

技术与应用

Technology & Application

安徽庐江褐飞虱的抗药性监测及不同杀虫剂对其田间防效评价

张 帅¹, 叶文男², 刘兆宇², 吴向辉³, 孙俊铭⁴, 高聪芬^{2*}

(1. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 2. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095;

3. 安徽省植保总站, 合肥 230001; 4. 安徽省庐江县植保站, 合肥 231500)

摘要 近年来,褐飞虱田间种群已对多种药剂产生了抗性,为筛选可防控褐飞虱的高效药剂,2020年—2022年采用稻茎浸渍法连续测定了安徽省庐江县褐飞虱种群对三氟苯嘧啶、吡虫啉、烯啶虫胺、吡蚜酮、氟啶虫胺胍等5种药剂的抗性水平,并在庐江县开展了不同药剂对褐飞虱田间防效试验。室内抗性监测结果表明,2020年—2022年褐飞虱种群对吡蚜酮始终处于高水平抗性(抗性倍数104.6~154.4倍),对吡虫啉的抗性从中等水平上升至高水平(抗性倍数77.7~157.2倍),对氟啶虫胺胍、烯啶虫胺处于中等水平抗性(氟啶虫胺胍抗性倍数21.3~64.5倍、烯啶虫胺抗性倍数14.6~22.6倍),对三氟苯嘧啶处于敏感状态。庐江单季稻试验田田间试验结果表明,在推荐高剂量下,20%三氟苯嘧啶WG、10%异唑虫啉SC等介离子杀虫剂对褐飞虱速效性和持效性表现较好,除了药后1d 20%三氟苯嘧啶WG防效为74.72%外,2种药剂3~14d的防效都在80%以上;50%烯啶虫胺SG、22%氟啶虫胺胍SC防效次之,药后1d防效在67.63%~71.61%,药后3d至7d防效有所提高,为77.16%~84.13%,而药后14d防效降为71.52%~75.77%;50%吡蚜酮WG药后1~7d防效均在约70%,而药后14d下降为62.12%;20%氟啶虫胺胍SC、20%吡虫啉WG、10%噻虫啉SC速效性和持效性都表现较差,药后1~14d防治效果都在80%以下。结合室内抗药性监测和田间防治效果,说明三氟苯嘧啶等介离子类杀虫剂作为新型杀虫剂品种,可与新烟碱类、吡蚜酮及其混剂交替轮换使用,用于抗药性褐飞虱的治理。

关键词 杀虫剂; 抗性监测; 褐飞虱; 田间药效

中图分类号: S 481.4 文献标识码: B DOI: 10.16688/j.zwbh.2023010

Resistance monitoring and field control efficacy of different insecticides on *Nilaparvata lugens* in Lujiang county, Anhui province

ZHANG Shuai¹, YE Wennan², LIU Zhaoyu², WU Xianghui³, SUN Junming⁴, GAO Congfen^{2*}

(1. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China; 2. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Plant Protection Station of Anhui Province, Hefei 230001, China; 4. Plant Protection Station of Lujiang County, Anhui Province, Hefei 231500, China)

Abstract Brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, has developed resistance to many kinds of insecticides. To screen highly effective insecticides against brown planthopper, resistance of triflumezopyrim, dinotefuran, nitenpyram, pymetrozine, and sulfoxaflor against a field population, which collected from Lujiang county, Anhui province, were monitored by the rice stem dipping method from 2020 to 2022. Meanwhile, field trial was carried out to investigate the efficacy of these insecticides against brown planthopper in Lujiang county. Resistance monitoring test showed that Lujiang populations developed high resistance to pymetrozine (RR:104.6–154.4-fold), moderate to high resistance to dinotefuran (RR:77.7–157.2-fold), moderate resistance to sulfoxaflor and nitenpyram (21.3–64.5-fold and 14.6–22.6-fold, respectively), and still kept susceptible to triflumezopyrim. At the recommended high concentration, triflumezopyrim 20% WG and yizuocongmingding 10% SC showed quick and persistent effects on brown planthoppers,

收稿日期: 2023-01-08

修订日期: 2023-02-01

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1401105, 2022YFD1400903)

* 通信作者 E-mail: gaocongfen@njau.edu.cn

except of a 74.72% control efficacy on the first day after treated with triflumezopyrim 20% WG. The control effect of nitenpyram 50% SG and sulfoxaflor 22% SC was the second, 67.63%—71.61% control efficacy on the first day, and increased to 77.16%—84.13% at the 3rd day to the 7th day after treatment, but reduced to 71.52%—75.77% on the 14th day. The control efficacy of pymetrozine 50% WG was about 70% at the 1st to the 7th day but decreased to 62.12% at the 14th day. For flonicamid 20% SC, dinotefuran 20% WG and etofenprox 10% SC, the control efficacy kept below 80% from the 1st to the 14th day. Combined with the results of resistance monitoring and field trial efficacy, we concluded that the triflumezopyrim and other mesoionic insecticides could be used alternately with neonicotinoids, pymetrozine or their mixtures for the control of resistant brown planthopper.

Key words insecticide; resistance monitoring; *Nilaparvata lugens*; field efficacy

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 是一种为害水稻的单食性害虫, 具有迁飞性、种群繁殖快等特点, 很容易暴发成灾^[1], 2020 年农业农村部将其列入《一类农作物病虫害名录》。长期以来, 化学防治是控制褐飞虱的主要措施, 但随着农药长期、大面积或不合理施用, 导致褐飞虱对有机磷类、氨基甲酸酯类、新烟碱类等多种杀虫剂产生不同程度的抗性, 特别是近几年陆续有文献报道褐飞虱对田间主打药剂吡蚜酮产生抗性, 导致褐飞虱田间防控难度越来越大^[2-7]。因此, 引进高效、低毒, 且与环境相容性好的杀虫剂, 对有效控制褐飞虱为害, 保障水稻安全生产有重要的现实意义。三氟苯嘧啶等介离子杀虫剂是防治刺吸式害虫的新型杀虫剂, 能有效防治对新烟碱类、有机磷类和氨基甲酸酯类杀虫剂产生抗性的刺吸式害虫, 目前已成为褐飞虱防控药剂研究热点^[8]。为了明确不同作用机理杀虫药剂对褐飞虱的防治效果, 筛选高效、低毒且与环境相容性好的杀虫剂, 全国农业技术推广服务中心联合南京农业大学在安徽省庐江县组织开展了褐飞虱抗药性水平测定以及不同药剂对褐飞虱的田间药效试验。

1 材料与方法

1.1 室内抗药性监测

1.1.1 监测对象

试虫: 由安徽省庐江县植保站从示范区内采集褐飞虱试虫送到南京农业大学植物保护学院进行室内抗药性监测。

敏感品系: 2005 年 7 月由浙江化工研究院提供, 该品系于 1995 年采自杭州市蒋家湾村单季水稻大田, 在室内不接触任何药剂的情况下用‘汕优 63’杂交稻饲养。

1.1.2 监测药剂

吡蚜酮原药, 由江苏安邦电化股份有限公司提供; 三氟苯嘧啶原药, 由杜邦作物保护有限公司提供; 烯啶虫胺原药, 由南京南农农药科技发展有限公司提供; 22% 氟啶虫胺胍悬浮剂 (SC), 由美国陶氏

益农公司提供; 呋虫胺原药, 由江阴苏利化学股份有限公司提供。

上述原药除吡蚜酮以二甲基亚砜作为溶剂外其余药剂均以丙酮作溶剂, 加 10% Triton-100 (m/V) 加工成与该药剂通常市售乳油的有效成分含量一致的乳油后, 供测定用。

1.1.3 监测方法

参考褐飞虱抗药性监测技术规程 (NY/T1708-2009) 建立的稻茎浸渍法, 对褐飞虱进行室内毒力测定。具体过程为: 带根拔起健壮的分蘖期稻株, 洗净, 剪成约 10 cm 长的带根稻茎, 3 株 1 组, 于荫凉处晾干; 将供试药剂的母液用含 0.1% 的 Triton X-100 的水溶液等比稀释为 5 个系列浓度 (制剂直接用水稀释), 将稻茎分别在相应浓度的药液中浸泡 30 s, 以不含药剂的处理作为空白对照, 每浓度 3 个重复, 取出置于荫凉处晾干, 以浸湿的脱脂棉包住根部放入塑料杯中, 接入生长发育一致且活力较强的 3 龄中期若虫, 每杯 15 头; 静置 1~2 h 后, 把试验装置放入温度为 (27±1) °C, 光周期为 L//D=16 h//8 h, 相对湿度为 (70±10)% 的人工气候培养箱中饲养。根据药剂特性确定处理后检查结果的时间。呋虫胺、烯啶虫胺、氟啶虫胺胍、三氟苯嘧啶为处理后 4 d, 吡蚜酮为稻茎浸渍处理后 7 d 检查褐飞虱活虫数, 计算死亡率, 以细毛笔触动虫体后不能协调运动为死亡标准^[9]。

1.2 田间药效试验

1.2.1 试验田基本情况

试验田位于庐江县白山镇马鞍村彭老组, 水稻品种为‘镇稻 18’, 2022 年 6 月 16 日移栽, 株行距为 25 cm×14 cm, 2022 年 9 月 16 日施药, 水稻处于灌浆初期, 采用机动喷雾器均匀喷雾, 施药部位侧重于水稻下部, 施药时田间水层 3~5 cm 并保水 7 d。试验田田间地势平坦, 灌溉条件好, 肥力较高。

1.2.2 供试药剂及用量

20% 氟啶虫胺胍悬浮剂 (SC), 25 mL/667 m², 湖南新长山农业发展股份有限公司生产; 10% 异唑虫啉悬浮剂 (SC), 20 mL/667 m², 50% 烯啶虫胺可溶粒

剂(SG),10 g/667 m²,广西田园生化股份有限公司生产;50%吡蚜酮水分散粒剂(WG),20 g/667 m²,河北威远生物化工有限公司生产;20%呋虫胺水分散粒剂(WG),40 g/667 m²,海利尔药业集团股份有限公司生产;10%醚菊酯悬浮剂(SC),70 mL/667 m²,山西绿海农药科技有限公司生产;20%三氟苯嘧啶水分散粒剂(WG),9 g/667 m²,先正达(中国)投资有限公司生产;22%氟啶虫胺胍悬浮剂(SC),40 mL/667 m²,科迪华公司生产。以喷清水作为空白对照,试验设置 3 次重复,小区面积 222 m²,采用随机区组排列。

1.2.3 调查时间和方法

防治褐飞虱小区试验分别在施药前和施药后 1、3、7 d 和 14 d 调查,每小区平行跳跃法调查 25 点,每点调查 2 丛,将涂有机油或肥皂水的白瓷盘伸入稻行间,摇动或拍打稻丛,迅速统计白瓷盘上的飞虱数,计算防治效果。

虫口减退率=(施药前活虫数-施药后活虫数)/施药前活虫数×100%;

防治效果=(处理区虫口减退率-对照区虫口减退率)/(1-对照区虫口减退率)×100%。

2 结果

2.1 褐飞虱对 5 种杀虫剂的抗药性监测

室内采用稻茎浸渍法测定了庐江县褐飞虱田间种群对吡蚜酮等 5 种药剂的抗性,监测结果表明(表 1),2020 年-2022 年安徽庐江褐飞虱种群对吡蚜酮的 LC₅₀ 值为 268.8~396.9 mg/L,抗性倍数>100 倍,属于高水平抗性;对新烟碱类药剂呋虫胺的 LC₅₀ 为 22.5~45.6 mg/L,抗性倍数为 77.7 倍到 157.2 倍,其中 2021 年抗性水平最高;烯啶虫胺的 LC₅₀ 值为 6.9~10.6 mg/L,抗性倍数从 14.6 倍上升到 22.6 倍,仍处于中等水平抗性;对氟啶虫胺胍的 LC₅₀ 值为 10.5~31.6 mg/L,虽属于中等水平抗性,但抗性倍数从 64.5 倍降为 21.3~25.0 倍;对三氟苯嘧啶 LC₅₀ 值 0.1~0.3 mg/L,抗性倍数在 2.3~4.0 倍,尚处于敏感状态。

表 1 2020 年-2022 年庐江褐飞虱对不同药剂抗性水平

药剂名称 Insecticide		2020 年		2021 年		2022 年	
		LC ₅₀ /(mg/L)	抗性倍数	LC ₅₀ /(mg/L)	抗性倍数	LC ₅₀ /(mg/L)	抗性倍数
		LC ₅₀	RR	LC ₅₀	RR	LC ₅₀	RR
吡蚜酮	pymetrozine	396.9	154.4	268.8	104.6	350.0	136.2
呋虫胺	dinotefuran	22.5	77.7	45.6	157.2	26.3	90.6
烯啶虫胺	nitenpyram	6.9	14.6	10.6	22.6	9.3	19.9
氟啶虫胺胍	sulfoxaflor	31.6	64.5	10.5	21.3	12.3	25.0
三氟苯嘧啶	triflumezopyrim	0.2	3.1	0.1	2.3	0.3	4.0

2.2 三氟苯嘧啶等 8 种杀虫剂防治褐飞虱的田间药效试验

从田间药效试验结果看(表 2):药后 1 d,异唑虫嘧啶的防治效果为 86.17%;三氟苯嘧啶、烯啶虫胺、吡蚜酮及氟啶虫胺胍的防效为 67.63%~74.72%,氟

啶虫酰胺、呋虫胺及醚菊酯的防效为 44.27%~58.49%;异唑虫嘧啶的速效性最好,显著高于其他试验药剂;三氟苯嘧啶、烯啶虫胺、吡蚜酮和氟啶虫胺胍的速效性低于异唑虫嘧啶,但显著高于另外 3 种药剂。药后 3 d,异唑虫嘧啶、三氟苯嘧啶、烯啶虫

表 2 不同杀虫药剂对褐飞虱田间防效试验¹⁾

药剂名称 Insecticide	防治效果/% Control efficacy			
	药后 1 d	药后 3 d	药后 7 d	药后 14 d
	1 d after application	3 d after application	7 d after application	14 d after application
20%三氟苯嘧啶 WG	(74.72±0.96)b	(81.77±2.38)a	(88.31±1.19)a	(92.03±1.54)a
10%异唑虫嘧啶 SC	(86.17±1.09)a	(80.29±0.97)ab	(80.82±0.95)b	(80.35±1.22)b
50%烯啶虫胺 SG	(71.61±0.24)b	(82.12±0.80)a	(84.13±0.60)ab	(75.77±0.32)bc
22%氟啶虫胺胍 SC	(67.63±1.11)b	(77.16±1.44)bc	(81.13±1.42)b	(71.52±1.86)c
50%吡蚜酮 WG	(68.43±3.11)b	(71.13±3.09)bc	(71.52±3.58)cd	(62.12±1.71)d
20%氟啶虫酰胺 SC	(58.49±1.70)c	(54.16±2.23)d	(78.01±0.68)bc	(69.38±1.33)c
20%呋虫胺 WG	(55.83±0.91)c	(67.37±1.16)c	(69.47±0.83)d	(61.80±0.49)d
10%醚菊酯 SC	(44.27±1.65)d	(73.18±1.99)bc	(62.49±2.13)d	(29.19±0.98)e

1) 表中数据为平均值±标准误。表中同列不同字母代表在 0.05 水平上差异显著。
Data in the table were mean±SE. Different letters in the same column indicated significant differences at 0.05 level.

胺的防治效果较好,为 80.29%~82.12%;氟啶虫胺胍、吡蚜酮、醚菊酯防治效果次之,为 71.13%~77.16%,显著低于三氟苯嘧啶、烯啶虫胺防效;呋虫胺防效较差,为 67.37%,与异唑虫嘧啶、三氟苯嘧啶、烯啶虫胺防效差异显著;氟啶虫酰胺对褐飞虱防效为 54.16%,防效最差。药后 7 d,三氟苯嘧啶的防效最高(88.31%),略高于烯啶虫胺(84.13%),显著高于其他药剂;氟啶虫胺胍和氟啶虫酰胺防效上升,与异唑虫嘧啶和烯啶虫胺防效差异不显著;吡蚜酮、呋虫胺、醚菊酯防效依然很差,防效均不到 75%。药后 14 d,三氟苯嘧啶防效上升到 92.03%,显著高于其他试验药剂;其次为异唑虫嘧啶,与药后 7 d 防效相当,持效性较好;烯啶虫胺、氟啶虫胺胍、氟啶虫酰胺持效性次之,防效为 69.38%~75.77%;吡蚜酮和呋虫胺的持效性较差,防效约为 62%,醚菊酯持效性最差,防效低于 30%。

3 结论与讨论

长期大面积使用单一农药品种、不合理用药是褐飞虱产生抗药性的重要原因,而褐飞虱对主要防控药剂产生抗性是近些年来褐飞虱大暴发的重要原因之一,因此褐飞虱抗药性问题受到国内广泛关注^[10-11]。

自 2005 年吡虫啉在褐飞虱的防治上被停用以来,吡蚜酮逐渐成为我国褐飞虱防治的主要杀虫剂,褐飞虱对吡蚜酮的抗性也受到更多的关注。近年来国内不断有研究表明,褐飞虱田间种群对吡蚜酮抗性水平上升迅猛^[12-13]。本研究发现,不论是室内抗性监测结果,还是田间药效试验结果都表明,褐飞虱对吡蚜酮产生高水平抗性,即使吡蚜酮每 667 m² 有效成分使用量提高到 10 g,药后 1~14 d 田间防治效果都不到 75%,速效性和持效性都显著下降,需引起水稻产区各级植保技术部门高度关注。氟啶虫酰胺作用方式类似于吡蚜酮,也是通过抑制害虫口针对植物组织的穿透来干扰害虫的取食行为,致使害虫不能正常取食,饥饿而死^[14]。目前有关氟啶虫酰胺防治蚜虫的报道较多,但对于褐飞虱田间防效研究较少。本研究发现,氟啶虫酰胺对褐飞虱药后 1~14 d 防治效果都不到 80%,速效性和持效性表现都较差。

烯啶虫胺、呋虫胺都属于新烟碱类杀虫剂,都被农业农村部全国农业技术推广服务中心推荐与吡蚜酮轮换使用或混配使用。近几年,南京农业大学、华中农业大学相继研究报道褐飞虱对烯啶虫胺、呋虫胺抗性都有所上升^[15-16]。本研究发现,褐飞虱对呋虫胺处于高水平抗性,对烯啶虫胺处于中等水平

抗性,与其他学者研究结果相同。田间药效试验结果表明,烯啶虫胺防治效果要优于呋虫胺,呋虫胺对褐飞虱药后 1~14 d 田间防治效果都不到 70%,而烯啶虫胺药后 3~7 d 防治效果 80%以上,且与三氟苯嘧啶、异唑虫嘧啶防效差异不显著。氟啶虫胺胍是一种新型烟碱类杀虫剂,具有独特的亚砷亚胺基团,在化学结构和代谢抗性机制上区别于传统新烟碱类杀虫剂^[17]。裴新国等 2019 年监测了 7 省共 13 个褐飞虱田间种群对氟啶虫胺胍的抗性,90%的种群已达到中等水平抗性^[18],这与本研究结果相同。本研究田间药效结果表明,氟啶虫胺胍速效性较差,药后 1~3 d,防治效果都不到 80%,持效性也明显降低,药后 14 d 防治效果为 71.52%。

三氟苯嘧啶、异唑虫嘧啶都属于新型介离子类杀虫剂,作用于靶标害虫烟碱型乙酰胆碱受体正位结合位点,通过减少害虫的神经冲动或阻断神经传递,最终影响害虫取食、生殖等生理行为,导致害虫死亡^[19]。介离子类杀虫剂作用机理与传统的新烟碱类杀虫剂不同,三氟苯嘧啶、异唑虫嘧啶都与吡虫啉没有交互抗性^[20-21]。朱友理等的研究表明,三氟苯嘧啶对水稻飞虱具有很好的防治效果,不论是速效性还是持效性,田间表现均优于以往常用的对照药剂,且在试验剂量范围内对水稻安全^[22]。本研究室内抗性监测结果表明,褐飞虱对三氟苯嘧啶尚处于敏感状态,该药剂是唯一一个褐飞虱对其没有产生抗性的杀虫药剂种类。田间药效试验结果表明,三氟苯嘧啶、异唑虫嘧啶速效性和持效性都表现较好,药后 3~14 d 防治效果都高于 80%,明显优于其他作用机理的杀虫药剂。

结合本文研究结果,建议在今后褐飞虱防控过程中,要开展系统、科学的褐飞虱抗药性监测,并结合物种进化、生态学和生物信息学等多学科理论和研究手段,探明褐飞虱抗药性的发展规律和形成机制等,制定科学合理的田间高效防控及抗药性治理配套措施。在杀虫剂使用上,首先要严格限制高水平抗性药剂使用,如吡虫啉、噻虫嗪、噻嗪酮等;其次通过控制用药量,选择合理的用药方案减轻药剂的选择压力,如暂停使用吡蚜酮单剂而改用与吡蚜酮有增效作用的混剂;再次是实施轮用、混用、镶嵌式用药方式,减少每类杀虫剂在每季作物上的使用次数,如三氟苯嘧啶每季水稻只使用 1 次;最后建议田间喷施杀虫剂防治褐飞虱时,保持一定的水层,有利于内吸性药剂的传导和药效的充分发挥,从而延缓褐飞虱抗药性的发展,延长药剂使用寿命。

- fruit moth, *Grapholita molesta* [J]. Pest Management Science, 2001, 57(9): 822–826.
- [5] SHNON T, SCOTT J G. Autosomal sex-associated pyrethroid resistance in a strain of house fly (Diptera: Muscidae) with a male-determining factor on chromosome three [J]. Journal of Economic Entomology, 1990, 83 (3): 686–689.
 - [6] HØJLAND D H, SCOTT J G, VAGN JENSEN K M, et al. Autosomal male determination in a spinosad resistant housefly strain from Denmark [J]. Pest Management Science, 2013, 70 (7): 1114–1117.
 - [7] KENCE M, KENCE A. Genetic consequences of linkage between malathion resistance and an autosomal male-determining factor in house fly (Diptera: Muscidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 1992, 85(5): 1566–1570.
 - [8] ZHANG Yi, LI Jing, MA Zhuo, et al. Multiple mutations and overexpression of the *MdaE7* carboxylesterase gene associated with male-linked malathion resistance in housefly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) [J/OL]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 224. DOI: 10.1038/s41598-017-17325-x.
 - [9] MARKUSSEN M D, KRISTENSEN M. Cytochrome P450 monooxygenase-mediated neonicotinoid resistance in the house fly *Musca domestica* L. [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2010, 98(1): 50–58.
 - [10] BOUBIDI S C, ROSSIGNOL M, CHANDRE F, et al. Gender bias in insecticide susceptibility of *Aedes albopictus* is solely attributable to size [J]. Journal of the American Mosquito Control Association, 2016, 32(3): 251–253.
 - [11] DE LAME F M, HONG J J, SHEARER P W, et al. Sex-related differences in the tolerance of oriental fruit moth (*Grapholita molesta*) to organophosphate insecticides [J]. Pest Management Science, 2001, 57(9): 827–832.
 - [12] NAVARRO-ROLDÁN M A, BOSCH D, GEMENO C, et al. Enzymatic detoxification strategies for neurotoxic insecticides in adults of three tortricid pests [J]. Bulletin of Entomological Research, 2020, 110(1): 144–154.
 - [13] MARKUSSEN M D, KRISTENSEN M. Spinosad resistance in female *Musca domestica* L. from a field-derived population [J]. Pest Management Science, 2012, 68(1): 75–82.
 - [14] HØJLAND D H, JENSEN K V, KRISTENSEN M. Expression of xenobiotic metabolizing cytochrome P450 genes in a spinosad-resistant *Musca domestica* L. strain [J/OL]. PLoS ONE, 2014, 9(8): e103689. DOI: 10.1371/journal.pone.0103689.
 - [15] 胡维涛. CYP302A1、CYP307A1v2 调控雌雄灰飞虱对三氟苯嘧啶产生敏感性差异的分子机制[D]. 合肥:安徽农业大学, 2022.
 - [16] 高希武, 梁沛. 昆虫毒理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2022: 71–73.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 306 页)

参考文献

- [1] 程遐年, 吴进才, 马飞. 褐飞虱研究与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [2] 邵振润, 张帅, 李永平, 等. 中国水稻主产区褐飞虱 3 种杀虫剂的抗性监测[J]. 农药学学报, 2011, 13(1): 91–94.
- [3] 张帅, 张绍明, 周群芳, 等. 褐飞虱对噻嗪酮和噻虫嗪的室内抗性 & 田间防效[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(7): 77–79.
- [4] 张帅. 2020 年全国农业有害生物抗性监测结果 & 科学用药建议[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(2): 71–78.
- [5] 张帅, 邵振润, 李永平, 等. 不同杀虫药剂对水稻“两迁”害虫田间药效研究[J]. 植物保护, 2014, 40(3): 191–194.
- [6] 张帅, 李建洪, 张绍明, 等. 杀虫剂对长江中下游地区水稻害虫田间防效[J]. 农药, 2016, 55(7): 530–535.
- [7] 王鹏, 甯佐苹, 张帅, 等. 我国主要稻区褐飞虱对常用杀虫剂的抗性监测[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 191–197.
- [8] 英君伍, 雷光月, 宋玉泉, 等. 三氟苯嘧啶的合成 & 杀虫活性研究[J]. 现代农药, 2017, 16(2): 14–16.
- [9] 梁桂梅, 沈晋良, 李永平, 等. 水稻褐飞虱抗性监测技术规程: NY/T1708-2009 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [10] 程家安, 祝增荣. 2005 年长江流域稻区褐飞虱暴发成灾原因分析[J]. 植物保护, 2006, 32(4): 1–4.
- [11] 王彦华, 沈晋良, 王鸣华. 褐飞虱抗性机理 & 其治理研究进展[J]. 农药科学与管理, 2005, 26(4): 24–28.
- [12] 郑晨. 褐飞虱的抗性监测 & 吡蚜酮对褐飞虱交尾行为的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [13] 王利祥. 吡蚜酮的生殖毒理 & 抗性机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [14] 张亦冰. 新颖杀虫剂—氟啶虫酰胺[J]. 世界农药, 2010, 32 (1): 54–56.
- [15] 张勇. 褐飞虱的抗性监测 & 复配配方的筛选[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [16] 李文浩. 共生菌介导褐飞虱对烯啶虫胺抗性机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [17] SPARKS T C, WATSON G B, LOSO M R, et al. Sulfoxafloor and the sulfoximine insecticides: chemistry, mode of action and basis for efficacy on resistant insects [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2013, 107(1): 1–7.
- [18] 裴新国, 张帅, 张彦超, 等. 褐飞虱对氟啶虫胺的抗性监测 & 生化抗性机制[J]. 植物保护, 2022, 48(3): 39–46.
- [19] CORDOVA D, BENNER E A, SCHROEDER M E, et al. Modes of action of triflumezopyrim: a novel mesoionic insecticide which inhibits the nicotinic acetylcholine receptor [J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2016, 74: 32–41.
- [20] 张彦超. 褐飞虱的抗性监测 & 对三氟苯嘧啶的抗性风险评估[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [21] 张建. 新型含氮杂环的吡啶并[1,2-a]嘧啶酮类介离子化合物的设计合成、杀虫活性 & 作用机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [22] 朱友理, 何东兵, 曹书培, 等. 三氟苯嘧啶对稻飞虱的防效 & 对天敌的安全性[J]. 中国植保导刊, 2018, 38(8): 71–74.

(责任编辑: 田 喆)