



# 我国入侵昆虫学研究进展\*

胥丹丹<sup>1</sup> 陈立<sup>1</sup> 王晓伟<sup>2</sup> 鲁敏<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101;  
2. 浙江大学昆虫学研究所, 农业部农业昆虫学重点实验室, 杭州 310058)

**摘要** 随着经济全球化的加速发展,生物入侵已成为一个影响深远的全球性问题,而外来入侵昆虫对世界各国农林业、生态环境、社会经济和人类健康造成的影响日益严重。本文以我国 14 种重要的入侵昆虫为例,从基础理论研究和应用研究两方面总结了近几年来我国入侵昆虫学科研究的新理论、新方法和新进展,并提出该学科未来发展的方向、趋势和领域。为入侵昆虫预警与预防、检测与监测、管理与防治提供了理论依据。

**关键词** 入侵昆虫, 基础研究, 应用研究

## Advances in the research on invasive insects in China

XU Dan-Dan<sup>1</sup> CHEN Li<sup>1</sup> WANG Xiao-Wei<sup>2</sup> LU Min<sup>1\*\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agricultural Entomology, Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract** With the rapid development of economic globalization, invasive species have become a far-reaching global issue. Impacts of invasive insects on agriculture, forestry, ecology, socio-economy and human health are becoming increasingly serious and cause for concern. In this paper, we introduce advances in theoretical and applied research on 14 invasive insects in China and summarize novel theory, methods and recent progress. Perspectives and directions for future research on invasive insects are discussed. The results provide new insights for the early warning, prevention, detection, monitoring, management, and control, of invasive insects.

**Key words** invasive alien insects, theoretical research, applied research

生物入侵 (Biological invasion) 是指非本地产生的生物或本地原产但已灭绝的生物侵入该地区的过程,这些非本地种在自然情况下无法跨越天然地理屏障,在大多数情况下通过人类活动、运输和贸易而被引入,对入侵地的本地物种、群落和生态环境造成严重危害和巨大经济损失,随着经济全球一体化的加速发展,生物入侵已经成为 21 世纪全球环境问题之一,近几十年来,受到各国政府和学术界的高度重视。

我国是一个粮食与经济作物种植的大国,外来入侵昆虫对我国农业和经济发展造成了巨大损失。比如,稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* 发生面积超过 51.3 万  $\text{hm}^2$ ,每年造成经济损失超过 4.3 亿元;美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 发生面积高达 273.3 万  $\text{hm}^2$ ,每年造成 30 多亿元的经济损失(俞红等,2010)。据统计,我国外来入侵昆虫有 198 种,其中种类较多的分别为鞘翅目(29 种)、半翅目(19 种)、双翅目(13 种)。

\*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(31222013)

\*\*通讯作者 Corresponding author, E-mail: lumin@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2017-08-06, 接受日期 Accepted: 2017-09-26

鳞翅目(8种),且新入侵昆虫数量总体呈明显上升趋势(黄顶成和张润志,2011)。可见我国在外来入侵昆虫的防治方面仍任重而道远。

入侵昆虫学科是以我国入侵昆虫,特别是重大入侵昆虫为对象,以研究入侵昆虫生物生态特性、扩张与扩散的机制和本地生态系统的抵抗力/可入侵性等理论基础及对入侵昆虫预警与预防、检测和监测、控制与管理的技术和方法等应用基础的学科。入侵昆虫学科是入侵生物学重要组成部分,因此入侵昆虫学科既保持着入侵生物学着重与研究入侵生物传入至成灾的过程和机理的特征,又着重与发展外来有害昆虫入侵过程中的防控技术体系。

本文主要凝练入侵昆虫学科最新基础研究和应用研究发展动态,科学分析学科发展趋势,以促进入侵昆虫学科与昆虫学科以及其他各领域之间的交叉、融合与渗透,推动入侵昆虫学科各领域的协调发展,提高原始创新能力。本文总结了2012年以来我国入侵昆虫学科研究的新理论、新方法和新进展,提出该学科未来发展的方向、趋势和领域。

## 1 2012 年以来的研究进展

2012年以来,我国科研工作者对入侵昆虫开展了大量研究,取得了巨大的成果,主要集中在基础研究和应用研究两方面。其中基础研究方面,主要明确了入侵昆虫生物学和生态学特性(党志红等,2015)、扩张与扩散机制(孙荆涛等,2012)、寄主植物-入侵昆虫-伴生微生物互作(Su *et al.*, 2017)以及入侵昆虫天敌和寄生蜂的生物学特性(曲树杰等,2016)。应用研究方面,主要研究了生物防治(王海鸿等,2011)、物理防治(文韬等,2014)、化学防治(刘忠芳等,2016)、RNAi技术(李晓旭等,2015)和不育技术(张桂芬等,2015)在捕获和防治入侵昆虫方面的效果,另外还改进了基因芯片和条形码技术,明确了其在入侵昆虫鉴定方面的重要作用(武海斌等,2012)。以上这些研究成果为入侵昆虫预警与预防、检测与监测、管理与防治提够了理论依据。现选择以下14种重要的入侵昆虫

从基础研究和应用研究两方面对其最近几年的研究进展进行介绍。

### 1.1 西花蓟马

西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 又称苜蓿蓟马,属于缨翅目 Thysanoptera 蓟马科 Thripidae 花蓟马属 *Frankliniella*, 是一种危险严重的世界性入侵害虫。

我国的学者通过种群遗传学的方法对西花蓟马在我国的扩散过程和扩散模式进行了研究。基于微卫星标记和线粒体 DNA 序列的研究表明中国种群在入侵过程中发生了显著的瓶颈效应(孙荆涛等,2012);北京南部地区的种群与我国其他地区的遗传组成明显不同,表明我国的种群来源于多次入侵事件(张衍雷等,2011)。

王海鸿等人研究发现将干燥后的微菌核颗粒预混到土壤中能引起西花蓟马土栖阶段的高死亡率,这增加了白僵菌作为西花蓟马土栖阶段生防因子的潜力(王海鸿等,2011)。武海斌等(2012)提出了可以通过形态学、PCR 鉴定和基因芯片的方法来进行西花蓟马的鉴定,利用颜色趋性和诱虫植物对西花蓟马进行农业防治并利用捕食性花蝽、草蛉、捕食螨、寄生蜂、病原真菌和线虫等西花蓟马的天敌进行生物防治。

### 1.2 烟粉虱

烟粉虱 *Bemisia tabaci* Gennadius 是一种危害严重的世界性入侵害虫。近年来有关烟粉虱种系发生的研究结果表明,烟粉虱是一个至少包含36个隐存种的隐存种复合群,其中B和Q烟粉虱在我国都是入侵物种。

在烟粉虱传播双生病毒方面,发现烟粉虱唾液腺主腺对病毒起到了识别和运输的作用,揭示了烟粉虱唾液腺中特定的分泌细胞在病毒传播中的关键作用(Wei *et al.*, 2014);在烟粉虱共生菌方面,发现感染 *Hamiltonella* 的烟粉虱取食番茄,可以有效抑制茉莉酸合成以及茉莉酸相关的植物防御反应,并且进一步揭示了水杨酸和茉莉酸信号通路之间可能存在的关系(Su *et al.*, 2015)。首次报道了昆虫寄主内共生菌可以借助

于寄生蜂进行水平传播的新途径 (Ahmed *et al.*, 2015)。发现烟粉虱原生共生菌 *Portiera* 在各个烟粉虱隐种中都有分布, 而次生共生菌在隐种间的分布存在较大差异。进一步的研究在本地种烟粉虱 China 1 中, 发现了一个新的次生共生菌, 并命名 *Candidatus Hemipteriphilus asiaticus* (Bing *et al.*, 2013)。在烟粉虱-病毒-植物三者互作方面, 发现中国番茄黄曲叶病毒 (TYLCCNV) 侵染烟草后, 可以抑制植物的茉莉酸防御反应, 帮助烟粉虱更好地在烟草上存活; 同时病毒能够有效地抑制植物萜类物质的合成, 从而增强了烟粉虱对烟草的适应性 (Zhang *et al.*, 2012; Luan *et al.*, 2013b)。与不带 TYLCCNV 病毒的烟粉虱相比, 携带该病毒的烟粉虱中, 氧化磷酸化通路和解毒酶表达量相对下调, 或许有助于烟粉虱的生活力 (Luan *et al.*, 2013a)。在烟粉虱功能基因组方面, 筛选到了与烟粉虱抵抗噻虫嗪相关的基因 (Yang *et al.*, 2013)。另外证明了入侵型烟粉虱和本地种烟粉虱在氧化还原反应、碳水化合物、氨基酸和甘油酯代谢的基因的表达水平上, 存在较大差异 (Wang *et al.*, 2012b; Ye *et al.*, 2014)。

崔元英 (2012) 应用 400 亿孢子/g 球孢白僵菌 WP 实现了对烟粉虱和韭蛆的生物防治, 达到以菌治虫或综合治虫的目的。丁雪玲等 (2015) 通过测定比较烟粉虱的寄主选择性差异, 开展烟粉虱诱集植物的筛选并建立利用诱集植物诱杀防治烟粉虱的技术体系。张艳璇等 (2012) 研究发现斯氏小盲绥螨能取食烟粉虱的卵、成虫、若虫和伪蛹, 对大棚黄瓜烟粉虱的防控具有显著作用。

### 1.3 苹果绵蚜

苹果绵蚜 *Eriosoma lanigerum* Hausmann, 又名苹果棉虫、白毛虫、棉花虫等, 属同翅目, 瘿棉蚜科, 棉蚜属。该虫原产于北美东部, 现已遍布于世界六大洲的苹果产区, 于 1910 年在山东省青岛市首次发现, 随着苗木及果品的调运, 已扩散到了全国, 是重要的苹果检疫性害虫。

苹果绵蚜已严重危害到了我国苹果产区的

发展, 发生面积逐年增加, 并且有持续扩散的趋势。我国学者对苹果绵蚜越冬状况进行了研究, 发现在渭北地区苹果绵蚜主要以 2 龄若虫越冬为主, 而在河北省冀中地区苹果绵蚜主要以 1 龄若虫越冬为主, 都主要集中在根部, 另外标准化管理果园苹果绵蚜被日光蜂寄生的寄生率高于普通管理果园 (党志红等, 2015); 而曲树杰等 (2016) 对日光蜂寄生行为过程展开了更详细的研究, 发现其寄生过程分为六个步骤, 而清理苹果绵蚜体表的蜡质棉毛是该蜂寄生过程中最重要的环节。

最近几年对于苹果绵蚜的防治也进行了大量的研究。但主要是药剂研究方面, 比如; 刘中方等 (2016) 研究发现 240 g/L 氟啶虫胺胍悬浮剂 5 000 倍液对苹果绵蚜的防治持续性较好, 因此, 在棉蚜发生盛期, 使用 240 g/L 氟啶虫胺胍悬浮剂 5 000 倍液, 按 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 用量施药, 可有效控制苹果绵蚜的危害。

### 1.4 扶桑绵粉蚧

扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* 原产于北美大陆, 已入侵到了多个国家和地区, 2005 年, 我国台湾首次发现, 2008 年首次在广东省广州市街道绿化带扶桑上发现, 现已扩散到了多个省市, 造成了巨大的损失, 尤其对我国棉花产区造成了严重的危害。

我国学者近年来对扶桑绵粉蚧开展了系统的研究, 取得了一定的进展。赵静等 (2014) 通过 CO<sub>1</sub> 及 28S rDNA 序列分析了扶桑绵粉蚧地理种群的遗传分化, 表明扶桑绵粉蚧存在两个隐存谱系。其中安徽及江苏种群应与入侵印度及巴基斯坦的支系为同一遗传支系; 黄芳等 (2015) 调查了共生菌 *Tremblaya princeps* 在扶桑绵粉蚧个体发育中的动态变化, 明确了该共生菌的变化因宿主性别而异。

昆虫病原真菌被越来越多地应用到害虫综合治理。袁盛勇等 (2016) 测定了球孢白僵菌和蜡蚧轮枝菌对扶桑绵粉蚧的致病性, 发现对扶桑绵粉蚧有较强的致病性, 为利用病原真菌防治该虫提供了科学依据; 崔志富等 (2015) 研究了龟

纹瓢虫对扶桑绵粉蚧的捕食功能反应,发现龟纹瓢虫对扶桑绵粉蚧有较强的捕食潜能,为扶桑绵粉蚧的生物防治提供了依据。

### 1.5 稻水象甲

稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* 是一种多食性害虫,原产于美国东南部,1988 年在我国河北唐山市唐海县首次被发现,此后,相继在我国多个省市和地区发生。稻水象甲在原产地主要营两性生殖,而在入侵地均营孤雌生殖,无雄虫发生,因此在入侵地的危害性极大。

利用 MAXENT 生态位模型和 ArcGIS 对稻水象甲在中国入侵扩散动态和适应性进行了分析和预测,发现南方稻区为最主要的高度适生区,少量分布在环渤海湾一带(齐国君等,2012);共生菌在昆虫的生物学和功能方面都发挥着重要的作用,所以陆芳(2014)对稻水象甲的内生菌进行了详细的调查,并且发现有些细菌与稻水象甲的生殖联系紧密。

关于稻水象甲生物防治方面研究较多的是应用昆虫致病菌。比如,球孢白僵菌和白僵菌对稻水象甲致病性的研究,且已经开展了许多的田间试验(徐进等,2015);刘志峰等(2016)还发现水旱轮作对稻水象甲有很好的防控作用,以上这些研究为防治稻水象甲提供了科学依据。

### 1.6 马铃薯甲虫

马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 原产于美国洛基山脉,分布于美洲、欧洲、亚洲和非洲等 40 多个国家和地区,是世界性的检疫性害虫。90 年代初传入中国新疆,目前扩散到了新疆天山以北准噶尔盆地的 37 个县(区、市)约 30 万 km<sup>2</sup> 的区域及新疆建设兵团马铃薯种植区,对我国马铃薯产量造成了严重的损失。

近年来,我国学者在马铃薯甲虫基础研究方面取得了巨大的进步。郭文超等(2012)研究了营养对马铃薯甲虫飞行能力的影响;另外李超等(2016)结合新疆历史降水数据,对马铃薯甲虫现有分布区内的降水时空格局展开分析,明确了降水对马铃薯甲虫分布的影响;张云慧等(2012)

利用热敏电阻测定仪对马铃薯甲虫不同虫态过冷却点和冰点进行了测定,明确了马铃薯甲虫自然种群的抗寒性,为制定其在我国潜在分布和风险分析提供了科学依据。

这几年,随着 RNA 干扰技术在防治害虫方面的应用,关于马铃薯甲虫 RNA 干扰防治方面的研究也越来越深入。李晓旭等(2015)对腺苷高半胱氨酸水解酶基因 dsRNA 技术做了全面系统的研究。比如,采用饲喂表达腺苷高半胱氨酸水解酶基因 dsRNA 的大肠杆菌发酵液,测定和明确了其对马铃薯甲虫幼虫的毒力。这些研究为准确、有效以及可持续将 RNA 干扰技术实际应用于马铃薯甲虫防治中,提供了强而有力的科学依据。在天敌防治方面,舒敏等(2012)通过室内试验研究了天敌蓝蜻对马铃薯甲虫低龄幼虫的功能反应和选择效应。在病原菌方面,任羽等(2016)阐明了对马铃薯甲虫具有致病性的苏云金芽孢杆菌 Cry8E 杀虫晶体蛋白对马铃薯甲虫解毒酶和保护酶活性的影响;陆慧慧等(2015)分析鉴定了苏云金芽孢杆菌的杀虫基因。这些研究为有效地控制马铃薯甲虫的危害奠定了基础。

### 1.7 红脂大小蠹

红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* LeConte (鞘翅目:象甲科,小蠹亚科)于 20 世纪 80 年代由原产地北美引入中国,1999 年该虫于山西省多个地区首次暴发后,迅速扩散到相邻省份河北、河南、陕西和北京等地(Yan *et al.*, 2005)。我国国家林业局已将红脂大小蠹列入我国 14 种林业检疫性有害生物之一。

红脂大小蠹的伴生真菌 *Leptographium procerum* 除了参与化学信息物质介导的种间互动,还建立了营养共生的关系。最新的研究表明红脂大小蠹伴生细菌挥发物改变了 *L. procerum* 对葡萄糖的优先利用,而选择利用了松醇,而葡萄糖是红脂大小蠹幼虫生长发育重要的营养物质,从而红脂大小蠹幼虫保留更多的营养成分葡萄糖,减少了昆虫、真菌和细菌三者对共同的营养资源的竞争,形成一种新的共生机制(Wang *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2016)。在 Lou 等(2014)首次对

不同生活史阶段中国红脂大小蠹肠道、体表及蛀屑的酵母物种和细菌进行了全面、系统的调查,通过与北美红脂大小蠹比较发现,中国红脂大小蠹伴生的 *Pseudomonas* 不仅量很大,而且种类非常多,其中最优势种 *Pseudomonas* sp. 11 在北美红脂大小蠹可能并不存在,另外,中国红脂大小蠹伴生的 *Streptomyces* 种类多达 16 种,北美红脂大小蠹仅见报道有 6 种,为以后的研究奠定了基础。Cheng 等 (2016) 发现红脂大小蠹新携带的本地伴生真菌能够诱导油松产生防御性物质——柚皮素,柚皮素对幼虫生长发育及成虫钻蛀率都是不利的,是红脂大小蠹的拒食性物质,而红脂大小蠹坑道微生物能够降解柚皮素来消除这种不利。这些研究极大地丰富了红脂大小蠹与伴生菌互作的理论基础,为红脂大小蠹的防治提供了理论支持。

### 1.8 椰心叶甲

椰心叶甲 *Brontispa longissima* 又称椰子铁甲、椰子叶甲、椰心潜甲,主要危害以椰子为主的棕榈科植物,原发生于印度尼西亚和巴布亚新几内亚,1975 年入侵我国台湾,2002 年入侵海口和三亚市并暴发成灾,之后迅速扩散,是一种重大危害性外来有害生物,是我国林业检疫性有害生物之一。

近年来,我国学者在椰心叶甲和其天敌、寄生蜂基础研究方面做了大量的工作。在椰心叶甲基础研究方面,初步研究了椰心叶甲的耐寒和耐热能力 (唐真正等, 2016), 还研究了低温条件下,椰心叶甲啮小蜂成虫体内 3 种保护酶的变化 (郭东峰等, 2013), 并且构建了低温胁迫下椰心叶甲啮小蜂正反向 cDNA 文库,分析筛选出与啮小蜂耐寒性相关的基因 (吕宝乾等, 2014)。

前期的研究发现薇甘菊在椰心叶甲防治方面具有非常重要的作用,所以近年来关于薇甘菊的应用也进行了更深入的研究。相关研究表明了薇甘菊提取物对椰心叶甲表现出一定的胃毒性和拒食性 (钱军等, 2015), 薇甘菊次生物质对椰心叶甲表现出驱避作用 (李洪等, 2016), 这些研究为薇甘菊的应用提供了科学依据。

### 1.9 红棕象甲

红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus* 又称椰子甲虫、亚洲棕榈象。原产于东南亚热带地区,后蔓延扩散到其他国家和地区,是一种世界性的棕榈科植物害虫。1997 年在我国广东中山首次被发现,目前已扩散到了其他的 10 个省,被列为我国林业检疫性有害生物之一。

林燕婷 (2014) 通过研究明确了红棕象甲存在免疫致敏现象,并且红棕象甲雌虫存在免疫致敏跨代传递现象。王桂花 (2014) 通过微卫星和线粒体 CO 分析了福建省 12 个红棕象甲地理种群的遗传特征和遗传关系,为研究红棕象甲的遗传多样性和扩散途径奠定了基础。万婕等 (2014) 采用评价昆虫耐寒性的经典手段对海南红棕象甲各个虫龄的耐寒性进行了全面的研究,并且确定了对红棕象甲高龄幼虫进行冷驯化时的有效降温速率。

我国学者从感染的红棕象甲身上分离了金龟子绿僵菌,并对其进行了纯化、鉴定,测定了其红棕象甲的致病力以及探明了其侵染红棕象甲的组织病理学变化 (张晶, 2012), 这些研究为应用金龟子绿僵菌来防治红棕象甲奠定了基础。在化学防治方面,孟志远等 (2013) 比较了不同药剂采用淋灌法和挂包法对红棕象甲的防治效果,证明了这两种方法的可实施性。阎伟等 (2015) 调查了不同诱捕条件下红棕象甲聚集信息素的诱捕效果,明确了诱捕器的颜色和位置,为有效利用红棕象甲聚集信息素防治红棕象甲提供指导。

### 1.10 橘小实蝇

橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 别称柑橘小实蝇、东方果实蝇,原产于亚洲热带或亚热带地区,现扩散至 30 多个国家和地区,是一种世界性检疫害虫。我国于 1911 年在中国台湾高雄地区首次发现橘小实蝇,1937 年大陆地区发现该虫,目前已扩散到了多个省份,对我国水果和蔬菜等作物造成了巨大的损失。

近年来,我国学者从分子层面上对橘小实蝇进行了深入的研究。如,克隆了橘小实蝇羧酸酯

酶基因 *BdCAREB1*, 阐明了该基因在橘小实蝇不同发育阶段和组织以及经高效氯氟菊酯饲喂后的表达情况 (申光茂等, 2014); 明确了橘小实蝇蜕皮激素合成通路基因的组织分布以及饥饿条件下的表达情况, 为进一步开展橘小实蝇变态发育与抗逆胁迫机制的研究提供了理论支持 (丛林等, 2015)。另外, 王洪秀等 (2015) 对橘小实蝇成虫的肠道微生物进行了初步研究, 分析了其 3 个橘小实蝇种群成虫肠道中可培养细菌的群落结构组成, 为利用微生物防治奠定基础。

我国学者在橘小实蝇防治方面也取得了一定进展。研究了啤酒酵母酶解液挥发性成分、不同用量的假丝酵母丸、甲基丁香酚和蛋白饵剂对橘小实蝇的诱捕效果 (蔡波等, 2014)。寄生蜂防治害虫一直是研究重点, 王勇 (2013) 等明确了橘小实蝇在长尾潜蝇茧蜂寄生后其体内过氧化氢酶、过氧化酶、超氧化物歧化酶和非氧化物酶的活性变化; 另外, 相关学者还研发了基于无线传感器网络的橘小实蝇成虫检测系统 (文韬等, 2013)。

### 1.11 柑橘大实蝇

柑橘大实蝇 *Bactrocera minax* 别称柑蛆, 原产于日本九州琉球群岛的奄美大岛。我国于 20 世纪六七十年代开始发生, 主要分布在重庆、四川、云南、贵州陕西等西南和华中各地, 主要危害柑橘属多种果树的果实, 严重降低了产量。

近几年, 我国科研工作者对柑橘大实蝇的生物学特性及其影响因子展开了大量的研究。如, 肖伟等 (2013) 确定了柑橘大实蝇成虫性成熟的时间、直肠的形态和位置, 并且通过触角电位试验和田间诱集试验, 证实了柑橘大实蝇成虫直肠具有分泌和储存信息素的功能。而雌虫直肠提取物中含有能够吸引雌性和雄性个体的信息素。高立志等 (2016) 利用 4 对微卫星引物对中国 7 省市的 18 个柑橘大实蝇地理种群进行了遗传多样性分析, 结果表明中国柑橘大实蝇种群的遗传多样性较高, 不同种群间存在较大的遗传分化。

柑橘大实蝇防治方面也取得了一定的成果, 但在柑橘大实蝇不育技术研究方面成果最突出。

确定了辐射的适应剂量、辐射时期, 测定了辐射对柑橘大实蝇交配竞争力没有不良影响 (张桂芬等, 2015)。另外, 还对柑橘大实蝇蛹滞育机制展开了研究, 明确了滞育相关的基因, 克隆了滞育相关热激蛋白基因以及测定了其在不同龄期的表达情况, 为实现柑橘大实蝇的大量繁育奠定基础 (张桂芬等, 2015)。

### 1.12 斑潜蝇

斑潜蝇属 *Liriomyza* 主要分布于世界温带地区, 我国是世界上蔬菜潜叶蝇类害虫危害最严重的国家之一, 入侵到我国的斑潜蝇有美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae*、南美斑潜蝇 *Liriomyza huidobrensis*、三叶草斑潜蝇 *Liriomyza trifolii* 和番茄斑潜蝇 *Liriomyza bryoniae*。

孙兴华等 (2012) 揭示了南美斑潜蝇与其寄主相互作用的机制, 分别测定了南美斑潜蝇幼虫危害后, 黄瓜叶片内可溶性糖、可溶性蛋白质、单宁、黄酮和叶绿素含量的变化; 采用 RT-PCR 和 RACE 技术获得了三叶斑潜蝇热激蛋白 *Hsp90* 基因, 高温胁迫可以诱导三叶草斑潜蝇 *Hsp90* 基因的表达 (吉青战等, 2013)。

快速准确的检测鉴定技术是防治斑潜蝇进一步扩散蔓延的必要前提。张桂芬等 (2012) 采用 SS-PCR 技术, 找到了一对美洲斑潜蝇特异性引物, 灵敏度高, 可用于美洲斑潜蝇的鉴定识别和检测监测; 郭伟等 (2013) 研究和比较了以 CO 和 ITS1 序列为条形码和间接 ELISA 方法鉴定三叶草斑潜蝇, 结果表明 CO 序列作为条形码鉴定效果更好, ELISA 更适于田间大量样品鉴定; 鉴定方法的优化为有效阻截其传播扩散, 提供了技术支撑。

### 1.13 苹果蠹蛾

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 别称苹果小卷蛾、苹果食心虫, 原产于欧亚大陆中南部地区, 现广泛分布于世界上六大洲几乎所有的苹果和梨产地, 是全世界仁果类水果的重要害虫之一。20 世纪 50 年代入侵到我国新疆, 目前广泛分布于新疆和甘肃, 对我国陕西和山东两大苹果主产区

造成了巨大损失, 因此是我国重要的对外检疫对象。

首先, 我国科研工作者对苹果蠹蛾生物学特性开展了细致的研究。如, 测定了不同温度下苹果蠹蛾各发育历期、存活率和产卵量, 明确了其生长发育和繁殖的最适温度(刘月英等, 2012); 研究了光周期和温度对苹果蠹蛾滞育诱导的影响(刘月英等, 2015)。其次, 冯宏组等(2014, 2015)对 10 个苹果蠹蛾地理种群体内共生菌 *Wolbachia* 进行了分子生物学鉴定, 确定了其进化位置, 并且明确了该共生菌不能诱导苹果蠹蛾的胞质不亲和现象。另外, 刘向阳等(2014)研究了苹果蠹蛾颗粒体病毒 GP37 蛋白的真核表达和亚细胞定位, 表明了该蛋白定位于细胞质中, 为研究该蛋白的增效机制奠定了基础。

在生物源农药, 如寄生蜂, 颗粒体病毒研究方面都取得了很大的进展。在我国, 相关研究表明赤眼蜂和周氏啮小蜂能够有效地防治苹果蠹蛾(吴正伟等, 2015); 樊江斌等(2015)通过田间试验表明了添加低剂量的氧化铁, 能够显著增强苹果蠹蛾颗粒体病毒在田间的活性和持久性, 提高其对苹果蠹蛾的防治效果, 为该病毒更好的应用提供了依据。吕婷婷等(2013)研究发现基因工程表达的 BtCry1Ab 毒素蛋白能够显著缩短苹果蠹蛾颗粒体病毒对苹果蠹蛾的致死时间。

#### 1.14 红火蚁

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 是危害性极大的外来入侵物种。该蚁原产于南美巴拉那河流域, 于 2003 年首次在我国台湾桃园发现, 2004 年在广东吴川发现, 目前已扩散到了华南、西南、华东地区多个省市, 并且呈不断蔓延的趋势, 对当地经济、生态、公共设施和人身健康造成了严重的危害。

蚂蚁生物学方面, 研究发现单只红火蚁工蚁可以搬运小块食物, 但工蚁集体搬运大块食物会出现不协调性(Wang *et al.*, 2016)。红火蚁工蚁之间相互清洁的行为有助于提高存活率(Qiu *et al.*, 2014)。真菌感染能加速工蚁搬运蛹尸体(Qiu *et al.*, 2015), 工蚁能够通过增加取食和

哺喂行为对抗真菌感染(Qiu *et al.*, 2016)。报警信息素和多种结构类似物均可引起红火蚁工蚁的电生理和行为反应, 报警信息素及其类似物加入可以显著增加食物诱饵对工蚁的吸引(Guan *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2017)。

红火蚁毒囊产生生物碱, 用于防御和抢占领地。毛细管虹吸、毒囊解剖、工蚁浸泡等方法可以提取毒液生物碱成分(Liu *et al.*, 2017)。GC-MS 和 GC-FID 分析结果表明反式生物碱和顺式生物碱在不同物种中的比例有很大不同, 预示了物种的进化关系, 并且为寄生蝇区分不同红火蚁寄主时提供了嗅觉线索(Yu *et al.*, 2014)。红火蚁、黑火蚁 *S. richteri* 和它们的杂交代 3 个物种蚁后的毒囊内有着相似的生物碱组分, 这也预示着两种火蚁和杂交代的生殖兼容性(Chen *et al.*, 2012)。

两种入侵生物, 红火蚁与扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* 之间的共生关系能提高双方适合度, 相互促进对新生境的入侵和扩散(Zhou *et al.*, 2012a)。红火蚁可以显著降低龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 的幼虫数量(Zhou *et al.*, 2013), 同时显著降低龟纹瓢虫对扶桑绵粉蚧的取食, 从而促进了扶桑绵粉蚧的增长(Cheng *et al.*, 2015a)。另外, 红火蚁利用棉大卷叶螟 *Sylepta derogate* 制造的避难所保护扶桑绵粉蚧免受天敌的寄生(Zhou *et al.*, 2012b)。扶桑绵粉蚧则通过调整糖代谢产物吸引红火蚁(Zhou *et al.*, 2015)。

RNAi 方面的研究结果显示, 化学感受蛋白基因 *Si-CSP9* 和蛋白激酶基因 *PKA* 在红火蚁 3 龄幼虫发育过程中有重要作用, *Si-CSP9* 与幼虫蜕皮过程相关, 而沉默 *PKA* 基因, 3 龄幼虫将停止发育(Cheng *et al.*, 2015b)。化学感受蛋白基因 *Si-CSP1* 能够调节红火蚁工蚁的搬尸行为(Qiu and Cheng, 2017)。

红火蚁防治方面也有较多的报道, 辣椒 *Capsicum annuum*、香茅 *Cymbopogon nardus*(Wang *et al.*, 2012)、樟脑 *Cinnamomum camphora*、青蒿 *Artemisia annua*、桉树 *Eucalyptus globulus*、艾蒿 *Artemisia argyi*、冬青 *Ilex chinensis* 等(Tang

*et al.*, 2013) 多种植物的精油对红火蚁有趋避作用, 柑橘 *Citrus sinensis* (L.) 精油成分有熏蒸作用 (Hu *et al.*, 2017)。商品化的风油精对红火蚁有很强的趋避作用 (Wen *et al.*, 2016), 可能作为化学杀虫剂的替代品。土壤中的肉桂叶屑可以产生肉桂醛、丁香酚, 这些成分可以趋避和杀死红火蚁, 杀虫毒力测定显示, 含有肉桂叶的土壤对红火蚁工蚁有很强的趋避作用, 并可以提高各种大小的工蚁的死亡率, 因此种植肉桂树可能是控制红火蚁种群数量的有效办法 (Huang *et al.*, 2016)。亚致死剂量的吡虫啉对红火蚁蚁后早期建立蚁巢有很大的影响, 可以显著降低蚁后生殖能力, 幼虫初次出现时间显著后移, 没有成年工蚁和蛹出现 (Wang *et al.*, 2015)。

## 2 本学科发展趋势及展望

近年来, 我国在外来入侵生物特别是外来入侵昆虫研究领域取得了一定的进展, 对入侵昆虫的适应性进化与表型可塑性、入侵昆虫与其共生微生物的种间互作, 环境响应与系统抵御的外部特征和预防与控制的技术基础等方面取得了一些重大突破。然而随着研究平台和体系的不断完善, 分子生物学、分子遗传学和信息技术的不断发展以及不断变化的国际环境, 为中国的入侵昆虫学科又提出了新的挑战和机遇。在此背景下, 我国入侵昆虫学科未来的发展存在以下三个方面的趋势:

(1) 将原创性的入侵理论应用到入侵昆虫的预警和防控中, 开发入侵昆虫的化学信息与食物结构调整机理及其分子干涉调控技术, 入侵物种的传统生物防治控制技术、控制效应及天敌适应机理, 以及入侵害虫的转基因控制技术。最终, 建立从基础研究、技术研发到应用示范的全链式入侵昆虫研究体系。

(2) 在全球格局尺度上, 针对全球性重大入侵和检疫害虫, 研究全球变化 (气候变化、环境变化和土地利用变化) 对生物入侵的影响, 着重于景观尺度、区域尺度和全球尺度上的生态因子对外来物种的定殖、扩散和危害的影响, 揭示不同地理环境与外来物种入侵相关性。最终, 产

出全球关注的入侵昆虫原产性重大成果。

(3) 2013 年以来, 入侵昆虫学科没有产生一位杰出青年基金获得者, 青年领军人才相对于其他学科, 明显较少。全国能够持续产出入侵昆虫相关论文的团队与 5 年前相比, 也没有明显的扩大。“十三五”布局的国家重点研发计划的生物安全专项中已经和正在立项的关于生物入侵的项目超过 10 个, 为今后入侵昆虫学科培养青年领军人才和扩大研究团队打下基础。

## 参考文献 (References)

- Ahmed MZ, Li SJ, Xue X, Yin XJ, Ren SX, Jiggins FM, Greeff JM, Qiu BL, 2015. The intracellular bacterium *Wolbachia* uses parasitoid wasps as phoretic vectors for efficient horizontal transmission. *PLoS Pathog*, 11(2): e1004672.
- Bing XL, Yang J, Zchori-Fein E, Wang XW, Liu SS, 2013. Characterization of a newly discovered symbiont of the whitefly *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Applied and Environmental Microbiology*, 79(2): 569–575.
- Cai B, Lin MG, Chen HM, Li F, Shi J, 2014. Study of dosage and field longevity of torula yeast bait pellets for capturing *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Plant Quarantine*, 28(5): 55–58. [蔡波, 林明光, 陈华敏, 黎奋, 石晶, 2014. 不同用量假丝酵母丸对橘小实蝇引诱效果及田间持效期研究. *植物检疫*, 28(5): 55–58.]
- Chen L, Lu YY, Hu QB, Fadamiro HY, 2012. Similarity in venom alkaloid chemistry of alate queens of imported fire ants: implication for hybridization between *Solenopsis richteri* and *S. invicta* in the Southern United States. *Chemistry & Biodiversity*, 9(4): 702–713.
- Cheng CH, Xu LT, Xu DD, Lou QZ, Lu M, Sun JH, 2016. Does cryptic microbiota mitigate pine resistance to an invasive beetle-fungus complex? Implications for invasion potential. *Scientific Reports*, 6: 33110.
- Cheng DF, Lu YY, Zeng L, Liang GW, He XF, 2015a. Si-CSP9 regulates the integument and moulting process of larvae in the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Scientific Reports*, 5: 9245.
- Cheng SJ, Zeng L, Xu YJ, 2015b. Mutualism between fire ants and mealybugs reduces lady beetle predation. *Journal of Economic Entomology*, 108(4): 1560–1569.
- Cong L, Jiang XZ, Yang WJ, Xu KK, Dou W, Ran C, Wang JJ, 2015. Identification of ecdysone synthesis pathway genes and analysis on the impact of food deprivation on larvae development of *Bactrocera dorsalis* Hendel. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(22): 4469–4482. [丛林, 蒋玄赵, 杨文佳, 许抗抗, 豆威, 冉春, 王



- 进军, 2015. 橘小实蝇蜕皮激素合成通路基因鉴定分析及饥饿对幼虫发育的影响. *中国农业科学*, 48(22): 4469–4482.]
- Cui YY, 2012. The study of 40 billion spores/g of white muscardine wettable powder to control *Bemisia tabaci* and *Bradysia odoriphaga*. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2(1): 18–20. [崔元英, 2012. 400 亿孢子/g 球孢白僵菌 WP 对番茄烟粉虱和韭蛆的防治效果研究. *农业灾害研究*, 2(1): 18–20.]
- Cui ZF, Cao FQ, Lin JT, Cheng LS, Peng ZQ, Wan FH, 2015. Predation of *Propylaea japonica* Thunberg to *Phenacoccus solenopsis* Tinsley. *Journal of Environmental Entomology*, 37(4): 834–842. [崔志富, 曹凤勤, 林进添, 程立生, 彭正强, 万方浩, 2015. 龟纹瓢虫对扶桑绵粉蚧的捕食功能反应. *环境昆虫学报*, 37(4): 834–842.]
- Dang ZH, Li YF, Pan WL, 2015. Study on over-winter situation of *Eriosoma lanigerum* Hausmann in the middle of Hebei province. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 19(2): 44–46, 62. [党志红, 李耀发, 高占林, 潘文亮, 2015. 河北省冀中地区苹果绵蚜越冬状况研究. *河北农业科学*, 19(2): 44–46, 62.]
- Fan JB, Wu ZW, Liu GF, Wang D, 2015. Synergic enhancement of *Cydia pomonella* granulovirus virulence using an adjuvant. *Journal of Biosafety*, 24(4): 310–314. [樊江斌, 吴正伟, 刘国锋, 王敦, 2015. 一种增强苹果蠹蛾颗粒体病毒田间防效方法的建立. *生物安全学报*, 24(4): 310–314.]
- Feng HZ, Cao Y, Yang ML, Liu HM, Xu JJ, 2015. The effects of *Wolbachia* on the reproduction of *Cydia pomonella* (L.). *Journal of Biosafety*, 24(4): 306–309. [冯宏祖, 曹玉, 杨明禄, 刘慧敏, 许建军, 2015. *Wolbachia* 对苹果蠹蛾生殖调控的作用. *生物安全学报*, 24(4): 306–309.]
- Feng HZ, Wang YP, Cao Y, Yang ML, Liu HM, Xu JJ, 2014. Cloning and sequence analysis of the *Wolbachia wsp* gene to detect of *Wolbachia* in *Cydia pomonella*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(3): 725–732. [冯宏祖, 王月萍, 曹玉, 杨明禄, 刘慧敏, 许建军, 2014. 苹果蠹蛾体内 *Wolbachia wsp* 基因克隆与序列分析. *应用昆虫学报*, 51(3): 725–732.]
- Gao LZ, Liu YH, Wan XW, Tu ZX, Pu P, Chen Y, 2016. Genetic diversity analysis of *Bactrocera minax* (Diptera: Tephritidae) in China. *Plant Protection*, 42(1): 51–55, 80. [高立志, 刘映红, 万宣伍, 涂祖霞, 蒲颇, 陈媛, 2016. 中国柑橘大实蝇遗传多样性分析. *植物保护*, 42(1): 51–55, 80.]
- Guan D, Lu YY, Liao XL, Wang L, Chen L, 2014. Electroantennogram and behavioral responses of the imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, to an alarm pheromone component and its analogues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(49): 11924–11932.
- Guo DF, Lv BQ, Wen ML, Jin QA, Wen HB, Peng ZQ, 2013. Effect of low temperature on the protective enzymes in *Tetrastichus brontispae*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 34(2): 331–334. [郭东峰, 吕宝乾, 韦曼丽, 金启安, 温海波, 彭正强, 2013. 低温对椰心叶甲啮小蜂保护酶活性的影响. *热带作物学报*, 34(2): 331–334.]
- Guo W, Zhao WC, Xu Y, Jin YT, Zhu LX, 2013. Methodology comparison between DNA barcoding identification and ELISA detection of *Liriomyza trifolii*. *Journal of Zhejiang Chinese Medical University*, 37(1): 74–78. [郭伟, 赵伟春, 徐阳, 金艳婷, 祝丽欣, 2013. 三叶草斑潜蝇 DNA 条形码鉴定和 ELISA 检测的方法学比较. *浙江中医药大学学报*, 37(1): 74–78.]
- Guo WC, Tu EX, Guo LN, He J, Xu JJ, 2012. Effects of different nutrients on flight capacity in colorado potato beetles. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 49(3): 461–469. [郭文超, 吐尔逊, 郭利娜, 何江, 许建军, 2012. 营养对马铃薯甲虫迁飞能力的影响. *新疆农业科学*, 49(3): 461–469.]
- Hu W, Zhang N, Chen H, Zhong B, Yang A, Kuang F, Ouyang Z, Chun J, 2017. Fumigant activity of sweet orange essential oil fractions against red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, doi: 10.1093/jee/tox12.
- Hu DC, Zhang RZ, 2011. Taxonomic categorisation, origins and trends of invasive alien species in China. *Journal of Biosafety*, 20(2): 113–118. [黄顶成, 张润志, 2011. 中国外来入侵种的类群、原产地及变化趋势. *生物安全学报*, 20(2): 113–118.]
- Huang RL, Li ZH, Wang SY, Fu JT, Cheng DM, 2016. Insecticidal effect of volatile compounds from plant materials of *Murraya exotica* against red imported fire ant workers. *Sociobiology*, 63(2): 783–791.
- Ji QZ, Wang HO, Lei ZR, Zhang KJ, Wang J, Zhang Y, 2013. Cloning and expression of heat shock protection 90 gene in relation to heat stress in the leaf miner, *Liriomyza trifolii*. *Plant Protection*, 39(5): 110–116, 122. [吉青战, 王海鸿, 雷仲仁, 张靠稳, 王娇, 张焯, 2013. 三叶斑潜蝇热激蛋白 Hsp90 基因的克隆及其在高温胁迫下的表达分析. *植物保护*, 39(5): 110–116, 122.]
- Li C, Liu H, Guo WC, Cheng DF, Zhang YH, Tuerxun-Ahemaiti, 2016. Effects of precipitation on the distribution of colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, in Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 36(8): 2348–2354. [李超, 刘怀, 郭文超, 程登发, 张云慧, 吐尔逊·阿合买提, 2016. 降水对新疆马铃薯甲虫分布的影响. *生态学报*, 36(8): 2348–2354.]
- Li H, Qian J, Lv CJ, Wu TJ, Cen XC, Gou ZH, 2016. Oviposition deterrent activity of *Mikania micrantha* secondary compounds on *Brontispa longissima*. *Hubei Agricultural Sciences*, 55(7): 1717–1719. [李洪, 钱军, 吕朝军, 吴挺佳, 岑选才, 苟志辉, 2016. 薇甘菊次生物质对椰心叶甲的忌避活性. *湖北农业科学*, 55(7): 1717–1719.]
- Li XX, Guo WC, Fu KY, Li GQ, Tu EX, He J, 2015b. The toxicity

- measurement of dsSAHase on different age colorado potato beetles. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 52(1): 56–64. [李晓旭, 郭文超, 付开赞, 李国清, 吐尔逊, 何江, 2015. 腺苷高半胱氨酸水解酶基因 dsRNA 对马铃薯甲虫幼虫毒力测定. *新疆农业科学*, 52(1): 56–64.]
- Lin YT, 2014. The immune priming and trans-generational immune protection of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier)(Coleoptera: Curculionidae). Master dissertation. Fuzhou : Fujian Agriculture and Forestry University. [林燕婷, 2014. 红棕象甲的免疫致敏与跨代传递效应. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Liu HW, Lu YY, Wang WK, Chen L, 2017. Whole body solvent soak gives representative venom alkaloid profile from *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) workers. *Florida Entomologist*, in press.
- Liu XY, Sun XL, Zhang ZX, Zhou L, 2014. Expression in Bac-to-Bac baculovirus system and localization in infected cells of *Cydia pomonella granulovirus* (CpGV) GP37. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 22(5): 552–560. [刘向阳, 孙修炼, 张忠信, 周琳, 2014. 苹果蠹蛾颗粒体病毒(CpGV)GP37 蛋白在 Bac-to- Bac 系统中的表达和亚细胞定位. *农业生物技术学报*, 22(5): 552–560.]
- Liu YY, Luo JC, Zhou ZX, Wei JH, 2012. Life tables of the experimental population of codling moth , *Cydia pomonella* (L.) at different temperatures. *Acta Phytophylacica Sinica*, 39(3): 205–210. [刘月英, 罗进仓, 周昭旭, 魏玉红, 2012. 不同温度下苹果蠹蛾实验种群生命表. *植物保护学报*, 39(3): 205–210.]
- Liu YY, Luo JC, Zhou ZX, Zhang DW, Wei YH, 2015. Effects of photoperiod and temperature on diapause induction in the codling moth *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Olethreutidae). *Journal of Plant Protection*, 42(1): 39–44. [刘月英, 罗进仓, 周昭旭, 张大为, 魏玉红, 2015. 光周期和温度对苹果蠹蛾滞育诱导的影响. *植物保护学报*, 42(1): 39–44.]
- Liu ZF, Zhang MW, Liao XJ, Xie Y, 2016. Prevention and control against *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel in FDD rotation. *Biological Disaster Science*, 39(1): 48–50. [刘志峰, 张茂文, 廖晓军, 谢彦, 2016. 水旱轮作对稻水象甲防控研究. *生物灾害科学*, 39(1): 48–50.]
- Liu ZF, Zhang PJ, Guo XJ, Gao Y, Li X, Fan RJ, 2016. Field efficacy trial of 240 g/l sulfoxaflor sc for control *Eriosoma lanigerum*. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 44(10): 1526–1528. [刘中芳, 张鹏九, 郭晓君, 高越, 李霞, 范仁俊, 2016. 240 g/L 氟啶虫胺腈悬浮剂防治苹果绵蚜田间药效试验. *山西农业科学*, 44(10): 1526–1528.]
- Lou QZ, Lu M, Sun JH, 2014. Yeast diversity associated with invasive *Dendroctonus valens* killing *Pinus tabuliformis* in China using culturing and molecular methods. *Microbial Ecology*, 68(2): 397–415.
- Lu F, 2014. The bacterial diversity in rice water weevil and its relationship with host reproduction. Master dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [陆芳, 2014. 稻水象甲体内细菌多样性及其和生殖的关系. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学.]
- Lu HH, Lin ZQ, Tan WZ, Luo HD, Xian F, Bi CW, Yu Y, Yang YH, 2015. Insecticidal protein genes of *Bacillus thuringiensis* strain CPB012 and its effects in controlling different insect pests. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(6): 1112–1121. [陆慧慧, 林志强, 谭万忠, 罗华东, 鲜菲, 毕朝位, 余洋, 杨宇衡, 2015. 苏云金芽孢杆菌 CPB012 菌株的杀虫功能基因鉴定及其对害虫的控制作用. *中国农业科学*, 48(6): 1112–1121.]
- Luan JB, Yao DM, Zhang T, Walling LL, Yang M, Wang YJ, Liu SS, 2013a. Suppression of terpenoid synthesis in plants by a virus promotes its mutualism with vectors. *Ecology Letter*, 16(3): 390–398.
- Luan JB, Wang YL, Wang J, Wang XW, Liu SS, 2013b. Detoxification activity and energy cost is attenuated in whiteflies feeding on Tomato yellow leaf curl China virus-infected tobacco plants. *Insect Molecular Biology*, 22(5): 597–607.
- Lv BQ, Wan J, Li YQ, Jin QA, Peng ZQ, Wen HB, 2014. Construction and preliminary analysis of forward and reverse subtracted cDNA libraries from *Tetrastichus brontispae* Ferriere under low temperature. *Journal of Biosafety*, 23(3): 210–216. [吕宝乾, 万婕, 李艺琼, 金启安, 彭正强, 温海波, 2014. 低温胁迫下椰心叶甲啮小蜂正反向消减 cDNA 文库的构建及其序列分析. *生物安全学报*, 23(3): 210–216.]
- Lv TT, Xu BQ, Abudukeyoumu KDE, Wang D, 2013. The enhancement on *Cydia pomonella* Granulovirus virulence by prokaryotic expressed BtCry1Ab. *Chinese Journal of Biological Control*, 29(3): 469–472. [吕婷婷, 徐兵强, 阿不都克尤木·卡德尔, 王敦, 2013. BtCry1Ab 原核表达产物与苹果蠹蛾颗粒体病毒协同增效初探. *中国生物防治学报*, 29(3): 469–472.]
- Meng ZY, Chen YQ, Wang N, Liu L, Tang MB, Chen XJ, 2013. Comparison of the effect of different pesticides against *Rhynchophorus ferrugineus* with drenching and hanging bag methods. *Forest Pest and Disease*, 32(6): 30–32. [孟志远, 陈艳娟, 王宁, 刘莉, 唐梦碧, 陈小军, 2013. 淋灌法和挂包法防治红棕象甲不同药剂效果比较. *中国森林病虫*, 32(6): 30–32.]
- Qi GJ, Gao Y, Huang DC, Lv LH, 2012. Historical invasion , expansion process and the potential geographic distributions for the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* in China based on MAXENT. *Acta Phytophylacica Sinica*, 39(2): 129–136. [齐国君, 高燕, 黄德超, 吕利华, 2012. 基于 MAXENT 的稻水象甲在中国的入侵扩散动态及适生性分析. *植物保护学报*,

- 39(2): 129–136.]
- Qian J, Cen XC, Du SJ, Liu SB, Feng Q, Lin ZW, 2015. Oral toxicity and antifeedant activity of *Mikania micrantha* extracts on *Brontispa longissima* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(27): 258–261. [钱军, 岑选才, 杜尚嘉, 刘盛波, 冯巧, 林作武, 2015. 薇甘菊提取物对椰心叶甲胃毒和拒食活性研究. 中国农学通报, 31(27): 258–261.]
- Qiu HL, Cheng DF, 2017. A chemosensory protein gene *Si-CSP1* associated with necrophoric behavior in red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 110: 1284–1290.
- Qiu HL, Lu LH, Shi QX, He YR, 2014. Fungus exposed *Solenopsis invicta* ants benefit from grooming. *Journal of Insect Behavior*, 27(5): 678–691.
- Qiu HL, Lu LH, Shi QX, Tu CC, 2015. Differential necrophoric behaviour of the ant *Solenopsis invicta* towards fungal-infected corpses of workers and pupae. *Bulletin of Entomological Research*, 105(5): 607–614.
- Qiu HL, Lu LH, Zalucki MP, He YR, 2016. *Metarhizium anisopliae* infection alters feeding and trophallactic behavior in the ant *Solenopsis invicta*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 138: 24–29.
- Qu SJ, Zhu AG, Li G, Chen H, Zheng FQ, Zhou XH, Chen AS, 2016. Study on process and characteristics of parasitic behavior of *Aphelinus mali* on *Eriosoma lanigerum*. *Shandong Agricultural Sciences*, 48(8): 109–112. [曲树杰, 朱爱国, 李刚, 陈浩, 郑方强, 周仙红, 张安盛, 2016. 日光蜂对苹果绵蚜寄生行为过程及特征研究. 山东农业科学, 48(8): 109–112.]
- Ren Y, Guo WC, Yue MC, ABDUL Reheman-Tursun, 2016. Influence of Cry8E sublethal doses on activities of detoxification enzymes and protective enzyme of the potato beetle larvae. *Chinese Journal of Biological Control*, 32(6): 794–799. [任羽, 郭文超, 岳明翠, 阿布都热合曼·吐尔逊, 2016. Cry8E 亚致死浓度对马铃薯甲虫解毒酶和保护酶的影响. 中国生物防治学报, 32(6): 794–799.]
- Shen GM, Dou W, Wang JJ, 2014. Cloning and expression analysis of a carboxylesterase gene *BdCAREB1* from *Bactrocera dorsalis*. *Scientia Agricultura Sinica*, 47(10): 1947–1955. [申光茂, 豆威, 王进军, 2014. 橘小实蝇羧酸酯酶基因 *BdCAREB1* 的克隆及其表达模式解析. 中国农业科学, 47(10): 1947–1955.]
- Shu M, Eyoumu WLM, Luo QH, Liu WW, Mou LS, Feng LK, Wang PL, 2012. Predation potential of *Zicrona caerulea* (Linnaeus) to the *Leptinotarsa decemlineata* (Say) low instar larvae. *Journal of Environmental Entomology*, 34(1): 38–44. [舒敏, 克尤木·维勒木, 罗庆怀, 刘伟伟, 牟刘森, 冯丽凯, 马宁, 王佩玲, 2012. 蓝蜻对马铃薯甲虫低龄幼虫的捕食潜能初探. 环境昆虫学报, 34(1): 38–44.]
- Su Q, Oliver K M, Xie W, Wu QJ, Wang SL, Zhang YJ, 2015. The whitefly-associated facultative symbiont *Hamiltonella defensa* suppresses induced plant defences in tomato. *Functional Ecology*, 29(8): 1007–1018.
- Sun JT, Yang XM, Ge C, Hong XY, 2012. The application of microsatellite markers in insect molecular ecology. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 35(5): 103–112. [孙荆涛, 杨现明, 葛成, 洪晓月, 2012. 微卫星分子标记在昆虫分子生态学研究上的应用. 南京农业大学学报, 35(5): 103–112.]
- Sun XH, Zhou XR, Pang BP, Meng QJ, 2012. Effects of infestation of *Liriomyza huidobrensis* (Diptera: Agromyzidae) on the contents of main nutrients, secondary metabolites and chlorophyll in cucumber leaves. *Acta Entomologica Sinica*, 55(10): 1178–1184. [孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 孟庆玖, 2012. 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内主要营养物质、次生代谢物质及叶绿素含量的影响. 昆虫学报, 55(10): 1178–1184.]
- Sun Y, Shao KM, Lu YY, Shi QH, Wang WK, Chen L, 2017. Electrophysiological and alarm behavioral responses of *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) to alkoxy-pyrazines. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(2): 541–546.
- Tang L, Sun YY, Zhang QP, Zhou Y, Zhang N, Zhang ZX, 2013. Fumigant activity of eight plant essential oils against workers of red imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Sociobiology*, 60(1): 35–40.
- Tang ZZ, Wang J, Liu XR, Li YQ, Lv BQ, Peng ZQ, Yu RH, Liu MW, 2016. Comparison of cold tolerance in two tropical invasive pests. *Plant Quarantine*, 30(2): 40–44. [唐真正, 王谨, 刘向蕊, 李艺琼, 吕宝乾, 彭正强, 于永浩, 刘恣文, 2016. 热带两种入侵棕榈害虫耐寒性比较. 植物检疫, 30(2): 40–44.]
- Wan J, Yan W, Liu L, Long XF, Li CX, Tan WQ, 2014. Definitude of effective cooling rates of cold acclimation for old larvae of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Oliver). *Chinese Journal of Tropical Crops*, 35(6): 1192–1197. [万婕, 阎伟, 刘丽, 龙雪峰, 李朝绪, 覃伟权, 2014. 红棕象甲高龄幼虫冷驯化有效降温速率的确定. 热带作物学报, 35(6): 1192–1197.]
- Wang C, Chen X, Strecker R, Henderson G, Wen XJ, Hooper-Büi LM, 2016. Individual and cooperative food transport of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae): Laboratory observations. *Journal of Insect Behavior*, 29(1): 99–107.
- Wang GH, 2014. Population genetic structure analysis of *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) based on microsatellite loci and mitochondrial COI sequences. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [王桂花, 2014. 基于微卫星和线粒体 COI 的红棕象甲不同地理种群遗传结构. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]

- Wang HX, Jin L, Chen QL, Wei YH, Ma JP, 2015. The community structure of the intestine cultivable bacteria of *Bactrocera dorsalis* adults. *Microbiology China*, 42(12): 2351–2365. [王洪秀, 靳亮, 陈庆隆, 魏云辉, 马吉平, 姚健, 陈柳萌, 钟国祥, 2015. 橘小实蝇成虫肠道可培养细菌群落结构分析. *微生物学通报*, 42(12): 2351–2365.]
- Wang HO, Wang JL, Liu YP, Liu X, Wen JC, Lei ZR, 2011. Liquid culturing of microsclerotia of *Beauveria bassiana*, an entomopathogenic fungus to control western flower thrip, *Frankliniella occidentalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 588–595. [王海鸿, 王晶玲, 李银平, 刘旋, 问锦曾, 雷钟仁, 2011. 防治西花蓟马的病原真菌-白僵菌微菌核的液体培养. *应用昆虫学报*, 48(3): 588–595.]
- Wang J, Zhang H, Zeng L, Xu YJ, 2012a. Repellent effects of five plant essential oils on the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Sociobiology*, 59(3): 695–701.
- Wang L, Zeng L, Chen J, 2015. Impact of imidacloprid on new queens of imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Scientific Reports*, 5: 17938
- Wang R, Guo JJ, Chen JY, Ji QE, 2013. The Changes of the activity of four enzymes in larvae of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) parasitized by diachasmimorpha longicaudata. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 34(2): 335–338. [王勇, 郭俊杰, 陈家骅, 李清娥, 2013. 长尾潜蝇茧蜂寄生后橘小实蝇幼虫体内 4 种酶活性的变化. *热带作物学报*, 34(2): 335–338.]
- Wang XW, Zhao QY, Luan JB, Wang YJ, Yan GH, Liu SS, 2012b. Analysis of a native whitefly transcriptome and its sequence divergence with two invasive whitefly species. *BMC Genomics*, 13(1): 529.
- Wei J, Zhao JJ, Zhang T, Li FF, Ghanim M, Zhou XP, Ye GY, Liu SS, Wang XW, 2014. Specific cells in the primary salivary glands of the whitefly *Bemisia tabaci* control retention and transmission of begomoviruses. *Journal of Virology*, 88(22): 13460–13468.
- Wen T, Hong TS, Li LJ, Ye Z, Ye ZJ, Zhang YH, 2014. Design and experiment of trapping and monitoring device for adult *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(11): 37–44. [文韬, 洪添胜, 李立君, 李震, 叶智杰, 张彦晖, 2014. 橘小实蝇成虫诱捕监测装置的设计与试验. *农业工程学报*, 30(11): 37–44.]
- Wen Y, Ma T, Chen X, Liu Z, Zhu C, Zhang Y, Strecker R, Henderson G, Hooper-Bui LM, Chen X, Sun Z, Wen X, Wang C, 2016. Essential balm: a strong repellent against foraging and defending red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 109: 1827–1833.
- Wu HB, Lu XB, Sun HW, Zhao JZ, Zhang KP, Fan K, Sun RH, 2012. Detection of invasive pest *Frankliniella occidentalis* and its control strategies. *Shandong Agricultural Sciences*, 44(4): 86–90. [武海斌, 路兴波, 孙红炜, 赵建忠, 张坤鹏, 范昆, 孙瑞红, 2012. 入侵害虫西花蓟马检测及其防治策略. *山东农业科学*, 44(4): 86–90.]
- Wu ZW, Yang XQ, Zhang YL, 2015. Application of biological pesticides in the control of codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Journal of Biosafety*, 24(4): 299–305. [吴正伟, 杨雪清, 张雅林, 2015. 生物源农药在苹果蠹蛾防治中的应用. *生物安全学报*, 24(4): 299–305.]
- Xiao W, Wu KM, Gong QT, Zhao ZM, He L, 2013. Pheromonal activity of rectum extracts from Chinese citrus fly (*Bactrocera minax*). *Scientia Agricultura Sinica*, 46(7): 1501–1508. [肖伟, 武可明, 宫庆涛, 赵志模, 何林, 2013. 柑橘大实蝇直肠粗提物的信息素功能. *中国农业科学*, 46(7): 1501–1508.]
- Xu J, Yang MG, Di XY, Shi PQ, Zou X, 2015. Field control effects of *Beauveria bassiana* strain YS03 on rice water weevil. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 28(4): 1630–1633. [徐进, 杨茂发, 狄雪源, 师沛琼, 邹晓, 2015. 球孢白僵菌 YS03 菌株对稻水象甲的田间防治效果. *西南农业学报*, 28(4): 1630–1633.]
- Yan W, Liu L, Li CX, Huang SC, Tan WQ, Peng ZQ, 2015. Affecting factors on capture efficacy of aggregation pheromone traps for *Rhynchophorus ferrugineus* Oliver. *Journal of Environmental Entomology*, 37(5): 1003–1007. [阎伟, 刘丽, 李朝绪, 黄山春, 覃伟权, 彭正强, 2015. 诱捕条件对红棕象甲聚集信息素田间效果的影响. *环境昆虫学报*, 37(5): 1003–1007.]
- Yan Z, Sun J, Don O, Zhang ZN, 2005. The red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* LeConte (Scolytidae): an exotic invasive pest of pine in China. *Biodiversity & Conservation*, 14(7): 1735–1760.
- Yang N, Xie W, Jones CM, Bass C, Jiao X, Yang X, Liu B, Li R, Zhang Y, 2013. Transcriptome profiling of the whitefly *Bemisia tabaci* reveals stage-specific gene expression signatures for thiamethoxam resistance. *Insect Molecular Biology*, 22(5): 485–496.
- Ye XD, Su YL, Zhao QY, Xia WQ, Liu SS, Wang XW, 2014. Transcriptomic analyses reveal the adaptive features and biological differences of guts from two invasive whitefly species. *BMC Genomics*, 15(1): 370.
- Yu YT, Wei HY, Fadamiro HY, Chen L, 2014. Quantitative analysis of alkaloidal constituents in imported fire ants by gas chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(25): 5907–5915.
- Yu H, Wang HL, Wang ZF, 2010. A review of domestic and foreign researches on the correlation between the alien species invasion

- and socio-economic development. *Hubei Agricultural Sciences*, 49(8): 1999–2002. [俞红, 王红玲, 王兆锋, 2010. 外来物种入侵与社会经济发展相关性研究综述. 湖北农业科学, 49(8): 1999–2002.]
- Yuan SY, Yan PF, Kong Q, Deng YL, Zhang HR, Liu ZX, He HF, 2016. Study on virulence of *Verticillium lecanii* against *Phenacoccus solenopsis* Tinsley. *Journal of Environmental Entomology*, 38(4): 748–754. [袁盛勇, 闫鹏飞, 孔琼, 邓裕亮, 张洪瑞, 刘正喜, 何红飞, 2016. 蜡蚧轮枝菌对扶桑绵粉蚧的致病性研究. 环境昆虫学报, 38(4): 748–754.]
- Zhang GF, Liu WX, Guo JY, Lv ZC, Wang FH, Shen XJ, 2012. Species-specific PCR primers for identification of *Liriomyza sativae* Blanchard. *Journal of Biosafety*, 21(1): 74–78. [张桂芬, 刘万学, 郭建英, 吕志创, 万方浩, 申香菊, 2012. 美洲斑潜蝇 SS-PCR 检测技术研究. 生物安全学报, 21(1): 74–78.]
- Zhang GF, Wang FL, Lv ZC, Hang C, Li RJ, Guo JY, Li CR, Wan FH, 2015. Research progress on the biology, ecology and the application of sterile insect technique on *Bactrocera minax* (Enderlein). *Journal of Biosafety*, 24(2): 171–176. [张桂芬, 王福莲, 吕志创, 黄聪, 李咏军, 郭建英, 李传仁, 万方浩, 2015. 柑橘大实蝇生物、生态学及辐照不育技术最新研究进展. 生物安全学报, 24(2): 171–176.]
- Zhang J, 2012. The technical research of *Metarhizium anisopliae* isolates for biological control of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus*. Master dissertation. Haikou: Hainan University. [张晶, 2012. 感染红棕象甲的金龟子绿僵菌菌株筛选及致病力研究. 硕士学位论文. 海口: 海南大学.]
- Zhang T, Luan JB, Qi JF, Huang CJ, Li M, Zhou XP, Liu SS, 2012. Begomovirus–whitefly mutualism is achieved through repression of plant defences by a virus pathogenicity factor. *Molecular Ecology*, 21(5): 1294–1304.
- Zhang YH, Zhang Z, He J, Tu EX, Cheng DF, 2012. Cold hardiness of natural populations of the colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Plant Protection*, 38(5): 64–67, 77. [张云慧, 张智, 何江, 吐尔逊, 程登发, 2012. 马铃薯甲虫自然种群抗寒能力测定. 植物保护, 38(5): 64–67, 77.]
- Zhang YL, Fu WD, Zhang GL, Wang W, 2011. The occurrences dynamic of western flower thrips in Beijing municipality. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 42(2): 194–196. [张衍雷, 付卫东, 张国良, 王薇, 2011. 北京地区西花蓟马发生动态调查. 山东农业大学学报(自然科学版), 42(2): 194–196.]
- Zhang YX, Zhang GQ, Chen X, Lin JZ, Ji J, Sun L, 2012. Research on the application of *Typhlodromips swirskii* for the control of *Bemisia tabaci*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(3): 721–728. [张艳璇, 张公前, 陈霞, 林坚贞, 季洁, 孙莉, 2012. 斯氏小盲绥螨在大棚上防治烟粉虱的研究与应用. 应用昆虫学报, 49(3): 721–728.]
- Zhao J, Sun Y, Tan YA, Xiao LB, Bai LX, Lu XJ, Zheng SF, 2014. Genetic differentiation among different geographic populations of *Phenacoccus solenopsis* based on sequences of COI and 28S rDNA. *Cotton Science*, 26(2): 130–137. [赵静, 孙洋, 谭永安, 肖留斌, 柏立新, 路曦结, 郑曙峰, 2014. 基于 COI 及 28S rDNA 序列分析的扶桑绵粉蚧地理种群的遗传分化研究. 棉花学报, 26(2): 130–137.]
- Zhou AM, Lu YY, Zeng L, Xu YJ, Liang GW, 2012a. Does mutualism drive the invasion of two alien species? The case of *Solenopsis invicta* and *Phenacoccus solenopsis*. *PLoS ONE*, 7(7): e41856.
- Zhou AM, Lu YY, Zeng L, Xu YJ, Liang GW, 2013. *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), defend *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) against its natural enemies. *Environmental Entomology*, 42(2): 247–252.
- Zhou AM, Zeng L, Lu YY, Xu YJ, Liang GW, 2012b. Fire ants protect mealybugs against their natural enemies by utilizing the leaf shelters constructed by the leaf roller *Sylepta derogata*. *PLoS ONE*, 7(11): e49982.
- Zhou AM, Wu D, Liang GW, Lu YY, Xu YJ, 2015. Effects of tending by *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) on the sugar composition and concentration in the honeydew of an invasive mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae). *Ethology*, 121(5): 492–500.
- Zhou FY, Lou QZ, Wang B, Xu LT, Cheng CH, Lu M, Sun JH, 2016. Altered carbohydrates allocation by associated bacteria-fungi interactions in a bark beetle-microbe symbiosis. *Scientific Reports*, 6: 20135.