

赵景, 蔡万伦, 沈栎阳, 等. 水稻害虫绿色防控技术研究的发展现状及展望[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 92-104.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.01.009

# 水稻害虫绿色防控技术研究的发展现状及展望

赵景<sup>1</sup>, 蔡万伦<sup>1</sup>, 沈栎阳<sup>1</sup>, 朱宏远<sup>1</sup>,  
蒲雷<sup>1</sup>, 谢美琦<sup>1</sup>, 邹玉兰<sup>2</sup>, 华红霞<sup>1</sup>

1. 华中农业大学植物科学技术学院/湖北省昆虫资源利用与害虫可持续治理重点实验室, 武汉 430070;

2. 华中农业大学生命科学技术学院, 武汉 430070

**摘要** 绿色低碳是我国当前农业发展的主要方向, 作物病虫害绿色防控技术是保障粮食安全的重要措施, 其推广和应用对于农业可持续发展具有重要意义。水稻是我国主要的粮食作物之一, 近年来我国在水稻病虫害绿色防控技术研究和推广上取得了巨大的进展。本文分别从生态调控技术、农艺栽培措施、物理防控技术、生物防治和应急精准化学防治方面系统梳理和总结我国水稻害虫绿色防控技术的研究和应用概况。生态工程控制技术、扇吸式诱虫灯和适用于稻田的植保无人机低容量喷雾技术等代表性技术的发展, 为水稻害虫绿色防控技术发展提供了有力支撑。开展区域性和特色性的水稻害虫绿色防控技术集成研究与推广, 加大政策扶持和技术培训, 将进一步发挥水稻害虫绿色防控技术在农药减量使用和水稻绿色生产中的作用。

**关键词** 水稻害虫; 绿色防控; 生态调控; 生物防治; 精准化学防治; “两型”农业

**中图分类号** S 471 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)01-0092-13

水稻自古以来是我国种植的主要粮食作物之一, 近年来种植面积稳定在 3 000 万  $\text{hm}^2$ , 稻谷产量 2 亿 t 左右<sup>[1]</sup>。作为我国城乡居民消费第一位的口粮, 稻米的稳定安全生产对于保证我国粮食安全和口粮自给具有重要意义。在水稻种植过程中, 多种病虫害的连续和严重发生对稻谷生产造成了巨大的产量和质量损失。如 2020 年我国农业农村部公布《一类农作物病虫害名录》中的 10 类害虫, 仅水稻害虫稻飞虱(褐飞虱 *Nilaparvata lugens* Stål)和白背飞虱(*Sogatella furcifera* Horváth)、稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée)和二化螟(*Chilo suppressalis* Walker)就占 3 类。据统计, 2006—2015 年水稻病虫害造成的损失为 33.67%, 而通过防治挽回的损失比例为 55.18%, 系统的植物保护措施在保证水稻稳定生产中贡献巨大<sup>[2]</sup>。但我国水稻病虫害防治中, 长期化学农药单一大量使用带来了天敌杀伤、害虫再猖獗、环境污染和稻田生态服务功能下降等负面影响<sup>[3]</sup>。随着我国经济和社会的发展, 广大人民对绿色安全食品的需求和绿色生态环境的关注提高, 绿色、生态和安全的植物保护防

控体系迫切需要发展和完善。

为服务于建设资源节约和环境友好型的绿色可持续农业, 我国于 2006 年提出了“绿色植保, 公共植保”的理念, 决定实施“以绿色植保产品为核心组装的绿色集成防控技术”的植物保护发展策略<sup>[4]</sup>。绿色防控是综合生态调控、农艺栽培措施、生物防治、物理防治和应急性精准化学防治等措施的一套综合技术体系<sup>[5]</sup>, 其强调在建立具有自我控害能力的平衡生态系统前提下, 综合利用一系列措施减少化学农药防治压力, 以促进农作物的绿色安全生产。作为水稻安全生产的重要一环, 我国在水稻害虫绿色防控技术上进行了大量的研究与推广, 取得了一系列代表性的进展<sup>[6]</sup>。本文将结合相关应用原理和研究进展, 从生态调控、农艺栽培措施、生物防治、物理防控和化学防控 5 个方面详细介绍我国在水稻害虫绿色防控上的发展状况。

## 1 生态调控技术

生态系统是由相互关系的生物群落及其生存环境组成的动态平衡系统。在害虫控制方面, 稻田生

收稿日期: 2021-11-05

基金项目: 湖北洪山实验室重大项目(2021HSZD002); 国家自然科学基金面上项目(32172396)

赵景, E-mail: zhao-jing@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 华红霞, E-mail: huahongxia@mail.hzau.edu.cn

态系统经过长期的演化,通过水稻品种自身进化的抗虫性和生物群落中捕食性天敌和寄生性天敌等控虫因子协同作用,形成了对植食性昆虫的自然控害功能。

生态调控技术强调从稻田生态系统中水稻-害虫-天敌及其周围环境的相互关系出发,通过对生态因子调节和非生态因子的调控,发挥稻田系统对害虫的自然控害功能,将害虫种群控制在生态经济阈值水平之下。近年来我国通过国际合作在浙江等地开展以生态工程技术为主的稻田病虫害综合治理,减少农药使用量的同时保持产量不下降,带来了巨大的经济、社会和生态效益<sup>[7]</sup>。近年来该技术一直是全国农业技术推广中心主推的水稻害虫绿色防控技术之一。生态调控主要通过提高作物和天敌的控害能力而实现对害虫的控制,与传统的农业防治具有一定的交叉。区别在于生态调控侧重于从稻田作物及周围景观生境上的布局,创造有利于天敌的环境而抑制害虫种群控制害虫,而农业防治侧重于农艺栽培管理上创造不利于害虫发生的条件而控制害虫。

### 1.1 抗虫水稻品种的培育与利用

稻田生态系统中水稻是核心生产者,推广抗虫品种是防治害虫最经济有效和环境友好的途径之一。在抗虫性资源研究上,抗稻飞虱水稻资源鉴定及机理研究目前进展较快。自 1969 年国际水稻研究所首次发现抗褐飞虱水稻种质 Mudgo 以来,研究人员在栽培稻及野生稻中开展了大量的抗稻飞虱水稻种质资源筛选<sup>[8]</sup>。如国际水稻所分别在 44 335 份水稻资源中发现 15.4% 的抗褐飞虱生物型 I 种质,在 10 553 份中鉴定到 1.9% 的抗褐飞虱生物型 II 种质,13 021 份中鉴定到 1.8% 的抗褐飞虱生物型 III 种质,52 042 份中鉴定到 1.7% 的抗白背飞虱种质<sup>[9]</sup>。在鉴定到对单一稻飞虱具有抗性的品种同时,也发现了一些抗 3 种稻飞虱的广谱抗性品种,如籼稻品种 Mudgo 和一种药用野生稻 *Oryza officinalis* (Acc. HY018) 等<sup>[10-11]</sup>。获得抗性品种资源后,对其抗性基因进行定位有助于杂交育种,目前至少有 30 个抗褐飞虱基因、14 个抗白背飞虱基因定位在水稻染色体上。抗灰飞虱 (*Laodelphax striatellus* Fallén) 基因定位由于抗性资源较少而进展较慢,目前已鉴定到至少 34 个抗虫的数量性状位点 (quantitative trait loci, QTL)<sup>[12]</sup>。另外,我国科学家已克隆到 *Bph14*、*Bph3* 和 *Bph6* 等多个褐飞虱抗性基因并明确了其抗性机制,取得了国际领先的

进展<sup>[13]</sup>。

在生产上,我国一直重视抗虫基因的应用,如在我国推广面积最大的汕优系列杂交稻含有 *Bph1* 抗褐飞虱基因。分子标记辅助选择 (marker assisted selection, MAS) 育种技术的发展,推动了含 *Bph14* 基因的抗褐飞虱广两优 476 和含有 *Bph14* 和 *Bph15* 基因的两系杂交稻两优 234 等审定品种及不育系珞红 4A 等的选育<sup>[14-16]</sup>。同时将 *Bph3* 导入感虫品种宁粳 3 号,获得了对褐飞虱和白背飞虱的抗性<sup>[17]</sup>。开发整合不同抗性机制的多基因聚合品系,将在提高抗性水平和延缓抗性种群进化上起重要作用,如 Hu 等<sup>[18]</sup> 利用分子标记将 *Bph14*、*Bph15* 和 *Bph18* 导入 9311 水稻中,显著提高了对褐飞虱的抗性。

在稻纵卷叶螟和二化螟等害虫的抗性品种选育上,虽然筛选到一些抗虫资源,同时有聚合一些 QTLs 能显著增强水稻对稻纵卷叶螟抗性的报道,但并没有发现主效抗虫基因<sup>[19]</sup>。现代转基因育种技术的发展,推动了抗鳞翅目害虫株系的获得,我国在转 *Bt* 基因抗虫水稻研发上处于世界领先,如华中农业大学培育的抗虫水稻“华恢 1 号”和杂交稻“Bt 汕优 63”在世界上首次获批转基因安全证书<sup>[20-21]</sup>。另外,基于 RNAi 技术的抗二化螟水稻培育目前已获得较大进展,水稻中转入靶向二化螟蜕皮激素通路基因的 *microRNA14* 和 *csu-novel-260* 后,均获得了对二化螟的高抗性<sup>[22-23]</sup>。以上转基因抗虫新材料的获得,为抗虫水稻的应用拓展了选择空间。

### 1.2 稻田系统中天敌支持植物的选择与布局

据调查,在我国稻田生态系统中,有 889 种捕食性天敌和 424 种寄生性天敌种类,其中稻田蜘蛛类、隐翅甲类和缨小蜂等天敌在控制主要害虫种群发展上起到重要作用<sup>[24]</sup>。因此,在了解稻田天敌发生规律和消长特点基础上,选择有利于天敌的植物配置,通过建立保护性生境涵养种群和提高天敌种群适合度而增强其控害作用。

1) 越冬期生境管理。稻田天敌群落随着水稻移栽和收割,周期性经历着群落形成、发展和重建的过程,越冬期保护性种库的建立将有助于稻田天敌群落重建<sup>[25]</sup>。水稻收割后在稻田中保留杂草或种植蔬菜、绿肥等可以显著增加天敌的种库<sup>[26-28]</sup>,如冬种蔬菜田的物种丰富度和种群-密度指数等均显著高于冬犁田和冬闲田等<sup>[27]</sup>,冬季种植紫云英 (*Astragalus*

*sinicus* L.) 田的天敌种类和数量显著高于冬闲田<sup>[28]</sup>。

2) 非稻田生境的利用及田埂植物选择。稻田旁的田埂杂草和周围杂草等植物是重要的非稻田生境,其作为稻田中节肢动物来源及避难所的作用逐渐被重视<sup>[29-30]</sup>。刘雨芳等<sup>[31]</sup>通过对稻田及其近邻杂草地的捕食性天敌群落调查,发现两者间群落相似性较高,对寄生性天敌群落的分析也发现相似结果<sup>[32]</sup>。非稻田生境中存在大量天敌的载体植物,如稻田旁茭白可作为拟水狼蛛(*Pirata subpiraticus* Bösenberg & Strand)的主要越冬栖息地,水稻移栽后可逐渐转入稻田<sup>[33]</sup>;同时在茭白上生长的长绿飞虱(*Saccharosydne procerus* Matsumura)是稻虱缨小蜂(*Anagrus nilaparvatae* Pang et Wang)主要越冬寄主<sup>[34]</sup>。另外,朱平等<sup>[35]</sup>调查发现田埂禾本科杂草马唐(*Digitaria sanguinalis* (L.) Scop.)和牛筋草(*Eleusine indica* (L.) Gaertn.)是寡索赤眼蜂(*Oligosita* spp.)的适宜越冬植物。因此,基于其载体植物功能,适当保留田埂杂草或稻田周边植物有利于保护天敌种群。

3) 显花植物的配置。在农田边缘种植显花植物,可以通过提供天敌栖境及蜜源等方面增强农田生态系统在害虫控制和植物传粉上的生态服务功能。通过统计分析大量研究数据,Albrecht 等<sup>[36]</sup>发现农田边缘配置显花植物带与未配置相比,平均增加 16% 的害虫控制效率。在具体实践中,选择天敌昆虫喜食而对害虫支持作用不大的显花植物将更有利于提高其害虫控制服务功能<sup>[37]</sup>。在中国、泰国和越南通过稻田边种植芝麻等显花植物的多年多地实践发现,稻田配置显花植物在增加 5% 产量的同时,可显著降低褐飞虱和白背飞虱发生量,减少 70% 农药使用量,稻田中寄生性和捕食性天敌及腐生生物显著增多<sup>[38]</sup>。通过室内研究发现,芝麻花可以显著吸引稻虱缨小蜂等寄生蜂,饲喂芝麻花后稻虱缨小蜂、黑肩绿盲蝽(*Cyrtorhinus lividipennis* Reuter)和螟黄赤眼蜂(*Trichogramma chilonis* Ishii)等天敌昆虫适合度显著提高,验证了芝麻花作为有益蜜源植物的功能<sup>[39-41]</sup>。赵燕燕等<sup>[42]</sup>观察发现,酢浆草(*Oxalis corniculata* L.)白天开花,花期长且花蜜含量高,饲喂螟黄赤眼蜂可显著增加其寿命和提高寄生力,可作为潜在的田埂增益显花植物。

### 1.3 基于推拉策略的控制技术

基于植物与害虫或天敌间的化学生态学关系,选择有效的诱集与驱避作物或植物源的化学驱避或

引诱物质结合形成的“推-拉”(Push-pull)库是目前生态调控的一种重要措施<sup>[43]</sup>。在水稻害虫上目前应用最成功的推拉植物是香根草(*Vetiveria zizanioides* L.),稻田田埂种植香根草可显著诱集二化螟产卵而二化螟幼虫在香根草上不能完成发育史,这种特性赋予香根草独特的“诱集+灭杀”功能,使其得到大量应用<sup>[44-45]</sup>。驱避植物方面,田埂间隔种植驱避稻飞虱类植物紫苏(*Perilla frutescens* (L.) Britt.)和烟草(*Nicotiana tabacum* L.)可显著抑制田间白背飞虱和褐飞虱种群数量<sup>[46]</sup>。进一步利用推拉植物中的活性成分或鉴定有效单体化合物,可以作为害虫驱避剂或天敌引诱剂使用,如苏远萍等<sup>[47]</sup>报道水菖蒲(*Acorus calamus* L.)等乙醇提取物对褐飞虱有显著的产卵驱避和幼虫触杀活性;Wang 等<sup>[48]</sup>发现,Z-3-己烯乙酸酯等水稻挥发物可显著引诱稻虱缨小蜂;Liu 等<sup>[49]</sup>发现植物源的异石竹烯和反-2-十二碳烯醇田间应用可显著诱集黑肩绿盲蝽,下一步需考虑田间如何有效配置以上化合物。

## 2 农艺栽培措施

农艺栽培措施主要是利用一系列的栽培管理技术,从农事操作措施上破坏害虫的生存环境和合理的水肥管理达到健身栽培目的。

### 2.1 稻田残茬处理和耕灌

二化螟、大螟(*Sesamia inferens* Walker)等水稻钻蛀性螟虫多以高龄幼虫在稻茬、稻草及杂草上等越冬,稻桩上越冬幼虫是翌年发生的主要虫源<sup>[50]</sup>。通过对晚稻田不同收割方式调查,机割田由于留茬高度比手割田高而稻桩内残虫量是手割田的 7~11 倍<sup>[51]</sup>。因此,生产上条件适宜机割田尽量采用留茬低的全喂入式联合收割机收获,收获后可以集中对稻草进行沤肥处理。来年春季螟虫化蛹期前,进行稻田旋耕灭茬和灌水,可显著降低越冬代成活率。在稻虾共作等稻田综合种养田,由于稻田春季覆水长期浸泡稻桩,降低了二化螟等害虫的越冬成活率<sup>[52]</sup>。

### 2.2 调整播期

越冬害虫或迁飞害虫转移到稻田中具有一定的规律,因此根据本地害虫发生规律在不影响水稻收获的情况下适当调整播期可显著降低稻田初始虫源。朱金良等<sup>[53]</sup>在浙江嘉兴连续 2 a 调查发现,适当推迟单季晚稻的播种期可显著减低水稻各生育期二化螟和灰飞虱的为害。

## 2.3 合理水肥管理达到水稻健身栽培

尽管我国水稻单产高于世界平均单产 65% 左右,但长期以来氮肥投入也比世界平均用量高 75% 左右<sup>[54]</sup>。过量施用氮肥导致水稻稻茎水分含量和植株营养增加等,诱发了稻纵卷叶螟、稻飞虱和二化螟种群数量增加<sup>[55]</sup>。如张桂芬等<sup>[56]</sup>评价了水稻密度和氮肥水平对稻飞虱和稻纵卷叶螟的综合效应,发现氮肥对 2 种害虫的种群数量影响最大,建议在一定密度条件下,控制氮肥用量。氮磷钾肥合理施用有利于水稻品质等综合性状提高,同时增施钾肥可以提高植株活力,降低稻纵卷叶螟等虫害发生<sup>[57-58]</sup>。在浙江的田间试验表明,减少氮肥、氮肥后移及氮磷钾协调使用,可以显著降低田间稻纵卷叶螟幼虫种群数量<sup>[59]</sup>。因此,控制氮肥施用量、无效分蘖和最高苗数及联合增施磷钾肥以控制病虫害发生的水稻“三控”施肥技术推广,有利于控制害虫发生<sup>[60]</sup>。水稻是富含硅的作物,一般产量与其植株硅含量呈正相关,另外硅在水稻的抗虫性方面起到重要作用<sup>[61-62]</sup>。通过增施硅肥或利用硅含量高的品种,可显著降低二化螟、稻纵卷叶螟和白背飞虱对水稻的为害<sup>[63-65]</sup>。

## 3 物理防控技术

以各种工具及物理因素防治农业害虫的物理防控技术是水稻绿色防控体系中重要一环,在水稻中主要表现在隔离育秧、灯光和色板诱杀等技术的应用上。

### 3.1 物理隔离育秧

育秧是水稻生产中重要环节,随着我国水稻生产技术的发展,无纺布覆盖育秧、工厂化设施育秧等集中隔离育秧技术发展迅速<sup>[66]</sup>。在水稻条纹叶枯病、南方黑条矮缩病等虫传病害发生严重地区,采用孔径 0.85 mm 以上白防虫网或 15~20 g/m<sup>2</sup> 规格的无纺布全程覆盖育秧等措施,可在秧苗期达到 100% 的控害效果,减少苗期虫害发生<sup>[67]</sup>。

### 3.2 基于趋光性的诱杀技术

趋光性是昆虫进化过程中形成的重要习性,利用这一特性进行害虫防治具有技术安全和环保高效等特点。利用灯光诱杀害虫一直是我国害虫监测预报和防治上的一种重要措施,灯光诱杀技术经历了白炽灯、黑光灯、高压汞灯、频振式杀虫灯、LED 灯和光陷阱诱虫等阶段,技术逐渐成熟和完善<sup>[68]</sup>。目前,在水稻害虫防治上主要应用的是频振式杀虫灯

和基于光陷阱技术的窄光谱杀虫灯。频振式杀虫灯是河南汤阴佳多公司利用 320 nm 到 400 nm 光源,组合灯光周围频振式高压电网的诱虫装置,多光谱扩大了诱虫谱并减少了对天敌的诱杀,在我国得以大面积推广应用<sup>[69]</sup>。水稻田应用频振式杀虫灯后的调查发现,稻飞虱和稻纵卷叶螟发生数量显著降低,同时诱集昆虫的益害比为 1:84<sup>[70]</sup>。涂海华等<sup>[71]</sup>利用稻田主要害虫趋光性的波段范围和上灯节律设计出 LED 多光谱循环式太阳能杀虫灯,显著增加了靶标害虫的诱集比例和减少了天敌诱集比例。华中农业大学雷朝亮教授团队设计的光陷阱诱捕器,通过采用波长单一的专用灯和风吸式捕获口,同时增设天敌逃生通道,增加了诱虫专一性和天敌保护性<sup>[72]</sup>。目前湖南本业绿色防控科技股份有限公司生产的光陷阱诱捕器逐渐成为行业内的新标杆。何超等<sup>[73]</sup>田间试验表明,扇吸式诱虫灯显著增加了主要害虫的诱虫量,并且诱集到的天敌昆虫存活率在 70% 以上。

## 4 生物防治

### 4.1 天敌昆虫的工厂化培育和释放

人工繁殖并释放天敌昆虫是增益生物防治的重要一环,我国自 1980 年以来,利用人工扩繁和释放赤眼蜂防治水稻二化螟等害虫取得重大进展并大量应用于生产<sup>[74]</sup>。例如,利用米蛾 (*Corcyra cephalonica* Stainton) 卵孵育稻螟赤眼蜂 (*Trichogramma japonicum* Ashmead) 的工厂化饲养技术<sup>[75]</sup>。通过对田间二化螟卵寄生蜂的发生情况调查及考虑释放成本,开发了大、小卵蜂混合释放技术,即组合柞蚕卵饲养的松毛虫赤眼蜂 (*Trichogramma dendrolimi* Matsumura) 和米蛾卵饲养的稻螟赤眼蜂,保证防效的同时显著降低成本<sup>[76]</sup>。在放蜂技术上,适用于水田的球形可降解漂浮装置和附带糖水饲喂功能的赤眼蜂释放装置得以开发<sup>[77-78]</sup>。无人机释放赤眼蜂的技术开发,提高了田间释放效率<sup>[79]</sup>。

### 4.2 基于化学生态学的性诱剂和食诱剂防治技术

许多昆虫在交配和食物寻找过程中需要化学信息的识别,通过鉴定这些化学物质,促进了害虫性诱剂和食诱剂的开发与利用。近年来,我国在二化螟和稻纵卷叶螟等水稻害虫性信息素成分鉴定的基础上,逐步优化和大量应用了相关关键技术,如二化螟地理区系差异性和配比专一性的诱芯、具有缓释性的 PVC 毛细管诱芯材料、新型干式飞蛾诱捕器等应

用<sup>[80]</sup>。迷向技术是利用田间大量释放性信息素干扰雌雄虫间交配通信从而达到控制害虫目的,二化螟等信息素迷向丝或性信息素超剂量喷雾释放在田间应用,同样可以减低虫害的发生<sup>[81]</sup>。

利用害虫偏好性植物及其关键挥发物制成的食诱剂,在害虫绿色防控中具有重要用途<sup>[82]</sup>。曾娟等<sup>[83]</sup>于 2020 年在南方 3 稻区 6 省的稻纵卷叶螟成虫食诱剂监测试验中发现,食诱监测可准确反映田间稻纵卷叶螟种群动态,诱虫数量高于性诱剂但低于灯诱和田间赶蛾,诱虫的专一性较高。综合分析,食诱剂反应灵敏专一、雌雄同诱的特点为害虫绿色防控提供了一种新手段。

### 4.3 生物农药的利用

生物农药包括农用抗生素、微生物农药、植物源农药和核酸农药等,具有使用安全和环境友好等特点。我国的生物农药占整个农药总产量和总产值的 9% 左右,一些明星产品如苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*, Bt) 和阿维菌素的利用规模可媲美化学农药,在当前农药减量和环境安全的需求下具有较大发展空间<sup>[84]</sup>。水稻害虫防治上,长期以来可供使用的主要品种是 Bt(防治二化螟和稻纵卷叶螟)和阿维菌素(防治稻纵卷叶螟)。2008—2009 年的多地示范试验中,Bt 可湿性粉剂对二化螟和稻纵卷叶螟表现出良好的防治效果,可在生产上大量推广<sup>[85]</sup>。白僵菌属 *Beauveria* 和绿僵菌属 *Metarhizium* 等虫生真菌由于杀虫谱广等因素具有重大的应用前景,重庆大学筛选的金龟子绿僵菌(*Metarhizium anisopliae*) CQMa421 在我国多地多年(2011—2018 年)的施用结果表明,应用后有效控制了稻飞虱和稻纵卷叶螟等害虫,达到了化学农药同等防效并保持了田间的天敌种群<sup>[86-87]</sup>。昆虫病毒上,稻纵卷叶螟颗粒体病毒(*Cnaphalocrocis medinalis granulovirus*, CnmeGV) 和甘蓝夜蛾核型多角体病毒(*Mamestra brassicae nuclear polyhedrosis virus*) 对稻纵卷叶螟也具有较好的防效<sup>[88-89]</sup>。随着稻田综合种养模式在我国的推广发展,植物源农药苦参碱、鱼藤酮和藜芦碱等和乙基多杀菌素等农用抗生素在水稻害虫防治上具有很好的应用前景<sup>[90]</sup>。

### 4.4 稻田综合种养系统对害虫的生物控制

稻田综合种养中鸭、小龙虾、鱼类等生物的引入,提供了稻田害虫控制中新的增益生物防治因子。我国 2 000 多年前就开始稻田养鱼,2010 年以来,随着市场需求和国家政策支持、科学研究和技术推广

加强,稻渔综合种养面积迅速增加,2018 年已突破 200 万  $\text{hm}^2$ <sup>[91]</sup>。稻渔综合种养对于害虫控制具有重要意义,在对我国第一个世界农业文化遗产浙江青田“稻鱼共生”系统的可持续性生态机制研究中发现,稻田鱼类通过主动撞击稻茎捕食落在水面的稻飞虱而控制害虫发生<sup>[92]</sup>。稻鸭系统中,鸭直接捕食稻飞虱等害虫,在不施药情况下可以 100% 地控制稻飞虱和减轻二化螟幼虫 50% 发生量<sup>[93]</sup>。薛智华等<sup>[94]</sup>通过大量的调查,发现稻蟹田稻飞虱发生量显著下降,距离养殖沟越近螃蟹对飞虱的控制作用越明显。综合分析,稻田综合种养对害虫的控制作用主要表现在水产(水禽)对害虫的直接捕食和活动干扰,稻田灌水较深或通风环境较好不利于褐飞虱害虫的生存等方面。

## 5 应急性精准化学防治

化学防治是防治害虫的一种快速高效方法,水稻是我国农药使用量最多的作物,如仅我国浙江稻区杀虫剂的单位面积使用量是东南亚各国的 4 倍以上<sup>[95]</sup>。长期大量不合理使用化学农药带来的负面效应迫使我们思考如何科学合理地使用农药。在害虫绿色防控体系下,化学防治应该在害虫种群密度较高时作为应急性的防治措施。我国在控制用药次数、低毒高效对靶农药选择使用和精准施药技术开发等方面取得了较大进展。

### 5.1 控制用药次数

稻田用药次数多、用药量大是化学防治中的普遍问题。水稻生长前期或迁入初期防治稻飞虱和螟虫等,大量杀灭了天敌,导致稻田自我控害能力下降。因此,在水稻生长前期建议放宽防治指标,发挥植株补偿作用和天敌等因子的自然控害能力<sup>[67]</sup>。汤鉴球<sup>[96]</sup>人工模拟水稻螟害试验结果表明,无论早稻或晚稻在低叶位时,对 1% 以下的枯心率有补偿作用。通过对 2 个水稻品种的剪叶试验模拟稻纵卷叶螟为害,发现苗期和分蘖期 10%~70% 的剪叶不会影响水稻产量<sup>[97]</sup>。因此,除非种群数量巨大,水稻生长前期稻纵卷叶螟可以不用化学防治<sup>[98]</sup>。在害虫达到防治指标时进行防治,根据不同水稻特性和生育期制定合理防治指标,是减少用药次数的重要途径<sup>[6]</sup>。

### 5.2 低毒高效对靶农药选择使用

对一些高效低毒化学农药的利用、从剂型助剂等方面提高药效、避开害虫抗药性和轮换用药等措

施,是绿色化学防控的根本。目前生产上推荐应用的氯虫苯甲酰胺、三氟苯嘧啶等稻田杀虫剂均具有低毒高效特点。在害虫抗药性检测上,我国已制定颁布了二化螟和 3 种稻飞虱等害虫抗药性检测技术规程,全国农业技术推广服务中心每年在多地多点组织害虫抗药性监测,并每年发布科学用药建议,有力支持了合理用药<sup>[99]</sup>。对农药剂型的改进有利于提高其环境友好性和药效,近年来甲维盐微乳剂、噁虫嗪微胶囊等药剂的研制,显著提高了原药的毒效并延长了持效期<sup>[100-101]</sup>。在农药使用时添加提高药剂表面张力和在叶片上黏着等特性的助剂可以显著提高药效,降低农药使用量,目前已经开发出有机硅类和植物油类等助剂在水稻害虫防治上应用<sup>[102-103]</sup>。种子包衣技术是防治稻蓟马和稻飞虱等苗期害虫的一种环境友好防治方式,近年来我国开发的许多种子包衣成膜剂可以将杀虫剂等活性成分网结在种子膜上,然后缓释到环境中,对本田土壤和环境污染极小<sup>[104]</sup>。持效期长的丁硫克百威等拌种药效可以持效到拌种后 45 d,保证防效的同时显著降低了杀虫剂的使用次数和使用量<sup>[105]</sup>。

### 5.3 精准减量施药技术

植保作业是水稻生产过程中的关键环节,稻田泥脚深浅不一和生长中后期植株覆盖度大等特点严重限制了植保作业质量。传统的人工背负式装置存在劳动强度大和农药利用率低等各种问题。在农药减量利用和绿色防控的需求下,我国水稻植保机械和喷雾技术取得巨大进步,以自走式大型喷杆喷雾技术和植保无人机低容量喷雾技术等为代表的精准高效施药技术在农药减量高效施用技术发展上推动巨大<sup>[106-107]</sup>。高地隙自走式喷杆喷雾机具有喷液均匀、作业效率高和受气候影响小等优势,我国自 2010 年以来参照日韩等技术,开发出一系列自小至大型产品在水田上大量应用<sup>[108]</sup>。Gong 等<sup>[109]</sup>通过比较东风井关 JKB18C 自走式喷杆喷雾机和其他类型喷雾机械的稻田喷药效果发现,自走式喷杆喷雾机在喷药均匀性、药液沉积和防治效果上均高于传统机械。

“十三五”以来,随着国家政策支持和各方面的通力协作,新型植保机械无人机发展迅速。在前期关于飞行参数、喷头选择、雾滴参数和冠层渗透等参数系统研究的基础上,近年来植保无人机在水稻上的应用技术逐渐成熟的同时应用量逐年增加<sup>[110]</sup>。在农药减施方面,陈豪明等<sup>[111]</sup>通过在浙江诸暨的

田间试验发现,使用植保无人机全程防治水稻病虫害,可实现用药量减少 42.8%。

## 6 展 望

绿色低碳是我国农业发展的主要方向,绿色防控技术在提升农产品品质、保护环境和促进农业可持续发展等方面意义重大。我国自提倡绿色植保和农药减施政策以来,在绿色防控政策项目支持、技术研发和推广等方面投入了巨大的人力物力,取得了一系列丰硕成果。在水稻病虫害防治上,多点多地系统开展了绿色防控技术模式的应用示范并验证了绿色防控的优势。如江苏省推广的“前防、中控、后保”全程简约化绿色防控策略,核心示范区主要水稻害虫防效 90% 以上,农药使用比常规防治减少 2~3 次,病虫害损失率控制在 3% 以下<sup>[112]</sup>。绿色防控理念和技术同时也被广大稻农认可和接受,如李后建等<sup>[113]</sup>在四川的调查发现,尽管绿色防控带来了一定的减产,但绿色防控技术带来的价格溢价改善了稻农的经济收益。

绿色防控技术体系需要不断的完善更新,及时从研究前沿开发相关技术将促进绿色防控技术体系的发展。当前,在后基因组时代,各种生物组学不断涌现。农田生态系统中,宏观上深入研究作物与其他生物间的关系、植物与害虫各自代谢组学、害虫与植物围微生物组关系、害虫与内共生菌组等生物组学关系,将有利于开发相关绿色防控技术。如 Zhang 等<sup>[114]</sup>发现在高温下,内共生菌组改变可以引起其介导的褐飞虱药剂敏感性下降。在转基因抗虫植物研究方面,利用新的 CRISPR/Cas9 基因编辑技术改变植物本身基因表达,已经在植物抗虫性提高方面显现巨大潜力,如敲除水稻 CYP71A1 基因可以显著提高对褐飞虱的抗性<sup>[115]</sup>。基于 RNAi 机制的转靶标害虫特异致死基因 dsRNA 的抗虫作物已大量研发,目前随着递送保护材料开发,直接喷施 dsRNA 等核酸农药已显示巨大应用潜力<sup>[116]</sup>。化学防治方面,具有缓释性黏附性的纳米农药,可以输送至特定植物部位的导向农药研究在农药增效减量方面意义重大<sup>[117-118]</sup>。具有强黏附性的溴虫酰胺纳米缓释剂和温敏性控释纳米农药已在防治水稻害虫上显示出广阔的应用前景<sup>[119-120]</sup>。

我国自南向北分布着六大稻区,各稻区气候土壤等因素决定了不同地区水稻害虫存在不同的发生模式。另一方面,目前在我国存在着单季稻、双季

稻、再生稻和稻田综合种养等不同的栽培模式。建议在不断完善和革新相关单项技术的基础上,开展区域化和特色化的水稻害虫绿色防控集成技术体系组装研究。在对各地各模式害虫发生规律确定的基础上,协同水稻病害和杂草防治,推广有效可行的系统绿色防控技术,达到全面推广水稻病虫害绿色防控技术的目的。

绿色防控技术的发展,最终需要得到稻农的接受和使用。在管理上,应继续加强对农药的使用管理,认真落实《农药经营许可管理办法》的规定,严肃惩处违反农药使用规定行为。在政策上,要制定绿色稻米标准,提高对绿色防控技术生产稻米的最低收购价和对绿色农资购买提供一定补贴,激励稻农采纳绿色防控技术。绿色防控技术的培训和推广,需要适应水稻种植和生产现状,优先鼓励种粮大户采纳绿色防控技术,带动其周边散户更全面参与。

#### 参考文献 References

- [1] 徐春春,纪龙,陈中督,等.中国水稻生产、市场与进出口贸易的回顾与展望[J].中国稻米,2021,27(4):17-21.XU C C,JI L,CHEN Z D,et al.Historical review and prospect of China's rice production,market and import and export trade[J].China rice,2021,27(4):17-21(in Chinese with English abstract).
- [2] 刘万才,刘振东,黄冲,等.近 10 年农作物主要病虫害发生危害情况的统计和分析[J].植物保护,2016,42(5):1-9,46.LIU W C,LIU Z D,HUANG C,et al.Statistics and analysis of crop yield losses caused by main diseases and insect pests in recent 10 years[J].Plant protection,2016,42(5):1-9,46(in Chinese with English abstract).
- [3] 程家安,祝增荣.中国水稻病虫害草害治理 60 年:问题与对策[J].植物保护学报,2017,44(6):885-895.CHENG J A,ZHU Z R.Development of rice pest management in the past 60 years in China:problems and strategies[J].Journal of plant protection,2017,44(6):885-895(in Chinese with English abstract).
- [4] 夏敬源.公共植保、绿色植保的发展与展望[J].中国植保导刊,2010,30(1):5-9.XIA J Y.Development and expectation of public and green plant protection[J].China plant protection,2010,30(1):5-9(in Chinese with English abstract).
- [5] 宋莹,胡宝贵.中国农业绿色防控技术推广研究进展[J].中国农学通报,2020,36(35):150-155.SONG Y,HU B G.Research progress on agricultural green prevention and control technology extension in China[J].Chinese agricultural science bulletin,2020,36(35):150-155(in Chinese with English abstract).
- [6] 徐红星,郑许松,田俊策,等.我国水稻害虫绿色防控技术的研究进展与应用现状[J].植物保护学报,2017,44(6):925-939.XU H X,ZHENG X S,TIAN J C,et al.Advances in the development and application of control technologies for insect pest management in paddy fields in China[J].Journal of plant protection,2017,44(6):925-939(in Chinese with English abstract).
- [7] LU Z X,ZHU P Y,GURR G M,et al. Rice pest management by ecological engineering:a pioneering attempt in China[M]//HEONG K L,CHENG J A,ESCALADA M M. Rice plant hoppers:ecology, management, socio economics and policy. Dordrecht:Business media,2015:163-180.
- [8] PATHAK M D,CHENG C H,FORTUNO M E. Resistance to *Nephotettix impicticeps* and *Nilaparvata lugens* in varieties of rice[J].Nature,1969,223(5205):502-504.
- [9] JACKSON M T. Conservation of rice genetic resources; the role of the International Rice Genbank at IRRI[J].Plant molecular biology,1997,35(1/2):61-67.
- [10] 段灿星,程治军,雷才林,等.利用 Mudgo/武育梗 3 号 F<sub>2</sub> 群体分析水稻抗灰飞虱 QTL[J].作物学报,2009,35(3):388-394. DUAN C X,CHENG Z J,LEI C L,et al. Analysis of QTLs for resistance to small brown plant hopper (*Laodelphax striatellus* fallén) in rice (*Oryza sativa* L.) using an F<sub>2</sub> population from a cross between Mudgo and Wuyujing 3[J].Acta agronomica sinica,2009,35(3):388-394(in Chinese with English abstract).
- [11] ZHANG W L,DONG Y,YANG L,et al. Small brown planthopper resistance loci in wild rice (*Oryza officinalis*) [J].Molecular genetics and genomics,2014,289(3):373-382.
- [12] YANG L,ZHANG W L. Genetic and biochemical mechanisms of rice resistance to planthopper[J].Plant cell reports,2016,35(8):1559-1572.
- [13] 杜波,陈荣智,何光存.抗褐飞虱基因的发掘、鉴定与利用[J].生命科学,2018,30(10):1072-1082. DU B,CHEN R Z,HE G C. Exploitation,identification and utilization of brown planthopper resistance genes in rice[J].Chinese bulletin of life sciences,2018,30(10):1072-1082(in Chinese with English abstract).
- [14] 夏明元,万丙良,李进波,等.高产优质杂交中籼新组合广两优 476 的选育与应用[J].杂交水稻,2010,25(6):18-20. XIA M Y,WAN B L,LI J B,et al. Breeding and application of new quality medium indica hybrid rice combination Guangliangyou 476[J].Hybrid rice,2010,25(6):18-20(in Chinese with English abstract).
- [15] 朱仁山,黄文超,胡骏,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(1):24-28. ZHU R S,HUANG W C,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(1):24-28(in Chinese with English abstract).
- [16] 朱仁山,黄文超,胡骏,等.红莲型杂交稻新不育系珞红 4A 的选育[J].武汉大学学报(理学版),2013,59(1):33-36. ZHU R S,HUANG W C,HU J,et al. Breeding of the new sterile line Luohong 4A of Honglian type hybrid rice[J].Journal of Wuhan University (natural science edition),2013,59(1):33-36(in Chinese with English abstract).
- [17] LIU Y Q,WU H,CHEN H,et al. A gene cluster encoding lectin receptor kinases confers broad-spectrum and durable insect re-

- sistance in rice[J]. *Nature biotechnology*, 2015, 33(3): 301-305.
- [18] HU J, CHENG M X, GAO G J, et al. Pyramiding and evaluation of three dominant brown planthopper resistance genes in the elite indica rice 9311 and its hybrids[J]. *Pest management science*, 2013, 69(7): 802-808.
- [19] RAO Y C, DONG G J, ZENG D L, et al. Genetic analysis of leafhopper resistance in rice[J]. *Journal of genetics and genomics*, 2010, 37(5): 325-331.
- [20] CHEN M, SHELTON A, YE G Y. Insect-resistant genetically modified rice in China: from research to commercialization[J]. *Annual review of entomology*, 2011, 56: 81-101.
- [21] LU C M. The first approved transgenic rice in China[J]. *GM crops*, 2010, 1(3): 113-115.
- [22] HE K, XIAO H M, SUN Y, et al. Transgenic microRNA-14 rice shows high resistance to rice stem borer[J]. *Plant biotechnology journal*, 2019, 17(2): 461-471.
- [23] ZHENG X X, WENG Z J, LI H, et al. Transgenic rice overexpressing insect endogenous microRNA csu-novel-260 is resistant to striped stem borer under field conditions[J]. *Plant biotechnology journal*, 2021, 19(3): 421-423.
- [24] LOU Y G, ZHANG G R, ZHANG W Q, et al. Biological control of rice insect pests in China[J]. *Biological control*, 2013, 67(1): 8-20.
- [25] 古德祥, 张古忍, 张文庆, 等. 稻田蜘蛛群落的重建及与其种库的相关性[J]. *蛛形学报*, 1999(2): 89-94. GU D X, ZHANG G R, ZHANG W Q, et al. The reestablishment of the spider community and the relationship between spider community and its species pool in paddy fields[J]. *Acta arachnologica sinica*, 1999(2): 89-94 (in Chinese with English abstract).
- [26] 张文庆, 张古忍, 古德祥. 稻田生境调节和捕食性天敌对稻飞虱的控制作用[J]. *生态学报*, 1998, 18(3): 283-288. ZHANG W Q, ZHANG G R, GU D X. Biological control of rice planthopper by habitat manipulation and arthropod predators in dasha township[J]. *Acta ecologica sinica*, 1998, 18(3): 283-288 (in Chinese with English abstract).
- [27] 谭乾开, 黎华寿, 骆世明, 等. 广东恩平市稻区越冬期不同土地利用方式下主要节肢动物多样性调查分析[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 938-943. TAN Q K, LI H S, LUO S M, et al. Arthropod biodiversity and community structure as influenced by different winter-cropping systems in the paddy fields of Enping City, Guangdong Province[J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2008, 16(4): 938-943 (in Chinese with English abstract).
- [28] 袁伟, 刘洪, 张士新, 等. 长江农场有机稻田害虫与天敌群落评价[J]. *上海农业学报*, 2010, 26(2): 132-136. YUAN W, LIU H, ZHANG S X, et al. Evaluation of communities of insect pests and natural enemies in organic rice fields of Changjiang Farm[J]. *Acta agriculturae Shanghai*, 2010, 26(2): 132-136 (in Chinese with English abstract).
- [29] 庄西卿. 稻田田埂昆虫群落与田埂杂草关系的研究[J]. *生态学报*, 1989, 9(1): 35-40. ZHUANG X Q. Studies on the relationship between the insect community and the grasses on the rice field ridges[J]. *Acta ecologica sinica*, 1989, 9(1): 35-40 (in Chinese with English abstract).
- [30] 俞晓平, 胡萃, HEONG K L. 非作物生境对农业害虫及其天敌的影响[J]. *中国生物防治*, 1996, 12(3): 130-133. YU X P, HU C., HEONG K L. The effects of non-crop habitats on crop pests and their natural enemies[J]. *Chinese journal of biological control*, 1996, 12(3): 130-133 (in Chinese).
- [31] 刘雨芳, 古德祥, 张古忍. 广东双季稻区杂草和稻田中捕食性节肢动物的群落动态[J]. *昆虫学报*, 2003, 46(5): 591-597. LIU Y F, GU D X, ZHANG G R. The community dynamics of predatory arthropods in both weed habitat and paddy field from a double cropping paddy in Guangdong[J]. *Acta entomologica sinica*, 2003, 46(5): 591-597 (in Chinese with English abstract).
- [32] 徐敦明, 李志胜, 刘雨芳, 等. 稻田及其毗邻草地寄生蜂群落结构与特征[J]. *生物多样性*, 2004, 12(3): 312-318. XU D M, LI Z S, LIU Y F, et al. Structure and characteristics of parasitoid communities in a rice field and adjacent weed habitat[J]. *Chinese biodiversity*, 2004, 12(3): 312-318 (in Chinese with English abstract).
- [33] 俞晓平, 郑许松, 徐红星, 等. 拟水狼蛛在水稻与茭白田之间的转移[J]. *昆虫学报*, 2002, 45(5): 636-640. YU X P, ZHENG X S, XU H X, et al. A study on the dispersal of lycosid spider, *Pirata subpiraticus* between rice and *Zizania* fields[J]. *Acta entomologica sinica*, 2002, 45(5): 636-640 (in Chinese with English abstract).
- [34] 俞晓平, 郑许松, 陈建明, 等. 茭白害虫长绿飞虱与稻田缨小蜂关系的研究[J]. *昆虫学报*, 1999, 42(4): 387-393. YU X P, ZHENG X S, CHEN J M, et al. A study on the relationship between egg parasitoid, *Anagrus nilaparvatae* and green slender planthopper, *Saccharosydne procerus*, a species of insect pest of wild rice, *Zizania caduciflora*[J]. *Acta entomologica sinica*, 1999, 42(4): 387-393 (in Chinese with English abstract).
- [35] 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, 56. ZHU P Y, ZHENG X S, YAO X M, et al. Ecological engineering technology for enhancement of biological control capacity of egg parasitoids against rice planthoppers in paddy fields[J]. *China plant protection*, 2015, 35(7): 27-32, 56 (in Chinese with English abstract).
- [36] ALBRECHT M, KLEIJN D, WILLIAMS N M, et al. The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: a quantitative synthesis[J]. *Ecology letters*, 2020, 23(10): 1488-1498.
- [37] LU Z X, ZHU P Y, GURR G M, et al. Mechanisms for flowering plants to benefit arthropod natural enemies of insect pests: prospects for enhanced use in agriculture[J]. *Insect science*, 2014, 21(1): 1-12.
- [38] GURR G M, LU Z X, ZHENG X S, et al. Multi-country evidence that crop diversification promotes ecological intensification of agriculture[J/OL]. *Nature plants*, 2016, 2: 16014 [2021-11-05]. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.14>.
- [39] ZHU P Y, GURR G M, LU Z X, 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.
- [40] ZHU P Y, LU Z X, HEONG K L, et al. Selection of nectar plants for use in ecological engineering to promote biological control of rice pests by the predatory bug, *Cyrtorhinus lividipennis*, (Heteroptera: Miridae) [J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e108669 [2021-11-05]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108669>.
- [41] ZHU P Y, WANG G W, ZHENG X S, et al. Selective enhancement of parasitoids of rice Lepidoptera pests by sesame (*Sesamum indicum*) flowers[J]. *BioControl*, 2015, 60(2): 157-167.
- [42] 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. ZHAO Y Y, TIAN J C, ZHENG X S, 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 (in Chinese with English abstract).
- [43] KHAN Z, MIDEGA C A O, HOOPER A, et al. Push-pull: chemical ecology-based integrated pest management technology[J]. *Journal of chemical ecology*, 2016, 42(7): 689-697.
- [44] 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*, 2009, 25(4): 299-303. ZHENG X S, XU H X, CHEN G H, et al. Potential function of Sudan grass and vetiver grass as trap crops for suppressing population of stripped stem borer, *Chilo suppressalis* in rice[J]. *Chinese journal of biological control*, 2009, 25(4): 299-303 (in Chinese with English abstract).
- [45] 鲁艳辉, 郑许松, 吕仲贤. 水稻螟虫诱杀植物香根草的发现与应用[J]. *应用昆虫学报*, 2018, 55(6): 1111-1117. LU Y H, ZHENG X S, LÜ Z X. The potential of vetiver grass as a biological control for the rice stem borers *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens* [J]. *Chinese journal of applied entomology*, 2018, 55(6): 1111-1117 (in Chinese with English abstract).
- [46] 陈杰华, 吴荣昌, 向亚林, 等. 水稻害虫生态调控系统中推-拉策略的初步应用[J]. *环境昆虫学报*, 2018, 40(3): 514-522. CHEN J H, WU R C, XIANG Y L, et al. Preliminary application of a pest ecological regulation system with pushpull strategy with rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of environmental entomology*, 2018, 40(3): 514-522 (in Chinese with English abstract).
- [47] 苏远萍, 杨长举, 华红霞, 等. 13 种植物乙醇提取物对褐飞虱的生物活性研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(1): 198-202. SU Y P, YANG C J, HUA H X, et al. Bioactivities of ethanol extracts from thirteen plants against *Nilaparvata lugens* (Stal) [J]. *Chinese agricultural science bulletin*, 2009, 25(1): 198-202 (in Chinese with English abstract).
- [48] WANG P, LOU Y G. Screening and field evaluation of synthetic plant volatiles as attractants for *Anagrus nilaparvatae* Pang et Wang, an egg parasitoid of rice planthoppers[J]. *Chinese journal of applied entomology*, 2013, 50(2): 431-440.
- [49] LIU S Y, ZHAO J, HAMADA C, et al. Identification of attractants from plant essential oils for *Cyrtorhinus lividipennis*, an important predator of rice planthoppers[J]. *Journal of pest science*, 2019, 92(2): 769-780.
- [50] 黄水金, 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[J]. *江西农业学报*, 2010, 22(11): 91-93, 96. HUANG S J, LIU J Q, QIN W J, et al. Studies on distribution of overwintering larvae of *Chilo suppressalis* (walker) in rice stem and its control technique[J]. *Acta agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(11): 91-93, 96 (in Chinese with English abstract).
- [51] 王藕芳, 包生土, 贾华凑, 等. 晚稻不同收割方式对二化螟越冬虫量的影响[J]. *上海农业科技*, 2002(5): 41. WANG O F, BAO S T, JIA H C, et al. Effects of different harvesting methods of late rice on the overwintering population of *Chilo suppressalis* [J]. *Shanghai agricultural science and technology*, 2002(5): 41 (in Chinese).
- [52] 曹湊贵, 江洋, 汪金平, 等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1245-1253. CAO C G, JIANG Y, WANG J P, et al. “Dual character” of rice-crayfish culture and strategies for its sustainable development [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2017, 25(9): 1245-1253 (in Chinese with English abstract).
- [53] 朱金良, 祝增荣, 冯金祥, 等. 水稻播种和移栽期对本地越冬主要病虫害发生的影响[J]. *浙江农业学报*, 2011, 23(2): 329-334. ZHU J L, ZHU Z R, FENG J X, et al. Effect of sowing/transplanting time on occurrence of main locally-overwintering insect pests and diseases [J]. *Acta agriculturae zhejiangensis*, 2011, 23(2): 329-334 (in Chinese with English abstract).
- [54] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103. PENG S B, HUANG J L, ZHONG X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103 (in Chinese with English abstract).
- [55] 吕仲贤, 俞晓平, HEONG K L, 等. 氮肥对植食性昆虫的影响及其对水稻主要害虫种群的诱导[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(6): 649-656. LU Z X, YU X P, HEONG K L, et al. Nitrogen fertilizer affects herbivores and stimulates the populations of major insect pests of rice [J]. *Chinese journal of rice science*, 2006, 20(6): 649-656 (in Chinese with English abstract).
- [56] 张桂芬, 鲁传涛, 申效诚, 等. 栽插密度、施氮量对水稻主要病虫害的综合生态效应[J]. *植物保护学报*, 1995, 22(1): 38-44. ZHANG G F, LU C T, SHEN X C, et al. The synthesized ecological effect of rice density and nitrogen fertilizer on the occurrence of main rice pests [J]. *Journal of plant protection*, 1995, 22(1): 38-44 (in Chinese with English abstract).
- [57] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1058-1065. WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effects of potassium fertilizer and potassium use efficiency on early-, mid- and late-season rice in Hubei Province, China [J]. *Plant nutrition and fertilizer science*, 2011, 17(5): 1058-1065 (in Chinese with English abstract).

- [58] 张舒,赵华,吕亮,等.不同化肥农药减施组合对水稻主要病虫害发生及产量的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(6):1-7. ZHANG S, ZHAO H, LU L, et al. Effects of reduction combinations of fertilizer and pesticide on incidence of mainpests and diseases and yield in rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [59] 郑许松,成丽萍,王会福,等.施肥调节对稻纵卷叶螟发生和水稻产量的影响[J].浙江农业学报,2015,27(9):1619-1624. ZHENG X S, CHENG L P, WANG H F, et al. Effects of fertilizer regulation on occurrence of leafroller, *Cnaphalocrocta medinalis* and rice production[J]. Acta agriculturae zhejiangensis, 2015, 27(9): 1619-1624 (in Chinese with English abstract).
- [60] 钟旭华,黄农荣,郑海波,等.水稻“三控”施肥技术规程[J].广东农业科学,2007,34(5):13-15,43. ZHONG X H, HUANG N R, ZHENG H B, et al. Specification for the “Three Controls” nutrient management technology for irrigated rice[J]. Guangdong agricultural sciences, 2007, 34(5): 13-15, 43 (in Chinese with English abstract).
- [61] 高玉凤,焦峰,沈巧梅.水稻硅营养与硅肥应用效果研究进展[J].中国农学通报,2009,25(16):156-160. GAO Y F, JIAO F, SHEN Q M. The research development of silicon nutrition and fertilizer application in rice[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2009, 25(16): 156-160 (in Chinese with English abstract).
- [62] REYNOLDS O L, KEEPING M G, MEYER J H. Silicon-augmented resistance of plants to herbivorous insects: a review[J]. Annals of applied biology, 2009, 155(2): 171-186.
- [63] DJAMIN A, PATHAK M D. Role of silica in resistance to Asiatic rice borer, *Chilo suppressalis* (Walker), in rice varieties [J]. Journal of economic entomology, 1967, 60(2): 347-351.
- [64] RAMACHANDRAN R, KHAN Z R. Mechanisms of resistance in wildrice *Oryza brachyantha* to rice leafroller *Cnaphalocrocta medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. Journal of chemical ecology, 1991, 17(1): 41-65.
- [65] YANG G Q, ZHU Z F, HU W F, et al. Effects of foliar spraying of silicon and phosphorus on rice (*Oryza sativa*) plants and their resistance to the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) [J]. Acta entomologica sinica, 2014, 57(8): 927-934.
- [66] 邹应斌.水稻育秧技术的历史回顾与发展[J].作物研究,2018,32(2):163-168. ZOU Y B. Historical retrospect and development of rice raising seedlings [J]. Crop research, 2018, 32(2): 163-168 (in Chinese with English abstract).
- [67] 郭荣,韩梅,束放.减少稻田用药的病虫害绿色防控策略与措施[J].中国植保导刊,2013,33(10):38-41. GUO R, HAN M, SHU F. Strategies and measures of green control of rice pests based on reduction of pesticides application in paddy field [J]. China plant protection, 2013, 33(10): 38-41 (in Chinese).
- [68] 桑文,黄求应,王小平,等.中国昆虫趋光性及灯光诱虫技术的发展、成就与展望[J].应用昆虫学报,2019,56(5):907-916. SANG W, HUANG Q Y, WANG X P, et al. Progress in research on insect phototaxis and future prospects for pest light-trap technology in China [J]. Chinese journal of applied entomology, 2019, 56(5): 907-916 (in Chinese with English abstract).
- [69] 赵树英.佳多频振式杀虫灯的开发与应用[J].中国森林病虫,2002,21(S1):6-8. ZHAO S Y. The development and application of the “Jiaddo” multi-frequency vibration type insect-killing lamp [J]. Forest pest and disease, 2002, 21(S1): 6-8 (in Chinese).
- [70] 龙艳,高兴华,李红祥,等.频振式杀虫灯在水稻害虫防治中的应用与研究[J].中国农学通报,2012,28(15):216-220. LONG Y, GAO X H, LI H X, et al. Application and study of frequency-vibrancy pest-killing lamp during insect pest management in rice [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2012, 28(15): 216-220 (in Chinese with English abstract).
- [71] 涂海华,唐乃雄,胡秀霞,等.LED多光谱间歇发光太阳能杀虫灯对稻田害虫诱杀效果[J].农业工程学报,2016,32(16):193-197. TU H H, TANG N X, HU X X, et al. LED multispectral circulation solar insecticidal lamp application in rice field [J]. Transactions of the SCAE, 2016, 32(16): 193-197 (in Chinese with English abstract).
- [72] 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):26-30,68. SANG W, CAI F Y, WANG X P, et al. Application status and prospects of insect trapping lamp in fields [J]. China plant protection, 2018, 38(10): 26-30, 68 (in Chinese with English abstract).
- [73] 何超,方宝华,张玉焯,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 C, FANG B H, ZHANG Y Z, 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 (in Chinese with English abstract).
- [74] ZANG L S, WANG S, ZHANG F, et al. Biological control with *Trichogramma* in China: history, present status, and perspectives [J]. Annual review of entomology, 2021, 66: 463-484.
- [75] 史光中,周运宁,赵俊生.米蛾饲养及利用技术的研究[J].昆虫天敌,1982,4(4):1-8. SHI G Z, ZHOU Y N, ZHAO J S. Study on feeding and utilization technology of *Corcyra cephalonica* [J]. Natural enemies of insects, 1982, 4(4): 1-8 (in Chinese).
- [76] 张俊杰,阮长春,臧连生,等.我国赤眼蜂工厂化繁育技术改进及防治农业害虫应用现状[J].中国生物防治学报,2015,31(5):638-646. ZHANG J J, RUAN C C, ZANG L S, et al. Technological improvements for mass production of *Trichogramma* and current status of their applications for biological control on agricultural pests in China [J]. Chinese journal of biological control, 2015, 31(5): 638-646 (in Chinese with English abstract).
- [77] 臧连生,阮长春,邵喜文,等.一种适合水田释放寄生蜂防治水稻害虫的放蜂装置:CN203388148U [P]. 20140115. ZANG L S, RUAN C C, SHAO X W, et al. Wasp keeping device suitable for releasing parasitic wasps in water field to prevent and treat rice grubs: CN203388148U [P]. 20140115 (in Chinese).
- [78] 田俊策,王国荣,郑许松,等.一种带有糖水饲喂装置的赤眼蜂

- 释放装置;CN204232122U[P].2015-04-01.TIAN J C,WANG G R,ZHENG X S,et al.*Trichogramma* releasing device with sweet water feeding device;CN204232122U[P].2015-04-01(in Chinese).
- [79] 徐东甫,白越,宫勋,等.基于六轴多旋翼飞行器的赤眼蜂投放系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(1):1-7.XU D F,BAI Y,GONG X,et al.Design of *Trichogramma* delivering system based on hex-rotor UAV [J]. Transactions of the CSAM,2016,47(1):1-7(in Chinese with English abstract).
- [80] 杜永均,郭荣,韩清瑞.利用昆虫性信息素防治水稻二化螟和稻纵卷叶螟应用技术[J].中国植保导刊,2013,33(11):39-42.DU Y J,GUO R,HAN Q R.The application technology of using insect sex pheromone to control rice stem borer and rice leaf roller[J].China plant protection,2013,33(11):39-42(in Chinese).
- [81] 胡代花.中国水稻二化螟性信息素研究及应用新进展[J].江苏农业学报,2019,35(3):736-742.HU D H.Recent advances in the research and application of sex pheromone of *Chilo suppressalis* (Walker) in China[J].Jiangsu journal of agricultural sciences,2019,35(3):736-742(in Chinese with English abstract).
- [82] 蔡晓明,李兆群,潘洪生,等.植食性害虫食诱剂的研究与应用[J].中国生物防治学报,2018,34(1):8-35.CAI X M,LI Z Q,PAN H S,et al.Research and application of food-based attractants of herbivorous insect pests[J].Chinese journal of biological control,2018,34(1):8-35(in Chinese with English abstract).
- [83] 曾娟,张涛,王立颖,等.食诱剂监测稻纵卷叶螟种群动态初报[J].植物保护,2021,47(4):203-214.ZENG J,ZHANG T,WANG L Y,et al.Preliminary application of food attractant trapping in monitoring population dynamics of rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) in China [J]. Plant protection, 2021, 47(4): 203-214 (in Chinese with English abstract).
- [84] 刘晓漫,曹勤程,王秋霞,等.我国生物农药的登记及推广应用现状[J].植物保护,2018,44(5):101-107.LIU X M,CAO A C,WANG Q X,et al.Current situation of bio-pesticide registration,extension and application in China[J].Plant protection,2018,44(5):101-107(in Chinese with English abstract).
- [85] 郭荣.我国生物农药的推广应用现状及发展策略[J].中国生物防治学报,2011,27(1):124-127.GUO R.Extension, application and developmental strategies of biopesticides in China[J].Chinese journal of biological control,2011,27(1):124-127(in Chinese with English abstract).
- [86] 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,2009,26(2):286-291.WANG J X,MA L J.Application of entomogenous fungi in biological control of agriculture and forestry pests[J].Journal of Zhejiang Forestry College,2009,26(2):286-291(in Chinese with English abstract).
- [87] PENG G X,XIE J Q,GUO R,et al.Long-term field evaluation and large-scale application of a *Metarhizium anisopliae* strain for controlling major rice pests[J]. Journal of pest science, 2021, 94(3): 969-980.
- [88] 刘琴,徐健,王艳,等.CmGV与Bt对稻纵卷叶螟幼虫的协同作用研究[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2013,34(4):89-93.LIU Q,XU J,WANG Y,et al.Synergism of CmGV and *Bacillus thuringiensis* against larvae of *Cnaphalocrocis medinalis* güenée[J].Journal of Yangzhou University (agricultural and life science edition),2013,34(4):89-93(in Chinese with English abstract).
- [89] 邓方坤,李永平,祁琪,等.甘蓝夜蛾核型多角体病毒杀虫剂防治水稻害虫效果及增产作用[J].湖北植保,2014(6):27-29.DENG F K,LI Y P,QI Q,et al.Effects of *Mamestra brassicae* nuclear polyhedrosis virus on rice insect pests and yield increasing[J].Hubei plant protection,2014(6):27-29(in Chinese).
- [90] 陈新林,桑海旭,刘兴,等.植物源农药在水稻上的应用现状与展望[J].北方水稻,2008,38(4):6-9,12.CHEN X L,SANG H X,LIU X,et al.Current status and prospects of application of botanical pesticides to rice[J].North rice,2008,38(4):6-9,12(in Chinese with English abstract).
- [91] 唐建军,李巍,吕修涛,等.中国稻渔综合种养产业的发展现状与若干思考[J].中国稻米,2020,26(5):1-10.TANG J J,LI W,LÜ X T,et al.Development status and rethinking of the integrated rice-fish system in China[J].China rice,2020,26(5):1-10(in Chinese with English abstract).
- [92] XIE J,HU L L,TANG J J,et al.Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J].PNAS,2011,108(50):E1381-E1387.
- [93] 杨治平,刘小燕,黄璜,等.稻田养鸭对稻鸭复合系统中病、虫、草害及蜘蛛的影响[J].生态学报,2004,24(12):2756-2760.YANG Z P,LIU X Y,HUANG H,et al.A study on the influence of rice-duck intergrowth on spider, rice diseases, insect and weeds in rice-duck complex ecosystem[J].Acta ecologica sinica,2004,24(12):2756-2760(in Chinese with English abstract).
- [94] 薛智华,杨慕林,任巧云,等.养蟹稻田稻飞虱发生规律研究[J].植保技术与推广,2001,21(1):5-7.XUE Z H,YANG M L,REN Q Y,et al.Study on the occurrence rules of rice plant hoppers in rice field with cultural crab[J].Plant protection technology and extension,2001,21(1):5-7(in Chinese with English abstract).
- [95] 张帅,邵振润,沈晋良,等.加强水稻主要病虫科学用药防控的原则和措施[J].农药,2011,50(11):855-857.ZHANG S,SHAO Z R,SHEN J L,et al.Emphasis on fundamental principle and measures of scientific control towards main pests and diseases of rice[J].Agrochemicals,2011,50(11):855-857(in Chinese with English abstract).
- [96] 汤鉴球.水稻不同生育期对模拟螟害补偿作用的研究[J].中山大学学报(自然科学版),1999,38(4):58-61.TANG J Q.The compensation for yield loss of rice by the simulation of the damage of stemborers at different stage[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,1999,38(4):58-61(in Chinese with English abstract).

- [97] 吴降星,郑许松,周光华,等.不同生育期剪叶对水稻生长、产量及生理的影响[J].应用昆虫学报,2013,50(3):651-658.WU J X,ZHENG X S,ZHOU G H,et al.Effect of leaf cutting at different growth stages on growth,yield and physiological traits of two rice cultivars[J].Chinese journal of applied entomology,2013,50(3):651-658(in Chinese with English abstract).
- [98] 杨亚军,徐红星,郑许松,等.中国水稻纵卷叶螟防控技术进展[J].植物保护学报,2015,42(5):691-701.YANG Y J,XU H X,ZHENG X S,et al.Progresses in management technology of rice leaffolders in China[J].Journal of plant protection,2015,42(5):691-701(in Chinese with English abstract).
- [99] 张帅.2020 年全国农业有害生物抗性监测结果及科学用药建议[J].中国植保导刊,2021,41(2):71-78.ZHANG S. Resistance monitoring results of agricultural pests in China and scientific use of pesticides in 2020[J].China plant protection,2021,41(2):71-78(in Chinese).
- [100] 范鹏,顾中言,徐德进,等.能在水稻叶上润湿铺展的甲维盐微乳剂的研制[J].江苏农业学报,2009,25(5):1019-1024.FAN P,GU Z Y,XU D J,et al.Studies on ME of emamectin-benzoate which enhanced wetting and spreading performance on rice leaf[J].Jiangsu journal of agricultural sciences,2009,25(5):1019-1024(in Chinese with English abstract).
- [101] 朱锐,杨琛,喻湘林,等.基于改性 PBS 载体的噻虫嗪微胶囊的制备及性能测试[J].农药,2013,52(5):334-336.ZHU R,YANG C,YU X L,et al.Preparation and performance test of modified PBS microcapsules containing thiamethoxam[J].Agrochemicals,2013,52(5):334-336(in Chinese with English abstract).
- [102] 张春华,张宗俭,刘宁,等.农药喷雾助剂的作用及植物油类喷雾助剂的研究进展[J].农药科学与管理,2012,33(11):16-18.ZHANG C H,ZHANG Z J,LIU N,et al.Effect of pesticide spray adjuvants and research progress of vegetable oil spray adjuvants[J].Pesticide science and administration,2012,33(11):16-18(in Chinese).
- [103] 徐鹏飞,康廷浩,张园,等.卵磷脂桶混助剂的特性及其在防治稻飞虱中对氟啶虫腈的协同增效作用[J].农药学报,2019,21(2):227-232.XU P F,KANG T H,ZHANG Y,et al.Characterization of lecithin tank mixing adjuvant and synergistic effect with sulfoxaflor on the control of rice plant hopper[J].Chinese journal of pesticide science,2019,21(2):227-232(in Chinese with English abstract).
- [104] 齐麟,王昱翔,王宁,等.水稻种衣剂成膜助剂的研究进展[J].种子,2017,36(6):54-60.QI L,WANG Y X,WANG N,et al.Research progress of the seed coating membrane agent[J].Seed,2017,36(6):54-60(in Chinese).
- [105] 康敏,赵剑锋,顾中量,等.4 种药剂拌种对白背飞虱的防治效果[J].植物保护,2016,42(2):220-224.KANG M,ZHAO J F,GU Z L,et al.Field control effect of four seed coating insecticides on the white-backed plant hopper[J].Plant protection,2016,42(2):220-224(in Chinese with English abstract).
- [106] 周志艳,袁旺,陈盛德.中国水稻植保机械现状与发展趋势[J].广东农业科学,2014,41(15):178-183.ZHOU Z Y,YUAN W,CHEN S D.Current status and future directions of rice plant protection machinery in China[J].Guangdong agricultural sciences,2014,41(15):178-183(in Chinese with English abstract).
- [107] 闫晓静,褚世海,杨代斌,等.给农业插上科技的翅膀:植保无人机低容量喷雾技术助力农药减施增效[J].植物保护学报,2021,48(3):469-476.YAN X J,CHU S H,YANG D B,et al.Agriculture on the wings of science and technology:plant protection unmanned aerial vehicle(UAV) low-volume spraying technology reduces pesticide use and boosts control efficacy[J].Journal of plant protection,2021,48(3):469-476(in Chinese with English abstract).
- [108] 杨学军,严荷荣,张铁,等.我国水旱两用型自走式喷杆喷雾机发展现状和趋势[J].农业工程,2020,10(11):1-5.YANG X J,YAN H R,ZHANG T,et al.Development status and trend of dual-purpose self-propelled boom sprayer in paddy field and dry field in China[J].Agricultural engineering,2020,10(11):1-5(in Chinese with English abstract).
- [109] GONG Y,YU L H,ZHANG X,et al.Application of self-propelled boom sprayers for control of rice insects and diseases[J].Agricultural science & technology,2016,17(7):1667-1670.
- [110] 孙星星,王凯,李红阳,等.航空超低量喷雾技术在水稻生产上应用现状、存在问题及发展趋势[J].江苏农业科学,2020,48(13):29-33.SUN X X,WANG K,LI H Y,et al.Application status,existing problems and development trends of aviation ultra-low volume spray technology in rice production[J].Jiangsu agricultural sciences,2020,48(13):29-33(in Chinese).
- [111] 陈豪明,周宇杰,骆琴,等.植保无人机全程解决水稻病虫害效果评价[J].中国稻米,2020,26(5):97-101.CHEN H M,ZHOU Y J,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(in Chinese with English abstract).
- [112] 朱凤,程金金,张国,等.江苏水稻生产全程简化绿色防控策略研究与应用[J].中国植保导刊,2021,41(1):94-101.ZHU F,CHENG J J,ZHANG G,et al.Research and application of green prevention and control strategies on Jiangsu rice production[J].China plant protection,2021,41(1):94-101(in Chinese with English abstract).
- [113] 李后建,曹安迪.绿色防控技术对稻农经济收益的影响及其作用机制[J].中国人口·资源与环境,2021,31(2):80-89.LI H J,CAO A D.Impact of green control techniques on farmers' economic benefits and their mechanism[J].China population,resources and environment,2021,31(2):80-89(in Chinese with English abstract).
- [114] ZHANG Y H,CAI T W,REN Z J,et al.Degradation of insecticide by symbiont-dependent host detoxification metabolism contributes to increased insecticide susceptibility of insects under high temperature[J].The ISME journal,2021,15(12):3693-3703.
- [115] LU H P,LUO T,FU H W,et al.Resistance of rice to insect pests mediated by suppression of serotonin biosynthesis[J].

- Nature plants, 2018, 4(6): 338-344.
- [116] 王治文, 高翔, 马德君, 等. 核酸农药: 极具潜力的新型植物保护产品[J]. 农药学学报, 2019, 21(S1): 681-691. WANG Z W, GAO X, MA D J, et al. Nucleic acid pesticides: the new plant protection products with great potential[J]. Chinese journal of pesticide science, 2019, 21(S1): 681-691 (in Chinese with English abstract).
- [117] 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, 48(14): 144-146, 155. ZHAO L Y. Effect evaluation of spraying nano pesticides by plant-protection unmanned aerial vehicle to control pests on rice[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2020, 48(14): 144-146, 155 (in Chinese with English abstract).
- [118] 肖永欣, 李俊凯. 导向农药分子设计及传导分布机制研究进展[J]. 农药学学报, 2021, 23(3): 438-445. XIAO Y X, LI J K. Research progress on molecular design and conduction distribution mechanism of guided pesticide[J]. Chinese journal of pesticide science, 2021, 23(3): 438-445 (in Chinese with English abstract).
- [119] GAO Y H, KAZIEM A E, ZHANG Y H, et al. A hollow mesoporous silica and poly(diacetone acrylamide) composite with sustained-release and adhesion properties[J]. Microporous and mesoporous materials, 2018, 255: 15-22.
- [120] GAO Y H, XIAO Y N, MAO K K, et al. Thermoresponsive polymer-encapsulated hollow mesoporous silica nanoparticles and their application in insecticide delivery[J/OL]. Chemical engineering journal, 2020, 383: 123169 [2021-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123169>.

## Current situation and prospect of green rice pest control technology

ZHAO Jing<sup>1</sup>, CAI Wanlun<sup>1</sup>, SHEN Liyang<sup>1</sup>, ZHU Hongyuan<sup>1</sup>,  
PU Lei<sup>1</sup>, XIE Meiqi<sup>1</sup>, ZOU Yulan<sup>2</sup>, HUA Hongxia<sup>1</sup>

1. *College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University/  
Key Laboratory of Hubei Insect Resources Utilization and Sustainable Pest Management,  
Wuhan 430070, China;*

2. *College of Life Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** Under the trend of green and low carbon in current agricultural development, green pest control technologies are very important to ensure food security. Also, the wide application of these green pest control techniques will promote the sustainable development of agriculture. In recent years, great progress has been made in the research and application of green pest control technology. In this paper, the newly progress of research and application of green rice pest control in China were systematically summarized from the perspectives of ecological regulation and management, agronomic cultivation measures, physical control technologies, biological control and emergency precise chemical control. The development of representative techniques, such as ecological engineering technology, the Fan-inhaling Lamp and the unmanned aerial vehicle (UAV) low-volume spraying technology for paddy field, has provided strong support for the development of green rice pest control. In prospect, to carry out regional and characteristic integrated research and promotion of green pest control technology, strengthen policy support and technical training, will further improve their importance in reducing pesticides use and green rice production.

**Keywords** rice pests; green pest control; ecological regulation and management; biological control; precise chemical control; “Two Oriented” agriculture

(责任编辑:边书京)