

◆ 药效与应用 ◆

三氟苯嘧啶与新烟碱类杀虫剂对家蝇和 褐飞虱的协同增效作用

孟翔坤¹, 戴雨雯², 张建桃³, 江定心^{1*}

(1. 华南农业大学植物保护学院, 广州 510642 2. 广东天禾农资股份有限公司, 广州 510080 3. 华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642)

摘要:为了评估三氟苯嘧啶与新烟碱类杀虫剂混用对家蝇和褐飞虱的毒杀效果与混用效应, 开展了室内毒力测定试验, 并根据筛选出的最佳混配组合开展田间药效试验。试验结果显示, 三氟苯嘧啶与呋虫胺、噻虫嗪、烯啶虫胺按照质量比1:5.57、1:1.83、1:11.6混配, 对家蝇的共毒系数分别为250、144、174; 按照质量比1:3.99、1:3.33、1:7.83混配, 对褐飞虱的共毒系数分别为219、178、138。田间试验结果显示, 施用10%三氟苯嘧啶SC+20%呋虫胺SC(7.65 g/hm²+39.00 g/hm²)、10%三氟苯嘧啶SC+30%噻虫嗪SC(10.35 g/hm²+12.15 g/hm²)、10%三氟苯嘧啶SC+10%烯啶虫胺SL(6.75 g/hm²+47.25 g/hm²), 药后第7天, 对褐飞虱的防治效果为76.22%~78.09%。表明混配组合在减少药剂用量后仍能保持原有的防治效果。三氟苯嘧啶与呋虫胺、烯啶虫胺、噻虫嗪混用对家蝇和褐飞虱具有明显的协同增效作用。

关键词:三氟苯嘧啶; 新烟碱类杀虫剂; 混用; 增效作用; 褐飞虱; 家蝇

中图分类号:TQ 450.2 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-5284.2025.05.009

Synergistic effects of triflumezopyrim and neonicotinoid insecticides against *Musca domestica* and *Nilaparvata lugens*

MENG Xiangkun¹, DAI Yuwen², ZHANG Jiantao³, JIANG Dingxin^{1*}

(1. College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Tianhe Agricultural Means of Production Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 3. College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To evaluate the insecticidal and synergistic effects of triflumezopyrim and neonicotinoid insecticides on *Nilaparvata lugens* and *Musca domestica*, the laboratory bioassay tests were carried out to evaluate the mixed effects of different insecticides, and field efficacy trials were carried out based on the best mixed combination. The results showed that triflumezopyrim combined with dinotefuran, thiamethoxam and nitenpyram had synergistic effects. The co-toxicity coefficients were 250, 144 and 174 against *Musca domestica* at the mass ratios of 1:5.57, 1:1.83 and 1:11.6. The co-toxicity coefficients were 219, 138 and 178 against *Nilaparvata lugens* at the ratios of 1:3.99, 1:3.33, 1:7.83, respectively. The control effects of triflumezopyrim 10% SC + dinotefuran 20% SC (7.65 g/hm² + 39.00 g/hm²), triflumezopyrim 10% SC + thiamethoxam 30% SC (10.35 g/hm² + 12.15 g/hm²), triflumezopyrim 10% SC + nitenpyram 10% SL (6.75 g/hm² + 47.25 g/hm²) on *Nilaparvata lugens* were 76.22%-78.09% at the 7th day after field application. The mixtures of the tested insecticides could maintain the control effects even after reducing the dosage. Triflumezopyrim mixed with dinotefuran, nitenpyram and thiamethoxam exhibited synergistic effects on *Nilaparvata lugens* and *Musca domestica*.

Key words: triflumezopyrim; neonicotinoid insecticide; mixture; synergistic effect; *Nilaparvata lugens*; *Musca domestica*

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011277)

作者简介: 孟翔坤, 硕士研究生, 主要从事农药作用机理研究。E-mail: 2468274604@qq.com

通信作者: 江定心, 教授, 博士, 主要从事昆虫毒理学研究。E-mail: dxj2005@scau.edu.cn

三氟苯嘧啶是由杜邦公司开发的新型介离子嘧啶酮类杀虫剂,为烟碱乙酰胆碱受体拮抗剂,通过竞争性结合受体的正构位点,抑制受体传导信号。昆虫中毒后,呆滞不动,无兴奋或痉挛现象,随后麻痹、瘫痪,直至死亡^[1]。其具有高效、持效、低毒等特性,对同翅目(Homoptera)、鳞翅目(Lepidoptera)等多种害虫均具有良好的防效,尤其是对新烟碱类杀虫剂抗性害虫防效优异^[2]。新烟碱类杀虫剂的作用机制主要是通过选择性控制昆虫神经系统烟碱型乙酰胆碱受体,阻断中枢神经系统的正常传导,从而使昆虫麻痹死亡^[3]。该类杀虫剂是一类低用量、安全、高效、内吸性好的广谱杀虫剂^[4-5]。近年来,由于新烟碱类杀虫剂广泛大量使用,使得害虫的抗药性问题逐渐显露,给农作物产量造成很大的经济损失^[6]。徐鹏飞^[7]研究发现,三氟苯嘧啶与烯啶虫胺、毒死蜱、噻虫胺等几种杀虫剂存在潜在的交互抗性。本文测定了三氟苯嘧啶与8种作用于乙酰胆碱受体杀虫剂对家蝇与褐飞虱的杀虫活性及其联合毒力,旨在得到三氟苯嘧啶与8种杀虫剂的最佳增效比,为农药混配使用提供有效方案,从而扩大杀虫谱,发挥协同作用,在保证防治效果的前提下节省药剂用量或减少喷药次数,延缓有害生物的抗药性,降低环境污染^[8]。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

家蝇(*Musca domestica*)从广东省疾病预防控制中心引进,饲养在饲养笼内,并在光照周期L:D=14 h:10 h、培养温度25℃、相对湿度(70±10)%的条件下培养,试验前不接触任何药剂。

褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)采自华南农业大学试验田,于温度(25±5)℃、相对湿度50%~80%、光照周期L:D=16 h:8 h的室内饲养,试验前不接触任何药剂,为连续饲养10代以上的敏感种群。

1.2 供试药剂

96%三氟苯嘧啶原药,科迪华农业科技有限责任公司;95%吡虫啉原药,湖北康宝泰精细化工有限公司;96%烯啶虫胺原药,湖南新长山农业发展股份有限公司;98.3%多杀霉素原药,美国Chem Service公司;95%杀虫单原药,江苏天容集团股份有限公司;98%呋虫胺原药,浙江永泰科技股份有限公司;98%噻虫嗪原药,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;98%噻虫胺原药、98%噻虫啉原药,江苏克胜集团股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 单剂毒力测定

采用饲料拌毒法测定化合物对家蝇成虫的毒力^[9]。称取1 g白砂糖装入直径2 cm、长度10 cm的玻璃管,加入用1 mL丙酮稀释后的供试药剂原药,设置丙酮作为空白对照。待玻璃管内丙酮完全挥发后,将经乙醚麻醉后的羽化48 h的家蝇成虫转入玻璃管中,用纱布封口。24 h后检查家蝇死亡情况,每组试验重复3次。

1.3.2 增效作用评价

以供试药剂的致死中浓度配制药液,按不同体积比进行混合,计算混配组合中各药剂的实际浓度,24 h后观察死亡率。共毒因子大于20的混配组合表现为增效作用,共毒因子最大的混配组合中各药剂的质量比最佳。按该配比设置浓度梯度,根据各药剂的LC-P曲线得出在不同浓度下的理论死亡率,计算农药混配组合的LC₅₀和共毒系数。共毒系数大于120,为增效作用;共毒系数在80~120,为相加作用;共毒系数小于80,为拮抗作用。

$$\text{共毒因子} = \frac{\text{实测死亡率} - \text{理论死亡率}}{\text{理论死亡率}} \times 100$$

$$\text{混剂实测毒力指数} = \frac{\text{标准单剂的LC}_{50}}{\text{混剂的LC}_{50}} \times 100$$

$$\text{混剂理论毒力指数} = \text{A毒力指数} \times \text{A在混剂中质量分数} + \text{B毒力指数} \times \text{B在混剂中质量分数}$$

$$\text{共毒系数} = \frac{\text{混剂实测毒力指数}}{\text{混剂理论毒力指数}} \times 100$$

1.3.3 增效复配检验

将有增效作用的混配组合对褐飞虱进行联合毒力测定,参考稻苗浸渍法^[10]。选取实验室培养的长势一致的稻苗(10~15 cm),在配制好的药液中浸渍10 s,用脱脂棉包住根茎连接处,置于20 cm长玻璃试管中,每试管3株。用吸虫器将试虫移入试管中,每试管15头,管口用纱布罩住,每处理重复3次。处理后48 h检查试虫死亡情况。将三氟苯嘧啶分别与3种新烟碱类杀虫剂按不同有效成分质量比混配进行毒力测定,计算每组混配组合的共毒因子,确定最佳配比并计算共毒系数。

1.4 田间药效试验

田间药效试验在广州市增城区进行,施药方法参考GB/T 17980.4—2000中试验方法。试验共设置8个处理:10%三氟苯嘧啶SC 22.5 g/hm²(有效成分用量,下同);20%呋虫胺SC 120 g/hm²;30%噻虫嗪SC 22.5 g/hm²;10%烯啶虫胺SL 60 g/hm²;10%三氟苯嘧

啉SC 7.65 g/hm²+20%呋虫胺SC 39 g/hm² ;10%三氟苯嘧啶SC 10.35 g/hm²+30%噻虫嗪SC 12.15 g/hm² ;10%三氟苯嘧啶SC 6.75 g/hm²+10%烯啶虫胺SL 47.25 g/hm² ,清水对照。每处理重复3次,共24个小区,每个小区面积667 m²,随机排列。在水稻分蘖末期,采用极飞P20植保无人机(广州极飞科技有限公司)在离地面约1.5 m处对水稻茎叶进行均匀喷雾。施药前对虫口基数调查1次,施药处理后第3天、第7天调查虫口数。试验期间观察药剂对作物是否有药害产生。

$$\text{虫口减退率}/\%=\frac{\text{药前虫口数}-\text{药后虫口数}}{\text{药前虫口数}}\times 100$$
$$\text{防效}/\%=\frac{\text{处理区虫口减退率}-\text{对照区虫口减退率}}{1-\text{对照区虫口减退率}}\times 100$$

2 结果与分析

2.1 9种杀虫剂对家蝇的毒力

9种杀虫剂对家蝇成虫均表现出良好的杀虫效果,试验结果见表1。9种作用于乙酰胆碱受体的杀虫剂中,噻虫啉对家蝇的毒力最高,LC₅₀为1.189 1 μg/g;烯啶虫胺的毒力最低,LC₅₀为8.273 7 μg/g;三氟苯嘧啶的LC₅₀为2.850 2 μg/g。

表 1 9 种杀虫剂对家蝇成虫的毒力

杀虫剂	LC ₅₀ / (μg/g)	毒力回归 方程	相关 系数	95%置信区间/ (μg/g)
三氟苯嘧啶	2.850 2	y=4.06+2.070x	0.985 1	2.193~3.705
吡虫啉	4.783 6	y=3.53+2.160x	0.964 1	3.739~6.121
烯啶虫胺	8.273 7	y=3.43+1.710x	0.907 2	6.103~11.35
噻虫胺	2.535 2	y=4.54+1.130x	0.977 4	1.551~4.143
噻虫嗪	1.304 7	y=4.77+2.010x	0.987 9	0.928~1.833
噻虫啉	1.189 1	y=4.88+1.645x	0.969 2	0.849~1.664
呋虫胺	1.766 3	y=4.63+1.48x	0.947 6	1.123~2.778
杀虫单	2.363 8	y=4.41+1.57x	0.966 2	1.677~3.332
多杀霉素	4.439 5	y=3.85+1.77x	0.950 9	3.340~5.901

2.2 三氟苯嘧啶与8种杀虫剂混配对家蝇的共毒因子

将质量分数为致死中浓度的供试药剂按照体积比1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1进行混合,共毒因子见表2。三氟苯嘧啶与烯啶虫胺按体积比1:9、2:8、3:7、4:6、5:5混配时共毒因子大于20;三氟苯嘧啶与噻虫嗪、呋虫胺按体积比1:9、2:8、3:7、4:6混配时共毒因子大于20,具有明显的增效作用。其中,三氟苯嘧啶与烯啶虫胺、噻虫嗪和呋虫胺在混配体积比2:8时共毒因子均最大,分别为31.39、26.77和34.82。

表 2 三氟苯嘧啶与 8 种杀虫剂不同配比混合物对家蝇成虫的共毒因子

混配组合	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
三氟苯嘧啶+吡虫啉	4.30	1.69	4.41	8.62	7.85	3.02	5.88	-4.02	-2.68
三氟苯嘧啶+烯啶虫胺	29.97	31.39	24.91	25.43	23.00	10.90	13.38	18.20	11.61
三氟苯嘧啶+噻虫胺	13.49	6.70	-0.36	9.76	-5.44	2.69	-13.1	-0.34	6.75
三氟苯嘧啶+多杀霉素	-1.19	18.90	11.03	0.21	-1.79	5.50	14.33	12.19	10.56
三氟苯嘧啶+杀虫单	-9.54	3.50	10.03	11.25	7.93	-3.48	3.34	1.85	2.11
三氟苯嘧啶+噻虫嗪	24.15	26.77	22.17	25.20	10.72	5.98	15.07	12.99	2.82
三氟苯嘧啶+噻虫啉	16.29	4.31	17.83	12.73	9.93	-1.86	5.37	9.93	10.33
三氟苯嘧啶+呋虫胺	28.91	34.82	27.48	27.14	12.23	22.14	23.23	11.13	12.46

2.3 三氟苯嘧啶与3种杀虫剂混配对家蝇的共毒系数

测定三氟苯嘧啶分别与呋虫胺、噻虫嗪、烯啶虫胺按质量比1:5.57、1:1.83、1:11.6混配组合对家蝇的毒力,结果见表3。

试验结果显示,三氟苯嘧啶与呋虫胺、噻虫嗪、烯啶虫胺混配组合的实测LC₅₀分别为0.798 3 μg/g、0.768 5 μg/g、4.164 7 μg/g,共毒系数分别为250、144、174。其中,三氟苯嘧啶与呋虫胺混配共毒系数最大,增效作用最强。

表 3 三氟苯嘧啶与 3 种杀虫剂最佳配比混合物对家蝇成虫的毒力

混配组合	质量比	毒力回归方程	相关系数	实测LC ₅₀ /(μg/g)	共毒系数
三氟苯嘧啶+呋虫胺	1:5.57	y=5.15+1.55x	0.960 9	0.798 3	250
三氟苯嘧啶+噻虫嗪	1:1.83	y=5.21+1.77x	0.989 9	0.768 5	144
三氟苯嘧啶+烯啶虫胺	1:11.6	y=4.08+1.48x	0.969 0	4.164 7	174

2.4 三氟苯嘧啶等4种杀虫剂对褐飞虱的毒力

如表4所示,4种杀虫剂对褐飞虱3龄若虫的毒力效果存在明显差异。三氟苯嘧啶对褐飞虱的

LC₅₀为1.045 0 mg/L,呋虫胺的LC₅₀为0.356 2 mg/L,烯啶虫胺的LC₅₀为2.045 8 mg/L,噻虫嗪的LC₅₀为0.476 2 mg/L。

表 4 4 种杀虫剂对褐飞虱 3 龄若虫的毒力

杀虫剂	LC ₅₀ /(mg/L)	毒力回归方程	相关系数	95%置信区间/(mg/L)
三氟苯嘧啶	1.045 0	y=4.96+2.04x	0.979 9	0.833~1.312
烯啶虫胺	2.045 8	y=4.43+1.83x	0.956 6	1.605~2.608
噻虫嗪	0.476 2	y=5.66+2.06x	0.986 1	0.387~0.585
呋虫胺	0.356 2	y=5.60+1.34x	0.834 7	0.248~0.512

2.5 三氟苯嘧啶与3种杀虫剂混配对褐飞虱的共毒因子

为进一步探究几种杀虫剂对褐飞虱3龄若虫的联合毒力,根据上述测定的单剂致死中浓度配制药液,按照体积比1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、

7:3、8:2、9:1进行混合,进行毒力测定,结果见表5。三氟苯嘧啶与烯啶虫胺按体积比2:8混配时共毒因子最大,为31.87;三氟苯嘧啶与噻虫嗪按体积比3:7混配时,共毒因子最大,为33.47;三氟苯嘧啶与呋虫胺按体积比2:8混配时,共毒因子最大,为39.76。

表 5 三氟苯嘧啶与 3 种杀虫剂不同配比混合物对褐飞虱 3 龄若虫的共毒因子

混配组合	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
三氟苯嘧啶+ 烯啶虫胺	11.89	31.87	29.65	24.60	23.44	23.37	17.69	27.82	24.04
三氟苯嘧啶+ 噻虫嗪	22.63	24.39	33.47	20.75	15.53	20.59	24.78	20.13	22.89
三氟苯嘧啶+ 呋虫胺	25.25	39.76	35.14	20.30	23.42	24.54	18.95	22.86	24.30

2.6 三氟苯嘧啶与3种杀虫剂混配对褐飞虱的共毒系数

根据上述所得的理论最佳配比,分别测定三氟苯嘧啶与烯啶虫胺混配体积比2:8(质量比为1:3.99)、三氟苯嘧啶与噻虫嗪混配体积比3:7(质量比为1:3.33)、三氟苯嘧啶与呋虫胺混配体积

比2:8(质量比为1:7.83)的3组混配药剂对褐飞虱3龄若虫的毒力,结果见表6。三氟苯嘧啶与呋虫胺、噻虫嗪、烯啶虫胺混配组合物LC₅₀分别为0.186 9 mg/L、0.311 4 mg/L、0.573 4 mg/L,共毒系数分别为219、178、138,其中三氟苯嘧啶与呋虫胺混配共毒系数最大,协同增效作用最强。

表 6 三氟苯嘧啶与 3 种杀虫剂最佳配比混合物对褐飞虱 3 龄若虫的毒力

混配组合	质量比	毒力回归方程	相关系数	实测 LC ₅₀ /(mg/L)	共毒系数
三氟苯嘧啶+呋虫胺	1:3.99	y=6.26+1.73x	0.961 7	0.186 9	219
三氟苯嘧啶+噻虫嗪	1:3.33	y=6.26+1.47x	0.977 5	0.311 4	178
三氟苯嘧啶+烯啶虫胺	1:7.83	y=5.46+1.94x	0.925 0	0.573 4	138

2.7 田间药效试验结果

在室内联合毒力测定的基础上,选择4种杀虫剂及其最高增效作用混配组合对水稻褐飞虱进行药效试验,结果如表7。

4种杀虫剂单剂中,10%三氟苯嘧啶SC 22.50 g/hm²、20%呋虫胺SC 120.00 g/hm²、30%噻虫嗪SC 22.50 g/hm²、10%烯啶虫胺SL 60.00 g/hm²施用后第3天的防效分别为53.51%、49.36%、48.48%、48.72%,第7天的防效分别为71.88%、74.70%、70.60%、71.58%。10%三氟苯嘧啶SC与20%呋虫胺SC混配、10%三氟苯嘧啶SC与30%噻虫嗪SC混配、10%三氟

苯嘧啶SC与10%烯啶虫胺SL混配组合第3天的防治效果分别为65.81%、59.21%、61.68%,第7天的防效分别为78.09%、76.39%、76.22%,表明混配组合中的药剂在减少使用量后仍能保持原有的防治效果。

3 结论与讨论

杀虫剂抗性是影响杀虫剂货架寿命的重要因素之一,农药混用是科学使用农药的一种重要途径^[11]。烟碱型乙酰胆碱受体竞争调节剂对受体的结合方式不同,三氟苯嘧啶与新烟碱类杀虫剂存在竞争关系^[12]。

表 7 三氟苯嘧啶及其混配组合对水稻褐飞虱的防治效果

药剂及组合	有效成分用量/(g/hm ²)	药前 虫口数/头	防效/%	
			第3天	第7天
10%三氟苯嘧啶SC	22.50	25.60	53.51 ± 3.49ab	71.88 ± 2.77ab
20%呋虫胺SC	120.00	26.20	49.36 ± 2.69a	74.70 ± 1.43ab
30%噻虫嗪SC	22.50	27.27	48.48 ± 2.48a	70.60 ± 1.37a
10%烯啶虫胺SL	60.00	29.93	48.72 ± 4.62a	71.58 ± 4.21a
10%三氟苯嘧啶SC+20%呋虫胺SC	7.65+39.00	29.87	65.81 ± 3.83d	78.09 ± 2.07b
10%三氟苯嘧啶SC+30%噻虫嗪SC	10.35+12.15	28.07	59.21 ± 2.63bc	76.39 ± 4.37ab
10%三氟苯嘧啶SC+10%烯啶虫胺SL	6.75+47.25	25.80	61.68 ± 4.43cd	76.22 ± 4.76ab
清水对照		26.67		

注 虫口数一栏数据为5株水稻上虫口数。

试验证明,作用机制相近而类型不同的2种药剂组成的混剂不一定都无增效作用,作用机制不同的2种药剂组成的混剂不一定都有增效作用。三氟苯嘧啶属于乙酰胆碱受体抑制剂,呋虫胺、噻虫嗪和烯啶虫胺属于乙酰胆碱受体激动剂,4种杀虫剂均作用于烟碱型乙酰胆碱受体,具有相同作用靶标的杀虫剂之间极易产生交互抗性,故而从理论上很难确定2种农药之间是否存在增效作用。本试验通过测定三氟苯嘧啶与8种作用于昆虫乙酰胆碱受体杀虫剂的混配效果,发现三氟苯嘧啶与呋虫胺、噻虫嗪、烯啶虫胺混配有明显的增效作用,并筛选出最佳增效组合。当三氟苯嘧啶与呋虫胺按质量比1:3.99混配,对褐飞虱3龄若虫的共毒系数可达219;三氟苯嘧啶与噻虫嗪按质量比1:3.33混配,共毒系数达到178;三氟苯嘧啶与烯啶虫胺按质量比为1:7.83混配,共毒系数可达138。在广州市增城区开展的田间药效试验结果表明,三氟苯嘧啶分别与3种杀虫剂混用,对稻飞虱的防效与4种杀虫剂单独使用相比,在维持原有防效的基础上,混配组合的使用量显著下降,且对水稻生长无不良影响。使用三氟苯嘧啶与新烟碱类农药组合防治害虫,既能延缓害虫对三氟苯嘧啶和新烟碱类杀虫剂的抗性发展,又能保障对害虫的防治效果,节约了用药成本,减轻了对环境的污染,对农业的可持续性发展和环境生态保护有着重要意义。

参考文献

[1] QIN Y, XU P F, JIN R H, et al. Resistance of *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae) to triflumezopyrim: inheritance and fitness costs[J]. Pest Management Science, 2021, 77(12): 5566-5575.

[2] BORDEY A, FELTZ P, TROUSLARD J. Nicotinic actions on neurones of the central autonomic area in rat spinal cord slices[J].

The Journal of Physiology, 1996, 497: 87-175.

[3] TOMIZAWA M, CASIDA J E. Molecular recognition of neonicotinoid insecticides: the determinants of life or death[J]. Accounts of Chemical Research, 2009, 42(2): 260-269.

[4] WATSON G B, LOSO M R, BABCOCK J M, et al. Novel nicotinic action of the sulfoximine insecticide sulfoxaflor[J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2011, 41(7): 432-439.

[5] LIU Z W, WILLIAMSON M S, LANSDELL S J, et al. A nicotinic acetylcholine receptor mutation conferring target-site resistance to imidacloprid in *Nilaparvata lugens* (brown planthopper)[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102(24): 8420-8425.

[6] CHEN L, WANG X G, ZHANG Y Z, et al. The population growth, development and metabolic enzymes of the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) under the sublethal dose of triflumezopyrim[J]. Chemosphere, 2020: 247125865.

[7] 徐鹏飞. 褐飞虱对三氟苯嘧啶的早期抗性进化机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.

[8] CORDOVA D, BENNER E A, SCHROEDER M E, et al. Mode of action of triflumezopyrim: a novel mesoionic insecticide which inhibits the nicotinic acetylcholine receptor[J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2016, 7432-7441.

[9] 费程程. 含硫醚结构N-苯基吡唑类衍生物的合成与生物活性评价[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.

[10] 倪廷萍. 褐飞虱室内活性测定法的优化与应用[J]. 农药科学与管理, 2007, 28(8): 36-41.

[11] ZHU J, LI Y, JIANG H, et al. Selective toxicity of the mesoionic insecticide, triflumezopyrim, to rice planthoppers and beneficial arthropods[J]. Ecotoxicology, 2018, 27(4): 411-419.

[12] CASIDA J E. Neonicotinoids and other insect nicotinic receptor competitive modulators: progress and prospects[J]. Annual Review of Entomology, 2018, 63: 125-144.

(编辑:顾林玲)