

中国昆虫学70年前沿与综述专栏

中国农业害虫防治科技 70 年的成就与展望*

萧玉涛^{1**} 吴超¹ 吴孔明^{2***}

(1. 中国农业科学院农业基因组研究所, 基因组学分析农业部重点实验室, 深圳 518120;

2. 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)

摘要 新中国成立 70 年以来, 随着农业生产方式的不断变革和科技进步, 农业害虫的防治策略从 20 世纪 50 年代的农业防治发展到 80 年代的综合防治和现阶段的绿色防控, 害虫防治越来越高效、科学和环保。中国农业昆虫学家先后研究明确了水稻、小麦、玉米、棉花、蔬菜和果树等作物主要害虫发生规律, 创新了一系列监测预警、生物防治、物理防治、化学生态调控、抗药性治理和抗虫育种技术, 构建了以重要作物生产过程和重大致灾害虫为对象的综合防治技术体系。研发的以农业防治为主的蝗虫防控技术体系、以异地测报治理为主的粘虫 *Mythimna separata* 防控技术体系、以化学农药应急防治为主的稻飞虱防控技术体系、以生物防治为主的玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 防控技术体系和以转基因技术为主的棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 防控技术体系等害虫治理模式, 已成为国际农业害虫防治的经典案例。展望未来, 信息技术和人工智能技术、基因组技术、农业生物技术等高新技术发展正推动害虫智能化精准识别与监测预警、智能化精准对靶施药、基因诊断与快速检测、害虫种群遗传调控、区域性生态调控和转基因防治技术的不断创新与广泛应用。

关键词 农业害虫; 防治策略; 关键技术; 绿色防控; 发展展望

Agricultural pest control in China over the past 70 years: Achievements and future prospects

XIAO Yu-Tao^{1**} WU Chao¹ WU Kong-Ming^{2***}

(1. Genome Analysis Laboratory of the Ministry of Agriculture, Agricultural Genomics Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shenzhen 518120, China; 2. State Key Laboratory of Insect Pests and Plant Diseases, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract Since the foundation of The People's Republic of China 70 years ago, continuous improvements in the field of agricultural science and technology have led to significant progress in agricultural pest control strategies, which have been upgraded from primary agronomic measures in the 1950's to the current more efficient, scientific and environmental-friendly, green pest-management strategies. Chinese agricultural entomologists have successively clarified the outbreak principles of the major pests of rice, wheat, corn, cotton, vegetables and fruit crops, and have also innovated a number of monitoring, forecasting, biological and physical control, and eco-chemical regulation, technologies. They have also developed resistance management strategies, and insect-resistant crop breeding techniques, and have constructed a comprehensive control technology system for both important crops and major pests. Pest management models mainly driven by agronomic measures, source population monitoring and management, chemical pesticides, biological measures, and transgenic technology, have been used to control *Locusta migratoria*, *Mythimna separata*, the rice planthopper, *Ostrinia furnacalis* and *Helicoverpa armigera*, respectively, which have now become classic examples of agricultural pest control strategies worldwide. The rapid

*资助项目 Supported projects: 国家转基因生物新品种培育重大专项 (2016ZX08012004-003); 国家自然科学基金 (31601646)

**第一作者 First author, E-mail: xiaoyutao@caas.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: wukongming@caas.cn

收稿日期 Received: 2019-10-15; 接受日期 Accepted: 2019-10-28

development of information technology, artificial intelligence, agricultural biotechnology, genome technology and other high throughput technologies, will promote continuous innovation in the fields of intelligent pest identification and forecasting, genetic diagnosis and rapid detection, targeted pesticide application, pest population genetics management, regional ecological control and transgenic technology.

Key words agriculture insect pest; control strategy; key technology; green prevention and management; future prospect

1 前言

我国常见的农业害虫有 860 多种, 其中 20 多种属于重大农业害虫(陆宴辉等, 2017)。害虫防治是农业生产中非常重要的组成部分, 农业害虫防治技术随着农业生产方式的转变以及科学技术的进步而不断发展。新中国成立 70 年以来, 害虫防治策略先后经历了农业防治、化学防治、综合防治和绿色防治阶段。随着监测预警技术、精准施药技术、生物防治、物理防治和转基因技术等多种害虫防治技术的不断发展, 先后构建了以单个作物生产过程和重大致灾害虫为对象的综合防治技术体系, 在保障我国粮食产量与食品安全, 推动农业害虫绿色防控方面发挥了关键作用。近年来, 受全球气候变化、耕作模式变化、产业结构调整和国际贸易交流带来的生物入侵日趋频繁等多种因素的影响, 我国农业害虫的发生种类和为害规律也产生了明显变化, 农业害虫防治面临新的挑战。

2 中国农业害虫防治策略的发展过程

农业害虫的防治策略和国家农业生产的发展阶段及科技发展水平有密切的关系。建国 70 年来, 中国农业害虫的防治策略经历了农业防治、化学防治、综合防治和绿色防治四个阶段。

2.1 农业防治为主的策略

建国初期, 在我国化学工业体系尚未建立的背景下, 害虫防治以农业防治为主。农业防治是通过改善农田环境条件, 减少或避免作物病虫害的发生和发展, 最终实现作物增产的有害生物防治策略(周明群, 1956a, 1956b)。农业防治措

施主要包括改良农田环境、合理灌溉与施肥、深耕改土、选用优良作物品种、合理密植、及时清除田间杂草等(孟祥玲, 1964; 吴孔明和郭予元, 2000)。其中, 改良农田环境可以有效破坏害虫的栖息繁衍条件; 合理施肥与密植能够通过改善农作物生长状态提高抗虫能力; 深耕改土可将杂草和作物秸秆上的虫卵翻入地下, 或将地下害虫和蛹翻出, 降低其存活率; 种植优良品种可降低害虫的取食、产卵和为害。农业防治策略最成功的案例是通过改良东亚飞蝗 *Locusta migratoria* 产卵繁殖的滩涂地, 解决了数千年来制约中国农业发展的蝗患难题(马世骏, 1965)。

2.2 化学防治为主的策略

20 世纪 60 年代以后, 我国建立了完整的农药工业体系, 化学防治的技术与方法得到了快速发展。有机氯、有机磷等有机合成农药被广泛开发并应用于害虫防治, 如敌百虫和乐果等有机磷农药对害虫防效显著, 深受农民欢迎(赵善欢, 1962)。化学农药在害虫防治方面具有见效快、易操作、受地域和季节影响较小, 经济效益高等优势, 很快成为农业害虫防治的主要措施, 其在农业重大害虫暴发危害的应急防控方面具有无可比拟的优势。水稻是我国主要的粮食作物, 迁飞性害虫稻飞虱常常在几天内对迁入区的水稻造成毁灭性的危害, 化学农药的及时高效使用保障了水稻的稳产高产。但是化学农药的过度使用导致害虫抗药性迅速增加、农药使用寿命迅速缩短、生物多样性降低、生态环境破坏以及农产品质量安全等一系列问题(龚坤元, 1978; 高希武, 2010)。

2.3 综合防治策略

尽管化学防治在重大害虫防治中起到了关

键作用,但其对生态环境的影响以及自身局限性也日益受到关注。因此,我国政府在 1975 年的全国植物保护工作会议上确立了“预防为主,综合防治”的病虫害防治方针。综合防治不仅考虑害虫本身,同时将寄主植物、天敌昆虫在内的整个农田生态系统考虑进来,充分发挥抗性品种、栽培、生态等多种因素的作用,采用最合理的综合性策略开展害虫防治。在研究明确主要农作物生产过程中多种害虫发生规律的基础上,研发了水稻、小麦、玉米、棉花、蔬菜和果树等作物的害虫综合防治技术体系,以及麦蚜等重大害虫的综合防治技术体系。针对河北唐山和秦皇岛稻区中华稻蝗 *Oxya chinensis* 危害逐年加重的趋势,在掌握其发生规律的前提下,自 1985 年开始,逐步探索出了一整套综合防治措施,稻蝗发生面积和虫口密度显著下降,水稻增产和农民增收得到保障(王振庄,1991)。基于对棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的多年研究,中国农业科学院植物保护研究所从改进棉铃虫中期预报、制定科学防治指标、配套措施保护、利用天敌控害、抗药性检测与治理、利用抗虫品种等多维度考虑,组建了北方棉区棉铃虫综合防控关键技术体系,并在河南新乡推广应用(吴钊等,1981;张广学等,1990)。1992 和 1993 年棉铃虫为害猖獗的情况下,该策略取得了良好的防控效果、经济、生态和社会效益显著(中国农业科学院植物保护研究所棉虫组,1995)。针对不同害虫发生为害规律制定的综合防控策略在水稻和小麦等主要农作物害虫(吴立民等,1991;祝增荣和程家安,2013)以及多种果树害虫(林貽鼎等,1991;孙德寿等,1991;邱同铎等,1994)防控中也得到推广应用并取得成功。

2.4 绿色防控策略

随着中国经济社会的发展,十六届五中全会提出了建设“社会主义新农村”的目标,对农业发展提出了高产、优质、生态、安全等新的更高的要求。建设资源节约型和环境友好型农业成为农业发展的方向。与此同时,由于气候变化、耕作制度、贸易交流频繁、害虫抗药性增强等诸多

因素,农业重大害虫暴发频率增加,并且呈现出新的特点,害虫防控风险加剧(夏敬源,2010)。在继续秉持“预防为主,综合防治”方针的基础上,农业部在 2006 年 4 月适时提出了“公共植保、绿色植保”的新植保理念,绿色防控的植保发展战略正式确定,害虫防控进入了新的阶段。更加专业高效的新型植保服务系统被构建。甲胺磷、甲基对硫磷、硫丹等多种高毒农药停止使用,以物理防治和生物防治等绿色防控技术为依托的新型防控技术体系不断发展完善。建立了农业害虫数字化监测预警平台 and 专业化防治组织,提高了害虫测报的准确率,挽回了巨大的粮食损失。同时保障了农产品质量安全,改善了生态环境。以浙江为例,通过综合“降低农药化肥用量,释放天敌,蜜源诱集植物种植,高抗品种培育”等措施,恢复了稻田生态系统的调节能力,在降低 80% 农药用量的同时,实现了重要害虫的有效防控和水稻的高产增收(祝增荣,2012)。

3 农业害虫防控关键技术的创新发展与应用实践

新中国成立后,我国建立了植物保护科技创新体系,改革开放后农业虫害防治技术创新进入了快速发展阶段。监测预警、生物防治、物理防治、化学生态调控、抗药性治理和抗虫育种技术等多项技术实现了创新发展,并在农业生产实践中得到广泛应用。

3.1 农业害虫监测预警技术

实时监测以及早期预警可为预防和控制农业重大害虫暴发危害提供及时的情报,在害虫防控中扮演着非常重要的角色。20 世纪 60 年代,我国科学家完成了粘虫 *Mythimna separata* 等重大害虫的迁飞规律与异地测报技术研究,为这类害虫的防控发挥了重要作用(李光博等,1964)。尤其是粘虫的异地测报与南方虫源地治理技术的应用显著降低了北方小麦、玉米主产区的粘虫发生程度。随着现代信息技术的进一步发展,遥感(Remote sensing, RS)、地理信息系统(Geography information system, GIS)全球定

位系统 (Global positioning system, GPS) 生态环境模型、计算机网络技术等多种现代化技术和方法被植保工作者应用到了病虫害监测预警领域,使农业重大害虫监测预警获得了长足发展(张云慧和程登发,2013)。中国农业科学院植物保护研究所、河南省农业科学院、南京农业大学等多家机构分别在广西兴安、山东长岛、内蒙古锡林浩特、河南新乡、江苏江浦、北京延庆等地建立毫米波或厘米波昆虫雷达系统,对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、稻飞虱、草地螟 *Loxostege sticticalis*、粘虫、棉铃虫等重大迁飞性农业害虫开展了实时监测(张云慧等,2009;朱建等,2018),在重大害虫的防控决策及有效治理过程中发挥了重要作用。在飞蝗预测预报方面,将 GPS、GIS 与人工田间监测相结合,使飞蝗中短期预报的准确率提高了 5%-10%(周万良,2006)。通过昆虫雷达和高空探照灯监测明确了稻飞虱的迁飞规律(蒋春先等,2010;齐会会等,2010;齐国君等,2011;Hu *et al.*, 2013, 2014; Qi *et al.*, 2014),为相关机构的防控决策提供了可靠依据。蚜虫监测方面,中国科学院动物研究所所在我国小麦和大豆主要产区安装了多台吸虫塔,形成了蚜虫迁移动态监测预警系统,在蚜虫等小型迁飞性害虫预警以及防控策略实施方面具有重要价值(乔格侠等,2011)。中国农业科学院植物保护研究所综合运用昆虫雷达、高空测报灯、同位素示踪、种群遗传分化分析、植物花粉检测、卵巢解剖等技术方法,对渤海湾地区百余种迁飞昆虫的迁飞行为、数量、路线等进行了研究,提出了构建国家迁飞害虫监测预警技术体系和区域性绿色防治技术体系的思路(吴孔明,2018)。

3.2 农业害虫抗药性治理技术

害虫抗药性的演化发展是影响化学农药防治效果的重要因素,也是害虫再猖獗的主要原因。随着化学农药的长期广泛使用,目标害虫会逐渐产生抗药性,对植保工作带来巨大挑战。抗性治理旨在采用合理的方式方法延缓或者阻止害虫抗药性的产生与发展,甚至使其对农药恢复

敏感状态(王凇等,2010)。加强虫害的预报,通过调查全面了解害虫的发生和发展,有针对性地开展药剂防治,减少盲目用药,降低用药频率,开发和推广新型农药、交替及混合使用不同类型农药等措施都可以有效延缓害虫抗药性的发展(刘泽文和韩召军,2002)。抗性机制研究表明,抗药性产生的根本原因在于害虫体内解毒酶活性提高导致其对农药的代谢能力增强,或者害虫体内农药靶标位点突变导致害虫对农药的不敏感。我国科学家在害虫抗药性机制以及抗性治理策略研究方面已经取得显著进展。其中,对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 乙酰胆碱酯酶受体、棉蚜 *Aphis gossypii* 乙酰胆碱酯酶以及羧酸酯酶、棉铃虫细胞色素 P450 等受体和解毒酶的研究取得了重要成果(高希武,2010)。研究表明乙酰胆碱酯酶、电压门控钠离子通道、鱼尼丁受体的突变分别与昆虫对有机磷和有机氯、拟除虫菊酯、氯虫苯甲酰胺等农药的抗性密切相关(吴益东等,2019)。针对害虫抗药性分子机制开发相应的分子靶向药物是解决害虫抗药性的新的重要策略。

3.3 农业害虫生物防治技术

生物防治是利用生物及其代谢物控制有害生物,降低其危害的防治方法(古德祥等,2000)。寄生蜂和捕食螨是国内应用最多的两类天敌昆虫,寄生蜂可用于防治 20 多种重要害虫,捕食螨则主要用于蓟马、叶螨、白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* 等害虫的防治。目前国内已经建成首个年产量达 8 000 亿只胡瓜钝绥螨 *Amblyseius cucumeris* 的生产线。另外,以生物防治为主的玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 防控技术体系有效保障了我国玉米作物的高产稳产(王振营等,2000),已成为国际农业害虫防治的经典案例。随着技术改进,目前已经实现了赤眼蜂的一卵多蜂、混合放蜂以及无人机投放,大大提升了对玉米螟的防效(<http://www.nzdb.com.cn/hy/255260.jhtml>)。微生物农药近年来的销量也呈现持续增长,截至 2019 年 3 月,我国已登记微生物农药共涉及 22 种有效成分,其中苏云金杆菌产品占 95%以上(李秦,2019)。此外,松毛虫质型多

角体病毒、棉铃虫核型多角体病毒、斜纹夜蛾核型多角体病毒等昆虫病毒也被应用于靶标害虫的防治。昆虫病原线虫在防治钻蛀型害虫方面具有独特优势,斯氏线虫 *Steinernema carpocapsae* 可用于防治荔枝拟木蠹蛾 *Arbela dea* Swinhoe 和豌豆蛀杆蝇 *Phytagromyza* sp. (徐洁莲和杨平, 1992; 刘南欣等, 1994), 并且对蔗扁蛾 *Opogona sacchari* 防效显著 (刘南欣等, 1998)。苦参碱、烟碱、鱼藤酮、苦皮藤素、印楝素等植物提取物对昆虫也具有毒杀作用, 相应的植物源杀虫剂也被开发并用于农林害虫防治。

3.4 农业害虫物理防治技术

物理防治是指利用各种工具以及物理因素进行害虫防治的措施, 随着科技发展, 物理防治措施也日趋多样和高效。防虫网是相对简单和直接的防虫措施, 尤其适用于温室害虫的防治, 将其覆盖于通风口和门窗上即可阻止害虫的进入。色板诱杀是应用较为广泛的物理措施之一, 主要利用害虫对不同颜色的强烈趋性, 制作相应颜色的粘虫板用于蚜虫、粉虱、叶蝉、斑潜蝇、蓟马等害虫的诱捕。灯光诱杀利用昆虫的趋光性将其吸引至高压电网上诱杀。其中, 太阳能杀虫灯防治面积大、适用范围广, 常用于害虫诱杀、测报、调查。频振式杀虫灯利用害虫对光、波、色、味等的趋性对其进行诱杀。其光谱独特, 既可诱杀害虫, 又能保护天敌 (高凤彦, 2013; 郭祥川, 2014)。随着人们对粮食、蔬菜、水果品质的要求日益提高, 物理防治优势凸显, 在有害生物绿色防控体系中发挥着重要作用。

3.5 农业害虫化学生态调控技术

在农田生态系统中, 植物-昆虫-天敌之间及其各自内部存在着复杂的化学联系。植物在受到害虫为害时, 可以产生有毒物质驱避害虫, 并释放挥发性物质吸引害虫天敌。周边植物也可通过探知受害植物释放的挥发性化学信号提前做好防御准备 (Erb *et al.*, 2015; Schuman and Baldwin, 2015)。昆虫化学生态调控就是通过深入分析生态系统中“植物-害虫-天敌”之间营养

关系、化学信息联系等, 充分发挥植物抗虫物质、昆虫信息素等在控制害虫种群结构中的作用, 实现害虫防控的目的 (冯宏祖, 2013; 莫晓畅和娄永根, 2016)。基于昆虫性信息素开发的引诱剂产品可显著改变害虫种群结构, 目前市场上已经有多种相关产品。植物挥发性次生代谢物质是连接“植物-害虫-天敌”的重要媒介, 在驱避害虫及吸引害虫天敌方面具有广泛的报道和应用。“推-拉”的害虫防御措施就是基于此提出。

3.6 农业害虫转基因防治技术

我国转基因作物商业化始于 1997 年, 目前批准商业化种植的转基因抗虫植物只有转基因抗虫棉 (Bt 棉花), 种植比例占棉花面积的 80% 以上, 主要用于控制棉铃虫和红铃虫 *Pectinophora gossypiella* 的发生危害。对转基因棉田和常规棉田中棉铃虫种群动态监测显示, 转基因抗虫棉上的棉铃虫幼虫发生量可减少 90% 以上。棉铃虫具有很强的迁飞能力, 成虫可在棉花种植区和非棉花种植区之间频繁转移, 转基因抗虫棉的种植相当于“诱杀陷阱”, 破坏了棉铃虫季节转移的食物链, 从而压缩了其生态位。棉田以及周边玉米、大豆、花生等田块的棉铃虫发生和危害均受到极大抑制 (Wu *et al.*, 2008)。国外转基因抗虫棉种植多年后, 靶标害虫演化出了不同程度的抗性。由于中国北方小农户生产模式, 转基因棉田周边的玉米等作物很好地扮演了“天然庇护所”的作用, 我国棉铃虫对转基因抗虫棉的抗性一直维持在低水平。另一个靶标害虫红铃虫寄主植物单一, 缺乏天然庇护所。针对这一情况, 我国科研人员建立了红铃虫抗性监测预警技术体系, 开发了种植子二代杂交抗虫棉 (包含大约 25% 常规棉花) 的方式, 成功解决了缺乏天然庇护所的问题 (Wan *et al.*, 2017), 转基因抗虫棉对红铃虫的控制效率高达 95% 以上, 生产上已经无需施用农药进行控制。在利用作物转基因防治棉花害虫方面, 中国科学家创新性地发展了中国特定耕作制度下的害虫治理策略。在转基因抗虫棉种植 20 多年后, 棉铃虫和红铃虫对抗虫棉的抗性依然维持在较低的水平, 实现了转基因

因抗虫棉的可持续利用。

4 农业害虫防控技术未来发展方向与趋势

全球气候的变化、国际贸易与交流的日益频繁、农业生产的集约化发展等给农业害虫发生规律带来了新的变化。气候变暖导致部分农业害虫暴发成灾的可能性增大,害虫为害范围有进一步扩大趋势;国际贸易频繁导致检疫性害虫入侵我国的风险升高,检验检疫以及防控手段有待进一步改善;农业生产集约化在大幅度提高生产力的同时,往往具有种植结构单一,病虫害暴发风险增加等特点。另一方面,信息技术和生物技术等的快速发展也为农业害虫防治提供了许多新的手段。主要的发展方向包括:

4.1 智能化精准识别与监测预警技术

对农业害虫的精准识别是农业害虫监测预警和防治的重要前提条件。一些不同种类的昆虫在形态学方面具有较高的相似性,而有些同种昆虫不同发育时期的形态特征差异却较大,传统的图像数据整理能力难以满足要求。在图像获取方面,自然环境下光照角度、图像噪声、背景以及明暗对比的多变性也给精准识别带来很大困难,害虫监测数据可靠性难以保障,无法满足农业生产实际需求。随着成像水平、人工智能深度学习技术、雷达监测水平以及多时相光学遥感影像技术、计算机技术尤其是人工智能(Artificial intelligence, AI)技术的发展,农业害虫的精准识别有了新的保障。精准识别的实现结合害虫发生规律,将不断提高害虫监测预警的准确度,更好地服务于农业生产实际需求。

4.2 基因诊断与快速检测技术

害虫的种系以及遗传变异特征的准确鉴定关系着害虫防治方法的有效性。随着分子生物学和基因组学在昆虫学领域的应用,害虫种系和抗药性等分子机制将被揭示。利用重要农业检疫性有害生物分子生物学特征,可开发用于检测的特异性分子标记及其相应试剂盒产品,实现检

性有害生物的精准监测和快速预警。针对已知抗性位点设计特异性分子标记,可方便快捷地应用于田间害虫抗性频率监测,为抗性治理提供更加可靠的依据。利用基因组技术可对作物品种进行抗性基因诊断,为区域布局和健康管理提供技术支撑。

4.3 种群遗传调控技术

昆虫种群遗传调控是基于不育昆虫释放技术发展的一种控制昆虫种群结构的方法,能够在一定程度上实现对昆虫种群的有效调控。目前已经从基于辐射的不育调控技术(Sterile insect technique, SIT)发展到了基于遗传转化的调控技术。 γ 射线辐射最早用于不育昆虫种群的获得,之后安全性更高且更易获取的X射线逐渐取代 γ 射线用于昆虫的辐射不育。继而发现了不相容昆虫技术(Incompatible insect technique, IIT),即感染沃尔巴克氏体共生菌的雄虫与雌虫交配后,因体内共生菌不同导致胞质不相容,进而使虫卵不能孵化的技术。相关研究在白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 中已经取得良好效果(Zheng *et al.*, 2019),在灰飞虱 *Laodelphax striatellus* 和鳞类等节肢动物中同样存在沃尔巴克氏体菌引起的胞质不相容现象(李志伟和王志钢, 2006)。该技术在防治害虫方面的应用潜力巨大。另外,近年来不断成熟的昆虫基因编辑技术为种群遗传调控策略的实施提供了更为广阔的前景。

4.4 新一代农业转基因防治技术

通过转基因技术将Bt毒素等外源杀虫基因在农作物中表达,可获得对害虫具有抗性的植株,显著地降低了化学杀虫剂用量,改善了生态环境。但该技术也有一定的局限性。以Bt作物为例,往往只针对单一靶标害虫,且多年种植后害虫可能逐渐对Bt产生抗性。新一代农业转基因技术可以培育多价广谱抗虫作物,使昆虫难以产生抗性,将在害虫防治中扮演重要作用。另外,最新的研究表明,基于RNAi原理的植物转基因技术可有效地进行害虫防治(胡少茹等, 2019),且已经在灰飞虱、柑橘木虱 *Diaphorina citri*、小

菜蛾 *Plutella xylostella* 等多种害虫研究中得以证实。最新的昆虫基因编辑技术的发展也为害虫防控提供了新途径。利用基因编辑技术表达特定基因使昆虫后代性别比例失衡的研究已经在按蚊中开展 (Galizi *et al.*, 2014)。另外通过基因编辑发掘杀虫剂靶标以及改变害虫致害表型等都可用于害虫防治, 应用潜力巨大。

4.5 智能化精准对靶施药技术

粗放的喷药技术导致农药极大浪费的同时造成了生态环境污染, 提高农药利用率的精准施药技术是植保的发展趋势。随着人工智能技术、智能控制系统、识别探测技术的发展, 根据害虫类型和为害程度做到按需施药逐渐成为现实。例如适用于农田/果园等特殊环境条件的探测技术, 能确保对施药对象的外形轮廓、作物类型、生长密度等有精准把握, 农田/果园的虫害情况以及具体特征将被准确转化为施药命令传递给控制器, 进而通过智能控制系统控制喷药位置和喷药量, 做到差异化的按需精准施药(傅泽田等, 2007; 翟长远等, 2010)。

4.6 区域性生态调控技术

害虫区域生态调控策略从农田生态系统整体把控, 综合考虑害虫与天敌在不同农作物上的发生和发展过程及其迁移扩散规律, 采用区域性的间作、轮作、套作以及其他调控措施, 优化设计, 合理布局, 长期监测, 实现害虫的生态控制。食诱剂利用昆虫对蜜源植物具有趋向性的特点进行害虫诱杀, 降低其种群密度。性诱剂也是昆虫生态调控可利用的重要诱饵。采用高空探照灯在特定区域建立诱虫带, 结合频振式杀虫灯等设备可形成对迁飞害虫的立体防控, 据此开发适用于特定环境的重大跨区域迁飞害虫阻截技术, 可实现对迁飞害虫的有效阻截, 降低其暴发危害风险。未来的大规模集约化农业新模式更有利于将不同的生物因素以及非生物因素在一定区域内进行整体规划, 进而发挥各因素在害虫及其天敌种群调控方面的协同作用, 将害虫数量控制在较低水平。区域生态调控技术的研究和应用在农业

生产方式转变的大背景下, 将能够更充分发挥其在害虫调控方面的优势, 极具发展潜力。

参考文献 (References)

- Cotton Insect Research Group, 1995. A study on the key technic system of integrated management against the rampant damage of cotton bollworm. *Scientia Agricultura Sinica*, 28(1): 1–7. [中国农业科学院植物保护研究所棉虫组, 1995. 控制棉铃虫猖獗危害的区域性综合防治关键技术体系的研究. 中国农业科学, 28(1): 1–7.]
- Erb M, Veyrat N, Robert CAM, Xu H, Frey M, Ton J, Turlings TC, 2015. Indole is an essential herbivore-induced volatile priming signal in maize. *Nature Communications*, 6: 6273.
- Feng HZ, 2013. New cotton pest control pathways-chemical ecology regulation. *China Cotton*, 40(3): 1–5. [冯宏祖, 2013. 棉花害虫防治的新途径——化学生态调控. 中国棉花, 40(3): 1–5.]
- Fu ZT, Qi LJ, Wang JH, 2007. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 38(1): 189–192. [傅泽田, 祁力钧, 王俊红, 2007. 精准施药技术研究进展与对策. 农业机械学报, 38(1): 189–192.]
- Galizi R, Doyle LA, Menichelli M, Bernardini F, Deredec A, Burt A, Stoddard BL, Windbichler N, Crisa A, 2014. A synthetic sex ratio distortion system for the control of the human malaria mosquito. *Nature Communications*, 5: 3977.
- Gao FY, 2013. Biological and physical control techniques of greenhouse pests. *Modern Rural Science and Technology*, (19): 24–25. [高凤彦, 2013. 温室害虫生物防治和物理防治技术. 现代农村科技, (19): 24–25.]
- Gao XW, 2010. Current status and development strategy for chemical control in China. *Plant Protection*, 36(4): 19–22. [高希武, 2010. 我国害虫化学防治现状与发展策略. 植物保护, 36(4): 19–22.]
- Gong KY, 1978. Prospects for the use of chemical pesticides. *Environmental Science*, (2): 3–7. [龚坤元, 1978. 化学农药的使用前途问题. 环境科学, (2): 3–7.]
- Gu DX, Zhang GR, Zhang RJ, Pang Y, 2000. Review on fifty-years biological control of insect pests in southern China. *Acta Entomologica Sinica*, 43(3): 327–335. [古德祥, 张古忍, 张润杰, 庞义, 2000. 中国南方害虫生物防治 50 周年回顾. 昆虫学报, 43(3): 327–335.]
- Guo XC, 2014. Frequency vibration insecticidal lamp to control rice pests. *China Agricultural Information*, (3): 111. [郭祥川, 2014.

- 频振式杀虫灯物理防治水稻害虫. 中国农业信息, (3): 111.]
- 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 SR, Guan RB, Li HC, Miao XX, 2019. Application of RNAi in insect pest management: important progress and problems. *Acta Entomologica Sinica*, 62(4): 506–515. [胡少茹, 关若冰, 李海超, 苗雪霞, 2019. RNAi 在害虫防治中应用的重要进展及存在问题. 昆虫学报, 62(4): 506–515.]
- Jiang CX, Qi HH, Sun MY, Wu JJ, Zhang YH, Cheng DF, 2011. Occurrence dynamics and trajectory analysis of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 31(21): 6495–6504. [蒋春先, 齐会会, 孙明阳, 武俊杰, 张云慧, 程登发, 2011. 2010 年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析. 生态学报, 31(21): 6495–6504.]
- Li GB, Wang HX, Hu WX, 1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three-year result of releasing and recapturing of marked moths. *Acta Phytopylacica Sinica*, 3(2): 101–110. [李光博, 王恒祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验. 植物保护学报, 3(2): 101–110.]
- Li Q, 2019. Microbial pesticides are on the rise, with billions of markets waiting to be tapped. *Pesticide Market News*, (14): 41–43. [李秦, 2019. 微生物农药风头正劲, 数十亿市场待“开垦”. 农药市场信息, (14): 41–43.]
- Li ZW, Wang ZG, 2006. The role of *Wolbachia* in pest control and its research progress. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 17(3): 250–252. [李志伟, 王志钢, 2006. *Wolbachia* 在害虫防治中的作用及其研究进展. 中国媒介生物学及控制杂志, 17(3): 250–252.]
- Lin YD, Huang SF, Fang YM, Chen W, 1991. Studies on the biology and integrated control of citrus leaf-miner on *Citrus aurantium* var. *amara* Engl. *Journal of Plant Protection*, 18(1): 39–44. [林贻鼎, 黄水富, 方毅敏, 陈伟, 1991. 玳瑁桔潜蛾发生规律与综合防治研究. 植物保护学报, 18(1): 39–44.]
- Liu NX, Liu XL, Li QJ, Gu DX, Zhang GR, Zhang WQ, 1998. Preliminary report on the sensitivity test of insect-borne nematode to *Opogona sacchari* (Bojer). *Natural Enemies of Insects*, 20(3): 143. [刘南欣, 刘秀玲, 李秋贱, 古德祥, 张古忍, 张文庆, 1998. 昆虫病原线虫对蔗扁蛾敏感性试验初报. 昆虫天敌, 20(3): 143.]
- Liu NX, Yang P, Liu NZ, Lin JY, 1994. Preliminary report on control of *Phytagromyza* sp. by insect-borne nematodes in pea. *Natural Enemies of Insects*, 16(2): 80–82. [刘南欣, 杨平, 刘暖珠, 林锦英, 1994. 用昆虫病原线虫防治豌豆蛀杆蝇的试验初报. 昆虫天敌, 16(2): 80–82.]
- Liu ZW, Han ZJ, 2002. Research progress on drug resistance of white-backed planthopper. *Plant Protection Technology and Extension*, 22(10): 38–39. [刘泽文, 韩召军, 2002. 白背飞虱抗药性研究进展. 植保技术与推广, 22(10): 38–39.]
- Lu YH, Zhao ZH, Cai XM, Cui L, Zhang HN, Xiao HJ, Li ZY, Zhang LS, Zeng J, 2017. Progresses on integrated pest management (IPM) of agricultural insect pests in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 349–363. [陆宴辉, 赵紫华, 蔡晓明, 崔丽, 张浩男, 肖海军, 李振宇, 张礼生, 曾娟, 2017. 我国农业害虫综合防治研究进展. 应用昆虫学报, 54(3): 349–363.]
- Ma SJ, 1965. Stages of eradication of locust infestation. *Chinese Science Bulletin*, (12): 1072–1077. [马世骏, 1965. 根除蝗害的阶段. 科学通报, (12): 1072–1077.]
- Meng XL, 1964. Discussion on agricultural control of pests. *Entomological Knowledge*, 8(6): 285–288, 284. [孟祥玲, 1964. 略谈害虫的农业防治. 昆虫知识, 8(6): 285–288, 284.]
- Mo XC, Lou YG, 2016. Review of the use of naturally occurring, ecologically active chemicals to regulate insect pests in rice crops. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(3): 435–445. [莫晓畅, 娄永根, 2016. 水稻害虫化学生态调控研究进展. 应用昆虫学报, 53(3): 435–445.]
- Qi GJ, Lu F, Gao Y, Liang JL, Lan RQ, Zhang XX, Zhai BP, Lv LH, 2011. Analysis of a migration process and the source population of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) in 2010. *Acta Entomologica Sinica*, 54(10): 1194–1203. [齐国君, 芦芳, 高燕, 梁居林, 蓝日青, 张孝羲, 翟保平, 吕利华, 2011. 稻纵卷叶螟 2010 年的一次迁飞过程及其虫源分析. 昆虫学报, 54(10): 1194–1203.]
- Qi H, Jiang C, Zhang Y, Yang X, Cheng D, 2014. Radar observations of the seasonal migration of brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) in Southern China. *Bulletin of Entomological Research*, 104(6): 731–741.
- Qi HH, Zhang YH, Cheng DF, Han EB, Sun JR, 2010. Radar

- observation and trajectory analysis on the autumn return migration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) in 2009 in China. *Acta Entomologica Sinica*, 53(11): 1256–1264. [齐会会, 张云慧, 程登发, 韩二宾, 孙京瑞, 2010. 褐飞虱 2009 年秋季回迁的雷达监测及轨迹分析. *昆虫学报*, 53(11): 1256–1264.]
- Qiao GX, Qin QL, Liang HB, Cao YZ, Xu GQ, Gao ZL, Xu WJ, Wu YQ, Li XJ, Zhao ZW, Cheng XY, 2011. A new aphid-monitoring network system based on suction trapping and development of “green techniques” for aphid management. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(6): 1596–1601. [乔格侠, 秦启联, 梁红斌, 曹雅忠, 许国庆, 高占林, 徐伟钧, 武予清, 李学军, 赵章武, 成新跃, 2011. 蚜虫新型预警网络的构建及其绿色防控技术研究. *应用昆虫学报*, 48(6): 1596–1601.]
- Qiu TD, Chen HJ, Mao WF, Li L, Chen DY, 1994. Summary of comprehensive control experiment of *Carposina sasakii* Matsumura. *China Fruits*, (2): 39, 44. [邱同铎, 陈汉杰, 毛文付, 李磊, 陈冬亚, 1994. 桃小食心虫综合防治试验总结. *中国果树*, (2): 39, 44.]
- Schuman MC, Baldwin IT, 2015. The layers of plant responses to insect herbivores. *Annual Review of Entomology*, 61(1): 373–394.
- Sun DS, Yin GS, Shen SC, 1991. On the bionomics and control of hawthorn trunk borer. *Journal of Plant Protection*, 18(3): 231–234. [孙德寿, 尹冠时, 申史成, 1991. 山楂长小蠹发生规律和综合防治研究. *植物保护学报*, 18(3): 231–234.]
- Wan P, Xu D, Cong S, Jiang Y, Huang Y, Wang J, Wu H, Wang L, Wu K, Carrière Y, Mathias A, Li X, Tabashnik BE, 2017. Hybridizing transgenic Bt cotton with non-Bt cotton counters resistance in pink bollworm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(21): 201700396.
- Wang L, Liao WJ, Wang WX, 2010. The causes and preventive measures of pest insecticide resistance. *Modern Agricultural Technology*, (23): 194. [王凜, 廖文君, 王文雪, 2010. 害虫抗药性产生原因及预防措施. *现代农业科技*, (23): 194.]
- Wang ZY, Lu X, He KL, Zhou DR, 2000. Review of history, present situation and prospect of the Asian maize borer research in China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 31(5): 402–412. [王振营, 鲁新, 何康来, 周大荣, 2000. 我国研究亚洲玉米螟历史、现状与展望. *沈阳农业大学学报*, 31(5): 402–412.]
- Wang ZZ, 1991. Preliminary progress has been made in comprehensive control of the rice locust in Eastern Hebei province. *Plant Protection*, 17(1): 47–48. [王振庄, 1991. 冀东稻区稻蝗综合防治初见成效. *植物保护*, 17(1): 47–48.]
- Wu KM, 2018. Monitoring and control of major pest population migration. Yangzhou: Annual Conference of The Crop Science Society of China 2018. 22. [吴孔明, 2018. 作物重大害虫种群迁飞的监测与控制. 扬州: 2018 中国作物学会学术年会. 22.]
- Wu KM, Lu YH, Feng HQ, Jiang YY, Zhao JZ, 2008. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton. *Science*, 321(5896): 1676–1678.
- Wu KM, Guo YY, 2000. The main achievements and prospects of cotton pest research in the 20th century in China. *Entomological Knowledge*, 37(1): 45–49. [吴孔明, 郭予元, 2000. 我国 20 世纪棉花害虫研究的主要成就及展望. *昆虫知识*, 37(1): 45–49.]
- Wu LM, Lu HS, He PT, 1991. The comprehensive control effect of *Pleonomus canaliculatus* in wheat field is remarkable. *Plant Protection*, 17(5): 55. [吴立民, 陆化森, 何培谭, 1991. 麦田沟金针虫综合防治效果显著. *植物保护*, 17(5): 55.]
- Wu Y, Li YP, Jiang DZ, 1981. Integrated control of cotton pests in Nanyang region. *Acta Entomologica Sinica*, 24(1): 34–41. [吴钰, 李映萍, 姜典志, 1981. 南阳棉区棉虫的综合防治. *昆虫学报*, 24(1): 34–41.]
- Wu YD, Shen HW, Zhang Z, Wang XL, Shi Y, Wu SW, Yang YH, 2019. Current status of insecticide resistance in *Spodoptera frugiperda* and counter measures to prevent its development. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 599–604. [吴益东, 沈慧雯, 张正, 王兴亮, 施雨, 武淑文, 杨亦桦, 2019. 草地贪夜蛾抗药性概况及其治理对策. *应用昆虫学报*, 56(4): 599–604.]
- Xia JY, 2010. Development and expectation of public and green plant protection. *China Plant Protection*, 30(1): 5–9. [夏敬源, 2010. 公共植保、绿色植保的发展与展望. *中国植保导刊*, 30(1): 5–9.]
- Xu LJ, Yang P, 1992. The application of codling moth nematode against the litchi stemborer. *Journal of Plant Protection*, 18(3): 217–222. [徐洁莲, 杨平, 1992. 应用苹果蠹蛾线虫防治荔枝拟木蠹蛾的研究. *植物保护学报*, 18(3): 217–222.]
- Zhai CY, Zhu RX, Zhang ZJ, Ma LL, Zhnag QY, 2010. Status analysis of precision pesticide application techniques. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 32(5): 9–12. [翟长远, 朱瑞祥, 张佐经, 马亮亮, 张启遇, 2010. 精准施药技术现状分析. *农机化研究*, 32(5): 9–12.]
- Zhang GX, Liu DM, Zhao JQ, Zhu SF, Li BZ, Yang XF, 1990. On the development of self-controlled cotton ecosystem in

- early-maturing cotton region in Northeast China. *Journal of Plant Protection*, 16(1): 1–4. [张广学, 刘德明, 赵季秋, 朱淑范, 李本珍, 杨秀芬, 1990. 东北早熟棉区组建自控棉田生态系的研究. 植物保护学报, 16(1): 1–4.]
- Zhang YH, Cheng DF, 2013. Progress in monitoring and forecasting of insect pests in China. *Plant Protection*, 39(5): 55–61. [张云慧, 程登发, 2013. 突发性暴发性害虫监测预警研究进展. 植物保护, 39(5): 55–61.]
- Zhang YH, Yang JG, Jin XH, Cheng DF, Tian Z, Li YL, 2009. Aerial band barrier formed by vertical-pointing searchlight-traps against the migrating *Locostege sticticalis*. *Plant Protection*, 35(6): 104–107. [张云慧, 杨建国, 金晓华, 程登发, 田喆, 李云龙, 2009. 探照灯诱虫带对迁飞草地螟的空中阻截作用. 植物保护, 35(6): 104–107.]
- Zhao SH, 1962. Research status and development direction of chemical control of agricultural pests. *Journal of Plant Protection*, 1(4): 351–364. [赵善欢, 1962. 农业害虫化学防治研究的现状及今后发展方向. 植物保护学报, 1(4): 351–364.]
- Zheng XY, Zhang DJ, Li YJ, Yang C, Wu Y, Liang X, Liang YK, Pan XJ, Hu LC, Sun Q, Wang XH, Wei YY, Zhu J, Qian W, Yan ZQ, Parker AG, Gilles JRL, Bourtzis K, Bouyer J, Tang MX, Zheng B, Yu JS, Liu JL, Zhuang JJ, Hu ZG, Zhang MC, Gong JT, Hong XY, Zhang ZB, Lin LF, Liu QY, Hu ZY, Wu ZD, Baton LA, Hoffmann AA, Xi ZY, 2019. Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes. *Nature*, 572(7767): 56–61.
- Zhou MZ, 1956a. About agricultural control. *Scientia Agricultura Sinica*, (1): 12–14. [周明群, 1956a. 关于农业防治. 农业科学通讯, (1): 12–14.]
- Zhou MZ, 1956b. Introduction to agricultural control methods. *Entomological Knowledge*, 2(2): 51–54. [周明群, 1956b. 农业防治法概论. 昆虫知识, 2(2): 51–54.]
- Zhou WL, 2006. Important progress has been made in the comprehensive control of migratory locust in China. *Pratacultural Science*, 23(9): 36. [周万良, 2006. 我国飞蝗综合防治取得多项重要进展. 草业科学, 23(9): 36.]
- Zhu J, Jiang YY, Zhai BP, 2018. Autumn migration of *Mythimna separata*: A case study of the 2012–2013 outbreak. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 802–809. [朱健, 姜玉英, 翟保平, 2018. 粘虫的秋季回迁: 2012–2013 年大发生年个案分析. 应用昆虫学报, 55(5): 802–809.]
- Zhu ZR, 2012. Ecological Engineering to Control Rice Pests. 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.]
- Zhu ZR, Cheng JA, 2013. The evolution and perspective of rice insect pest management strategy in China. *Plant Protection*, 39(5): 25–32. [祝增荣, 程家安, 2013. 中国水稻害虫治理对策的演变及其展望. 植物保护, 39(5): 25–32.]