

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*

王佳旭^{1,2**} 李明亮² 韩叙^{2,3} 官亚军²
魏书军² 陈敏^{1***} 陈金翠^{2***}

(1. 北京林业大学林业有害生物防治北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市农林科学院植物保护研究所, 北京 100097; 3. 中国农业大学植物保护学院, 北京 100083)

摘要 【目的】明确新型杀虫剂溴虫氟苯双酰胺对不同发育阶段烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的毒力与防治效果。【方法】采用室内浸叶法, 测定溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱卵、若虫和成虫的毒力, 并采用喷雾法进行不同虫态的防治效果试验。【结果】溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱卵和成虫的毒力较低, LC_{50} 分别为 959.168 和 2 935.736 mg/L, 对 1 龄和 2 龄若虫的毒力较高, LC_{50} 分别为 3.212 和 27.602 mg/L。在防效试验中, 溴虫氟苯双酰胺 1 000、2 000 和 3 000 倍液对卵和成虫的防效较差, 对卵的防效低于 9.38%, 对成虫的防效在 2.31%–35.38% 之间, 但对 1 龄若虫有很好的防治效果, 药后 10 d 的防效分别为 92.76%、82.50% 和 70.11%, 14 d 后的防效分别为 93.82%、80.08% 和 72.53%; 溴虫氟苯双酰胺对 2 龄及以上未成熟期混合虫态的防效较差, 1 000、2 000 和 3 000 倍液药后 7 d 的防效分别为 50.54%、36.56% 和 25.49%, 但均高于对照药剂氟啶虫胺胍 2 000 倍液的 14.49%, 药后 14 d 防效分别为 57.74%、48.49% 和 22.26%, 高于 22% 氟啶虫胺胍 2 000 倍液的 18.70%。【结论】溴虫氟苯双酰胺除对烟粉虱低龄若虫有较高活性, 对其他发育阶段的烟粉虱毒力较低。针对烟粉虱不同虫态的药剂敏感性, 可混用氟啶虫胺胍和阿维菌素等药剂进行科学有效的防治。

关键词 烟粉虱; 溴虫氟苯双酰胺; 虫态; 毒力; 防效

Toxicity and control efficacy of the novel insecticide broflanilide on different developmental stages of *Bemisia tabaci*

WANG Jia-Xu^{1,2**} LI Ming-Liang² HAN Xu^{2,3} GONG Ya-Jun²
WEI Shu-Jun² CHEN Min^{1***} CHEN Jin-Cui^{2***}

(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pests Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Institute of Plant Protection, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;
3. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract 【Aim】To evaluate the toxicity and control efficacy of broflanilide, a pesticide with a novel mode of action, for controlling whitefly, *Bemisia tabaci*. 【Methods】We tested the toxicity of broflanilide on *B. tabaci* eggs, nymphs, and adults in the laboratory using a leaf dipping method. Control efficacy experiments were conducted in the greenhouse using a spraying method. 【Results】Our results demonstrate that broflanilide has low toxicity in *B. tabaci* eggs and adults, with LC_{50} values of 959.17 and 2 935.74 mg/L, respectively. In contrast, broflanilide was more toxic to 1st and 2nd instar nymphs, with LC_{50} values of 3.21 and 27.60 mg/L, respectively. Broflanilide exhibited limited control against eggs and adults, with an efficacy of less than 9.38% for eggs, and 2.31% to 35.38% for adults. In contrast, broflanilide displayed high efficiency against 1st instar nymphs in the greenhouse, with a control efficacy of 92.76%, 82.50%, 70.11% and 93.82%, 80.08%, 72.53%, on days 10, 11, 12, 13 and 14 post-treatment, respectively. The control efficacy of broflanilide for immature stages from 2nd instar nymphs to

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2023YFD1401200); 北京市农林科学院资助项目 (JKZX202208)

**第一作者 First author, E-mail: jxwang1999@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: minch@bjfu.edu.cn; chenjincui1314@126.com

收稿日期 Received: 2024-01-11; 接受日期 Accepted: 2024-02-26

pupae was low at 1 000 (50.54%), 2 000 (36.56%), and 3 000 (25.49%) times dilution, but higher than that of sulfoxaflor at 2 000 times dilution (14.49%) after 7 d of treatment. The control efficacy 14 d after treatment was 57.74%, 48.49%, and 22.26%, respectively, higher than the 18.70% of broflanilide. **[Conclusion]** This study demonstrated low broflanilide toxicity in all developmental stages of *B. tabaci* except 1st instar nymphs. Combining broflanilide with sulfoxaflor or avermectin could improve the control efficacy of *B. tabaci* by targeting different developmental stages.

Key words *Bemisia tabaci*; broflanilide; developmental stage; toxicity; control efficacy

烟粉虱 *Bemisia tabaci* 属半翅目 Hemiptera 粉虱科 Aleyrodidae, 是蔬菜和经济作物上的重要害虫, 在全球范围内广泛分布, 主要为害茄科、瓜类和豆类等农作物和花卉 (De Barro *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2021)。烟粉虱以若虫、成虫刺吸植物汁液和分泌蜜露等使植物萎蔫和干枯, 成虫还可传播植物病毒造成作物减产, 甚至绝产 (柳洋, 2015; Rosen *et al.*, 2015; 张吉松等, 2022)。目前生产上施用化学农药是田间防控烟粉虱的主要措施, 尤其在烟粉虱暴发期化学防控是最有效的应急方法 (Zheng *et al.*, 2021)。然而, 烟粉虱世代重叠严重、繁殖速度快且传播范围广, 尤其是田间种群对常用杀虫剂产生了不同程度的抗药性, 加大了防控的难度 (王文璐等, 2023)。目前已发现烟粉虱对有机磷类、新烟碱类、拟除虫菊酯类和抗生素类等多种杀虫剂产生了抗药性 (Xie *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2017; Horowitz *et al.*, 2020; 谈星等, 2021; 王文璐等, 2023)。一些高毒、高残留和高抗药性杀虫剂已经不适应当前绿色农业发展的需求, 亟须寻求高效、低毒且低残留的新型杀虫剂。

烟粉虱发育经历卵、若虫 (1-4 龄) 和成虫不同阶段。成虫多于叶片背部产卵, 1 龄若虫有可以活动的足, 在叶背爬行寻找合适的取食场所后固定取食植物汁液, 2 龄和 3 龄若虫固定叶片背面取食, 4 龄若虫又称为伪蛹期, 此时期的烟粉虱停止进食直至羽化为成虫 (柳洋, 2015)。已有研究发现, 不同发育阶段的烟粉虱对杀虫剂的敏感性存在较大差异 (Xie *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2018)。因此, 在评价药剂对烟粉虱防控效果时, 需要考虑不同发育阶段的药剂敏感性。

溴虫氟苯双酰胺是由日本三井农业化学公

司和巴斯夫共同合作开发的新型双酰胺类杀虫剂, 其间二酰胺结构使其具有广谱、高效和内吸性强等特点, 在农业害虫防治中具有广阔的应用前景 (宋璐璐等, 2022)。该药于 2020 年 12 月 28 日在我国登记上市, 目前有 2 个登记的产品, 靶标害虫为黄曲跳甲 *Phyllotreta striolata*、小菜蛾 *Plutella xylostella*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、瓜绢螟 *Diaphania indica* 和黄瓜上的蓟马。国内外研究发现, 溴虫氟苯双酰胺对等翅目、半翅目、缨翅目、双翅目、鳞翅目和鞘翅目等多种害虫均具有较高活性 (Li *et al.*, 2022; Snetselaar *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023a, 2023b)。例如, 溴虫氟苯双酰胺对花蓟马 *Frankliniella intonsa*、瓜蓟马 *Thrips palmi*、黄胸蓟马 *Thrips hawaiiensis* 和美洲棘蓟马 *Echinothrips americanus* 的 LC_{50} 在 0.513-27.650 mg/L 之间, 均具有较高的毒力 (Chen *et al.*, 2022), 对瓜蚜 *Aphis gossypii* 的 LC_{50} 为 0.200-1.480 mg/L (Li *et al.*, 2022), 对桃蚜 *Myzus persicae* 的 LC_{50} 为 2.541 mg/L (Zhang *et al.*, 2023), 对小菜蛾的 LC_{50} 为 0.042 mg/L (齐浩亮等, 2017)。此外, 溴虫氟苯双酰胺对二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 也具有较高的毒力, 对成螨的 LC_{50} 为 2.062 mg/L, 对卵的 LC_{50} 为 1.015 mg/L (Shen *et al.*, 2021)。综上所述, 溴虫氟苯双酰胺对昆虫纲以及螨类害虫均具有较高的毒力, 因此推测其对烟粉虱可能同样具有较高毒力。然而, 国内外尚未有溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱的毒力报道和登记使用。

本研究在室内条件下, 测定了溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱卵、若虫及成虫的毒力和防治效果, 以明确溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱的防效, 为生产防控中科学合理使用该药剂提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫和药剂

供试烟粉虱种群于 2023 年 12 月 20 日采自北京市海淀区北京市农林科学院院内温室茄子上,参考 Chen 等 (2018) 和褚栋等 (2005),使用分子鉴定的方法对烟粉虱的生物型进行鉴定。选取 8 头烟粉虱成虫,使用 DNeasy Blood & Tissue Kit (Qiagen) 试剂盒单头提取 DNA,使用 PCR 引物 C1-J-2195 (5'-TTGATTTTTTGGTCATCCAGAAGT-3') 和 R-BQ-2819 (5'-CTGAATATCGRCGAGGCATTCC-3') 扩增长度为 620 bp 线粒体 CO I 基因的部分片段。PCR 反应体系为 15 μ L, 含 ddH₂O 8.6 μ L, Buffer 1.5 μ L, dNTP 1.5 μ L, 引物 C1-J-2195 和 R-BQ-2819 各 0.6 μ L, LA Taq 酶 (TaKaRa) 0.2 μ L, DNA 模板 1.5 μ L。反应体系于 94 $^{\circ}$ C 预变性 30 s 后,进行 40 个如下循环: 98 $^{\circ}$ C 变性 10 s, 50 $^{\circ}$ C 退火 50 s, 72 $^{\circ}$ C 延伸 40 s, 循环结束后, 72 $^{\circ}$ C 延伸 10 min。PCR 扩增产物送至生工生物工程 (上海) 股份有限公司使用 ABI 3730xl 测序仪进行测序。通过在 NCBI 中 BLAST 测序结果, 确定供试粉虱的生物型为 Q 型, 即 MED 隐种 *B. tabaci* Mediterranean (De Barro *et al.*, 2011)。

供试药剂为巴斯夫欧洲公司生产的 10% 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂, 科迪华农业科技有限责任公司生产的 22% 氟啶虫胺胍悬浮剂。室内毒力测定药剂配比是在预试验的基础上, 将 10% 溴虫氟苯双酰胺用 0.1% Triton X-100 水溶液按等比配制成 5-6 个系列浓度药液, 其中对卵、1 龄若虫、2 龄若虫和成虫的处理初始浓度分别为 500、12.5、200 和 3 000 mg/L, 以 0.1% Triton X-100 水溶液作为对照, 试验设 4 次重复。防效试验设 5 个处理: 分别为 10% 溴虫氟苯双酰胺 1 000、2 000 和 3 000 倍液, 22% 氟啶虫胺胍 2 000 倍液及清水对照。

1.2 毒力测定

1.2.1 烟粉虱卵和 1 龄若虫毒力测定 采用带虫浸叶法测定卵和 1 龄若虫的毒力。取长有 3-4

片真叶的无虫辣椒苗置于养虫笼中, 接入适量的烟粉虱成虫使其产卵 24 h, 取出辣椒苗并剔除烟粉虱成虫, 选取带有 70-80 粒卵的叶片, 调查每个叶片上卵的数量。将带卵叶片在不同浓度药液中浸 10 s, 取出后用滤纸吸干多余药液, 将处理好的辣椒苗放入温度 (25 $\pm$ 1) $^{\circ}$ C, 相对湿度 60%, 光照 16 L : 8 D 的养虫室中饲养。施药后 5 d, 在蔡司 305 体视显微镜下调查卵的存活情况, 颜色发黄和干瘪视为死亡, 颜色发亮和饱满或孵化为 1 龄若虫视为卵存活 (图 1: A, C), 计算卵的存活率。施药后 8 d, 卵均孵化为 1 龄若虫, 调查 1 龄若虫的存活情况, 不能在叶片上固定或固定后发黄和干瘪视为死亡 (图 1: B, D), 计算 1 龄若虫的死亡率。

1.2.2 烟粉虱 2 龄若虫毒力测定 采用带虫浸叶法测定 2 龄若虫的毒力。待接虫辣椒苗上的烟粉虱发育至 2 龄若虫时, 在显微镜下用毛笔去除未孵化的卵和初孵若虫, 调查每株辣椒苗上的若虫数量后进行浸药。将药剂处理的带有烟粉虱 2 龄若虫的辣椒苗放入养虫室内培养, 待若虫发育至蛹时, 在显微镜下调查若虫死亡情况, 发育至蛹的均为活虫 (图 1: E, G), 虫体干瘪, 颜色变暗褐色记为死虫 (图 1: F, H)。

1.2.3 烟粉虱成虫毒力测定 成虫的毒力以自然混合日龄的成虫为对象采用浸叶法进行测定。将干净、新鲜和无药剂的茄子叶片裁剪为直径 60 mm 的圆形, 将叶片在药液中浸泡 10 s, 取出后自然晾干。在直径 60 mm 和量程 250 mL 烧杯中倒入浓度 2%, 厚度 5 mm 的琼脂, 冷却凝固后, 将叶片正面贴紧琼脂, 边缘用 2% 琼脂封边。每个烧杯接入烟粉虱成虫 40-50 头, 用黑布封口, 将烧杯倒置于养虫室中, 48 h 后观察并记录成虫死亡情况, 用毛笔触碰不活动视为死亡 (图 1: I, J), 统计烟粉虱成虫死亡率。

1.3 防治效果试验

1.3.1 烟粉虱卵和若虫防治效果评价 将温室中长有 3-4 个叶片, 叶片上卵和若虫数量较多的茄子苗移栽至塑料盆, 在显微镜下分别统计叶片上的卵和若虫数量。用分装不同浓度药剂的定量

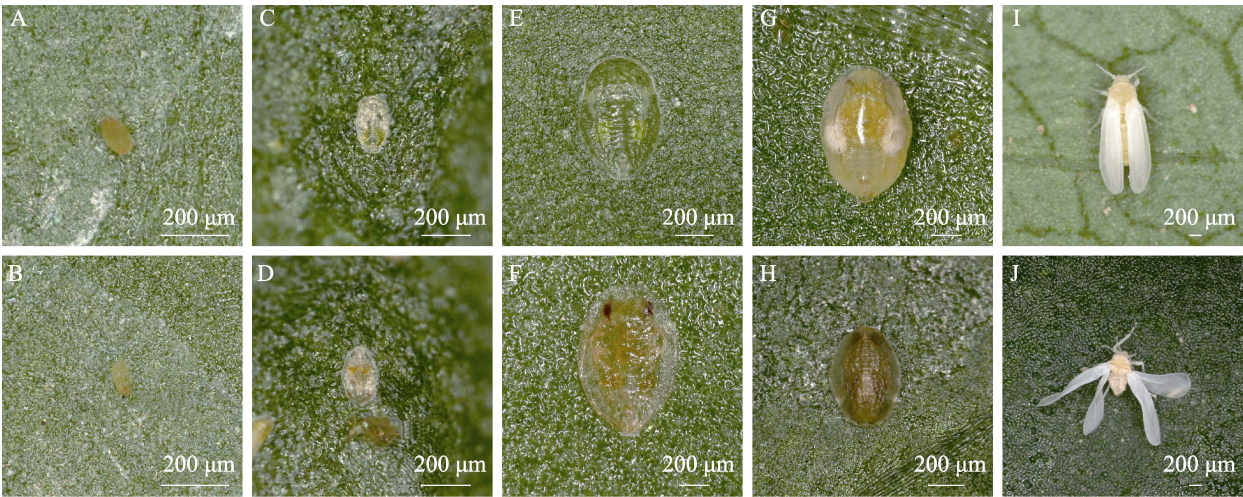


图 1 溴虫氟苯双酰胺处理后不同发育阶段烟粉虱中毒和正常状态
Fig. 1 Poisoning and normal status of *Bemisia tabaci* at different developmental stages after treatment with broflanilide

A. 清水处理 5 d 后存活的卵; B. 500 mg/L 溴虫氟苯双酰胺处理 5 d 后死亡的卵; C. 清水处理 8 d 后存活的 1 龄若虫; D. 12.5 mg/L 溴虫氟苯双酰胺处理 8 d 后死亡的 1 龄若虫; E. 清水处理 3 d 后存活的 4 龄若虫; F. 200 mg/L 溴虫氟苯双酰胺处理 3 d 后死亡的 4 龄若虫; G. 清水处理 8 d 后存活的蛹; H. 200 mg/L 溴虫氟苯双酰胺处理 8 d 后死亡的蛹; I. 清水处理 2 d 后存活的成虫; J. 3 000 mg/L 溴虫氟苯双酰胺处理 2 d 后死亡的成虫。
A. Survived egg after 5 d treatment with water; B. Died egg after 5 d treatment with 500 mg/L broflanilide; C. Survived 1st instar nymph after 8 d treatment with water; D. Died 1st instar nymph after 8 d treatment with 12.5 mg/L broflanilide; E. Survived 4th instar nymph after 3 d treatment with water; F. Died 4th instar nymph after 3 d treatment with 200 mg/L broflanilide; G. Survived pupa after 8 d treatment with water; H. Died pupa after 8 d treatment with 200 mg/L broflanilide; I. Survived adult after 2 d treatment with water; J. Died adult after 2 d treatment with 3 000 mg/L broflanilide.

喷壶对整株茄子苗进行均匀喷雾（压力 30 Pa，喷药量 3 mL/株），自然晾干后，将每株茄苗单独放置在养虫笼中，置于温室环境下。处理后 7、10 和 14 d 按上述方法在显微镜下调查烟粉虱卵和若虫数量（图 1：A-H），并统计死亡率，计算防治效果，试验设 4 次重复。

1.3.2 烟粉虱成虫防治效果评价 选择长有 3-4 片真叶的 2 株无虫辣椒苗放于养虫笼内并置于温室环境下。用吸虫器将 100 头烟粉虱成虫接于每个养虫笼的辣椒苗上，每个药剂浓度下设 3 次重复。接虫 6 h 后，用定量喷壶均匀喷洒药液于整株辣椒苗及养虫笼四周，每个重复喷药量为 10 mL。施药后第 1、3 和 7 天统计烟粉虱成虫存活的数量（图 1：I，J），第 7 天统计叶片上存活卵的数量，计算防治效果。

1.4 数据分析

根据剂量对数和死亡率几率值的直线回归

法,用DPS v20.05软件进行统计分析(Tang *et al.*, 2013)，计算毒力回归方程、LC₅₀ 值、95%置信区间和卡方值等。虫口减退率和防治效果的计算公式为：虫口减退率=（药前活虫数－药后活虫数）/药前活虫数×100%，防治效果=（药剂处理区虫口减退率－空白对照区虫口减退率）/（100－空白对照区虫口减退率）×100%。使用 DPS v20.05 软件中的 Duncan 氏新复极差测验法，对不同处理间的差异显著性进行分析。

2 结果与分析

2.1 毒力测定结果

溴虫氟苯双酰胺对不同虫态烟粉虱的毒力差异较大，对烟粉虱低龄若虫的毒力明显高于对卵和成虫的毒力（*P* < 0.05）（表 1）。溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱卵的毒力测定中，施药 5 d 统计卵的存活情况，LC₅₀ 为 956.168 mg/L，对卵的毒

表 1 10%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对不同虫态烟粉虱的室内毒力测定
Table 1 Toxicity of broflanilide to different developing stages of *Bemisia tabaci*

虫态 Developmental stage	总虫数 Testing number	毒力方程 (y) Toxicity regression equation	卡方值 χ^2	自由度 df	相对毒力 Relative toxicity	致死中浓度 (mg/L) LC ₅₀ (mg/L)	95%置信区间 (mg/L) 95% confidential limits (mg/L)
卵 Eggs	1 546	$y=0.549x+3.362$	5.283	4	298.620	959.168	482.336-2 844.268
1 龄若虫 1st instar nymphs	837	$y=1.739x+4.119$	1.461	3	1.000	3.212	2.691-3.844
2 龄若虫 2nd instar nymphs	388	$y=2.155x+1.895$	4.285	3	8.593	27.602	19.853-39.965
成虫 Adults	668	$y=11.586x-35.177$	1.504	2	913.990	2 935.736	2 690.811-3 512.191

力较低。当第 8 天卵孵化为 1 龄若虫时, 药剂对 1 龄若虫的毒力仍较高, LC₅₀ 为 3.212 mg/L。溴虫氟苯双酰胺对 2 龄若虫的毒力同样较高, LC₅₀ 为 27.602 mg/L, 但对成虫毒力较低, LC₅₀ 为 2 935.736 mg/L。

2.2 防治效果

2.2.1 烟粉虱卵防治效果 10%溴虫氟苯双酰胺 1 000、2 000 和 3 000 倍液的 3 个浓度及 22% 氟啶虫胺胍 2 000 倍液对卵的防治效果均较差, 药后 7 d 防治效果均低于 9.38% (表 2)。施药后 10 和 14 d, 当卵孵化为 1 龄若虫时, 溴虫氟苯

双酰胺 1 000、2 000 和 3 000 倍液在 10 和 14 d 的防效为 70.11%-93.82%, 对照药剂 22% 氟啶虫胺胍 2 000 倍液的防效分别为 14.92% 和 21.85%, 2 种药剂对 1 龄若虫的防治效果存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2.2 烟粉虱若虫防治效果 10%溴虫氟苯双酰胺 1 000、2 000 和 3 000 倍液在药后 7、10 和 14 d 对 2 龄及以上未成熟混合龄期若虫的防效为 22.26%-57.74%, 对照药剂 22% 氟啶虫胺胍 2 000 倍液的防效为 14.49%-20.90% (表 3), 可见溴虫氟苯双酰胺和氟啶虫胺胍对混合龄期的若虫防效均较差。

表 2 10%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对烟粉虱卵和 1 龄若虫的防治效果
Table 2 Control efficacy of broflanilide on eggs and 1st instar nymphs of *Bemisia tabaci*

药剂 Insecticide	稀释 倍数 Dilution ratio	虫口基 数 (头) Base number of <i>B. tabaci</i> (ind.)	药后 7 d 7 d after treatment		药后 10 d 10 d after treatment		药后 14 d 14 d after treatment	
			虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)	虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)	虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	1 000	7 960	15.33	9.38 a	93.25	92.76 a	94.35	93.82 a
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	2 000	6 034	13.16	7.06 a	83.69	82.50 b	81.77	80.08 b
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	3 000	6 278	9.29	2.92 c	72.14	70.11 c	74.86	72.53 c
氟啶虫胺胍 Sulfoxaflor	2 000	12 040	11.84	5.65 b	20.70	14.92 d	28.48	21.85 d
对照 (清水) Control (water)	—	4 420	6.56	—	6.79	—	8.48	—

同列数字后具有相同小写字母表示 0.05 水平差异不显著 (Duncan 氏多重检验法)。下表同。

The data in the table followed by the same lowercase letters indicate no significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's multiple tests. The same below.

表 3 10%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对烟粉虱 2 龄及以上未成熟期混合若虫的防治效果
Table 3 Control efficacy of broflanilide on immature stages from 2nd instar nymphs to pupae of *Bemisia tabaci*

药剂 Insecticide	稀释 倍数 Dilution ratio	虫口基数 (头) Base number of <i>B. tabaci</i> (ind.)	药后 7 d		药后 10 d		药后 14 d	
			7 d after treatment		10 d after treatment		14 d after treatment	
			虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)	虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)	虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	1 000	4 460	53.81	50.54 a	56.50	52.53 a	58.97	54.74 a
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	2 000	6 060	40.76	36.56 b	48.18	43.45 b	53.30	48.49 b
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	3 000	3 320	30.42	25.49 c	34.04	28.01 c	29.52	22.26 c
氟啉虫胺腈 Sulfoxaflor	2 000	4 070	20.15	14.49 d	27.52	20.90 d	26.29	18.70 d
对照 (清水) Control (water)	—	5 140	6.61	—	8.37	—	9.34	—

2.2.3 烟粉虱成虫防治效果 溴虫氟苯双酰胺 1 000、2 000 和 3 000 倍液药后 1、3 和 7 d 的防治效果在 2.31%-35.38%之间, 不同浓度之间差异不显著 ($P > 0.05$) (表 4), 可见溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱成虫的速效性和持效性均较差。对照药剂氟啉虫胺腈 2 000 倍液在药后 1、3 和 7 d 对烟粉虱成虫的防治效果分别为 57.14%、88.06%和 91.15%, 与溴虫氟苯双酰胺存在显著

表 4 10%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂对烟粉虱成虫的防治效果
Table 4 Control efficacy of broflanilide on adult of *Bemisia tabaci*

药剂 Insecticide	稀释倍 数 Dilution ratio	虫口基数 (头) Base number of <i>B. tabaci</i> (ind.)	药后 1 d		药后 3 d		药后 7 d	
			1 d after treatment		3 d after treatment		7 d after treatment	
			虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)	虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)	虫口减退率 (%) Reduction rate (%)	防效 (%) Control efficacy (%)
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	1 000	300	29.67	22.71 b	41.33	34.33 b	44.00	35.38 b
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	2 000	300	18.00	9.89 c	19.67	10.07 c	22.67	10.77 c
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	3 000	300	11.33	2.56 c	14.33	4.10 c	15.33	2.31 d
氟啉虫胺腈 Sulfoxaflor	2 000	300	61.00	57.14 a	89.33	88.06 a	92.33	91.15 a
对照 (清水) Control (water)	—	300	9.00	—	10.67	—	13.33	—

差异 ($P < 0.05$), 可见氟啉虫胺腈对烟粉虱成虫的速效性较差, 但持效性较好。调查施药后 7 d 烟粉虱的产卵量, 以接入的 300 头烟粉虱成虫为基数计算, 空白对照、溴虫氟苯双酰胺 1 000、2 000 和 3 000 倍液及氟啉虫胺腈 2 000 倍液不同处理下平均产卵量分别为 14.93、6.30、10.66、10.98 和 1.52 粒/虫; 以存活的烟粉虱成虫为基数计算, 平均产卵量分别为 17.23、11.26、13.78、12.97 和 19.87 粒/虫 (表 5)。表明 2 种药剂对存活成虫的产卵量均没有显著影响。

表 5 10%溴虫氟苯双酰胺悬浮剂施药的 7 d 后叶片上烟粉虱卵的数量
Table 5 Number of *Bemisia tabaci* eggs on leaves after 7 d of application of broflanilide

药剂 Insecticide	稀释倍数 Dilution ratio	总产卵量(粒/虫) Total number of eggs (grain/insect)	基于虫口基数的平均 产卵量(粒/虫) Average number of eggs based on all adults (grain/insect)	存活成虫平均 产卵量(粒/虫) Average number of eggs based on live adults (grain/insect)
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	1 000	1 891	6.30	11.26
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	2 000	3 197	10.66	13.78
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	3 000	3 294	10.98	12.97
氟啉虫胺腈 Sulfoxaflo	2 000	457	1.52	19.87
对照(清水) Control (water)	—	4 480	14.93	17.23

3 结论与讨论

本研究测定了溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱卵、若虫和成虫的室内毒力及防效,发现溴虫氟苯双酰胺对不同虫态烟粉虱的毒力差异较大,对 1 龄若虫有较高的毒力,但对卵、高龄若虫和成虫的毒力不高。下面将结合烟粉虱的生物学特性、试验方法和溴虫氟苯双酰胺对不同害虫的毒力等方面讨论本研究结果的可靠性及可能存在的问题,分析溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱不同虫态毒力差异的原因,在此基础上提出使用溴虫氟苯双酰胺防控烟粉虱的建议。

研究过程中使用了浸叶法测定了溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱卵、若虫和成虫的毒力,其中卵和若虫使用着虫浸叶的方法进行测定,即将带有卵和若虫的叶片同时浸泡到药液中进行处理,而对成虫则在浸泡过药剂的叶片上接入成虫进行测定,虽然虫态间的测定方法存在差异,在使用喷雾法进行防控效果测定时,仍然发现溴虫氟苯双酰胺对卵和成虫的防控效果较低,表明毒力测定和防控效果试验的结果是一致的。

烟粉虱发育期有卵、1-4 龄若虫和成虫 3 个阶段,前期研究发现不同虫态的烟粉虱对药剂的敏感性差异较大,本研究选取不同虫态烟粉虱进行室内毒力及药效试验。在烟粉虱发育过程中,1 龄若虫处于短期活动状态,不易获取,故本研究采用着卵浸叶法,通过调查卵的孵化率及 1 龄若虫的固定率测定了溴虫氟苯双酰胺对卵和 1

龄若虫的毒力,溴虫氟苯双酰胺对卵的毒力不高,但施药 7 d 后观察 1 龄若虫的固定情况,发现对初孵若虫有较好的防治效果,推测溴虫氟苯双酰胺残效期较长,卵孵化为 1 龄若虫接触叶片或取食汁液后死亡。烟粉虱卵和若虫个体微小,成虫易受到惊扰后飞离叶片,且存在世代重叠,导致在田间难以进行精确计数调查。本研究在测定溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱成虫的防效时,为了便于在显微镜下观察、统计产卵数量,同时防止成虫因惊扰飞走或者其他成虫飞落植株上影响试验结果,故将施药后的植株置于养虫笼中观察。药效试验在温室中开展,进行卵和若虫防效试验时天气骤冷,温室内温度有所下降,导致卵孵化时间延长 3-4 d,对照组死亡率略有提升。由于供试叶片上烟粉虱卵和若虫的数量多,本研究以四分之一叶片上的卵和若虫数量为基数进行调查,可能会造成数据结果偏差。

溴虫氟苯双酰胺是一种作用机制新颖、广谱和高效的双酰胺类新型杀虫剂。其在部分农作物食品中残留量较低,对哺乳动物和水生生物相对安全低毒,且对多种害虫均具有较高杀虫活性(Nakao and Banba, 2016; Katsuta *et al.*, 2019; Jia *et al.*, 2020)。本研究发现溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱 1 龄和 2 龄若虫的 LC_{50} 分别为 3.212 和 27.602 mg/L,相比其他害虫,如花蓟马、瓜蓟马、黄胸蓟马、美洲棘蓟马(LC_{50} = 0.513 – 27.650 mg/L)(Chen *et al.*, 2022)、瓜蚜(0.200-1.480 mg/L)(Li *et al.*, 2022)、桃蚜(2.541 mg/L)

(Zhang *et al.*, 2023) 和小菜蛾 (0.042 mg/L) (齐浩亮等, 2017) 等, 溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱 1-2 龄若虫同样具有较高毒力。本研究采用浸叶法对烟粉虱进行生物测定, 对蓟马的毒力测定则使用喷雾塔 (Chen *et al.*, 2022), 不同的生物测定方法可能导致结果的差异。

本研究虽然发现溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱卵和成虫的毒力较低, 鉴于烟粉虱低龄若虫对该药剂较高的敏感性, 推测不是由稳定遗传的靶标抗性造成的。目前已有研究发现, 烟粉虱不同虫态对同一药剂的敏感性存在差异 (Chen *et al.*, 2018), 然而造成这一现象的原因尚不清楚。推测不同虫态间的药剂敏感性差异可能与不同虫态的取食特点和形态差异等有关, 也可能是由不同虫态的解毒代谢差异导致 (宫亚军等, 2013; 王泽华等, 2014; 陈金翠等, 2022)。一方面是烟粉虱的卵和高龄若虫均有外壳保护, 表皮穿透率的降低可以有效阻挡杀虫剂化学药剂的渗透, 并延缓杀虫剂到达靶标部位的时间, 使烟粉虱卵和高龄若虫有更多的时间代谢药剂, 导致杀虫剂在喷雾时对这些虫态的活性低于无保护外壳且处于活动状态的低龄若虫。另一方面, 溴虫氟苯双酰胺的抗性机制尚未明确, 在田间不科学不合理的用药过程中, 烟粉虱经历药剂筛选, 导致一些虫态解毒代谢酶活力的提高, 使得成虫对溴虫氟苯双酰胺本身产生了一定的解毒代谢抗性。

本研究发现, 溴虫氟苯双酰胺对烟粉虱低龄若虫有较高活性, 但对其他发育阶段的毒力较低。考虑到田间烟粉虱世代重叠的现象, 以及不同虫态对药剂敏感性的差异和溴虫氟苯双酰胺的作用特点, 建议在防治过程中可混用氟啶虫胺腈和阿维菌素等药剂, 以针对性地靶向烟粉虱低龄若虫进行科学有效的防治。

参考文献 (References)

Chen JC, Cao LJ, Ma ZZ, Yuan XX, Gong YJ, Shen XJ, Wei SJ, 2022. Susceptibility of different instar larvae of *Spodoptera frugiperda* to commonly used insecticides. *Guangdong Agricultural Sciences*, 49(8): 81–86. [陈金翠, 曹利军, 马中正, 苑新新, 宫亚军, 沈修婧, 魏书军, 2022. 不同龄期草地贪夜蛾对常用杀虫剂的敏感性. *广东农业科学*, 49(8): 81–86.]

Chen JC, Cao LJ, Sun LN, Gao YF, Cao HQ, Ma ZZ, Ma LJ, Shen XJ, Wang JX, Gong YJ, Hoffmann AA, Wei SJ, 2022. Variation in the toxicity of a novel meta-diamide insecticide, broflanilide, among thrips pest species and developmental stages. *Pest Management Science*, 78(12): 5090–5096.

Chen JC, Wang ZH, Cao LJ, Gong YJ, Hoffmann AA, Wei SJ, 2018. Toxicity of seven insecticides to different developmental stages of the whitefly *Bemisia tabaci* MED (Hemiptera: Aleyrodidae) in multiple field populations of China. *Ecotoxicology*, 27(6): 742–751.

Chu D, Zhang YJ, Cong B, Xu BY, Wu QJ, Zhu GR, 2005. Sequence analysis of mtDNA COI gene and molecular phylogeny of different geographical populations of *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Scientia Agricultura Sinica*, 38(1): 76–85. [褚栋, 张友军, 丛斌, 徐宝云, 吴青君, 朱国仁, 2005. 烟粉虱不同地理种群的 mtDNA COI 基因序列分析及其系统发育. *中国农业科学*, 38(1): 76–85.]

De Barro PJ, Liu SS, Boykin LM, Dinsdale AB, 2011. *Bemisia tabaci*: A statement of species status. *Annual Review of Entomology*, 56: 1–19.

Gong YJ, Wang ZH, Shi BC, Jiang CY, Kang ZJ, Jin GH, Wei SJ, 2013. The sensitivity of two body colour bio-types of the green peach aphid *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) to the pesticides and its correlation to enzyme activity. *Journal of Environmental Entomology*, 35(4): 452–457. [宫亚军, 王泽华, 石宝才, 姜春燕, 康总江, 金桂华, 魏书军, 2013. 两种体色生物型桃蚜对杀虫剂敏感性差异及其与酶活力的关系. *环境昆虫学报*, 35(4): 452–457.]

Horowitz AR, Ghanim M, Roditakis E, Nauen R, Ishaaya I, 2020. Insecticide resistance and its management in *Bemisia tabaci* species. *Journal of Pest Science*, 93(3): 893–910.

Jia ZQ, Zhang YC, Huang QT, Jones AK, Han ZJ, Zhao CQ, 2020. Acute toxicity, bioconcentration, elimination, action mode and detoxification metabolism of broflanilide in zebrafish, *Danio rerio*. *Journal of Hazardous Materials*, 394: 122–125.

Katsuta H, Nomura M, Wakita T, Daido H, Kobayashi Y, Kawahara A, Banba S, 2019. Discovery of broflanilide, a novel insecticide. *Journal of Pesticide Science*, 44(2): 120–128.

Li R, Cheng SH, Chen ZB, Guo TF, Liang PZ, Zhen CA, Wang JH, Zhang L, Liang P, Gao XW, 2022. Establishment of toxicity and susceptibility baseline of broflanilide for *Aphis gossypii* Glove. *Insects*, 13(11): 1033.

Li YP, Mbata GN, Punnuri S, Simmons AM, Shapiro-Ilan DI, 2021. *Bemisia tabaci* on vegetables in the southern United States: Incidence, impact, and management. *Insects*, 12(3): 198.

Liu Y, 2015. Biotype, the ratio of vector-borne diseases and insecticide resistance status of *Bemisia tabaci* populations in China. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [柳洋, 2015. 中国烟粉虱生物型分布、带

- 毒率及抗药性监测. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Nakao T, Banba S, 2016. Broflanilide: A meta-diamide insecticide with a novel mode of action. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 24(3): 372–377.
- Qi HL, Cui L, Wang QQ, Liu F, Rui CH, 2017. Toxicity of broflanilide to *Plutella xylostella* and its influence on the activities of related enzymes in *P. xylostella*. *Plant Protection*, 43(1): 112–116, 130. [齐浩亮, 崔丽, 王芹芹, 刘峰, 芮昌辉, 2017. 溴虫氟苯双酰胺对小菜蛾的毒力及相关酶活性的影响. 植物保护, 43(1): 112–116, 130.]
- Rosen R, Kanakala S, Kliot A, Cathrin Pakkianathan B, Farich BA, Santana-Magal N, Elimelech M, Kontsedalov S, Lebedev G, Cilia M, Ghanim M, 2015. Persistent, circulative transmission of begomoviruses by whitefly vectors. *Current Opinion in Virology*, 15: 1–8.
- Shen N, Li Y, Leviticus K, Chang XL, Tang T, Cui L, Han ZJ, Zhao CQ, 2021. Effect of broflanilide on the phytophagous mite *Tetranychus urticae* and the predatory mite *Typhlodromips swirskii*. *Pest Management Science*, 77(6): 2964–2970.
- Snetselaar J, Rowland MW, Azizi S, Mawa B, Malone DJ, Kirby MJ, 2023. Laboratory evaluation of broflanilide (TENE BENAL™) against *Anopheles gambiae* in Moshi, Tanzania-delayed mortality, cross-resistance, and residual efficacy. *Frontiers in Tropical Diseases*, 4: 1–10.
- Song LL, Ai DP, Ju XL, Liu GY, 2022. A novel diamide insecticide-broflanilide. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 24(4): 671–681. [宋璐璐, 艾大朋, 巨修练, 刘根炎, 2022. 新型双酰胺类杀虫剂——溴虫氟苯双酰胺. 农药学报, 24(4): 671–681.]
- Tan X, Zheng HX, Ji Y, Xie W, Zhang YJ, 2021. Monitoring of resistance in field populations of *Bemisia tabaci* to 5 insecticides in China. *China Vegetables*, 2021(5): 64–69. [谈星, 郑慧新, 季尧, 谢文, 张友军, 2021. 田间烟粉虱种群对 5 种杀虫剂的抗性监测. 中国蔬菜, 2021(5): 64–69.]
- Tang QY, Zhang CX, 2013. Data Processing System (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research. *Insect Science*, 20(2): 254–260.
- Wang K, Che WN, Duan MM, Wang CJ, Li XW, He L, 2023a. Effects of broflanilide on oxidative stress and expression of apoptotic genes in zebrafish (*Danio rerio*) Gill. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 110(5): 91.
- Wang SL, Zhang YJ, Yang X, Xie W, Wu QJ, 2017. Resistance monitoring for eight insecticides on the sweetpotato whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae) in China. *Journal of Economic Entomology*, 110(2): 660–666.
- Wang WL, Liang P, Ning J, Wu MY, Wang SL, Xie W, 2023. Field efficacy evaluation of different insecticides on *Bemisia tabaci* in three greenhouse vegetables. *China Vegetables*, 2023(9): 105–109. [王文璐, 梁鹏, 宁杰, 吴明月, 王少丽, 谢文, 2023. 不同杀虫剂对 3 种设施蔬菜烟粉虱的田间防效评价. 中国蔬菜, 2023(9): 105–109.]
- Wang XL, Shi TL, Tang P, Liu SN, Hou BF, Jiang D, Lu JD, Yang YH, Carrière Y, Wu YD, 2023b. Baseline susceptibility of *Helicoverpa armigera*, *Plutella xylostella*, and *Spodoptera frugiperda* to the meta-diamide insecticide broflanilide. *Insect Science*, 30(4): 1118–1128.
- Wang ZH, Shi BC, Kang ZJ, Zhu L, Jin GH, Wei SJ, Gong YJ, 2014. The sensitivity of different larval instars of the beet armyworm *Spodoptera exigua* to insecticides and correlation with enzyme activity. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 185–193. [王泽华, 石宝才, 康总江, 朱亮, 金桂华, 魏书军, 宫亚军, 2014. 甜菜夜蛾不同龄期幼虫对药剂的敏感性及其与酶活力的关系. 应用昆虫学报, 51(1): 185–193.]
- Xie W, Liu Y, Wang SL, Wu QJ, Pan HP, Yang X, Guo LT, Zhang YJ, 2014. Sensitivity of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) to several new insecticides in China: Effects of insecticide type and whitefly species, strain, and stage. *Journal of Insect Science*, 14: 261.
- Zhang SW, Zeng QH, Yang H, Zhang C, Ding B, Yang HZ, Yang MF, 2023. Sublethal and transgenerational effects of broflanilide on *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae). *Crop Protection*, 174: 389–396.
- Zhang JS, Zhang Z, Zhang DY, Zhang ZH, Liu Y, Shi XB, Zhang YJ, 2022. Transmission characteristics of Tomato chlorosis virus on *Capsicum annuum* by adult *Bemisia tabaci* MEAM1 and MED (Hemiptera: Aleyrodidae). *Acta Entomologica Sinica*, 65(11): 1452–1458. [张吉松, 张卓, 张德咏, 张战泓, 刘勇, 史晓斌, 张友军, 2022. 烟粉虱 MEAM1 和 MED 成虫在辣椒上传播番茄褪绿病毒的特性. 昆虫学报, 65(11): 1452–1458.]
- Zheng HX, Xie W, Fu BL, Xiao S, Tan X, Ji Y, Cheng JX, Wang R, Liu BM, Yang X, Guo ZJ, Wang SL, Wu QJ, Xu BY, Zhou XM, Zhang YJ, 2021. Annual analysis of field-evolved insecticide resistance in *Bemisia tabaci* across China. *Pest Management Science*, 77(6): 2990–3001.
- Zheng HX, Xie W, Wang SL, Wu QJ, Zhou XM, Zhang YJ, 2017. Dynamic monitoring (B versus Q) and further resistance status of Q-type *Bemisia tabaci* in China. *Crop Protection*, 94: 115–122.