

六种药剂对桃粉蚜毒力及刺吸取食行为测定分析*

乔利^{1**} 陈磊¹ 黄楠楠¹ 岳双奇¹
尤伟晨¹ 武予清² 王国君^{1***}

(1. 信阳农林学院, 信阳 464000; 2. 河南省农业科学院植物保护研究所, 郑州 450002)

摘要 【目的】筛选对桃粉蚜 *Myzus persicae* 毒力较好的药剂及复配增效配比, 为其化学防治提供理论依据。【方法】以室内饲养的桃粉蚜成虫为材料, 采用药液浸渍法测定 6 种药剂对桃粉蚜成虫的室内毒力。试验设置 6 个浓度梯度。根据毒力测定结果将氟啶虫酰胺、氟啶虫胺腈 2 种药剂按照 1 : 1、1 : 5、5 : 1、1 : 10 和 10 : 1 的比例进行复配, 对照为清水, 记录 0、2、4、6、12、24、36、48 和 72 h 后桃粉蚜的死亡数, 计算药剂的 LC_{50} 及共毒系数 (Co-toxicity coefficient, CTC)。在各单剂的 6 个浓度梯度处理中, 分别取 5 头成虫置于刺吸电位仪 (Electrical penetration graph, EPG) 下进行取食行为观察。【结果】6 种药剂对桃粉蚜成虫的毒力、药效大小依次为: 氟啶虫胺腈>氟啶虫酰胺>吡虫啉>高效氯氟氰菊酯>双丙环虫酯>噻虫嗪。氟啶虫酰胺和氟啶虫胺腈复配联合毒力结果表明, 混配药效均高于单剂, 且表现出不同程度的增效作用, 其中氟啶虫胺腈 : 氟啶虫酰胺比例为 10 : 1 增效较大, CTC 为 3 832.015。EPG 结果显示, 氟啶虫胺腈 E 波总刺探持续时间最短 (36.16 min), 刺探次数最少 (20.50 次), 噻虫嗪总刺探持续时间最长 (173.82 min), 总刺探次数最多 (48.00 次)。氟啶虫酰胺和氟啶虫胺腈复配比例为 10 : 1 的 E 波总刺探持续时间最短 (41.31 min), 刺探次数最少 (15.50 次), 1 : 10 的总刺探持续时间最长 (105.59 min), 刺探次数最多 (29 次)。综合 EPG 测定数据, 其结果与毒力测定结果相符合。【结论】单剂氟啶虫胺腈的防治效果和氟啶虫酰胺与氟啶虫胺腈复配比例 10 : 1 增效最大, 可在桃粉蚜发生严重时喷施, 为桃粉蚜有效防治提供技术支撑。

关键词 桃粉蚜; 毒力测定; 增效作用; 取食特性

The toxicity of six insecticides to *Myzus persicae* and their impacts on stinging behavior

QIAO Li^{1**} CHEN-Lei¹ HUANG Nan-Nan¹ YUE Shuang-Qi¹
YOU Wei-Chen¹ WU Yu-Qing² WANG Guo-Jun^{1***}

(1. Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China;

2. Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract [Aim] To investigate the toxic efficiency of 6 insecticides against *Myzus persicae*, providing a theoretical basis for its chemical control. [Methods] Adult *M. persicae* were reared indoors and the toxicity of 6 insecticides to adult *M. persicae* was determined using the liquid impregnation method. 6 concentration gradients were established. Based on the toxicity test results, fluosamide and flunitrile were combined in ratios of 1 : 1, 1 : 5, 5 : 1, 1 : 10, 10 : 1. Water was for the control treatment. The LC_{50} and co-toxicity coefficient (CTC) were calculated based on the mortality rate of *M. persicae* at

*资助项目 Supported projects: 河南省重点研发与推广专项 (科技攻关) “基于茶园鳞翅目害虫灯光和生防菌联合防控技术研究” (222102110109); 国家重点研发计划 “新型材料对害虫的诱 (驱) 技术及产品研发” (No.2017YFD0200907)

**第一作者 First author, E-mail: 2017180004@xyafu.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: 2008180045@xyafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-06-05; 接受日期 Accepted: 2024-03-29

0, 2, 4, 6, 12, 24, 36, 48, and 72 h. The electrical penetration graph (EPG) technique was used to monitor the feeding behavior of 5 adult *M. persicae* across the 6 concentration gradient treatments for each of the insecticides. [Results] The findings indicated that the toxicity and efficacy hierarchy of the 6 insecticides against adult *M. persicae* was fluonitrile > fluosamide > pyrazine > high efficiency cypermethrin > dipropyl ester > thiothiazide. The results of the combined toxicity test showed that the efficacy of the combined insecticide mixture was higher compared to the individual insecticides. Additionally, there was variation in the synergistic effect. The ratio of fluonitrile to fluosamide was 1 : 1, with a CTC value of 3 832.015. The EPG results showed that the duration of the fluonitrile E wave was the shortest (36.16 min) and the least frequent (20.50 times). In contrast, the duration of thiothiazide was the longest (173.82 min) and the most the frequent (48.00 times). When the ratio of fluosamide to fluonitrile was 10 : 1, the E wave exhibited the shortest total duration (41.31 min), the least frequent probes (15.50 times), the longest probe duration (105.59 min), and the highest number of probes (29 times). Based on the EPG data, the results were consistent with the toxicity test. [Conclusion] The findings of this study demonstrated the control efficacy of a single dose of fluonitrile combined with fluosamide at a ratio of 10 : 1. This mixture could be applied during severe aphid infestations, providing technical support for the effective control of *M. persicae*.

Key words *Myzus persicae*; toxicity determination; synergistic effect; feeding characteristic

桃粉蚜 *Myzus persicae*, 又名桃赤蚜、烟蚜、菜蚜, 属半翅目 Hemiptera, 蚜科 Aphididae, 寄主植物约 50 科 400 种, 分布于华北、华东、东北各地区, 危害桃、杏、李等果树的新梢和叶 (Bass *et al.*, 2014; 曲春鹤和王彭, 2017; Prince and Chandler, 2020; 闫虹江等, 2021; 韩腾等, 2023), 是果园的主要害虫之一 (Mohammed and Hatcher, 2017; 刘宝生等, 2021)。桃粉蚜不仅以成虫、若虫刺吸汁液为害, 导致被害植株生长速率低、枯萎甚至死亡, 而且还分泌蜜露覆盖植物表面, 影响光合作用 (汤秋玲等, 2016; 胡月等, 2023)。桃粉蚜可传播 115 种植物病毒, 如黄瓜花叶病毒 (Cucumber mosaic virus, CMV)、马铃薯 Y 病毒 (Potato virus Y, PVY) 和烟草蚀纹病毒 (Tobacco etch virus, TEV) 等 (李姝等, 2014; 潘明真等, 2022)。

刺吸电位图谱 (Electrical penetration graph, EPG) 技术是一种用来记录刺吸式口器昆虫在寄主植物上刺探和取食行为的电生理技术, 通过电信号反映昆虫在植物组织中的位置及活动行为 (李静静等, 2019; 刘伟娇, 2022)。昆虫口针与植物接触的状态、刺入的深度、刺入不同组织均可引起昆虫体内电阻的变化, 从而形成一系列波谱, 判断昆虫刺吸行为特征, 进而分析昆虫在不同处理下的取食变化 (薛承美, 2014)。随着 EPG 技术日益成熟, 其应用领域涉及的昆虫种类和内容不断扩大, 主要进行昆虫取食行为、昆虫

传毒机理、筛选不同品种植物对昆虫抗性等方面的研究 (李静静等, 2019)。例如荆裴 (2013) 利用 EPG 研究灰飞虱 *Laodelphax striatellus* 取食过程中的传毒机理, 发现灰飞虱传毒过程发生在取食时分泌唾液阶段、口针在韧皮部探索和持续取食阶段; 祝愿等 (2019) 研究杭菊品种对菊小长管蚜 *Macrosiphoniella sanborni*、棉蚜 *Aphis gossypii* 和桃蚜 *Myzus persicae* 的抗性时发现, 菊蚜取食 E1、E2 波的长短与可溶性糖、可溶性蛋白含量呈正相关, 与总酚含量、总黄酮含量成负相关。于良斌等 (2021) 研究发现, 苜蓿斑蚜 *Therioaphis trifolii* 在不同苜蓿品种上的取食行为各异, 且不同品种的抗虫位点和抗虫机制不同。

化学药剂防治具有见效快、防治彻底等特点, 广泛用于害虫防治。目前未见有关桃粉蚜的药剂防治报道。桃粉蚜繁殖速度快, 危害严重, 需要采用药剂防治, 本研究采用生产上应用较广的 70%吡虫啉、10%氟啶虫酰胺、30%噻虫嗪、22%氟啶虫胺腈、25 g/L 高效氯氟氰菊酯和 50 g/L 双丙环虫脂 6 种单剂, 对其取食行为进行观察。为筛选最佳配置浓度, 各单剂按照 1 : 1、1 : 5、5 : 1、1 : 10 和 10 : 1 的比例进行混配 (邓秉东等, 2022; 张明浩等, 2022)。最佳复配药剂的筛选, 不仅可减轻生产中长期单一用药防效降低的风险, 也可扩大生产用药的选择范围, 提高药剂使用效果。本研究利用刺吸式电位仪

(EPG) 进行数据记录分析, 分析药剂处理后桃粉蚜的取食行为变化(周昊等, 2020; 刘伟娇等, 2022)。该研究为桃粉蚜的防治药剂选择及科学使用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试昆虫 桃粉蚜于 2023 年 6 月 10 日采自河南省信阳市平桥区信阳农林学院桃园内, 在温度 (25 ± 2) °C, 湿度 $60\%\pm 10\%$, 光周期 12 L : 12 D 条件下, 于养虫笼内 (50 cm × 50 cm × 60 cm) 采用桃树新鲜枝叶每天定时更换进行继代饲养。

1.1.2 供试药剂 30%噻虫嗪悬浮剂(江苏剑牌农化股份有限公司)、10%氟啶虫酰胺水分散剂(宁波石原金牛农业科技有限公司)、70%吡虫啉水分散剂(山东省联合农药工业有限公司)、25 g/L 高效氯氟氰菊酯乳油(先正达南通作物保护有限公司)、22%氟啶虫酰胺悬浮剂(科迪华农业科技有限责任公司)、50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂(巴斯夫(中国)有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 不同药剂对桃粉蚜成虫的室内毒力测定 将配置好的 6 个梯度药剂分别放置到 2 000 mL 烧杯内, 用玻璃棒搅拌均匀, 选取 2-3 枝桃枝, 在药剂内浸泡约 10 s, 置于 150 mL 锥形瓶中, 在室温下自然风干, 取 30 头健康的桃粉蚜分别接种到经过药剂处理的桃枝上, 分别记录 0、2、4、6、12、24、36、48 和 72 h 后桃粉蚜的死亡个数。每组试验重复 3 次。

毒力指数=药剂 LC_{50} 最大值/各药剂 LC_{50} 值 × 100。

1.2.2 复配药剂增效配比筛选 从 6 种药剂中选取 2 种药剂进行 1 : 1、1 : 5、5 : 1、1 : 10 和 10 : 1 的比例复配, 每一复配的药剂设 6 个梯度浓度, 按照 1.2.1 节的方法进行毒力测定, 计算 LC_{50} 值和共毒系数 (Co-toxicity coefficient, CTC), 根据联合毒力计算方法得出复配剂的 CTC 大小: CTC 为 80-120, 表现为相加作用;

CTC > 120, 表现为增效作用; CTC < 80, 表现为拮抗作用。共毒系数 (CTC) 计算公式如下:

共毒系数 (CTC) = (A 药剂的 LC_{50} 值 × B 药剂的 LC_{50} 值) / [(混合药剂的 LC_{50} 值 × ($P_A \times B$ 的 LC_{50} 值 + $P_B \times A$ 的 LC_{50} 值))] × 100, 其中, P_A 为单剂 A 在复配剂中的百分比, P_B 为单剂 B 在复配剂中的百分比。

1.2.3 刺吸电位仪的数据记录 取生命特征活泼的虫体, 饥饿处理 1 h, 把蘸有少量水溶性导电银胶粘的金丝 (长 3-4 cm, 直径 15 μm), 粘接于桃粉蚜成虫的前胸背板处, 将粘接好的虫体粘接到铜钉顶端焊接好的铜丝上, 处理好的虫体放置观察 1-3 min, 每次处理桃粉蚜成虫 5 头, 重复 3 次。及时更换未粘接牢固和死亡虫体, 最后将铜钉连接电极, 虫体放置药剂浸泡处理后的桃树叶背面幼嫩部位。在温度 (25 ± 2) °C, 湿度 $60\%\pm 10\%$ 条件下, 连续观察记录 6 h, 采用 Stylet+d 软件记录桃粉蚜的取食行为, 通过软件 Stylet+a 取得各处理的刺探和取食波型。利用 Excel 2021 软件统计各波型出现的次数、每次出现持续的时长、各波型出现总时间占处理时长的百分率。采用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析 (ANOVA), 并用 Duncan 氏多重比较法进行差异显著性检验。

N_p 波: 代表着昆虫处在非取食状态, 因此也被称为非取食波。A 波: 出现于桃粉蚜的口针刚开始刺探植物叶片时, 它出现的频率不太稳定, 范围为 5-15 Hz, 出现幅度较大, 且每次出现的历时较短, 为 5-10 s 左右。此种波型出现在桃粉蚜每次刺探和分泌唾液时, 口针处在植株的表皮部位。C 波: 该类波型与桃粉蚜的刺探和分泌唾液相关, 桃粉蚜的口针位于表皮和韧皮部筛管细胞之间。E 波: 波型较乱, 振幅大, 持续时间相对较短, 一般出现在 C 波之后, 和 C 波界限不明显。而韧皮部取食波形 (E1 和 E2) 比较规律, 振幅小, 持续时间长。E1 波表明唾液分泌, 昆虫分泌唾液一般也与克服韧皮部筛管分子中的抗性因子相关; E2 波表明韧皮部的被动吸食植物汁液过程。长于 10 min 的 E2 波一般认为是蚜虫在韧皮部的持续吸食。F 波: 波型出现时, 表明桃粉蚜在刺吸过程中遇阻力, 虽然它出现时

频率较高为 11-16 Hz, 此时桃粉蚜的口针处在细胞膜外。G 波: 属于胞外波型的一种, G 波的频率相对较低为 4-6 Hz, 此时桃粉蚜的口针位于木质部, 并且为主动取食的状态 (Tjallingii, 1985; Tjallingii and Esch, 1993)。

2 结果与分析

2.1 不同药剂对桃粉蚜成虫的室内毒力

6 种药剂对桃粉蚜成虫的室内毒力显示 (表 1), LC_{50} 值介于 30.23-64.84 mg/L 之间, 48 h 的 LC_{50} 值从小到大依次为氟啶虫胺胍<氟啶虫酰胺<吡虫啉<高效氯氟氰菊酯<双丙环虫酯<噻虫嗪, 其中氟啶虫胺胍的活性最高, LC_{50} 值为 30.23 mg/L。以噻虫嗪 LC_{50} 值为基准, 氟啶虫胺胍的毒力指数由高到低的表现趋势同 LC_{50} 。

2.2 复配药剂增效配比筛选

将毒力较高的氟啶虫胺胍和氟啶虫酰胺按照不同比例进行混合, 测定其联合毒力。结果表明, 氟啶虫胺胍与氟啶虫酰胺不同比例复配时均表现出不同程度的增效作用, 其中 1:1 增效较小, 10:1 增效较大 (表 2)。随着氟啶虫胺胍和氟啶虫酰胺比例的增加, 增效效果逐渐增强。氟啶虫胺胍: 氟啶虫酰胺为 10:1 时, LC_{50} 最小, 表明这一配比下的联合效果最佳, 具有更高的经济合理性。

2.3 刺吸电位仪数据分析

2.3.1 单剂处理的波型分析 桃粉蚜刺吸产生的 EPG 波型有 7 种: Np 波、A 波、C 波、E1 波、E2 波、G 波和 F 波。

表 1 不同药剂对桃粉蚜成虫的室内毒力测定

Table 1 Indoor toxicity test of different insecticides against adult of *Myzus persicae*

供试药剂 Pesticides	LC_{50} 95%置信区间 (mg/L) LC_{50} 95% confidence interval (mg/L)	回归方程 Regression equation	相关系数 r Correlation coefficient	LC_{50} (mg/L)	毒力指数 Toxicity index
氟啶虫胺胍 Fluonitrile	3.32-60.52	$y=0.724x+28.11$	0.996	30.23	214.49
氟啶虫酰胺 Fluosamide	4.26-167.20	$y=0.768x+22.61$	0.997	35.68	181.73
吡虫啉 Pyrazine	55.15-113.78	$y=0.777x+22.18$	0.996	35.81	181.07
高效氯氟氰菊酯 High efficiency cypermethrin	6.80-188.97	$y=0.800x+18.50$	0.995	39.38	164.67
双丙环虫酯 Dipropyl ester	16.27-171.64	$y=0.885x+5.99$	0.996	49.70	130.46
噻虫嗪 Thiothiazide	26.37-1 175.63	$y=0.466x+19.78$	0.992	64.84	100.00

表 2 不同比例氟啶虫胺胍和氟啶虫酰胺混配对桃粉蚜成虫的联合毒力评价

Table 2 Evaluation of the combined toxicity of different ratios of fluonitrile and fluridanamide to adult of *Myzus persicae*

氟啶虫胺胍和 氟啶虫酰胺比例 Ratio of fluonitrile to fluosamide	毒力回归方程 Regression equation	LC_{50} (mg/L)	LC_{50} 95%置信区间 (mg/L) LC_{50} 95% confidence interval (mg/L)	共毒系数 CTC Co-toxicity coefficient	评价 Valuation
10:1	$y=0.0155x+0.488$	0.800	0.01-2.50	3 832.02	增效 Efficiency
5:1	$y=0.0164x+0.466$	2.091	0.05-5.92	1 483.49	增效 Efficiency
1:1	$y=0.0250x+0.163$	13.470	1.06-37.56	242.98	增效 Efficiency
1:5	$y=0.0146x+0.478$	1.486	0.09-4.01	2 331.04	增效 Efficiency
1:10	$y=0.0165x+0.465$	2.121	0.01-18.23	1 655.07	增效 Efficiency

表 3 6 种药剂处理对桃粉蚜成虫主要 EPG 参数的影响
Table 3 Effects of six fungicides on the main EPG parameters of *Myzus persicae* adult

EPG 参数 EPG parameter	CK	氟啶虫腈腈 Fluonitrile	氟啶虫酰胺 Fluosamide	吡虫啉 Pyrazine	高效氟氰菊酯 High efficiency cypermethrin	双丙环虫酯 Dipropyl ester	噻虫嗪 Thiothiazide
第 1 次平均刺探持续时间 (min)	1.25±0.21 c	1.32±0.16 c	3.13±0.34 a	1.68±0.36 b	2.05±0.42 b	1.94±0.63 b	1.42±0.44 bc
The average duration of the first probe (min)							
总刺探时间 (min)	318.88±3.90 a	113.42±9.93 f	145.46±4.67 e	171.33±3.76 d	204.26±3.43 c	274.83±4.10 b	320.80±2.08 a
Total probing time (min)							
Np 波平均持续时间 (min)	2.05±0.37 b	4.86±0.30 a	5.11±0.36 a	5.90±0.42 a	6.14±0.65 a	5.34±0.32 a	4.65±1.05 a
Mean duration of NP wave (min)							
Np 波总次数	9.00±1.00 d	31.00±1.00 a	22.00±2.00 b	18.50±1.50 b	14.50±0.50 c	13.50±0.50 c	19.50±2.50 b
Total number of NP wave							
A 波总次数	16.50±1.50 a	8.50±0.24 d	10.00±0.16 c	5.50±0.50 e	12.00±1.00 b	10.50±1.50 bc	4.50±0.50 e
Total number of A wave							
G 波平均持续时间 (min)	4.62±0.19 a	1.28±0.25 e	2.12±0.22 d	2.75±0.23 c	2.5±0.26 cd	2.69±0.23 c	3.84±0.13 b
Mean duration of G wave (min)							
G 波总次数	35.00±2.00 a	9.50±0.50 f	10.50±1.50 f	16.50±1.50 e	27.00±1.00 c	30.50±1.50 b	20.50±1.50 d
Total number of G wave							
C 波总次数	16.00±1.00 a	8.50±0.80 c	13.00±1.00 b	6.50±1.05 d	6.00±1.00 d	4.00±1.00 e	8.50±1.50 c
Total number of C wave							
F 波总次数	3.00±1.00 b	9.00±1.00 a	6.00±1.00 ab	3.50±0.50 b	8.00±1.00 a	3.50±0.50 b	7.00±1.00 a
Total number of F wave							
E1 波平均持续时间 (min)	2.16±0.23 a	2.01±0.26 a	2.18±0.30 a	3.01±0.42 a	2.36±0.48 a	3.06±0.38 a	2.87±0.46 a
Mean duration of E1 wave (min)							
E1 波总次数	24.50±2.50 a	7.50±1.50 c	14.50±1.50 b	12.50±2.50 b	7.50±1.50 c	16.00±1.00 b	11.50±2.50 b
Total number of E1 wave							
E2 波平均持续时间 (min)	3.86±0.29 a	1.71±0.28 b	1.59±0.21 b	3.28±0.32 a	3.53±0.29 a	3.91±0.32 a	3.99±0.23 a
Mean duration of E2 wave (min)							
E2 波总次数	34.50±1.50 a	13.00±2.00 c	20.00±1.00 b	21.50±1.50 b	25.50±1.50 b	24.00±2.00 b	36.50±2.50 a
Total number of E2 wave							
E 波总时间 (min)	188.03±1.50 a	36.16±0.70 f	60.19±1.40 e	92.61±0.96 d	96.24±2.52 d	156.05±2.26 c	173.82±2.15 b
Total time of E wave (min)							
E 波总次数	59.00±1.00 a	20.50±2.50 f	30.50±1.50 e	34.00±2.00 d	33.00±1.50 d	40.00±3.00 c	48.00±0.00 b
Total number of E wave							

CK: 对照, 清水处理。表中数值为平均值±标准误, 同一行数据后标有不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$, 单因素方差分析)。下表同。

CK: Control, clear water treatment. Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters within the same row indicate significant difference ($P < 0.05$, One-way analysis of variance). The same below.

对 6 种药剂处理后, 桃粉蚜的取食波形 Np、A、E、G、C 波和 F 波进行比较发现, 在 6 h 的记录过程中, 桃粉蚜在噻虫嗪处理下的总刺探时间显著长于其他药剂 ($F = 271.698, P < 0.001, df = 6$); 经过 6 种药剂处理的桃粉蚜 E1 波平均持续时间没有显著性差异 ($F = 525.429, P > 0.05, df = 6$)。桃粉蚜在经 6 种药剂处理的桃树叶片上的 Np 波平均持续时间显著长于对照组 ($F = 8.679, P < 0.05, df = 6$), 但各药剂之间没有显著差异 ($F = 764.857, P > 0.05, df = 6$), 说明这 6 种药剂对桃粉蚜的取食均具有较强的抑制作用。在 G 波平均持续时间中, 对照组显著长于 6 种药剂 ($F = 11.616, P < 0.05, df = 6$), 说明对照组处理便于桃粉蚜取食 (表 3)。E1 波的持续时间反映了药剂浸泡过的桃树叶韧皮部对桃粉蚜取食的抗性程度, E1 波持续时间越长, 表明蚜虫取食困难。表 3 显示, 桃粉蚜在 6 种药剂处理下的 E1 波持续时间无显著差异 ($F = 525.429, P > 0.05, df = 6$)。桃粉蚜在噻虫嗪、双丙环菊酯、高效氯氟氰菊酯和吡虫啉处理的桃树叶, 以及清水处理的桃树叶上的 E2 波平均持续时间显著高于氟啶虫胺腈和氟啶虫酰胺 ($F = 8.696, P < 0.05, df = 6$), 说明噻虫嗪、双丙环菊酯、高效氯氟氰菊酯、吡虫啉和清水对桃粉蚜在韧皮部的取食抑制性较弱, 而氟啶虫胺腈和氟啶虫酰胺则表现较强的抑制性。

从表 3 中可以看出, 氟啶虫酰胺、高效氯氟氰菊酯和双丙环虫酯的 A 波总刺探次数显著高于吡虫啉和噻虫嗪 ($F = 31.889, P < 0.05, df = 6$), 吡虫啉和噻虫嗪之间无显著差异 ($F = 15.007, P > 0.05, df = 6$), 说明氟啶虫酰胺、高效氯氟氰菊酯和双丙环虫酯对桃粉蚜刺吸桃树叶表皮的抑制性较小, 可以分泌较多的凝胶型唾液。C 波总刺探次数显示氟啶虫酰胺显著高于吡虫啉 ($F = 11.385, P < 0.05, df = 6$), 说明吡虫啉药剂的使用对桃粉蚜在韧皮部的刺探抑制性较强。E 波的总刺探次数显示, 噻虫嗪显著高于氟啶虫酰胺和吡虫啉 ($F = 40.053, P < 0.05, df = 6$), 说明噻虫嗪对桃粉蚜的刺探抑制性较低。对照组 E1 波的总刺探次数显著高于 6 种药剂 ($F = 6.778, P < 0.05, df = 6$)。E2 波的总刺探次数显

示, 噻虫嗪显著高于吡虫啉和氟啶虫酰胺 ($F = 33.780, P < 0.05, df = 6$), 但吡虫啉和氟啶虫酰胺无显著差异 ($F = 75.286, P > 0.05, df = 6$), 噻虫嗪与对照也无显著差异 ($F = 34.256, P > 0.05, df = 6$), 说明经过噻虫嗪处理过的桃树叶对桃粉蚜的被动取食无显著影响。G 波的刺探次数显示对照显著高于 6 种药剂 ($F = 27.614, P < 0.05, df = 6$), 说明桃粉蚜在木质部的主动取食受到药剂的影响。综合表 3 来看, 6 种药剂的毒力大小和抗性大小, 依次为氟啶虫胺腈>氟啶虫酰胺>吡虫啉>高效氯氟氰菊酯>双丙环虫酯>噻虫嗪, 桃粉蚜成虫在 EPG 的数据分析结果符合室内毒力测定结果。

2.3.2 混配药剂下刺吸电位仪数据分析 将氟啶虫胺腈和氟啶虫酰胺混配后, 按照不同的浓度进行试验, 发现药剂混配的药效高于单剂的药效, 且混配后的药效对桃粉蚜各个波型均产生了不同程度的影响。波型比较表明, 对照处理下的总刺探时间显著高于其他处理 ($F = 278.171, P < 0.05, df = 5$), 说明药剂处理后对桃粉蚜的毒性有所增强, 影响其刺探取食。对照组桃粉蚜 A 波的总刺探次数显著高于其他处理 ($F = 4.876, P < 0.05, df = 5$), 不同比例处理之间也存在差异 ($F = 27.378, P > 0.05, df = 6$), 说明经过药剂处理后对桃粉蚜在表皮刺探有一定的影响。在 G 波总时间中, 1:10 和 1:5 显著高于其他处理 ($F = 6.826, P < 0.05, df = 5$), 说明氟啶虫酰胺药剂占比较高, 对桃粉蚜在木质部主动取食有抑制作用。E1 波的总刺探次数以对照显著高于其他比例 ($F = 7.995, P < 0.1, df = 5$), E2 波持续时间在不同比例和对照中无显著差异 ($F = 85.379, P > 0.05, df = 6$)。E2 波总次数显示, 对照显著高于其他处理 ($F = 30.195, P < 0.05, df = 5$), 说明不同比例处理对桃粉蚜的被动取食有抑制作用。E 波总时间中, 对照显著高于其他处理 ($F = 152.136, P < 0.05, df = 5$), 对照组桃粉蚜 E 波总次数也显著高于其他处理 ($F = 21.767, P < 0.05, df = 5$), 说明药剂处理后对桃粉蚜的取食有抑制作用, 且氟啶虫胺腈占比越高抑制越小 (表 4)。

从氟啶虫酰胺中 E 波的持续时间、总次数以

表 4 不同比例氟啶虫胺腈和氟啶虫酰胺处理桃粉蚜成虫对主要 EPG 参数影响
Table 4 Effects of different ratios of fluonitrile and fluosamide on main EPG parameters of *Myzus persicae* adult

EPG 参数 EPG parameter	10 : 1	5 : 1	1 : 1	1 : 5	1 : 10	CK
第 1 次刺探持续时间 (min) Duration of first probe (min)	2.04±0.61 a	1.61±0.48 a	1.49±0.26 a	3.00±0.83 a	1.69±0.15 a	1.25±0.21 a
总刺探时间 (min) Total probing time (min)	90.76±6.57 f	132.83±7.44 e	153.14±6.29 d	241.10±3.09 c	262.40±1.68 b	318.88±3.90 a
Np 波总时间 (min) Total time of Np wave (min)	9.42±1.07 a	9.68±0.90 a	8.70±0.82 a	8.49±1.18 a	8.14±1.16 a	4.65±1.05 a
Np 波总次数 Total number of NP wave	21.50±1.50 a	17.50±1.50 ab	15.50±1.50 ab	17.50±3.50 ab	14.50±3.50 ab	9.00±1.00 b
A 波总时间 (min) Total time of A wave (min)	2.39±0.31 bc	2.06±0.30 c	3.00±0.43 abc	3.80±0.45 ab	4.30±1.16 a	1.47±0.19 c
A 波总次数 Total number of A waves	8.00±1.00 c	10.00±1.00 c	9.50±1.50 c	13.50±0.50 b	9.50±1.50 c	16.50±1.50 a
G 波总时间 (min) Total time of G wave (min)	2.82±0.57 b	2.97±0.53 b	3.36±0.46 b	4.80±0.61 a	5.20±0.91 a	2.32±0.19 b
G 波总次数 Total number of G wave	5.50±0.50 b	8.00±1.00 b	11.50±2.50 b	12.00±1.00 b	11.50±4.50 b	35.00±3.00 a
F 波总时间 (min) Total time of F wave (min)	2.11±0.46 a	2.38±0.34 a	2.43±0.29 a	2.37±0.37 a	2.95±0.36 a	1.96±0.61 a
F 波总次数 Total number of F wave	3.50±0.50 bc	8.50±0.50 a	6.50±0.50 a	8.00±1.00 a	6.00±1.00 ab	3.00±1.00 c
C 波总时间 (min) Total time C wave (min)	2.51±0.64 a	2.31±0.60 a	2.63±0.36 a	3.70±1.00 a	2.71±0.58 a	1.73±0.19 a
C 波总次数 Total number of C wave	4.50±1.50 b	8.00±2.00 b	9.00±2.00 b	8.50±0.50 b	9.00±2.00 b	16.00±1.00 a
E1 波持续时间 (min) Mean duration of E1 wave (min)	2.75±0.24 a	3.53±0.40 a	2.95±0.44 a	3.19±0.43 a	3.79±0.88 a	2.16±0.23 a
E1 波总次数 Total number of E1 wave	6.50±2.50 b	8.50±2.50 b	10.00±3.00 b	8.50±1.50 b	12.50±1.50 b	24.50±2.50 a
E2 波持续时间 (min) Mean duration of E2 wave (min)	3.77±0.69 a	4.01±0.52 a	5.23±0.92 a	4.35±0.54 a	4.44±0.32 a	3.86±0.29 a
E2 波总次数 Total number of E2 waves	9.00±2.00 c	11.00±2.00 c	9.00±2.00 c	16.00±2.00 b	16.50±0.50 b	34.50±1.50 a
E 波总时间 (min) Total time of E wave (min)	41.31±3.91 e	59.96±2.68 d	53.27±3.99 de	87.98±4.81 c	105.59±7.11 b	188.03±1.50 a
E 波总次数 Total number of E wave	15.50±3.50 c	19.50±2.50 c	19.00±2.00 c	24.50±0.50 c	29.00±2.00 b	59.00±1.00 a

及总刺探时间可以看出, 氟啶虫胺腈: 氟啶虫酰胺两种药剂在不同浓度配比下的毒力大小和抗性大小, 依次为 10 : 1 > 5 : 1 > 1 : 1 > 1 : 5 > 1 : 10, 当比例为 10 : 1 时, 桃粉蚜的取食次数和时间最少, 抑制效果最强, 为最优组合。

3 结论与讨论

桃粉蚜通过刺吸桃树梢、叶及幼果完成自身的生长发育和繁殖。生产中桃粉蚜大多是采用化学防治, 能够达到直接杀死害虫的目的, 筛选出

具有高效性且低毒化的药剂可有效减少农药残留。研究表明, 药剂对石榴上棉蚜的毒力大小依次为啶虫脒>氟啶虫胺胍>吡虫啉>噻虫嗪>高效氯氟氰菊酯>吡蚜酮(韩腾等, 2023), 与本研究所得出的毒力大小基本吻合。新烟碱类杀虫剂对石榴上棉蚜的 LC_{50} 数值高于其他作物寄主蚜虫, 说明石榴上棉蚜对新烟碱类杀虫剂显示出了较强的抗性, 这种抗性增强的情况同样体现在高效氯氟氰菊酯和氟啶虫胺胍毒力上(王立等, 2021)。本研究中, 对桃粉蚜 48 h 的 LC_{50} 值从小到大依次为氟啶虫胺胍<氟啶虫酰胺<吡虫啉<高效氯氟氰菊酯<双丙环虫酯<噻虫嗪, 其中氟啶虫胺胍的活性最高, LC_{50} 值为 30.23 mg/L, 与王立等(2021)研究结果相同, 高效氯氟氰菊酯和氟啶虫胺胍都具有一定的毒力作用。研究发现, 木瓜秀粉蚧 *Paracoccus marginatus* 2 龄若虫室内毒力测定结果为螺螨酯>哒螨灵>噻虫胺>联苯菊酯>矿物油>高效氯氟氰菊酯>炔螨特>啶虫脒>吡虫啉>噻螨酮>四螨嗪(张蕊等, 2020), 毒力大小与本试验中的吡虫啉与高效氯氟氰菊酯的毒力有区别, 推测原因可能与不同寄主上的蚜虫对不同药剂的反应不同有关。陈吉祥等(2021)得出, 10%甲维盐·茚虫威悬浮剂、12%甲维盐·虫螨腈悬浮剂、12%虫螨腈·虱螨脲悬浮剂、14%呋虫胺·螺虫乙酯悬浮剂、22%吡虫啉·螺虫乙酯悬浮剂和 6%吡虫啉·高效氯氟氰菊酯悬浮剂 6 种复配杀虫剂对七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 幼虫具有急性毒性。

应用 EPG 技术检测刺吸式口器昆虫在寄主植物中的刺吸行为, 在国内外的昆虫研究中已经得到了广泛的应用。目前研究的昆虫主要有叶蝉、蚜虫、飞虱、粉虱和介壳虫等(于良斌等, 2021)。在研究刺吸式口器的昆虫和寄主植物之间的关系时, 从而得出它们之间的对应关系是相对较为复杂的。不同药剂处理植株上取食行为的差异, 为研究提供了快速评价药剂抗性等级和抗虫位点的工具, 各波型参数中 E 波、NP 波和 F 波是抗蚜性的重要标志。在蚜虫刺探取食过程中如出现高频率、短时间的口针刺探以及长时间非取食行为或短时间的取食行为, 则认为抗虫位点在植

物表面、表皮层和叶肉层; 如出现长时间的 E1 波, 则说明该药剂处理的药效高(周昊等, 2020)。本研究基于 EPG 技术分析桃粉蚜对不同药剂处理的桃枝取食行为, 研究结果与于良斌等(2021)关于蚜虫 EPG 波型的研究相一致。桃粉蚜刺吸产生 6 种 EPG 波型, 分别为 Np、A、C、E、F 和 G 波型, 根据前人研究结果, E 波被细分为 E1 波和 E2 波(雷宏和徐汝梅, 1996)。雷宏和徐汝梅(1996)认为这 2 种波型除波峰较为明显外, 也有一定的差异, 大约在 2-9 Hz, 在试验过程中出现的微弱波型, 不受外接电源电压(Vs)的约束, 认为明显的波峰是电阻存在引起的。

通过 6 种药剂对桃粉蚜药效水平的差异显著性分析发现, 药剂处理后 E 波的刺探持续时间以及刺探次数, 氟啶虫胺胍相对较少, 说明桃树叶经过氟啶虫胺胍处理后, 对桃粉蚜有一定的趋避作用, 对刺探位置的选择造成了干扰, EPG 所得的数据与毒力测定的结果相符合。在药剂进行两两复配之后, 对桃粉蚜的取食均有一定程度的抑制作用, 并且在复配中, 依然符合毒力测定的大小顺序, 毒力较小的占比越高, 所对应的 E 波相对于较多, NP 波相对于较少, 也就是说对桃粉蚜的取食抑制作用较小。

本研究中, 6 种药剂的毒力大小与其刺吸电位所测得的取食行为结果一致, 药剂毒力越强, 对桃粉蚜取食刺探的抑制作用越大, 取食波 E2 的次数和时间就越少。将单剂中毒力最强的药剂进行复配, 当氟啶虫胺胍和氟啶虫酰胺复配比例为 10:1 时, 显示出最强的毒力效果, 同时在该比例下, 桃粉蚜的取食波的时间和次数也相应减少。由此可以看出, 无论是单剂还是复配, 室内毒力测定结果与刺吸电位行为测定结果是相对应的。本研究结果为田间药剂应用提供了重要的理论指导, 在桃粉蚜的田间防治中, 合理复配药剂并根据虫量适当提高氟啶虫胺胍的比例, 是一种经济且有效的控制策略。

参考文献 (References)

- Bass C, Puinean AM, Zimmer CT, Denholm I, Field LM, Foster SP, Gutbrod O, Nauen R, Slater R, Williamson MS, 2014. The

- evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 51: 41–51.
- Chen JX, Yu WL, Su L, Bai Q, Wei CC, Chen LL, Wang GY, Wu P, 2021. Toxicity and risk assessment of six compound insecticides to *Coccinella septempunctata*. *Journal of Environmental Entomology*, 43(5): 1265–1272. [陈吉祥, 于伟丽, 苏磊, 白倩, 魏成彩, 陈乐乐, 王广友, 吴培, 2021. 6种复配杀虫剂对七星瓢虫的毒力测定及风险评估. *环境昆虫学报*, 43(5): 1265–1272.]
- Deng BD, Lv ZZ, Cui J, Gao GZ, 2022. Toxicity of different insecticides to *Sphaerolectanium prunastri* in laboratory and field. *China Plant Protection*, 42(9): 83–85, 89. [邓秉东, 吕昭智, 崔志军, 高桂珍, 2022. 不同药剂对杏树鬃球蚧的室内毒力与田间防效. *中国植保导刊*, 42(9): 83–85, 89.]
- Han T, Fan J, Wang YH, Li YF, Zhang XN, An GC, 2023. Toxicity test and field control efficacy of six insecticides against pomegranate *Aphis gossypii* Glover. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 54(1): 37–41. [韩腾, 范静, 王跃华, 李永锋, 张晓南, 安广池, 2023. 6种药剂对石榴棉蚜的毒力测定及田间防效. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 54(1): 37–41.]
- Hu Y, Wu DJ, Hu C, Zhou HY, Lv ZY, Tian LC, 2023. Selection of pesticide combination formula and field control effect on *Tinocallis kahawaluokalani*. *Agrochemicals*, 62(2): 142–145. [胡月, 吴道军, 胡冲, 周涵宇, 吕志远, 田立超, 2023. 紫薇长斑蚜防治用复配配方筛选及田间防效. *农药*, 62(2): 142–145.]
- Jing P, 2013. Preliminary research on electrical penetration graph (EPG) waveforms in relation to feeding behavior and virus transmission mechanism in *Laodelphax striatellus*. Master dissertation. Zhengzhou: Henan Agricultural University. [荆裴, 2013. 灰飞虱取食行为 EPG 波型认定及传毒行为机理的初步研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学.]
- Lei H, Xu RM, 1996. EPG-An effective method for studying the prying and sucking behavior of herbivorous insects. *Entomological Knowledge*, 33(2): 116–120. [雷宏, 徐汝梅, 1996. EPG——一种研究植食性刺吸式昆虫刺探行为的有效方法. *昆虫知识*, 33(2): 116–120.]
- Li JJ, Pan JB, Wu LL, Lu SH, Yan FM, 2019. Three-decades of electrical penetration graph technique innovation in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1224–1234. [李静静, 潘建斌, 吴莉莉, 卢少华, 闫凤鸣, 2019. 我国刺吸电位技术三十年应用及创新. *应用昆虫学报*, 56(6): 1224–1234.]
- Li S, Wang S, Zhao J, Yang LW, Gao XW, Zhang F, 2014. Efficacy of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) against green peach aphid *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) on vegetables under greenhouse conditions. *Journal of Plant Protection*, 41(6): 699–704. [李姝, 王甦, 赵静, 杨丽文, 高希武, 张帆, 2014. 释放异色瓢虫对北京温室甜椒和圆茄上桃粉蚜的控害效果. *植物保护学报*, 41(6): 699–704.]
- Liu BS, Hu RR, Bai PH, Li JC, 2021. Toxicity of extracts from 4 species of chinese herbal medicines to *Hyalopterus amygdali* in laboratory, *Shandong Agricultural Sciences*, 53(1): 105–108. [刘宝生, 胡瑞瑞, 白鹏华, 李建成, 2021. 4种中药材提取物对桃粉蚜的室内毒力. *山东农业科学*, 53(1): 105–108.]
- Liu WJ, 2022. Evaluation of cotton cultivars for resistance to *Aphis gossypii* based on the life table and EPG technology. Master dissertation. Baoding: Hebei Agricultural University. [刘伟娇, 2022. 基于生命表和 EPG 技术的棉花品种抗蚜性评价. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]
- Liu WJ, Li LY, Gao XK, Zhang KX, Li DY, Luo JY, Cui JJ, Yang J, 2022. Screening of EPG-based parameters for measuring resistance to *Aphis gossypii*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(5): 1193–1201. [刘伟娇, 李玲玉, 高雪珂, 张开心, 李东阳, 雒珺瑜, 崔金杰, 杨君, 2022. 基于 EPG 技术的棉蚜抗性指标筛选. *中国生物防治学报*, 38(5): 1193–1201.]
- Mohammed AA, Hatcher PE, 2017. Combining entomopathogenic fungi and parasitoids to control the green peach aphid *Myzus persicae*. *Biological Control*, 110: 44–55.
- Pan MZ, Zhang Y, Cao HH, Wang XX, Liu TX, 2022. Research progresses, application, and prospects in aphid biological control on main crops in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 146–172. [潘明真, 张毅, 曹贺贺, 王杏杏, 刘同先, 2022. 我国主要农作物蚜虫生物防治的研究进展、应用与展望. *植物保护学报*, 49(1): 146–172.]
- Prince G, Chandler D, 2020. Susceptibility of *Myzus persicae*, *Brevicoryne brassicae* and *Nasonovia ribisnigri* to fungal biopesticides in laboratory and field experiments. *Insects*, 11(1): 55–70.
- Qu CH, Wang P, 2017. Laboratory bioassay and field Efficacy of sulfoxaflor active against peach aphid (*Myzus persicae*). *Agrochemicals*, 56(3): 216–218. [曲春鹤, 王彭, 2017. 氟啶虫胺腈对桃粉蚜的室内杀虫活性及田间防治效果. *农药*, 56(3): 216–218.]
- Tang QL, Ma KS, Gao XW, 2016. Current status and management strategies of insecticide resistance in aphids on the vegetable crops. *Plant Protection*, 42(6): 11–20. [汤秋玲, 马康生, 高希武, 2016. 蔬菜蚜虫抗药性现状及抗性治理策略. *植物保护*, 42(6): 11–20.]
- Tjallingii WF, Esch TH, 1993. Fine structure of aphid stylet routes in

- plant tissues in correlation with EPG signals. *Physiological Entomology*, 18(3): 317–328.
- Tjallingii WF, 1985. Membrane potentials as an indication for plant cell penetration by aphid stylets. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 38(2): 187–193.
- Wang L, Wang QQ, Rui CH, Yuan HZ, Cui L, 2021. The toxicity and synergistic effect of 14 insecticides against *Semiaphis heraclei* (Takahashi). *Pesticide Science and Administration*, 42(2): 32–37. [王立, 王芹芹, 芮昌辉, 袁会珠, 崔丽, 2021. 14 种杀虫剂对芹菜蚜的毒力及协同增效研究. *农药科学与管理*, 42(2): 32–37.]
- Xue CM, 2014. Preliminary studies on the infection mechanism between obligate aphid pathogen *Pandora neophidis* and its host *Myzus persicae* using EPG and quantitative real-time PCR. Master dissertation. Hangzhou: China Jiliang University. [薛承美, 2014. EPG 结合实时荧光定量 PCR 对新蚜虫病毒侵染桃粉蚜致病机理初探. 硕士学位论文. 杭州: 中国计量学院.]
- Yan HJ, Li WZ, Liang H, Ning ZX, Lu W, 2021. Indoor toxicity and field efficacy of three neonicotinoids against *Aphis gossypii*. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 58(8): 1454–1459. [闫虹江, 李维政, 梁赫, 宁忠雄, 路伟, 2021. 3 种新烟碱类杀虫剂对棉蚜的室内毒力测定及田间药效. *新疆农业科学*, 58(8): 1454–1459.]
- Yu LB, Yue FZ, Cheng TT, Wang YT, Cui J, Xu LB, 2021. Resistance of different alfalfa cultivars to *Therioaphis trifolii* (Hemiptera: Drepanosiphidae) analyzed by EPG technology. *Acta Entomologica Sinica*, 64(11): 1293–1304. [于良斌, 岳方正, 程通通, 王予彤, 崔进, 徐林波, 2021. 应用 EPG 技术分析不同品种苜蓿对苜蓿斑蚜的抗性. *昆虫学报*, 64(11): 1293–1304.]
- Zhang MH, Kang SS, Guo JL, Liu ZQ, Cheng YP, Chen ZL, 2022. Application progress of neonicotinoid insecticides in pesticide combination. *Agrochemicals*, 61(5): 313–320. [张明浩, 康珊珊, 郭靖立, 刘子琪, 程有普, 陈增龙, 2022. 新烟碱类杀虫剂在农药复配中的应用进展. *农药*, 61(5): 313–320.]
- Zhang R, Yang SY, Mao XX, Lin SY, Wang WJ, Zhang ZX, Cheng DM, 2020. Toxicities and synergism of different pesticides against *Paracoccus marginatus*. *Journal of Environmental Entomology*, 42(1): 221–226. [张蕊, 杨石有, 毛欣欣, 林树叶, 王维娟, 张志祥, 程东美, 2020. 不同农药对木瓜秀粉蚜的毒力及复配增效作用. *环境昆虫学报*, 42(1): 221–226.]
- Zhou H, Li Y, Teng ZW, Du LJ, Wan FH, Zhou HX, 2020. EPG-based comparison of feeding behaviors of three piercing-sucking pests on apple seedlings. *Acta Entomologica Sinica*, 63(10): 1207–1214. [周昊, 李钰, 滕子文, 杜凌君, 万方浩, 周洪旭, 2020. 基于 EPG 的三种刺吸式害虫在苹果苗上的取食行为比较. *昆虫学报*, 63(10): 1207–1214.]
- Zhu Y, Wang MX, Cui L, Shen ZY, Zhou SJ, Han BY, 2019. Analysis of resistance of two elite *Chrysanthemum morifolium* cultivars to three species of aphids using EPG techniques and their potential resistant substances. *Journal of Plant Protection*, 46(2): 425–433. [祝愿, 王梦馨, 崔林, 沈子尧, 周建松, 韩宝瑜, 2019. 基于 EPG 技术分析杭菊两主栽品种对三种菊蚜抗性及其相关抗性物质. *植物保护学报*, 46(2): 425–433.]