

海南桃蚜对拟除虫菊酯类药剂抗性监测及电压门控钠离子通道突变分析

赵晨阳[#], 邱鑫垚, 李 芬, 吴少英^{*}

(海南大学 三亚南繁研究院, 海南 三亚 572025 中国)

摘要: 桃蚜(*Myzus persicae*)是一种全球分布的多食性害虫,可对多种经济作物造成严重危害。为评估海南桃蚜田间种群对拟除虫菊酯类药剂的抗性水平,本研究对 2021—2023 年海口、儋州和三亚地区的桃蚜田间种群进行了抗性监测。叶片药膜法测定桃蚜对高效氯氟氰菊酯、溴氰菊酯、联苯菊酯和氯菊酯敏感性的结果表明,3 个地区的桃蚜种群均对高效氯氟氰菊酯的抗性水平最低,对联苯菊酯的抗性最高,且整体抗性水平随时间呈上升趋势。其中,2021 年三亚种群对高效氯氟氰菊酯的抗性最低,LC₅₀ 值为 41.992 mg·L⁻¹;海口种群对联苯菊酯的抗性增长最为显著,抗性倍数从 2021 年的 7.35 倍提升至 2023 年的 85.32 倍,其 LC₅₀ 值在 2023 年达到 2 085.829 mg·L⁻¹。检测桃蚜钠离子通道 Domain II 区域和辅助亚基 *TipE* 的突变情况发现,2022 年海口、儋州和三亚种群中 *TipE* 基因未发生突变,但两个经典突变位点 918 和 1014 出现三种突变连锁现象(I-F、T-F、L-L)。其中,L-L 出现频率最高,分别达到 70%、50% 和 50%,并且三种连锁突变形式与不同菊酯药剂的抗性水平呈现一致的变化趋势。本研究揭示了海南地区桃蚜田间种群的抗性现状及抗性基因突变情况,为科学制定抗性管理策略提供重要参考,同时为深入探究桃蚜对拟除虫菊酯类药剂抗性形成机制提供了素材。

关键词: 桃蚜;拟除虫菊酯;抗性监测;突变点检测

中图分类号: S43 文献标志码: A 文章编号: 1674-7054(2026)04-0645-11

赵晨阳,邱鑫垚,李芬,等.海南桃蚜对拟除虫菊酯类药剂抗性监测及电压门控钠离子通道突变分析[J].热带生物学报(中英文),2026,17(4):645-655. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250042

CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20250042



桃蚜(*Myzus persicae*)是一种全球性分布的多食性害虫,其寄主范围涵盖 40 科 400 多种植物,包括多种重要的经济作物,如十字花科、茄科和葫芦科作物^[1-2]。桃蚜可通过刺吸植物汁液直接进行危害,表现为植物叶片卷曲、生长停滞^[3-5]。桃蚜也可通过传播病毒(如黄瓜花叶病毒和马铃薯卷叶病毒)及分泌蜜露等方式间接进行危害^[6]。桃蚜分泌的蜜露会诱发煤污病或影响植物光合作用,导致作物品质下降和经济损失^[7]。由于桃蚜繁殖速度快、适应能力强,桃蚜已成为农业生产中难以防治的重要害虫之一^[8]。

长期以来,化学防治是控制桃蚜的主要手段。然而,随着化学农药的广泛使用,桃蚜对多种药剂的抗性日益突出^[9]。全球多个国家和地

区相继发现桃蚜对有机磷、氨基甲酸酯、拟除虫菊酯及新烟碱类等药剂的抗性种群^[10]。苏格兰、意大利、韩国和法国等地的研究表明,桃蚜对拟除虫菊酯类药剂的抗性已广泛存在^[11-14]。在中国,桃蚜对拟除虫菊酯类药剂抗性同样严峻。自 1993 年,高希武等^[15]首次报道北京桃蚜种群对拟除虫菊酯类药剂产生极高抗性以来,桃蚜的抗性发展迅速。2006 年,山东昌乐地区的桃蚜种群对氰戊菊酯表现出中等水平抗性,抗性倍数为 23.85 倍^[16]。2011 年,北京 6 个田间种群均对高效氯氟氰菊酯产生了高水平抗性^[17]。2015 年,云南玉溪四个地区的桃蚜种群对溴氰菊酯的抗性倍数最高达到 80.22 倍^[18]。2016 年,重庆地区桃蚜种群对氯氟氰菊酯达到了高抗性水平(抗性倍数=41.28)^[19],而

© CC BY 4.0 收稿日期: 2025-03-03

修回日期: 2025-03-07

基金项目: 菁英人才科技项目(SCKJ-JYRC-2023-15);国家自然科学基金项目(32260666);海南省冬季瓜菜产业技术体系项目(HNARS-05-G04)

[#]第一作者: 赵晨阳(1999—),男,海南大学三亚南繁研究院 2022 级硕士研究生。E-mail: z17700637679@163.com

^{*}通信作者: 吴少英(1980—),女,教授。研究方向:昆虫分子毒理及生理生化。E-mail: wsywysy6000@hainanu.edu.cn

北京地区桃蚜种群对高效氯氟氰菊酯的抗性倍数最高达到 260.80 倍^[20]。2020 年, 贵阳地区的桃蚜种群对联苯菊酯和高效氯氟氰菊酯的 LC_{50} 值分别为 89.93 和 562.93 $mg \cdot L^{-1}$, 表现出中等抗性水平^[21]。2023 年, 新疆西蓝花田桃蚜对高效氯氟氰菊酯的 LC_{50} 值为 1011.03 $mg \cdot L^{-1}$, 已到达高抗性水平^[22]。这些研究揭示桃蚜在中国广泛分布且对多种药剂具有极高抗性的现状。

抗药性的迅速发展不仅降低了化学防治的效果, 还增加了农业生产成本, 并对生态环境和公共健康构成潜在威胁。而拟除虫菊酯类药剂的主要作用靶标是电压门控钠离子通道, 其通过与钠离子通道结合, 延长通道开放时间, 导致神经细胞过度兴奋, 最终引起昆虫死亡^[23-24]。含有 α -氰基的拟除虫菊酯被归类为 II 型拟除虫菊酯, 无 α -氰基的则称为 I 型拟除虫菊酯, II 型拟除虫菊酯表现出更高的神经毒性^[25-26]。昆虫电压门控钠离子通道(voltage-gate sodium channel, Na_v)的结构由四个连续的同源结构域组成, 这些片段被称作结构域 I 至 IV(Domain I-IV)。每个结构域包含 6 个 α -螺旋跨膜片段, 依次为 S1 ~ S6, 这些螺旋通过不规则环状多肽链(Linker)相互连接, 形成一个完整的通道蛋白^[23]。在昆虫中还鉴定出与钠通道相关的跨膜蛋白 TipE, 该蛋白因能增强昆虫钠通道的功能性表达而被确认为昆虫钠通道的辅助亚基^[27]。

钠通道的突变可导致昆虫对菊酯类药剂的敏感性降低, 尤其是 L1014F 和 M918T 等突变显著降低了拟除虫菊酯与钠离子通道的结合能力, 从而导致抗药性的产生, L1014F 和 M918T 突变位于钠通道 Domain II^[28]。最早在家蝇中报道了 L1014F 突变位点, 它是由单核苷酸多态性导致 1014 位置点的亮氨酸被苯丙氨酸取代^[23]。而后研究中发现多个物种 1014 位点还可被替换为 W、C、H 和 S, 这些突变均能显著降低钠通道对菊酯药剂的敏感性^[29-30]。类似的突变点还有 M918(T/L/V), 突变 M918T 会很大程度上影响钠离子通道与氯菊酯和溴氰菊酯结合的能力^[31]。M918T 突变与 L1014F 突变的组合(M918T+L1014F)可进一步加剧抗性水平, 形成“超级击倒抗性”(super-kdr)表型^[32-33]。Wang 等^[34]在 2021 年克隆桃蚜钠通道时发现 918 和 1014 位置存在三种突变连锁形式“I-F、T-F、L-L”, 但并未阐明这种突变发生的普遍性及发生频

率, 也未探究连锁形式与桃蚜抗药性之间的联系。昆虫钠通道辅助亚基 TipE 暂未报道突变点, 但哺乳动物中辅助亚基突变能够引起心律失常、Brugada 综合征和心脑血管等多种疾病^[35], 据此推测昆虫辅助亚基突变可能对昆虫的生长发育、繁殖等产生显著影响。

本研究通过对海南桃蚜的抗药性监测、super-kdr 突变频率及辅助亚基突变位点检测, 评估海南桃蚜种群对常用药剂的敏感性变化, 揭示桃蚜钠通道关键氨基酸位点突变情况, 为科学合理地使用药剂提供依据, 同时为开发新型药剂及对桃蚜的综合治理和农业的可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源 桃蚜室内种群是由中国热带农业科学院环境与植物保护研究所陈青研究员于 2021 年馈赠, 饲养使用新鲜、未接触任何药剂的包菜叶片。室内饲养条件: 温度(25 ± 2) $^{\circ}C$, 相对湿度 66% ~ 80%, 光周期 L:D=16 h:8 h。桃蚜田间种群采集自 2021—2023 年海口市、儋州市和三亚市, 具体位置见表 1。饲养条件与室内种群一致, 饲养一代后进行毒力测定。

1.2 毒力测定方法 桃蚜毒力测定使用叶片药膜法: 使用打孔器将洗净的白菜叶打出 4 cm 圆形叶片, 放置到一次性塑料杯(盖子具有通气孔)中, 倒入 30 mL 药液使叶片和塑料杯浸泡 15 s, 随后倒回药液晾干 2 h。用毛笔小心将桃蚜转移至准备好的塑料杯中, 最后在盖口放上 20 目(孔径为 0.127 mm)防虫网后盖上盖子。所用桃蚜选择由无翅雌蚜产出的 4 ~ 6 d 若蚜和 7 ~ 11 d 无翅成蚜进行实验。所用药剂为 95% 氯菊酯(上海克林生物科技有限公司); 98% 联苯菊酯(北京华诺远生物科技有限公司); 98% 溴氰菊酯(北京华诺远生物科技有限公司); 97% 高效氯氟氰菊酯(上海毕得医药科技股份有限公司)。所用药液使用 0.1% Triton X-100 溶液等比稀释 6 ~ 8 个浓度, 每个浓度设置 3 组重复, 每个重复放置 30 头桃蚜, 在温度 25 $^{\circ}C$ 、相对湿度 70%、光周期 16 L:8 D 条件下 48 h 后检查成蚜死亡情况, 使用毛刷轻触桃蚜, 无反应判定为死亡。根据统计后的总虫数和死亡数, 采用 PoloPlus 软件进行方差分析和回归分析, 得出 LC_{50} 、95% 置信区间, 斜率、自由度、卡方等。

表 1 桃蚜田间种群采集信息

Tab. 1 Information of field population collection of *Myzus persicae*

种群 Population	采集地点 Collection site	年份 Year	经纬度 Longitude and latitude	寄主 Host plants
海口种群 Haikou population	海南省海口市琼山区石门村 Shimen Village, Qiongsan District, Haikou City, Hainan Province	2021	19°45'33.95" N 110°31'36.98" E	白菜、烟草、萝卜 Chinese cabbage, tobacco, radish
		2022	19°45'34.40" N 110°31'33.95" E	
		2023	19°45'34.18" N 110°31'37.51" E	
		2021	19°30'21.41" N 109°29'38.85" E	
		2022	19°30'20.64" N 109°29'47.07" E	
		2023	19°30'18.21" N 109°29'21.46" E	
儋州种群 Danzhou population	海南省儋州市宝岛新村 Baodao New Village, Danzhou City, Hainan Province	2021	18°23'13.75" N 109°08'38.00" E	萝卜、白菜、辣椒 Radish, cabbage, pepper
		2022	18°23'8.71" N 109°08'31.08" E	
		2023	18°23'6.94" N 109°08'34.71" E	
三亚种群 Sanya population	海南省三亚市崖州区坝头基地 Batou Base, Yazhou District, Sanya City, Hainan Province	2021	18°23'13.75" N 109°08'38.00" E	茄子、白菜、萝卜 Eggplant, cabbage, radish
		2022	18°23'8.71" N 109°08'31.08" E	
		2023	18°23'6.94" N 109°08'34.71" E	

1.3 桃蚜钠离子通道 Domain II 区域和辅助亚基 TipE 的克隆

1.3.1 引物设计 根据 NCBI(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)已上传的桃蚜钠离子通道 α 亚基(Genbank 登录号: MN124170)和 TipE(Genbank 登录号: MN176135)序列, 利用 SnapGene 软件设计 PCR 引物, 引物设计区域在外显子上, 克隆引物信息见表 2。引物由擎科生物科技股份有限公司合成。

1.3.2 单头桃蚜基因组 DNA 的提取 利用 TransDirect® Animal Tissue PCR Kit 快速提取试剂盒(北京全式金)提取单头桃蚜基因组 DNA。

表 2 桃蚜 Domain II 片段和 TipE 基因克隆引物信息
Tab. 2 Cloning primer information of Domain II and TipE genes of *M. persicae*

引物名称 Primer	引物序列 Primer sequence	扩增长度/bp Amplification length
Domain II -5'	GTATTCGATCCGTTTCG TC	1 942
Domain II -3'	CAATCTTTTCTTGCGTT GTTGCTG	
MpTipE-1-5'	ATGGATGACGACGGGCC GGC	1 285
MpTipE-1-3'	CGGTGGAATTGGTTAGA AACGGTG	
MpTipE-2-5'	AAACTTGACCAAGACG ATG	65
MpTipE-2-3'	TTAGACTTCCGCCGTCG GCC	

取单头无翅桃蚜成虫放入 1.5 mL 离心管进行液氮冷冻处理, 加入 12.0 μ L 的 AD1 Buffer 和 3.0 μ L 的 AD2 Buffer, 使用研磨棒进行充分研磨。室温静置 10 min 后 95 $^{\circ}$ C 孵育 3 min。再加入 12.0 μ L 的 AD3 Buffer 充分混匀, 放入-20 $^{\circ}$ C 冰箱保存。

1.3.3 PCR 扩增钠离子通道 Domain II 和 TipE 基因 使用 2 $\times$ Phanta® Flash Master Mix(Dye Plus)(南京诺唯赞)试剂盒进行 PCR 扩增, 反应体系为 9.5 μ L ddH₂O, 12.5 μ L 2 $\times$ Phanta Flash Master Mix, 1.0 μ L 上游引物, 1.0 μ L 下游引物, 1.0 μ L DNA 模板。PCR 反应条件为 98 $^{\circ}$ C 1 min; 98 $^{\circ}$ C 30 s, 60 $^{\circ}$ C 30 s, 72 $^{\circ}$ C 2 min, 30 个循环; 72 $^{\circ}$ C 8 min。PCR 产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳验证, 条带正确后由擎科生物科技股份有限公司测序。

2 结果与分析

2.1 桃蚜田间种群成蚜对四种菊酯药剂的抗性水平 对海南三个地区(海口、儋州和三亚)桃蚜田间种群进行抗药性监测, 桃蚜无翅成蚜对四种菊酯药剂的抗性在总体上呈现逐年上升趋势。其中海口种群(表 3)对联苯菊酯抗性的增长最为显著, 2021—2023 年, LC₅₀ 从 179.763 mg·L⁻¹ 增至 2 085.829 mg·L⁻¹, 抗性倍数提升 11.6 倍, 尤其在 2021—2022 年间, 抗性倍数从 7.35 增至 38.93, 增幅达 5.30 倍。海口种群对氯菊酯抗性持续上升, LC₅₀ 从

127.432 mg·L⁻¹ 增至 625.119 mg·L⁻¹, 抗性倍数提高 4.9 倍。海口种群对溴氰菊酯抗性增长显著, 2021—2023 年, LC₅₀ 从 89.154 mg·L⁻¹ 增至 974.511 mg·L⁻¹, 抗性倍数提高 10.9 倍。海口种群对高效氯氟氰菊酯的抗性呈先增后减趋势, LC₅₀ 最大为 123.412 mg·L⁻¹。

表 3 2021—2023 年海口种群桃蚜成蚜对四种菊酯药剂抗性水平

Tab. 3 The resistance level of adult <i>M. persicae</i> to four pyrethroids in Haikou population from 2021 to 2023						
药剂 Pesticide	种群 Population	年份 Year	致死中浓度(95%置信区间) LC ₅₀ (95%CL)/(mg·L ⁻¹)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方 χ ²	抗性倍数 Resistance ratio
氯菊酯 Permethrin	室内 Indoor	2021	7.822(2.007 ~ 22.417)	1.098±0.147	10.476	1
		2021	127.432(56.522 ~ 247.999)	1.091±0.198	0.534	16.29
	海口 Haikou	2022	258.838(106.348 ~ 555.941)	0.828±0.107	1.569	33.10
		2023	625.119(202.346 ~ 1693.490)	0.708±0.097	7.152	79.92
联苯菊酯 Bifenthrin	室内 Indoor	2021	24.448(13.805 ~ 40.478)	1.241±0.184	1.813	1
		2021	179.763(88.319 ~ 319.883)	1.029±0.146	2.037	7.35
	海口 Haikou	2022	951.704(217.684 ~ 2380.737)	1.019±0.173	6.700	38.93
		2023	2085.829(146.485 ~ 4822.066)	1.210±0.289	4.388	85.32
溴氰菊酯 Deltamethrin	室内 Indoor	2021	15.912(7.801 ~ 28.549)	1.067±0.196	2.696	1
		2021	89.154(40.740 ~ 167.165)	1.159±0.206	1.304	5.60
	海口 Haikou	2022	278.746(28.689 ~ 884.019)	1.002±0.175	6.591	17.52
		2023	974.511(553.058 ~ 1590.650)	1.137±0.151	1.604	61.24
高效氯氟氰菊酯 λ-Cyhalothrin	室内 Indoor	2021	11.122(3.661 ~ 27.029)	1.001±0.166	4.101	1
		2021	94.331(40.516 ~ 190.235)	0.853±0.118	1.246	8.48
	海口 Haikou	2022	123.412(59.820 ~ 243.210)	0.919±0.119	1.886	11.10
		2023	105.589(26.221 ~ 446.355)	1.202±0.185	7.862	9.49

儋州种群(表 4)对联苯菊酯的抗性倍数提高了 2.27 倍, 2021—2023 年, LC₅₀ 从 109.510 mg·L⁻¹ 增至 297.588 mg·L⁻¹。对溴氰菊酯抗性倍数提高了 1.81 倍。LC₅₀ 从 175.219 mg·L⁻¹ 增至 317.829 mg·L⁻¹。儋州种群对氯菊酯和高效氯氟氰菊酯的抗性呈先降后升趋势, LC₅₀ 最大分别为 256.581、194.872 mg·L⁻¹。

三亚种群(表 5)对联苯菊酯、溴氰菊酯、高效氯氟氰菊酯均呈现逐年增长趋势, 其中对高效氯氟氰菊酯增长最为显著, 2021—2023 年, LC₅₀ 从 41.992 mg·L⁻¹ 增至 334.303 mg·L⁻¹, 抗性倍数提高了 7.95 倍。三亚种群对联苯菊酯抗性倍数提高了 2.14 倍。LC₅₀ 从 123.168 mg·L⁻¹ 增至 262.661 mg·L⁻¹。对溴氰菊酯抗性倍数提高了 1.62 倍, LC₅₀ 从 177.431 mg·L⁻¹ 增至 288.418 mg·L⁻¹。三亚种群的对氯菊酯抗性呈先增后减趋势, LC₅₀ 最

大为 383.059 mg·L⁻¹。

2.2 桃蚜田间种群若蚜对四种菊酯类药剂的抗性水平 桃蚜若蚜对联苯菊酯和溴氰菊酯抗性变化趋势与成蚜一致。桃蚜若蚜对联苯菊酯和溴氰菊酯的抗性在三个地区均呈现逐年上升趋势, 其中海口种群(表 6)的抗性增长最为显著, 2021—2023 年, 对联苯菊酯 LC₅₀ 从 85.034 mg·L⁻¹ 增至 601.582 mg·L⁻¹, 抗性倍数提升 7.06 倍; 对溴氰菊酯 LC₅₀ 从 89.154 mg·L⁻¹ 增至 974.511 mg·L⁻¹, 抗性倍数提高 8.98 倍。海口种群对氯菊酯也呈现逐年上升趋势, LC₅₀ 从 2021 年的 149.731 mg·L⁻¹ 增至 2023 年的 319.846 mg·L⁻¹, 抗性倍数从 34.98 倍增至 74.73 倍。海口种群对高效氯氟氰菊酯抗性倍数先增后降, LC₅₀ 最大为 123.412 mg·L⁻¹。

儋州种群(表 7)对联苯菊酯和溴氰菊酯抗性呈现逐年上升趋势, 对联苯菊酯 LC₅₀ 从 2021 年

表 4 2021—2023 年儋州种群桃蚜成蚜对四种菊酯药剂抗性水平

Tab. 4 The resistance level of adult *M. persicae* to four pyrethroids in Danzhou population from 2021 to 2023

药剂 Pesticide	种群 Population	年份 Year	致死中浓度(95%置信区间) LC ₅₀ (95%CL)/(mg·L ⁻¹)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方 χ ²	抗性倍数 Resistance ratio
氯菊酯 Permethrin	室内 Indoor	2021	7.822(2.007 ~ 22.417)	1.098±0.147	10.476	1
		2021	188.196(46.009 ~ 591.424)	0.745±0.105	5.535	24.10
	儋州 Danzhou	2022	111.974(18.918 ~ 454.805)	0.902±0.137	3.720	14.32
		2023	256.581(117.781 ~ 510.874)	0.824±0.127	3.654	32.80
联苯菊酯 Bifenthrin	室内 Indoor	2021	24.448(13.805 ~ 40.478)	1.241±0.184	1.813	1
		2021	109.510(46.376 ~ 219.363)	0.902±0.129	1.656	4.47
	儋州 Danzhou	2022	135.599(58.074 ~ 287.994)	1.012±0.156	0.884	5.55
		2023	297.588(123.295 ~ 615.965)	0.724±0.106	3.284	12.17
溴氰菊酯 Deltamethrin	室内 Indoor	2021	15.912(7.801 ~ 28.549)	1.067±0.196	2.696	1
		2021	175.219(84.240 ~ 360.934)	1.156±0.200	1.196	11.01
	儋州 Danzhou	2022	303.838(148.752 ~ 552.008)	1.108±0.227	3.409	19.09
		2023	317.829(171.801 ~ 589.112)	1.014±0.131	2.800	19.97
高效氯氟氰菊酯 λ-Cyhalothrin	室内 Indoor	2021	11.122(3.661 ~ 27.029)	1.001±0.166	4.101	1
		2021	183.401(75.170 ~ 406.535)	0.865±0.125	2.173	16.49
	儋州 Danzhou	2022	107.888(36.465 ~ 250.049)	1.079±0.177	4.072	9.70
		2023	194.872(73.680 ~ 420.456)	0.969±0.145	0.598	17.52

表 5 2021—2023 年三亚种群桃蚜成蚜对四种菊酯药剂抗性水平

Tab. 5 The resistance level of adult *M. persicae* to four pyrethroids in Sanya population from 2021 to 2023

药剂 Pesticide	种群 Population	年份 Year	致死中浓度(95%置信区间) LC ₅₀ (95%CL)/(mg·L ⁻¹)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方 χ ²	抗性倍数 Resistance ratio
氯菊酯 Permethrin	室内 Indoor	2021	7.822(2.007 ~ 22.417)	1.098±0.147	10.476	1
		2021	133.755(64.090 ~ 264.672)	0.928±0.119	2.152	17.10
	三亚 Sanya	2022	383.059(52.267 ~ 922.902)	1.379±0.284	3.008	48.97
		2023	324.531(130.239 ~ 659.206)	0.850±0.110	1.875	41.49
联苯菊酯 Bifenthrin	室内 Indoor	2021	24.448(13.805 ~ 40.478)	1.241±0.184	1.813	1
		2021	123.168(10.793 ~ 143.544)	1.000±0.137	7.702	5.03
	三亚 Sanya	2022	126.377(17.959 ~ 716.647)	1.016±0.157	5.041	5.17
		2023	262.661(124.049 ~ 462.697)	1.087±0.180	1.313	10.74
溴氰菊酯 Deltamethrin	室内 Indoor	2021	15.912(7.801 ~ 28.549)	1.067±0.196	2.696	1
		2021	177.431(97.545 ~ 321.265)	1.150±0.197	1.052	11.15
	三亚 Sanya	2022	189.402(36.724 ~ 733.561)	1.029±0.170	6.056	11.90
		2023	288.418(141.673 ~ 508.109)	1.006±0.151	1.988	18.13
高效氯氟氰菊酯 λ-Cyhalothrin	室内 Indoor	2021	11.122(3.661 ~ 27.029)	1.001±0.166	4.101	1
		2021	41.992(19.202 ~ 80.753)	0.911±0.147	2.375	3.78
	三亚 Sanya	2022	203.921(52.780 ~ 422.062)	1.100±0.252	2.25	18.33
		2023	334.303(125.812 ~ 718.455)	0.926±0.136	1.266	30.06

表 6 2021—2023 年海口种群桃蚜若蚜对四种菊酯药剂抗性水平

Tab. 6 The resistance levels of *M. persicae* to four pyrethroids in Haikou population from 2021 to 2023

药剂 Pesticide	种群 Population	年份 Year	致死中浓度(95%置信区间) LC ₅₀ (95%CL)/(mg·L ⁻¹)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方 χ ²	抗性倍数 Resistance ratio
氯菊酯 Permethrin	室内 Indoor	2021	4.280(1.972 ~ 8.828)	0.815±0.119	0.993	1
		2021	149.731(74.075 ~ 316.439)	1.013±0.141	2.109	34.98
	海口 Haikou	2022	249.250(54.159 ~ 799.854)	0.834±0.115	4.315	58.24
		2023	319.846(175.512 ~ 540.323)	1.060±0.149	1.656	74.73
联苯菊酯 Bifenthrin	室内 Indoor	2021	18.620(10.100 ~ 34.203)	0.944±0.138	0.956	1
		2021	85.034(26.021 ~ 270.905)	0.981±0.140	5.167	4.57
	海口 Haikou	2022	420.535(219.478 ~ 779.872)	1.158±0.181	0.66	22.59
		2023	601.582(260.706 ~ 1 168.744)	1.089±0.191	1.164	32.30
溴氰菊酯 Deltamethrin	室内 Indoor	2021	15.912(7.801 ~ 28.549)	1.067±0.196	2.696	1
		2021	89.154(40.740 ~ 167.165)	1.159±0.206	1.304	5.60
	海口 Haikou	2022	278.746(28.689 ~ 884.019)	1.002±0.175	6.592	17.52
		2023	974.511(553.058 ~ 1 590.650)	1.137±0.151	1.604	61.24
高效氯氟氰菊酯 λ-Cyhalothrin	室内 Indoor	2021	11.122(3.661 ~ 27.029)	1.001±0.166	4.101	1
		2021	94.331(40.516 ~ 190.235)	0.853±0.118	1.246	8.48
	海口 Haikou	2022	123.412(59.820 ~ 243.210)	0.919±0.119	1.886	11.10
		2023	105.589(26.221 ~ 446.355)	1.202±0.185	7.862 2	9.49

表 7 2021—2023 年儋州种群桃蚜若蚜对四种菊酯药剂抗性水平

Tab. 7 The resistance levels of *M. persicae* to four pyrethroids in Danzhou population from 2021 to 2023

药剂 Pesticide	种群 Population	年份 Year	致死中浓度(95%置信区间) LC ₅₀ (95%CL)/(mg·L ⁻¹)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方 χ ²	抗性倍数 Resistance ratio
氯菊酯 Permethrin	室内 Indoor	2021	4.280(1.972 ~ 8.828)	0.815±0.119	0.993	1
		2021	93.481(45.992 ~ 202.027)	1.013±0.154	2.227	21.84
	儋州 Danzhou	2022	87.495(34.752 ~ 188.127)	0.717±0.112	3.365	20.44
		2023	216.634(79.123 ~ 472.302)	0.655±0.100	4.899	50.62
联苯菊酯 Bifenthrin	室内 Indoor	2021	18.620(10.100 ~ 34.203)	0.944±0.138	0.956	1
		2021	69.419(17.169 ~ 193.931)	1.012±0.143	4.957	3.73
	儋州 Danzhou	2022	136.214(61.708 ~ 251.010)	1.137±0.176	1.558	7.32
		2023	283.593(138.369 ~ 538.304)	0.759±0.096	4.985	15.23
溴氰菊酯 Deltamethrin	室内 Indoor	2021	15.912(7.801 ~ 28.549)	1.067±0.196	2.696	1
		2021	175.219(84.240 ~ 360.934)	1.156±0.200	1.196	11.01
	儋州 Danzhou	2022	303.838(148.752 ~ 552.008)	1.108±0.227	3.409	19.09
		2023	317.829(171.801 ~ 589.112)	1.014±0.131	2.800	19.97

续表 7 Tab. 7 Continued

药剂 Pesticide	种群 Population	年份 Year	致死中浓度(95%置信区间) LC ₅₀ (95%CL)/(mg·L ⁻¹)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方 χ ²	抗性倍数 Resistance ratio
高效氯氟氰菊酯 λ-Cyhalothrin	室内 Indoor	2021	11.122(3.661 ~ 27.029)	1.001±0.166	4.101	1
	儋州 Danzhou	2021	183.401(75.170 ~ 406.535)	0.865±0.125	2.173	16.49
		2022	107.888(36.465 ~ 250.049)	1.079±0.177	4.072	9.70
		2023	194.872(73.680 ~ 420.456)	0.969±0.145	0.598	17.52

的 69.419 mg·L⁻¹ 增至 2023 年的 283.593 mg·L⁻¹, 抗性倍数从 3.73 倍增至 15.23 倍; 对溴氰菊酯 LC₅₀ 从 2021 年的 175.219 mg·L⁻¹ 增至 2023 年的 317.829 mg·L⁻¹, 抗性倍数从 11.01 倍增至 19.97 倍。儋州种群对氯菊酯和高效氯氟氰菊酯抗性呈现先降后升趋势, LC₅₀ 最大分别为 216.634、194.872 mg·L⁻¹。

三亚种群(表 8)对联苯菊酯、溴氰菊酯和高效氯氟氰菊酯抗性呈现逐年上升趋势, 其中对高效氯氟氰菊酯抗性增长最为显著, LC₅₀ 从 2021 年的 41.992 mg·L⁻¹ 增至 2023 年的 334.303 mg·L⁻¹, 抗性倍数从 3.78 倍增至 30.06 倍。三亚种群对氯菊酯抗性倍数先增后降, LC₅₀ 最大为 321.030 mg·L⁻¹。

表 8 2021—2023 年三亚种群桃蚜若蚜对四种菊酯药剂抗性水平

Tab. 8 The resistance levels of *M.persicae* to four pyrethroids in Sanya population from 2021 to 2023

药剂 Pesticide	种群 Population	年份 Year	致死中浓度(95%置信区间) LC ₅₀ (95%CL)/(mg·L ⁻¹)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方 χ ²	抗性倍数 Resistance ratio
氯菊酯 Permethrin	室内 Indoor	2021	4.280(1.972 ~ 8.828)	0.815±0.119	0.993	1
	三亚 Sanya	2021	107.272(56.402 ~ 211.818)	0.988±0.135	1.325	25.06
		2022	321.030(154.608 ~ 529.959)	1.475±0.306	1.702	75.01
		2023	306.762(140.993 ~ 546.561)	1.004±0.164	2.771	19.40
联苯菊酯 Bifenthrin	室内 Indoor	2021	18.620(10.100 ~ 34.203)	0.944±0.138	0.956	1
	三亚 Sanya	2021	56.959(31.349 ~ 99.704)	0.993±0.135	3.071	3.06
		2022	98.565(33.128 ~ 298.703)	0.840±0.116	4.371	5.29
		2023	222.271(109.896 ~ 420.360)	0.942±0.120	1.892	11.94
溴氰菊酯 Deltamethrin	室内 Indoor	2021	15.912(7.801 ~ 28.549)	1.067±0.196	2.696	1
	三亚 Sanya	2021	177.431(97.545 ~ 321.265)	1.150±0.197	1.052	11.15
		2022	189.402(36.724 ~ 733.561)	1.029±0.170	6.056	11.90
		2023	288.418(141.673 ~ 508.109)	1.006±0.151	1.988	18.13
高效氯氟氰菊酯 λ-Cyhalothrin	室内 Indoor	2021	11.122(3.661 ~ 27.029)	1.001±0.166	4.101	1
	三亚 Sanya	2021	41.992(19.202 ~ 80.753)	0.911±0.147	2.375	3.78
		2022	203.921(52.780 ~ 422.062)	1.100±0.252	2.25	18.33
		2023	334.303(125.812 ~ 718.455)	0.926±0.136	1.266	30.06

2.3 桃蚜钠离子通道 Domain II 区域及辅助亚基 *TipE* 基因的突变检测 对 2022 年海口、儋州和三亚种群的钠离子通道 Domain II 区域和辅助亚基 *TipE* 基因进行克隆, 并与室内种群的克隆子序列进行比对。结果显示, 三个田间种群在 918 位点和 1014 位点存在连锁突变现象, 且不同地区种群突变频率存在显著差异。如图 1 所示, 918 和 1014 位点主要表现为“I-F”、“T-F”和“L-L”三种类型。“L-L”连锁突变在三个种群中均占主导地位, 海口、儋州和三亚种群的突变频率分别为 70%、

50% 和 50%, 表明该突变类型在田间种群中具有较高的选择优势(表 9)。“T-F”连锁突变仅在三亚种群中被检测到, 突变频率为 10%。三个种群的钠离子通道辅助亚基 *TipE* 基因均未发生突变。

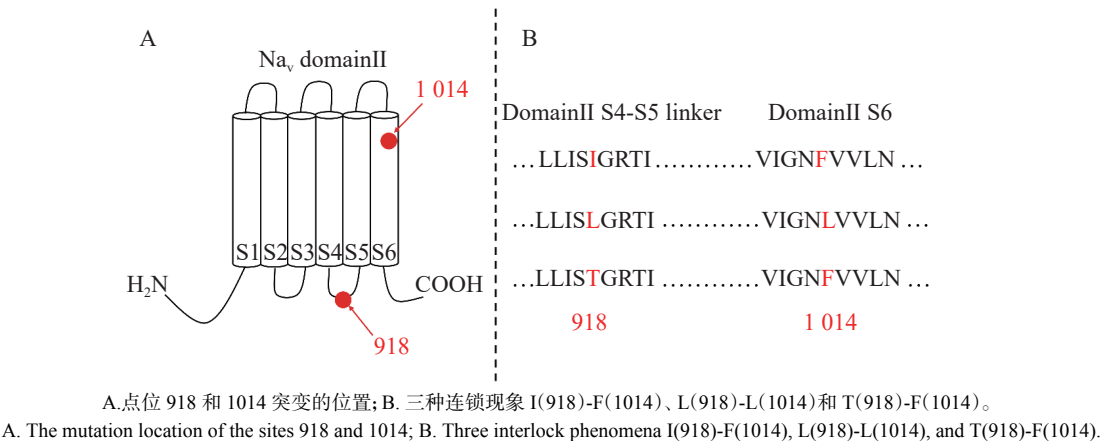


图 1 桃蚜位点 918 和 1014 处三种连锁模式

Fig. 1 Three interlock patterns at the sites 918 and 1014 from the *Myzus persicae*

表 9 桃蚜田间种群钠离子通道 918 和 1014 点位
三种连锁模式的突变情况

Tab. 9 Mutation of three interlock patterns of sodium
channels at the sites 918 and 1014 from the
M. persicae field populations

种群	连锁模式	突变位置	虫数/头	突变数	突变频率/%
Popu	Interlock	Mutation	Insect	Mutation	Mutation
lation	patterns	in region	number	in number	frequency
海口	I-F			3	30
Hai	L-L		10	7	70
kou	T-F			0	0
儋州	I-F	DomainII		5	50
Dan	L-L	S4-S5	10	5	50
zhou	T-F	Linker,		0	0
		DomainII			
		S6			
三亚	I-F			4	40
San	L-L		10	5	50
ya	T-F			1	10

3 讨 论

本研究对海南省桃蚜田间种群进行三年持续的抗药性监测, 发现海口、三亚和儋州三个地区的桃蚜种群对高效氯氟氰菊酯的抗性水平最低, 而对联苯菊酯的抗性最高, 且整体抗药性水平呈上升趋势。对比海南其他害虫对拟除虫菊酯类药剂的抗性趋势, 袁琳琳等^[36]的研究结果显示海口、乐东和三亚种群的普通大蓟马对甲氰菊酯和氯菊酯的抗性也逐年增强, 这与本研究监测海南省桃蚜

对拟除虫菊酯类药剂的抗性趋势一致, 表明海南地区害虫对拟除虫菊酯类药剂的抗性普遍呈增强态势。同时, 陈青等^[37]发现海南崖城和金江两地区豇豆蚜虫种群对三氟氯氰菊酯和氰戊菊酯的抗性倍数也达到中等水平。汤秋玲等^[38]在 2011—2014 年共监测了中国 11 个省市 62 个桃蚜田间种群, 发现这些种群对高效氯氰菊酯抗性倍数为最高 472 倍, 对氯菊酯产生了 15.3 倍至 123 倍的中高等抗性水平, 对溴氰菊酯和联苯菊酯也产生不同程度的抗性, 抗药性也呈现逐年上升趋势。

从分子机制的角度来看, 昆虫电压门控钠离子通道氨基酸的突变会导致昆虫对拟除虫菊酯类药剂的敏感性降低^[39]。本研究检测 2022 年三个桃蚜田间种群的钠离子通道 Domain II 区域发现, 海南三个地区两个经典氨基酸突变位点 918 与 1014 同样出现“I-F、T-F、L-L”突变连锁现象, 与 Wang 等^[34]在桃蚜上发现的三种连锁形式一致, 这个结果表明桃蚜突变连锁现象并非偶然, 具有普遍性。结合 2022 年三个种群生测数据来看, 不同突变连锁情况对菊酯类药剂有选择性抗药性。海口、儋州、三亚对联苯菊酯 LC₅₀ 分别为 951.704、135.599、126.377 mg·L⁻¹, 而“L-L”连锁突变频率分别为 70%、50%、50%, 二者变化趋势一致。三个种群对溴氰菊酯 LC₅₀ 分别为 278.746、303.838、189.402 mg·L⁻¹, 而“I-F”连锁形式突变频率分别为 30%、50%、40%, 二者变化趋势也一致。同样, 三个种群对高效氯氟氰菊酯的抗性趋势与“T-F”连

锁形式突变频率变化趋势也相同。因此,不同突变连锁形式可能会对菊酯药剂具有针对性抗性,但这一结果还需使用电生理技术进一步验证。

MacKenzie 等^[40]在加拿大桃蚜种群发现 I935M 和 I936V 突变,并且电生理实验证明 I936V 突变能够影响钠通道的药剂敏感性^[41]。然而,本研究在海南种群中并未发现 F979S、I935M 和 I936V 等突变情况,可能是由于地理位置和对药剂的抗性倍数不同。在 2022 年三个桃蚜田间种群中并未 *TipE* 基因突变,原因可能是其序列具有高度保守性,Li^[42]发现昆虫 *TipE* 是一个非常保守的基因家族。使用哺乳动物 β 亚基和昆虫钠通道辅助亚基的序列形成的系统发育树中,桃蚜 *TipE* 与同目昆虫的 *TipE* 单独聚为一支^[43]。这些结果都表明了桃蚜辅助亚基 *TipE* 基因具有高度保守性。

综上所述,桃蚜对拟除虫菊酯类药剂的抗性发展是一个复杂的过程,涉及田间用药实践、分子机制及环境因素的多重影响。目前桃蚜对菊酯类药剂抗性呈现上升趋势,还应在防治过程中采取综合管理策略。为延缓桃蚜对拟除虫菊酯类药剂的抗性发展,在防治实践中应采取综合防治策略。首先,应避免单一药剂的频繁使用,转而采用轮换用药和混合用药的方式,以降低桃蚜对特定药剂的抗药性选择压力。目前,三个种群对高效氯氟氰菊酯抗性水平最低,其中海口种群对高效氯氟氰菊酯抗性呈下降趋势,因此建议轮换使用高效氯氟氰菊酯来控制桃蚜种群数量。其次,可结合低毒、低残留的高效农药进行防控,并通过测定桃蚜及其天敌的耐药性,筛选出对天敌影响较小但对桃蚜高效的适宜药剂浓度^[44]。此外,矿物油喷雾剂的应用也值得推广。矿物油喷雾剂通过物理作用机制(如形成油膜)可有效减少桃蚜种群数量,同时阻断病毒传播途径^[45]。在农业防治方面,轮作制度、抗性品种选育及田间卫生管理等手段可有效降低桃蚜种群基数。生物防治方面,桃蚜的天敌(如寄生蜂和瓢虫)在控制桃蚜种群中发挥了重要作用。例如,异色瓢虫和龟纹瓢虫对桃蚜具有较强的捕食能力,而菜叶蜂(俗称小菜蜂)等寄生蜂也能显著减少桃蚜种群数量^[46]。这些生物防治方法不仅对环境友好,还能实现桃蚜种群的持续控制。另外,本研究提出桃蚜“L-L”、“I-F”和“T-F”三种连锁突变形式与不同菊酯药剂的抗

性水平呈现一致的变化趋势这一新的见解,可为进一步研究桃蚜对菊酯药剂抗性机制提供新的思路。

参考文献:

- [1] Van Emden H F, Eastop V F, Hughes R D, et al. The ecology of *Myzus persicae*[J]. *Annual Review of Entomology*, 1969, 14(1): 197–270. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.14.010169.001213>
- [2] 何石兰. 海南琼北蔬菜病虫害发生与农药使用调查[J]. *热带农业科学*, 2022, 42(12): 98–105. <https://doi.org/10.12008/j.issn.1009-2196.2022.12.016>
- [3] Fingu-mabola J C, Bawin T, Francis F. Direct and indirect effect via endophytism of entomopathogenic fungi on the fitness of *Myzus persicae* and its ability to spread PLRV on tobacco[J]. *Insects*, 2021, 12(2): 89. <https://doi.org/10.3390/insects12020089>
- [4] Eigenbrode S D, Ding H J, Shiel P, et al. Volatiles from potato plants infected with potato leafroll virus attract and arrest the virus vector, *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae)[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2002, 269(1490): 455–460. <https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1909>
- [5] Gray S, Gildow F E. Luteovirus-aphid interactions[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2003, 41(1): 539–566. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.012203.105815>
- [6] Kanavaki O M, Margaritopoulos J T, Katis N I, et al. Transmission of *Potato virus Y* in Tobacco plants by *Myzus persicae nicotianae* and *M. persicae* s. str.[J]. *Plant Disease*, 2006, 90(6): 777–782. <https://doi.org/10.1094/PD-90-0777>
- [7] Frantz J D, Gardner J, Hoffmann M P, et al. Greenhouse screening of *Capsicum* accessions for resistance to green peach aphid (*Myzus persicae*)[J]. *HortScience*, 2004, 39(6): 1332–1335. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.6.1332>
- [8] 孙瑞红, 姜莉莉, 武海斌, 等. 中国桃蚜防治药剂及抗药性发展[J]. *农药*, 2020, 59(1): 1–5. <https://doi.org/10.16820/j.cnki.1006-0413.2020.01.001>
- [9] 郁晓梅. 高效氯氟氰菊酯对菜青虫和桃蚜的防治效果及其影响因素研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [10] Bass C, Puinean A M, Zimmer C T, et al. The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2014, 51: 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.05.003>
- [11] Devonshire A L, Foster G N, Sawicki R M. Peach - potato aphid, *Myzus persicae* (Sulz.), resistant to organophosphorus and carbamate insecticides on potatoes in Scotland[J]. *Plant Pathology*, 1977, 26(2): 60–62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1977.tb01024.x>
- [12] Mazzoni E, Cravedi P. Analysis of insecticide - resistant *Myzus persicae* (Sulzer) populations collected in Italian peach orchards[J]. *Pest Management Science*, 2002, 58(9): 975–980. <https://doi.org/10.1002/ps.564>
- [13] Kwon D H, Choi B R, Lee S W, et al. Characterization of carboxylesterase-mediated pirimicarb resistance in

- Myzus persicae*[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2009, 93(3): 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2008.12.001>
- [14] Fontaine S, Caddoux L, Brazier C, et al. Uncommon associations in target resistance among French populations of *Myzus persicae* from oilseed rape crops[J]. *Pest Management Science*, 2011, 67(8): 881–885. <https://doi.org/10.1002/ps.2224>
- [15] 高希武, 郑炳宗, 曹本钧. 北京及河北廊坊地区桃蚜对拟除虫菊酯类杀虫剂抗性研究[J]. *农药*, 1993(2): 8–9. <https://doi.org/10.16820/j.cnki.1006-0413.1993.02.003>
- [16] 顾春波, 王刚, 王开运, 等. 我国西南烟区桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer) 的抗药性水平[J]. *植物保护学报*, 2006, 33(1): 77–80. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-7518.2006.01.016>
- [17] 宫亚军, 王泽华, 石宝才, 等. 北京地区不同桃蚜种群的抗药性研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4385–4394. <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2011.21.007>
- [18] 李艳琼, 赵临宇, 陆星星, 等. 玉溪菜区桃蚜种群对 6 种常用杀虫剂的抗药性分析[J]. *农学学报*, 2015, 5(11): 30–35. <https://doi.org/10.11923/j.issn.2095-4050.cjas15020014>
- [19] Li Y, Xu Z F, Shi L, et al. Insecticide resistance monitoring and metabolic mechanism study of the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae), in Chongqing, China[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2016, 132: 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.11.008>
- [20] Tang Q L, Ma K S, Hou Y M, et al. Monitoring insecticide resistance and diagnostics of resistance mechanisms in the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) in China[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2017, 143: 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2017.09.013>
- [21] 李文红, 李添群, 杨丽娟, 等. 贵州菜蚜对杀虫剂的敏感性监测[J]. *应用昆虫学报*, 2020, 57(4): 868–876. <https://doi.org/10.7679/j.issn.2095-1353.2020.089>
- [22] 赵斌荣, 田晓曦, 柴军发, 等. 西蓝花田桃蚜的室内药剂筛选及田间药效评价[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(3): 547–554. <https://doi.org/10.6048/j.issn.1001-4330.2023.03.004>
- [23] Dong K, Du Y Z, Rinkevich F, et al. Molecular biology of insect sodium channels and pyrethroid resistance[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2014, 50: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.03.012>
- [24] 王举梅, 李兵, 沈卫德. 菊酯类杀虫剂和昆虫的抗药性关系研究进展[J]. *浙江农业科学*, 2010(3): 570–575. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0528-9017.2010.03.049>
- [25] Matsuo T, Itaya N, Mizutani T, et al. 3-Phenoxy- α -cyano-benzyl esters, the most potent synthetic pyrethroids[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1976, 40(1): 247–249. <https://doi.org/10.1080/00021369.1976.10862034>
- [26] Davies T E, O'reilly A O, Field L M, et al. Knockdown resistance to DDT and pyrethroids: from target - site mutations to molecular modelling[J]. *Pest Management Science*, 2008, 64(11): 1126–1130. <https://doi.org/10.1002/ps.1617>
- [27] Silver K S, Song W Z, Nomura Y, et al. Mechanism of action of sodium channel blocker insecticides (SCBIs) on insect sodium channels[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2010, 97(2): 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2009.09.001>
- [28] Farnham A W, Murray A W A, Sawicki R M, et al. Characterization of the structure - activity relationship of *kdr* and two variants of *super - kdr* to pyrethroids in the housefly (*Musca domestica* L.)[J]. *Pesticide Science*, 1987, 19(3): 209–220. <https://doi.org/10.1002/ps.2780190306>
- [29] Milani R. Mendelian behavior of resistance to the knock-down action of DDT and correlation between knock-down and mortality in *Musca domestica* L[J]. *Rendiconti-Istituto Superiore di Sanita*, 1956, 19(11): 1107–1143.
- [30] Burton M J, Mellor I R, Duce I R, et al. Differential resistance of insect sodium channels with *kdr* mutations to deltamethrin, permethrin and DDT[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2011, 41(9): 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2011.05.004>
- [31] Vais H, Atkinson S, Eldursi N, et al. A single amino acid change makes a rat neuronal sodium channel highly sensitive to pyrethroid insecticides[J]. *FEBS Letters*, 2000, 470(2): 135–138. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(00\)01305-3](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(00)01305-3)
- [32] Ingles P J, Adams P M, Knipple D C, et al. Characterization of voltage-sensitive sodium channel gene coding sequences from insecticide-susceptible and knockdown-resistant house fly strains[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 1996, 26(4): 319–326. [https://doi.org/10.1016/0965-1748\(95\)00093-3](https://doi.org/10.1016/0965-1748(95)00093-3)
- [33] Williamson M S, Martinez-torres D, Hick C A, et al. Identification of mutations in the housefly *para*-type sodium channel gene associated with knockdown resistance (*kdr*) to pyrethroid insecticides[J]. *Molecular and General Genetics MGG*, 1996, 252: 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF02173204>
- [34] Wang H, Duan W B, Gao R B, et al. Unique post - translational modifications diversify the sodium channels in peach aphid (*Myzus persicae* [Sulzer])[J]. *Pest Management Science*, 2021, 77(10): 4521–4529. <https://doi.org/10.1002/ps.6489>
- [35] Makita N, Shirai N, Wang D W, et al. Cardiac Na⁺ channel dysfunction in Brugada syndrome is aggravated by β_1 -subunit[J]. *Circulation*, 2000, 101(1): 54–60. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.101.1.54>
- [36] 袁琳琳, 潘雪莲, 陆容材, 等. 海南普通大蓟马对拟除虫菊酯药剂抗性监测及钠通道突变检测[J]. *植物保护*, 2023, 49(3): 60–67. <https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2022062>
- [37] 陈青, 卢芙蓉. 海南豇豆蚜对敌敌畏、三氟氯氰菊酯、辛硫磷和氰戊菊酯的敏感性测定[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(13): 179–181. <https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.2009-0418>
- [38] 汤秋玲, 马康生, 高希武. 蔬菜蚜虫抗药性现状及抗性治理策略[J]. *植物保护*, 2016, 42(6): 11–20. <https://doi.org/10.3969/j.issn.05291542.2016.06.002>

- [39] Bass C, Nauen R. The molecular mechanisms of insecticide resistance in aphid crop pests[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2023, 156: 103937. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2023.103937>
- [40] Mackenzie T D B, Arju I, Poirier R, et al. A genetic survey of pyrethroid insecticide resistance in aphids in New Brunswick, Canada, with particular emphasis on aphids as vectors of *Potato virus Y*[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111(3): 1361–1368. <https://doi.org/10.1093/jee/toy035>
- [41] Usherwood P N R, Davies T G E, Mellor I R, et al. Mutations in DIIS5 and the DIIS4–S5 linker of *Drosophila melanogaster* sodium channel define binding domains for pyrethroids and DDT[J]. *FEBS Letters*, 2007, 581(28): 5485–5492. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.10.057>
- [42] Li J, Waterhouse R M, Zdobnov E M. A remarkably stable *TipE* gene cluster: evolution of insect *Para* sodium channel auxiliary subunits[J]. *BMC Evolutionary Biology*, 2011, 11: 337. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-11-337>
- [43] 林芳菲. 禾谷缢管蚜 RSC1 阳离子通道基因和钠离子通道辅助亚基基因初步研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [44] Mohammed A A, Hatcher P E. Combining entomopathogenic fungi and parasitoids to control the green peach aphid *Myzus persicae*[J]. *Biological Control*, 2017, 110: 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2017.03.012>
- [45] Ateyyat M. Selectivity of four insecticides to woolly apple aphid, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) and its sole parasitoid, *Aphelinus mali* (Hald.)[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2012, 16(8): 1060–1064.
- [46] Tamaki G. Spring populations of the green peach aphid on peach trees and the role of natural enemies in their control[J]. *Environmental Entomology*, 1973, 2(2): 186–191. <https://doi.org/10.1093/ee/2.2.186>

Resistance monitoring and voltage-gated sodium channel mutation analysis of *Myzus persicae* against pyrethroids in Hainan

Zhao Chenyang[#], Qiu Xinyao, Li Fen, Wu Shaoying^{*}

(Sanya Nanfan Institute, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China)

Abstract: *Myzus persicae* is a globally distributed polyphagous pest that can cause severe damage to a variety of economic crops. To assess the resistance levels of field populations of *M. persicae* to pyrethroid insecticides in Hainan Province, resistance of *M. persicae* to pyrethroid insecticides was monitored in Haikou, Danzhou, and Sanya from 2021 to 2023. The leaf-dip method was used to determine the sensitivity of *M. persicae* to lambda-cyhalothrin, deltamethrin, bifenthrin, and permethrin. The results showed that the field populations in all the three regions exhibited the lowest resistance to lambda-cyhalothrin and the highest resistance to bifenthrin, with an overall increasing trend in resistance levels over time. In 2021, the Sanya population showed the lowest resistance to lambda-cyhalothrin, with the LC_{50} value being $41.992 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The Haikou population exhibited the most significant increase in resistance to bifenthrin, with the resistance ratio rising from 7.35-fold in 2021 to 85.32-fold in 2023, and the LC_{50} value reaching $2085.829 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in 2023. Analysis of mutations in the sodium ion channel Domain II region and the auxiliary subunit *TipE* revealed that no mutations occurred in the *TipE* gene in the Haikou, Danzhou, and Sanya populations in 2022. However, mutation of three interlock patterns (I-F, T-F, L-L) was observed at the classical mutation sites 918 and 1014. Among these, the L-L pattern was the most frequent, reaching 70%, 50%, and 50% in the respective populations. The mutation of three interlock patterns showed consistent trends with the resistance levels to different pyrethroid insecticides. These findings reveal the current resistance status and mutation profiles of *M. persicae* field populations in Hainan, providing important references for the scientific formulation of resistance management strategies and materials for further research into the mechanisms of pyrethroid resistance in *M. persicae*.

Keywords: *Myzus persicae*; pyrethroid; resistance monitoring; mutation detection

(责任编辑:叶 静)