

特 约 稿 件

Invited Paper

# “十三五”化学农药减施增效综合技术研发成效与标志性成果

张 凯<sup>1</sup>, 陈彦宾<sup>1</sup>, 张 昭<sup>1</sup>, 冯推紫<sup>2</sup>, 杨礼胜<sup>1\*</sup>

(1. 农业农村部科技发展中心, 北京 100122; 2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101)

**摘要** “化学肥料和农药减施增效综合技术研发”试点专项实施以来, 综合考虑现阶段我国农业科研体系构架和资源分布情况, 全面启动了 3 大领域 12 项任务 49 个项目, 涉及 18 个交叉学科领域的 57 个国家重点实验室、236 个各类省部级重点实验室、434 支课题层面研究团队, 汇聚了国内相关学科领域 80% 的一流科学家, 形成了“上中下游无缝对接、政产学研推一体化”的专业研发团队, 对推动我国植物病理学、农业昆虫与害虫防治、农药学、植物检疫与农业生态健康、农业机械化工程、农业电气化与自动化、植物营养生理与遗传、养分资源再利用与污染控制等相关学科发展起到了凝聚科研队伍、培养创新人才、优化结构布局、促进交叉融合、推动成果转化的作用。本文综述了化学农药减施增效中基础理论领域、共性关键技术领域的部分实施进展和标志性成果, 以期帮助相关研究人员横向了解专项进展和实施成效, 促进不同板块、不同项目、不同课题间研发团队的纵向交流、横向沟通, 形成合力。

**关键词** 化学农药; 减施增效; 实施成效; 国家重点研发计划

**中图分类号:** S 482 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2020597

## The landmark achievements in comprehensive technology development for reduction and efficiency enhancement of chemical pesticide application during the 13th Five-Year Plan

ZHANG Kai<sup>1</sup>, CHEN Yanbin<sup>1</sup>, ZHANG Zhao<sup>1</sup>, FENG Tuizi<sup>2</sup>, YANG Lisheng<sup>1\*</sup>

(1. Development Center of Science and Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100122, China;  
2. Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

**Abstract** By collectively considering the current structure of agricultural research system and resource distribution in China, the specific pilot project “Comprehensive Technology Development in Reduction and Efficiency Enhancement of Chemical Fertilizers and Pesticides Application” has launched 12 tasks and 49 projects in three major fields. This project has brought together over 80% of top scientists working in 18 interdisciplinary fields from 57 national key laboratories, 236 provincial & ministerial key laboratories and 434 research teams, forming a professional team with the feature of “seamless connection between upstream, middle and downstream, and integration of study, research and promotion”. Many relevant subjects obtained financial support from this project, including phytopathology, entomology, pesticide science, plant quarantine and agroecological health, agricultural mechanization engineering, agricultural electrification and automation, plant nutrition physiology & heredity, nutrient resource reuse & pollution control, and so on. Furthermore, this project has also made significant contributions in gathering research teams, cultivating innovative talents, optimizing structural layout, facilitating cross integration, and promoting the transformation of science & technology. This article summarized the landmark achievements in the projects “Reduction and Efficiency Enhancement of Chemical Pesticides” and “Common Key Technology Development”, in order to help scientists to understand the progress and implementation

收稿日期: 2020-11-10 修订日期: 2020-11-28

基金项目: 专业机构管理费(2069999)

\* 通信作者 E-mail: yanglisheng@agri.gov.cn

effects of the projects, promoting longitudinal and lateral communication between different research teams.

**Key words** chemical pesticides; reduction and synergy; achievements; National Key R & D Program of China

“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”试点专项(以下简称“两减专项”)实施以来,综合考虑现阶段我国农业科研体系构架和资源分布情况,全面启动了3大领域12项任务49个项目。作为“十三五”期间中央财政资金体量最大的农业类专项,两减专项涉及面广,影响力大,研究任务中涉及了18个交叉学科领域的57个国家重点实验室、236个各类省部级重点实验室、434支课题层面研究团队,汇聚了国内相关学科领域80%的一流科学家,形成了“上中下游无缝对接,政产学研推一体化”的专业研发团队,对推动我国植物病理学、农业昆虫与害虫防治、农药学、植物检疫与农业生态健康、农业机械化工程、农业电气化与自动化、植物营养生理与遗传、植物根际营养、新型肥料与数字化施肥、养分资源再利用与污染控制等相关学科发展起到了凝聚科研队伍、培养创新人才、优化结构布局、促进交叉融合、推动成果转化的作用。其中,化学农药减施增效研究中涉及基础理论类项目5个、共性关键技术类项目10个,研究团队分别由中国农业科学院植物保护研究所、中国科学院动物研究所、中国科学院微生物研究所、天津大学、贵州大学、中国农业大学、华南农业大学、华东理工大学等国内优势单位牵头,涉及中央财政经费6.28亿元。本文综述了两减专项化学农药减施增效基础理论领域、共性关键技术领域的部分实施进展和标志性成果,以期帮助相关研究人员横向了解专项进展和实施成效,促进不同板块、不同项目、不同课题间研发团队的纵向交流、横向沟通,通过优势单位的协作攻关,整合上中下游力量,形成合力。

## 1 项目实施进展

### 1.1 基础理论研究领域

#### 1.1.1 农业生物药物分子靶标发现与绿色药物分子设计

本研究构建了3个关键技术平台,解析了昆虫和病菌关键酶系晶体结构,开发低蜂毒原创杀虫剂1个,发表论文161篇,申请专利98项。围绕绿色农药创新,构建了从功能基因、蛋白到靶标的靶标发现技术平台,从微生物、天然产物到先导的先导挖掘技术平台,以小鼠、藻类、植物、水体和土壤微生物群

落为对象的多尺度风险评价技术平台。解析了昆虫几丁质降解酶全家族及稻瘟病菌关键效应蛋白AvrPib的晶体结构,首次明晰了几丁质酶OfChitI抑制剂互作机制。对蜜蜂安全的创新农药啉虫啉获得原药、10%悬浮剂及吡蚜酮复配剂型的农药正式登记。形成了“靶标挖掘-互作机制-分子设计-先导发现-农药创新”全链条创新体系。

#### 1.1.2 活体生物农药增效及有害生物生态调控机制

从“生防生物(生防微生物和天敌昆虫)-病虫-作物”互作关系出发,发现了新生防微生物(Bt、绿僵菌、白僵菌、木霉、芽胞杆菌和假单胞菌等)、天敌昆虫(捕食螨、茧蜂、瘿蜂、赤眼蜂等)和生态调控因子(功能植物等)等新防控途径。例如以苏云金芽胞杆菌(Bt)和线虫为模型,揭示了一种sRNA负调控Bt杀线虫蛋白欺骗宿主趋避行为的新机制,为高效速效Bt制剂开发提供了新策略;揭示了烟粉虱通过操控番茄间信息传递快速扩散的新机制,为未来选育正确识别虫害挥发物的抗虫番茄品种提供依据;揭示了MYC2-MTB负反馈回路调控茉莉酸信号终止的机制,利用CRISPR/Cas9基因编辑技术获得MTB功能缺失的番茄株系,为制定病虫害控制“推-拉”策略方案提供了理论基础。阐明了主要生防微生物主要活性成分、作用机理、环境适应性及宿存机制等,研究了优势天敌昆虫的生长发育与生殖的分子机制及滞育诱导、滞育维持和滞育解除的调控机制,揭示了区域性多生态调控因子协同增效的作用机制。提出了新生防微生物、天敌昆虫、生态调控因子作用新模式。为生防微生物稳定性、天敌昆虫高效繁育奠定了理论基础,为发展基于多生防因子协同控害功能的区域性病虫害生态调控技术、化学农药减施等提供了技术支撑。

#### 1.1.3 化学农药在我国不同种植体系的归趋特征与限量标准

明确了吡虫啉、啉虫脒、啉菌酯等27种农药在我国不同种植体系中的沉积、迁移、消解、代谢规律,绘制了我国粮食、蔬菜、果树、经济作物体系下常用农药的沉积谱、消解谱和代谢谱<sup>[2]</sup>。提出农药施用限量的概念,基于农药有效性、食品安全和环境安全的阈值要求,创建了农药施用限量标准的原则和方法,并制定了吡虫啉、啉虫脒、烯酰吗啉、苯醚甲环唑

等农药在不同种植体系中的农药施用限量标准草稿 24 项。

#### 1.1.4 化学农药对靶高效传递与沉积机制及调控

重点研究了环境因子、靶标作物界面结构特性、雾化参数、功能助剂等影响农药对靶传递、分布沉积及飘移流失的损失规律。基于靶标作物叶面的结构特性,构建了具有环境响应释放的载药系统,揭示了影响载药颗粒叶面沉积与释放的尺度和界面效应;基于药液理化性质,探究了助剂对提高农药有效沉积的作用机制。在风洞可控环境下,系统研究不同雾化参数所产生雾滴/雾滴云,在典型场景环境条件下的演化、飘移、沉积、分布规律及互作效应,构建了单雾滴和多雾滴模型;通过典型靶标作物冠层有效沉积结构与剂量效应之间存在的“水桶效应”“位置效应”和“地雷效应”,揭示了稻田农药茎叶喷雾的损失途径和根部施药的调控机制;利用接触角测量仪、超景深三维显微镜和高速摄像机,研究并揭示了助剂性质和叶面特性是影响雾滴蒸发、弹跳和沉积的主控因素。

#### 1.1.5 耕地地力影响农业有害生物发生的机制与调控

明确了耕地地力对棉花黄萎病的发病影响和致病机理、对玉米重要害虫种群的影响机理以及对油菜菌核病及根肿病的影响机理,确定了相关调控技术,建立了防控技术体系;明确了关键微生物类群在大豆孢囊线虫抑制性土壤中的作用;明确了设施环境及耕地地力对番茄病害的影响及调控机理。初步构建农业有害生物和耕地地力数据库,提出基于耕地地力提升和农耕模式优化的绿色有害生物防控方法 10 项。

### 1.2 共性关键技术领域

#### 1.2.1 化学农药协同增效关键技术及产品研发

针对农药应用中选药不对症、用药不对靶、混药不科学、技术不配套等导致农药过量施用的突出问题,研发了精准快速选药技术和产品、协同增效技术和产品、对靶精准智能释放技术和产品,构建了不同农区农作物全程减量用药协同增效技术体系。成功研制出基因、生化和群体水平选药试剂盒 82 个,筛选获得敏感单剂 51 个、协同增效组合 141 个;优化制剂配方 8 个、研发新制剂 32 个、新助剂 7 个,获得农药产品登记 8 个;创制农药载体新材料 7 个,构建 24 个对靶精准智能释药技术通用平台;集成了 59

个主要农作物重大病虫草害防治单项技术和全程化学防治减量协同增效技术。相关产品和技术已在黑龙江、辽宁、河北、河南、广西等多个省(自治区)验证示范和推广应用,示范面积 4 300 km<sup>2</sup>。

#### 1.2.2 天然绿色生物农药的合成生物学与组合合成技术

围绕新农药活性分子的发掘,充分利用微生物资源及我国特有药用植物资源构建大容量活性组分库和化合物库,针对农业病虫害作用靶标建立高通量的虚拟和实体筛选平台,并基于活性代谢物开展合成途径解析、结构衍生优化、高产菌株构建等的合成生物学研究,以及绿色低碳制造工艺研究,同时建立并优化目标天然绿色生物农药结晶工艺及新型制剂研究,提高了生物农药品种稳定性和利用率,实现示范生产和产品推广。完成了 10 265 个微生物源与 10 400 个植物源组分代谢物库的构建,筛选获得农药活性化合物 204 个。完成了印楝、川楝、苦皮藤 3 种杀虫植物的基因组测序,部分挖掘了印楝素、川楝素、苦皮藤素的合成关键基因;开展了阿维菌素 B2a 的结晶工艺研究,有效提高了产品稳定性,精品收率达 80%,纯度达 90%;建立了整体生防技术解决方案 2 套,生物农药示范推广面积超过 8.8 万 hm<sup>2</sup>。

#### 1.2.3 天敌昆虫防控技术及产品研发

针对天敌产品种类少、生产效率低、货架期短、与现代植保机械不配套等技术瓶颈,挖掘天敌昆虫资源,优化人工饲料、替代寄主及发育调控技术,革新生产工艺,制定生产标准,规模化生产天敌昆虫及捕食螨产品,探索粮经作物天敌互作及协同控害技术。建立天敌扩繁生产线 14 条,创制天敌昆虫、捕食螨产品 21 种,扩繁各类天敌 3 500 亿头;研发针对草地贪夜蛾的蠋蝽、益蝽等 2 种产品;完成天敌扩繁与防效评估标准 15 项;研发高效释放配套设备 7 套,“一卵多蜂”“混合放蜂”“无人机释放”等显著提升释放效率和防治效果;主动对接专项中设立的集成示范类项目,在吉林、黑龙江、天津、山东、广东、重庆等主产区示范推广 19.3 万 hm<sup>2</sup>。

#### 1.2.4 新型高效植物生长调节剂和生物除草剂研发

针对高效安全生物源调节剂、除草剂缺乏问题,研究发现一批新型的具有调节植物生长与除草功效的菌株和代谢产物,创制一批满足作物生产重大需

求的新产品,建立相应的绿色高效生产工艺,实现新产品的配套综合应用。获得植物生长调节和除草功效的微生物菌株 50 株,分离鉴定、筛选获得植物生长调节和除草活性代谢产物 27 个。进行了冠菌素、海藻酸寡糖、赤霉素 A4、氟苄硫缩诱醚、二氢赤霉素、甲基环丙烯、丁羟咯酮、戊羟咯草酮、齐整小核菌、辛酸等 10 个新产品生产工艺及剂型研究,其中 10 个新产品进入农药登记阶段,新增 4 个产品获得新农药登记试验证书。赤霉素 A4 完成了农药登记全部资料,取得原药生产许可证,14-羟基芸苔素甾醇等 6 个产品获得农药登记。建立了不同生态区主栽作物的生物调节剂和生物除草剂的应用技术 12 套;制定省级技术规程 3 项。

#### 1.2.5 种子、种苗与土壤处理技术及配套装备研发

完成了主要粮食作物、经济作物种子携带病原物检测技术、主要蔬菜种子种苗携带病原物检测技术和主要苗木、草莓、三七等种苗携带病原物检测技术研究,共制定了水稻种子携带稻瘟病菌的环介导恒温核酸扩增检测(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)等检测技术规程 21 项。研发出高效低风险种子处理剂产品 14 个,完成 2 个种子处理悬浮剂产品登记,建成 2 条种子处理种衣剂生产线并投入生产。研发土壤处理新技术 4 项,明确了土壤厌氧消毒技术、土壤火焰消毒技术、氯化苦与生物熏蒸轮用技术、棉隆与乙蒜素轮用技术要点。完成了基于专家系统的智能化种子包衣装备、智能多模式种子丸粒化技术装备、种子干热处理装备、土壤高温火焰处理装备、土壤射频处理装备、固态和液态药剂土壤处理装备、化学土壤消毒装备和广角电喷式土壤熏蒸装备的第二轮样机试制,年度推广装备 3 600 多台。2019 年度累计开展示范应用面积 5.5 万  $\text{hm}^2$ ,主要在水稻、玉米、小麦等作物开展种子、种苗处理技术示范,其中寒地水稻恶苗病配套防治技术示范应用面积 4 万  $\text{hm}^2$ ;在蔬菜、中药材等作物开展土壤处理技术示范,示范面积达到 0.8 万  $\text{hm}^2$ 。

#### 1.2.6 地面与航空高工效施药技术及智能化装备

项目针对我国农业植保作业中施药装备和技术落后、农药跑冒滴漏严重、装备自主研发能力薄弱的问题,在施药基础理论和关键技术的基础上,研发适用于各种作物和地形环境的高工效、智能化的航空精准施药关键部件、装备和技术,研发植保无人飞机专用药剂和助剂,制定新产品或新技术的作业标准

或规范,开展规模化的应用和示范,推动植保专业化服务应用模式的建立。目前,项目已研发航空施药高工效智能化装备 15 套,地面施药装备 13 套,研发植保无人飞机专用药剂助剂 15 种,3 年示范面积超过 93.3 万  $\text{hm}^2$ ,制订或发布植保无人飞机及地面装备产品和施药作业标准或规范 22 项。其中,植保无人飞机装备的高效化、自动化、智能化、施药的精准化程度取得了快速的进步,作业效率可达 0.2~0.3  $\text{km}^2/\text{d}$ ,实现了全自主操控模式,并向智能化作业模式过渡;解决了航空喷洒作业中的重喷、漏喷问题;植保无人飞机国内保有量和作业面积已从 2016 年的 5 546 架、192.1 万  $\text{hm}^2$  次增长到 2019 年的约 5 万架、3 066.7 万  $\text{hm}^2$  次。

#### 1.2.7 高效低风险小分子农药和制剂研发与示范

针对农药品种老化、防效低、抗性严重等问题,克服天然仿生合成、不对称合成和清洁生产等技术难点开发了环氧虫啉、环吡氟草酮和丁吡吗啉等 3 个拥有我国自主知识产权的新农药品种,并取得农药正式登记证书。其中,环氧虫啉具有杀虫谱广、毒性低、活性高等特点,先后获得美国和欧盟专利授权。环吡氟草酮是全球第一个可用于小麦田防除禾本科杂草的 HPPD 抑制剂类除草剂,对小麦安全性高、防除效果好,能够解决小麦田抗性杂草危害严重、部分杂草无药可防的难题,该产品已向美国、英国、德国、法国等 50 多个国家申请专利。丁吡吗啉对粮经作物的疫病、霜霉病、炭疽病及烟草黑胫病等具有较好的保护和治疗效果。环氧虫啉、丁吡吗啉已完成转让。

#### 1.2.8 作物免疫调控与物理防控技术及产品研发

从诱导植物自身免疫、RNA 干扰、物理防控角度出发,研制高效、安全、专一性强的新型生物防治技术和产品。挖掘高效免疫诱导子 12 个,确定其抗病、抗虫、抗逆功能;获得高效抗病虫 RNA 靶标基因 81 个。揭示免疫诱导剂、RNAi 作用机制,紫外光、非发光材料等调控害虫行为机理。研制免疫诱导剂、RNAi、物理防控新产品 25 个,“阿泰灵”等 4 个具有自主知识产权的免疫诱导剂新产品获得农药登记;建立了蛋白类、糖类及化合物类免疫诱导剂规模化生产线和专用诱虫灯、智能型诱虫灯规模化生产线 8 条,制定相关企业标准和地方标准 4 项。以免疫诱导剂为基础,建立了免疫调控和物理防控综合技术集成与应用体系,进行了蔬菜、马铃薯、苹

果、水稻等作物病虫害的防控,示范推广 10 万  $\text{hm}^2$ 。

### 1.2.9 新型高效生物杀虫剂研发

针对生物杀虫剂研发资源筛选改良、工艺开发、产品登记推广 3 个关键环节开展研究。资源筛选改良方面,建立新筛选评价技术 3 项,筛选改造获得高效株系 35 株,活性代谢产物 16 个,发现杀虫相关功能基因 23 个,为新产品开发储备了优质菌株、代谢产物、功能基因资源。生产工艺开发方面,建立新生产工艺 6 项,解决了生物杀虫剂发酵生产过程中高能耗、高排放问题。产品登记推广方面,利用上述主要活性代谢产物与菌株,研制完成新剂型 5 个;生物杀虫剂 11 个,获得农药登记证 11 个;利用上述产品,提出 3 项减药理论及 12 项配套技术,产品与配套技术累计应用示范 22.8 万  $\text{hm}^2$  次。

### 1.2.10 新型高效生物杀菌剂研发

围绕生物杀菌剂产品种类少、防效不稳定、剂型单一、制造成本高、高效使用技术缺乏等问题,开展了防病抗病生物资源及其活性物质挖掘、高效生物杀菌剂及植物微生态制剂创制、低成本低污染制造工艺建立、高效应用技术集成创新等研究。通过广泛的生防资源收集、筛选、室内和田间评价,获得细菌、真菌、病毒等生防菌株超过 200 株;获得微生物和植物源活性代谢产物近 70 个,其中先导化合物 5 个;构建了生防微生物高通量筛选技术及评价体系,包括国际上首个木霉多型鉴定系统;创制安全高效的生物杀菌剂新产品 12 个,研制微生物新制剂 20 种;建立新剂型和配套应用技术体系 3 种;研发低成本、低污染制造工艺 3 项;获得国家农药登记证 5 个,有 8 个产品进入农药登记程序。

## 2 标志性成果

### 2.1 基础理论领域

#### 2.1.1 揭示了棉铃虫 CYP6AE 基因簇对顺式氰戊菊酯和茚虫威等药剂敏感性影响机制

中国农业科学院植物保护研究所蒋红云项目组采用反向遗传与离体代谢相结合的新策略,发现 CRISPR-Cas9 介导的 CYP6AE 基因簇敲除棉铃虫品系对顺式氰戊菊酯、茚虫威两种杀虫剂和花椒毒素、2-十三烷酮两种植物次生性化合物的敏感性显著提高,并锁定参与解毒代谢的 5 个 P450 基因,证实 CYP6AE 基因簇在药剂敏感性变化及寄主植物适应性中的重要作用,为精准快速选药试剂盒的研

究提供了重要线索<sup>[1]</sup>。

#### 2.1.2 阐明了农药载药体系在植株体内剂量传输与分布规律

中国农业科学院植物保护研究所黄啟良项目组构建了静电作用、载药颗粒结构、环境因子调控的控制释放载药体系,首次研究了介孔二氧化硅纳米载药体系在黄瓜植株中的吸收、传输、代谢规律及残留风险<sup>[2]</sup>,明确了纳米载体可以调控农药的内吸传导,可食部分的残留检出低于国家限量标准。

#### 2.1.3 揭示了番茄灰霉病的分子调控机制

中国科学院微生物研究所郭良栋项目组提出植物新型肽类激素 PSK 介导  $\text{Ca}^{2+}$  信号与生长素途径调控番茄对灰霉病抗性的信号途径,以及 *N*-癸酰基高丝氨酸内酯介导茉莉酸途径调控番茄灰霉病防御机制,揭示了番茄灰霉病的致病分子调控机制,为利用根际细菌分泌物提高植物抗病性提供了理论基础<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.4 揭示了 sRNA 负调控 Bt 杀线虫蛋白欺骗宿主趋避行为新机制

昆虫和线虫等容易对生物农药中的活性成分产生趋避行为而导致相关产品杀虫效果降低,中国科学院动物研究所戈峰项目组以苏云金芽胞杆菌和线虫为模型,揭示了一种由 sRNA 介导的病原菌欺骗宿主趋避行为的新策略。发现一种新型 sRNA 通过在体外抑制 Bt 杀线虫毒素 Cry5B 的表达以欺骗宿主的拒食行为,然而一旦进入宿主体内,抑制作用解除,Cry5B 毒素可大量表达,从而帮助 Bt 更高效杀死宿主。该研究为高效速效 Bt 制剂开发提供了新策略,同时启示在生物农药开发中需应对靶标害虫的趋避行为,提高生物农药被取食的几率,可大幅提高产品效果,进一步减少化学农药用量<sup>[4]</sup>。

#### 2.1.5 揭示了水稻农药根部施用的增效规律及调控机制

中国农业科学院植物保护研究所黄啟良项目组明确了水稻田农药根部施用的增效规律及调控机制。基于典型的水稻田茎叶喷雾研究发现,农药药液约 80% 沉积在冠层中上部,这对防控稻瘟病、二化螟、稻纵卷叶螟等有利;水稻基部沉积量不足 20%,基部茎秆更是少于 2%,这和水稻基部常发生稻飞虱、纹枯病等疫情现象形成落差<sup>[5]</sup>。研究团队利用生物可降解材料和控制释放技术,构建了基于有害生物为害时空规律的剂量传递与分布调控的缓

释粒剂型,研究了农药在水稻植株中的剂量传输及增效规律,并在田间进行了应用验证试验。结果表明,相比自防田,根施1次缓释粒剂可省药47%~65%,缓释粒剂+破口药可省药31%~55%,缓释粒剂+破口药+齐穗药可省药5%~37%,减少用药2次,增产9.6%。

## 2.2 共性关键技术领域

### 2.2.1 精准快速选药技术及产品研发取得显著成效

中国农业科学院植物保护研究所蒋红云项目组以不同地域施药水平差异所带来的化学农药防治靶标药剂敏感性变化为基础,针对群体、生化以及基因水平三级敏感性标志物,开展选药技术及试剂盒研制<sup>[6-7]</sup>。在群体水平上,采用药膜法研制了65个杀虫剂、抗性当季快速检测方法(resistance in season quick test, RISQ)研制成功6个除草剂的精准快速选药技术及试剂盒;在酶蛋白水平上,利用莽草酸和抗草甘膦基因(*EPSPS*)单边特异性生物标志物研制2个除草剂精准快速生化选药技术;在基因水平上,利用LAMP技术研制了7个杀虫剂、1个杀菌剂、1个除草剂的精准快速选药技术。杀虫剂和杀螨剂群体水平选药试剂盒田间检测时间为1~3 h,相对于室内生测选药缩短了至少1 d,除草剂选药时间从长于30 d缩短到7~12 d(群体水平选药试剂盒)、4 d(酶蛋白水平选药试剂盒)和1.5 h(基因水平选药试剂盒),杀菌剂从3 d以上缩短到70 min,提高了选药效率。项目成功突破除草剂、杀菌剂田间选药技术瓶颈,实现了对农作物病虫害田间快速选药的全覆盖,保证了化学农药的防效,使药剂应用从“外围推荐”到“依田定制”。

### 2.2.2 植保无人飞机实现高度自动化作业

华南农业大学兰玉彬项目组共研发15种型号的植保无人飞机产品,涵盖了国内油动单旋翼、电动单旋翼及电动多旋翼等3种典型和先进的机型。植保无人飞机产品的可靠性大大提高,已进入大规模示范或作业阶段。实现了自动化操控,并具备了一定的智能化功能。可根据预先测绘的作业边界与设置的飞行参数,自动规划航线;一键启动,实现作业全程全自主飞行,具有断点续喷功能等;采用实时动态差分法(real-time kinematic, RTK)差分定位系统,作业航迹精度提升至厘米级<sup>[8]</sup>;支持大数据管理平台,实现无人机监控及飞防服务的管理;3种机型都具备了仿地飞行与自主避障的功能,个别机型还

具备夜间飞行与一控多机(多机协同作业)能力。实现了不重喷、不漏喷的作业要求,大幅提高了精准施药的能力和作业效率,为精准喷洒与农药减施提供了可靠的作业平台<sup>[9]</sup>。

### 2.2.3 首个抗植物病毒微生物免疫诱导蛋白产品“阿泰灵”获农药正式登记

中国农业科学院植物保护研究所邱德文项目组利用植物天然免疫,通过蛋白提取技术、寡糖制备技术、先导化合物优化技术等关键技术<sup>[10-11]</sup>,开发了6%寡糖·链蛋白可湿性粉剂(“阿泰灵”)、5%寡糖·噻霉酮悬浮剂、24%甲噻·吗啉胍悬浮剂3个拥有我国自主知识产权的新产品,并取得农药正式登记证书<sup>[13-14]</sup>。其中,“阿泰灵”为我国自主研发的首个抗植物病毒的微生物源免疫诱导蛋白产品,其销售在生物农药中名列前茅,被评为“2019年农业农村部十大新产品”,打破了植物激活剂领域的国际垄断。

### 2.2.4 鳞翅目/鞘翅目害虫双杀Bt工程菌G033A杀虫剂获得登记并规模化应用

中国农业科学院植物保护研究所张杰项目组成功登记了我国首例基因工程微生物农药“苏云金杆菌G033A”,这是国内获批登记的第一个基因工程生物杀虫剂,也是我国第一个防治鞘翅目害虫的Bt产品。该产品也在积极与两减专项下游项目进行紧密合作,在露地蔬菜、油菜、茶园、北方玉米化肥农药减施技术集成研究与示范等10个项目中进行生物防治<sup>[16]</sup>,防治效果达到80%的同时,Bt产品防治田块天敌昆虫数量显著高于化学杀虫剂防治田块,经济、生态和社会效益显著,应用前景良好。

### 2.2.5 自主创新微生物杀菌剂通过国家农药登记

中国农业大学王琦项目组首创泡腾片剂、粉尘剂、水分散粒剂等微生物杀菌剂新剂型;开发出以枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌为有效成分的微生物杀菌剂新产品12个,有效防治小麦全蚀病,水稻纹枯病、稻瘟病,水稻白叶枯病、细菌性条斑病,马铃薯黄萎病,瓜类白粉病,番茄灰霉病、黄萎病、叶霉病和枯萎病,茄子黄萎病,黄瓜根腐病,辣椒疫病,西瓜枯萎病,香蕉枯萎病等16种作物病害。通过国家农药登记新产品4个,国家农药登记待审产品3个,1个产品成功扩作登记防治病害5种。解决了小麦全蚀病、水稻白叶枯病和细菌性条斑病、马铃薯黄萎病、番茄黄萎病、黄瓜根腐病、茄子黄萎病、西瓜枯萎病、香蕉枯萎病等9种病害无微生物农药可防的难题。

## 2.2.6 自主创新一批植物生物调节剂产品

中国农业大学段留生项目组创制了冠菌素<sup>[13]</sup>、海藻酸寡糖、赤霉素 A4、14-羟基芸苔素甾醇等一批新产品,均进入了农药登记阶段。其中生物延缓剂/抗倒伏剂、抗逆诱导剂冠菌素,构建了发酵高产的基因工程菌,发酵水平超过 300 mg/L,突破了提取纯化、农业应用、制剂开发等关键技术,建立了主要作物抗旱、抗低温和耐盐碱、生物延缓/抗倒伏和脱叶催熟<sup>[14]</sup>的促生长增产应用技术。赤霉素 A4 完成了农药登记全部资料,取得了原药生产许可证;14-羟基芸苔素甾醇原药和制剂获得了农药登记。生物调节剂冠菌素系列专利技术已完成转让合作企业。

## 2.2.7 创制了草地贪夜蛾防控天敌昆虫产品

中国农业科学院植物保护研究所张礼生项目组针对草地贪夜蛾在我国发生、扩散和为害的防治需求,在云南、贵州、福建、湖南等发生区调查资源,选出蠋蝽、益蝽、夜蛾黑卵蜂等 10 余种可用天敌,进行捕食功能反应和寄生能力评价。基于人工饲料、替代猎物技术,在贵州和河北各建立完善了 1 条蠋蝽、益蝽扩繁生产线,优化扩繁工艺参数,建立质量标准,迅速实现了对天敌昆虫的大规模扩繁。起草行业标准 1 项,申报专利 4 项,2019 年累计扩繁蠋蝽 70 万头。田间和室内试验表明,每头蠋蝽成虫一天内可捕食约 60 头草地贪夜蛾 3 龄幼虫、或 30 头 4 龄幼虫、或 8~9 头 6 龄幼虫,可满足防控需求<sup>[15]</sup>。

## 2.2.8 构建了区域土壤熏蒸消毒技术体系及服务模式

中国农业科学院植物保护研究所曹勘程项目组围绕三七土传病害和连作障碍问题,集成轮作降氮、土壤熏蒸、微生物修复等关键技术,联合政府和企业建立“政策引导、科技支撑、企业参与、农民受益”的科技扶贫新模式,将三七轮作间隔年限缩短至 3~5 年。项目连续 3 年在云南省文山、丘北、马关开展技术推广,2019 年技术示范面积累计 10 050 hm<sup>2</sup>。试验显示,连作三七土壤未经土壤熏蒸,三七于移栽一年后全部死亡;土壤熏蒸后,移栽后三七死苗率显著降低;土壤熏蒸处理显著提高二年生连作三七的株高、叶片长宽、须根长、剪口长宽、主根长宽及主根生物量等性状,主根鲜重增加了 84%,干重增加 111%。经第三方检测,熏蒸后连作三七植株和土壤中均无药剂残留,三七品质与传统种植相比无显著差异,农药残留和重金属检测结果低于国家限量

标准<sup>[16]</sup>。

## 参考文献

- [1] WANG Huidong, LU Yushi, LIU Shuai, et al. CYP6AE gene cluster knockout in *Helicoverpa armigera* reveals role in detoxification of phytochemicals and insecticides [J/OL]. Nature Communications, 2018, 9(1):4820. DOI: 10.1038/s41467-018-07226-6.
- [2] ZHAO Pengyue, CAO Lidong, MA Dukang, et al. Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plants [J]. Nanoscale, 2018, 10(4): 1798-1806.
- [3] ZHANG Huan, HU Zhangjian, LEI Cui, et al. A plant phyto-sulfokine peptide initiates auxin-dependent immunity through cytosolic Ca<sup>2+</sup> signaling in tomato [J]. Plant Cell, 2018, 30(3):652-667.
- [4] PENG Donghai, LUO Xiaoxia, ZHANG Ni, et al. Small RNA-mediated Cry toxin silencing allows *Bacillus thuringiensis* to evade *Caenorhabditis elegans* avoidance behavioral defenses [J]. Nucleic Acids Research, 2018, 46(1):159-173.
- [5] 徐德进, 徐广春, 许小龙, 等. 喷头和施药液量对水稻植株上农药沉积和药剂防治效果的影响[J]. 植物保护学报, 2019, 46(2): 156-163.
- [6] ABDELRAHMAN T, QIN Xueying, LI Donglin, et al. Pectinase-responsive carriers based on mesoporous silica nanoparticles for improving the translocation and fungicidal activity of prochloraz in rice plants [J/OL]. Chemical Engineering Journal, 2020, 404, 126440. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126440.
- [7] YU Jinhe, YU Chang, GUO Wei, et al. Decoupling and correlating the ion transport by engineering 2D carbon nanosheets for enhanced charge storage [J/OL]. Nano Energy, 2019, 64(10): 103921. DOI:10.1016/j.nanoen.2019.103921.
- [8] MENG Yanhua, SONG Jianli, LAN Yubin, et al. Harvest aids efficacy applied by unmanned aerial vehicles on cotton crop [J/OL]. Industrial Crops and Products, 2019, 140: 111645. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111645.
- [9] WANG Guobin, LAN Yubin, QI Haixia, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat [J]. Pest Management Science, 2019, 75(6): 1546-1555.
- [10] LI Lin, WANG Shuangchao, YANG Xiufen, et al. Protein elicitor PeaT1 enhanced resistance against aphid (*Sitobion avenae*) in wheat [J]. Pest Management Science, 2020, 76(1): 236-243.
- [11] QIU Dewen, DONG Yijie, ZHANG Yi, et al. Plant immunity inducer development and application [J]. Molecular plant-microbe interactions, 2017, 30(5): 355-360.

Science, 2018, 74(9): 2176–2184.

- [45] GRANADA Y, MEJÍA-JARAMILLO A, STRODE C, et al. A point mutation V419L in the sodium channel gene from natural populations of *Aedes aegypti* is involved in resistance to  $\lambda$ -cyhalothrin in Colombia [J/OL]. Insects, 2018, 9(1): 23. DOI:10.3390/insects9010023.
- [46] RASLI R, LEE H, WASI AHMAD N, et al. Susceptibility status and resistance mechanisms in permethrin-selected, laboratory susceptible and field-collected *Aedes aegypti* from Malaysia [J/OL]. Insects, 2018, 9(2): 43. DOI:10.3390/insects9020043.
- [47] CHEN Mengli, DU Yuzhe, NOMURA Y, et al. Mutations of two acidic residues at the cytoplasmic end of segment IIIS6 of an insect sodium channel have distinct effects on pyrethroid resistance [J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2017, 82: 1–10.
- [48] CHEN Xuewei, TIE Minyuan, CHEN Anqi, et al. Pyrethroid resistance associated with M918L mutation and detoxifying metabolism in *Aphis gossypii* from Bt cotton growing regions of China [J]. Pest Management Science, 2017, 73(11): 2353–2359.
- [49] CARLETTI J, MARTIN T, VANLERBERGHE-MASUTTI F, et al. Insecticide resistance traits differ among and within host races in *Aphis gossypii* [J]. Pest Management Science; Formerly Pesticide Science, 2010, 66(3): 301–307.
- [50] MARSHALL K L, MORAN C, CHEN Y, et al. Detection of *kdr* pyrethroid resistance in the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae), using a PCR-RFLP assay [J]. Journal of Pesticide Science, 2012, 37(2): 169–172.
- [51] MARTINEZ-TORRES D, FOSTER S P, FIELD L M, et al. A sodium channel point mutation is associated with resistance to DDT and pyrethroid insecticides in the peach-potato aphid,

*Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) [J]. Insect Molecular Biology, 1999, 8(3): 339–346.

- [52] PANINI M, ANACLERIO M, PUGGIONI V, et al. Presence and impact of allelic variations of two alternative *s-kdr* mutations, M918T and M918L, in the voltage-gated sodium channel of the green peach aphid *Myzus persicae* [J]. Pest Management Science, 2015, 71(6): 878–884.
- [53] ELEFThERIANOS I, FOSTER S P, WILLIAMSON M S, et al. Characterization of the M918T sodium channel gene mutation associated with strong resistance to pyrethroid insecticides in the peach-potato aphid, *Myzus persicae* (Sulzer) [J]. Bulletin of Entomological Research, 2008, 98(2): 183–191.
- [54] CASSANELLI S, CERCHIARI B, GIANNINI S, et al. Use of the RFLP-PCR diagnostic test for characterizing MACE and *kdr* insecticide resistance in the peach potato aphid *Myzus persicae* [J]. Pest Management Science; Formerly Pesticide Science, 2005, 61(1): 91–96.
- [55] FOSTER S P, PAUL V L, SLATER R, et al. A mutation (L1014F) in the voltage-gated sodium channel of the grain aphid, *Sitobion avenae*, is associated with resistance to pyrethroid insecticides [J]. Pest Management Science, 2014, 70(8): 1249–1253.
- [56] ZUO Yayun, PENG Xiong, WANG Kang, et al. Expression patterns, mutation detection and RNA interference of *Rhopalosiphum padi* voltage-gated sodium channel genes [J/OL]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 30166. DOI:10.1038/srep30166.
- [57] 藏媛媛, 卢洁, 刘艺, 等. 七氟菊酯和溴氰菊酯对棉铃虫神经细胞大电导钙激活钾通道电流的影响[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2018, 51(1): 26–33.
- [58] 左亚运. 禾谷缢管蚜抗药性监测及其对高效氯氰菊酯的抗药性机理初步研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 7 页)

- [12] WANG Guangjun, ZHANG Jie, SONG Fuping, et al. Engineered *Bacillus thuringiensis* G033A with broad insecticidal activity against lepidopteran and coleopteran pests [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 72(5): 924–930.
- [13] 方国斌, 王攀, 望勇, 等. 苏云金杆菌 G033A 对萝卜黄曲条跳甲的室内活性及田间药效[J]. 长江蔬菜, 2019, 20(24): 73–75.
- [14] HE Yan, YU Sha, LIU Shaojin, et al. Data-independent acquisition proteomics unravels the effects of iron ions on coronatine synthesis in *Pseudomonas syringae* pv. tomato DC3000 [J/OL]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11:1362. DOI: 10.3389/fmicb.2020.01362.

- [15] YAN Yunjun, DU Yanhua, ZHAO Hui, et al. Relationships between plant architecture traits and cotton yield within the plant height range of 80–120 cm desired for mechanical harvesting in the Yellow River Valley of China [J/OL]. Agronomy, 2019, 9(10): 587. DOI: 10.3390/agronomy9100587.
- [16] YANG Min, YUAN Ye, HUANG Huichuan, et al. Steaming combined with biochar application eliminates negative plant-soil feedback for sanqi cultivation [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 189: 189–198.

(责任编辑: 张文蔚)