

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2026.02.006

新型农药溴虫氟苯双酰胺 对重大入侵害虫红棕象甲的灭杀效果

游文庆^{1,2}, 郭家成², 蒲宇辰^{1,2}, 王怡凡²,
郑宗炜^{1,2}, 丁灿辉^{1,2}

1. 福建农林大学 植物保护学院/农林生物安全全国重点实验室, 福州 350002;

2. 闽南师范大学 生物科学与技术学院/闽台特色园林植物福建省高校重点实验室, 福建 漳州 363000

摘要: 红棕象甲(*Rhynchophorus ferrugineus*)是对棕榈科植物产生毁灭性危害的一种重大入侵害虫。目前化学防治仍是该虫的主要防控手段,但传统药剂不可避免地出现了害虫抗药性以及环境污染等一系列问题。溴虫氟苯双酰胺作为一种高效且广谱的新型双酰胺类杀虫剂,对咀嚼式口器类害虫有较好的防控效果。研究评估了溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲3龄幼虫的毒力。在50 mg/L的5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂处理条件下,该虫的死亡率可达100%。采用胃毒法和触杀法测定的致死中浓度(LC₅₀)分别为1.290 mg/L和0.689 mg/L,显著低于毒死蜱、氯氟菊酯等传统药剂,表明其具有更高的杀虫活性。研究结果为红棕象甲的高效防控提供了新的选择,对减少传统农药使用、延缓抗药性发展及降低环境风险具有重要意义。

关键词: 红棕象甲; 毒力; 新型杀虫剂;

溴虫氟苯双酰胺

中图分类号: S436.8; S482.3; TQ453 文献标识码: A

文章编号: 2097-1354(2026)02-0050-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The Control Effect of a Novel Pesticide Broflanilide Against the Major Invasive Pest, *Rhynchophorus ferrugineus*

YOU Wenqing^{1,2}, GUO Jiacheng², PU Yuchen^{1,2},

收稿日期: 2025-09-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32102203); 福建省自然科学基金面上项目(2025J01976, 2021J01994); 福建省林业科技研究项目(2026FKJ25); 闽南师范大学校长基金项目(KJ2020018)。

作者简介: 游文庆, 硕士研究生, 主要从事入侵害虫防控研究。

通信作者: 蒲宇辰, 博士, 副教授。

WANG Yifan², ZHENG Zongwei^{1,2}, DING Canhui^{1,2}

1. State Key Laboratory of Agricultural and Forestry Biosecurity, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Key Laboratory of Landscape Plants with Fujian and Taiwan Characteristics of Fujian Colleges and Universities, School of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou Fujian 363000, China

Abstract: The red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus*, is a significant invasive pest that poses devastating harm to palm family plants. Currently, chemical control remains the primary management strategy for controlling this pest. However, conventional insecticides have inevitably led to a series of issues such as pest resistance and environmental pollution. Broflanilide, a novel bisamide insecticide, exhibits broad-spectrum and high efficacy against chewing pests. This study evaluated the toxicity of broflanilide against third-instar larvae of *Rhynchophorus ferrugineus*. Under the treatment with 5% broflanilide suspension concentrate at 50 mg/L, the mortality rate of insect reached 100%. The median lethal concentration (LC₅₀) values determined by oral ingestion and contact toxicity assays were 1,290 mg/L and 0,689 mg/L, respectively, which were significantly lower than those of traditional insecticides such as chlorpyrifos and cypermethrin, indicating broflanilide possessed superior insecticidal activity. These findings provide a new option for the efficient prevention and control of the red palm weevil, which is of great significance for reducing the use of traditional pesticides, delaying the development of resistance, and reducing environmental risks.

Key words: *Rhynchophorus ferrugineus*; toxicity; novel insecticide; broflanilide

红棕象甲(*Rhynchophorus ferrugineus*)隶属于鞘翅目(Coleoptera)象甲科(Curculionidae)棕榈象属(*Rhynchophorus*)昆虫,是我国重要的林业检疫性有害生物,常见于海南、广东、广西、云南、福建和台湾等地,主要以椰子(*Cocos nucifera*)、油棕(*Elaeis guineensis*)、加拿利海枣(*Phoenix canariensis*)等棕榈科植物为食^[1]。该虫为钻蛀性群居害虫,幼虫蛀食寄主植物的茎干及生长点柔软组织,形成隧道而阻断养分运输,致受害组织坏死腐烂、植物活力下降并散发特殊气味;危害初期无症状,发现时茎干多已蛀空,植株难以挽救^[2]。全球持续的气候变化进一步增强了该虫的入侵能力,导致其逐步扩散至其他地区^[3]。据估计,仅因根除严重感染的棕榈树,当红棕象甲的侵染率分别为1%和5%时,每年便会造成5.18万~25.92万美元的损失,这对入侵地的棕榈产业及园林景观构成了严重威胁^[4]。

目前红棕象甲防治以化学药剂为主,氨基甲酸酯、苯基吡唑、新烟碱类药剂多通过树干注射应用^[5-6]。但该虫隐蔽性强、寄主植物高大,化学防效有限,过量用药易引发环境污染、生态破坏、抗药性及害虫再猖獗^[2]。其依赖乙酰胆碱酯酶(acetylcholinesterase, AChE)、谷胱甘肽S-转移酶(glutathione S-transferase, GST)和酯酶(esterase, EST)等解毒酶抵御毒物,也可能是化学防治失败的主因^[7-8]。已有研究证实,该虫田间种群对毒死蜱、吡虫啉、高效氯氟氰菊酯等多种化学杀虫剂产生高抗药性,吡虫啉7代选择后抗性倍数达1 883倍^[6, 9]。因此,研究和开发更加高效且对环境友好的新型杀虫剂对于防治该虫有着重要的实践意义。

双酰胺类杀虫剂是一类以芳香环为核心,在芳香环的2个不同位点分别连接一个酰胺键的活性分子^[10]。第一个登记的代表品种是日本农药株式会社研发的氟苯虫酰胺(亦称氟虫双酰胺,英文名 flubendiamide,实验代号 NNI-0001)^[11-12]。此类杀虫剂作用靶标新颖,为昆虫鱼尼丁受体(ryanodine receptor, RyR),具有优良的胃毒作用兼一定的触杀活性,对鳞翅目害虫有

很好的防治效果,对卵和幼虫作用效果极佳,对作物药害风险小,且使用剂量低^[13]。此外,由于昆虫与其他生物间鱼尼丁受体存在差异,双酰胺类杀虫剂具有优异的选择毒性,对哺乳动物、鸟类、蜜蜂、鱼类低毒,与传统的杀虫剂无交互抗性^[14-15]。溴虫氟苯双酰胺(broflanilide)作为一种新型杀虫剂,在昆虫体内代谢为去甲基溴苯胺,后者是昆虫神经系统中 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)受体的非竞争性拮抗剂,可抑制氯离子通道,阻断氯离子向神经细胞内的传递,进而引发昆虫过度兴奋与抽搐,最终导致死亡^[16]。该药剂于2020年推出,用于防控卫生及农业害虫。

溴虫氟苯双酰胺在虫害防治中的应用研究主要聚焦于鳞翅目和鞘翅目害虫。该药剂对黄曲条跳甲(*Phyllotreta striolata*)^[16]、小猿叶甲(*Phaedon brassicae*)^[17]、烟粉虱(*Bemisia tabaci*)^[18]、番茄潜叶蛾(*Tuta absoluta*)^[19]、小菜蛾(*Plutella xylostella*)^[20]、菜青虫(*Artogeia rapae*)^[21]、二化螟(*Chilo suppressalis*)^[22]、稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis patnalis*)^[22]等多种害虫均存在较强的毒杀作用。其中,溴虫氟苯双酰胺对二化螟和稻纵卷叶螟的室内毒力分别是氟苯虫酰胺的1.49倍和1.61倍,且大田防效也高于氟苯虫酰胺,说明该药剂在水稻上有较好的应用潜力^[22-23]。溴虫氟苯双酰胺作为双酰胺类杀虫剂,其对人畜的毒性较低,对环境较友好^[12]。然而,关于溴虫氟苯双酰胺对重大入侵害虫红棕象甲的毒力效应尚未明确。鉴于此,探究溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲幼虫的室内杀虫效果,可为红棕象甲防治提供一种新型、环境友好的化学防治候选药剂。

本研究通过室内测定试验,探究了不同浓度溴虫氟苯双酰胺及不同施用方式对红棕象甲3龄幼虫的杀虫效果,结果表明该药剂对重大入侵害虫红棕象甲同样具有显著的防治效果。这一发现有望为红棕象甲新型杀虫剂的研发与应用拓宽途径。

1 材料与方法

1.1 虫源的采集与饲养

红棕象甲成虫采自福建省漳州市芗城区江滨公园(24.51° N, 117.66° E),通过安装于棕榈科植物上的6层漏斗形诱捕器进行采集。诱捕器距地面约1 m,诱芯更换周期为50~60 d。诱捕器与诱芯均购自漳州市英格尔农业科技有限公司。将野外诱集的红棕象甲成虫带回实验室后,经雌雄配对置于330 mL的玻璃组培瓶中,以甘蔗(*Saccharum officinarum*)为食物进行饲养,每7 d更换一次新鲜的甘蔗。卵粒转移至直径为90 mm、预先铺有湿润脱脂棉的培养皿中,待其孵化。孵化后的幼虫单头转移至直径为60 mm的培养皿中,以甘蔗为食物进行饲养;待幼虫发育至5龄后,转移至直径为90 mm培养皿中继续单头饲养,直至化蛹并羽化为成虫。红棕象甲种群及试验昆虫均饲养于可精确控温、控湿的智能人工气候培养箱中,饲养条件:温度(27±1)℃,相对湿度(75±5)%;光照条件上,成虫光照周期L:D=12 h:12 h,其余虫态均置于全黑暗环境中培养。

1.2 供试药剂

本试验的供试药剂为5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂(商品名:爱利可多;农药登记证号:PD20210874;登记证持有人:日本三井化学AGRO株式会社;生产商:江苏龙灯化学有限公司;包装规格:10 mL/包)。

1.3 胃毒法测定溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲的毒力

依据预实验结果确定供试药剂的浓度范围后,采用梯度稀释法,以去离子水将5%溴虫氟苯双酰胺原液稀释成8个浓度梯度(50、5、4、2.5、1、0.5、0.05、0.005 mg/L),分别装入100 mL广口瓶中备用;同时取等量去离子水加入100 mL广口瓶中,作为对照组。将新鲜甘蔗切成3 cm长的薄片,浸泡于上述不同浓度的药液中,1 min后用镊子取出,在室内晾干至表面无游离水后,再转移至直径为60 mm的培养皿中,每皿单头接入经4 h饥饿处理的红棕象甲3龄幼虫。每个浓度梯度处理10头幼虫,对照组以去离子水进行相同处理,各处理及对照组均重复3次。将药剂处理后的试虫置于智能人工气候箱中饲养,培养条件为温度(27±1)℃、相对湿度(75±5)%、光周期为24 h黑暗(D)。每24 h观察并统计试虫的死亡情况,连续观察72 h,以虫体发黑、缩小及毛笔轻触无反应作为死亡判定标准。数据统计后,计算红棕象甲在胃毒处理下的死亡率和校正死亡率,并进行毒力回归分析。

1.4 触杀法测定溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲的毒力

参照1.3中的方法配制5%溴虫氟苯双酰胺的梯度稀释液,所用的浓度为50、5、4、2.5、1、0.5、0.05、0.005 mg/L。用移液器吸取100 μL配制的稀释液,采用点滴法均匀滴加至红棕象甲3龄幼虫表皮,确保幼虫表皮与药剂充分接触;随后让幼虫在干燥的纸面上自由爬行以去除多余的水分,再将试虫单头转移至直径为60 mm的培养皿中,同时提供3 cm长的新鲜甘蔗块供其取食。每个浓度梯度处理10头幼虫,以滴加100 μL去离子水至虫体表皮的试虫作为对照组,各处理及对照组均重复3次。将药剂处理后的试虫置于智能人工气候箱中饲养,培养条件为温度(27±1)℃、相对湿度(75±5)%、光周期为24 h黑暗(D)。每24 h观察并统计试虫的死亡情况,连续观察72 h,以虫体发黑、缩小及毛笔轻触无反应作为死亡判定标准。数据统计后,计算红棕象甲在触杀处理下的死亡率和校正死亡率,并进行毒力回归分析。

1.5 数据统计分析

溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲3龄幼虫的死亡率和校正死亡率的计算公式如下:

$$\text{死亡率} = \frac{\text{处理后试虫死亡数}}{\text{处理前试虫总数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{校正死亡率} = \frac{\text{药剂处理死亡率} - \text{对照组死亡率}}{1 - \text{对照组死亡率}} \times 100\% \quad (2)$$

不同浓度药剂处理后的试虫的死亡率和校正死亡率之间的差异性比较采用卡方(χ^2)检验(chi-square test)分析进行,多重比较选择Duncan's新复极差法,统计分析均在SPSS 27.0软件中完成,数据以“平均值±标准误(SE)”表示。同时,统计不同浓度溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲三龄幼虫的校正死亡率为10%~90%的数据,采用SPSS 27.0软件的Probit过程求出溴虫氟苯双酰胺对该虫的毒力回归方程、致死中浓度(LC₅₀)以及95%置信区间等毒理学参数。

2 结果与分析

2.1 溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲的胃毒效果

采用胃毒法对红棕象甲3龄幼虫进行溴虫氟苯双酰胺处理后,其虫体颜色随着处理时间的增加转为棕褐色,活动能力逐渐减弱,最终死亡(图1)。动态监测结果显示,试虫的存活数量随溴虫氟苯双酰胺浓度升高及处理时间增加而呈下降趋势(图2)。由表1可知,红棕象甲3龄

幼虫经不同浓度药剂胃毒处理 72 h 后, 个体的校正死亡率存在显著性差异 ($\chi^2 = 5\ 400$, $df = 48$, $p < 0.01$)。其中, 50 mg/L 处理组校正死亡率最高达 100%, 而 0.05 mg/L 及以下浓度处理组校正死亡率均为 0。时间效应分析显示, 5 mg/L 处理组 24 h 累计存活数量为 26 头, 48 h 降至 14 头, 72 h 降至 5 头, 表明胃毒作用存在明显的时间累积效应(图 2)。

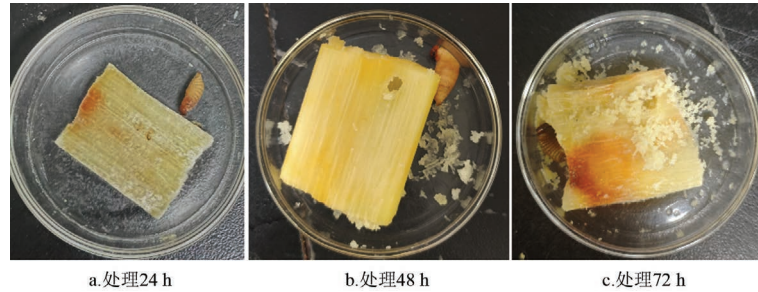


图 1 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对红棕象甲幼虫的致死症状(胃毒法)

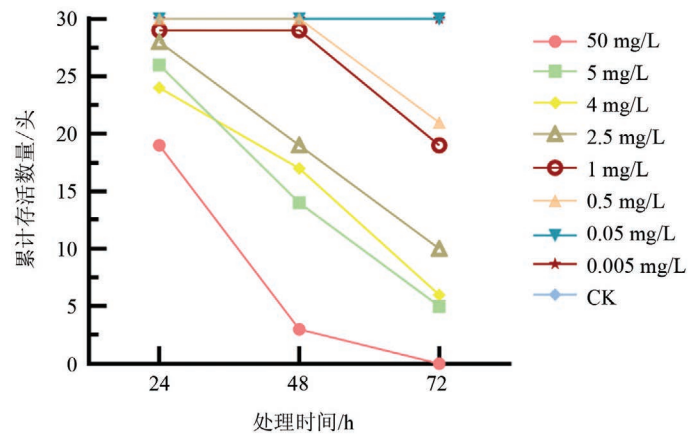


图 2 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂梯度液处理后红棕象甲幼虫的累计存活数量(胃毒法)

表 1 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂梯度液对红棕象甲幼虫胃毒处理 72 h 后的效果

药剂浓度/(mg · L ⁻¹)	死亡率/%	校正死亡率/%
0(去离子水)	0.00±0.00 g	—
0.005	0.00±0.00 g	0.00±0.00 g
0.05	0.00±0.00 g	0.00±0.00 g
0.5	30.00±0.00 f	30.00±0.00 f
1	36.67±3.33 e	36.67±3.33 e
2.5	66.67±3.33 d	66.67±3.33 d
4	80.00±5.77 c	80.00±5.77 c
5	83.33±3.33 b	83.33±3.33 b
50	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a

表中数据为“平均值±标准误”, 不同小写字母表示不同浓度之间存在显著性差异($p < 0.05$)。

胃毒法试验结果的毒力回归分析显示,5%溴虫氟苯双酰胺的给药浓度对数值与供试幼虫的死亡率值呈正线性相关。由表2可知,胃毒法处理红棕象甲3龄幼虫时,5%溴虫氟苯双酰胺的毒力回归方程为 $y=2.604x-0.288$, LC_{50} 为1.290 mg/L。

表2 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对红棕象甲幼虫胃毒处理72 h后的毒力回归分析

虫态	毒力回归方程	$LC_{50}/(mg \cdot L^{-1})$ (95%置信区间)	卡方值(χ^2)	自由度(df)
3龄幼虫	$y=2.604x-0.288$	1.290(1.050~1.542)	2.955	3

2.2 溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲的触杀效果

采用触杀法对红棕象甲3龄幼虫进行溴虫氟苯双酰胺处理后,其虫体颜色随着处理时间的增加转为黄褐色,抽搐后死亡(图3)。动态监测结果显示,试虫的存活数量也随溴虫氟苯双酰胺浓度升高及处理时间增加而呈下降趋势,但该下降趋势较胃毒法更显著(图4)。由表3可知,红棕象甲3龄幼虫经不同浓度药剂触杀处理72 h后,个体的校正死亡率存在显著性差异($\chi^2=4200$, $df=36$, $p<0.001$)。其中,50 mg/L处理组校正死亡率最高达100%,仅0.005 mg/L处理组无死亡。从时间动态来看,5 mg/L处理组24 h累计存活数量为17头,48 h降至8头,其上升速度显著快于胃毒法同期水平,表明触杀作用起效更快(图4)。

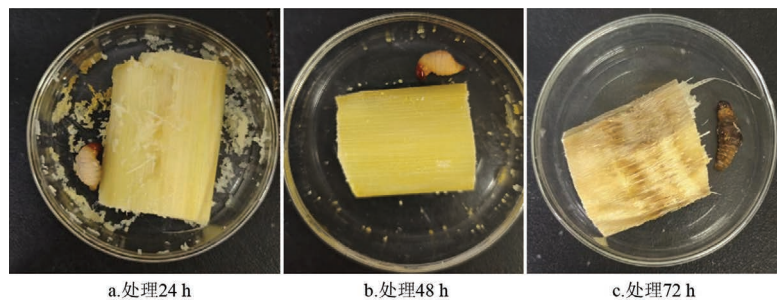


图3 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对红棕象甲幼虫的致死症状(触杀法)

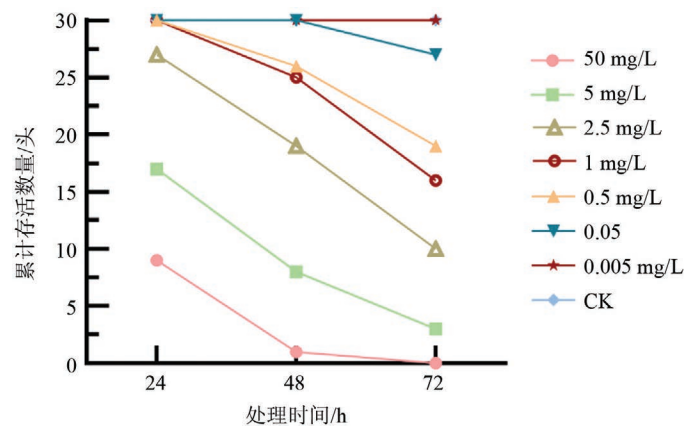


图4 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂梯度液处理后红棕象甲幼虫的累计存活数量(触杀法)

表3 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂梯度液对红棕象甲幼虫触杀处理72 h后的效果

药剂浓度/(mg·L ⁻¹)	死亡率/%	校正死亡率/%
0(去离子水)	0.00±0.00 g	—
0.005	0.00±0.00 g	0.00±0.00 g
0.05	10.00±5.77 f	10.00±5.77 f
0.5	36.66±3.33 e	36.66±3.33 e
1	46.67±3.33 d	46.67±3.33 d
2.5	66.67±3.33 c	66.67±3.33 c
5	90.00±5.77 b	90.00±5.77 b
50	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a

表中数据为“平均值±标准误”，不同小写字母表示不同浓度之间存在显著性差异($p < 0.05$)。

触杀法试验结果的毒力回归分析显示,5%溴虫氟苯双酰胺的给药浓度对数值与供试幼虫的死亡率值呈正线性相关。由表4可知,触杀法处理红棕象甲3龄幼虫时,5%溴虫氟苯双酰胺的毒力回归方程为 $y = 2.218x + 0.359$, LC_{50} 为0.689 mg/L。

表4 5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对红棕象甲幼虫触杀处理72 h后的毒力回归分析

虫态	毒力回归方程	LC_{50} /(mg·L ⁻¹)(95%置信区间)	卡方值(χ^2)	自由度(df)
3龄幼虫	$y = 2.218x + 0.359$	0.689(0.538~0.860)	3.155	3

2.3 溴虫氟苯双酰胺通过胃毒法与触杀法对红棕象甲的灭杀效果比较

当自由度 $df = 3$ 时,查 χ^2 分布表得 $\chi_{0.05}^2 = 7.815$,而胃毒法和触杀法处理的 χ^2 值分别为2.955(表2)和3.155(表4),均小于7.815,差异不显著,表明两种施药方法的毒力回归方程均有效且符合实际情况。

表1和表3数据显示,无论是胃毒法还是触杀法,5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对红棕象甲3龄幼虫均具有良好的毒杀效果,最高致死率均达100%。由表2和表4可知,触杀法的 LC_{50} (0.689 mg/L)低于胃毒法(1.290 mg/L),表明药剂经体壁接触的杀虫活性更高;触杀法的毒力回归方程斜率(2.218)低于胃毒法(2.604),说明胃毒作用对浓度变化更敏感;触杀法处理24 h的死亡率普遍高于胃毒法处理,表明触杀作用起效更快。

3 结论与讨论

近年来,红棕象甲对入侵地的棕榈产业及园林景观造成严重危害,其防治仍以化学手段为主。本研究通过胃毒法与触杀法,测定了5%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对红棕象甲3龄幼虫的室内毒力,结果表明,该药剂对幼虫具有显著致死作用,在50 mg/L高浓度下,两种施药方式的校正死亡率均达100%。毒力回归分析显示,触杀法的 LC_{50} 为0.689 mg/L,而胃毒法的 LC_{50} 为1.290 mg/L,触杀毒力显著高于胃毒作用。触杀处理组24 h内的幼虫死亡率显著上升,而胃毒处理组的死亡高峰出现在24~48 h,这种差异可能与药剂的吸收途径相关^[24]。

溴虫氟苯双酰胺作为一种新型杀虫剂,可有效防治多种农林害虫。已有研究显示,96%溴虫氟苯双酰胺及其100 g/L制剂对草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)3龄幼虫的 LC_{50} 分别

为 12.07 mg/L 与 0.286 mg/L^[15, 25-26]; 10% 溴虫氟苯双酰胺制剂对西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*)的 LC_{50} 为 51.703 mg/L^[27]; 100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对番茄潜叶蛾卵的 LC_{50} 为 65.79 mg/L^[28]; 而 10% 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对烟粉虱卵和成虫的毒力则更低, LC_{50} 分别为 959.168 mg/L 和 2 935.736 mg/L^[18]。相较于对上述害虫的毒力, 5% 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对红棕象甲 3 龄幼虫表现出更强的毒杀作用。

与传统杀虫剂相比, 溴虫氟苯双酰胺在红棕象甲防治中展现出显著优势。魏娟^[29]采用触杀法测定 4 种常用的高效药剂对红棕象甲 3 龄幼虫的毒力, 结果显示: 3% 啶虫脒 3 600 倍稀释液处理 7 d 后试虫死亡率达 70%, 其 LC_{50} 为 6.131 8 mg/kg; 其次为高效氯氰菊酯, LC_{50} 为 15.995 0 mg/kg; 效果最差的是 80% 敌敌畏, LC_{50} 为 337.329 9 mg/kg。上述药剂的 LC_{50} 值均高于本研究中触杀法测得的数值, 进一步表明溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲具有显著的毒杀效果。

溴虫氟苯双酰胺的作用靶点属于 GABA 门控氯离子通道负变构调节剂, 作用机制独特, 有助于延缓害虫抗药性^[30]。例如, 棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)对拟除虫菊酯类药物的抗性很强, 但对二酰胺类药物和溴苯胺类药物的交叉抗性可以忽略不计^[31-32]。与仅作用于单一靶点的杀虫剂相比, 溴虫氟苯双酰胺可能存在多靶点作用的潜力。研究发现, 该药剂不仅对斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*)的神经系统发挥作用, 影响其取食、生长等行为, 还可对其生殖系统产生影响^[33]。此外, 溴虫氟苯双酰胺与市场现有产品无交叉抗性^[32, 34], 这意味着其应用不会因交互抗性而失效。因此, 基于溴虫氟苯双酰胺独特的作用机制及在延缓抗药性方面的优势, 实际应用中可与其他作用机制不同的杀虫剂进行轮用或混用。研究证实, 溴虫氟苯双酰胺与毒死蜱混配对草地贪夜蛾具有良好的触杀效果, 当二者复配比例为 2:8 时, 表现出显著增效作用, 其杀虫效果显著高于各单一药剂处理^[26]。此外, 化学药剂与生物农药的联合防治也取得了一定成效, 例如, 博落回生物碱与苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)按“3 989.60 mg/L+54.98 mg/L”混配时, 可提高对小菜蛾的毒杀效果^[35]。

红棕象甲作为钻蛀类害虫, 因其隐蔽的生活习性, 往往难以在虫害爆发前实施有效防控, 尤其当寄主为高大的棕榈植物时, 更不利于对害虫进行有效遏制^[36]。然而, 本研究中溴虫氟苯双酰胺对红棕象甲幼虫的毒杀作用测定均在严格控制的实验室条件下完成, 且试验仅针对 3 龄幼虫进行了毒力测定, 未能全面评估该药剂对其他虫态及发育阶段的防治效果, 由于条件受限也暂缺乏田间实际应用效果的验证数据, 尤其未考察在高大棕榈植物等复杂环境中药剂的渗透性与持效性。因此, 后续研究需进一步开展该药剂的田间试验, 并同步评估其对非靶标生物的安全性, 探讨其作为红棕象甲潜在防治药剂的可行性, 以期为该虫的化学防治提供新的技术选择。

参考文献:

- [1] 阚金涛, 陈梦冉, 张玉锋, 等. 红棕象甲幼虫的基本营养成分与抗氧化活性分析[J]. 热带农业科学, 2024, 44(4): 65-72.
- [2] 蒲宇辰. 红棕象甲体外免疫效能及其与体内免疫权衡的生理调控[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- [3] FIABOE K K M, PETERSON A T, KAIRO M T K, et al. Predicting the Potential Worldwide Distribution of the Red Palm Weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) Using Ecological Niche Modeling[J]. The Florida Entomologist, 2012, 95(3): 659-673.
- [4] EL-SABEA A M R, FALEIRO J R, ABO-EL-SAAD M M. The Threat of Red Palm Weevil *Rhynchophorus*

- ferrugineus* to Date Plantations of the Gulf Region in the Middle-East: an Economic Perspective[J]. *Outlooks on Pest Management*, 2009, 20(3): 131-134.
- [5] 马兵. 基于多组学的红棕象甲抵御不同病原菌侵染的免疫应答机理解析[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- [6] 蒲宇辰, 游文庆, 陈娟, 等. 一株对红棕象甲卵有生物活性的病原细菌的分离和鉴定[J]. *植物医学*, 2025, 4(3): 22-33.
- [7] BILAL M, FREED S, ASHRAF M Z, et al. Resistance and Detoxification Enzyme Activities to Bifenthrin in *Oxycarenus hyalinipennis* (Hemiptera: Lygaeidae)[J]. *Crop Protection*, 2018, 111: 17-22.
- [8] GAO C F, MA S Z, SHAN C H, et al. Thiamethoxam Resistance Selected in the Western Flower Thrips *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae): Cross-Resistance Patterns, Possible Biochemical Mechanisms and Fitness Costs Analysis[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2014, 114: 90-96.
- [9] AHMED R, FREED S. Biochemical Resistance Mechanisms Against Chlorpyrifos, Imidacloprid and Lambda-Cyhalothrin in *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae)[J]. *Crop Protection*, 2021, 143: 105568.
- [10] Du J, Fu Y. Diamide Insecticides Targeting Insect Ryanodine Receptors: Mechanism and Application Prospect [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2023, 670: 19-26.
- [11] TOHNISHI M, NISHIMATSU T, MOTOBA K, et al. Development of a Novel Insecticide, Flubendiamide[J]. *Journal of Pesticide Science*, 2010, 35(4): 490-491.
- [12] KATSUTA H, NOMURA M, WAKITA T, et al. Discovery of Broflanilide, a Novel Insecticide[J]. *Journal of Pesticide Science*, 2019, 44(2): 120-128.
- [13] 赵平, 严秋旭, 李新, 等. 双酰胺类杀虫剂的现状与展望[J]. *农药科学与管理*, 2015, 36(11): 23-29.
- [14] 陈琴, 涂红, 邵安琪, 等. 双酰胺类杀虫化合物的研究进展[J]. *精细化工中间体*, 2016, 46(2): 11-16.
- [15] 宁旭. 溴虫氟苯双酰胺对草地贪夜蛾的药效及亚致死效应研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
- [16] 王果红, 刘光华, 熊艺霖, 等. 10%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂防治甘蓝黄曲条跳甲试验[J]. *现代农业科技*, 2021(12): 116-117, 127.
- [17] 施颖红, 唐玉英, 吴珏, 等. 溴虫氟苯双酰胺对上海地区乌塌菜主要害虫的田间药效[J]. *中国植保导刊*, 2025, 45(2): 83-85.
- [18] 王佳旭, 李明亮, 韩叙, 等. 新型杀虫剂溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱不同虫态的毒力与防效[J]. *应用昆虫学报*, 2024, 61(6): 1322-1330.
- [19] 渠成, 冯耀方, 林澳丽, 等. 溴虫氟苯双酰胺对番茄潜叶蛾的室内毒力与田间防效评价[J]. *中国蔬菜*, 2024(11): 114-118.
- [20] 齐浩亮, 崔丽, 王芹芹, 等. 溴虫氟苯双酰胺对小菜蛾的毒力及相关酶活性的影响[J]. *植物保护*, 2017, 43(1): 112-116, 130.
- [21] NAKAO T, BANBA S. Broflanilide: a Meta-Diamide Insecticide with a Novel Mode of Action[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2016, 24(3): 372-377.
- [22] 徐赛. 溴虫氟苯双酰胺对水稻主要害虫的生物活性及其在水稻环境中的残留[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- [23] 吴亚坚, 徐赛, 李保同, 等. 溴虫氟苯双酰胺对水稻主要害虫的毒性及对稻田天敌的影响[J]. *植物保护学报*, 2019, 46(3): 574-581.
- [24] 李怡萍, 刘少凯, 袁向群, 等. 棉铃虫围食膜中 Bt 抗性相关蛋白的分离与鉴定[J]. *植物保护*, 2023, 49(1): 132-138.
- [25] LV S L, SHI Y, ZHANG J C, et al. Detection of Ryanodine Receptor Target-Site Mutations in Diamide Insecticide-Resistant *Spodoptera frugiperda* in China[J]. *Insect Science*, 2021, 28(3): 639-648.
- [26] 李尚轩. 防治草地贪夜蛾溴虫氟苯双酰胺与毒死蜱的增效复配研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [27] 钱康华, 袁江江, 王京, 等. 10 种杀虫剂对 4 种蓟马的毒力及对西花蓟马的田间药效评价[J]. *植物保护*,

- 2023, 49(6): 343-349.
- [28] 明飞辰, 胡守印, 王克, 等. 不同药剂对番茄潜叶蛾幼虫和卵的毒力及防效研究[J/OL]. 环境昆虫学报[2025-06-10]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1640.Q.20250609.1730.006>.
- [29] 魏娟. 红棕象甲防控技术初步研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
- [30] 宋璐璐, 艾大朋, 巨修练, 等. 新型双酰胺类杀虫剂——溴虫氟苯双酰胺[J]. 农药学学报, 2022, 24(4): 671-681.
- [31] ZHANG R M, DONG J F, CHEN J H, et al. The Sublethal Effects of Chlorantraniliprole on *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(3): 457-466.
- [32] AHMAD S, MUZAMMIL K, SIDDIQUI S, et al. Re-Evaluation of Recommended Insecticides for Resistance Development, Cross-Resistance Pattern, and Underlying Mechanisms in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Ecotoxicology, 2025, 34(9): 1753-1767.
- [33] 沈宁. 新型杀虫剂(溴虫氟苯双酰胺)和 LDH-dsRNA 对农业害虫的生物活性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- [34] LI Ke, ZHANG C, REN YT, et al. Risk Assessment of Broflanilide Resistance in *Panonychus citri* (McGregor): Cross-Resistance, Inheritance and Relative Fitness[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2025, 208: 106256.
- [35] 谷清义, 聂淑君, 马润红, 等. 博落回生物碱与 Bt 复配对小菜蛾的毒力增效作用[J]. 长江蔬菜, 2023(2): 25-29.
- [36] 侯有明, 吴祖建, 王长方. 福建生物入侵现状与危害[M]. 见: 谢联辉, 尤民生, 侯有明. 生物入侵——问题与对策. 北京: 科学出版社, 2011, 111-114.

责任编辑 杨光明