



吕亮, 常向前, 张舒. 水稻害虫绿色防控技术应用研究现状及展望 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (3): 623–632.

水稻害虫绿色防控技术应用研究现状及展望

吕 亮, 常向前, 张 舒*

(湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064)

摘要: 发展绿色防控技术是当前现代农业发展的必然要求, 对保障我国粮食安全、生态安全等方面起着十分重要的作用。本文从农业和生态调控、理化诱控、生物防治、精准施药等 4 个方面回顾和梳理了我国水稻害虫绿色防控技术应用研究的发展和现状, 并对未来的发展提出了建议和展望。本综述可为水稻害虫绿色防控技术的研究和应用提供参考。

关键词: 水稻; 绿色防控; 应用研究; 现状; 展望

中图分类号: Q968.1; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 03-0623-10

Current situation and prospect of application of green control techniques for rice insect pests

LV Liang, CHANG Xiang-Qian, ZHANG Shu* (Institute for Plant Protection & Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: The development of green prevention and control technology is an inevitable requirement for the development of modern agriculture, and plays an important role in ensuring food security and ecological security in China. In this paper, the development and current situation of green control technology of rice pests in China are reviewed and sorted out from four aspects: Agricultural and ecological control, physical and chemical control, biological control, and precise application of pesticides. Finally, some suggestions and prospects for the future development are put forward. This paper can provide a reference for the research and application of green control techniques of rice pests.

Key words: Rice; green prevention and control; application research; current situation; prospect

水稻作为我国重要的粮食作物, 其生产在保障我国粮食安全、推动农业发展等方面起着举足轻重的作用。长期以来, 病虫害的发生和为害一直是制约水稻生产的重要瓶颈, 然而在过去的水稻病虫害防治策略中, 由于过度依赖化学农药以及化学农药的不合理使用, 造成害虫抗药性、农药残留、环境污染、物种灭绝等一系列严重问题, 直接威胁着我国农业的可持续发展、粮食安全以

及农产品安全。针对病虫害的防治, 1975 年我国提出了“预防为主, 综合防治”的八字方针 (Integrated Pest Management, 简称 IPM)。随着社会的发展和科学的进步, 2006 年又进一步修订为“公共植保、绿色植保”, 首次提出了“统防统治”以及“绿色”的概念。2015 年又提出了“科学植保、公共植保和绿色植保”等方针, 进一步明确了以政府为主导、病虫害防控绿色发展和可持续

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFD0200807)

作者简介: 吕亮, 1975 年生, 男, 硕士, 副研究员, 研究方向为水稻害虫发生规律与防控技术, E-mail: lvlianghbaas@126.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 张舒, 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为水稻病虫害绿色防控技术, E-mail: ricezs6410@163.com

收稿日期 Received: 2021-01-04; 接受日期 Accepted: 2021-04-13

发展的理念。2015 年 10 月 29 日,中国共产党十八届五中全会首次提出“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念,“绿色”渐渐成为发展的纲领性内容。特别是党的十九大以来,实行了最严格的生态环境保护制度,“绿色”是现代社会发展的必然。另外,随着我国经济的高速发展,人们的消费需求亦在发展,越来越重视农产品的质量,不断升级的市场需求倒逼着农业生产的调整,推动着农业向低碳化、可循环方向发展。总之“绿水青山就是金山银山”,绿色发展已成为当代中国农业发展的最强音。

近些年来,在国家科技支撑计划、国家公益性行业(农业)科研专项、国家重点研发计划等重大项目的连续资助下,我国水稻害虫绿色防控技术研究得到迅速的发展和长足进步,推广了一系列高效、可持续控制水稻害虫的新技术和方法,从源头上减轻了化学农药的污染,保障了农产品质量安全,保护了生态环境,深入推崇了“绿色”发展理念,并正在推动着现代农业的可持续发展。

1 农业、生态调控技术

农业、生态调控是指以农业生态系统为总体,通过针对性地运用各种栽培技术措施,创造有利于农业作物生产和天敌发展、不利于害虫发生的条件,把害虫控制在经济损失允许的密度以下,并达到农业增产的目的。农业、生态调控措施可直接杀灭害虫,还可恶化害虫的营养条件和生态环境,达到压低虫源基数,抑制害虫生存和繁殖。

1.1 抗性品种的应用

抗性品种的应用是病虫害防治最直接、最经济、最有效的措施之一。我国水稻抗性资源研究自上世纪 80 至 90 年代起,迅速得以广泛开展。如彭忠魁(1982)连续 3 年鉴定了 380 份水稻品种对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的田间抗性,获得一批抗性材料。而顾正远等(1984)从 8 222 份水稻品种资源的筛选出科砂 3 号、Suweon290 等抗褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 品种。湖北省农业科学院植物保护研究所在 80 年代末也相继筛选出一系列抗褐飞虱、白背飞虱 *Sogatella furcifera* 等水稻早中晚稻品种在湖北大面积推广,亦获得了良好的社会、经济和生态效益(谷守礼等,1990)。

开展野生稻 *Oryza rufipogon* 有利性状的鉴定、挖掘抗性基因一直受到我国科学家们的普遍关注。

李青等(1988)从药用野生稻 *Oryza officinalis* 中筛选到 191 份抗褐飞虱和 30 份高抗种质,而广西农科院从 197 份药用野生稻筛选出对白背飞虱免疫性种质 47 份。陈峰等(1989)等从 1 463 份普通野生稻材料中筛选到 3 份抗褐飞虱种质 S3026、S7535 和 S7536。以黑选 A 为母本,通过与药用野生稻杂交,杨士杰(2003; 2005; 2007)陆续发现其后代对二化螟 *Chilo suppressalis*、稻纵卷叶螟和白背飞虱等表现出很强的抗性。特别在抗褐飞虱研究方面,武汉大学生命科学院以药用野生稻、普通野生稻等材料为基因供体,通过杂交获得一批抗虫中间材料,如 B5、B2 和 B3 等。其中何光存研究团队应用图位克隆法(Map-based cloning)在国际上成功克隆了首个抗褐飞虱基因 *Bph14* (Du *et al.*, 2009),其后克隆了 *Bph15*、*Bph6*、*Bph9* 及其等位基因 *Bph1*、*Bph7*、*Bph10* 和 *Bph21* (杜波等,2018)。

目前,我国通过分子标记辅助选择(Marker-Assisted Selection, MAS)成功培育了一批抗褐飞虱的水稻新品种。如湖北省农科院选育出含 *Bph14* 的恢复系 R476,组配出高产优质杂交中粳新组合广两优 476,并在湖北迅速得到推广应用(夏明元等,2010)。武汉大学朱英国院士课题组选育出了具有 *Bph14* 和 *Bph15* 基因的抗褐飞虱光温敏核不育系 Bph68S 和红莲型细胞质雄性不育系洛红 4A,进一步选育出了通过湖北省和安徽省品种审定的抗褐飞虱两系杂交稻两优 234 (朱仁山等,2013)。南京农业大学将 *Bph3* 导入感虫品种宁粳 3 号,获得的新品系无论苗期还是成株期均高抗褐飞虱 (Liu *et al.*, 2015)。另外,在水稻转基因育种方面,如浙江大学舒庆尧等(1998)成功地将 Bt 基因 *cry1Ab* 导入秀水 11 中,获得“克螟稻”转基因水稻品系,对水稻二化螟、三化螟 *Tryporyza incertulas* 和稻纵卷叶螟表现高抗。而复旦大学与中国水稻研究所、湖北省农业科学院等单位合作,利用基因枪法在粳稻品种鄂宜 105 和鄂晚 5 号中导入雪花莲凝集素基因(*Galanthus nivalis* agglutinin, GNA),获得了一批抗褐飞虱转基因株系(孙小芬等,2001)。随后,华中农业大学亦相继成功培育出转 Bt (苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*, 简称 Bt) 基因抗虫水稻“华恢 1 号”以及杂交稻“Bt 汕优 63”,并获得转基因安全证书,引起国内外广泛关注 (Jiang *et al.*, 2004)。

1.2 冬季灌水翻耕稻田

一些水稻害虫如水稻螟虫等冬季常以老熟幼虫在稻茬、杂草等场所越冬,因此把控好水稻害虫越冬等关键节点,采取相应的有效控制措施,来年害虫的发生基数就会大大减少。戴志一等(1993)对冬季二化螟越冬存活率的研究发现,免耕处理的二化螟幼虫越冬存活率最高,冬季深耕处理可明显降低二化螟越冬存活率。王争文等(2005)的研究表明,冬闲田春季深水灌溉并且放养鸭子则可显著降低水稻螟虫越冬虫口基数。而黄水金等(2010)发现,冬前旋耕处理对越冬二化螟的控制效果显著高于焚烧稻草或冬后堆沤处理。

另外,冬前清理田埂杂草、农作物残株等对水稻越冬害虫亦有一定的控制作用。

1.3 调整播种期、耕作制度

害虫为害与作物生育期有密切的关系,因此适当调整水稻播种期就有可能减少害虫的发生和为害。如早稻育秧时,可适当提前或推迟播种期,尽量避免水稻二化螟越冬代成虫的羽化高峰,应该可明显减少水稻秧田的落卵量。还有晚稻早插,可减轻稻瘿蚊 *Orseolia oryzae* 的为害(张国华,2004)。

我国耕作制度十分复杂,自然存在单作、多作等多种形式,其中多作易造成作物和害虫的多样性,从而能起到以害繁益、以益控害等控制效果。如由于湖北地区早稻种植面积大大减少,已造成单食性原常发害虫三化螟发生显著减少(吕亮等,2018)。

1.4 肥水管理

事实上,科学的肥水管理一方面可促进水稻的生长发育,壮苗健株,从而提高水稻抗耐虫性。另一方面,亦可造成对害虫发生的不利环境,抑制害虫的生长、存活和繁殖,进而降低害虫的为害。

如水稻生长季适当施用硅钙肥可明显减少稻田粘虫为害(陈佳广,2014)。在稻飞虱发生期,结合水稻栽培技术的要求,适时进行搁水晒田,可在一定程度上减少稻飞虱发生量。另外,晚稻通过干旱等育秧方式亦可减轻稻瘿蚊的发生为害(农国邦和莫华发,1992)。

1.5 稻田周边的作物布局

有研究表明,通过周边合理的作物布局可以给害虫天敌提供良好的栖息、庇护与涵养增殖场

所,从而减缓单一作物种植条件下的天敌与害虫跟随现象的时滞效应,能及时抑制害虫种群数量的发展(Chen *et al.*,2008;戈峰等,2011)。这些稻田生态系统害虫生物防治的理论基础已渐渐在水稻害虫绿色防控上得到越来越多的应用。

于水稻田田埂闲余土地上种植大豆等作物,大豆上蜘蛛发生种类较多,一般发生数量约占其主要捕食性天敌种类的一半左右,而这些蜘蛛类天敌又对邻近稻田害虫如稻飞虱等有很好的自然控制作用,可有效控制稻飞虱的过度繁殖,从而减轻稻飞虱的发生为害(刘向东等,2001)。另外大豆与水稻邻作,还可明显增加寄生蜂在大豆-水稻的扩散,稻田二化螟、三化螟、稻纵卷叶螟和褐飞虱的卵寄生率分别为17.8%、20.3%、10.2%和12.4%(戈林泉等,2013)。

蜜源植物可供稻田寄生蜂等采集花蜜和花粉来补充营养,从而促进寄生蜂雌蜂的生殖系统发育,提高寄生蜂的生殖力、存活率、搜索能力和寄生能力(陈学新等,2014;时敏等,2020)。由于不同的显花植物其花蜜营养成份存在差异,所以对植物上寄生蜂发生的影响也不同(朱平阳等,2012)。而Zhu *et al.* (2013)对23种植物的筛选测试表明,芝麻 *Sesamum indicum* 可为稻飞虱小蜂 *Anagrus* sp. 提供营养丰富的蜜源,可使其寿命延长约30%,并显著提高稻飞虱等卵寄生率上升。浙江省农业科学院吕仲贤研究团队在浙江省金华市水稻上实行生态工程技术控制害虫多年的实践表明,田边长期种植芝麻可明显提高稻飞虱和稻纵卷叶螟寄生蜂的数量,其生态控制区的稻飞虱寄生蜂数量是农民自防田的4~10倍,稻飞虱数量显著降低12倍(朱平阳等,2015)。还有赵燕燕等(2017)研究发现,水稻田埂种植花期较长的车轴草 *Trifolium pratense* (又称三叶草)和酢浆草 *Oxalis corniculata* 等2种植物,能显著延长和提高螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* 的寿命和寄生能力,对水稻螟虫具有很好的自然控制效果。

在农田生态系统中,害虫可通过感觉器官感受特定的信号,进而产生取食、产卵等行为,而周边引诱植物或驱避植物亦可通过自身物理、化学信号对害虫的视觉、嗅觉等感受器官产生影响,从而起到引诱或驱避害虫的作用。如引诱植物香根草 *Vetiveria zizanioides*、苏丹草 *Sorghum sudanense* 都能引诱水稻二化螟前来产卵,但卵孵后的幼虫在香根草和苏丹草上皆不能完成生活史,因此已

广泛应用在水稻田边种植上,对水稻二化螟具有很好的“诱杀”作用(郑许松等,2009)。另外,苏丹草对其他多种钻蛀性螟虫也具较强引诱作用,并在非洲生产上得到很好应用(Khan *et al.*, 1997)。而驱避植物通过散发特殊气味则能使害虫不能取食或产卵,并远离主栽作物,目前多在蔬菜等经济作物上得到很好地应用(Seljasen and Meadow, 2006)。总之,在农业生产实际中,利用“Pull-Push”策略来控制害虫,即在农田田块内同时种植引诱植物和驱避植物并通过合理的种植布局来降低农田内的害虫种群密度,渐渐成为研究热点(Cook *et al.*, 2007)。“Pull-Push”策略的运用已成为当前水稻害虫绿色防控技术体系的重要组成部分。

2 理化诱控技术

理化诱控技术主要是依据害虫固有的生物学习性(如趋光、迁飞、交配、产卵等),人为的、有针对性的采用物理、化学或其他的措施来诱集并最终杀灭害虫。水稻害虫理化诱控技术可明显减少农药施用、保护生态环境,在水稻病虫绿色防控中大受欢迎,已得到越来越多的应用。

2.1 灯光诱杀

由于昆虫具有趋光性,人们也较早实践了灯光诱杀害虫技术,如在上世纪建国初,全国以原始的白炽灯为光源,响应号召开展了“万家灯火”杀灭害虫的活动,但杀虫效果极不明显(赵季秋, 2012)。随后又研发出黑光灯诱杀害虫,但黑光波长为紫外波段,穿透能力弱,而且诱杀害虫易受环境影响,长久以来仅在害虫预测预报中继续使用。而高压汞灯由于亮度强、穿透力强、诱虫谱广等众多优点,迅速在害虫防治中起着重要的作用,但高压汞灯存在着耗电多、不便移动等明显缺点,又在一定程度上限制了其发展。

上世纪90年代,河南省汤阴佳多科贸有限公司在前期研究的基础上,成功研制出频振式杀虫灯,从而使灯光诱杀害虫有了新的重大发展和突破。频振式杀虫灯依据不同昆虫的趋性,采取不同波长的光源,辅以颜色和气味诱集靶标害虫靠近灯具后靠高压电网击杀方式杀灭害虫。佳多频振式杀虫灯自1993年的田间试验获得认证后,已经在大田作物和蔬菜害虫的治理上得到广泛应用。后来在众多实践中发现,频振式杀虫灯由于不具

备靶标害虫选择性,杀死害虫的同时,对昆虫天敌也有杀伤作用。

新型LED光源的出现,为害虫灯光诱控技术注入了新的活力,波长单一的LED光源大大提高了靶标害虫的诱集率,降低了对天敌和中性昆虫的潜在伤害,渐已成为最佳的诱虫光源(刘彦飞等, 2013)。华中农业大学雷朝亮研究团队率先提出害虫“光陷阱”理论,即依据不同害虫对光波和光强的特异趋性以及不同的上灯节律,设计适用于不同农业生态系统内害虫防治的专性诱捕器,可明显提高靶标害虫的诱捕效果。光陷阱害虫专性诱捕器经改造后,将电触式改为风吸式,并增加了针对天敌昆虫的小型逃生孔,减少了对大多数小型天敌昆虫的杀伤(桑文等, 2018)。湖南本业绿色防控科技股份有限公司依据“光陷阱”理论,研发出的光陷阱诱捕器已成为害虫灯诱防控技术行业内的新标杆。与常规的频振式杀虫灯相比,光陷阱诱捕器对稻田主要害虫的诱捕量提高,并能保证益虫和中性昆虫的存活率在70%以上(何超等, 2013)。

2.2 性信息素诱杀

昆虫性信息素,又称性外激素,是由某种昆虫个体分泌于体外的一种微量化学物质(Wang *et al.*, 2008),能被同种异性个体的感受器所接受并引起异性个体产生一定的生理反应,如求偶、交配等。多数昆虫种类由雌虫释放性信息素来引诱远处雄虫进行交配,也有些种类由雄虫近距离释放性信息素激发雌虫性欲,阻止同种其他雄虫进行交配作用。截至目前,全世界已鉴定和合成的昆虫性信息素或类似物约2 000余种,而我国研制成功的重要害虫的性信息素也有近百种,为应用昆虫性信息素防治害虫提供了可靠的保障(范晓军等, 2010)。

昆虫性信息素的应用在农业害虫绿色防控方面起着重要作用,且当前市场上的上百种商品化的昆虫性信息素,多以诱杀鳞翅目害虫为主。其使用方法可分为迷向法和诱杀法。迷向法的基本原理是指,在高浓度的性信息素环境中,雄成虫通过触角长时间接触而导致其处于麻痹状态,完全丧失了对雌成虫的定向求偶、交配等行为,降低了雌雄交配机率,进而降低了害虫种群密度(Wright, 1965)。而诱杀法是指,利用昆虫性信息素诱集异性昆虫,并设置性信息素诱捕器进行诱杀害虫,导致自然条件下的雌雄比例严重失调,

减少了雌雄的交配行为, 从而降低其种群密度 (王安佳等, 2018)。

2.3 色板诱杀

昆虫对色彩的趋性是指通过其视觉器官中的感光细胞对外界光波产生的趋向反应, 不同种类害虫对色彩的趋性有明显差异。如蓟马类害虫偏好蓝色, 粉虱类害虫喜欢黄色, 而蜂类尤喜黄色和粉色, 叶甲对黄色趋性亦较强。由于粘虫色板制作相对简便, 成本低, 因此人们早在上世纪 80 年代就用粘虫色板来诱集并杀灭害虫, 并率先在蔬菜、果树等作物害虫的监测与防治上得到应用。

贝亚维等 (2004) 用黄色诱虫板进行蔬菜田间试验, 结果表明, 黄色诱虫板可诱集粉虱 Aleyrodidae、蚜虫、叶蝉、飞虱 Delphacidae、斑潜蝇 Liriomyza、实蝇、果蝇 Drosophilidae、寄生蝇、摇蚊 Chironomid、蓟马类及小型甲虫、蜂类和蛾类等多种小型成虫。曾泉等 (2007) 用黄板在柑橘园诱集有 20 种小型昆虫, 其中柑橘害虫占总虫量的 65.21%, 天敌占 0.24%, 其余虫类占 34.55%, 说明粘虫色板对天敌相对安全。而贺春久等 (2007) 在中稻上采用套袋式黄板诱虫发现, 飞虱类占 52.19%、叶蝉类占 0.04%、卷叶虫类占 0.02%、稻赤斑黑沫蝉 *Callitettix versicolor* 占 0.03%、其他虫类占 47.72%。

3 生物防治技术

生物防治技术是利用生物或其代谢产物来控制有害动、植物种群或减轻其危害程度的方法, 是我国病虫害综合防治的重要措施之一。

通过天敌资源调查, 已初步明确我国水稻害虫天敌有 1 303 种, 其中寄生性天敌 419 种, 捕食性天敌 820 种, 病原性天敌 64 种 (万方浩等, 2000)。保护利用本地天敌成为害虫综合治理的核心, 上世纪 90 年代, 仅湖南一省利用稻田天敌控制害虫的面积每年就达 173.3 万 hm^2 , 且农药用量比 1980 年减少了 46.5% (朴永范和林晃, 1998)。

我国在研究赤眼蜂人工规模化饲养与繁殖技术方面进展较快。我国创新了利用柞蚕 *Antheraea pernyi* 卵繁殖赤眼蜂的技术, 并成功研制出赤眼蜂人工卵半机械化生产线, 从而实现了天敌商品化生产。目前, 赤眼蜂蜂卡已在玉米螟 *Ostrinia nubilalis*、水稻螟虫等害虫绿色防控中得到广泛使

用, 并产生较好的经济、社会和生态效益 (彭昌家等, 2015)。

整体来说, 我国微生物农药的研发与应用成就显著, 其中细菌性病原微生物苏云金芽孢杆菌 Bt 研发和应用应该是最迅猛的。我国正式注册登记的 Bt 工厂有 42 家, 1995 年全国 Bt 产量达到 2 000 万 kg, 其主要剂型有悬浮剂、可湿性粉剂等, 仅湖北、江苏、安徽、四川等省应用 Bt 防治稻苞虫 *Parnara guttata*、稻纵卷叶螟的面积就达 80 多万 hm^2 (包建中和古德祥, 1998)。而虫生真菌微生物农药的研究近年来发展较为迅速。目前报道应用于生防的虫生真菌重要种类有白僵菌 *Beauveria bassiana*、绿僵菌 *Metarhizium anisopliae*、镰刀菌 *Fusarium*、拟青霉菌 *Paecilomyces* 等 (王记祥和马良进, 2009)。绿僵菌代表种类中的金龟子绿僵菌具有广谱杀虫性, 如金龟子绿僵菌 CQMa421 对稻飞虱、稻纵卷叶螟和水稻螟虫均具较好的杀灭作用, 且对天敌安全 (张舒等, 2018)。在自然条件下, 镰刀菌是控制害虫口密度、维持生态平衡的重要因素, 利用镰刀菌可防治水稻害虫有螟虫、粘虫 *Mythimna separata*、稻苞虫、稻纵卷叶螟、稻飞虱及叶蝉等 (李宏科, 1983; 李宏科, 1996)。拟青霉属类真菌是又一类重要的昆虫病原真菌, 如玫烟色拟青霉 *Paecilomycesfum osoroseus* 对蚜虫、粉虱类害虫效果较好, 已在蔬菜、茶叶害虫上得到很好的应用 (景云飞和张仙红, 2007)。

常用病毒农药是以核型多角体病毒 (NPV) 和颗粒体病毒 (GV) 为基础制成的生物制剂。1975 年中国科学院武汉病毒研究所在国内首次分离出棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 核多角体病毒, 于 1990 年正式投产, 主要防治棉铃虫等重大害虫, 并取得了良好的防治效果 (陶圣如, 1994)。而中山大学之后又分离出斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 核型多角体病毒, 并最后研制成功相关生物制剂, 对斜纹夜蛾有明显杀灭作用, 且对环境安全 (蒲蛰龙等, 1990)。

国内植物源农药方面, 目前应用较多的为苦参碱、烟碱、鱼藤酮、茶皂素、木烟碱、印楝素、苦皮藤素等, 而对于植物次生物质的筛选与应用, 也必将促进害虫生物防治的发展 (杜小凤等, 2000)。

4 精准施药技术

水稻害虫绿色防控技术体系中应包括化学农药防治,化学农药防治是在害虫大发生特别是暴发成灾情况下必须采取的一种应急防治措施。化学农药防治能迅速杀灭害虫,降低虫口基数,这些效果都是非化学防治方法所不具备的。但传统的农药施用方法重在考虑由于害虫的发生所带来的经济损失,导致频繁用药,大剂量用药,农药利用效率不高,易造成严重的“3R”(抗药性 Resistance、害虫再猖獗 Resurgence、农药残留 Residue)问题,与现代绿色农业和可持续农业的发展不相符。精准施药技术是当前智慧农业的重要部分,已成为当前的研究热点。

4.1 害虫发生的数字化预测预报技术

开展准确的害虫发生预测预报,是害虫防治的关键所在。加强害虫预测预报,及时掌握害虫发生时期和发生动态,可指导害虫适时用药、达到防治指标施药,从而能提供对水稻害虫的防治效果,又能降低农药使用量,因此,准确的害虫预测预报是实施精准施药的前提。特别是随着信息技术的发展,通过远程数据和图像的采集与传输,对害虫发生实行实时监测已成为可能。目前数字化害虫预测预报技术已得到越来越多的发展和应用,并在不断地完善和改进中。

4.2 害虫的防治适期、防治指标

在预测预报的基础上,要抓住害虫防治的最佳时期,即防治适期,并准确选用高效、低毒、低残留对路农药进行防治,可明显减少用药次数、提高防治效果。通常水稻害虫应抓住卵孵高峰期或低龄幼(若)虫发生高峰期用药,防治效果会明显提高。如顾志龙和陈跃(2012)对大螟 *Sesamia inferens* 造成水稻白穗的防治适期研究表明,大螟白穗的防治适期在水稻破口期至破口后 4 d,而破口后 8 d 防治,防效直线下降,破口后 12 d 防治基本无效。而周浩等(2019)研究沿江地区水稻第 2 代二化螟的防治适期,用氯虫苯甲酰胺等药剂在二化螟卵孵盛期用药的防治效果明显高于 2 龄后期用药的处理。

害虫发生时,应在达到防治指标时进行施药,才能获得较大经济效益,并能尽量减少用药次数。如狄雪塬等(2015)采用笼罩接虫法,得出稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* 的成虫防治指标为

1 头/穴,幼虫防治指标为 6.5 头/穴。而朱友理等(2018)研究发现,如果以产量损失率 3% 为准,水稻拔节孕穗期稻纵卷叶螟大发生时的防治指标可定为幼虫 30~40 头/百穴。

另外,稻田在防治主要害虫时,还要兼治次要害虫,尽量控制施药次数和用量。针对不同害虫的为害部位,施药部位也应所有不同。如稻飞虱多在水稻茎基部为害,因此针对施药时应对准水稻茎基部,而稻纵卷叶螟等只为害水稻上部叶片,故须对准水稻全部叶片用药。只有对针对性的部位进行重点施药,才能提高农药利用率和防治效果。其次为延缓害虫抗药性的形成,提倡尽量减少同一类型农药使用次数,交替轮换使用农药。

4.3 基于精准施药技术的植保新装备的研发

传统的施药技术与施药装备比较落后,防治效果差,农药利用率不高,易造成环境污染,而利用精准施药技术与高效植保装备则可减少农药使用量,提高农药利用率和防治效果,减少农药对环境的污染。近些年来,在国家众多项目的资助下,中国农业大学、华南农业大学、南京农业大学、中国农业机械化科学研究院等单位基于中国农业生产实际情况,研发出一系列精准施药技术,并联合相关设备制造企业,融合自动化、遥感、卫星导航等多种现代前沿技术,创制了一批新型现代化植保装备(何雄奎,2020)。

植保无人机渐已成为当前一种重要的新型植保作业机具。自 2010 年以来,以植保无人机为载体的超低容量施药技术已逐步成为研究热点,且主要集中在无人机喷雾的雾滴沉积和漂移特性方面。如王昌陵等(2016; 2017)通过雾滴收集装置和北斗卫星定位系统等联用,提出了一种植保无人机施药雾滴沉积和飘移特性评估方法;而王潇楠等(2017)对油动力单旋翼植保无人机雾滴飘移特性的研究表明,侧风风速是雾滴飘移的重要影响因素。Qin *et al.* (2016)研究了无人机在水稻冠层作业高度和横向喷幅对雾滴沉积量和分布均匀性的影响,结果表明,高度和喷幅会显著影响无人机的雾滴沉积量和分布均匀性。而陈盛德等(2016)设计无人机飞行参数的试验结果表明,飞行高度和飞行速度对水稻冠层上雾滴平均沉积量影响显著,但对雾滴分布均匀性影响不显著。

在植保无人机防治水稻害虫的应用方面,余为仆等(2020)研究了再生稻上病虫害防治的飞

行技术参数, 结果表明, 大疆 MS-G1 型无人机以飞行高度为 1.8 m、飞行速度为 4~6 m/s 的参数执行飞行喷雾, 对水稻病虫的防效最好。而陈豪明等 (2020) 研究表明, 采用植保无人机喷雾施药对稻蓟马 *Chloethrips oryzae* 的防效约高出常规施药方式的 25%, 且对水稻二化螟的防效亦达到 90% 以上。而随着植保无人机的进一步应用, 农药剂型及颗粒大小等因素又常造成喷头堵塞等现象, 因此适应新型施药器械的剂型研发成为当前急需。如赵莲英 (2020) 评价了植保无人机喷施纳米农药的试验效果, 得出对水稻病虫的总体防效优于常规施药和农民用药的结论。

总之精准施药技术是信息时代精准农业发展的必然, 目前, 精准施药的在农业上的应用已越来越广泛, 发展前景广阔。

5 展望

随着现今中国经济的稳步发展, 绿色发展、建设现代可循环农业是时代的强烈要求。然而面对当前病虫暴发频发、抗药性问题突出、生态环境恶化等一系列严重农业生产问题, 农业科研工作任重道远, 特别是病虫绿色防控技术研究必将面临新的机遇和挑战。

基础研究是绿色防控源头创新的理论基础。面向未来, 我们需要加强多学科、多领域相互融合的基础理论研究, 创新发展颠覆性绿色防控新技术。首先是继续深入开展害虫爆发成灾的分子和生态机制、害虫-植物-天敌间的互作关系、非生物因子对害虫发生的影响、新型绿色农药创制以及精准施药器械研发等基础理论研究。其次利用先进的分子生物学技术, 创新开展基因编辑、聚合多抗性基因育种等高新技术方面研究。再者, 融合当前快速发展的网络信息、北斗定位、人工智能技术等, 推进现代绿色防控产业朝自动化、智能化等方向发展。

由于目前我国有害生物绿色防控技术产业化程度低、规模小, 缺乏市场竞争力。因此在加强理论创新的同时, 作为政府主管部门, 要因势利导, 制定相关法律法规, 促进产、学、研深度融合, 从政策和资金上给予大力扶持, 做强做大优势企业, 提升市场竞争力。还有, 我国是以小规模农户分散种植为主体的农业生产模式, 普遍对绿色防控技术认识不够、接受程度低, 从而也长

期制约了我国绿色防控技术产业的发展。因此, 各级主管部门要加强绿色防控技术的宣传力度和推广培训等, 还要修订和完善相应的工作机制和政策, 健全和建立专业从事植保技术人员培训网络。

未来, 病虫害绿色防控技术定会朝着自动化、智能化等方向发展, 必然在推动我国现代农业发展、保障粮食安全等方面发挥着越来越大的作用。

参考文献 (References)

- Bao JZ, Gu DX. The Research of Biological Control in China [M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1998: 1-664. [包建中, 古德祥. 中国生物防治 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1998: 1-664]
- Bei YW, Gao CX, Chen XY, et al. Comparison in species and quantity of insect pests trapped on yellow sticky traps between greenhouse and open field [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2004, 16 (5): 340-342. [贝亚维, 高春先, 陈笑芸, 等. 黄色诱虫板在温室和露地诱虫谱的比较研究 [J]. 浙江农业学报, 2004, 16 (5): 340-342]
- Chen F, Tan YJ, Shuai YY. Identification of resistance of wild rice germplasm resources to brown planthopper *Nilaparvata lugens* (stål) in Guangdong Province [J]. *Journal of Plant Protection*, 1989, 16 (1): 12-26. [陈峰, 谭玉娟, 帅应垣. 广东省野生稻种质资源对褐稻虱的抗性鉴定 [J]. 植物保护学报, 1989, 16 (1): 12-26]
- Chen HM, Zhou YJ, Luo Q, et al. Evaluation of the effect of plant protection UAV on rice diseases, insect pests and weeds [J]. *China Rice*, 2020, 26 (5): 97-101. [陈豪明, 周宇杰, 骆琴, 等. 植保无人机全程解决水稻病虫草害效果评价 [J]. 中国稻米, 2020, 26 (5): 97-101]
- Chen JG. Discussion on the occurrence and integrated control of armyworm in Yi County [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2014, 245 (11): 6-7. [陈佳广. 义县粘虫的发生与综合防治探讨 [J]. 农业科技与装备, 2014, 245 (11): 6-7]
- Chen LD, Fu BJ, Zhao WW. Source-sink landscape theory and its ecological significance [J]. *Front. Biol. China*, 2008, 3 (2): 131-136.
- Chen SD, Lan YB, Li JY, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (17): 40-46. [陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (17): 40-46]
- Chen XX, Liu YQ, Ren SX, et al. Plant-mediated support system of natural enemies of insect pests [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (1): 1-12. [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 等. 害虫天敌的植物支持系统 [J]. 应用昆虫学报, 2014, 51 (1): 1-12]

- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA. The use of Push – Pull strategies in integrated pest management [J]. *Annual Review of Entomology*, 2007, 52: 375 – 400.
- Dai ZY, Yang YZ, Wang CA, et al. The effects of different tillage techniques on survival rate of *Chilo suppressalis* and *Tryporyza incertulas* were significant [J]. *Plant Protection*, 1993, 19 (4): 48 – 49. [戴志一, 杨益众, 王春安, 等. 不同耕作技术对二化螟、三化螟越冬存活率影响差异显著 [J]. 植物保护, 1993, 19 (4): 48 – 49]
- Di XY, Yang MF, Xu J, et al. Studies on the harm loss and economic threshold of *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel in Guizhou [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2015, 52 (6): 1474 – 1481. [狄雪源, 杨茂发, 徐进, 等. 贵州稻水象甲危害损失和防治指标研究 [J]. 应用昆虫学报, 2015, 52 (6): 1474 – 1481]
- Du B, Zhang WL, Liu B, et al. Identification and characterization of *Bph14*, a gene conferring resistance to brown planthopper in rice [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2009, 106: 22163 – 22168.
- Du B, Chen RZ, He GC. Exploitation, identification and utilization of brown planthopper resistance genes in rice [J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2018, 30 (10): 1072 – 1082. [杜波, 陈荣智, 何光存. 抗褐飞虱基因的发掘、鉴定与利用 [J]. 中国科学: 生命科学, 2018, 30 (10): 1072 – 1082]
- Du XF, Xu JM, Wang WZ, et al. Research progress on botanic pesticides [J]. *Agrochemicals*, 2000, 39 (11): 8 – 10. [杜小凤, 徐建明, 王伟中, 等. 植物源农药研究进展 [J]. 农药, 2000, 39 (11): 8 – 10]
- Fan XJ, Li Y, Li Y, et al. Research progress of insect sex pheromone [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38 (9): 4636 – 4638. [范晓军, 李瑜, 李瑶, 等. 昆虫性信息素研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (9): 4636 – 4638]
- Ge F, Wu KM, Chen XX. Major advance on the interaction mechanism among plants, pest insects and natural enemies in China [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (1): 1 – 6. [戈峰, 吴孔明, 陈学新. 植物 – 害虫 – 天敌互作机制研究前沿 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (1): 1 – 6]
- Ge LQ, Hu ZW, Wu JC. Effect of soybeans, corn and rice configuration on the biological control of pest insects [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (4): 921 – 927. [戈林泉, 胡中卫, 吴进才. 大豆、玉米与水稻配置对稻田寄生蜂的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (4): 921 – 927]
- Gu SL, Qian HL, Zhang Y, et al. Research and application of resistant rice varieties [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 1990, 12: 6 – 9. [谷守礼, 钱汉良, 张翼, 等. 水稻抗性品种的研究和应用 [J]. 湖北农业科学, 1990, 12: 6 – 9]
- Gu ZL, Chen Y. The dynamic effect of the optimum control period and pesticides to control *Sesamia inferens* (Walker) on the number of white rice ear [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Science*, 2012, 3: 360 – 362. [顾志龙, 陈跃. 大螟防治适期及药剂对白穗数量变化动态的影响 [J]. 浙江农业科学, 2012, 3: 360 – 362]
- Gu ZY, Zhang XJ, Cai WQ, et al. Resistance identification of rice germplasm resources to brown planthopper [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 1984, 1: 31 – 32. [顾正远, 张先进, 蔡蔚琦, 等. 稻种资源褐稻虱抗性鉴定 [J]. 江苏农业科学, 1984, 1: 31 – 32]
- He C, Fang BH, Zhang YZ, et al. Comparison of pest – controlling effect in rice fields between fan – inhaling lamps and frequency trembler grid lamps [J]. *Hybrid Rice*, 2013, 28 (3): 58 – 63. [何超, 方宝华, 张玉烛, 等. 扇吸式诱虫灯与频振式杀虫灯对稻田防虫效果比较 [J]. 杂交水稻, 2013, 28 (3): 58 – 63]
- He CJ, Liao GX, Zhou RF, et al. The trapping and killing effect of bagging and non – bagging yellow sticky traps on the insect pests of midseason rice [J]. *Guangxi Plant Protection*, 2017, Suppl.: 49 – 51. [贺春久, 廖贡献, 周如凤, 等. 套袋式和非套袋式黄板对中稻害虫的诱杀效果 [J]. 广西植保, 2017, 增刊: 49 – 51]
- He XK. Research progress and developmental recommendation on precision spraying technology and equipment in China [J]. *Smart Agriculture*, 2020, 2 (1): 133 – 146. [何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议 [J]. 智慧农业, 2020, 2 (1): 133 – 146]
- Huang SJ, Liu JQ, Qin WJ, et al. Studies on distribution of overwinter larvae of *Chilo suppressalis* (Walker) in rice stem and its control technique [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22 (11): 91 – 93. [黄金金, 刘剑青, 秦文婧, 等. 二化螟越冬幼虫在稻株内的分布及其控制技术的研究 [J]. 江西农业学报, 2010, 22 (11): 91 – 93]
- Jiang GH, Xu CG, Tu JM, et al. Pyramiding of insect – and disease – resistance genes into an elite indica, cytoplasm male sterile restorer line of rice, ‘Minghui63’ [J]. *Plant Breeding*, 2004, 123: 112 – 116.
- Jing YF, Zhang XH. Progress of *Paecilomyces fumosoroseus* [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2007, 35 (9): 19 – 22. [景云飞, 张仙红. 昆虫病原真菌玫烟色拟青霉的研究进展 [J]. 山西农业科学, 2007, 35 (9): 19 – 22]
- Khan ZR, Chiliswa P, Ampong – Nyarko K, et al. Utilization of wild gramineous plants for management of cereal stem borers in Africa. Management of tropic gramineous stem borers, Nairobi, Kenya [J]. *Insect Science and its Application*, 1997, 17 (1): 143 – 150.
- Li Q, Luo SY, Huang YQ, et al. A brief report on resistance of medicinal wild rice to brown plant – hopper in Guangxi [J]. *Guangxi Plant Protection*, 1988, 15 (3): 165 – 166. [李青, 罗善昱, 黄润清, 等. 广西药用野生稻抗褐稻虱研究简报 [J]. 广西植保, 1988, 15 (3): 165 – 166]
- Li HK. Studies on three pathogenic *Fusarium* species on rice pests [J]. *Journal of Plant Protection*, 1983, 10 (4): 217 – 222. [李宏科. 水稻害虫上三种病原镰刀菌的研究 [J]. 植物保护学报, 1983, 10 (4): 217 – 222]
- Li HK. Control of diseases, pests and weeds in agriculture and forestry with *Fusarium* [J]. *World Agriculture*, 1996, 6: 37 – 38. [李宏科. 利用镰刀菌防治农林病虫害 [J]. 世界农业, 1996, 6: 37 – 38]
- Liu XD, Zhang XX, Guo HF, et al. Control function of spider community to planthopper in rice field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (1): 100 – 105. [刘向东, 张孝羲, 郭慧芳, 等. 稻田蜘蛛群落对稻飞虱的控制功能作用研究 [J]. 生态学报, 2001, 21 (1): 100 – 105]

- 2001, 21 (1): 100–105]
- Liu Y, Wu H, Chen H, *et al.* A gene cluster encoding lectin receptor kinases confers broad-spectrum and durable insect resistance in rice [J]. *Nature Biotechnology*, 2015, 33: 301–305.
- Liu YF, Yu HL, Wu JX. Phototaxis of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) to LED lights and related affecting factors [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (3): 735–741. [刘彦飞, 于海利, 仵均祥. 梨小食心虫对 LED 光的趋性及影响因素的研究 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (3): 735–741]
- Lv L, Chang XQ, Yang XL, *et al.* Biological survey on the overwinter larvae of rice stem borer in Hubei Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (5): 1051–1057. [吕亮, 常向前, 杨小林, 等. 湖北水稻蛀秆螟虫越冬情况调查 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (5): 1051–1057]
- Nong GB, Mo HF. Raising seedlings of late season rice in dry land and by dry tube could reduce damage of rice gall midge [J]. *Guangxi Plant Protection*, 1992, 1: 42–43. [农国邦, 莫华发. 晚稻旱地早播旱管育秧减少稻瘿蚊为害 [J]. 广西植保, 1992, 1: 42–43]
- Peng CJ, Bai TK, Ding P, *et al.* Control effect and benefit of bio-guide wasp missile on *Ostrinia furnacalis* in Nanchong [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 28: 146–150. [彭昌家, 白体坤, 丁攀, 等. 南充市应用生物导弹防治玉米螟效果和效益研究 [J]. 中国农学通报, 2015, 28: 146–150]
- Peng ZK. Field identification of resistance of rice varieties to *Cnaphalocrocis medinalis* [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 1982, 2: 1–3. [彭忠魁. 水稻品种对稻纵卷叶螟抗性的田间鉴定 [J]. 昆虫知识, 1982, 2: 1–3]
- Piao YF, Lin H. New Progress in Biological Control of Crop Diseases and Insect Pests in China [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998: 181–208. [朴永范, 林晃主编. 我国农作物病虫害生防工作新进展 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 181–208]
- Pu ZL, Liu FS, Chen QJ. Application of insect nuclear polyhedrosis virus and *Spodoptera litura* virus insecticides [J]. *Changjiang Vegetable*, 1990, 6: 20–21. [蒲蛰龙, 刘复生, 陈其津. 昆虫核型多角体病毒及斜纹夜蛾病毒杀虫剂的应用 [J]. 长江蔬菜, 1990, 6: 20–21]
- Qin W, Qiu B, Xue X, *et al.* Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers [J]. *Crop Protection*, 2016, 85: 79–88.
- Sang W, Cai FY, Wang XP, *et al.* Application status and prospects of insect trapping lamp in fields [J]. *China Plant Protection*, 2018, 38 (10): 26–30. [桑文, 蔡夫业, 王小平, 等. 农用诱虫灯田间应用现状与展望 [J]. 中国植保导刊, 2018, 38 (10): 26–30]
- Seljasen R, Meadow R. Effects of neem on oviposition and egg and larval development of *Mamestra brassicae* L.: Dose response, residual activity, repellent effect and systemic activity in cabbage plants [J]. *Crop Protection*, 2006, 25 (4): 338–345.
- Shi M, Tang P, Wang ZZ, *et al.* Review of research on parasitoids and their use in biological control in China [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (3): 491–548. [时敏, 唐璞, 王知知, 等. 中国寄生蜂研究及其在害虫生物防治中的应用 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (3): 491–548]
- Shu QY, Ye GY, Cui HR, *et al.* Development of transgenic *Bacillus thuringiensis* rice resistant to rice stem borers and leaf folders [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1998, 24 (6): 579–580. [舒庆尧, 叶恭银, 崔海瑞, 等. 转基因水稻“克螟稻”选育 [J]. 浙江农业大学学报, 1998, 24 (6): 579–580]
- Sun XF, Tang KX, Wan BL, *et al.* Resistance to brown planthopper of transgenic rice lines expressing GNA [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46 (13): 1108–1113. [孙小芬, 唐克轩, 万丙良, 等. 表达雪花莲凝集素 (GNA) 的转基因水稻纯系抗褐飞虱 [J]. 科学通报, 2001, 46 (13): 1108–1113]
- Tao SR. Development status and prospect of virus pesticide [J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 1994, 25 (1): 6–9. [陶圣如. 病毒农药的发展状况和前景 [J]. 浙江化工, 1994, 25 (1): 6–9]
- Wan FH, Ye ZC, Guo JY, *et al.* Progress and prospect of biological control research in China [J]. *Entomological Knowledge*, 2000, 37 (2): 65–74. [万方浩, 叶正楚, 郭建英, 等. 我国生物防治研究的进展及展望 [J]. 昆虫知识, 2000, 37 (2): 65–74]
- Wang AJ, Zhang KX, Mei XD, *et al.* Research progress on mechanisms and application of insect mating behavior disruption by insect sex pheromones and analogues [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2018, 20 (4): 425–438. [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 [J]. 农药学学报, 2018, 20 (4): 425–438]
- Wang CL, He XK, Wang XN, *et al.* Distribution characteristics of pesticide application droplets deposition of unmanned aerial vehicle based on testing method of deposition quality balance [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (24): 89–97. [王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 基于空间质量平衡法的植保无人机施药雾滴沉积分布特性测试 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (24): 89–97]
- Wang CL, Song JL, He XK, *et al.* Effect of flight parameters on distribution characteristics of pesticide spraying droplets deposition of plant-protection unmanned aerial vehicle [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (23): 109–116. [王昌陵, 宋坚利, 何雄奎, 等. 植保无人机飞行参数对施药雾滴沉积分布特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (23): 109–116]
- Wang HL, Ming QL, Zhao CH, *et al.* Genetic basis of sex pheromone blend difference between *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *Helicoverpa assulta* (Guenée) (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2008, 54: 813–817.
- Wang JX, Ma LJ. Application of entomogenous fungi in biological control of agriculture and forestry pests [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2009, 2: 286–291. [王记祥, 马良进. 虫生真菌在农林害虫生物防治中的应用 [J]. 浙江林学院学报, 2009, 2: 286–291]
- Wang XN, He XK, Wang CL, *et al.* Spray drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (1): 117–123. [王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 等. 油动单旋翼植保无

- 人机雾滴飘移分布特性 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (1): 117–123]
- Wang ZW, Chen YK, Peng GQ. Study on effects of raising duck in fallow rice fields with deep water against bollworm in winter [J]. *China Plant Protection*, 2005, 25 (2): 5–6. [王争文, 陈运康, 彭国强. 冬闲田深水灌溉放养群鸭控制二化螟越冬基数及其为害研究 [J]. 中国植保导刊, 2005, 25 (2): 5–6]
- Wright RH. Finding metarchons for pest control [J]. *Nature*, 1965, 207: 103–104.
- Xia MY, Wan BL, Li JB, *et al.* Breeding and application of medium indica hybrid rice Guangliangyou 476 with high yield and good quality [J]. *Hybrid Rice*, 2010, 25: 18–20. [夏明元, 万丙良, 李进波, 等. 高产优质杂交中粳组合广两优 476 的选育与应用 [J]. 杂交水稻, 2010, 25: 18–20]
- Yang SJ. Resistance of hybrid progeny of Medicinal Wild Rice to striped stem borer, *Chilo suppressalis* [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2003, 1: 14–15. [杨士杰. 药用野生稻杂交后代对二化螟的抗性试验 [J]. 湖北农业科学, 2003, 1: 14–15]
- Yang SJ, Chen JQ. Rice leaf roller resistance of filial generation of medicinal mild rice [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, 33 (1): 34–35. [杨士杰, 谌校清. 药用野生稻杂交后代对稻纵卷叶螟的抗性试验 [J]. 贵州农业科学, 2005, 33 (1): 34–35]
- Yang SJ. Resistance of hybrid progenies of Medicinal wild rice to *Sogatella furcifera* [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2007, 4: 75–76. [杨士杰. 药用野生稻杂交后代对白背飞虱的抗性 [J]. 江苏农业科学, 2007, 4: 75–76]
- Yu WP, Zhou ZX, Xu GH, *et al.* Study on appropriate flight parameters of disease and pest control for plant protection UAV in regenerated rice [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 22: 125–127. [余为仆, 周志雄, 徐国华, 等. 再生稻植保无人机病虫害防治适宜飞机参数研究 [J]. 湖北农业科学, 2020, 22: 125–127]
- Zeng Q, Wang CQ, Xiang HL, *et al.* Preliminary report on the trapping and killing effect of yellow sticky traps in citrus insect pests [J]. *Hebei Plant Protection*, 2007, 5: 17. [曾泉, 王长青, 项海兰, 等. 黄色诱虫板对柑橘害虫诱杀效果初报 [J]. 河北植保, 2007, 5: 17]
- Zhang GH. Application of integrated control technique of rice gall midge [J]. *Fujian Agricultural Sciences*, 2004, 4: 37–38. [张国华. 稻瘿蚊综合治理技术的实施应用 [J]. 福建农业科学, 2004, 4: 37–38]
- Zhang S, Zhang QD, Luo HG, *et al.* Control effect of *Metarhizium anisopliae* CQMa421 against important pests of rice [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2018, 17: 53–55. [张舒, 张求东, 罗汉钢, 等. 金龟子绿僵菌 CQMa421 对水稻重要害虫的防治效果 [J]. 湖北农业科学, 2018, 17: 53–55]
- Zhao JQ. Development and application of light trapping pest control technology [J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2012, 1: 67–683. [赵季秋. 灯光诱杀害虫技术的发展与应用 [J]. 辽宁农业科学, 2012, 1: 67–68]
- Zhao LY. Evaluation on the control effect of rice main diseases and insect pests by using plant protection unmanned aerial vehicle to spray nano-pesticides [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 14: 144–146, 155. [赵莲英. 植保无人机喷施纳米农药防治水稻主要病虫的药效评价 [J]. 安徽农业科学, 2020, 14: 144–146, 155]
- Zhao YY, Tian JC, Zheng XS, *et al.* Feasibility of *Trifolium repens* and *Oxalis corniculata* as the nectar resource plant to *Trichogramma chilonis* [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29 (1): 106–112. [赵燕燕, 田俊策, 郑许松, 等. 酢浆草和车轴草作为螟黄赤眼蜂田间蜜源植物的可行性分析 [J]. 浙江农业学报, 2017, 29 (1): 106–112]
- Zheng XS, Xu HX, Chen GH, *et al.* Potential function of Sudan grass and Vetiver grass as trap crops for suppressing population of striped stem borer, *Chilo suppressalis* in rice [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2009, 25 (4): 299–303. [郑许松, 徐红星, 陈桂华, 等. 苏丹草和香根草作为诱虫植物对稻田二化螟种群的抑制作用评估 [J]. 中国生物防治学报, 2009, 25 (4): 299–303]
- Zhou H, Yang LF, Lu XF, *et al.* Discussion on the suitable period and techniques of chemical to control the second generation of *Chilo suppressalis* in the area along the Yangtze River [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2019, 35 (4): 69–71. [周浩, 杨凌峰, 陆邢峰, 等. 沿江地区 2 代二化螟化学防治适期与技术探讨 [J]. 中国农技推广, 2019, 35 (4): 69–71]
- Zhu PY, Lu ZX, Zheng XS, *et al.* Ecological function of flowering plants on conservation of the arthropod natural enemies of insect pests in agroecosystem [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2012, 28 (4): 583–588. [朱平阳, 吕仲贤, 郑许松, 等. 显花植物在提高节肢动物天敌控制害虫中的生态功能 [J]. 中国生物防治学报, 2012, 28 (4): 583–588]
- Zhu PY, Gurr GM, Lu ZX, *et al.* Laboratory screening supports the selection of sesame (*Sesamum indicum*) to enhance *Anagrus* spp. parasitoids (Hymenoptera: Mymaridae) of rice planthoppers [J]. *Biological Control*, 2013, 64 (1): 83–89.
- Zhu PY, Zheng XS, Yao XM, *et al.* Ecological engineering technology for enhancement of biological control capacity of egg parasitoids against rice planthopper in paddy fields [J]. *China Plant Protection*, 2015, 35 (7): 27–32. [朱平阳, 郑许松, 姚晓明, 等. 提高稻飞虱卵期天敌控害能力的稻田生态工程技术 [J]. 中国植保导刊, 2015, 35 (7): 27–32]
- Zhu RS, Huang WC, Hu J, *et al.* Breeding and utilization of hybrid rice Liangyou 234 and NMS Line Bph68S resistance to brown planthopper [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2013, 59: 24–28. [朱仁山, 黄文超, 胡俊, 等. 抗褐飞虱两系杂交稻不育系 BPH68S 及其组合两优 234 的选育 [J]. 武汉大学学报 (理学版), 2013, 59: 24–28]
- Zhu YL, He DB, Cao SP, *et al.* Study on the economic threshold and the yield effect of *Cnaphalocrocis medinalis* damaging at jointing and booting stage of rice [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018, 21: 111, 114. [朱友理, 何东兵, 曹书培, 等. 拔节孕穗期稻纵卷叶螟危害对水稻产量的影响及防治指标研究 [J]. 现代农业科技, 2018, 21: 111, 114]