



我国农业害虫综合防治研究进展*

陆宴辉^{1**} 赵紫华² 蔡晓明³ 崔丽¹ 张浩男⁴
肖海军⁵ 李振宇⁶ 张礼生¹ 曾娟⁷

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;
2. 中国农业大学植物保护学院, 北京 100193; 3. 中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008;
4. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095; 5. 江西农业大学昆虫研究所, 南昌 330045;
6. 广东省农业科学院植物保护研究所, 广州 510640; 7. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘 要 农业害虫综合防治是昆虫学的一门应用科学, 旨在明确农作物害虫的发生危害与暴发成灾规律, 提出害虫监测预警和可持续治理的理论与方法。在 2012—2016 年的 5 年间, 我国提出了基于生态系统服务和多尺度空间管理的害虫生态调控新理论, 发展了害虫行为调控技术和化学防治新技术, 并在棉铃虫对 Bt 棉花抗性治理对策、稻飞虱的监测预警和综合防控技术、小菜蛾抗药性诊断及治理技术、青藏高原农牧害虫发生规律和分区治理等防治实践中取得了重要进展。根据国际上害虫综合防治学科发展趋势和我国的研究现状, 将来还需要在害虫灾变机制研究、害虫绿色防控技术创新研发以及集成应用等方面进行深入探索, 为我国农业害虫可持续治理以及化学农药减量使用提供有力的科技支撑。

关键词 早期预警, 生态调控, 行为调控, 化学防治, 抗性治理, 集成应用

Progresses on integrated pest management (IPM) of agricultural insect pests in China

LU Yan-Hui^{1**} ZHAO Zi-Hua² CAI Xiao-Ming³ CUI Li¹ ZHANG Hao-Nan⁴
XIAO Hai-Jun⁵ LI Zhen-Yu⁶ ZHANG Li-Sheng¹ ZENG Juan⁷

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
3. Institute of Tea Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China; 4. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 5. Institute of Entomology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 6. Institute of Plant Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;
7. National Agro-Tech Extension and Service Centre, Beijing 100125, China)

Abstract Integrated pest management (IPM) is an applied discipline in Entomology, which aims to illuminate the population dynamics and outbreak mechanism of agricultural insect pests and then propose the theory of early warning and sustainable management. During the past 5 years from 2012–2016, the ecologically based pest management (EBPM) based on ecosystem services and multiple-scale spaces was raised to enhance pest control in theory. Additionally, a series of new technologies including behavioral regulation and chemical control were developed. In practice, a large number of research progresses have been made, which included the resistance management of cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*) to Bt cotton, early warning and integrated management of rice planthoppers, the resistance diagnosis and management of diamondback moth (*Plutella xylostella*), and outbreak regulation and division management of agricultural and pasture insect pests in Qinghai-Tibet Plateau. According to the research progresses in China and worldwide, the outbreak mechanisms, green management technologies, and

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金 (31621064)

**通讯作者 Corresponding author, E-mail: yhlu@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2017-03-19, 接受日期 Accepted: 2017-04-20

integrated applications of multiple tactics should be emphasized in future, which will be available for sustainable management of agricultural insect pests and reduced use of chemical insecticides in China.

Key words early warning, ecologically based pest management, behavior regulation, chemical control; resistance management, integrated application

害虫综合防治是昆虫学的一门应用科学,以农业害虫为主要研究对象,旨在明确害虫的发生危害与暴发成灾规律,提出害虫监测预警和可持续治理的理论与方法。我国常见农业害虫多达 860 余种,其中重大害虫 20 多种(郭予元, 2015)。由于受全球气候变化、产业结构和农作物布局调整、耕作制度变革以及外来生物入侵等因素的影响,我国农业害虫的重发种类、为害规律等发生了明显变化,水稻“两迁”害虫、草地螟 *Loxostege sticticalis* 等迁飞种类此起彼伏,粘虫 *Mythimna separata* 等曾被控制的种类死灰复燃,小麦吸浆虫等区域性种类突发成灾,盲蝽等次要种类加重发生,蚜虫、小菜蛾 *Plutella xylostella* 等抗药性种类日益严重,烟粉虱 *Bemisia tabaci*、西花蓟马 *Frankliniella occidentalis*、三叶斑潜蝇 *Liriomyza trifolii* 等入侵种类严重暴发,呈现出发生面积扩大、为害频率增加、灾害程度加重的严峻形势(吴孔明, 2016)。据农业部统计:1995—2001 年我国农作物害虫平均年发生面积 1.85 亿 hm^2 , 2002—2011 年平均发生面积上升到 2.36 亿 hm^2 , 2012 年以后超过 2.5 亿 hm^2 。

随着农业“转方式、调结构”以及“到 2020 年农药使用量零增长行动”战略的实施,我国对农业害虫综合防治重要性的认识提高到了一个新的高度,这不仅关系到国家粮食安全,而且直接影响农产品质量和农村生态环境安全。近 5 年来,在国家重点基础研究发展计划、国家科技支撑计划、公益性行业(农业)科研专项等科研项目的大力支持下,我国在农业害虫综合防治领域开展了大量的科学与技术研究工作,在害虫生态调控新理论,害虫行为调控、化学防治新技术,棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 对 Bt 棉花抗性治理、水稻飞虱治理、小菜蛾治理、西藏农牧害虫治理等新实践上取得系列重大成果。这些研究成果丰富了我国害虫综合防治学科理论与害虫

防控核心技术,为农业害虫绿色防控提供了必要的理论依据与科技支撑。本文就 2012—2016 年度我国农业害虫综合防治的代表性研究进展做一概述,同时分析我国与国际水平的差距并提出相应的发展对策。

1 代表性研究进展

1.1 害虫防治新理念

随着空间生态学和可持续治理理论的发展,害虫种群控制研究逐步趋向田间农事操作与景观格局设计的多尺度空间管理。多尺度空间的害虫生态调控是以生态学理论为基础,尤其需要在多尺度空间范围内进行多种作物与非作物生境(包括功能植物)的设计与布局,结合天敌庇护所,通过改变昆虫食物网组成结构调节害虫种群,达到减小环境污染、增强农业生态系统的控害保益功能、最终实现害虫种群控制的可持续性。

1.1.1 基于景观格局的害虫生态调控 景观空间尺度特征主要指景观或区域范围内的生境斑块格局与功能动态,主要包括大区域静态结构和动态功能的结合(张鑫等, 2015; 欧阳芳等, 2016)。农业景观格局主要表现在各种生境斑块和资源的空间配置结构,随着地理统计学技术的发展,农业景观的空间结构和布局能够得到精确地解析和计算。并且,大尺度的农业景观格局能够直接影响害虫及其天敌的分布和扩散,甚至能够阻隔害虫迁移,对种群动态造成重要的影响。利用农业景观格局的空间配置和布局能为天敌提供避难所或转移寄主,并消除害虫的越冬场所和转移寄主,阻断害虫的大规模扩散与蔓延,能够有效提高害虫的生物防治效果(欧阳芳等, 2016)。

农业景观中斑块的空间配置和排列格局是影响昆虫分布的关键,包括作物生境和非作物生

境的组成与布局,目标作物与非目标作物的空间布局等。空间异质性是农业景观(区域)空间斑块配置的核心问题,人类活动导致的农业土地覆盖类型迅速转变,形成了农业景观格局的演替(Zhao *et al.*, 2016)。这种空间的生境复杂性与害虫种群密切相关,欧阳芳等(2016)提出了农业景观的“质、量、形、度”,这些参数能够准确描述农业景观格局,优化这些参数能够有效的改进农业景观的格局,达到害虫种群调控的目的。

戈峰等(2014)提出了基于服务功能的昆虫生态调控理论,将昆虫的生态系统服务功能与害虫生态调控相结合,认为昆虫管理应从单一农田生态系统扩展到农田景观生态系统,设计和组装出以昆虫生态服务为中心、维持多功能的农田景观昆虫生态调控技术体系。此外,以天敌培育和田间释放为关键技术的生物防治理论也得到了迅速的发展,在天敌昆虫资源的发掘、应用、技术研发和配套措施等方面取得了显著进展(雷仲仁等, 2016)。这些以恢复生态系统功能和提升生态系统服务为目标的技术理论,都是通过建立田间完善的昆虫功能群,充分发挥不同昆虫群的作用,共同提升生态系统功能。

赵紫华(2016)提出了多空间尺度下的害虫生态调控理论,认为害虫生态调控需要在多空间尺度下进行。多尺度的景观空间特征强调的是景观大尺度和田块碎块尺度相结合的生境组成与排列空间的复杂性与异质性,即在大尺度空间内形成了一种“马赛克”镶嵌体景观,在“马赛克”体内,适时适地实施有效农事操作,造成生境界面上物种的流动与扩散,阻断害虫生活史,联动天敌库天敌的“溢出”与扩散,进而影响害虫及其天敌生长、交配和繁殖,达到对害虫与其天敌复合体的结构与功能的优化,实现害虫种群生态调控(Zhao *et al.*, 2016)。

1.1.2 害虫天敌的植物支持系统 大量研究指出,多作物混合种植区害虫种群密度较低的重要原因是较高的植物多样性。单一作物大面积种植使得天敌昆虫的食物(花粉和花蜜)、替代寄主或猎物、越冬和繁育场所等资源严重不足,而植物多样性的增加可为天敌提供更适合的微观环

境、更多的食物和替代寄主或猎物等资源,从而提高了天敌的控害能力(周海波等, 2012; 陈学新等, 2014)。但是,提高天敌作用所需要的植物多样性的关键组分需要认真筛选,以提供正确的多样性和正确功能的植物,仅仅靠提高多样性本身并不能提高天敌的效能,甚至会带来更严重的害虫增长和暴发(肖英方等, 2013)。由此陈学新等(2014)提出了害虫天敌的植物支持系统理论,总结了蜜源植物、储蓄植物、栖境植物、诱集植物、指示植物、护卫植物等在支持天敌生存和繁殖方面的生物功能,提出了科学利用这些植物以维持和增强农业生态系统中天敌控害作用的植物支持系统。针对特定的农业生态系统及其主要害虫,通过筛选相应的功能植物,进行科学合理的搭配和时空布局,构建相应的天敌植物支持系统,使得在这个支持系统中不同的植物或作物能有效地维持和促进天敌控害功能,使昆虫天敌长期有效地控制害虫(肖英方等, 2013; 陈学新等, 2014)。

1.2 害虫防治新技术

1.2.1 行为调控技术 近年来,基于植食性昆虫寄主选择机制和昆虫间化学通讯机制的行为调控策略,已运用到害虫治理的实践中。香根草 *Vetiveria zizanioides* 诱杀水稻螟虫、夜蛾科害虫食诱剂、梨小食心虫 *Grapholitha molesta* 性信息素迷向技术等无害化防治产品、技术的快速发展,改变了传统害虫防治方式。

(1) **诱集植物、驱避植物。**香根草,多年生禾本科草本植物,是一种少有的致死型诱集植物。香根草释放的樟脑、杜烯、油酸、柠檬醛等挥发性物质对二化螟 *Chilo suppressalis* 雌蛾具行为引诱活性,可以强烈吸引螟蛾产卵。大螟 *Sesamia inferens*、二化螟在香根草上的产卵量是水稻上的 4.5 倍。同时在香根草上,二化螟幼虫不能在完成生活史,大螟幼虫的存活率仅为 6.67%。稻田种植香根草的最佳时期为 3 月底至 4 月初,种植面积以占稻田面积的 6%~10%为宜。香根草可种植于稻田的田埂上、排灌沟两岸,晚稻及次年不需重新种植。种植香根草可显著降低

稻田螟虫种群, 水稻枯心率降低 56.81%, 稻田农药用量减少近 50% (Heong *et al.*, 2015)。目前, 该技术已在浙江、江苏、江西等稻米产区大面积示范应用。

某些气味强烈的非寄主植物挥发物, 如芳香植物、葱科植物, 对植食性昆虫具驱避作用。茶行中间种具驱避作用的迷迭香、罗勒、熏衣草, 可显著减少茶树上茶小绿叶蝉 *Empoasca pirusuga*、茶尺蠖 *Ectropis oblique* 种群数量 (Zhang and Chen, 2015)。1 行甘蓝+1 行大蒜间作, 甘蓝上菜青虫 *Pieris rapae* 和菜蚜 *Lipaphis erysimi* 的种群数量分别下降 49% 和 36%, 节肢动物群落多样性和益害比分别上升 18% 和 62% (缪勇等, 2013)。

(2) 植物源引诱剂、驱避剂。近年来, 就棉铃虫、绿盲蝽 *Apolygus lucorum*、茶小绿叶蝉、松墨天牛 *Monochamus alternatus*、暗黑鳃金龟 *Holotrichia parallela* 等害虫的植物源引诱剂开展了广泛的研究, 并获得了一批具有自主知识产权的引诱剂产品。棉铃虫食诱剂含有从几十种寄主植物挥发物中提取出的苯乙醛、水杨酸丁酯、柠檬烯、甲氧基苄醇等具强吸引力的挥发性物质。将这些物质搭载在高分子缓释载体上, 并配以具取食刺激作用的蔗糖和少量农药。挥发性物质将棉铃虫成虫吸引至味源, 在蔗糖的刺激下棉铃虫摄入农药, 从而达到诱杀的目的 (陆宴辉, 2016)。在棉铃虫产卵前, 棉铃虫食诱剂按 100 mL/667m² 的剂量, 通过茎叶条带滴洒或悬挂方盒诱捕器方式施用。食诱剂对雌雄蛾具有同等的诱杀效力, 可使棉田棉铃虫成虫口数量减少 95%, 极大降低下一代棉铃虫的为害程度。除棉铃虫外, 该食诱剂对烟青虫 *Heliothis assulta*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、斜纹夜蛾 *Prodenia litura*、小地老虎 *Agrotis ypsilon*、粘虫等重要夜蛾科害虫均有较好的诱杀效果, 在烟草、大豆、花生、玉米等作物田均获得了较好的防治效果。其中, 棉铃虫食诱剂处理的花生田、玉米田, 夜蛾科害虫幼虫口减退率可达 70%, 其农药使用量仅为常规防治田的 5%~10%。盲蝽植物源引诱剂是基于艾蒿、野艾蒿、藿香、凤仙

花等 18 种植物挥发物中的丙烯酸丁酯、丙酸丁酯和丁酸丁酯等引诱活性物质研制而成, 施用方式与棉铃虫引诱剂类似, 可大量诱杀绿盲蝽、中黑盲蝽 *Adelphocoris suturalis* 等盲蝽类害虫的雌雄成虫 (Pan *et al.*, 2015)。叶蝉、蚜虫、粉虱等小型刺吸式口器害虫引诱剂常与粘虫色板配合使用。以反-2-己烯醛、顺-3-己烯醇、顺-3-己烯醋酸酯等茶树挥发物组配的引诱剂, 可使黄板对茶蚜 *Toxoptera aurantii*、黑刺粉虱 *Aleurocanthus spittiferus* 的诱捕能力提高 50% (Han *et al.*, 2012)。

(3) 性信息素迷向防治技术。性信息素迷向技术已在我国果园大面积应用于梨小食心虫、苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 等害虫的防治。其防治效果与性信息素迷向丝的释放量、持效期、放置密度与使用时期等密切相关。在甘肃、宁夏、黑龙江等省, 苹果蠹蛾越冬代成虫活动前, 悬挂含 0.16 g 性信息素的迷向丝 660~1,320 根/hm², 蛀果防效为 91%~100%, 基本上可以控制整个生长期苹果蠹蛾对果实的为害。梨小食心虫越冬代成虫活动前, 悬挂含 0.27 g 性信息素的迷向丝 900 根/hm², 梨园内梨小食心虫的迷向率逐年提高, 连续 3 年的蛀果防效均在 90% 左右。目前, 我国已有超过 12 个省的果园采用性信息素迷向法防治梨小食心虫, 其防治成本仅是传统化学防治的一半, 减少果园化学农药用量 50% 以上。此外, 梨小食心虫、桃小食心虫 *Carposina niponensis* 复合式性信息素迷向剂的研制, 将进一步减少害虫防治成本和提升防治效率 (Cui and Zhu, 2016)。

(4) 推-拉策略。利用蚜虫报警激素反-β-法尼烯驱避蚜虫、吸引天敌的特性, 发展的小麦、蔬菜蚜虫“推-拉”防控技术已在河南、河北等地应用。小麦、大白菜、马铃薯田, 每 667 m² 放置含 100 μL 反-β-法尼烯的缓释器 25 个, 对麦长管蚜 *Sitobion avenae*、麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum*、菜蚜、马铃薯长管蚜 *Macrosiphum euphorbiae* 的有翅蚜表现出明显的驱避作用, 驱避率可达 60%; 对瓢虫、蚜茧蜂、草蛉、食蚜蝇等蚜虫天敌表现出明显的吸引作

用, 引诱率可达 50% (Cui *et al.*, 2012; 范佳等, 2014)。

1.2.2 化学防治技术 目前, 化学防治仍是防治害虫最有效的方法。近年来, 生物靶标导向的农药高效减量使用关键技术的应用, 以及静电喷雾、地面自走式喷雾、航空喷雾等高效农药使用技术的快速发展, 大大提高了害虫化学防治的效率。

(1) 抗药性治理技术。明确害虫对药剂敏感度的变异以及抗药性的发展, 是促进农药科学合理使用、高效减量使用的前提。全国来看, 从北向南、从西向东, 害虫抗药性呈现增加趋势。据初步统计, 在我国超过 37 种害虫 (螨) 对农药产生了抗性 (张帅, 2015)。其中, 褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 种群对吡虫啉、噻嗪酮已产生高水平抗性, 抗性倍数都在 100 倍以上。二化螟种群对杀虫剂抗性分布具有明显的地区性, 其中浙江、安徽、江西、湖北大部分地区供试种群对三唑磷、毒死蜱等有机磷类杀虫剂已普遍产生中等至高水平抗性。棉铃虫种群对功夫菊酯已产生中等水平以上抗性。棉蚜 *Aphis gossypii* 种群对吡虫啉、啉虫脒、高效氯氟菊酯、丁硫克百威均处于高水平抗性, 有些地区抗性倍数达到了数千倍以上 (张帅, 2016)。

通过系统研究害虫对农药的抗药性, 发现害虫对杀虫剂产生抗性的机制主要包括三个方面: 表皮穿透率降低、代谢作用增强和靶标敏感性下降。代谢作用增强主要涉及 3 大类解毒酶: 多功能氧化酶 (细胞色素 P450)、酯酶和谷胱甘肽 S-转移酶。3 类解毒酶比活力的升高以及基因的过量表达是害虫对杀虫剂产生抗性的一个关键机制。害虫抗性产生的另一个重要机制是杀虫剂作用靶标敏感性下降, 通常是由靶标基因突变引起的。如, 烟碱型乙酰胆碱受体 $\beta 1$ 亚基 R81T 突变被认为是蚜虫对吡虫啉产生抗性的一个重要机制 (Zhang *et al.*, 2015)。鱼尼丁受体 E1338D、Q4594L、I4790M 和 G4946E 4 个氨基酸突变通过不同的组合共同导致小菜蛾对氯虫苯甲酰胺的抗性 (Guo *et al.*, 2014)。

针对害虫的抗药性, 主要采取 “以综合防治

为基础, 以抗性动态监测为指导, 以科学合理用药为重点” 的治理原则。在高抗地区建立抗药性综合治理示范区, 组装、集成以科学轮换用药为主、综合防治技术为辅的抗药性综合治理技术模式, 并将成功的经验加以推广。由中国农业大学牵头完成的成果 “生物靶标导向的农药高效减量使用关键技术与应用” 荣获了 2015 年度国家科技进步二等奖。该成果以生物靶标敏感度变异为导向, 集成了 “对症下药”、剂量调控、克抗性治理等关键技术, 创新性的构建了生物靶标导向的农药减量使用技术体系, 并大面积示范推广。通过本成果的实施, 田间农药使用量明显减少, 例如在华北地区针对麦蚜防治农药投入量减少 30%~60%。该成果在湖南、河北、山东、河南等 9 省市大面积示范推广, 取得了显著的经济、社会和生态效益。

(2) 杀虫剂高效使用技术。从我国农药品种、施药器械和施药技术 3 个角度来看, 目前我国植保物质装备已经具备了现代化的雏形。自走式喷杆喷雾技术得到广泛的应用, 无人直升飞机、无人多旋翼飞机、动力三角翼、动力伞等低空施药技术也得到了快速发展, 初步形成了我国现代化农药应用技术体系 (袁会珠和李卫国, 2013)。

喷杆喷雾机与传统手动喷雾器相比, 具有移动方便、喷幅宽、喷洒均匀、效率高、省时省力、在作物表面更易沉积分布的特点, 是一种理想的大田作物植保机械。在棉花生长中后期采用自走式旱田作物喷杆喷雾机喷雾, 雾滴可以穿透棉花冠层沉积分布到棉花中层和下层, 在棉田沉积量的变异系数小、沉积分布均匀, 126 s 即可喷雾处理完 667 m² 棉田, 作业效率大幅提高。2012 年, 在应对玉米粘虫暴发的应急防治中, 国内开发的大型自走式喷雾机、高地隙喷杆喷雾机发挥了重要作用。3WX-280G 型自走式高杆作物喷杆喷雾机采用吊杆喷雾, 雾滴能够在玉米雌穗部位很好的沉积分布, 对玉米蚜虫及玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 具有很好的防治效果, 解决了玉米植株高大、难以进行常规喷雾防治的难题 (Yang *et al.*, 2014)。

2012 年以来,无人机等航空植保机械得到了快速发展(袁会珠等,2013)。以 WQF80-10 农用植保无人机为例,该机型每天可喷洒农药 26.67~46.67 hm²,每 667 m² 能节约 30%~50% 的农药使用量,节约 90% 的用水量,可以直接降低农药购买成本、降低农药残留。采用无人直升机喷洒 1.5% 吡虫啉超低容量剂 200 mL/667 m² (对水 300 mL),1 min 左右即可喷雾处理完,对小麦蚜虫的防效高达 86.7%。应用旋翼机喷洒 20% 氯虫苯甲酰胺悬浮剂以及 10% 毒死蜱超低容量剂防治玉米螟,防效均达到 80% 以上。WSZ-2410 型无人机飞行高度为 1 m 时,在玉米冠层上、中、下部雾滴沉积密度分别为 (35.2 ± 4.4) (27.5 ± 3.1) (22.3 ± 2.5) 个/cm²,对玉米粘虫的防效可达到 88.4% (高圆圆,2013)。

1.3 害虫防治新实践

1.3.1 棉铃虫对 Bt 棉花抗性治理 我国自 1997 年开始推广种植表达苏云金芽孢杆菌 (*Bacillus thuringiensis*, Bt) Cry1Ac 蛋白的 Bt 棉花,2015 年全国 Bt 棉花种植面积达 370 万 hm²,占棉花总种植面积的 96%,在黄河流域多个省份 Bt 棉花的种植比例接近 100%。随着 Bt 棉花种植面积的不断增长,主要靶标害虫棉铃虫承受着空前的选择压力。针对棉花生产中的棉铃虫 Bt 抗性问题的,开展了系统研究。

(1) 抗性演化机制。受体突变导致其与毒素的结合能力下降,是引起棉铃虫 Bt 抗性产生的重要机制。棉铃虫中肠上皮细胞中特异表达的钙粘蛋白胞外区氨基酸缺失或翻译提前终止,导致钙粘蛋白截短并丧失 Cry1Ac 结合部位,从而产生高水平抗性。通过基因定位、遗传互补和功能表达,在国际上首次发现钙粘蛋白基因的胞质区突变也可导致棉铃虫对 Cry1Ac 产生高水平抗性 (Zhang *et al.*, 2012a)。利用建立的胞质区突变的分子检测方法对我国主要棉区棉铃虫种群进行了检测,结果发现钙粘蛋白胞质区突变具有多样性 (Zhang *et al.*, 2013)。该研究首次证实了棉铃虫钙粘蛋白的胞质区和胞外区共同参与 Cry1Ac 的毒杀作用,从而完善了现有的 Bt 毒素

作用机理的理论模型。

在一个对 Cry1Ac 产生 1 000 倍以上抗性的棉铃虫品系中发现 ABCC2 基因的 cDNA 上有一段 73 bp 的碱基插入,导致提前产生了终止密码子,引起 ABCC2 蛋白的翻译提前终止。遗传连锁实验证实该变异与 Cry1Ac 抗性紧密连锁。受体与毒素实时互作表明该突变导致 ABCC2 与 Cry1Ac 毒素的结合位点发生缺失从而引起棉铃虫对 Cry1Ac 产生高水平抗性 (Xiao *et al.*, 2014)。ABCC2 具有清除外源小分子物质的功能,利用昆虫细胞表达和 HPLC 分析表明,ABCC2 变异导致其不能完全清除外源物质——阿维菌素,从而导致该突变品系对阿维菌素更敏感 (Xiao *et al.*, 2016)。

Bt 原毒素需要在靶标害虫中肠内经蛋白酶消化为活化毒素,活化毒素与中肠上皮细胞上的受体互作并导致昆虫死亡,因此蛋白酶发生变异也会导致棉铃虫 Bt 抗性。Liu 等 (2014a) 首次发现棉铃虫一个胰蛋白酶顺式调控与 Bt 抗性相关。棉铃虫 Cry1Ac 抗性品系中肠内一个胰蛋白酶表达水平显著下调,序列分析发现该胰蛋白酶基因的启动子序列在抗性品系里发生了突变。利用荧光素酶报告基因系统比较了突变和野生型启动子的活性,结果表明突变型启动子不能正常启动胰蛋白酶基因的表达,导致胰蛋白酶基因在抗性品系里的表达水平显著低于敏感品系。遗传连锁分析表明该启动子序列突变与 Cry1Ac 抗性连锁。

(2) 抗性治理对策。棉铃虫 Bt 抗性的早期预警对于 Bt 棉的抗性治理具有重要意义。从 2002 年起,中国农业科学院植物保护研究所每年对山东夏津和河北安次的上千个棉铃虫家系进行抗性监测,发现夏津种群的相对平均发育级别 (RADR) 均值在 0.58~0.62 间波动,安次种群的 RADR 在 0.53~0.62 之间。与 2002 年监测结果相比,2009—2013 年棉铃虫田间种群对 Cry1Ac 的敏感性显著降低,但尚未出现高水平抗性 (An *et al.*, 2015)。

室内筛选的棉铃虫 Cry1Ac 抗性品系通过钙粘蛋白受体缺失突变产生高水平抗性,并且抗性

呈隐性遗传 (Xu *et al.*, 2005), 棉铃虫田间种群中是否也存在基于钙粘蛋白的抗性等位基因? 是否还有其他类型的非隐性抗性基因? 南京农业大学利用单对家系筛选结合 DNA 鉴定的检测技术研究发现, 我国华北棉区田间棉铃虫对 Cry1Ac 的抗性基因频率是新疆棉区田间棉铃虫对 Cry1Ac 抗性基因频率的 3 倍。抗性基因等位性测验表明, 携带基于钙粘蛋白突变的隐性抗性基因个体的比例为 84%, 表明钙粘蛋白相关的抗性基因在我国棉铃虫对 Bt 棉花的抗性演化中起重要作用。利用 Bt 抗性基因显隐性鉴定技术对抗性基因的遗传特性进行了鉴定, 在所检测到的华北棉区棉铃虫抗性个体中, 携带一个非隐性抗性基因的比例高达 59%~94%, 而新疆棉区棉铃虫抗性个体均携带隐性抗性基因。因此非隐性基因在抗性演化过程中占主导地位 (Zhang *et al.*, 2012b)。上述研究首次揭示了棉铃虫田间种群对 Bt 棉花的抗性基因存在遗传多样性, 明确了非隐性抗性基因在棉铃虫 Bt 抗性演化中具有关键性作用。

为了延缓害虫对转基因 Bt 抗虫作物抗性的产生, 美国、澳大利亚等发达国家通常采用人工庇护所策略。在我国, 特有的小规模、多样化种植结构使得与棉花同时期种植的玉米、大豆、花生、芝麻等其它寄主作物为棉铃虫提供了天然庇护所。但是, 天然庇护所是否能延缓 Bt 抗性一直缺乏评价方法和直接证据。南京农业大学等单位通过对 6 省 17 县田间棉铃虫种群连续 4 年大规模 Bt 抗性监测, 发现我国华北棉区棉铃虫 Bt 抗性个体频率由 2010 年 0.93% 上升到 2013 年 5.5%。利用 Bt 抗性基因演化模型分析了抗性基因的数目、显性度、抗性个体的初始频率、适合度代价和自然庇护所的比例五个因子对抗性发展的影响, 结果发现自然庇护所是延缓抗性进化的最主要因素。模型模拟结果表明, 如果没有天然庇护所, 抗性个体频率在 2013 年将达到 98%; 我国目前有效庇护所面积占 56%, 在此条件下预测 2013 年抗性个体频率为 4.9%, 与实测值 5.5% 基本相符。该结果直接证实了天然庇护所能够有效延缓靶标害虫对 Bt 作物抗性的发展。利用田

间笼罩试验及模型模拟比较了人工庇护所和天然庇护所延缓抗性的效率, 结果发现天然庇护所延缓抗性的效率较低, 仅为人工庇护所 (常规棉花) 的 15%。通过对棉铃虫 Bt 抗性个体基因型的鉴定, 发现携带至少一个非隐性抗性基因的个体频率由 2010 年 37% 上升到 2013 年的 84%, 该结果表明在棉铃虫 Bt 抗性遗传方式多样化的背景下, 显性抗性发展速度显著快于隐性抗性 (Jin *et al.*, 2015)。从田间分离得到一个棉铃虫 Bt 抗性完全显性抗性品系, 研究了其抗性特征和在 Bt 棉花上的适合度, 结果显示该品系及其与敏感品系的杂交 F_1 代均能够在 Bt 棉上存活并完成整个世代, 表明显性抗性严重威胁着 Bt 棉花的长期有效性 (Jin *et al.*, 2013)。

鉴于棉铃虫田间种群 Bt 抗性基因的多样性及显性基因在 Bt 抗性演化中的关键作用, 应综合采用生物测定、家系筛选和 DNA 分子检测等多种监测技术, 同时应加快研究推广双价或多价 Bt 棉花, 并结合我国各棉区的实际情况, 挖掘利用天然庇护所, 延缓棉铃虫 Bt 抗性发展。

1.3.2 水稻飞虱治理 稻飞虱是我国粮食作物上的首要害虫, 刺吸为害水稻的同时, 其所传播的多种病毒病一直是稻田生态系统的重要病害, 并频繁暴发成灾, 严重威胁我国粮食安全 (刘万才等, 2016)。近年来, 围绕稻飞虱及其传播病害绿色防控, 取得了系列显著成果, 贵州大学等单位完成的“防治农作物病毒病及媒介昆虫新农药研制与应用”, 江苏省农业科学院植物保护研究所牵头完成的“长江中下游稻飞虱暴发机制及可持续防控技术”以及“水稻条纹叶枯病和黑条矮缩病灾变规律与绿色防控技术”分别获得 2014、2015 和 2016 年度国家科技进步二等奖。

(1) 监测预警技术。 稻飞虱种群监测预警是实施准确防控的前提, 近年研究围绕稻飞虱后期突发、区域性暴发关键机制, 研究创新监测防控技术, 更新预警分析和数据模块, 将稻飞虱暴发预测的准确率提高到 92% 以上。在广西兴安利用毫米波雷达和高空探照灯监测表明, 稻飞虱夏季从广西西北部雷达监测点附近迁移, 由盛行的西

南风携带向东北方向移动并到达湖南省北部,秋季随着普遍的东北风,迁回到 21°N 以南的越冬区域 (Qi *et al.*, 2014)。围绕稻飞虱种群监测预警研究,明确了越南中南稻区的虫源 3 月份能否直达华南及前期迁入虫量的大小,可作为我国稻飞虱大发生的预警指标之一 (Hu *et al.*, 2014)。同时,每年 5 月西南风指数可以直接影响到褐飞虱境外虫源的迁入格局,并影响到 7 月风场、雨带位置,从而影响到早稻上褐飞虱种群能否实现成功转移。因此,5 月西南风指数可以显著影响褐飞虱种群发生程度 (Hu *et al.*, 2013; 王翠花和翟保平, 2013)。另外,南海季风暴发的早晚与梅雨的起止有较好的负相关关系,南海季风暴发早晚亦作为褐飞虱大发生的前期预警指标 (Hu *et al.*, 2013, 2014)。

(2) 综合防控技术。近年研究围绕灰飞虱 *Laodelphax striatellus* 传播病毒病害暴发,褐飞虱后期突发、区域性暴发关键机制,创新集成了稻飞虱虫情和抗药性的准确监测防控技术,更新预警分析和数据模块,稻飞虱低抗性和天敌安全性药剂精准化施用,开发田间天敌保护增强利用和稻飞虱种群生态调控技术,结合高产品种、多病虫集中防治,综合集成了稻飞虱可持续绿色防控技术规程。

我国长江中下游地区一直是稻飞虱及其传播病毒病害的重灾区。近年研究围绕高产单季粳稻区不断扩大,单季粳稻与杂交籼稻的稻飞虱实施一体化虫源治理,建立了“前防后治、中期放宽、防早防巧、治多治小”的可持续防控新对策和技术体系。针对单季粳稻区由灰飞虱介导传播的重要病毒病害防控,重点针对前期灰飞虱,按照防控关口前移、秧田阻断为主的防控思路,提出“源控为首、栽培先行、品种并重、治虫应急”防控策略,结合麦田“一喷三防”压低介体基数实现源头控制。大力推广水稻“机插秧+防虫网”为核心、“麦田控源、秧田网隔”为主的绿色防控技术。麦田兼治灰飞虱、秧田覆盖防虫网等防控技术的实施。通过防治措施连年大面积应用,使灰飞虱的带毒率呈逐年下降趋势。单季粳稻区后期第 4、5 代褐飞虱,采用“前防后治(推迟

用药)、中期放宽(减少用药)、防早防巧(低抗性选择性药剂/增强天敌等)、治多治小(集中防治/精准化/多药剂轮用/增效药剂)”的对策措施。杂交籼稻区则针对中后期第 3、4 代褐飞虱,采用治前控后策略,减少迁出成虫。绿色防控策略每年减少水稻用药 3~5 次,减少用药量 30%以上,显著提升天敌作用(天敌保护率提高 68%以上),病虫害综合防效达 92%~96%。

以调节稻田生境植被生物多样性、保护利用天敌、恢复稻田生态系统的控害功能为基础的生态工程控制水稻害虫技术,是一项利用害虫和天敌之间关系设计的害虫控制措施,在生态景观层面进行人为设计(祝增荣, 2012; Lu *et al.*, 2014)。在浙江金华、三门县、宁波、台州等地通过蜜源植物(最好是芝麻)为主的天敌栖息地环境设置,结合稻田中的诱杀植物等配套方法,减少农药使用和氮肥的施用量,并系统调节稻田非作物生境的多样性,增加了生态系统的生物多样性和害虫生物防治功能,可以减少田间 26%~48%的稻飞虱种群数量,减少 70%的农药施用量 (Lu *et al.*, 2015; Gurr *et al.*, 2016)。另外,水稻周边种植大花六道木,寄生蜂尤其是缨小蜂数量显著上升,可提高稻飞虱卵被寄生的比率。不同功能植物对黑肩绿盲蝽 *Cyrtorrhinus lividipennis* 等稻飞虱天敌有明显促进作用,利用万寿菊、芝麻、一占红和长柄菊都能显著延长黑肩绿盲蝽雌成虫的寿命;长柄菊、一点红、万寿菊和芝麻在有盛开花朵的条件下,都能显著提高黑肩绿盲蝽雌成虫对褐飞虱若虫的捕食量 (Zhu *et al.*, 2014)。

1.3.3 小菜蛾治理 我国是小菜蛾为害最严重的国家之一,其发生、防治面积和为害损失均呈逐年上升趋势 (Li *et al.*, 2016),我国每年小菜蛾为害造成损失的蔬菜近 70 万吨。

(1) 种群越冬迁飞规律。小菜蛾种群越冬迁飞是阐明灾变机制的关键。研究表明小菜蛾在东北地区全部及华北大部分地区不能越冬或零星越冬,越冬北限为北京以北地区,在华中、华南等地可安全越冬。由于气候条件、耕作制度和栽培品种之间的差异,小菜蛾在不同区域形成了具有明显区域特点的种群,但不同地理种群小菜蛾

之间遗传分化不明显 (Wei *et al.*, 2013)。北城隍岛小菜蛾迁飞种群研究表明 (Fu *et al.*, 2014), 每年 7 月前后为迁飞高峰, 迁飞模式有迁入迁出模式和迁入定殖模式两种; 推测的迁飞路径有从华南、华东沿海岸线至山东、东北和华中经华北至东北两条, 南方地区小菜蛾存在近距离迁移现象 (李振宇等, 2016)。

(2) 抗药性诊断技术。小菜蛾对各类药剂等均产生不同程度抗药性。广东省农业科学院等单位研究表明小菜蛾对不同药剂在全国的抗药性水平有很大差异, 在华南、西南和华东等南方省份抗药性水平普遍显著高于北方省份, 以广东省和海南省抗药性水平最高, 云南、浙江和福建次之, 在湖北、湖南和北京、天津等省 (地区) 呈上升趋势。从药剂来看, 阿维菌素和高效氯氰菊酯在全国抗药性普遍达到高抗水平; Bt 制剂抗药性区域性分布明显, 高抗种群主要集中在湖北和湖南 (200 倍以上), 而新型药剂氯虫苯甲酰胺在广东、海南、云南和浙江均产生高水平抗性 (李振宇等, 2016)。

研究早期抗药性快速检测技术是抗药性治理的基础。全国农业技术推广服务中心等单位研究制定了氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、Bt、高效氯氰菊酯、多杀菌素、溴虫腈、啉虫隆、丁醚脲、茚虫威 9 种常用药剂对小菜蛾的抗药性诊断剂量实现了小菜蛾田间种群抗药性的早期快速诊断 (邵振润等, 2013)。通过揭示小菜蛾对氯虫苯甲酰胺 (郭磊, 2014) 和阿维菌素 (Liu *et al.*, 2014b) 等代表性药剂的抗药性机理, 并利用分子检测技术构建了氯虫苯甲酰胺、多杀菌素、Bt 和阿维菌素等药剂抗药性快速检测试剂盒 (李振宇等, 2016)。

(3) 抗药性综合治理技术。在研究小菜蛾抗性治理新技术的基础上, 根据我国小菜蛾主要发生区的种植结构、气候条件、用药习惯等具体情况, 将害虫防治、作物布局与生产模式、生物防治、行为调控和药剂防治等有机融合并优化, 形成了针对不同种植区域特点的无害化综合防控技术, 并推广应用小菜蛾抗药性“区域治理”理念模式和技术体系, 特别是促成了规模化菜场生

产模式的根本性转变 (李振宇等, 2016)。

针对西南蔬菜种植区、华中油菜种植区, 采用以生物防治为主的区域治理技术: 通过释放半闭弯尾姬蜂等寄生蜂, 建立稳定的田间种群, 发挥天敌控害作用; 施用 Bt 工程菌制剂、植物源农药印楝素等生物农药; 高效诱捕技术与化学农药相协调的小菜蛾治理技术。

针对广东大型供港蔬菜基地, 采用以生态调控为主的区域治理技术: 以“改变耕作制度”为主, 利用小菜蛾发生的时空差异, 适时进行“南北休耕轮作”, 显著减少抗性虫源, 降低抗性选择压力。目前广东境内 $500\text{ m}^2 \times 667\text{ m}^2$ 以上的供港菜场, 超过 90% 的菜场应用该技术方案, 应用广泛。

针对高端蔬菜生产区域, 采用以物理防治为主的区域治理防控技术: 推广小菜蛾成虫电击捕杀新技术、黑光灯诱杀小菜蛾成虫、性信息素及诱捕器田间使用技术、小菜蛾成虫驱避剂等应用技术。此套技术适用于绿色食品、有机食品、出口欧盟蔬菜等高端蔬菜生产区域使用, 蔬菜可达到绿色食品质量标准。

针对散户种植、北方地区包菜田、油菜田等种植水平相对较低区域, 采用以合理用药技术为核心的防控技术: 优化集成基于种群抗药性系统监测的区域性抗药性治理技术, 根据小菜蛾对药剂抗药性有季节性差异和区域性差异的特点, 因地制宜制定出科学、合理的区域性用药技术, 实施周年轮换用药方案, 简单实用、可操作性强, 已在华南区推广应用。

1.3.4 西藏农牧害虫治理 青藏高原地域辽阔, 占我国国土面积的四分之一, 平均海拔 4 200 m, 是长江、黄河、澜沧江等江河的发源地。该区域生态环境脆弱, 属以青稞和牧草为主的农业生产区域。西藏农牧科学院、中国农业科学院植物保护研究所等单位, 以青稞和牧草害虫为研究对象, 系统研究了害虫及其天敌的区系与分布, 揭示了害虫成灾与天敌利用的生态学机理, 集成创建了绿色防控技术体系, 并开展大规模应用, 取得了显著成效。2014 年, 共同完成的“青藏高原青稞和牧草害虫绿色防控技术研发及应用”

获得国家科技进步二等奖。

(1) 害虫发生灾变规律。从系统、群落、种群三个层次分析了青藏高原农牧害虫及其天敌的空间分布格局,划分了昆虫水平分布的三大区域和垂直分布的三大地带。水平分布三大区域分别是生态脆弱农业区,主要害虫种类有西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis*、白边迦蝗 *Bryodemaluctuosum*、草原毛虫 *Gynaephora alpherakii*、喜马象甲 *Leptomias* sp.等,天敌昆虫主要有芫菁、寄蝇、蜘蛛等;生态半脆弱农业区,主要害虫有麦无网长管蚜、定日腊粉蚧 *Kiritshenkella dingeriensis*、郁金香瘿螨 *Eriophyes tulipae*、青海穗螨 *Siteroptes chinghaiensis*,天敌昆虫主要有瓢虫、寄蝇、食蚜蝇、蜘蛛等;生态稳定农业区,主要害虫有云斑鳃金龟 *Polyphylla laticollis*、小褐丽金龟 *Phyllopertha horticola*、麦无网长管蚜等,天敌昆虫有步甲、瓢虫、食蚜蝇、蜘蛛等。垂直分布三大地带,即脆弱带,指海拔 4 200 m 以上的区域,主要为半荒漠化草地害虫发生区;半脆弱带,指海拔 3 200~4 200 m 的区域,主要为青稞和小麦害虫发生区;稳定带,指海拔 3 200 m 以下的区域,为多种农作物混作区,害虫种类因作物而异(王保海,2006,2010;黄复生等,2008)。

除青稞蚜虫外,其它青稞害虫多为一年发生一代,有 50%以上的害虫生活在土壤中,易受耕作制度的影响。为害基本规律是:地栖性,一化性占多数;干旱年份发生重,正常年份发生轻;早播发生重,晚播发生轻;连作发生重,轮作发生轻;冬播作物发生重,春播作物发生轻;暖冬发生重,寒冬发生轻;单播发生重,套播发生轻(覃荣,2009)。

青藏高原牧草害虫,主要是西藏飞蝗与草原毛虫等,受低温的制约,均为一年发生一代,幼虫期(或终生)危害牧草。西藏飞蝗与草原毛虫的生境截然不同,前者最适生境和主要成灾区是干旱半干旱温性草原,植被主要是芨芨草、针茅等禾本科牧草;后者最适生境和主要成害区是潮湿、凉爽的山地草甸和高寒草甸,植被主要是嵩草、苔草等莎草科牧草。为害基本规律是:旱涝

年份重,正常年份轻;河谷地带重,平缓地带轻;禾本科草地重,豆科草地轻;原始草地重,开垦草地轻(覃荣,2009)。

研究发现了多数农牧害虫的食性比较单一,对寄主植物的依存度极高,而寄主植物的生长状况改变易受耕作栽培制度的影响,进而影响害虫及其天敌的发生。证实了耕作栽培制度的变化对青稞与牧草害虫种群数量动态及为害成灾的影响尤为明显,特别是扩大冬播作物面积和早播,使害虫有了越冬寄主,便于虫源的积累,是青藏高原害虫种群数量快速增长和猖獗危害的根本原因(王翠玲等,2008;王保海,2011)。

(2) 害虫分区治理技术。青藏高原不同的区域有独特的生态条件及害虫发生规律,结合高原害虫及其天敌的水平分布特点,区分为高海拔生态脆弱区、农牧交错带生态半脆弱区和岛屿状生态稳定区,采取分区治理的策略,不同区域施以不同的害虫防控技术。在高海拔生态脆弱区,采取生物防治结合生态调控的策略,以保护自然生态系统为基础,在害虫常发区采取种植苜蓿、改造虫源基地等措施,压低草原蝗虫和草原毛虫发生基数;在害虫重发区采用招引鸟类、草地牧鸡、喷施蝗虫微孢子虫等生物防治技术控制重大害虫为害。在农牧交错带半脆弱区,采取生态调控结合生物防治的策略,以恢复生态系统为基础,通过合理设置田块间距、保留田边田埂杂草、提倡绿肥留茬或条割、青稞收获期田边堆放杂草和石块等,增加农田生物多样性,为天敌提供避难场所;通过轮作倒茬、适时晚播、压缩冬播面积、清除自生苗,切断麦无网长管蚜、卷叶瘿螨 *Eriophyes tulipae*、青稞毛蚊 *Bibio hordeiphagut*、西藏穗螨 *Siteroptes xizangensis* 等主要害虫的食物链和传播病毒病的桥梁;通过改单种为套种、种植蜜源植物等,培育青稞田天敌种群数量,发挥天敌对蚜虫等关键害虫的控制作用。在岛屿状生态稳定区,采取生物防治结合耕作制度调整的策略,本区域农田所占比例较小,呈岛屿状分布,生物多样性丰富,生物之间长期形成了相互依赖、相互制约的关系;虽然植食性昆虫种类很多,但天敌昆虫寄生率和捕食率达 80%以上,自然控

制作用好,有虫不成灾,一般不会形成灾害,故此采取以生物防治、压缩冬播青稞面积为主的害虫防治措施(王保海,2011;胡胜昌等,2013;张礼生等,2014)。

针对暴发虫害的根本原因,结合藏区民俗和宗教信仰,提出“两改两用”的防治技术策略,即改种植模式、改防治方法、用生态调控、用生物防治。凝炼了8项轻简化实用技术,包括压缩冬播、适时晚播、合理轮作、间混套作等生态调控措施,堆积物庇护、留茬庇护天敌、种植豆科作物诱集天敌、种植豆科牧草等天敌保护措施,这些措施简便易行,符合藏区宗教习俗,又有显著的提升天敌控制害虫的效果,为青稞田和草地主要害虫的绿色防控奠定重要基础(王保海,2011;张礼生等,2014)。

2 发展趋势及研究展望

2015年,我国农业部正式提出了《到2020年农药使用量零增长行动方案》,这对农作物害虫防控研究与实践提出了更高的要求,也为害虫综合防治学科发展创造了新的机遇。基于国际上害虫综合防治学科发展趋势和我国在本领域的研究现状与存在问题,今后需要重点关注如下几方面工作。

2.1 害虫灾变机制的多学科解析

针对不同作物,我国系统研究了全球气候变化、产业结构调整、种植制度变革、土地利用方式变化等因素影响下主要害虫的种群演替规律,阐明了害虫种群消长、暴发成灾机制及其关键影响因子,提出了适合我国国情、农情、民情的害虫综合防治理论与对策。我国以小农户分散种植模式为主;而美国等发达国家多为大农场种植模式,更加重视农田景观格局下害虫区域灾变机制与基于生境管理的害虫防治对策研究(Schellhorn *et al.*, 2014; Guedes *et al.*, 2016; Nansen and Elliott, 2016; Gurr *et al.*, 2017)。

今后,应用现代生物学理论与技术,从微观水平解析农业害虫生物型转变、抗药性及其变异规律和农作物抗性机理。利用分子、化学生态学

等技术与方法,研究作物-害虫-天敌之间的食物营养关系与化学信息联系,解析农田节肢动物食物网的结构与功能。利用现代信息技术与景观生态理念,定量研究多尺度空间下昆虫种群的时空分布与转移特征、农业景观格局和过程对天敌保育与害虫种群控制的影响。多层次、多角度、跨学科研究解析农业害虫种群消长与灾变规律及其机制,以期探索发展害虫种群控制的新途径与新方法。

2.2 害虫绿色防控技术的创新发展

在“绿色植保”科学理念的倡导下,我国加快了害虫绿色防控技术产品的研发,并在赤眼蜂、烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis*、苦参碱、苏云金芽孢杆菌、白僵菌、频振式杀虫灯、转基因抗虫棉花等技术产品的研发和产业化中取得了一系列重大进展,但总体现状明显落后于发达国家(吴孔明,2016)。

下一步,充分利用昆虫雷达以及互联网+、大数据、云平台、“3S”技术、自动化图形处理等现代信息技术,构建立体型、多元化、综合性监测预警平台,实现害虫远程诊断、实时监测、早期预警和应急防治指挥调度的网络化管理,全面提高害虫监测预警时效性和准确率。重点研究天敌昆虫高效繁育技术与装备及配套应用技术、生物源杀虫剂创制与产业化技术、害虫诱杀新型光源与装备、害虫化学通讯调控物质与利用技术、害虫不育技术,以及基于转基因技术的害虫防治新方法与新产品,提升害虫绿色防治的技术创新和产业化水平。创新农药研究与应用理念,探索农药高效利用及减量调控途径,研究农药精准减量施用核心技术及配套装备,完善农产品中农药残留限量标准和分析方法,促进农药科学合理使用。

2.3 害虫绿色防控技术模式的集成应用

我国集成了一系列农业害虫绿色防控技术模式,涉及水稻、小麦、玉米、马铃薯等粮食作物,果树、蔬菜、棉花、茶树等经济作物,油菜、大豆和花生等油料作物,以及农作物重要靶标害

虫如玉米螟、柑橘大实蝇 *Bactrocera minax* 等(杨普云等, 2014)。害虫防控技术模式需与农作物的种植模式、耕作制度以及机械化等生产要求高度吻合。我国农业处于转型升级阶段, 作物种植模式不断变化, 需要及时调整发展适应生产实践需要的害虫防控技术模式。与发达国家相比, 我国害虫防控技术规程不够完善, 导致技术人员推广困难、农户操作不当, 从而直接影响害虫防控技术的推广规模与防控效果。

有待进一步针对不同农区及其种植模式, 分别以作物、靶标害虫、核心技术、农产品生产要求为主线, 提出相应的农业害虫绿色防控技术模式, 建立和完善技术规程, 促进大规模推广应用。重视对西北绿洲农业区、青藏高原农牧交错区等特殊农业系统的研究与实践, 大幅度减少生态薄弱区的农药使用量, 提高生物多样性与生态系统的稳定性, 促进农业与农区的可持续发展, 丰富我国农业害虫防控技术模式与实践经验。

参考文献 (References)

- An JJ, Gao YL, Lei CL, Gould F, Wu KM, 2015. Monitoring cotton bollworm resistance to Cry1Ac in two counties of northern China during 2009–2013. *Pest Management Science*, 71(3): 377–382.
- Chen XX, Liu YQ, Ren SX, Zhang F, Zhang WQ, Ge F, 2014. Plant-mediated support system for natural enemies of insect pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 1–12. [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 张帆, 张文庆, 戈峰, 2014. 害虫天敌的植物支持系统. 应用昆虫学报, 51(1): 1–12.]
- Cui GZ, Zhu JJ, 2016. Pheromone-based pest management in China: past, present, and future prospects. *Journal of Chemical Ecology*, 42(7): 557–570.
- Cui LL, Francis F, Heuskin S, Lognay G, Liu YJ, Dong J, Chen JL, Song XM, Liu Y, 2012. The functional significance of E- β -farnesene: Does it influence the populations of aphid natural enemies in the fields? *Biological Control*, 60(2): 108–112.
- Fan J, Liu Y, Zeng JG, Guo M, Sun JR, Cheng P, 2014. Advancement of new prevent and control technologies for aphids in wheat and vegetable. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1413–1434. [范佳, 刘勇, 曾建国, 郭梅, 孙京瑞, 程辟, 陈巨莲, 2014. 小麦与蔬菜蚜虫新型防控技术研究进展. 应用昆虫学报, 51(6): 1413–1434.]
- Fu XW, Xing ZL, Liu ZF, Ali A, Wu KM, 2014. Migration of diamondback moth, *Plutella xylostella*, across the Bohai Sea in northern China. *Crop Protection*, 64(3): 143–149.
- Gao YY, 2013. Study on distribution of pesticide droplets in gramineous crop canopy and control effect sprayed by unmanned aerial vehicle (UAV). Master dissertation. Harbin: Northeast Agricultural University. [高圆圆, 2013. 无人直升机 (UAV) 低空低容量喷洒农药雾滴在禾本科作物冠层的沉积分布及防治效果研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学.]
- Ge F, Ou YF, Zhao ZH, 2014. Ecological management of insects based on ecological services at a landscape scale. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(3): 597–605. [戈峰, 欧阳芳, 赵紫华, 2014. 基于服务功能的昆虫生态调控理论. 应用昆虫学报, 51(3): 597–605.]
- Guedes RNC, Smagghe G, Stark JD, Desneux N, 2016. Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. *Annual Review of Entomology*, 61: 43–62.
- Guo L, 2014. Molecular mechanism of chlorantraniliprole resistance in *Plutella xylostella* (L.). Doctoral dissertation. Beijing: China Agricultural University. [郭磊, 2014. 小菜蛾对氯虫苯甲酰胺抗性的分子机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]
- Guo L, Liang P, Zhou XG, Gao XW, 2014. Novel mutations and mutation combinations of ryanodine receptor in a chlorantraniliprole resistant population of *Plutella xylostella* (L.). *Scientific Reports*, 4(4): 6924.
- Guo YY, 2015. Crop Diseases and Insect Pests in China (Third Edition). Beijing: China Agriculture Press. 1–1707. [郭予元, 2015. 中国农作物病虫害 (第三版). 北京: 中国农业出版社. 1–1707.]
- Gurr GM, Lu ZX, Zheng XS, Xu HX, Zhu PY, Chen GH, Yao XM, Cheng JA, Zhu ZR, Catindig JL, Villareal S, Chien HV, Cuong LQ, Channoo C, Chengwattana N, Lan LP, Hai LH, Chaiwong J, Nicol HI, Perovic DJ, Wratten SD, Heong KL, 2016. Multi-country evidence that crop diversification promotes ecological intensification of agriculture. *Nature Plants*, 2(3): 16014.
- Gurr GM, Wratten SD, Landis DA, You MS, 2017. Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 62: 91–109.
- Han BY, Zhang QH, Byers JA, 2012. Attraction of the tea aphid, *Toxoptera aurantii*, to combinations of volatiles and colors related to tea plants. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 144(3): 258–269.
- Heong KL, Cheng JA, Escalada MM, 2015. Rice Planthoppers. Springer-Verlag: Springer Netherlands. 1–231.

- Hu G, Lu F, Lu MH, Liu WC, Xu WG, Jiang XH, Zhai BP, 2013. The influence of typhoon Khanun on the return migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in Eastern China. *PLoS ONE*, 8(2): e57277.
- Hu G, Lu F, Zhai BP, Lu MH, Liu WC, Zhu F, Wu XW, Chen GH, Zhang XX, 2014. Outbreaks of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in the Yangtze River Delta: immigration or local reproduction. *PLoS ONE*, 9(2): e88973.
- Hu SC, Lin XW, Wang BH, 2013. Coccinellidae of the Qinghai-Xizang Plateau. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press. 1–213. [胡胜昌, 林祥文, 王保海, 2013. 青藏高原瓢虫. 郑州: 河南科学技术出版社. 1–213.]
- Huang FS, Wang BH, Qin R, Liu H, Han JC, 2010. Edge effects and insect differentiation in Tibet. *Tibet's Science and Technology*, 6: 68–71. [黄复生, 王保海, 覃荣, 刘晃, 韩建成, 2010. 西藏的边缘效应与昆虫分化. 西藏科技, 6: 68–71.]
- Jin L, Wei YY, Zhang L, Yang YH, Tabashnik BE, Wu YD, 2013. Dominant resistance to Bt cotton and minor cross-resistance to Bt toxin Cry2Ab in cotton bollworm from China. *Evolutionary Applications*, 6(8): 1222–1235.
- Jin L, Zhang HN, Lu YH, Yang YH, Wu KM, Tabashnik BE, Wu YD, 2015. Large-scale test of the natural refuge strategy for delaying insect resistance to transgenic Bt crops. *Nature Biotechnology*, 33(2): 169–174.
- Lei ZR, Wu SY, Wang HH, 2016. Progresses in biological control of vegetable insect pests in China. *Plant Protection*, 42(1): 1–6. [雷仲仁, 吴圣勇, 王海鸿, 2016. 我国蔬菜害虫生物防治研究进展. 植物保护, 42(1): 1–6.]
- Li ZY, Chen HY, Bao HL, Hu ZD, Yin F, Lin QS, Zhou XM, Wu QJ, Chen AD, Wu YD, Hou YM, He YM, He YR, Li JH, Xie SH, Zhang JM, Fu W, Mao CS, Feng X, 2016. Progress in research on managing regional pesticide resistance in the diamondback moth in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(2): 247–255. [李振宇, 陈焕瑜, 包华理, 胡珍娣, 尹飞, 林庆胜, 周小毛, 吴青君, 谌爱东, 吴益东, 侯友明, 何余容, 李建红, 谢胜华, 章金明, 符伟, 马春森, 冯夏, 2016. 小菜蛾区域性抗药性治理技术研究——公益性行业(农业)科研专项“十字花科小菜蛾综合防控技术研究与示范推广”研究进展. 应用昆虫学报, 53(2): 247–255.]
- Li ZY, Feng X, You MS, Liu SS, Furlong MJ, 2016. Biology, ecology and management of the diamondback moth in China. *Annual Review of Entomology*, 61: 277–296.
- Liu CX, Xiao YT, Li, XC, Oppert B, Tabashnik BE, Wu KM, 2014a. Cis-mediated down-regulation of a trypsin gene associated with Bt resistance in cotton bollworm. *Scientific Reports*, 4: 7219.
- Liu F, Shi XZ, Liang YP, Wu QJ, Xu BY, Xie W, Wang SL, Zhang YJ, Liu NN, 2014b. A 36-bp deletion in the alpha subunit of glutamate-gated chloride channel contributes to abamectin resistance in *Plutella xylostella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 153(2): 85–92.
- Liu WC, Liu ZD, Huang C, Lu MH, Liu J, Yang QP, 2016. Statistics and analysis of crop yield losses caused by main diseases and insect pests in recent 10 years. *Plant Protection*, 42(5): 1–9. [刘万才, 刘振东, 黄冲, 陆明红, 刘杰, 杨清坡, 2016. 近 10 年农作物主要病虫害发生危害情况和统计和分析. 植物保护, 42(5): 1–9.]
- Lu YH, 2016. The development strategy of synthetic plant volatile-based attractants for agricultural insects // Wu KM (ed.). Development Strategy of Green Control Technology of Agricultural Insect Pests in China. Beijing: Science Press. 119–130. [陆宴辉, 2016. 农业昆虫植物源引诱剂防治技术发展策略//吴孔明. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社. 119–130.]
- Lu ZX, Zhu PY, Gurr GM, Zheng XS, Chen GH, Heong KL, 2015. Rice pest management by ecological engineering: A pioneering attempt in China // Heong KL, Cheng JA, Escalada MM (eds.). Rice Planthoppers: Ecology, Management, Socio Economics and Policy. Hangzhou: Zhejiang University Press. 161–178.
- Lu ZX, Zhu PY, Gurr GM, Zheng XS, Read DMY, Heong KL, Yang YY, Xu HX, 2014. Mechanisms for flowering plants to benefit arthropod natural enemies of insect pests: Prospects for enhanced use in agriculture. *Insect Science*, 21(1): 1–12.
- Miao Y, Gao XW, Jiang JQ, Wang Y, 2013. Effects of intercropping of cabbage and garlic on major pests and arthropod community in spring cabbage fields. *Journal of South China Agricultural University*, 34(3): 352–355. [缪勇, 高希武, 江俊起, 王云, 2013. 甘蓝与大蒜间作对甘蓝田主要害虫及节肢动物群落的影响. 华南农业大学学报, 34(3): 352–355.]
- Nansen C, Elliott N, 2016. Remote sensing and reflectance profiling in entomology. *Annual Review of Entomology*, 61: 139–158.
- Ou YF, Men XY, Guan XM, Xiao YL, Ge F, 2016. Ecological effects of regional agricultural landscape pattern on wheat aphids and their natural enemies. *Scientia Sinica Vitae*, 46(1): 139–150. [欧阳芳, 门兴元, 关秀敏, 肖云丽, 戈峰, 2016. 区域性农田景观格局对麦蚜及其天敌种群的生态学效应. 中国科学: 生命科学, 46(1): 139–150.]
- Pan HS, Lu YH, Xiu CL, Geng HH, Cai XM, Sun XL, Zhang YJ, Williams L, Wyckhuys KAG, Wu KM, 2015. Volatile fragrances associated with flowers mediate host plant alternation of a polyphagous mirid bug. *Scientific Reports*, 5: 14805.

- Qi HC, Jiang C, Zhang YH, Yang X, Cheng DF, 2014. Radar observations of the seasonal migration of brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) in Southern China. *Bulletin of Entomological Research*, 104(6): 731–741.
- Qin R, 2009. Control Technology of Crop Pests in Tibet. Lhasa: Tibet People's Publishing House. 1–317. [覃荣, 2009. 西藏农作物害虫防治实用技术. 拉萨: 西藏人民出版社. 1–317.]
- Schellhorn NA, Bianchi FJJA, Hsu CL, 2014. Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: Links to pest suppression. *Annual Review of Entomology*, 59: 559–581.
- Shao ZR, Feng X, Zhang S, Li ZY, Huang JD, 2013. NY/T 2360–2013. Guideline for insecticide resistance monitoring of *Plutella xylostella* (L.) on cruciferous vegetables. Beijing, Agriculture Industry Standard of China. 1–6. [邵振润, 冯夏, 张帅, 李振宇, 黄军定, 2013. NY/T 2360-2013. 小菜蛾抗药性监测技术规程. 北京. 中国农业行业标准. 1–6.]
- Wang BH, 2011. Tibetan Insects. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press. 1–857. [王保海, 2011. 西藏昆虫研究. 郑州: 河南科学技术出版社. 1–857.]
- Wang BH, Huang FS, Qing R, 2006. Insect Differentiation in Tibet. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press. 1–286. [王保海, 黄复生, 覃荣, 2006. 西藏昆虫分化. 郑州: 河南科学技术出版社. 1–286.]
- Wang BH, Qin R, Wang WF, Han JC, 2010. Study on insect fauna and differentiation at the central area of Tibet. *Tibet's Science and Technology*, 4: 57–62, 65. [王保海, 覃荣, 王文峰, 韩建成, 2010. 青藏高原中心区昆虫区系及分化研究. 西藏科技, 4: 57–62, 65.]
- Wang CH, Zhai BP, 2013. Landing characteristics of *Nilaparvata lugens* (Stål) in typhoon. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 36(6): 30–36. [王翠花, 翟保平, 2013. 褐飞虱在台风系统中的降落特征. 南京农业大学学报, 36(6): 30–36.]
- Wang CL, Yao XB, Qin R, Xi YS, Wang BH, Wang WF, Zha L, Wang KC, 2008. Discussion on occurrence regularity and integrated control to *Locusta migratoria tibetensis*. *Tibet Agricultural Science and Technology*, 30(4): 34–40. [王翠玲, 姚小波, 覃荣, 席永士, 王保海, 王文峰, 扎罗, 王考昌, 2008. 西藏飞蝗的发生规律与综合防治技术探讨. 西藏农业科技, 30(4): 34–40.]
- Wei SJ, Shi BC, Gong YJ, Jin GH, Chen XX, Meng XF, 2013. Genetic structure and demographic history reveal migration of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) from the southern to northern regions of China. *PLoS ONE*, 8(4): e59654.
- Wu KM, 2016. Development Strategy of Green Control Technology of Agricultural Insect Pests in China. Beijing: Science Press. 1–286. [吴孔明, 2016. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社. 1–286.]
- Xiao YF, Mao RQ, Wang FH, 2013. New concept of biological control: Bio-control plants used for management of arthropod pests. *Chinese Journal of Biological Control*, 29(1): 1–10. [肖英方, 毛润乾, 万方浩, 2013. 害虫生物防治新概念—生物防治植物及创新研究. 中国生物防治学报, 29 (1): 1–10.]
- Xiao YT, Liu KY, Zhang DD, Gong LL, He F, Soberón M, Bravo A, Tabashnik BE, Wu KM, 2016. Resistance to *Bacillus thuringiensis* mediated by an ABC transporter mutation increases susceptibility to toxins from other Bacteria in an invasive insect. *PLoS Pathogens*, 12(2): e1005450.
- Xiao YT, Zhang T, Liu CX, Heckel D, Li XC, Tabashnik BE, Wu KM, 2014. Mis-splicing of the ABC2 gene linked with Bt toxin resistance in *Helicoverpa armigera*. *Scientific Reports*, 4: 6184.
- Xu XJ, Yu LY, Wu YD, 2005. Disruption of a cadherin gene associated with resistance to Cry1Ac δ -endotoxin of *Bacillus thuringiensis* in *Helicoverpa armigera*. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(2): 948–954.
- Yang DB, Zhang LN, Yan XJ, Wang ZY, Yuan HZ, 2014. Effects of droplet distribution on insecticide toxicity to Asian corn borers (*Ostrinia furnaealis*) and spiders (*Xysticus ephippiatus*). *Journal of Integrative Agriculture*, 13(1): 124–133.
- Yang PY, Zhao ZH, Liang JM, 2014. Green Prevention and Control Technology of Crop Diseases and Insect Pests. Beijing: China Agriculture Press. 1–426. [杨普云, 赵中华, 梁俊敏, 2014. 农作物病虫害绿色防控技术模式. 北京: 中国农业出版社. 1–426.]
- Yuan HZ, Li WG, 2013. Modern Pesticide Application Technology Diagram. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 1–524. [袁会珠, 李卫国, 2013. 现代农药应用技术图解. 北京: 中国农业科学技术出版社. 1–524.]
- Zhang HN, Tang MY, Yang F, Yang YH, Wu YD, 2013. DNA-based screening for an intracellular cadherin mutation conferring non-recessive Cry1Ac resistance in field populations of *Helicoverpa armigera*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107: 148–152.
- Zhang HN, Wu SW, Yang YH, Tabashnik BE, Wu YD, 2012a. Non-recessive Bt toxin resistance conferred by an intracellular cadherin mutation in field-selected populations of cotton bollworm. *PLoS ONE*, 7(12): e53418.
- Zhang HN, Tian W, Zhao J, Jin L, Yang J, Liu CH, Yang YH, Wu SW, Wu KM, Cui JJ, Tabashnik BE, Wu YD, 2012b. Diverse

- genetic basis of field-evolved resistance to Bt cotton in cotton bollworm from China. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 109(26): 10275–10280.
- Zhang J, Cui L, Xu XB, Rui CH, 2015. Frequency detection of imidacloprid resistance allele in *Aphis gossypii* field populations by real-time PCR amplification of specific-allele (rtPASA). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 125(1): 1–7.
- Zhang LS, Chen HY, Li BP, 2014. Mass-rearing and Utilization of Insect Natural Enemies. Beijing: China Science and Technology Press. 1–420. [张礼生, 陈红印, 李保平, 2014. 天敌昆虫扩繁与应用. 北京: 中国农业科学技术出版社. 1–420.]
- Zhang S, 2015. The present resistance situation and management strategies of agricultural diseases and pests in China. *Pesticide Bulletin*, http://www.agroinfo.com.cn/other_detail_2109.html. [张帅, 2015. 我国农业病虫害抗药性发展现状与对策. 农药快讯信息网: http://www.agroinfo.com.cn/other_detail_2109.html.]
- Zhang S, 2016. Resistance monitoring for agricultural pests of China in 2015 and the suggestions for scientific application of pesticides. *China Plant Protection*, 36(3): 61–65. [张帅, 2016. 2015 年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议. 中国植保导刊, 36(3): 61–65.]
- Zhang X, Wang YH, Liu YH, Dai PP, Dong J, Yu ZR, 2015. Approaches biological control of pests of through landscape regulation: theory and practice. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31(5): 617–624. [张鑫, 王艳辉, 刘云慧, 戴飘飘, 董杰, 宇振荣, 2015. 害虫生物防治的景观调节途径: 原理与方法. 生态与农村环境学报, 31(5): 617–624.]
- Zhang ZQ, Chen ZM, 2015. Non-host plant essential oil volatiles with potential for a ‘push-pull’ strategy to control the tea green leafhopper, *Empoasca vitis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 156(1): 77–87.
- Zhao ZH, 2016. From “Integrated Pest Management” to “Ecologically Based Pest Management”. *Chinese Science Bulletin*, 61(18): 2027–2034. [赵紫华, 2016. 从害虫“综合治理”到“生态调控”. 科学通报, 61(18): 2027–2034.]
- Zhao ZH, Reddy GVP, Hui C, Li BL, 2016. Approaches and mechanisms for ecologically based pest management across multiple scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230: 199–209.
- Zhou HB, Chen JL, Cheng DF, Frederic F, Liu Y, Sun JR, 2012. Effects of ecological regulation of biodiversity on insects in agroecosystems. *Plant Protection*, 38(1): 6–10. [周海波, 陈巨莲, 程登发, Francis F, 刘勇, 孙京瑞, 2012. 农田生物多样性对昆虫的生态调控作用. 植物保护, 38(1): 6–10.]
- Zhu PY, Lu ZX, Heong KL, Chen GH, Zheng XS, Xu HX, Yang YJ, Nicol HI, Gurr GM, 2014. Selection of nectar plants for use in ecological engineering to promote biological control of rice pests by the predatory bug, *Cyrtorhinus lividipennis*, (Heteroptera: Miridae). *PLoS ONE*, 9: e108669.
- Zhu ZR, 2012. Ecological Engineering for Pest Management in Rice. Beijing: China Agriculture Press. 1–112. [祝增荣, 2012. 生态工程治理水稻有害生物. 北京: 中国农业出版社. 1–112.]