

◆ 专论:杀虫剂(特约稿) ◆

水稻重要害虫防治的杀虫剂应用及 关键技术研究进展

刘 姣,程季康,何承帅,高聪芬*

(南京农业大学植物保护学院,南京 210095)

摘要:水稻作为我国重要的粮食作物,其害虫防治直接关系到国家粮食安全。化学杀虫剂作为当前水稻害虫防治中不可或缺的工具,对于控制害虫数量、减少作物损失和保障粮食产量发挥着关键作用。然而,长期不合理使用杀虫剂导致了害虫抗药性的产生,给水稻害虫的科学防控和粮食安全带来挑战。概述了我国水稻重要害虫稻飞虱、二化螟和稻纵卷叶螟的发生与危害,化学防治药剂的发展历程及抗药性现状,并对当前水稻田杀虫剂应用及关键技术进行了综述,以期为实现我国水稻害虫的科学防控、提高杀虫剂利用效率和防治效果,进而为推动水稻产业的可持续发展和保障我国粮食安全提供指导。

关键词:水稻;害虫防治;杀虫剂;抗药性;关键技术

中图分类号:S482.3;S435.112 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-5284.2024.04.002

Advancements on the insecticides application and key technique in the control of disaster pests in paddy field

LIU Jiao, CHENG Jikang, HE Chengshuai, GAO Congfen*

(College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Rice is the subsistence crop in China, chemical control in paddy is the important measure to ensure its yield and food security. However, the long term or abuse of insecticides has caused resistance developed and the challenge on pest control and sustainable rice production. The current prevalence of key rice pests, including rice planthopper (*Nilaparvata lugens*, *Sogatella furcifera*, *Laodelphax striatellus*), striped stem borer (*Chilo suppressalis*), and rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*), and the development of chemical insecticides and resistance status were reviewed in this paper, the key technique of the insecticide application was also suggested to guide the insecticide scientific application in paddy and enhance the efficiency of insecticide, the aim was to ensure the sustainability of rice industry and food safety.

Key words: rice; pest management; insecticide; resistance; key technique

水稻(*Oryza sativa* L.)作为世界许多国家主要的粮食作物之一,是我国60%以上人口的主食,水稻生产的丰欠盈余直接关系到我国的粮食安全。在我国农作物的重大害虫中,水稻害虫占半数之多,且其多具迁飞性,其突发性也给防治带来很大困难,造成的损失触目惊心,治理费用也极为巨大。2013年以来,我国水稻虫害问题严重,造成年均产量损

失约181.05万吨^[1]。

我国水稻害虫主要有褐飞虱*Nilaparvata lugens*、白背飞虱*Sogatella furcifera*、二化螟*Chilo suppressalis*和稻纵卷叶螟*Cnaphalocrocis medinalis*,它们均被列入《一类农作物病虫害名录(2023)》。截至目前,我国水稻重要害虫的防控仍以施用化学杀虫剂为主,然而随着杀虫剂的长期和不合理使用,害虫

收稿日期:2024-06-07

作者简介:刘姣(2001—),女,硕士研究生,主要从事自组装农药研究。E-mail: xyxn0628@163.com

通信作者:高聪芬(1970—),女,石家庄人,博士,教授,主要从事杀虫剂毒理与抗药性研究。E-mail: gaocongfen@njau.edu.cn

抗药性问题日趋严重。例如华中稻区的二化螟因抗药性问题而缺乏高效防治药剂,2016年后成为该稻区水稻病虫害防治的首要问题。本文围绕水稻害虫的发生现状、杀虫剂的应用及其抗药性现状、施药技术的发展进行综述,以期对水稻害虫的科学防控及保障我国粮食安全提供参考。

1 水稻重要害虫的发生现状

统计数据显示,我国田间稻飞虱、二化螟、稻纵卷叶螟的为害面积占比较大,年均发生面积分别为0.13亿 hm^2 次、0.14亿 hm^2 次和0.20亿 hm^2 次,整体约占到虫害年均发生总面积的85.75%,是危害我国水稻产业发展的重要害虫^[1]。

1.1 稻飞虱

稻飞虱属半翅目飞虱科,刺吸式口器害虫,可通过取食、产卵和传播水稻病毒病直接或间接为害水稻,其中以褐飞虱危害最为严重,其次为白背飞虱和灰飞虱*Laodelphax striatellus*。稻飞虱属于典型的r对策型害虫,成虫迁入后若不及时采取有效防治措施,则会大量繁殖,种群激增,进而导致稻飞虱的大面积发生甚至暴发。2005—2012年间,稻飞虱年均造成的水稻产量实际损失超过100万吨,其中,2006年大发生年损失更高,达206.5万吨^[2]。此后,除2020年水稻生长后期发生较重外,我国稻飞虱总体中等发生,2019年造成水稻产量损失约49.4万吨^[3]。

1.1.1 褐飞虱

褐飞虱属于单食性害虫,寄主植物以水稻为主,为害单季中稻和晚稻穗期。其成、若虫群集于稻丛基部,刺吸茎叶组织汁液从而引起稻株瘫痪倒伏,造成“冒穿”或“虱烧”等症状,严重时会导致减产或绝收。此外,褐飞虱吸食和产卵造成的伤口极易造成病害侵染,传播水稻病毒病草状丛矮病毒(rice grassy stunt virus, RGSV)和齿叶矮缩病毒(rice ragged stunt virus, RRSV)^[4]。褐飞虱发生代数随地区气候温度、水稻栽培期而不同,每年可发生1~12代,通常淮北地区发生1~2代,江淮地区发生3代,广东和广西发生8~9代,海南发生12代^[4]。褐飞虱喜湿热,在我国华中稻区和华南稻区发生为害较重^[5]。

20世纪80年代后,褐飞虱在我国年发生面积为1 300万~2 000万 hm^2 次,约占水稻种植面积的50%^[6]。2005—2010年,褐飞虱连续5年在南方稻区暴发,造成多处“冒穿”“倒伏”等现象,实际损失达188万吨/年^[7]。2013—2019年,我国褐飞虱危害总体呈减轻趋势。2019年后,褐飞虱发生为害表现出明显的区

域性,总体呈南重北轻的特点。华南、江南稻区早稻和单季稻褐飞虱偏重发生,西南、长江中下游和江淮稻区褐飞虱偏轻至中等发生^[8];2023年,褐飞虱在华南、江南、长江中下游沿江及以南稻区偏重发生,南方其他稻区中等发生,全国发生面积1 000万 hm^2 次^[8]。

1.1.2 白背飞虱

白背飞虱主要取食水稻,兼食大麦*Hordeum vulgare*、小麦*Triticum aestivum*、玉米*Zea mays*、甘蔗*Saccharum officinarum*、野生稻*Oryza rufipogon*和稗草*Echinochloa crusgalli*等。白背飞虱主要为害穗期早稻、单季中稻和分蘖期晚稻,在稻株上的活动位置比其他两者都高。直接危害症状与褐飞虱危害大致相同,都是通过刺吸取食茎秆汁液,常引起“黄塘”。间接危害是传播南方水稻黑条矮缩病毒(southern rice black-streaked dwarf virus, SRBSDV),2010年,该病害在我国南方稻区13个省区大发生,受害面积达130万 hm^2 ,受害严重稻田失收^[9]。在我国,白背飞虱发生1~11代,其中,新疆、宁夏发生1~2代,北方稻区发生2~3代,淮河以南稻区发生3~4代,长江以南稻区发生4~7代,而南岭以南稻区发生7~11代^[4]。

白背飞虱在长江流域发生面积大,而在我国华南稻区和西南稻区造成的产量损失占比较高,且白背飞虱在西南稻区的发生重于褐飞虱的发生^[5]。2005—2009年,白背飞虱在我国连续大发生,最高年发生面积达1 316万 hm^2 次^[10]。据报道,2012年,我国西南稻区白背飞虱偏重发生,发生面积为200万 hm^2 次^[5]。2023年,白背飞虱全国发生面积约1 000万 hm^2 次,在西南东部、华南西部和东部稻区偏重发生,南方其他稻区中等发生^[8]。

1.1.3 灰飞虱

与褐飞虱和白背飞虱相比,灰飞虱取食范围广,包括水稻、小麦、玉米、高粱*Sorghum bicolor*、稗草、千金子*Leptochloa chinensis*等禾本科植物。灰飞虱直接危害是刺吸茎秆汁液,造成植株矮小,籽粒不饱满,较少出现类似褐飞虱和白背飞虱的“虱烧”或“黄塘”症状。间接危害是传播条纹叶枯病(rice stripe disease, RSV)、水稻黑条矮缩病等多种水稻病毒病,所造成的危害常大于直接危害^[4]。

灰飞虱喜低湿,耐低温能力较强,不耐高温。其危害呈由北向南递减,东北和华北稻区发生频繁,在其他水稻产区造成的产量损失较低^[5]。在我国,灰飞虱年最多发生8代,由北方寒冷地区到南方温暖地区世代逐渐增加^[4]。但因其不具备远距离迁飞,多

以局部越冬为主。20世纪90年代后期,灰飞虱暴发,传播RBSDV,并迅速蔓延至整个长江流域中东部稻区,造成了巨大的经济损失^[11]。2004年,江苏省灰飞虱传播的水稻纹枯病发病严重,危害面积占水稻种植总面积的79%^[12];此后几年,灰飞虱在东北、安徽、江苏、山东等地间歇性大暴发,造成小麦和水稻的大面积减产^[13]。近几年,灰飞虱发生较轻,水稻产区害虫发生总面积均呈逐年减少的趋势。

1.2 二化螟

二化螟是亚洲、北非和南欧等地区最主要的水稻害虫之一,又称蛀心虫、钻心虫、白穗虫等。二化螟以幼虫形态在水稻发育的各个阶段钻蛀稻茎,造成水稻“枯心”“枯鞘”“白穗”和“虫伤株”,影响水稻的正常生长^[14]。二化螟在我国每年可发生1~5代,发生代数与温度有关,由北到南随气温升高,发生代数逐渐增加。二化螟在湖南和浙江地区每年发生3~5代,江苏和安徽地区一般年发生2~3代,东北稻区则发生1代^[15]。

二化螟主要分布于我国长江流域及以南稻区,在沿海、沿江平原地区为害最为严重^[5]。20世纪90年代,我国水稻螟虫发生量总体呈上升趋势^[16];2000—2010年,辽南地区二化螟发生、危害严重,3成以上的水稻受到侵害,重灾区水稻产量损失占总产量一半^[17]。2010—2020年,华中稻区二化螟发生面积较大,年均发生面积近1 000万hm²次;而西南、东北和华北稻区的二化螟发生面积也较其他害虫发生面积大,其中,西南稻区年均发生面积高达246.34万hm²次^[5]。2023年统计至8月底,全国二化螟累计发生面积1 066.7万hm²次,总体偏重发生^[18]。

1.3 稻纵卷叶螟

稻纵卷叶螟属鳞翅目螟蛾科,又称稻苞叶虫、刮青虫等,晚间活动,具有远距离迁飞能力^[19]。幼虫期在水稻叶片吐丝,把叶片两边纵卷成管状虫苞,一苞一虫,3龄后转移为害,虫龄增大,食量增大,虫苞扩大,耐药力也变强。稻纵卷叶螟一生可转移为害稻叶5~9片。严重时,被卷的叶片只剩下透明发白的表皮,全叶枯死,致水稻千粒重降低,秕粒增加,造成减产^[20]。稻纵卷叶螟在适温下可连续多代繁殖,全国由北向南发生代数增加,年发生1~11代^[21]。

20世纪60年代,稻纵卷叶螟发生严重,多次暴发,之后发生较轻。2005—2015年,稻纵卷叶螟年均发生面积达1 900万hm²次,造成的产量损失超过700万吨,占水稻总产量的3.6%^[22]。2010—2020年,稻纵卷叶螟在华中、华南稻区发生严重,平均年发生面

积分别达到1 166.38万hm²次和283.22万hm²次^[5]。2023年统计至8月底,全国稻纵卷叶螟累计发生1 066.70万hm²次,总体中等发生,局部大发生^[18]。

2 水稻害虫防治药剂应用及其抗性现状

2.1 稻田常用杀虫剂的发展

2.1.1 稻飞虱常用杀虫剂的发展

稻飞虱的防治主要以化学药剂为主,主要经历以下3个阶段^[23]:第一阶段(1950—1960年),主要使用滴滴涕等有机氯类农药;第二阶段(1960—1990年),人们开始重视农药“3R”问题,有机氯类农药逐渐被淘汰,氨基甲酸酯类农药快速发展,速灭威、异丙威等品种被大量用于稻飞虱的防治,该阶段开始使用对稻飞虱具有高选择性的昆虫生长调节剂类杀虫剂噻嗪酮;第三阶段(1990年后),新烟碱类杀虫剂被大规模推广使用,逐渐成为防治稻飞虱的主力军。目前登记用于防治稻飞虱的化学农药单剂产品有1 113种,主要品种有吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪、噻嗪酮、异丙威、呋虫胺、毒死蜱、仲丁威、速灭威和烯啶虫胺等,这些产品大多数为新烟碱类、氨基甲酸酯类和有机磷类杀虫剂,也包括少数吡啶甲亚胺类和昆虫生长调节剂类杀虫剂。

2.1.2 二化螟常用杀虫剂的发展

我国二化螟的化学防治主要经历了4个阶段^[24]:第一阶段(20世纪80年代前),主要应用六六六、敌百虫、杀虫脒;第二阶段(1983年到90年代中期),六六六、滴滴涕等有机氯类杀虫剂被禁,沙蚕毒素类杀虫剂杀虫单、杀虫双,有机磷类杀虫剂三唑磷和毒死蜱被用于防治二化螟;第三阶段(20世纪90年代末到21世纪初),苯基吡啶类杀虫剂氟虫腈和大环内酯类杀虫剂阿维菌素大量用于防治二化螟;第四阶段(2008年后),双酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺在我国登记,并逐渐成为防治二化螟的主要杀虫剂。目前登记应用于二化螟防治的单剂杀虫剂产品有485种,主要品种有氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐(甲维盐)、三唑磷、毒死蜱等,主要分类为双酰胺类、大环内酯类和有机磷类杀虫剂。

2.1.3 稻纵卷叶螟常用杀虫剂的发展

稻纵卷叶螟的化学防治主要经历了以下3个阶段:第一阶段,上世纪50~70年代,主要使用六六六等有机氯类化学药剂;第二阶段,1983年我国禁用六六六、滴滴涕、杀虫脒等高毒农药后^[25],开始以有机磷类杀虫剂(毒死蜱、辛硫磷等)和沙蚕毒素类杀

虫剂(杀虫单、杀虫双)为主;第三阶段,2010年禁用了高毒有机磷类杀虫剂甲胺磷、久效磷等,防治药剂多样化^[26]。目前登记用于稻纵卷叶螟防治的化学单剂产品有743种,主要包括有机磷类杀虫剂(毒死蜱、辛硫磷等),大环内酯类杀虫剂(阿维菌素、乙基多杀菌素等)和双酰胺类杀虫剂(氯虫苯甲酰胺、四氯虫酰胺等)。

2.2 稻飞虱的抗药性现状

2.2.1 褐飞虱的抗药性现状

褐飞虱对大多数化学药剂均已产生抗性。2021年,宋鑫宇等^[27]监测了我国8个省12个褐飞虱田间种群的抗药性。研究发现:除了上海金山、江西上高、湖南邵阳3个褐飞虱种群对吡蚜酮处于中等水平抗性,抗性倍数为53.9~93.6倍,其余皆为高水平抗性,抗性倍数为104.6~347.8倍;对呋虫胺、烯啶虫胺、毒死蜱、氟啶虫胺胍以中等水平抗性为主;对三氟苯嘧啶为敏感到低水平抗性。2022年,褐飞虱对主要药剂的抗性变化不明显,对呋虫胺、吡蚜酮的抗性呈下降趋势,但整体仍处于中等至高水平抗性;对新烟碱类药剂吡虫啉、噻虫嗪,生长调节剂类杀虫剂噻嗪酮为高水平抗性;对烯啶虫胺、氟啶虫胺胍、环氧虫啉、毒死蜱仍以中等水平抗性为主^[28-29]。

2.2.2 白背飞虱的抗药性现状

2021年监测结果显示:广西、福建、四川、安徽、江苏等地的白背飞虱田间种群对三氟苯嘧啶、氟啶虫胺胍、吡蚜酮等大部分杀虫剂处于敏感至低水平抗性阶段,对噻嗪酮、毒死蜱以中等水平抗性为主(抗性倍数分别为49.0~79.2倍、6.7~38.6倍)。2022年,白背飞虱对新烟碱类药剂的抗性呈发展趋势,吡虫啉、噻虫嗪、呋虫胺均出现中等水平抗性的田间种群,广东恩平种群对吡虫啉的抗性倍数已达到53.3倍。整体来看,白背飞虱对多数药剂的抗性变化不明显,除对噻嗪酮、毒死蜱的抗性水平较高外,对其他药剂仍处于敏感至低水平抗性阶段^[30]。

2.2.3 灰飞虱的抗药性现状

2021—2022年的监测数据显示,安徽、江苏和浙江3个省的灰飞虱田间种群对噻嗪酮为中等到高水平抗性(抗性倍数为89.2~146.6倍),对毒死蜱为中等水平抗性,对吡蚜酮、烯啶虫胺、噻虫嗪、呋虫胺、氟啶虫胺胍等杀虫剂均处于敏感至低水平抗性阶段^[13,31]。

2.3 二化螟的抗药性现状

2008年,氯虫苯甲酰胺在我国登记上市后,迅速成为长江中下游稻区二化螟防治的主要药剂。

2010—2013年间进行的我国7个省68个二化螟田间种群对双酰胺类杀虫剂敏感性测定中,大多数种群对氯虫苯甲酰胺处于敏感水平阶段,只有少数种群表现出低水平抗性。2014—2016年,监测到浙江和江西部分种群对氯虫苯甲酰胺抗性上升为中等水平(抗性倍数27.8~77.6倍)。但2017—2018年,江西、浙江及湖南种群对氯虫苯甲酰胺已达高水平抗性,其中,江西南昌种群抗性水平最高(抗性倍数536.8倍),安徽和湖北大部分种群也升至中等水平抗性(抗性倍数10.7~58.1倍)。2019—2022年,氯虫苯甲酰胺高抗区域扩展至安徽、湖北、上海及华南稻区,其中,江西南昌种群的抗性高达1 293.1倍;湖北、江西、湖南及浙江田间种群对阿维菌素也已达高水平抗性(抗性倍数101.3~443.5倍);多数监测种群对甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、乙基多杀菌素、毒死蜱、三唑磷为中等水平抗性;目前所有田间种群对环丙氟虫胺和杀虫单均处于敏感水平^[32-33]。

2.4 稻纵卷叶螟的抗药性现状

2003年,苏建坤等^[34]监测发现,江苏扬州地区稻纵卷叶螟种群对杀虫单、甲基对硫磷产生低至中等水平抗性。随着高毒农药的禁用,防治稻纵卷叶螟主要应用大环内酯类杀虫剂、双酰胺类杀虫剂。2019年,李增鑫等^[35]发现,湖北孝感稻纵卷叶螟种群对氯虫苯甲酰胺产生了7倍左右的抗性,长沙种群对溴氰虫酰胺也产生了7倍左右的抗性,而华中其他地区的稻纵卷叶螟田间种群对双酰胺类杀虫剂尚未产生抗性。2021年,湖南、广西稻纵卷叶螟田间种群对氯虫苯甲酰胺产生中等水平抗性(抗性倍数13.4~22.1倍)。2022年,广西兴安、江苏丹阳、安徽潜山、安徽庐江和湖北武穴稻纵卷叶螟田间种群对氯虫苯甲酰胺快速升至高水平抗性(抗性倍数102.3~135.1倍),且对其他双酰胺类药剂存在较高水平的交互抗性;对阿维菌素和甲氨基阿维菌素苯甲酸盐为低至中等水平抗性(抗性倍数分别为6.0~32.0倍、7.4~50.0倍);对乙基多杀菌素的抗性以低水平抗性为主;目前田间种群对茚虫威、氰氟虫腙、毒死蜱仍处于敏感水平^[36]。

3 水稻田杀虫剂应用的关键技术研究进展

由于化学杀虫剂的长期或不合理使用,水稻害虫抗药性问题严重。在缺乏高效防治药剂,提倡高效精准绿色植保的方针下,害虫的防治技术得到了发展。传统的植保设备往往采取大容量、大雾滴的设计,导致田间农药施用过量,造成环境污染、农药

残留超标及害虫再猖獗等一系列问题。近年来,随着绿色防控和专业化统防统治协同推进,创新发展了自走式植保机械、航空植保等新型施药技术,水稻田农药的有效利用率也明显提高。

交替轮换使用不同抗性机理的药剂是保障水稻田杀虫剂有效性的措施。由于水稻稻飞虱、二化螟、稻纵卷叶螟已出现严重的抗药性问题,单一依靠某一种或某一类杀虫剂已很难做到对害虫的有效防控。如在褐飞虱的防治中,尽管三氟苯嘧啶对其高效,但用药建议为每季水稻使用1次,并做好与吡蚜酮及其混剂的交替轮换使用;在使用乙基多杀菌素防治抗药性二化螟时,每季水稻最多使用2次,并注意与其他不同作用机理的药剂轮换使用。

种衣剂或拌种技术的使用有效控制了水稻苗期虫害。三氟苯嘧啶拌种、包衣的应用可有效控制早期稻飞虱虫源基数。武庆^[37]发现,三氟苯嘧啶拌种处理水稻种子,播种后56~133 d对田间褐飞虱防治效果仍在80%以上。唐涛等^[38]采用24%氟苯虫酰胺水分散粒剂1~4 g拌种处理1 kg水稻种子,播种后64 d对稻纵卷叶螟的防效为77.3%。韩永强等^[39]采用50%氯虫苯甲酰胺悬浮剂1.25 g拌种处理1 kg水稻种子,对二化螟的防效在93%以上,对稻纵卷叶螟的防效在70%以上,同时还能促进水稻生长,具有一定的增产效应。

“送嫁药”技术改变了传统的水稻害虫防治理念,尤其是在成蛾高峰期多,且持续时间长时,效果显著。“送嫁药”是指水稻移栽(包括机插、抛栽或人工栽插等方式)前在秧苗期使用的最后一次农药,包括防病、防虫、补充营养和增加抵抗力的药剂等。秧苗带药移栽,由“虫等药”变为“药等虫”,不但确保秧苗健壮不带病虫害,预防、减轻或推迟大田病虫的发生和为害,有效减轻水稻分蘖期病虫的防治压力,还具有省工、省力、省药的特点,起到事半功倍的效果。20世纪70年代,宁德地区农科所研究了晚稻秧苗带药移栽的治虫效果,用40%乐果乳油500倍液处理秧苗,移植后11 d对稻飞虱防治效果达到85.1%^[40]。江西、湖南等地农民习惯在移栽秧苗前施用“送嫁药”,对控制早稻1代二化螟、减轻大田期二化螟发生基数和发生程度有较好效果,19%溴氰虫酰胺悬浮剂处理40 d后,对二化螟造成的枯鞘和枯心防效良好^[41]。

合理使用性诱剂,做到适期施药,提高药剂防治效果。性诱剂是人工合成雌蛾在性成熟后释放出一种能吸引同种雄蛾寻求交配的化学物质。通过性

诱剂,实现对二化螟和稻纵卷叶螟的短期精准测报,从而确定化学药剂的施药适期,有效提高化学药剂的防治效果。蔡庆尧等^[42]研究了性诱剂对二化螟的防效,发现性诱剂群集诱杀方法可明显减少药剂防治前的螟害率,枯鞘丛率下降60.7%,枯鞘株率下降65%。

无人机施药提高了作业效率,是精准施药技术的发展趋势。植保无人机具有作业效率高、防治效果好、劳动强度低、对作物安全的特点,特别是对水稻中后期病虫害防治效果显著,能彻底解决水稻中后期病虫害防治困难或延误防治时间等问题,从而避免水稻产量的严重损失。随着飞防助剂、无人机机器等一系列研发创新,近几年农用植保无人机得到迅猛发展,无人机喷药技术逐渐成熟。创新型无人机通过搭载遥感相机和传感器能自动获取大范围的农田信息,实现对具体水稻虫害灾情点的农药精确喷洒,同时极大减少了农药的使用量。陈豪明等^[43]研究结果证明,无人机喷雾施药对二化螟防效达到90%。赵莲英^[44]研究了植保无人机喷施纳米农药对水稻主要害虫的防治效果,药后7 d,对稻飞虱的防效达到95.7%,对5代稻纵卷叶螟的防效为88.2%,杀虫效果均高于对照药剂。

4 总结与展望

水稻田重要害虫占据我国一类农作物害虫数量的3/10,且抗药性问题突出,在今后较长时间内其防治仍离不开化学农药的使用。因此,在充分利用其他防治措施的前提下,如何利用现代化的加工手段和施药技术,提高现有杀虫剂的利用率和防治效果,延长其有效使用时间,仍是水稻害虫防控的长期研究课题。而高效植保装备、省力化施药技术的不断涌现,将施药技术由自动化、机械化走向精准化、智能化,也为水稻田杀虫剂的安全高效使用带来了新的曙光。

参考文献

- [1] 卓富彦,陈学新,夏玉先,等. 2013—2022年我国水稻病虫害发生特点与绿色防控技术集成 [J/OL]. 中国生物防治学报. [2024-06-20]. <https://doi.org/10.16409/j.cnki.2095-039x.2023.11.011>.
- [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.
- [3] 陆明红,周丽丽,尹丽,等. 2019年我国稻飞虱发生特点及原因分析[J]. 中国植保导刊, 2020, 40(5): 52-57.
- [4] 罗守进. 稻飞虱的研究[J]. 农业灾害研究, 2011, 1(1): 1-13.
- [5] 车琳,蒋沁宏,王也,等. 我国水稻五大产区虫害发生及防控情况差异的比较分析[J]. 植物保护, 2022, 48(3): 233-241.

- [6] 李汝铎, 丁锦华, 胡国文, 等. 褐飞虱及其种群管理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 239-255.
- [7] 包云轩, 唐辟如, 孙思思, 等. 中南半岛前期异常气候条件对中国南方稻区褐飞虱灾变性迁入的影响及其预测模型[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2934-2947.
- [8] 刘杰, 曾娟, 杨清坡, 等. 2023年农作物重大病虫害发生趋势预报[J]. 中国植保导刊, 2023, 43(1): 32-35.
- [9] 张彤, 周国辉. 南方水稻黑条矮缩病研究进展[J]. 植物保护学报, 2017, 44(6): 896-904.
- [10] 沈慧梅. 我国褐飞虱与白背飞虱的境外虫源研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [11] WANG H D, CHEN J P, WANG A G, et al. Studies on the epidemiology and yield losses from rice black-streaked dwarf disease in a recent epidemic in Zhejiang province, China[J]. Plant pathology, 2009, 58(5): 815-825.
- [12] 王才林. 江苏省水稻条纹叶枯病抗性育种研究进展[J]. 江苏农业科学, 2006, 1(3): 1-5.
- [13] 宋鑫宇, 张文静, 刘雅婷, 等. 华东4地区灰飞虱对8种杀虫剂的抗性监测[J]. 农药学报, 2023, 25(4): 960-968.
- [14] 潘成旺. 水稻主要病虫害介绍——二化螟[J]. 湖南农业, 2013(1): 20-21.
- [15] 吕锐玲, 周强, 涂军明, 等. 水稻二化螟的发生与防治[J]. 现代农业科技, 2011(14): 188; 192.
- [16] 盛承发, 王红托, 盛世余, 等. 我国稻螟灾害的现状与损失估计[J]. 昆虫知识, 2003(4): 289-294.
- [17] 司学政. 北方稻区水稻害虫的发生与防治研究[J]. 乡村科技, 2017(18): 48-49.
- [18] 全国农业技术推广服务中心. 水稻重大病虫害秋后发生动态及下阶段发生趋势 [EB/OL]. (2023-09-04) [2024-06-01]. <https://www.natesc.org.cn/news/des?id=c87b2dc1-c9e4-43e5-82c0-df8-d7ad8ae65&Category=%E5%85%A8%E6%96%87%E6%90%9C%E7%B4%A2&CategoryId=a4981e2c-40d9-4765-917a-ef578-936572c>.
- [19] 王凤英, 张孝羲, 崔保平. 稻纵卷叶螟的飞行和再迁飞能力[J]. 昆虫学报, 2010, 53(11): 1265-1272.
- [20] 秦兰珍. 稻纵卷叶螟的发生与防治[J]. 现代农业科技, 2017(24): 95-97.
- [21] 尹先龙, 汪恩国. 气象因子对稻纵卷叶螟两种监测效果影响研究[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(3): 81-84.
- [22] 陆明红, 刘万才, 高胡, 等. 中越水稻迁飞性害虫稻飞虱、稻纵卷叶螟发生关系分析[J]. 植物保护, 2018, 44(3): 31-60.
- [23] 张正炜, 卫勤, 章先飞, 等. 我国稻飞虱化防药剂登记应用情况分析[J]. 世界农药, 2022, 44(6): 8-20.
- [24] 杨雪梅. ABC转运蛋白在二化螟对氯虫苯甲酰胺和阿维菌素解毒代谢中的作用研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2021.
- [25] 农业部. 中华人民共和国农业部公告第199号 [EB/OL]. (2002-06-05) [2024-06-01]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/gg/200210/t20021016_14308.htm.
- [26] 全国农业技术推广服务中心. 农业部等十部委关于打击违法制售禁限用高毒农药 规范农药使用行为的通知 [EB/OL]. (2010-04-22) [2024-06-01]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/201004/t20100423_1472446.htm.
- [27] 宋鑫宇. 2021年褐飞虱抗性监测及对吡蚜酮的抗性遗传与适合度研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- [28] 叶文男. 褐飞虱的抗性监测及黄素单加氧酶在褐飞虱抗性中的功能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2023.
- [29] 任宗杰, 郭永旺, 秦萌, 等. 2022年全国农业有害生物抗性监测评估与治理对策[J]. 中国植保导刊, 2023, 43(3): 62-71.
- [30] LIU Y T, SONG X Y, ZENG B, et al. The evolution of insecticide resistance in the white backed planthopper *Sogatella furcifera* (Horvath) of China in the period 2014-2022[J]. Crop Protection, 2023, 172: 106312.
- [31] 张文静. 两种稻飞虱的抗性监测和灰飞虱对噻嗪酮的抗性遗传及适合度研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- [32] 刘冲. 二化螟的抗性监测及其多药抗性机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2023.
- [33] SU C, LI C, CAI T, et al. Resistance monitoring in field populations of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) in Hubei Province to four insecticides in 2019-2022[J]. Applied Entomology, 2024, 148: 272-278.
- [34] 苏建坤, 褚柏, 陈伟民. 稻纵卷叶螟抗性测定方法初探及抗性监测[J]. 上海农业学报, 2003(4): 81-84.
- [35] 李增鑫, 李亮, 朱坤淼, 等. 华中地区稻纵卷叶螟对7种杀虫剂的敏感性监测[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 130-141.
- [36] SUN Y, LIU S T, LING Y, et al. Insecticide resistance monitoring of *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and its mechanism to chlorantraniliprole[J]. Pest Manag Sci, 2023, 79(9): 3290-3299.
- [37] 武庆. 三氟苯嘧啶拌种处理对水稻抗性及其褐飞虱取食行为和生殖的影响[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2021.
- [38] 唐涛, 刘德才, 刘雪源, 等. 氟虫双酰胺防治水稻纵卷叶螟研究[J]. 植物保护, 2013, 39(3): 182-185.
- [39] 韩永强, 李丹丹, 邓权权, 等. 50%氯虫苯甲酰胺悬浮剂拌种对二化螟和稻纵卷叶螟的防治效果[J]. 应用昆虫学报, 2022, 59(5): 1160-1172.
- [40] 宁德地区农科所植保组. 晚稻秧苗带药移栽的治虫效果[J]. 福建农业科技, 1975(4): 8-9.
- [41] 张帅, 舒宽义, 黄向阳, 等. 移栽前杀虫剂处理秧苗对早稻二化螟的防效[J]. 中国植保导刊, 2018, 38(7): 68-70.
- [42] 蔡庆尧, 张维尧. 性诱剂对水稻二化螟的防效研究[J]. 现代农业科技, 2021(23): 82-85.
- [43] 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.
- [44] 赵莲英. 植保无人机喷施纳米农药防治水稻主要病虫害的药效评价[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(14): 144-146.

(编辑: 顾林玲)