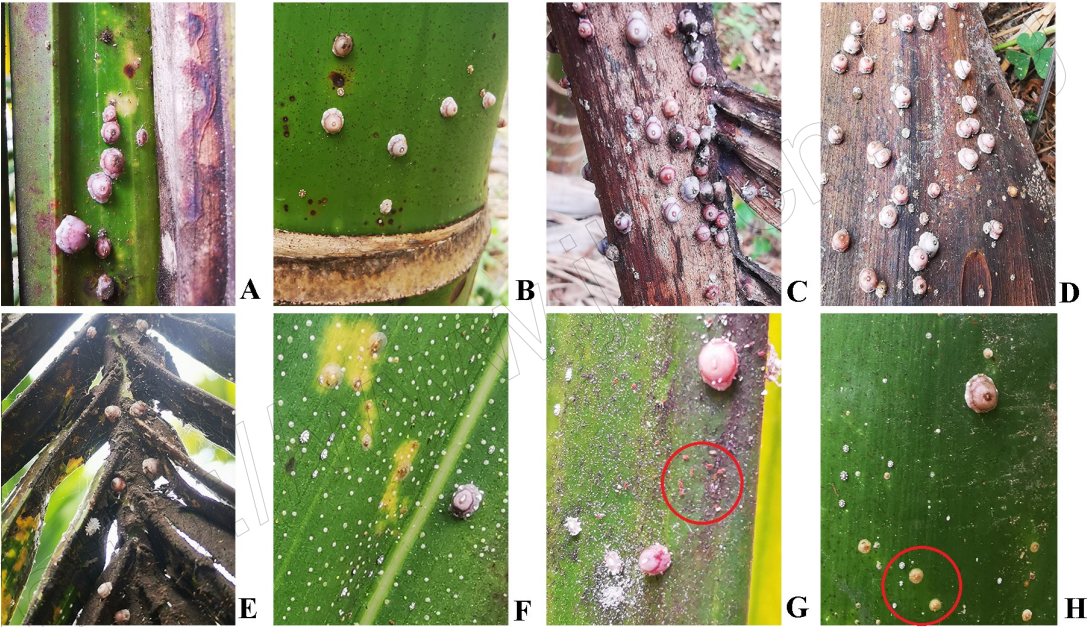


图1 无花果蜡蚧危害槟榔症状

Fig.1 Damage symptoms of *C. rusci* on *A. catechu*

A:危害叶片;B:危害茎干;C:危害叶柄;D:危害叶鞘;E:危害引发的煤烟病;F:不同龄期幼虫和成虫共同危害;
G:与红蜘蛛共同危害,圆圈内为红蜘蛛;H:与椰圆蚧共同危害,圆圈内为椰园蚧。

A: Damage to leaves; B: Damage to stem; C: Damage to petiole; D: Damage to leaf sheath; E: Sooty mold caused by *C. rusci*.
F: Co-damage by different instar nymphs and adults; G: Co-damage with red spider mite, which is the pest in the circle;
H: Co-damage with *A. destructor*, which is the pest in the circle.

2 无花果蜡蚧在海南的风险性分析

2.1 定性分析

2.1.1 在海南分布情况 目前仅在海南省三亚市崖州区发现无花果蜡蚧。

2.1.2 潜在经济危害性 主要靠刺吸为害。以危害槟榔为例,该虫可导致刺吸部位出现黄色或褐色斑纹,严重时可引发煤烟病,导致植株树势衰弱,影响产量。聚集为害叶鞘时,常造成叶鞘水分被吸食殆尽,导致叶片无法正常脱落,叶鞘内部花苞因长期被死亡叶鞘包裹最终无法展开而死亡,对产量影响巨大。

2.1.3 受害寄主特殊经济重要性 寄主种类繁多,包括无花果 *Ficus carica* L.、椰子 *Cocos nucifera* L.、秋枫 *Bischofia javanica* Blu.、芒果 *Mangifera indica* L.、榕树 *Ficus microcarpa* L. f.、香蕉 *Musa nana* Lour.等56科160余种(李海滨,2014;李海滨和武三安,2013;国家认证认可监督管理委员会,2014),本次调查发现其在槟榔上可造成严重危害。

椰子、芒果和香蕉是海南的重要水果种类,也是无花果蜡蚧的重要寄主植物。截至2021年,海南椰子种植面积约3.6万hm²,槟榔种植面积约17.3万hm²,香蕉种植面积约3.0万hm²(海南省统计局和国

家统计局海南调查总队,2022),其中椰子、槟榔作为海南重点发展的作物,在当地农户的增收和乡村振兴中起着举足轻重的作用,同时在维护海南社会稳定和保障生态安全方面发挥着重要作用,在海南当地具有极高的经济价值。

2.1.4 传播及扩散能力等分析 无花果蜡蚧目前在我国各省市偶尔被截获,2019 年在拱北海关被截获(珠海市政务服务数据管理局,2019)。该虫幼虫活动能力较弱,成虫吸附在寄主植物叶片或嫩枝表面取食汁液几乎不再移动,近距离扩散主要借助风力进行,远距离扩散主要通过寄主调运,被无花果蜡蚧危害脱落的植物组织上常携带大量的成虫和幼虫,其作为垃圾被转运也是传播的重要方式(黄永辉等,2022)。由于该虫有较厚蜡质保护,对环境的抗逆性较强,且雌蚧腹下常有大量幼蚧,在寄主运输过程中存活率较高。Hodges & Hodgson (2010)研究发现,在近 20 a 入侵佛罗里达州的 255 种节肢动物中,仅无花果蜡蚧成功建立了种群,说明该虫的适应能力极强。

2.1.5 危险性治理难度 该虫常聚集危害,对植株危害较大,常和其他的害虫混合发生,目前尚无十分有效的防治手段。其幼虫个体较小,需借助显微镜等专用仪器才可观察,检验鉴定难度较大。该虫在植株叶片、树干、果实上均可危害,且世代重叠,产卵量大,单雌产卵量可达 1000 余粒(王戌勃等,2022),常规化学防治效果有限。

无花果蜡蚧作为我国的进境检疫有害生物,在海南已经开始发生危害,在部分市县已对当地产业(如槟榔)造成了严重影响。鉴于槟榔等作物在海南具有较高经济价值,该虫很容易随种苗调运传入至其他市县并扩散定殖,根据《林业有害生物风险分析准则》(全国植物检疫标准技术委员会林学分技术委员会,2016)的风险预评估评价体系,该虫具有扩散可能性大、潜在危害性强、寄主在海南省经济重要性高、防治难度大的特点,具备 4 项风险因子,应开展风险评估。海南作为我国重要的自由贸易试验区,筑牢生态安全和生物安全屏障意义重大,因此开展无花果蜡蚧在海南省的风险性分析,对于维护海南农林产业安全和该虫防控策略的科学制定具有重要意义。

2.2 半定量分析

根据《林业有害生物风险分析准则》(全国植

物检疫标准技术委员会林学分技术委员会,2016),结合无花果蜡蚧在海南的寄主、危害现状及特点进行定量分析,结果如表 1 所示。

3 无花果蜡蚧在海南的风险综合评价值计算

3.1 准则层 P_i 和风险综合评价值 R 的计算

准则层 P_i 值:

$$P_1 = P_{11} = 2.50$$
$$P_2 = \sqrt[5]{P_{21} \times P_{22} \times P_{23} \times P_{24} \times P_{25}} = 2.67$$
$$P_3 = 0.4 \times P_{31} + 0.4 \times P_{32} + 0.2 \times P_{33} = 2.20$$
$$P_4 = \text{Max}(P_{41}, P_{42}, P_{43}) = 3.00$$
$$P_5 = (P_{51} + P_{52} + P_{53}) / 3 = 2.50$$

目标层风险综合评价 R 值:

$$R = \sqrt[5]{P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5} = 2.56$$

3.2 无花果蜡蚧在海南的风险等级

根据林业有害生物风险分析等级划分标准:
 $0 \leq R < 1.50$ 为低度危险, $1.50 \leq R < 2.00$ 为中度危险, $2.00 \leq R < 2.50$ 为高度危险, $2.50 \leq R < 3.00$ 为特别危险,无花果蜡蚧在海南 R 值为 2.56,属特别危险有害生物。

4 风险管理措施

根据林业有害生物风险分析准则,无花果蜡蚧作为海南的特别危险有害生物,应采取相应的风险管理措施:(1)加强检疫,积极防治。立即制定无花果蜡蚧防控预案并启动,迅速压低虫口基数;加强疫区苗木的隔离检疫,严禁带虫植株或植物组织运输。(2)定期调查监测,主动预警。开展无花果蜡蚧在海南的分布范围、寄主种类、发生量及种群动态调查,并在各市县设立监测点启动监测预警工作。(3)开展科学研究,收集相关资料。系统收集无花果蜡蚧的国内外相关研究数据和报道;开展该虫的生物生态学和发生动态等研究,并在此基础上进行防控产品和防控技术的研发;加大科研投入力度,鼓励科研工作者开展相关研究。(4)加强统防统治工作。结合无花果蜡蚧寄主的栽培情况,积极对种植户进行的培训,助力农户提升无花果蜡蚧的快速识别和精准防治水平;农技推广等部门可以建立防治示范基地,开展示范性防控技术培训,协助全省开展统一化防治工作;组织专业的防治服务队伍,开展社会化服务,形成“政府+科研单位+农技推广部门+农户”的统防统治工作体系。

表 1 无花果蜡蚧在海南省的风险性分析评判指标赋值
Table 1 Risk analysis and evaluation index score of *C. rusci* in Hainan Province

准则层 Criterion layer (P_i)	指标层 Indicator layer (P_{ij})	评判标准 Evaluation criteria	赋分依据 Grading basis	赋分值 Score	权重 Weight
海南分布情况 Distribution in Hainan (P_1)	海南分布情况 Distribution in Hainan (P_{11})	省内分布面积<5% The distribution area within the province <5%	仅分布于三亚崖州区 Only distribute in Yazhou District, Sanya	2.50	等权 Equal weight
	传入、定殖和扩散的可能性 Possibility of introduction, colonization, and diffusion (P_2)	被拦截的可能性 Possibility of be intercepted (P_{21})	寄主植物、产品调运的可能性和携带有害生物的可能性都大 High possibility in host transporting, products, and carrying harmful organisms	2.50	等权 Equal weight
		运输过程中存活率 Survival rate during transportation (P_{22})	易随植物组织和产品调运 Easy to transport with plant tissues and products	3.00	
		适生性 Adaptability (P_{23})	运输过程中很难死亡 Difficult to die during transportation	3.00	
		自然扩散能力 Dispersal ability (P_{24})	繁殖能力和抗逆性都强 High reproduction and stress resistance	2.00	
潜在危害性 Potential hazards (P_3)	潜在经济危害性 Potential economic harm (P_{31})	自身扩散能力一般 Average diffusion ability	靠风力及低龄若虫爬行扩散 Diffusion by wind and young nymphs	3.00	0.4
	在海南适生性范围 Adaptability range in Hainan (P_{25})	传入可造成林木死亡或产量损失介于 5%~20% Introduction can cause mortality or yield loss between 5%-20%	在海南多数区域可存活 Can survive in most areas of Hainan	1.50	0.4
	非经济方面的潜在危害性 Potential non-economic hazards (P_{32})	官方重视程度 Official attention level (P_{33})	大量发生时会影响生态多样性,并通过引发棕榈的煤烟病对旅游业造成影响 Impacts on ecological diversity when occurring in large numbers and impacts on tourism by causing soot disease in palms	3.00	0.2
	受害寄主重要性 Importance of the affected host (P_4)	寄主种类 Hosts number (P_{41})	为我国进境植物检疫性有害生物 It is quarantine pests for import plants in China	3.00	等权 Equal weight
危险性管理难度 Difficulty in management (P_5)		受害寄主的面积 Area of affected host (P_{42})	寄主种类超过 10 种 More than 10 host plants	3.00	
		受害寄主的特殊经济价值 Special economic value of the affected host (P_{43})	寄主槟榔、椰子等在全省均有种植 The hosts areca nut and coconut are planted in the whole province	3.00	
		检验识别难度 Difficulty in inspection and identification (P_{51})	现场识别可靠性低,费时,由专家才能识别鉴定 On-site identification reliability is low, time-consuming, need expert identification	2.50	等权 Equal weight
		除害处理难度 Difficulty in control (P_{52})	需请专家鉴定识别 Expert identification is required	2.50	
		根除难度 Difficulty in eradication (P_{53})	常规方法不能杀死 Cannot be kill use conventional methods	2.50	
			常规化学防治效果一般 Conventional chemical control effect is mediocre	2.50	
			产卵量大,繁殖快,较难根除 It is difficult to eradicate because of its large amount of spawning and fast reproduction	2.50	

5 小结

无花果蜡蚧已在海南省三亚市定殖,并有小区域成灾的趋势,因此针对该虫开展相关基础研究和防控技术研究亟待进行。要尽快进行该虫的全省普查,摸清家底,加强发生区域的检疫力度,发现后及时清除,抑制该虫的传播蔓延,并制定合理的防控预案和灭除措施。加强口岸拦截力度,建立无花果蜡蚧快速鉴定技术体系,严防省外及境外无花果蜡蚧随苗木或运输工具等传入海南省。

致谢:感谢北京林业大学武三安教授在本研究无花果蜡蚧鉴定过程中给予的无私帮助!

参考文献

陈乃中, 2009. 中国进境植物检疫性有害生物——昆虫卷. 北京: 中国农业出版社.

杜尚嘉, 吴海霞, 张国德, 卓上标, 符生波, 符溶, 符明珠, 2022. 青梅山天牛的风险评估及防控策略. *生物安全学报*, 31(3): 258–261.

国家认证认可监督管理委员会, 2014. 无花果蜡蚧检疫鉴定方法: SN/T 4012—2013. 北京: 中国标准出版社.

海南省统计局, 国家统计局海南调查总队, 2002. 海南统计年鉴 2022. 北京: 中国统计出版社.

黄山春, 李朝绪, 阎伟, 覃伟权, 马子龙, 刘丽, 2017. 海南发现椰子织蛾的重要天敌褐带卷蛾茧蜂. *生物安全学报*, 26(3): 256–258.

黄永辉, 李华锋, 王玉峰, 徐森锋, 2022. 无花果蜡蚧在广东地区的寄主范围及危害分析. *动植物检疫*, 4(7): 52–58.

李海滨, 2014. 中国蜡蚧属昆虫的分类研究(半翅目: 蚧总科: 蜡蚧科). 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.

李海斌, 武三安, 2013. 外来入侵新害虫——无花果蜡蚧. *应用昆虫学报*, 50(5): 1295–1300.

全国植物检疫标准技术委员会林学分技术委员会, 2016. 林业有害生物风险分析准则: LY/T 2588—2016. 北京: 中国标准出版社.

王戎勃, 向建英, 邓忠坚, 张媛, 2022. 警惕检疫性害虫无花果蜡蚧在我国西南地区油橄榄种植区扩散. *植物检疫*, 36(6): 50–53.

王颖, 张彦周, 邓望, 李海斌, 武三安, 李成德, 2014. 阔柄跳小蜂属——新种(膜翅目: 跳小蜂科)——入侵害虫无花果蜡蚧的重要天敌. *环境昆虫学报*, 36(3): 451–454.

虞国跃, 王山宁, 刘博, 阎伟, 李洪, 2019. 海南发现新入侵害虫——橘绵粉虱 *Aleurothrixus floccosus* (Maskell). *生物安全学报*, 28(3): 204–207.

珠海政务数据管理局, 2019. 拱北海关首次截获“入侵害虫”无花果蜡蚧. (2019-01-08) [2023-05-07]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzAwNDA5NjU5OQ==&mid=2653541811&idx=3&sn=e396a87c19ff0bc5ecba3dd96f16e234&chksm=80ec628bb79beb9d978e5e2fa513f3fd41e670b5c224a99187ce7804e99eb49afdb14c548308&scene=27.

FETYKÓ K, KOZÁR F, 2012. Records of *Ceroplastes* Gray, 1828 in Europe, with an identification key to species in the Palearctic Region. *Bulletin of Insectology*, 65(2): 291–295.

HODGES G S, HODGSON C J, 2010. *Phalacrocooccus howertoni*, a new genus and species of soft scale (Hemiptera: Coccidae) from Florida. *Florida Entomologist*, 93(1): 8–23.

RAINATO A, PELLIZZARI G, 2010. The adult male and male nymphal instars of *Ceroplastes rusci* (Linnaeus) (Hemiptera: Coccoidea: Coccidae). *Zootaxa*, 2357(1): 50–62.

SHABANA Y M, RAGAB M E, 1997. *Alternaria infectoria*, a promising biological control agent for the fig wax scale, *Ceroplastes rusci* (Homoptera: Coccidae), in Egypt. *Biocontrol Science and Technology*, 7(4): 553–564.

VU N T, EASTWOOD R, NGUYEN CT, PHAM L V, 2006. The fig wax scale *Ceroplastes rusci* (Linnaeus) (Homoptera: Coccidae) in south-east Vietnam: pest status, life history and biocontrol trials with *Eublemma amabilis* Moore (Lepidoptera: Noctuidae). *Entomological Research*, 36(4): 196–201.

(责任编辑: 郑姗姗)

海南首次发现人侵害虫七角星蜡蚧

胡馨予¹, 李彩凤¹, 魏久锋², 王芳^{1*}

¹河北师范大学生命科学学院, 河北 石家庄 050024; ²山西农业大学植物保护学院, 山西 太谷 030801

摘要:【目的】2022 年先后在海南省万宁市兴隆镇的番石榴、琼中黎族苗族自治县黎母山蒲桃上发现 1 种蚧虫为害, 对其进行报道, 以期为该物种的检疫鉴定和监测防控工作提供参考。【方法】通过形态学方法, 确定该蚧虫的种类; 参阅国内外相关文献资料, 梳理该蚧虫的基本信息及形态鉴别特征, 并参照国内外有害生物风险性分析指标体系进行风险性评价。【结果】经鉴定该蚧虫为检疫性害虫七角星蜡蚧, 在海南省首次发现, 为外来入侵害虫, 危害多种果树及观赏性植物。本研究介绍了七角星蜡蚧的分类地位、分布与寄主、形态特征、生物学和危害等; 编制了中国蜡蚧属物种的检索表; 七角星蜡蚧的综合风险值为 1.72。【结论】七角星蜡蚧在我国属于中风险有害外来入侵生物, 在我国热带地区扩散趋势明显, 应加以警惕, 加强其调查监测和检疫工作, 以防其进一步扩散。

关键词: 七角星蜡蚧; 海南; 风险分析; 检索表



开放科学标识码
(OSID 码)

First report of invasive pest of *Ceroplastes stellifer* in Hainan Province, China

HU Xinyu¹, LI Caifeng¹, WEI Jiufeng², WANG Fang^{1*}

¹College of Life Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050024, China;

²College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China

Abstract: 【Aim】In 2022, a harmful scale insect was found on *Psidium guajava* in Xinglong Town, Wanning City, Hainan Province, and on *Syzygium jambos* in Limu Mountain, Qiongzong Li and Miao Autonomous County. Herein, we report details of this pest to provide a reference for its quarantine identification, monitoring, and control. 【Method】The identity of this scale insect was determined based on morphological observations. In this regard, we surveyed the relevant domestic and international literature, and reviewed the basic information and morphological identification characteristics of this scale insect. In addition, we performed a risk assessment based on the risk assessment index system of China for this pest. 【Result】This insect was identified as the quarantine pest *Ceroplastes stellifer*, which is an invasive alien pest that has caused extensive damage of a wide range in fruit trees and ornamental plants. This is the first time that a risk-invasive pest has been found in Hainan Province. In this study, we provide details of the taxonomic status, distribution, hosts, morphological characteristics, and biology and hazards of *C. stellifer*. We also compiled a key to the species of *Ceroplastes* in China and determined a comprehensive risk value (*R*) of 1.72 for *C. stellifer*. 【Conclusion】*C. stellifer* is a moderately destructive alien invasive pest in China, the spread of which is evident in the tropical areas of the country. Accordingly, heightened levels of vigilance, along with a strengthening of investigation, monitoring, and quarantine measures, are necessary in these areas to prevent the further spread of this pest.

Key words: *Ceroplastes stellifer*; Hainan; risk analysis; key

七角星蜡蚧 *Ceroplastes stellifer* (Westwood) 俗称七星蜡蚧, 因雌成虫体被七角星状的蜡壳而得名。该虫寄主广泛, 着生于植株的叶片背面, 通过刺吸式口器吸食植物汁液, 影响植物的生长发育, 还分泌蜜露引起植物产生煤污病, 影响植物的光合作用, 致使植物长势衰退 (Blackwood & Pratt,

收稿日期 (Received): 2023-09-20 接受日期 (Accepted): 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金 (31802001); 河北省高等学校科学技术研究青年拔尖人才项目 (BJ2020052); 山西省自然科学研究面上项目 (202103021224132)

作者简介: 胡馨予, 女, 硕士研究生。研究方向: 昆虫系统学与生物多样性。E-mail: huxinyu2655@163.com

* 通信作者 (Author for correspondence), 王芳, E-mail: wangf0110@163.com

2007)。我国于 2007 年将七角星蜡蚧列入《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》(中华人民共和国农业部,2007)。

七角星蜡蚧最早于 1871 年在杓兰属 *Cypripedium* L.上被发现,此后陆续在澳洲、亚洲南部等地被发现报道。我国关于该物种的最早记录是 Takahashi(1929)于台湾杧果 *Mangifera indica* L.上发现的;直到 2014 年,七角星蜡蚧首次在我国大陆地区报道,由邓鋈等(2014)发现于云南省西双版纳地区的杧果和鹅掌柴 *Schefflera octophylla* (Lour.) Harms 上。此后,汪分等(2022)系统调查了云南省的七角星蜡蚧,发现该物种在景洪市、勐腊县、勐海县、宁洱县、盈江县、河口县等 4 州(市)7 县有分布,且大多发生地位于边境线,推测有可能为境外入侵;该物种在云南为害 4 科 4 属植物,包括经济树种杧果和莲雾(洋蒲桃) *Syzygium samarangense* (Blume) Merr. et Perry 等。本课题组于 2022 年 2 月上旬在海南省万宁市兴隆镇番石榴 *Psidium guajava* L.的叶片上发现七角星蜡蚧,为海南省首次发现,2022 年 7 月又在琼中黎族苗族自治县黎母山上的蒲桃 *Syzygium jambos* (L.) Alston 上再次发现。本文对七角星蜡蚧的分类地位、分布与寄主、形态特征、生物学和危害及风险性分析等进行介绍,并编制了中国蜡蚧属物种的检索表,以期为该物种的鉴定、早期监测及预警提供参考。

1 分类地位

中文名:七角星蜡蚧
学名: *Ceroplastes stellifer* (Westwood, 1871)
英文名: stellate scale, glassy star scale, glossy scale

异名: *Coccus stellifer* Westwood, 1871; *Vinsonia pulchella* Signoret, 1872; *Vinsonia stellifera* (Westwood, 1871)

分类地位: 半翅目 Hemiptera, 胸喙亚目 Sternorrhyncha, 蚧次目 Coccoomorpha, 蚧科 Coccidae, 蜡蚧亚科 Ceroplastinae, 蜡蚧属 *Ceroplastes*

2 分布与寄主

七角星蜡蚧分布广泛,在全球约 58 个国家或地区均有分布记录,且多在热带地区 (García Morales *et al.*, 2016)。虽然在荷兰、意大利等温带地区亦有分布报道,但仅见于当地的温室 (邓鋈等, 2014; Fetykó & Kozár, 2012)。该虫寄主众多,已记录的寄主植物有 22 科 40 余种,主要是观赏性植物和果树[兰科 Orchidaceae、鹅掌柴、散尾葵 *Dypsis lutescens* (H. Wendl.) Beentje *et al.* Dransf.、杧果、番石榴、莲雾、椰子 *Cocos nucifera* L.、甜橙 *Citrus sinensis* (L.) Osbeck 等] (García Morales *et al.*, 2016)。七角星蜡蚧在中国的分布与寄主详见表 1 (邓鋈等, 2014; 汪分等, 2022; García Morales *et al.*, 2016)。

表 1 七角星蜡蚧在中国的分布与寄主
Table 1 Distribution and hosts of *C. stellifer* in China

地区 Area	采集地 Collection sites	寄主 Hosts
海南 Hainan	万宁市兴隆镇, 琼中黎族苗族自治县黎母山 Xinglong Town, Wanning City; Limu Mountain, Qiongzong Li and Miao Autonomous County	番石榴、蒲桃 <i>Psidium guajava</i> , <i>Syzygium jambos</i>
云南 Yunnan	德宏州盈江县那邦镇, 红河州河口县、金平县, 普洱市宁洱县, 西双版纳州景洪市、勐海县打洛镇、勐腊县勐仑镇、磨憨镇 Nabang Town, Yingjiang County, Dehong Prefecture; Hekou County, Jinping County, Honghe Prefecture; Ninger County, Pu'er City; Jinghong City, Daluo Town, Menghai County, MengLun Town, Mengla County, Mohan Town, Xishuangbanna Prefecture	杧果、鹅掌柴、洋蒲桃、马六甲蒲桃、龙船花 <i>Mangifera indica</i> , <i>Schefflera octophylla</i> , <i>Syzygium samarangense</i> , <i>Syzygium malaccense</i> , <i>Ixora chinensis</i>
台湾 Taiwan		福树、杧果、洋蒲桃 <i>Garcinia subelliptica</i> , <i>Mangifera indica</i> , <i>Syzygium samarangense</i>

3 形态特征

3.1 七角星蜡蚧的形态特征

雌成虫体被有玻璃状、七角星形的厚蜡壳, 蜡壳长 3.0~5.0 mm。蜡壳中部突出, 突起中央有一乳白色椭圆形蜡点; 边缘较平, 有 6~7 个向外突出的蜡角, 通常前端 1 个, 两侧各 3 个, 每个蜡角顶端具白色

蜡块(图 1)。去壳虫体呈椭圆形至圆形, 体长 0.8~1.4 mm, 宽 0.6~1.0 mm。体尾部有明显的肛突, 随虫体不断成熟, 肛突会逐渐硬化, 颜色加深。

玻片标本特征见图 2, 体背面, 年轻虫体膜质, 老熟虫体硬化。背刺锥状, 稀疏分布。无腺区头端 1 个, 背 1 个, 两侧各 3 个。丝状腺分布在无腺区之

外的体背面。背部有双孔腺和三孔腺分布。肛板窄长,肛板端毛3根,位于后部1/3处。腹脊毛1根,肛筒缨毛2根。体缘毛尖细,直立或微微弯曲。臀裂顶端有4、5根长缘毛。气门凹深,气门刺锥状,呈小群分布。前、后气门凹间有7~10根体缘毛。体腹面,膜质。触角细小,分6节。触角间毛7~9对。足小,胫跗关节愈合,跗冠毛细长,爪冠毛较粗,顶端均膨大,爪无小齿。多孔腺少,多在阴区分布。十字腺散布在胸、腹部亚缘区。气门路由五孔腺组成宽带,每个气门路由约2个五孔腺宽。



图1 七角星蜡蚧生态图
Fig.1 Ecograph of *C. stellifer*

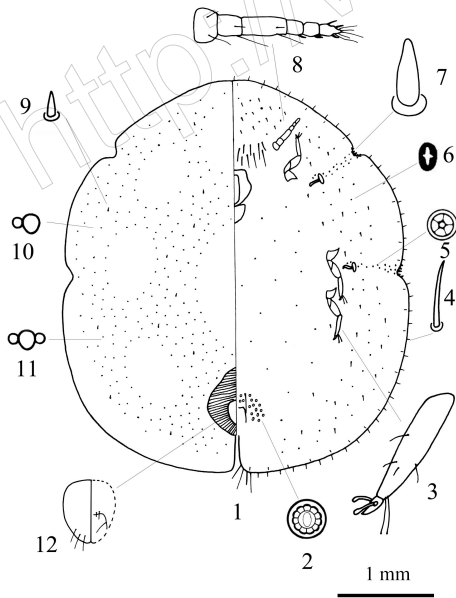


图2 七角星蜡蚧形态特征图
Fig.2 Morphology of *C. stellifer*

1:成虫体;2:多孔腺;3:后足之胫跗节;4:体缘毛;5:气门腺;6:十字腺;7:气门刺;8:触角;9:背刺;10:双孔腺;11:三孔腺;12:肛板。
1: Adult female; 2: Multilocular pore; 3: Tibio-tarsus of metathorax leg; 4: Marginal seta; 5: Spiracular pore; 6: Cruciform pore; 7: Stigmatic spine; 8: Antennae; 9: Dorsal seta; 10: Bilocular pore; 11: Trilocular pore; 12: Anal plate.

3.2 中国蜡蚧属的分种检索表

蜡蚧属 *Ceroplastes* 在全球记录约144种,我国记录15种 (García Morales *et al.*, 2016; Wu & Wang, 2019)。我国记录的蜡蚧属物种主要包括 *C. actiniformis* Green、红帽龟蜡蚧 *C. centrroseus* Chen、角蜡蚧 *C. ceriferus* (Fabricius)、藤壶蜡蚧 *C. cirripediformis* Comstock、弗州龟蜡蚧 *C. floridensis* Comstock、日本龟蜡蚧 *C. japonicus* Green、昆明龟蜡蚧 *C. kunmingensis* (Tang & Xie)、芒果蜡蚧 *C. magnificus* (Green)、默氏蜡蚧 *C. murrayi* Froggatt、饼蜡蚧 *C. planus* Wu & Wang、伪角蜡蚧 *C. pseudoceriferus* Green、红蜡蚧 *C. rubens* Maskell、无花果蜡蚧 *C. rusci* (L.)、七角星蜡蚧 *C. stellifer* (Westwood)、西双版纳蜡蚧 *C. xishuangensis* Tang & Xie。表2为中国蜡蚧属的分种检索表。

4 生物学和危害

七角星蜡蚧雌成虫和若虫通常聚集寄生在叶片背面,沿叶脉分布,叶正面也偶有发生。七角星蜡蚧的若虫期虫体活动能力较弱,可随风或人类活动等扩散到更远距离;若虫期后发育为雌成虫,雌成虫通常终生寄生在寄主植物上。该虫发生时,常大密度分布于寄主植物,在云南河口县龙船花 *Ixora chinensis* Lam.上密度达185~250头·叶⁻¹;一年发生多个世代,1、4、8、10月在云南均有发现1龄若虫,有世代重叠现象 (汪分等, 2022)。

该种曾侵袭英属维尔京群岛的濒危桃金娘科植物 *Calyptanthus thomasion* O. Berg,对当地濒危物种的保护带来巨大的挑战 (Malumphy *et al.*, 2019);此外,对巴西巴伊亚州,中国台湾和云南的杧果等经济作物带来危害 (汪分等, 2022; da Costa-Lima *et al.*, 2022)。

5 风险分析

根据蒋青等 (1995) 制定的有害生物风险性评估指标体系和评估方法,建立了七角星蜡蚧在中国风险分析指标体系,并获得各个指标的赋分值 (表3)。

计算得出各一级指标值:

$$P_1 = 2$$
$$P_2 = 0.6P_{21} + 0.2P_{22} + 0.2P_{23} = 0.8$$
$$P_3 = \text{Max}(P_{31}, P_{32}, P_{33}) = 3$$
$$P_4 = \sqrt[5]{P_{41} \times P_{42} \times P_{43} \times P_{44} \times P_{45}} = 1.89$$
$$P_5 = (P_{51} + P_{52} + P_{53}) / 3 = 1.67$$

表 2 中国蜡蚧属检索表
Table 2 Key to *Ceroplastes* species in China

1	跗跗关节愈合;腹部管状腺缺	2
	跗跗关节分节正常;腹部管状腺有	3
2	气门刺 2 种类型,一种半球形一种子弹形	红蜡蚧 <i>C. rubens</i>
	气门刺 1 种类型,子弹形	七角星蜡蚧 <i>C. stellifer</i>
3	体腹面管状腺内管细长	4
	体腹面管状腺内管膨大	10
4	气门凹深,气门刺群呈圆形分布	5
	气门凹浅,气门刺群呈非圆形分布	6
5	气门刺 1 种类型,子弹形	默氏蜡蚧 <i>C. murrayi</i>
	气门刺 2 种类型,一种半球形一种子弹形	芒果蜡蚧 <i>C. magnificus</i>
6	背腹面有丝状腺形成亚缘带;肛突明显,向外突出	7
	背腹面无丝状腺形成的亚缘带;肛突短,不向外伸出	8
7	气门刺每群 28~88 根	角蜡蚧 <i>C. ceriferus</i>
	气门刺每群 90~180 根	伪角蜡蚧 <i>C. pseudoceriferus</i>
8	触角 7 节	藤壶蜡蚧 <i>C. cirripediformis</i>
	触角 6 节	9
9	气门腺路宽 2~3 个 5 孔腺	西双版纳蜡蚧 <i>C. xishuangensis</i>
	气门腺路宽 5~10 个 5 孔腺	无花果蜡蚧 <i>C. rusci</i>
10	前后气门刺群相接,其间有 4~6 根体缘毛相间排列	日本龟蜡蚧 <i>C. japonicus</i>
	前后气门刺群不相接,其间有 8 根体缘毛将两群刺隔开	11
11	体腹面胸部和腹部前端多孔腺缺;背面有丝状腺形成的亚缘带	饼蜡蚧 <i>C. planus</i>
	体腹面胸部和腹部前端多孔腺有;背面无丝状腺形成的亚缘带	12
12	前足基节附近无多孔腺	红帽龟蜡蚧 <i>C. centroroseus</i>
	前足基节附近具多孔腺	13
13	爪冠毛 1 粗 1 细	昆明龟蜡蚧 <i>C. kunmingensis</i>
	爪冠毛同粗	弗州龟蜡蚧 <i>C. floridensis</i>

表 3 七角星蜡蚧在中国的风险分析指标体系
Table 3 Risk assessment index system of *C. stellifer* in China

序号 No.	评判指标 Evaluation indicator	赋值依据 Assignment basis	赋值 Score
P_1	国内分布情况 Distribution in China	在中国的分布面积 0%~20% The distribution area in China ranges from 0% to 20%	2
P_{21}	潜在的经济危害 Potentially harmful	侵害芒果、莲雾等经济作物和部分濒危植物 Encroaching on cash crops such as <i>Mangifera indica</i> and <i>Syzygium samarangense</i> and some endangered plants	1
P_{22}	是否为其他检疫性有害生物的传播媒介 Ability to carry other quarantine pests	可能传播病毒病,但国内外尚未见确切传播病毒病的报道 The virus may be spreading, but there are no definite reports at home and abroad	0
P_{23}	国外重视程度 List of quarantine pests in other countries	阿根廷、墨西哥将其列为检疫性有害生物 Argentina and Mexico list it as a quarantine pest	1
P_{31}	受害寄主种类 Number of affected hosts species	受害寄主 ≥ 40 Species of affected hosts ≥ 40	3
P_{32}	受害寄主种植面积 Planting area of affected hosts	受害寄主种植面积 $\geq 3.5\times 10^6$ hm ² Planting area of affected hosts $\geq 3.5\times 10^6$ hm ²	3
P_{33}	受害寄主的潜在损失水平 The potential loss level of the affected hosts	未造成严重损害 No serious damage	1
P_{41}	截获的频率 Frequency of interception	偶有截获报道 Occasional interception	2
P_{42}	运输过程中有害生物的存活率 The survival rate of pests in transport	运输中存活率 $>40\%$ Survival rate $>40\%$	3
P_{43}	国外分布是否广泛 Distribution abroad	现已知在 58 个国家或地区分布 Currently known to be distributed in 58 countries or regions	2
P_{44}	国内的适生范围 The suitable range of China	云南、海南、台湾等地已有分布 Distributed in Yunnan, Hainan and Taiwan	1
P_{45}	传播能力 Dispersal capacity	主要通过植物果实、种苗、虫体爬行进行传播 Mainly spread through the plant fruits, seedlings and insects crawling	2
P_{51}	检疫鉴定难度 The difficulty of inspection and identification	检验鉴定方法较可靠,可通过雌成虫蜡壳及玻片标本进行鉴定 The method of inspection and identification is more reliable, and the morphology of adult females and slide specimens are used for identification	1
P_{52}	除害难度 The difficulty of pest control	除害难度大,主要以预防为主 It is difficult to eliminate harm, mainly to prevent	2
P_{53}	根除难度 The difficulty of eradication	雌成虫较难根除 Adult females are more difficult to eradicate	2

综合风险评估值为：

$$R=\sqrt[5]{P_1\times P_2\times P_3\times P_4\times P_5}=1.72$$

R 值在 3.0~2.5 为极高风险,2.4~2.0 为高风险,2.0~1.5 为中风险,1.4~1.0 为低风险。结果表明,七角星蜡蚧在我国属于中风险有害外来入侵生物。

6 讨论

七角星蜡蚧寄主众多,分布范围广,我国热带地区植被类型丰富,为七角星蜡蚧的生存和繁殖提供了适宜环境。本研究风险性分析的结果表明,该虫可在我国热带地区传播、扩散、定殖和发生危害,对我国热带地区杧果、莲雾、番石榴等水果产业,鹅掌柴、龙船花、散尾葵、兰科植物等观赏性植物和花卉具有非常大的潜在威胁。

该虫在我国云南省西双版纳被发现以来,现已在云南 4 市 9 地被发现,本研究在海南省万宁、琼中两地发现,说明该虫扩散趋势明显,若不能对其进行有效控制,极有可能扩散至整个热带地区,给热带地区水果、花卉、苗木等产业造成损失。因此,建议加强警惕,对七角星蜡蚧适生区特别是采集地周边地区开展调查和监测工作,及时掌握其分布情况及发生动态,预防其进一步扩散甚至暴发成灾。同时加强入境苗木检疫以及国内苗木的调运检疫工作,特别是针对来自疫区的杧果、莲雾等植物。

参考文献

邓鋆,李海斌,王戌勃,武三安,2014. 我国大陆一新入侵种:七角星蜡蚧(半翅目:蚧总科:蚧科). 应用昆虫学报, 51(1): 278-282.

蒋青,梁忆冰,王乃杨,姚文国,1995. 有害生物危险性评价的定量分析方法研究. 植物检疫, 9(4): 208-211.

汪分,张永翥,王戌勃,徐进,李永和,2022. 七角星蜡蚧在云南省的分布与危害. 生物安全学报, 31(2): 191-194.

中华人民共和国农业部,2007. 中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录. (2007-05-29) [2023-09-14]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201006/t20100606_1534028.htm.

BLACKWOOD J S, PRATT P D, 2007. New host and expanded geographic range of stellate scale, *Vinsonia stellifera* (Hemiptera: Coccidae: Ceroplastinae). *Florida Entomologist*, 9(2): 413-414.

DA COSTA-LIMA T C, LUCIA B G P A, REGINA D S W V, PRUDENCIO D A P E, AGUIAR J P B, 2022. New scale insects (Hemiptera: Coccoomorpha) records as mango pests in Northeast Brazil. *International Journal of Tropical Insect Science*, 42: 2013-2017.

FETYKÓ K, KOZÁR F, 2012. Records of *Ceroplastes* Gray 1828 in Europe, with an identification key to species in the Palearctic Region. *Bulletin of Insectology*, 65(2): 291-295.

GARCÍA MORALES M, DENNO B D, MILLER D R, MILLER G L, BEN DOV Y, HARDY N B, 2016. ScaleNet: a literature-based model of scale insect biology and systematics. *Database*. [2023-09-14]. DOI: 10.1093/database/bav118.

MALUMPHY C, BÁRRIOS S, CORCORAN M R, SANCHEZ M D, HAMILTON M A, 2019. First report of invasive scale insects feeding on the threatened plants *Calypttranthes kiaerskovii* Krug & Urban and *Calypttranthes thomasi* O. Berg in the British Virgin Islands. *The Entomologist's Monthly Magazine*, 155(3): 193-199.

TAKAHASHI R, 1929. *Observations on the Coccidae of Formosa. Part I.* Japan: Government Research Institute, Department of Agriculture, Formosa.

WU S A, WANG X B, 2019. A review species of the genus *Ceroplastes* (Hemiptera: Coccoomorpha: Coccidae) in China. *Zootaxa*, 4701(6): 520-536.

(责任编辑:陈晓雯)

征订启事

《生物安全学报(中英文)》是由中国植物保护学会与福建省昆虫学会共同主办的面向生物安全科学国际前沿的中英文学术刊物。本刊为季刊,每年2、5、8、11月15日出版。国内统一连续出版物号CN 35-1307/Q,国际标准连续出版物号ISSN 2095-1787。每期定价28.00元,全年112.00元(不含邮资)。

订阅方式 纸本征订:请将征订回执单和汇款凭证复印件发邮件至jbscn@fafu.edu.cn。

电子版征订:点击首页中的“RSS”或“E-mail 订阅”进行电子版订阅。

汇款办法 银行汇款或邮局汇款(汇款单上请注明“订阅《生物安全学报(中英文)》”)。收到款项后,我校财务处即开具正式发票。

银行汇款 开户银行:中国农业银行福州农大支行

开户名称:福建农林大学

账 号:13130701040000016

邮局汇款 地址:福建省福州市上下店路15号福建农林大学《生物安全学报(中英文)》编辑部

邮编:350002

《生物安全学报(中英文)》征订回执单

征订单位				邮箱	
发票抬头				税号	
详细地址				邮政编码	
收件人				电话	
单价(元)	112.00	征订份数		汇款金额	
汇款方式	() 邮局汇款 () 银行汇款			汇款时间	

主 编 Editors-in-Chief

尤民生 YOU Minsheng

Fujian Agriculture and Forestry University,
China

万方浩 WAN Fanghao

Chinese Academy of Agricultural Sciences,
China

Geoff M. Gurr

Charles Sturt University, Australia

副主编 Associate Editors

侯有明 HOU Youming

Fujian Agriculture and Forestry University,
China

刘长明 LIU Changming

Fujian Agriculture and Forestry University,
China

王进军 WANG Jinjun

Southwest University, China

王源超 WANG Yuanchao

Nanjing Agricultural University, China

周忠实 ZHOU Zhongshi

Chinese Academy of Agricultural Sciences,
China

Liette VASSEUR

Brock University, Canada

编委会 Editorial Board

陈 立 CHEN Li, Hebei University, China

陈茂华 CHEN Maohua, Northwest A&F University, China

陈智明 CHEN Zhiming, Fuzhou Customs District P.R.CHINA, China

程代凤 CHENG Daifeng, South China Agricultural University, China

褚 栋 CHU Dong, Qingdao Agricultural University, China

董莎萌 DONG Suomeng, Nanjing Agricultural University, China

傅建炜 FU Jianwei, Fujian Academy of Agricultural Sciences, China

顾党恩 GU Dang'en, Pearl River Fisheries Research Institute, China

桂富荣 GUI Furong, Yunnan Agricultural University, China

郭 辉 GUO Hui, Nanjing Agricultural University, China

郭文超 GUO Wenchao, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, China

韩 鹏 HAN Peng, Yunnan University, China

洪晓月 HONG Xiaoyue, Nanjing Agricultural University, China

蒋红波 JIANG Hongbo, Southwest University, China

蒋明星 JIANG Mingxing, Zhejiang University, China

鞠瑞亭 Jǔ Ruiting, Fudan University, China

李 飞 LI Fei, Zhejiang University, China

李云河 LI Yunhe, Henan University, China

李志红 LI Zhihong, China Agricultural University, China

梁晋刚 LIANG Jingang, Development Center of Science and Technology, MARA, China

林 胜 LIN Sheng, Fujian Agriculture and Forestry University, China

刘 博 LIU Bo, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

刘万学 LIU Wanxue, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

刘文德 LIU Wende, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

陆永跃 LU Yongyue, South China Agricultural University, China

栾军波 LUAN Junbo, Shenyang Agricultural University, China

吕利华 Lǚ Lihua, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, China

吕要斌 Lǚ Yaobin, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, China

马德英 MA Deying, Xinjiang Agricultural University, China

宁约瑟 NING Yuese, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

牛长缨 NIU Changying, Huazhong Agricultural University, China

彭 露 PENG Lu, Fujian Agriculture and Forestry University, China

彭正强 PENG Zhengqiang, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, China

钱万强 QIAN Wanqiang, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

孙江华 SUN Jianghua, Hebei University, China

王晓伟 WANG Xiaowei, Ningbo University, China

魏 辉 WEI Hui, Fujian Academy of Agricultural Sciences, China

杨国庆 YANG Guoqing, Yangzhou University, China

杨 朗 YANG Lang, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, China

杨念婉 YANG Nianwan, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

叶恭银 YE Gongyin, Zhejiang University, China

尤士骏 YOU Shijun, Fujian Agriculture and Forestry University, China

战爱斌 ZHAN Aibin, Chinese Academy of Sciences, China

张爱兵 ZHANG Aibing, Capital Normal University, China

张飞萍 ZHANG Feiping, Fujian Agriculture and Forestry University, China

张 江 ZHANG Jiang, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

张润志 ZHANG Runzhi, Chinese Academy of Sciences, China

张友军 ZHANG Youjun, Chinese Academy of Agricultural Sciences, China

周文武 ZHOU Wenwu, Zhejiang University, China

《生物安全学报(中英文)》征稿简则

《生物安全学报(中英文)》(原《华东昆虫学报》《生物安全学报》)是由中国植物保护学会与福建省昆虫学会共同主办的面向生物安全科学国际前沿的中英文学术杂志,在国内外出版发行,征稿要求(简介)如下:

1. 主要刊载有关生物入侵、农业转基因生物、农用化学品、新技术等带来的生物安全科学问题的原始性研究论文、文献综述及研究简报等。

2. 论文内容力求充实,文字精炼流畅,论点明确,数据可靠。论文的基本要素齐全,包括标题、作者姓名、作者单位、摘要、关键词、正文、参考文献等。

3. 论文题目明确、简短易懂;摘要要求中文不低于 400 个字,英文不低于 250 个词,中英文摘要对应;关键词 3~8 个。

4. 来稿需在篇首页地脚处注明论文资助的基金项目和通信作者联系方式;基金项目包括课题来源、名称及基金代号。

5. 来稿请用 word 排版,全文五号字,1.5 倍行距(图表及文献除外);正确使用简化汉字和标点符号,采用国家规定的统一计量单位与符号;缩略词首次出现时必须给出相应的中文和英文全称。文稿标题与摘要中不宜采用缩略词,请写全称;外国人名一律用原名,不译成中文;希腊字母应注明希文,且生物科级以下名称首次出现时应注明拉丁学名和定名人。

6. 论文表格要求“三线表”,插图要求线条清晰、均匀。照片需提供分辨率为 300dpi 以上的 TIF 文件,层次清晰,大小适当;表题、图题、题及表图中注字均需采用中英文对照形式。

7. 参考文献以引用为限,只能引用公开发表的文章,勿用内部资料。本刊参考文献采用“著者-出版年”制,所有著者均不能省略,期刊名需用全称,所有文献按字母顺序进行排列,且中文在前、英文在后。

8. 所投稿件请保证文章版权的独立性、无抄袭、署名排列无争议、文责自负,请勿一稿多投!本刊编委会对来稿做必要的修改和压缩;来稿请自留底稿,无论刊登与否恕不退稿。

9. 本刊欢迎网上投稿 <http://www.jbscn.net>。

本刊被下列数据库固定收录:

- ★超星网“域出版”平台全文收录
- ★中文科技期刊数据库(维普网)全文收录
- ★中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)全文收录
- ★万方数字化期刊数据库全文收录

生物安全学报(中英文) Shengwu Anquan Xuebao (Zhongyingwen)

(季刊, 1992 年创刊)

第 33 卷 第 3 期 2024 年 8 月 15 日

JOURNAL OF BIOSAFETY

(Quarterly, Started in 1992)

Vol.33 No.3 Aug.15, 2024

主管 福建省科学技术协会
主办 中国植物保护学会 福建省昆虫学会
编辑出版 《生物安全学报(中英文)》编辑部
主编 尤民生 万方浩 Geoff M. Gurr
地址 福建省福州市金山 福建农林大学
邮编 350002
电话 0591-88191360
信箱 jbscn@fafu.edu.cn
网址 <http://www.jbscn.net>
印刷 福建东南彩色印刷有限公司
发行 《生物安全学报(中英文)》编辑部

Supervised by Fujian Association for Science and Technology
Sponsored by China Society of Plant Protection
Entomological Society of Fujian
Published by Editorial Department of Journal of Biosafety
Editors-in-Chief YOU Minsheng, WAN Fanghao, Geoff M. Gurr
Address Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou
Postcode 350002
Telephone +86-591-88191360
E-Mail jbscn@fafu.edu.cn
Website <http://www.jbscn.net>
Printed by Fujian Southeast Colour Printing Co. Ltd.
Distributed by Editorial Department of Journal of Biosafety

国内外公开发行

ISSN 2095-1787
CN 35-1307/Q

国内定价: 28.00 元