

· 综述 ·

## 农业病虫害绿色防控基础的前沿科学问题

王桂荣<sup>1</sup> 王源超<sup>2</sup> 杨光富<sup>3</sup> 王 燕<sup>2</sup> 周雪平<sup>1\*</sup>

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. 南京农业大学 植物保护学院,南京 210095
3. 华中师范大学 农药与化学生物学教育部重点实验室,武汉 430079

**[摘要]** 本文总结了我国植物保护学科研究及产业发展所面临的国家重大需求,回顾了近年来植物保护学领域在植物免疫调控、植物—害虫—天敌三营养级协同进化、绿色农药创制等方面取得的主要进展和成就,凝练了该领域未来5~10年的重大关键科学问题,并探讨了该领域的前沿研究方向和科学基金资助战略。

**[关键词]** 植物保护学;绿色防控;多学科交叉;基础研究;科学前沿

发展农作物有害生物绿色防控技术是保护粮食安全、农产品质量安全、生态安全、促进农业可持续发展的重要保障。我国有害生物多发,常见农作物病害775种、害虫739种、杂草109种、害鼠42种,它们分布范围广、成灾频率高、突发性强,每年都有重大病虫害发生流行,导致农作物减产、品质严重下降,给我国农业生产造成了重大损失<sup>[1,2]</sup>。此外,危险性外来生物入侵加重和突出了农业有害生物的危害,如2019年“幺蛾子”草地贪夜蛾入侵我国并不断扩散,在我国26个省市危害,引起了全社会的广泛关注<sup>[3]</sup>。目前主要依靠化学农药进行防治,过度依赖和滥用传统化学农药导致了有害生物抗药性、农药残留超标、环境严重污染及害虫再猖獗等一系列问题,严重影响了我国农产品质量安全、农业生态环境安全以及有害生物可持续防控<sup>[4-6]</sup>。进入21世纪以来,我国种植业结构进行了大幅调整,加之气候变化加剧,我国农作物有害生物防控工作所面临的形势仍然非常严峻。为及时扭转过分依赖化学农药的局面、提高有害生物防治的效率效果和社会环境效益,必须大力发展有害生物绿色防控技术,促进传统化学防治向现代绿色防控的转变,实现有害生物的可持续治理<sup>[2,7]</sup>。

近年来,随着经费资助的加大和研究的深入,我



周雪平 中国农业科学院植物保护研究所

所长,植物病虫害生物学国家重点实验室主任。长期从事植物病毒病害研究,在*Trends in Plant Science*等杂志发表论文300余篇,获国家自然科学奖二等奖、国家科学技术进步奖二等奖。担任国际植物保护科学协会执委、国际植物病理学会理事和*Annual Review of Phytopathology*等多个杂志编委。



王桂荣 中国农业科学院植物保护研究所研究员、博士生导师。担任植物病虫害生物学国家重点实验室副主任、亚太国际化学生态学会主席等职。一直从事昆虫化学生态学和功能基因组学的研究工作。先后主持国家自然科学基金重点项目、杰出青年基金以及国际合作项目等。在*PNAS*、*Current Biology*、*Biological Reviews*等杂志上发表研究论文100多篇、获得国家发明专利6项。

国植物保护领域取得了一系列的科技成果:摸清了一些农作物重大病虫害流行灾变规律,揭示了部分重要农业有害生物的致害机理;解析了部分重要天敌昆虫调控害虫的生理和生态学机制,研发了一批环境友好的绿色防控技术与产品;建立了作物病虫害监测预警及防控技术体系<sup>[6]</sup>。但总体而言,我国有害生物可持续防控方面仍存在几个重要问题:首先,缺乏对有害生物间歇性爆发成灾机制的了解,严重

国植物保护领域取得了一系列的科技成果:摸清了一些农作物重大病虫害流行灾变规律,揭示了部分重要农业有害生物的致害机理;解析了部分重要天敌昆虫调控害虫的生理和生态学机制,研发了一批环境友好的绿色防控技术与产品;建立了作物病虫害监测预警及防控技术体系<sup>[6]</sup>。但总体而言,我国有害生物可持续防控方面仍存在几个重要问题:首先,缺乏对有害生物间歇性爆发成灾机制的了解,严重

收稿日期:2020-06-03;修回日期:2020-06-10

\* 通信作者,Email: zzhou@zju.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(31725023)的资助。

影响了测报的准确性;对多元生物和生态因子影响有害生物爆发成灾的机制缺乏了解,严重制约了病虫害有效防控的实施;抗病虫资源利用中存在抗性资源缺乏,特别是缺乏具有自主知识产权的抗性基因、免疫受体资源,天敌控害基因资源缺乏挖掘与利用,绿色农药原创性分子靶标发现、重磅绿色农药品种等方面有被“卡脖子”的风险。未来我国有害生物的绿色防控,不仅需要加强应用技术的研究和推广,而且更需要加强基础理论和方法的研究,最终在揭示生态系统多元生态因子复杂互作重要节点的基础上,形成对作物系统有害生物的整体生态调控技术与方法。

研讨植物病虫害绿色防控的技术和发展方向、凝练前沿科学问题,可以进一步推动植物病虫害绿色防控技术的快速进步和产业发展。在此背景下,2019年11月14~16日,国家自然科学基金委员会生命科学部会同政策局联合召开了主题为“农业病虫害绿色防控基础的前沿科学问题”的第247期双清论坛,来自全国18家单位的47名专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家对国内外病虫害绿色防控研究现状和发展趋势进行了深入探讨,凝练了农业病虫害绿色防控中的关键基础科学问题,探讨了未来十年的重点突破方向。

## 1 植物保护学科研究主要进展和成就

### 1.1 农作物中有害生物致害机制及流行迁飞规律

我国昆虫学者先后对飞蝗、黏虫、褐飞虱、草地螟、小地老虎和棉铃虫等专性和兼性迁飞害虫进行了系统深入的研究,掌握了这些重大害虫的基本生物学特性,初步揭示了迁飞爆发为害规律,在此基础上建立了有效的防控体系。发现了褐飞虱翅型分化的分子开关,并利用全基因组测序揭示了全球褐飞虱迁飞扩散概貌和每年迁飞到我国水稻产区的境外虫源地<sup>[8,9]</sup>。基于全基因组测序和分析揭示了斜纹夜蛾的味觉受体、解毒以及杀虫剂抗性相关基因家族成员数量显著增加,从遗传学角度解释了斜纹夜蛾多食性、暴食性和抗药性机理<sup>[10]</sup>。东亚飞蝗基因组中参与脂肪酸合成、转运和代谢过程的许多基因家族发生明显扩增现象,这些基因家族是东亚飞蝗长距离迁飞的遗传基础<sup>[11]</sup>。在植物与真菌互作,植物与卵菌、植物与细菌、植物与病毒以及植物—病—虫三界互作等研究领域取得了重要进展。鉴定了一批重大作物病虫致害成灾的关键相关基因,明确了一批病原物效应子蛋白和小RNA干扰的植物靶

标,发现了诱饵模式等一批全新的有害生物致病新机制,系统阐明了病原物效应子蛋白在转录、RNA加工、翻译修饰水平抑制植物靶标的抗病功能<sup>[12-20]</sup>。

在植物病害综合治理方面,我国在小麦条锈病综合治理体系建立和应用方面取得突破性进展,创建了以生物多样性利用为核心,以生态抗灾、生物控害、化学减灾为目标的小麦条锈病菌源基地综合治理技术体系<sup>[21]</sup>。在水稻稻瘟病防控新技术研发方面,将稻瘟病菌群体的无毒基因监测与抗病品种筛选有机结合,筛选出表现高水平抗病性的品种<sup>[22,23]</sup>。在大豆根腐病防控新技术研究方面,构建了病原监测、抗病资源利用、药剂拌种等核心技术体系,形成了适宜于东北、黄淮和南方大豆产区的病害防控技术模式。在棉花黄萎病防控新技术方面,我国科学家成功利用寄主诱导基因沉默(HIGS)技术实现了对棉花黄萎病的防控,为解决实际生产中棉花缺乏抗病资源的困境开拓新的策略和研究方向<sup>[24,25]</sup>。

### 1.2 基于植物免疫调控机制研究发展抗病虫作物

我国科学家在水稻、小麦、玉米等重要农作物,以及稻瘟菌、小麦条锈菌、小麦白粉病菌、稻曲病菌、水稻白叶枯病菌、蝗虫、褐飞虱等病虫的全基因组测序工作基础上,鉴定了一批具有重要理论与应用价值的农作物抗病虫相关基因:克隆了一批重要的水稻、小麦、玉米抗病虫新基因并揭示了其作用机制<sup>[12,23,26-31]</sup>;利用非寄主植物材料,鉴定了一批植物的先天免疫受体基因,并阐明了其作用的分子与生化机制<sup>[11,32-34]</sup>;获得了世界上第一个抗病小体的结构并解析了植物抗病基因的作用模型<sup>[35-36]</sup>;提出了作物免疫与产量平衡的关键机制及改良作物综合性状的路径<sup>[27]</sup>,这一系列标志性工作得到了国际同行的高度认可。此外,我国科学家还在植物抑制病虫基因表达的RNA干扰技术、植物免疫系统与激素调节间的相互作用等领域取得了一系列重要成果。这些工作为推进病虫害防控提供了新手段、新材料与新思路。

### 1.3 小分子农药创制基础研究及农药创制体系

农药创制是一项十分复杂的多学科交叉集成的系统工程,具有投资大、周期长、风险高的特点。据统计,成功开发一个新农药,需要合成筛选15.9万个化合物,耗资2.86亿美元,从首次合成到进入市场平均历时11.5年<sup>[37]</sup>。经过多年的努力,我国已建立了基于化学小分子与生物大分子相互作用的农药分子设计创新研究体系,并构建了涵盖靶标发现、

分子设计、化学合成、生物活性评价、应用技术以及工程化开发等环节的较完整的农药创制体系,创制出了毒氟磷、氰烯菌酯、丁吡吗啉、哌虫啉、环氧虫啉、环吡氟草酮等多个具有自主知识产权的绿色农药新品种,使我国成为世界上第六个具有新农药创制能力的国家<sup>[38-40]</sup>。特别值得指出的是,这些自主创制的农药新品种在农业生产中已发挥了重要作用。例如,毒氟磷是国际首个免疫诱抗型农作物病毒病害调控剂,在我国南方水稻黑条缩病防控中发挥了重要作用<sup>[41]</sup>。顺式新烟碱类杀虫剂哌虫啉、环氧虫啉,对鳞翅目害虫具有很好的防治效果,国际杀虫剂抗性行动委员会将环氧虫啉列为未来潜在杀虫剂<sup>[42]</sup>。氰烯菌酯是一个全新作用机制的杀菌剂,已经成为我国防治小麦赤霉病的拳头产品,不仅防效好,而且可以有效降低毒素、防止植物早衰、增加小麦产量,为我国小麦安全生产做出了重要贡献<sup>[43]</sup>。此外,啞草酮、吡啶啞草酯、氟苯醚酰胺、甲磺酰菌啞、香草硫缩病醚等多个具有自主知识产权的新品种处于登记和工程化开发阶段,将陆续取得登记并投入使用<sup>[44, 45]</sup>。

#### 1.4 生防产品创制理论与应用技术

经过协同攻关和持续合作研究,我国在生物防治学科多个领域取得了重要进展,挖掘和改造了一批天敌和微生物生防资源,对重要天敌昆虫和微生物与害虫互作的生态学、生理学和分子生物学机制进行了深入的研究,挖掘出了一批可用于害虫防控的具有自主知识产权的关键基因,发展了大量昆虫天敌和微生物产品用于害虫的绿色防控。解决了天敌昆虫工厂化、大规模饲养技术,对多种昆虫滞育机制的解析有效延长了天敌昆虫的货架期,通过系统深入的研究优化了天敌昆虫与生防微生物和其他防治方法的联合使用技术,达到了显著的增效,促进了我国生物防治产品和技术的应用。通过深入研究植物水杨酸、茉莉酸和乙烯等抗病虫通路,发展了新型植物免疫诱抗剂及相关产品诱导激活植物免疫系统,使植物获得系统性抗性,有效抵御病虫的为害。开发了氨基寡糖素、“阿泰灵”、植物蛋白、香菇多糖等一批渐有影响力的生物农药品种作为作物病虫害防治的重要手段。

#### 1.5 理化诱控、生态调控等技术进步迅速

利用信息化合物调控昆虫的行为、利用健身栽培提高作物的抗性以及通过调节生境增强害虫的天敌作用,都可以做到减少靶标害虫种群数量,达到控制靶标害虫的目的。近年来,害虫食诱剂、性诱剂等

研发与利用技术发展迅速<sup>[46, 47]</sup>。围绕天敌昆虫的田间利用和保护,利用蜜源植物等功能植物配置,为天敌昆虫提供生殖、生存及活动的必需物质、空间和场所,研究集成了一批新型技术体系,充分发挥自然天敌和生物多样性的调控效果,提升农田生态系统的自我控制能力,实现对农业病虫害的可持续治理。从生产和应用上看,这些技术在我国有着巨大的发展空间和前景。

## 2 病虫害绿色防控技术发展与科学研究面临的重大机遇与挑战

### 2.1 病虫害绿色防控发展现状与问题

我国农作物有害生物种类多、危害重、发生规律复杂、防控难度大,相关理论和技术创新、防控体系构建与应用是保障农业安全生产的迫切需求。据统计,我国常见农作物病虫害有1700多种,每年都有重大病虫害流行和爆发,导致农作物大面积减产,最严重时甚至绝收,病虫害危害导致农作物品质严重下降。为有效防治病虫害危害,可能会过量滥用化学农药,由此也会带来农药残留超标、环境污染、抗药性等一系列问题,严重影响着我国农产品质量安全、生态环境安全及农业的可持续发展。为避免过分依赖传统化学农药、保护生态环境、提高有害生物防治效果,急需大力发展有害生物绿色防控技术,促进传统化学防治理念向现代环境友好的绿色防控理念的转变,实现有害生物的可持续治理。

美国、欧盟等发达国家和地区在农业害虫绿色防控技术的研发与产业化方面比较成熟,天敌昆虫与生物农药产品种类丰富、技术配套完整、产业化规模大,昆虫性诱剂、植物源引诱剂新产品日益增多、应用范围不断扩大。在“绿色植保”科学理念的倡导下,我国同样加快了有害生物绿色防控技术产品的研发,并在赤眼蜂、烟蚜茧蜂、苦参碱、苏云金芽孢杆菌、白僵菌等技术产品的研发和产业化中取得了一系列重大进展。2015年农业农村部提出《到2020年农药使用量零增长行动方案》,实施农药减量控害,减轻农业面源污染,保护农田生态环境,促进生产与生态协调发展。环境友好的有害生物绿色防控正得到各级政府的关注,迎来了良好的发展机遇。但总体来说,害虫绿色防控技术发展仍面临着一些瓶颈问题或挑战。

首先是科技支撑能力不足。我国在有害生物基础生物学、植物免疫调控、植物与有害生物互作、植物—有害生物—媒介生物—天敌等多界多元互作的



基础研究方面,取得了一些进展,但不够深入,原创性的害虫绿色防控技术不多,相关科研工作立项碎片化,多为短期小项目,这种科研管理模式不能形成稳定的科研团队,也无法通过长期连续性科技攻关产生突破性成果。此外,科研单位普遍重视针对某一科学问题的基础或应用基础研究,忽视产品研发和生产应用过程的技术标准研究,相关企业科技创新能力弱,研发资金投入有限,难以胜任绿色防控产品的技术研发工作,大部分研究领域存在产学研脱节的现象。

第二,有限的有害生物绿色防控技术产业化程度低。国际大型农药公司通过收购生物科技公司纷纷进入绿色防控产业,利用他们的资金与技术优势改变了生物农药研发和市场推广的传统模式。和国外企业相比,国内公司生产规模小、技术含量低、产品成本高、利润效益差,缺乏资金进行技术更新和改造升级,目前的绿色防控产品在化学农药市场竞争中处于弱势地位。

第三,欧美发达国家制订了严格的农药使用标准,而我国在管理法规方面还缺乏市场准入登记的标准体系。

最后,我国是以小规模农户分散种植为主体的农业生产模式,社会对绿色防控技术接受程度低,导致现阶段我国农业害虫绿色防控技术研发与产业化明显落后于国际先进水平。

## 2.2 病虫害绿色防控发展的机遇与挑战

尽管西方发达国家在一些领域建立了有效的绿色防控体系,但是生物系统的复杂性、地域性等性质决定了某一模式的病虫害绿色防控不具有全球普适性,因此急需建立适合我国国情的病虫害绿色防控体系。过去几十年的国内外知识积累底蕴、近年来迅猛发展的科研技术、种植模式的变迁、全球气候变化等诸多因素给我国的病虫害绿色防控发展提出了新的机遇与挑战,特别是:(1) 基于模式生物的植物—昆虫—天敌/微生物三者关系的基础上,我国逐渐建立了多物种的三者互作关系,尤其是在主要大田农作物—害虫—天敌/病原菌的互作方面,例如蔬菜—鳞翅目害虫—天敌昆虫、棉花—鳞翅目害虫—天敌昆虫、小麦/马铃薯/大豆—真菌性病害、水稻/蔬菜—刺吸式昆虫—天敌/病毒病等,并由此发现了新的免疫途径、效应因子、致病因子等关键功能基因;(2) 近年来,基于泛微生物组的昆虫—微生物互作模式和新一代的基因组编辑技术为害虫防治提供了新视角。这些领域的持续深入研究不仅有望推进

生物学的基础理论发展,而且可为绿色防控提供新的靶标;(3) 全球气候变化严重影响了自然生态系统,改变了病虫害的爆发规律。在此背景下,如何改变种植模式适应新的气候变化从而减少病虫害的发生值得进一步思考。

## 3 未来5~10年植物保护学科发展目标及研究重点

### 3.1 发展目标

随着产业变革、气候变化以及科学技术的进步,我国植保科技领域将迎来新的挑战和发展机遇。未来的植保理论和技术研究应围绕下列几方面展开:新型生产模式及气候变化下的有害生物发生规律、全球化趋势下的有害生物检测预警技术、绿色可持续发展的有害生物综合治理新模式。建立现代植保技术体系将保障我国的粮食安全、环境安全和农业可持续发展。

### 3.2 研究重点

本次双清论坛与会专家经过深入研讨,凝练了农业病虫害绿色防控的重大关键科学问题,并建议在未来5~10年植物保护学科应着重围绕以下领域,通过多学科交叉开展原创性研究。

#### 3.2.1 有害生物爆发成灾的种群形成机制与生态防控

具体包括:(1) 有害生物种群爆发危害机制,包括作物有害生物间歇性爆发成灾机制、昆虫迁飞行为的关键控制机制、介体昆虫传毒与植物病毒病害间歇性爆发流行的协同机制、具有潜在爆发风险新病虫害的传播规律及早期预警;(2) 植物—昆虫—微生物—天敌互作机制,包括农作物对害虫识别和防御的分子机制、天敌对害虫识别和防御的分子机制、害虫适应和调控植物防御反应的机制、植物—害虫—天敌三营养级互作机制、植物—昆虫—微生物三者互作机制;(3) 非生物因子对昆虫种群爆发非对称影响机制,包括气候和种植模式变化下的昆虫适应性变化、营养关系的适应与重建、气候变化和种植模式变化下有害生物种群爆发的监测预警平台构建;(4) 药剂的选择性机制与有害生物抗药性机制,包括农药与害虫分子靶标互作的结构生物学、抗药性遗传和生化机制、害虫抗药性水平调控路径和共性、专性抗性基因鉴定、有害生物抗药性演变规律和关键影响因素鉴定、基于害虫抗药性的新农药结构优化与分子设计;(5) 整合以生物学为基础的有害生物绿色防控策略,包括剖析作物生态系统中的生

物因子间的化学/分子互作、揭示有益生物自然调控病虫害的活性物质及其作用机制、合成农业生态系统的内稳性机制、协调防控多种病虫害的生态调控和分子调控措施。

### 3.2.2 植物免疫形成机制与病虫害绿色防控

具体包括:(1)作物泛基因组和病原/害虫泛效应子组的研究。在漫长的进化过程中,由于地域、环境等因素的影响,每个生物个体都形成独特的遗传性状,单一个体的基因组已经不能涵盖生物的所有信息。通过作物泛基因组和病原/害虫泛效应子组的研究,获取作物和病原生物全部的遗传信息并且对每一个特异性互作信息进行解析,从而全面解析植物的抗性和病原菌的致害机制。(2)新型免疫受体的鉴定与结构解析。挖掘新型免疫识别受体,通过结构生物学分析解析免疫受体免疫激发、强化和维持的调控机制。(3)重要农作物易感基因的鉴定与编辑。鉴定作物中的易感基因,分析其作用机制并利用基因编辑技术进行作物抗性改造。(4)染色体重塑与作物抗病性。从表观遗传学角度分析作物抗病性调控机制。(5)小RNA抗病虫新途径。解析小RNA作用机制,利用小RNA跨界诱导病原靶基因沉默的特性设计新的抗病策略。(6)作物—病原—环境互作。包括解析不同生物间信息流的建立及精细调控作物免疫及与病原生物互作的机制。(7)作物免疫与其他农艺性状协同调控,解析抗病基因对抗性和农艺性状的调控机制,精准调控抗病基因的表达。(8)作物免疫系统的重构,包括人工设计抗广谱、持久的新型免疫受体蛋白和优化整合不同类型的作物抗病基因,激发和强化作物自身免疫,提高作物广谱持久抗病性。

### 3.2.3 农药新靶标发掘与绿色农药创制

具体包括:(1)原创性绿色农药分子靶标的发现。以天然产物及农药活性分子为探针,研究其调控有害生物分子机制,发现原创性分子靶标,开展靶标验证;采用功能基因组学发现有害生物的特异性功能蛋白(如致病因子),针对这些特异性功能蛋白开展成靶标研究,发现新型绿色农药分子靶标。(2)绿色农药的分子设计。综合基因组学、结构生物学、高性能计算、大数据及人工智能技术,开展基于靶标组结构的绿色农药分子设计,发现原创性农药先导结构。(3)绿色农药高通量筛选及其环境安全风险评价方法。针对农业重大病虫害以及特殊作用机制,建立灵敏快速的离体及活体高通量筛选方法及技术平台;建立并发展新型的农药环境安全风

险评价模型。(4)新型植物免疫激活剂。开展植物免疫的分子机制研究,发现新的免疫信号通路和免疫蛋白及免疫受体,针对免疫蛋白和免疫受体,设计合成新型植物免疫激活剂。(5)生物源农药与核酸农药。从特殊环境中筛选发现具有农药活性的微生物菌株、次生代谢产物等新型生物源农药,开展生物合成机制研究和菌种改造;利用基因沉默技术、基因编辑技术等,设计新型核酸农药。(6)基于多维调控的绿色防控理论。建立基于化学—生物—免疫—生态协同调控的绿色防控理论体系,指导发展农业有害生物防控技术。

## 4 结 语

农业是国家发展和稳定的支柱产业,我国农业有害生物灾害多发,严重威胁着农业生产安全和农产品质量。农业生产中有害生物防控主要依赖大量喷洒化学农药,滥用化学农药带来了农药残留超标、害虫抗药性和害虫再猖獗等一系列问题。为改变这一被动局面,贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想,落实创新驱动战略、乡村振兴战略和可持续发展战略,实现建设生态文明、建设美丽中国的战略任务,必须要大力发展有害生物绿色防控技术体系,助力实现农业绿色发展和农业农村现代化的目标。全面实现有害生物绿色防控必然要求减少化学农药使用,除了需要强调采用生态调控、生物防治、物理防治等环境友好型害虫防治措施,更重要的是需要加强对有害生物爆发成灾和种群形成机制、生态防控理论基础、植物免疫形成机制以及绿色农药创制等基础理论方面的创新研究,全面提升有害生物防控水平,发展有害生物绿色防控颠覆性技术,才能满足国家粮食安全、农产品质量安全、生态安全和生物安全的重大需求。

**致谢** 本文根据参加第247期双清论坛的各位专家提供的材料整理,提供材料的专家有陈学新、董莎萌、何光存、胡高、刘泽文、姜永根、陶小荣、王进军、王晓伟、吴剑、向文胜、徐海君、杨青、叶恭银、张传溪、张正光、张友军、宋宝安。特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 郭子元. 中国农作物病虫害(第三版). 北京:中国农业出版社, 2015.
- [2] 吴孔明. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京:科学出版社, 2016.

- [3] 吴孔明. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 2020, 46(2): 1—5.
- [4] 高希武. 我国害虫化学防治现状与发展策略. 植物保护, 2010, 36(4): 19—22.
- [5] 杨普云, 李萍, 任彬元, 等. 我国农作物病虫害化学防控技术的环境成本分析. 中国植保导刊, 2019, 39(6): 27—30.
- [6] 张礼生, 刘文德, 李方方, 等. 农作物有害生物防控: 成就与展望. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(12): 1664—1678.
- [7] 李阔, 许吟隆. 适应气候变化的中国农业种植结构调整研究. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 8—17.
- [8] Xu HJ, Xue J, Lu B, et al. Two insulin receptors determine alternative wing morphs in planthoppers. *Nature*, 2015, 519(7544): 464—467.
- [9] Xue J, Zhou X, Zhang CX, et al. Genomes of the rice pest brown planthopper and its endosymbionts reveal complex complementary contributions for host adaptation. *Genome Biology*, 2014, 15(12): 521.
- [10] Cheng T, Wu J, Wu Y, et al. Genomic adaptation to polyphagy and insecticides in a major East Asian noctuid pest. *Nature Ecology and Evolution*, 2017, 1(11): 1747—1756.
- [11] Wang X, Fang X, Yang P, et al. The locust genome provides insight into swarm formation and long-distance flight. *Nature Communications*, 2014, 5: 2957.
- [12] Wang H, Sun S, Ge W, et al. Horizontal gene transfer of *Fhb7* from fungus underlies Fusarium head blight resistance in wheat. *Science*, 2020, 368(6493): eaba5435.
- [13] Ma Z, Zhu L, Song T, et al. A paralogous decoy protects *Phytophthora sojae* apoplastic effector PsXEG1 from a host inhibitor. *Science*, 2017, 355(6326): 710—714.
- [14] Chen Y, Kistler HC, Ma Z. Fusarium graminearum trichothecene mycotoxins: biosynthesis, regulation, and management. *Annual Review of Phytopathology*, 2019, 57: 15—39.
- [15] Feng F, Zhou JM. Plant-bacterial pathogen interactions mediated by type III effectors. *Current Opinion in Plant Biology*, 2012, 15(4): 469—476.
- [16] Hua C, Zhao JH, Guo HS. Trans-kingdom RNA silencing in plant-fungal pathogen interactions. *Molecular Plant*, 2018, 11(2): 235—244.
- [17] Sun W, Fan J, Fang A, et al. *Ustilagoidea virens*: insights into an emerging rice pathogen. *Annual Review of Phytopathology*, 2020, 58: doi: org/10.1146/annurev-phyto-010820-012908.
- [18] Wang Y, Tyler BM, Wang Y. Defense and counterdefense during plant-pathogenic oomycete infection. *Annual Review of Microbiology*, 2019, 73: 667—696.
- [19] Zhao J, Wang M, Chen X, et al. Role of alternate hosts in epidemiology and pathogen variation of cereal rusts. *Annual Review of Phytopathology*, 2016, 54: 207—228.
- [20] Zhu M, Grinsven ILV, Kormelink R, et al. Paving the way to tospovirus infection: multilined interplays with plant innate immunity. *Annual Review of Phytopathology*, 2019, 57: 41—62.
- [21] 陈万权, 康振生, 马占鸿, 等. 中国小麦条锈病综合治理理论与实践. 中国农业科学, 2013, 46(20): 4254—4262.
- [22] Li W, Zhu Z, Chern M, et al. A natural allele of a transcription factor in rice confers broad-spectrum blast resistance. *Cell*, 2017, 170(1): 114—126.
- [23] Wang J, Zhou L, Shi H, et al. A single transcription factor promotes both yield and immunity in rice. *Science*, 2018, 361(6406): 1026—1028.
- [24] Zhang T, Jin Y, Zhao JH, et al. Host-induced gene silencing of the target gene in fungal cells confers effective resistance to the cotton wilt disease pathogen *Verticillium dahlia*. *Molecular Plant*, 2016, 9(6): 939—942.
- [25] Wang S, Xing HY, Hua CL, et al. An improved single-step cloning strategy simplifies the *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation (ATMT)-based gene-disruption method for *Verticillium dahlia*. *Phytopathology*, 2016, 106(6): 645—652.
- [26] Liu Y, Wu H, Chen H, et al. A gene cluster encoding lectin receptor kinases confers broad-spectrum and durable insect resistance in rice. *Nature Biotechnology*, 2015, 33(3): 301—305.
- [27] Deng Y, Zhai K, Xie Z, et al. Epigenetic regulation of antagonistic receptors confers rice blast resistance with yield balance. *Science*, 2017, 355(6328): 962—965.
- [28] 张杰, 董莎萌, 王伟, 等. 植物免疫研究与抗病虫绿色防控: 进展、机遇与挑战. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(11): 1—29.
- [29] Li G, Zhou J, Jia H, et al. Mutation of a histidine-rich calcium-binding-protein gene in wheat confers resistance to Fusarium head blight. *Nature Genetics*, 2019, 51(7): 1106—1112.
- [30] Li N, Lin B, Wang H, et al. Natural variation in *ZmFBL1* confers banded leaf and sheath blight resistance in maize. *Nature Genetics*, 2019, 51(10): 1540—1548.
- [31] Su Z, Bernardo A, Tian B, et al. A deletion mutation in *TaHRC* confers *Fhb1* resistance to Fusarium head blight in wheat. *Nature Genetics*, 2019, 51(7): 1099—1105.
- [32] Liu T, Liu Z, Song C, et al. Chitin-induced dimerization activates a plant immune receptor. *Science*, 2012, 336(6085): 1160—1164.
- [33] Sun Y, Li L, Macho AP, et al. Structural Basis for flg22-induced activation of the *Arabidopsis* FLS2-BAK1 immune complex. *Science*, 2013, 342(6158): 624—628.
- [34] Ma Z, Song T, Zhu L, et al. A *Phytophthora sojae* glycoside hydrolase 12 protein is a major virulence factor during soybean infection and is recognized as a PAMP. *Plant Cell*, 2015, 27(7): 2057—2072.
- [35] Wang J, Hu M, Wang J, et al. Reconstitution and structure of a plant NLR resistosome conferring immunity. *Science*, 2019, 364(6435): eaav5870.
- [36] Wang J, Wang J, Hu M, et al. Ligand-triggered allosteric ADP release primes a plant NLR complex. *Science*, 2019, 364(6435): eaav5868.

- [37] Sparks TC, Lorsbach BA. Perspectives on the agrochemical industry and agrochemical discovery. *Pest Management Science*, 2017, 73(4): 672—677.
- [38] 陈卓, 杨松. 自主创新抗植物病毒新农药: 毒氟磷. *世界农药*, 2009, 31(2): 52—53.
- [39] Shao XS, Li Z, Qian XH, et al. Design, synthesis and insecticidal activities of novel analogues of neonicotinoids: replacement of nitromethylene with nitro-conjugated system. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(3): 951—957.
- [40] 芦志成, 张鹏飞, 李慧超, 等. 中国农药创制品种概述与展望. *农药学报*, 2019, 21: 551—579.
- [41] Chen Z, Zeng MJ, Song BA, et al. Dufulin activates HrBP1 to produce antiviral responses in tobacco. *PLoS One*, 2012, 7(5): e37944.
- [42] Xu XY, Bao HB, Shao XS, et al. Pharmacological of cis-nitromethylene neonicotinoids: overlapping one binding site of imidacloprid in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Insect Molecular Biology*, 2010, 19: 1—8.
- [43] Zhang CQ, Chen Y, Yin YN, et al. A small molecule species specifically inhibits *Fusarium* myosin I. *Environmental Microbiology*, 2015, 17(8): 2735—2746.
- [44] Lin HY, Chen X, Chen JN, et al. Crystal structure of 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase in complex with substrate reveals a new starting point for inhibitor discovery. *Research*, 2019: 2602414. doi: 10.34133/2019/2602414.
- [45] Xiong L, Li H, Jiang LN, et al. Structure-based discovery of potential fungicides as succinate-ubiquinone oxidoreductase inhibitors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(5): 1021—1029.
- [46] 王安佳, 张开心, 梅向东, 等. 昆虫性信息素及其类似物干扰昆虫行为的机理和应用研究进展. *农药学报*, 2018, 20(4): 425—438.
- [47] 蔡晓明, 李兆群, 潘洪生, 等. 植食性害虫食诱剂的研究与应用. *中国生物防治学报*, 2018, 34(1): 8—35.

## Frontiers in Scientific Issues of Controlling Agricultural Pests and Diseases by Environmental-Friendly Methods

Wang Guirong<sup>1</sup>   Wang Yuanchao<sup>2</sup>   Yang Guangfu<sup>3</sup>   Wang Yan<sup>2</sup>   Zhou Xueping<sup>1\*</sup>

1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests/Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193
2. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095
3. Laboratory of Pesticides and Chemistry Key Laboratory of Ministry of Education, Central China Normal University, Wuhan 430079

**Abstract** In this review, we summarized scientific progress and technological developments in meeting the major challenges facing China in plant protection. In particular, we reviewed the primary progresses and achievements in plant protection with focus on plant immune regulation, plant-pest-natural enemy co-evolution and green pesticide development. We proposed some key scientific issues for the next 5~10 years in this field, and discussed the frontier research direction and funding strategy of science foundation.

**Keywords** plant protection; environmental-friendly pest and disease management; multidisciplinary; basic research; frontiers in science

(责任编辑 张强 吴妹)

\* Corresponding Author, Email: zzhou@zju.edu.cn