



柑桔红蜘蛛田间种群药剂敏感性快速诊断方法^{*}

彭敏珊^{1,2**} 刘家莉¹ 董楠楠² 曾鑫年^{1***}

(1. 华南农业大学植物保护学院, 广东昆虫行为调控工程技术研究中心, 广州 510000; 2. 惠州学院, 惠州 516000)

摘要 【目的】明确柑桔红蜘蛛 *Panonychus citri* 敏感种群对果园常用杀虫杀螨剂的敏感性水平及差异, 并建立柑桔红蜘蛛对这些杀虫杀螨剂的敏感基线, 最终形成柑桔红蜘蛛田间种群药剂敏感性的快速诊断方法, 以期在柑桔红蜘蛛的化学防治中提供精准选药的理论科学依据。【方法】采用叶片浸渍法测定 10 种杀虫杀螨剂对柑桔红蜘蛛敏感品系的毒力水平, 并用死亡概率值法计算得到 LC_{50} 和 LC_{99} 值。以 $2 \times LC_{99}$ 值作为诊断剂量备选浓度, 并设置相应的诊断剂量浓度梯度进行验证试验, 选取柑桔红蜘蛛死亡率为 100% 的浓度值作为诊断剂量浓度。根据毒力回归曲线和诊断剂量法制定柑桔红蜘蛛诊断试剂盒敏感性等级评价标准。【结果】10 种杀虫杀螨剂的诊断剂量阿维菌素、丁氟螨酯、联苯肼酯、乙螨唑、螺螨酯、螺虫乙酯、炔螨特、哒螨灵、毒死蜱和苦参碱分别为 550、400、700、650、3 300、2 000、850、350、550 和 950 mg/L。诊断试剂盒抗性评价标准为死亡率 $\geq 95\%$, 敏感状态; 死亡率 88%-95%, 敏感性下降状态; 死亡率 $< 88\%$, 非敏感状态。【结论】研究所得诊断剂量浓度可以通过测定柑桔红蜘蛛田间种群死亡率, 快速评估柑桔红蜘蛛田间种群对杀虫杀螨剂的敏感水平, 为今后快速、精准选择高效的杀虫杀螨剂而指导田间用药提供了新方法。

关键词 柑桔红蜘蛛; 诊断剂量; 药剂敏感性; 评价标准

Rapid determination of the pesticide sensitivity of *Panonychus citri* populations in the field

PENG Min-Shan^{1,2**} LIU Jia-Li¹ DONG Nan-Nan² ZENG Xin-Nian^{1***}

(1. College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangdong Insect Behavior Regulation Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510000, China; 2. Huizhou University, Huizhou 516000, China)

Abstract [Aim] To develop a relatively quick method to detect the sensitivity of *Panonychus citri* to commonly used insecticides and acaricides in orchards, thereby optimizing the use of these chemicals. [Methods] The toxicity of 10 insecticides and acaricides to sensitive strains of *P. citri* were determined using the leaf impregnation method. LC_{50} and LC_{99} values were calculated using the probability of death method. Using twice the LC_{99} value as the alternative diagnostic concentration, and setting a corresponding diagnostic concentration gradient for validation experiments, the concentration that achieved 100% mortality was selected as the diagnostic dose. Based on the toxicity regression curve and diagnostic dose method, evaluation criteria for pesticide sensitivity for a *P. citri* diagnostic kit were developed. [Results] The diagnostic doses of 10 insecticides and acaricides, abamectin, cyflumetofen, bifenthrin, etoxazole, spiromeclofen, spirotetramat, prochloraz, pyridaben, chlorpyrifos and matrine, were 550, 400, 700, 650, 3 300, 2 000, 850, 350, 550 and 950 mg/L, respectively. The diagnostic kit classifies populations in terms of resistance as follows; those with a mortality rate $\geq 95\%$ are classified as sensitive, those with a mortality rate between 88% and 95% are classified as having reduced sensitivity, and those with a mortality rate $< 88\%$ are classified as resistant. [Conclusion] The diagnostic kit developed in this study can quickly

*资助项目 Supported project: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0202005)

**第一作者 First author, E-mail: 947037109@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zengxn@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-03-06; 接受日期 Accepted: 2025-01-24

assess the sensitivity of *P. citri* populations to insecticides and acaricides in the field by measuring the mortality rate. This provides a way to quickly select the most effective insecticides and acaricides for controlling a given *P. citri* population at a particular point in time.

Key words *Panonychus citri*; diagnostic dose; acaricidal sensitivity; evaluation criterion

柑桔红蜘蛛 *Panonychus citri* 属节肢动物 Arthropoda、蛛形纲 Arachnida、蜱螨目 Acarina、叶螨科 Tetranychidae、全爪螨属 *Panonychus* (Mcgegor, 1948), 又称为柑桔全爪螨、瘤皮红蜘蛛, 属于完全变态类螨虫。柑桔红蜘蛛是一种世界性分布的多食性害螨, 主要为害柑橘类果树, 还可取食芸香科、豆科等 112 种寄主植物 (Migeon *et al.*, 2010)。在国外主要分布在日本、伊朗、美国、西班牙、印度、南孟加拉、巴西等柑橘产地 (Hu *et al.*, 2010; Döker and Kazak, 2012; Faez *et al.*, 2018; Zanardi *et al.*, 2018; Pan *et al.*, 2020)。

柑桔红蜘蛛主要以成螨、若螨或幼螨聚集在柑橘的果实、嫩枝和叶片上, 并用其口针刺吸食汁液危害, 被害叶片呈现出白色斑点, 叶背分布许多蜕皮壳, 导致果实变小, 柑橘质量和产量下降 (Van Leeuwen *et al.*, 2015; 容利等, 2022)。我国柑橘园中针对柑桔红蜘蛛的治理主要为化学防治, 目前杀虫杀螨剂的种类主要有有机磷类 (毒死蜱等)、拟除虫菊酯类 (联苯菊酯等)、新型季酮酸类 (螺螨酯等) 和大环内酯类 (阿维菌素等) (张昆等, 2013; 丁天波, 2014; 沈晓敏, 2017; Liao *et al.*, 2018)。由于杀虫杀螨剂的使用频率高, 以及柑桔红蜘蛛生命周期短、繁殖力强等原因, 使得柑橘园每年用于防治柑桔红蜘蛛的杀螨剂喷洒次数高达 12-15 次。长此以往, 会导致柑桔红蜘蛛产生抗药性和交互抗性, 亦会引发农药残留以及土壤污染等诸多问题。

在柑桔红蜘蛛抗药性的研究中多以室内试验为主, 对柑桔红蜘蛛药剂敏感性的测定方法有玻片浸渍法、叶片残毒法以及喷雾法, 对于操作人员的操作水平有较高的要求且需要耗费较长的时间, 较难在田间推广。因此, 本研究第一通过开展不同地区田间种群对 10 种杀虫杀螨剂的敏感性研究, 比较不同地区田间种群对同种杀虫

杀螨剂的敏感性差异, 同一地区田间种群对 10 种杀虫杀螨剂的敏感性差异, 有针对性地对田间种群精准施药提供指导建议, 以减少杀虫杀螨剂的使用; 第二通过毒力回归曲线和诊断剂量法制定田间种群敏感性等级评价标准; 第三通过确定 10 种杀虫杀螨剂的诊断剂量浓度并制备成诊断试剂盒, 使得试验过程得到优化, 提高检测速度; 第四开展不同地区田间种群对 10 种杀虫杀螨剂的敏感性水平测定。本研究结果形成的诊断试剂盒可更加科学、精准并且快速确定待检测地区的柑桔红蜘蛛对杀虫杀螨剂的抗性水平, 指导田间科学施药, 合理制定柑桔红蜘蛛田间种群的化学防治措施。

1 材料与方法

1.1 供试螨源

柑桔红蜘蛛敏感种群 (SS): 2019 年 4 月采自华南农业大学没有喷洒过药剂的柑橘树上, 在室内不接触任何药剂的情况下在健康的柑橘苗上连续饲养至今。饲养条件: 温度 (25±1) °C, 相对湿度 60%±10%, 光周期 14 L : 10 D。

柑桔红蜘蛛田间种群, 详情见表 1。本文实验所用田间种群均采自表 1, 结果分析中用采集地简称代表具体的田间种群。

1.2 供试药剂

本文所用药剂如表 2 所示。

1.3 供试方法

1.3.1 毒力测定 将杀虫杀螨剂原药溶解于丙酮中配成母液, 用 0.1%TW-80 水溶液将母液稀释成不同的浓度梯度, 从稀释好的药液中取 100 mL 放入 150 mL 的玻璃瓶中用于毒力测定。用 0 号毛笔挑取柑桔红蜘蛛敏感品系雌成螨转移到豆叶上, 每片豆叶 30 头, 放置 1 min 后放

表 1 柑桔红蜘蛛雌成螨田间种群采集地信息

Table 1 Information on the collection locations of female adult mites of *Panonychus citri* populations in the field

采集地 Collection locations	北纬 North latitude	东经 East longitude	简称 Abbreviation
广州市增城区果园 Orchard in Zengcheng District, Guangzhou City	23°23'47"	113°49'6"	Zengcheng, ZC
广州市从化区果园 Orchard in Conghua District, Guangzhou City	23°45'19"	113°47'55"	Conghua, CH
惠州市山前村果园 Orchard in Shanqian Village, Huizhou City	23°21'45"	114°19'41"	Shanqian, SQ
惠州市杨村果园 Orchard in Yang Village, Huizhou City	23°25'52"	114°28'16"	Yangcun, YC
惠州市平潭镇果园 Orchard in Pingtan Town, Huizhou City	23°25'31"	114°36'08"	Pingtang, PT
惠州市横河镇果园 Orchard in Henghe Town, Huizhou City	23°33'93"	114°13'81"	Henghe, HH
河源市东源县柠檬产业园 Lemon Industry Park in Dongyuan County, Heyuan City	24°5'50"	114°45'43"	Heyuan, HY
清远市佛冈县果园 Orchard in Fogang County, Qingyuan City	24°3'4"	113°43'57"	Qingyuan, QY
云南省隆阳区果园 Orchard in Longyang District, Yunnan Province	24°58'19"	98°53'9"	Yunnan, YN
广西省南宁市青秀区果园 Citrus Garden in Qingxiu District, Nanning City, Guangxi Province	22°48'20"	108°38'3"	Qingxiuqu, QXC
广西省南宁市双桥村果园 Orchard in Shuangqiao Village, Nanning City, Guangxi Province	23°1'59"	108°18'25"	Shuangqiaocun, SQC
广西省南宁市腾飞村果园 Orchard in Tengfei Village, Nanning City, Guangxi Province	23°1'59"	108°18'21"	Tengfeicun, TFC
梅州市大埔县果园 Orchard in Dapu County, Meizhou City	24°18'27"	116°53'34"	Dabu, DB

表 2 供试药剂基本信息

Table 2 Basic information of the tested drug

供试药剂 Test drug	英文名 English name	生产商 Producer
99.2%毒死蜱原粉 99.2% Chlorpyrifos powder	Chlorpyrifos	浙江新农化有限公司 Zhejiang Xin Nonghua Co., LTD.
99.0%螺虫乙酯原粉 99.0% Spirotetramat powder	Spirotetramat	湖北康宝泰精细化工有限公司 Hubei Kangbaotai Fine Chemical Co., LTD.
99.0%阿维菌素原粉 99.0% Abamectin powder	Abamectin	河北远成生物科技有限公司 Hebei Yuancheng Biotechnology Co., LTD.
98.0%螺螨酯原粉 98.0% Spiroxate powder	Spirodiclofen	常州天泽化工有限公司 Changzhou Tianze Chemical Co., LTD.
97.0%乙螨唑原粉 97.0% Etoxazole powder	Etazazole	湖北艺康源化工有限公司 Hubei Yikangyuan Chemical Co., LTD.
99.0%哒螨灵原粉 99.0% Pyridaben powder	Pyridaben	广州苏鼎药业有限公司 Guangzhou Suding Pharmaceutical Co., LTD.
99.0%联苯肼酯原粉 99.0% Bifenazate powder	Bifenazate	陕西林奈生物化工有限公司 Shaanxi Linnaeus Biological Chemical Co., LTD.
90.0%炔螨特原粉 90.0% Propargite powder	Propargite	珠海乐泰药业有限公司 Zhuhai Letai Pharmaceutical Co., LTD.
96.0%丁氟螨酯原粉 96.0% Cyflumetofen powder	Cyflumetofen	北京百奥莱博科技有限公司 Beijing Biao Leibo Technology Co., LTD.
15.0%苦参碱液体 15.0% Matrine liquid	Matrine	瑞阳制药有限公司 Ruiyang Pharmaceutical Co., LTD.

入装有梯度浓度杀虫杀螨剂的玻璃瓶, 轻轻晃动 5-10 s, 使虫体接触杀虫杀螨剂, 取出后, 将虫体及其周围多余的药液用吸水纸迅速吸干, 置于光照培养箱(宁波江南仪器厂: RXZ-430D-LED)中[温度(25±1)℃, 相对湿度 60%, 光周期 14 L: 10 D], 1 和 24 h 后于便携式放大镜下用毛笔轻触螨体, 如果螨能正常活动或足能正常活动, 则视为存活, 反之则视为死亡, 并计算死亡率。对照组死亡率小于 10% 的为有效试验, 并校正死亡率。绘制毒力回归曲线, 获得毒力回归方程。

1.3.2 诊断剂量确定 利用毒力回归方程计算柑桔红蜘蛛死亡率在 99% 时所对应的致死浓度值 LC_{99} , 用 $2 \times LC_{99}$ 作为诊断剂量备选浓度, 并设置相应的诊断剂量浓度梯度进行验证试验, 最后选取柑桔红蜘蛛死亡率为 100% 的浓度值作为诊断剂量值。利用测出的平均死亡率拟合曲线, 将 $2 \times LC_{99}$ 浓度值代入拟合曲线中, 比较验证理论-实际死亡率。依据诊断剂量制备诊断试剂盒(图 1)。

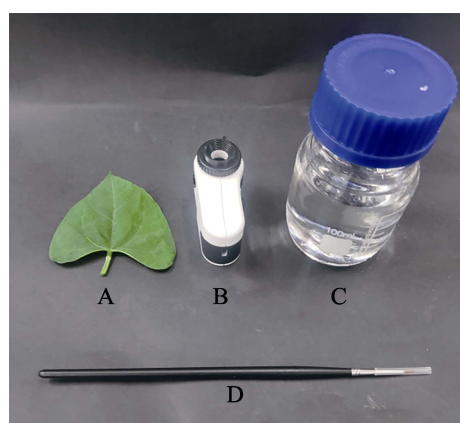


图 1 诊断试剂盒的构成

Fig. 1 Composition of diagnostic kit

A. 豆叶; B. 便携式放大镜; C. 玻璃瓶; D. 0 号毛笔。

A. Bean leaves; B. Portable magnifying glass;

C. Medicine; D. No. 0 brush.

1.3.3 柑桔红蜘蛛田间种群对诊断试剂盒验证

田间不同杀虫杀螨剂诊断试剂盒由豆叶、便携式放大镜、150 mL 玻璃瓶和 0 号毛笔的构成(图 1), 选择不同地区的柑桔红蜘蛛雌成螨种群, 对正常储存期内的 10 种诊断试剂盒进行田间验证试验。用 0 号毛笔挑取待测的柑桔红蜘蛛田间种群雌成螨转移到豆叶上, 放置 1 min 后放入含有诊断剂量的杀虫杀螨剂的玻璃瓶中晃

动 5-10 s, 使虫体接触杀螨剂, 每瓶 30 头, 观察 1 h 后检查柑桔红蜘蛛的死亡情况。死亡标准与供试方法中 1.3.1 一致, 以验证该诊断试剂盒对田间种群药剂敏感性的检测效果。

1.3.4 柑桔红蜘蛛诊断试剂盒敏感性等级评价标准的制定 参考我国棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的抗性倍数 ≤ 3 (敏感阶段); $3 <$ 抗性倍数 ≤ 5 (敏感性下降阶段); $5 <$ 抗性倍数 ≤ 10 (低水平抗性阶段); $10 <$ 抗性倍数 ≤ 40 (中等水平抗性阶段); $40 <$ 抗性倍数 ≤ 160 (高水平抗性阶段); 抗性倍数 > 160 (极高水平抗性阶段)(曾献英和吕双俊, 2004)。对应的棉铃虫的两种抗性监测方法的抗性分级标准如下(抗性倍数对应的抗性个体百分率): 敏感阶段: 0%-3%; 敏感性下降阶段: 6%-14%; 低水平抗性阶段: 15%-65%; 中等水平抗性阶段: 70%-85%; 高水平抗性阶段: 90%-95%; 极高水平抗性阶段: $> 95\%$ 。再根据柑桔红蜘蛛敏感品系测得的毒力回归曲线(24 h)和柑桔红蜘蛛田间种群诊断剂量法测得的诊断死亡率制定柑桔红蜘蛛诊断试剂盒敏感性等级评价标准, 重新划分敏感等级, 即敏感状态, 抗性倍数 < 3 ; 敏感性下降状态, $3 \leq$ 抗性倍数 < 5 ; 非敏感状态, 抗性倍数 ≥ 5 。抗性倍数(RR) = 田间种群 LC_{50} /敏感种群 LC_{50} (抗性倍数由室内生物测定所得)

1.3.5 柑桔红蜘蛛诊断试剂盒的田间应用 将柑桔红蜘蛛诊断试剂盒带至田间, 用 0 号毛笔挑取田间种群柑桔红蜘蛛雌成螨转移到豆叶上, 放置 1 min 后放入诊断剂量盒中轻轻晃动 5-10 s 后, 使得虫体接触杀螨剂, 取出后用吸水纸将虫体周围的液体吸干, 每瓶 30 头, 培养观察 1 h 后计算死亡率, 死亡标准与供试方法中 1.3.1 一致。再根据柑桔红蜘蛛诊断试剂盒的敏感性等级评价标准判定该地区柑桔红蜘蛛的敏感性水平。

1.4 数据分析

对柑桔红蜘蛛雌成螨实验数据采用 SPSS 25.0 进行分析, 通过 Probit-analysis 得到毒力回归方程, 并计算出 LC_{50} 和 LC_{99} 等数值, 相对抗性倍数为各杀虫杀螨剂对不同地区田间种群 LC_{50} 与敏感种群 LC_{50} 的比值。

2 结果与分析

2.1 10 种杀虫杀螨剂对柑桔红蜘蛛雌成螨的毒力测定

常用 10 种杀虫杀螨剂对柑桔红蜘蛛雌成螨敏感种群的 24 h 毒力如表 3 所示, 丁氟螨酯对柑桔红蜘蛛雌成螨毒力最强, LC_{50} 值为 0.56 mg/L; 苦参碱对柑桔红蜘蛛雌成螨的毒力较弱, LC_{50} 值为 13.85 mg/L; 毒力大小顺序为: 丁氟螨酯>乙螨唑>阿维菌素>炔螨特>联苯肼酯>螺虫乙酯>毒死蜱>螺螨酯>哒螨灵>苦参碱。常用 10 种杀虫杀螨剂对柑桔红蜘蛛雌成螨敏感种群的 1 h 毒力如表 4 所示, 回归曲线方程的斜率值均大于 2, 说明数值的分散程度相对较小。丁氟螨酯对柑桔红蜘蛛雌成螨毒力最强。10 种杀虫杀螨剂 1 h 的 LC_{99} 如表 4 所示。

2.2 诊断剂量的确定

由表 5 可知, 阿维菌素、丁氟螨酯、联苯肼酯、乙螨唑、螺螨酯、螺虫乙酯、炔螨特、哒螨

灵、毒死蜱和苦参碱对应的 $2\times LC_{99}$ 值分别为: 537.80、343.25、679.68、687.75、3 220.81、1 860.22、837.54、330.29、482.66 和 894.71 mg/L, 并以此为参照设定相应的浓度梯度开展验证实验(表 5)。结果发现, 阿维菌素、丁氟螨酯、联苯肼酯、乙螨唑、螺螨酯、螺虫乙酯、炔螨特、哒螨灵、毒死蜱和苦参碱能使柑桔红蜘蛛死亡率达到 100%对应的浓度值分别为: 550、400、700、650、3 300、2 000、850、350、550 和 950 mg/L (表 6)。此外, 从 10 种杀虫杀螨剂的验证浓度得到的线性拟合曲线看出, 阿维菌素、丁氟螨酯、联苯肼酯、乙螨唑、螺螨酯、螺虫乙酯、炔螨特、哒螨灵、毒死蜱和苦参碱的 $2\times LC_{99}$ 值对应的理论死亡率分别为: 95.33%、98.13%、98.34%、101.36%、97.82%、94.12%、101.95%、95.21%、93.88%和 95.34% (图 2)。

2.3 诊断试剂盒的田间种群验证试验

诊断试剂盒田间种群验证结果如表 7 所示, 阿维菌素处理下, CH 地区和 ZC、YC、SQ 3 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群平均死亡率之间存

表 3 10 种杀虫杀螨剂对柑桔红蜘蛛雌成螨敏感种群毒力测定结果 (叶片浸渍法, 24 h)

Table 3 The toxicity test results of 10 insecticides and acaricides to female adult mites of *Panonychus citri* (leaf impregnation method, 24 h)

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	毒力回归方程 Toxicity regression equation ($y=ax+b$)	斜率± 标准误 Slope±SE	相关系数 (R) Correlation coefficient (R)	卡方值 (χ^2) Chi square value (χ^2)	概率 Probability	LC_{50} (95%置信区间) (mg/L) LC_{50} (95% CI) (mg/L)
阿维菌素 Abamectin	$y=2.40x - 0.30$	2.40 ± 0.45	0.98	0.61	0.90	1.33 (0.96-1.68)
丁氟螨酯 Cyflumetofen	$y=1.31x - 1.05$	1.31 ± 0.24	0.99	0.36	0.95	0.56 (0.33-0.86)
联苯肼酯 Bifenazate	$y=1.66x - 1.05$	1.66 ± 0.34	0.98	0.69	0.88	4.32 (2.95-6.08)
乙螨唑 Etoxazole	$y=1.80x - 0.15$	1.80 ± 0.38	0.97	0.90	0.83	1.21 (0.87-1.68)
螺螨酯 Spirodiclofen	$y=1.48x - 1.59$	1.48 ± 0.37	0.98	0.37	0.95	11.74 (8.16-19.47)
螺虫乙酯 Spirotetramat	$y=1.32x - 1.04$	1.32 ± 0.27	0.98	0.54	0.91	6.13 (3.71-9.33)
炔螨特 Propargite	$y=1.70x - 0.23$	1.70 ± 0.37	0.98	0.48	0.92	1.36 (0.91-1.88)
哒螨灵 Pyridaben	$y=3.20x - 3.52$	3.23 ± 0.65	0.96	1.10	0.78	12.32 (10.16-14.68)
毒死蜱 Chlorpyrifos	$y=1.75x - 1.73$	1.75 ± 0.38	0.98	0.57	0.90	9.74 (7.03-13.89)
苦参碱 Matrine	$y=5.75x - 6.57$	5.75 ± 1.64	0.96	0.53	0.91	13.86 (12.61-15.95)

CI: Confidence interval. 表 4, 表 8 同。The same for Table 4 and Table 8.

表 4 10 种杀虫杀螨剂对柑桔红蜘蛛雌成螨敏感种群毒力测定结果 (叶片浸渍法, 1 h)
Table 4 The toxicity test results of 10 insecticides and acaricides to female adult mites of *Panonychus citri* (leaf impregnation method, 1 h)

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	毒力回归方程 Toxicity regression equation ($y=ax+b$)	斜率± 标准误 Slope±SE	相关系数 (R) Correlation coefficient (R)	卡方值 (χ^2) Chi square value (χ^2)	概率 Probability	LC ₅₀ (95%置信 区间) (mg/L) LC ₅₀ (95% CL) (mg/L)	LC ₉₉ (95%置信 区间) (mg/L) LC ₉₉ (95% CI) (mg/L)
阿维菌素 Abamectin	$y=3.82x - 6.94$	3.82±0.88	0.95	0.93	0.82	66.06 (56.29-76.97)	268.90 (171.98-852.69)
丁氟螨酯 Cyflumetofen	$y=2.75x - 3.81$	2.75±0.53	0.98	0.78	0.86	24.39 (19.30-29.93)	171.63 (100.02-550.20)
联苯肼酯 Bifenazate	$y=2.61x - 4.27$	2.61±0.49	0.97	0.98	0.81	43.53 (34.07-54.11)	339.84 (194.32-1 096.81)
乙螨唑 Etoxazole	$y=3.56x - 6.71$	3.56±0.75	0.96	0.88	0.83	76.42 (64.78-90.32)	343.88 (217.04-1 018.92)
螺螨酯 Spirodiclofen	$y=3.58x - 9.17$	3.58±0.75	0.97	0.74	0.87	361.27 (303.67-423.28)	1610.40 (1 035.45-4 497.89)
螺虫乙酯 Spirotetramat	$y=2.62x - 5.44$	2.62±0.53	0.97	0.94	0.81	120.02 (96.65-152.38)	930.11 (498.59-3 804.84)
炔螨特 Propargite	$y=4.13x - 8.49$	4.13±0.88	0.98	0.55	0.91	114.32 (99.35-132.36)	418.77 (280.39-1 084.13)
哒螨灵 Pyridaben	$y=3.54x - 5.53$	3.54±0.75	0.99	0.28	0.97	36.38 (30.51-42.72)	165.15 (105.10-480.48)
毒死蜱 Chlorpyrifos	$y=3.17x - 5.23$	3.17±0.62	0.95	1.42	0.70	44.54 (36.73-53.42)	241.33 (149.27-684.98)
苦参碱 Matrine	$y=4.70x - 10.12$	4.70±1.05	0.99	0.11	0.99	143.01 (126.50-163.05)	165.15 (105.10-480.48)

表 5 柑桔红蜘蛛雌成螨敏感种群对不同杀虫杀螨剂诊断剂量梯度设置
Table 5 Diagnostic dose gradient setting of different insecticides and acaricides for female
adult mites of *Panonychus citri* sensitive population

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	2×LC ₉₉ (mg/L)	浓度 (mg/L) Concentration (mg/L)
阿维菌素 Abamectin	537.80	400, 450, 500, 550, 600
丁氟螨酯 Cyflumetofen	343.25	200, 250, 300, 350, 400
联苯肼酯 Bifenazate	679.68	500, 550, 600, 650, 700
乙螨唑 Etoxazole	687.75	500, 550, 600, 650, 700
螺螨酯 Spirodiclofen	3 220.80	2 900, 3 000, 3 100, 3 200, 3 300
螺虫乙酯 Spirotetramat	1 860.22	1 600, 1 700, 1 800, 1 900, 2 000
炔螨特 Propargite	837.54	650, 700, 750, 800, 850
哒螨灵 Pyridaben	330.28	200, 250, 300, 350, 400
毒死蜱 Chlorpyrifos	482.66	350, 400, 450, 500, 550
苦参碱 Matrine	894.71	750, 800, 850, 900, 950

在显著差异 ($F=5.56$, $df=3$, $P<0.05$)。丁氟螨酯处理下, ZC、YC、SQ 和 CH 4 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群的平均死亡率不存在显著差

异 ($F=0.45$, $df=3$, $P>0.05$)。联苯肼酯处理下, ZC 地区和 YC 地区的田间种群平均死亡率存在显著差异 ($F=2.76$, $df=3$, $P<0.05$)。乙

表 6 柑桔红蜘蛛雌成螨敏感种群对不同杀虫杀螨剂诊断剂量梯度室内验证试验
Table 6 Indoor validation experiment on the diagnostic dose gradient of different insecticides and acaricides in the sensitive population of female adult mites of *Panonychus citri*

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	浓度 (mg/L) Concentration (mg/L)	重复次数 (n) Number of repetitions (n)	平均死亡率±标准误 (%) Average mortality rate±SE (%)
阿维菌素 Abamectin	400	3	72.00±2.31
	450		84.00±2.31
	500		93.33±1.33
	550		100.00±0.00
	600		100.00±0.00
丁氟螨酯 Cyflumetofen	200	3	76.00±2.31
	250		88.00±4.00
	300		94.67±3.53
	350		98.67±1.33
	400		100.00±0.00
	500		69.33±3.53
	550		81.33±2.67
联苯肼酯 Bifenazate	600	3	89.33±3.53
	650		93.33±2.67
	700		100.00±0.00
乙螨唑 Etoxazole	500	3	81.33±3.53
	550		84.00±4.62
	600		94.67±1.33
	650		100.00±0.00
	700		100.00±0.00
螺螨酯 Spirodiclofen	2 900	3	78.67±5.04
	3 000		85.33±4.81
	3 100		94.67±1.67
	3 200		97.33±1.33
	3 300		100.00±0.00
螺虫乙酯 Spirotetramat	1 600	3	78.67±4.81
	1 700		82.67±4.81
	1 800		94.67±1.33
	1 900		97.33±2.67
	2 000		100.00±0.00
炔螨特 Propargite	650	3	68.00±4.62
	700		80.00±8.32
	750		90.67±5.33
	800		98.67±1.33
	850		100.00±0.00

续表 6 (Table 6 continued)

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	浓度 (mg/L) Concentration (mg/L)	重复次数 (n) Number of repetitions (n)	平均死亡率±标准误 (%) Average mortality rate±SE (%)
哒螨灵 Pyridaben	200	3	78.67±4.81
	250		85.33±4.81
	300		94.67±1.33
	350		100.00±0.00
	400		100.00±0.00
毒死蜱 Chlorpyrifos	350	3	76.00±15.70
	400		81.33±5.33
	450		92.00±2.30
	500		98.67±1.33
	550		100.00±0.00
苦参碱 Matrine	750	3	76.00±6.11
	800		82.67±3.53
	850		90.67±5.33
	900		98.67±1.33
	950		100.00±0.00

螨唑处理下, ZC、YC、SQ 和 CH 4 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群平均死亡率不存在显著差异 ($F = 1.33, df = 3, P > 0.05$)。螺螨酯处理下, ZC、YC、SQ 和 CH 4 个种群平均死亡率不存在显著差异 ($F = 0.15, df = 3, P > 0.05$)。螺虫乙酯处理下, ZC、YC、SQ 和 CH 4 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群平均死亡率不存在显著差异 ($F = 0.59, df = 3, P > 0.05$)。快螨特处理下, CH 地区和另外 3 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群平均死亡率存在显著差异 ($F = 4.86, df = 3, P < 0.05$)。哒螨灵处理下, ZC、YC、SQ 和 CH 4 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群平均死亡率不存在显著差异 ($F = 1.80, df = 3, P > 0.05$)。毒死蜱处理下, ZC、YC、SQ 和 CH 4 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群平均死亡率不存在显著差异 ($F = 1.27, df = 3, P > 0.05$)。苦参碱处理下, ZC、YC、SQ 和 CH 4 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群平均死亡率不存在显著差异 ($F = 0.67, df = 3, P > 0.05$)。

2.4 诊断试剂盒评价敏感性等级标准

首先, 使用生物测定法测定柑桔红蜘蛛田间种群和实验室敏感种群的死亡率, 对不同柑桔红

蜘蛛田间种群的敏感性进行确定, 然后使用诊断试剂盒测定柑桔红蜘蛛田间种群的死亡率, 根据 YS、ZH、HY、QY、CH 5 个柑桔红蜘蛛田间种群在诊断试剂盒下的死亡率范围, 确定诊断试剂盒敏感性等级标准。结果如下:

对于 YS、ZH、HY、QY、CH 5 个柑桔红蜘蛛田间种群中处于敏感性状态 (抗性倍数 < 3) 的柑桔红蜘蛛用诊断试剂盒测得这些柑桔红蜘蛛田间种群的死亡率结果显示, 这些柑桔红蜘蛛田间种群的平均死亡率的最低值为 95.00%; YS、ZH、HY、QY、CH 5 个柑桔红蜘蛛田间种群中处于非敏感性状态 (抗性倍数 ≥ 5) 的柑桔红蜘蛛诊断试剂盒测得这些柑桔红蜘蛛田间种群的死亡率结果显示, 这些柑桔红蜘蛛田间种群的平均死亡率的最高值为 86.87%; YS、ZH、HY、QY、CH 5 个柑桔红蜘蛛田间种群中敏感性下降阶段 ($3 \leq$ 抗性倍数 < 5) 的柑桔红蜘蛛诊断剂量盒测得这些柑桔红蜘蛛田间种群的死亡率结果显示, 这些柑桔红蜘蛛田间种群的平均死亡率最低值为 88.00%, 最高值为 94.67%。检测的柑桔红蜘蛛雌成螨田间种群 50 组数据中, 在诊断剂量法测定下的平均死亡率 $\geq 95\%$, 即为敏感性状态, 在这 50 组数据当中一致率达到 98%;

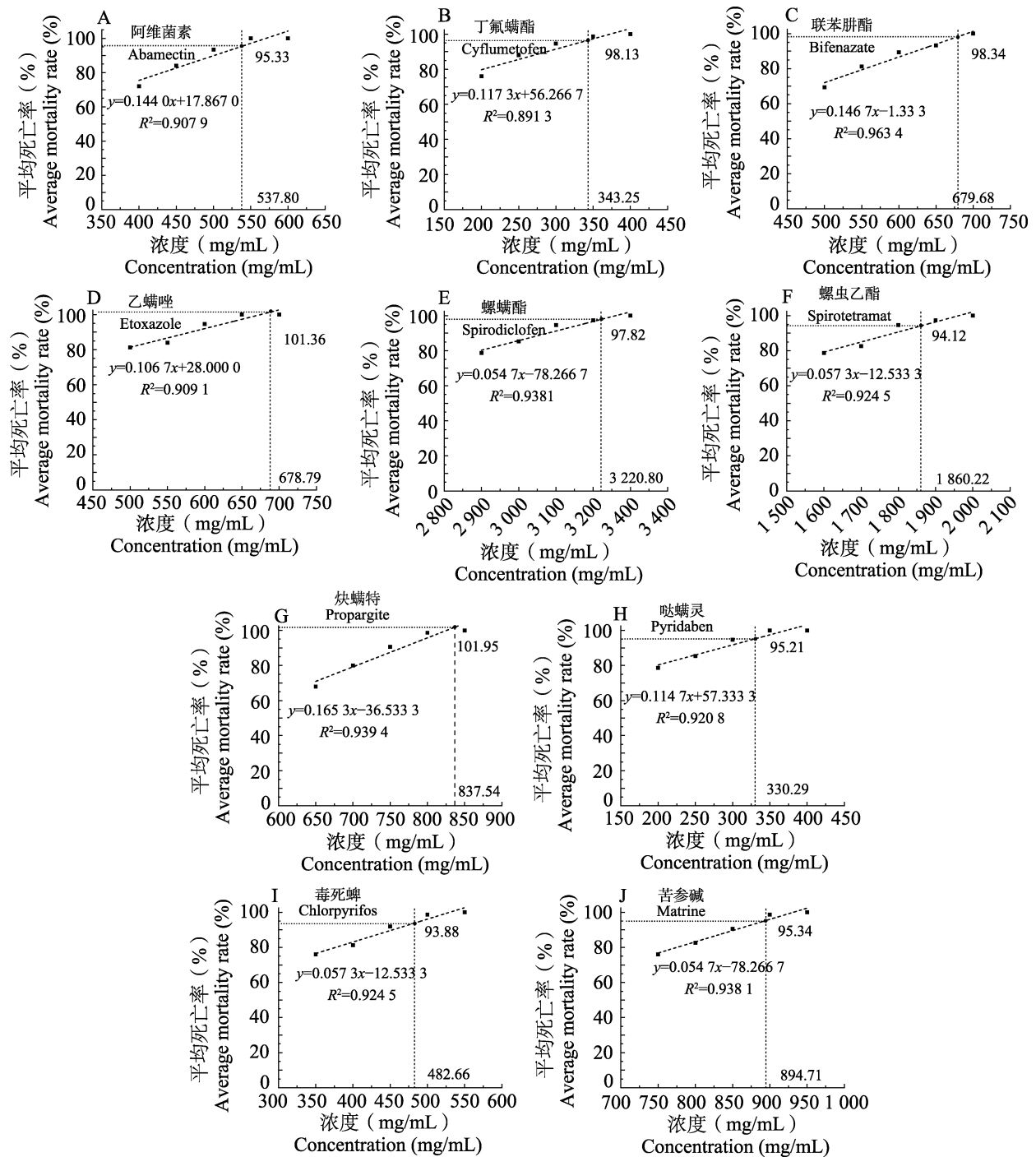


图2 柑桔红蜘蛛雌成螨敏感种群对不同杀虫杀螨剂各自 $2 \times LC_{99}$ 浓度对应死亡率线性拟合曲线

Fig. 2 Linear fitting curves of mortality rates corresponding to $2 \times LC_{99}$ concentrations of different insecticides and acaricides respectively for *Panonychus citri* female mite sensitive population

A. 阿维菌素; B. 丁氟螨酯; C. 联苯腈酯; D. 乙螨唑; E. 螺螨酯; F. 螺虫乙酯;
G. 炔螨特; H. 哒螨灵; I. 毒死蜱; J. 苦参碱。

A. Abamectin; B. Cyflumetofen; C. Bifenazate; D. Etoxazole; E. Spiroxate; F. Pirotetramat;
G. Propargite; H. Pyridaben; I. Chlorpyrifos; J. Matrine.

诊断剂量法测定下的平均死亡率 < 88.00%, 为非敏感状态, 在这 50 组数据当中一致率达到

100%; 诊断剂量法测定下的平均死亡率介于 86.67%-94.67%, 为敏感性下降状态, 在这 50 组

表 7 柑桔红蜘蛛雌成螨田间种群对不同杀虫杀螨剂诊断剂量田间验证试验结果

Table 7 The field validation test results of diagnostic dose values of different insecticides and acaricides for female adult mites of *Panonychus citri* in the field population

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	诊断剂量值 (mg/L) Diagnostic dose (mg/L)	重复次数 (n) Number of repetitions (n)	种群 Population	平均死亡率±标准误 (%) Average mortality rate±SE (%)
阿维菌素 Abamectin	550	3	ZC	88.00±2.31 b
			YC	86.67±3.53 b
			SQ	89.33±1.33 b
			CH	77.33±1.33 a
丁氟螨酯 Cyflumetofen	400	3	ZC	96.00±2.31 a
			YC	94.67±3.53 a
			SQ	94.67±2.31 a
			CH	92.00±4.00 a
联苯肼酯 Bifenazate	700	3	ZC	90.67±2.67 a
			YC	98.67±1.33 b
			SQ	92.00±2.31 ab
			CH	96.00±2.31 ab
乙螨唑 Etoxazole	650	3	ZC	66.67±2.67 a
			YC	62.67±2.31 a
			SQ	68.00±2.31 a
			CH	65.33±1.33 a
螺螨酯 Spirodiclofen	3 300	3	ZC	86.67±3.53 a
			YC	89.33±3.53 a
			SQ	88.00±2.31 a
			CH	89.33±3.53 a
螺虫乙酯 Spirotetramat	2 000	3	ZC	66.67±2.67 a
			YC	72.00±2.31 a
			SQ	69.33±2.67 a
			CH	69.33±3.53 a
炔螨特 Propargite	850	3	ZC	58.67±1.33 a
			YC	62.67±2.67 a
			SQ	64.00±4.00 a
			CH	77.33±1.33 b
哒螨灵 Pyridaben	350	3	ZC	90.67±1.33 a
			YC	96.00±2.31 a
			SQ	94.67±1.33 a
			CH	96.00±2.31 a
毒死蜱 Chlorpyrifos	550	3	ZC	88.00±4.62 a
			YC	88.00±2.31 a
			SQ	85.33±2.67 a
			CH	93.33±1.33 a
苦参碱 Matrine	950	3	ZC	100.00±0.00 a
			YC	98.67±1.33 a
			SQ	98.67±1.33 a
			CH	100.00±0.00 a

表中种群名称缩写代表的不同地区的柑桔红蜘蛛雌成螨田间种群, 详情见表 1。表中同列数据后不同字母表示显著差异 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法检验)。下表同。

The abbreviation of population names in the table represent the field populations of female adult mites of *Panonychus citri* in different regions, details see Table 1. Data with different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

数据当中一致率达到 100% (表 8)。

因此, 诊断试剂盒敏感性评价标准为死亡率

$\geq 95\%$, 为敏感状态; 死亡率 88%-95%, 为敏

感性下降状态; 死亡率 $< 88\%$, 为非敏感状态。

表 8 柑桔红蜘蛛成螨田间种群生物测定 (24 h) 与诊断剂量法 (1 h) 测定结果

Table 8 The results of field population bioassay (24 h) and diagnostic dose method (1 h) for female adult mites of *Panonychus citri*

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	种群 Population	斜率± 标准误 Slope±SE	LC ₅₀ (95%置信 区间) (mg/L) LC ₅₀ (95% CI) (mg/L)	卡方值 (χ^2) Chi square value (χ^2)	抗性倍 数 (RR) Resistance multiple (RR)	诊断死 亡率 (%) Diagnostic mortality rate (%)	敏感性 Sensitiveness
阿维菌素 Abamectin	SS	2.40±0.45	1.33 (0.96-1.68)	0.61	-	100.00	-
	YC	1.90±0.39	7.14 (5.04-9.56)	1.31	5.37	86.67	非敏感 Sensitive
	ZC	1.84±0.37	6.71 (4.61-9.04)	0.57	5.06	88.00	下降 Decline
	HY	1.71±0.34	7.93 (5.39-10.99)	1.13	5.98	86.67	非敏感 Non sensitive
	SQ	1.43±0.28	5.76 (3.59-8.47)	1.24	4.34	89.33	下降 Decline
	CH	2.02±0.39	9.46 (6.65-12.45)	1.27	7.23	77.33	非敏感 Non sensitive
丁氟螨酯 Cyflumetofen	SS	1.31±0.24	0.56 (0.33-0.86)	0.36	-	100.00	-
	YC	1.86±0.34	1.45 (1.01-1.96)	0.15	2.58	96.00	敏感 Sensitive
	ZC	1.60±0.31	1.43 (0.93-2.02)	0.23	2.54	96.00	敏感 Sensitive
	HY	1.64±0.32	1.81 (1.25-2.57)	0.42	3.22	94.67	下降 Decline
	SQ	1.64±0.30	1.82 (1.24-2.58)	0.55	3.24	94.67	下降 Decline
	CH	1.64±0.31	1.70 (1.16-2.37)	0.36	3.02	95.00	下降 Decline
联苯肼酯 Bifenazate	SS	1.66±0.34	4.32 (2.95-6.08)	0.69	-	100.00	-
	YC	2.51±0.51	6.60 (4.98-8.21)	0.19	1.53	98.67	敏感 Sensitive
	ZC	3.31±0.64	18.57 (15.17-21.96)	0.48	4.30	90.67	下降 Decline
	HY	1.78±0.38	14.39 (9.97-19.65)	0.96	3.33	94.67	下降 Decline
	SQ	3.84±0.76	18.12 (15.42-21.01)	0.58	4.19	92.00	下降 Decline
	CH	2.69±0.52	10.40 (7.92-12.80)	0.95	2.41	96.00	敏感 Sensitive
乙螨唑 Etoxazole	SS	1.80±0.38	1.21 (0.87-1.68)	0.90	-	100.00	-
	YC	1.81±0.38	19.52 (13.95-26.87)	0.48	16.12	62.67	非敏感 Non sensitive
	ZC	2.88±0.54	13.37 (10.52-16.22)	0.90	11.04	66.67	非敏感 Non sensitive
	HY	5.88±1.19	28.99 (26.17-31.99)	0.52	23.93	53.33	非敏感 Non sensitive
	SQ	2.67±0.52	11.97 (9.39-14.76)	1.37	9.89	68.00	非敏感 Non sensitive
	CH	2.69±0.53	15.33 (12.18-18.94)	1.19	12.65	65.33	非敏感 Non sensitive
螺螨酯 Spirodiclofen	SS	1.48±0.37	11.74 (8.16-19.47)	0.37	-	100.00	-
	YC	2.75±0.58	55.07 (43.73-67.57)	1.02	4.69	89.33	下降 Decline
	ZC	2.69±0.52	66.36 (51.22-84.53)	0.44	5.65	86.87	非敏感 Non sensitive
	HY	2.36±0.57	76.66 (57.51-97.22)	0.73	6.53	85.33	非敏感 Non sensitive
	SQ	3.59±0.75	66.66 (54.97-77.64)	0.17	5.68	88.00	下降 Decline
	CH	4.29±0.84	56.14 (48.05-63.89)	0.85	4.78	89.33	下降 Decline

续表 8 (Table 8 continued)

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	种群 Population	斜率± 标准误 Slope±SE	LC ₅₀ (95%置信 区间) (mg/L) LC ₅₀ (95% CI) (mg/L)	卡方值 (χ^2) Chi square value (χ^2)	抗性倍 数 (RR) Resistance multiple (RR)	诊断死 亡率 (%) Diagnostic mortality rate (%)	敏感性 Sensitiveness
螺虫乙酯 Spirotetramat	SS	1.32±0.27	6.13 (3.71-9.33)	0.54	-	100.00	-
	YC	2.91±0.59	54.96 (44.20-66.66)	0.72	8.97	72.00	非敏感 Non sensitive
	ZC	3.65±0.68	73.71 (62.06-86.17)	0.47	12.03	66.67	非敏感 Non sensitive
	HY	3.32±0.69	62.32 (50.79-73.54)	0.25	10.17	68.00	非敏感 Non sensitive
	SQ	3.16±0.67	58.70 (47.77-69.98)	0.89	9.58	69.33	非敏感 Non sensitive
	CH	3.24±0.63	56.94 (46.22-67.60)	0.38	9.29	69.33	非敏感 Non sensitive
炔螨特 Propargite	SS	1.70±0.37	1.36 (0.91-1.87)	0.48	-	100.00	-
	YC	2.70±0.51	21.71 (16.73-26.67)	1.17	16.01	62.67	非敏感 Non sensitive
	ZC	2.04±0.39	25.18 (18.22-33.09)	0.12	18.57	58.67	非敏感 Non sensitive
	HY	2.48±0.52	24.32 (18.76-30.46)	0.89	17.93	61.33	非敏感 Non sensitive
	SQ	1.83±0.40	17.95 (12.36-24.20)	1.06	13.24	64.00	非敏感 Non sensitive
	CH	2.54±0.52	9.69 (7.50-12.07)	0.75	7.14	77.33	非敏感 Non sensitive
哒螨灵 Pyridaben	SS	3.23±0.65	12.32 (10.16-14.68)	1.10	-	100.00	-
	YC	1.46±0.42	29.68 (21.07-39.49)	0.62	2.41	96.00	敏感 Sensitive
	ZC	2.63±0.51	58.31 (44.44-71.98)	0.52	4.30	90.67	下降 Decline
	HY	3.93±0.77	36.99 (31.68-42.83)	0.40	3.00	95.00	下降 Decline
	SQ	2.96±0.60	42.09 (33.86-50.83)	0.32	3.42	94.67	下降 Decline
	CH	2.19±0.44	30.90 (23.04-39.95)	0.87	2.51	96.00	敏感 Sensitive
毒死蜱 Chlorpyrifos	SS	1.75±0.38	9.74 (7.03-13.89)	0.57	-	100.00	-
	YC	2.77±0.58	52.34 (41.14-63.86)	0.47	5.37	88.00	下降 Decline
	ZC	2.37±0.46	50.57 (38.28-63.97)	1.21	5.19	88.00	下降 Decline
	HY	4.19±0.83	57.11 (48.82-65.22)	0.99	5.86	86.87	非敏感 Non sensitive
	SQ	3.24±0.65	59.88 (49.12-71.21)	0.49	6.15	85.33	非敏感 Non sensitive
	CH	3.17±0.61	41.75 (34.05-49.83)	0.81	4.28	93.33	敏感 Sensitive
苦参碱 Matrine	SS	5.75±1.64	13.86 (12.61-15.96)	0.53	-	100.00	-
	YC	2.19±0.44	21.98 (16.42-28.41)	0.47	1.59	98.67	敏感 Sensitive
	ZC	6.01±1.08	14.47 (13.01-15.92)	0.67	1.04	100.00	敏感 Sensitive
	HY	5.17±0.99	15.78 (14.11-17.74)	0.68	1.14	98.67	敏感 Sensitive
	SQ	4.01±0.86	16.94 (14.54-19.57)	0.88	1.22	98.67	敏感 Sensitive
	CH	5.28±1.02	14.83 (13.19-16.53)	0.52	1.07	100.00	敏感 Sensitive

抗性倍数 (RR) = 田间种群 LC₅₀/敏感种群 LC₅₀ (抗性倍数由室内生物测定所得)。

Resistance multiple (RR) = Field population LC₅₀/Sensitive population LC₅₀ (resistance multiples obtained from indoor biological measurements).

2.5 诊断试剂盒的田间诊断敏感性

由表 9 可知, 阿维菌素对 8 个地区的柑桔红蜘蛛田间种群的毒杀效果差异不显著 ($F = 0.20$,

$df = 7$, $P > 0.05$), 平均死亡率介于 65.33%-77.33% 之间, 说明 8 个地区的田间种群对阿维菌素均处于非敏感状态。丁氟螨酯对 8 个地区田间种群的毒杀效果差异也不显著 ($F = 0.50$, $df = 7$, $P >$

0.05), 平均死亡率介于 89.33%-97.33%之间, 其中 TFC、QXQ、QY 和 YN 4 个地区的田间种群对丁氟螨酯处于敏感状态, 其他地区的田间种群对丁氟螨酯处于敏感性下降状态。联苯肼酯对 8 个地区的田间种群的毒杀效果差异显著 ($F = 2.68$, $df = 7$, $P < 0.05$), 平均死亡率介于 81.33%-97.33%之间, QXQ 和 DB 地区的田间种群对联苯肼酯处于非敏感状态, SQC、QY 和 YN 3 个地区的田间种群对联苯肼酯均处于敏感状态, 剩余的 3 个地区的田间种群对联苯肼酯处于敏感性下降状态。乙螨唑对 8 个地区的田间种群的毒杀效果差异显著 ($F = 1.90$, $df = 7$, $P < 0.05$), 平均死亡率介于 66.67%-94.67%之间, QXC、SQC、DB 和 QY 4 个地区的田间种群对乙螨唑处于敏感性下降状态, 其他地区的田间种群对乙螨唑处于非敏感状态。螺螨酯对 8 个地区的田间

种群的毒杀效果差异不显著 ($F = 0.78$, $df = 7$, $P > 0.05$), 平均死亡率介于 74.67%-93.33%之间, HH、SQC 和 DB 3 个地区的天剑种群对螺螨酯的敏感性均处于非敏感状态, 其他地区的田间种群对螺螨酯处于敏感性下降状态。螺虫乙酯对 8 个种群的毒杀效果差异显著 ($F = 1.82$, $df = 7$, $P < 0.05$), 平均死亡率介于 78.67%-93.33%之间, QY 和 YN 地区的田间种群对螺虫乙酯处于敏感性下降状态, 其余 6 个地区的田间种群对螺虫乙酯处于非敏感状态。炔螨特对 8 个地区的田间种群的毒杀效果差异显著 ($F = 2.56$, $df = 7$, $P < 0.05$), 平均死亡率介于 70.67%-94.67%之间, PT、SQC、TFC 和 QY 4 个地区的田间种群对炔螨特处于敏感性下降状态, 其他地区的田间种群对炔螨特处于非敏感状态。哒螨灵对 8 个地区的田间种群的毒杀效果差异显著 ($F = 1.41$, $df = 7$, $P <$

表 9 不同杀虫杀螨剂诊断试剂盒对不同柑桔红蜘蛛雌成螨田间种群的田间诊断死亡率情况 (%)

Table 9 Field diagnostic mortality rates of female adult mites of different female adult mites of *Panonychus citri* using diagnostic kits for different insecticides and acaricides (%)

杀虫杀螨剂 Insecticide and acaricide	HH	PT	SQC	TFC	QXQ	QY	YN	DB
阿维菌素 Abamectin	72.00±8.37 a	77.33±5.82 a	70.67±7.06 a	76.00±10.07 a	73.33±9.62 a	74.67±7.06 a	72.00±8.33 a	65.33±2.56 a
丁氟螨酯 Cyflumetofen	89.33±8.74 a	94.67±2.67 a	89.33±5.82 a	97.33±2.67 a	96.00±4.00 a	97.33±1.33 a	96.00±4.00 a	92.00±4.62 a
联苯肼酯 Bifenazate	89.33±7.06 ab	94.67±2.67 b	96.00±0.31 b	97.33±1.33 b	76.00±6.11 a	97.33±1.33 b	89.33±5.82 ab	81.33±7.06 ab
乙螨唑 Etoxazole	66.67±11.62 a	93.33±3.53 b	77.33±10.41 ab	92.00±6.11 ab	80.00±8.33 ab	94.67±2.67 b	90.67±5.82 ab	73.33±8.11 ab
螺螨酯 Spirodiclofen	74.67±8.11 a	89.33±5.33 a	86.67±11.39 a	92.00±8.00 a	90.67±7.42 a	93.33±2.67 a	93.33±4.81 a	86.67±5.82 a
螺虫乙酯 Spirotetramat	80.00±4.62 ab	85.33±4.81 ab	80.00±4.62 ab	78.67±4.81 ab	72.00±4.62 a	93.33±4.81 b	90.67±4.81 b	82.67±7.06 ab
炔螨特 Propargite	70.67±8.11 a	93.33±4.81 b	92.00±2.31 b	94.67±5.33 b	77.33±7.42 ab	94.67±3.53 b	86.67±7.42 ab	77.33±5.82 ab
哒螨灵 Pyridaben	72.00±8.33 a	86.67±11.00 ab	93.33±6.67 ab	97.33±2.67 b	92.00±4.00 ab	85.33±7.06 ab	85.33±5.82 ab	81.33±8.11 ab
毒死蜱 Chlorpyrifos	88.00±6.93 a	93.33±4.81 a	89.33±5.33 a	90.67±5.33 a	82.67±9.61 a	96.00±2.31 a	90.67±3.53 a	89.33±3.53 a
苦参碱 Matrine	93.33±2.67 a	98.67±1.33 b	98.67±1.33 b	100.00±0.00 b	100.00±0.00 b	98.67±1.33 b	98.67±1.33 b	96.00±2.31 ab

HH、PT、SQC、TFC、QXQ、QY、YN、DB 代表的不同地区的柑桔红蜘蛛雌成螨田间种群, 详情见表 1。

The field populations of female adult mites of *P. citri* represented by HH, PT, SQC, TFC, QXQ, QY, YN, and DB in different regions are detailed in Table 1.

0.05), 平均死亡率介于 72.00%-97.33%之间, TFC 地区的田间种群对哒螨灵处于敏感状态, SQC 和 QCQ 地区的田间种群对哒螨灵处于敏感性下降状态, 其他地区的田间种群对哒螨灵均处于非敏感状态。毒死蜱对 8 个种群的毒杀效果差异不显著 ($F=0.49$, $df=7$, $P>0.05$), 平均死亡率介于 82.67%-93.33%之间, QY 种群对毒死蜱处于敏感状态, QXQ 种群对毒死蜱处于非敏感状态, 剩下的 6 个种群对毒死蜱均处于敏感性下降状态。苦参碱对 8 个地区的田间种群的毒杀效果差异不显著 ($F=2.08$, $df=7$, $P>0.05$), 8 个地区的田间种群对苦参碱均处于敏感状态。

3 结论与讨论

本研究通过选取柑桔红蜘蛛死亡率为 100% 的浓度值作为诊断剂量, 得出 10 种杀虫杀螨剂的诊断剂量为: 阿维菌素 550 mg/L、丁氟螨酯 400 mg/L、联苯肼酯 700 mg/L、乙螨唑 650 mg/L、螺螨酯 3 300 mg/L、螺虫乙酯 2 000 mg/L、炔螨特 850 mg/L、哒螨灵 350 mg/L、毒死蜱 550 mg/L 和苦参碱 950 mg/L。诊断试剂盒抗性评价标准为: 敏感阶段, 平均死亡率 $\geq 95\%$; 敏感性下降阶段, 平均死亡率 88%-95%; 非敏感阶段, 平均死亡率 $< 88\%$ 。本研究开发的诊断试剂盒能够通过测定柑桔红蜘蛛田间种群的死亡率, 快速、准确地评估其对杀虫杀螨剂的敏感水平。这一方法为今后高效、精准地筛选和选择杀虫杀螨剂, 进而科学指导田间用药提供了新的技术手段。

诊断剂量法相对于传统的生物测定法更加简便以及快速, 可区分敏感个体和非敏感个体种群, 并能检测到种群中非敏感个体数量上的微小变化, 也有利于田间非敏感种群的早期诊断和评估治理措施是否有效。同时通过诊断剂量法可以快速获得害虫(螨)田间种群对不同药剂的敏感性差异, 有利于科学、高效的指导田间用药。但是并非所有学者均采用 $2\times LC_{99}$ 或者 $LC_{99.9}$ 作为最终诊断剂量值。例如, 范仁俊等(2014)研究苹果黄蚜 *Aphis citricolavander* 对啉虫脒敏感性的诊断剂量, 通过对苹果黄蚜敏感种群的室内毒

力测定, 获得毒力回归曲线, 并得到该种群对啉虫脒的 LC_{50} 、 LC_{60} 、 LC_{70} 、 LC_{80} 和 LC_{90} , 然后比较各处理实际死亡率与理论死亡率是否一致, 最后选择一致度最高的剂量值作为其诊断剂量; 王少丽等(2012)在开发联苯菊酯对烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的毒力试剂盒中, 通过对烟粉虱敏感种群进行室内毒力测定, 3 h 后计算死亡率并获得毒力回归曲线, 获得该种群的 LC_{50} 、 LC_{60} 以及 LC_{80} 作为备选诊断剂量, 通过进一步验证各浓度值的稳定性, 最终确定 LC_{60} (40.66 mg/L) 作为诊断剂量; 徐志峰等(2019)研究叶螨类害虫药剂敏感性的田间快速检测, 选择 LC_{99} 、 $2\times LC_{99}$ 以及杀虫杀螨剂田间推荐使用浓度(FRC), 根据这 3 个浓度在田间实际死亡率与田间防效之间的相关性, 确定诊断试剂盒的使用浓度。然而, 一些害虫(螨)的敏感种群较难获取, 导致其敏感基线较难获得, 而有学者采用平坡法, 在不需敏感基线的条件下就能获得害虫(螨)的诊断剂量, 即通过田间种群对不同杀虫剂的致死中量-斜率(LC/P)曲线, 该曲线会出现很多个平坡和拐点, 它们的数量和田间种群抗性基因的显隐性以及数量相关, 该曲线中致死剂量的转折点就是一个平坡, 即田间种群中一个同质组分到另一个同质组分, 当第 n 个平坡为杂合子和抗性纯合子的转折点时, 对应的剂量值即为诊断剂量值(傅建炜等, 2005)。

在本文研究中, 通过叶片浸渍法快速测定柑桔红蜘蛛敏感种群对不同杀虫杀螨剂的敏感性, 对柑桔红蜘蛛的死亡率进行统计分析, 得到毒力回归曲线以及 LC_{99} 值, 选择 $2\times LC_{99}$ 浓度值的前后 5-6 个浓度值进行验证试验, 最后选择导致柑桔红蜘蛛敏感种群 100% 死亡率的浓度值作为诊断剂量值, 结合 10 种杀虫杀螨剂验证浓度所得到的拟合曲线看出, 10 种杀虫杀螨剂的 $2\times LC_{99}$ 值对应的理论死亡率均高于 95%。

对于诊断试剂盒中诊断时间的确定, 不同的害虫(螨)对不同的药剂诊断剂量选择的诊断时间存在差异。王少丽等(2012)研究联苯菊酯对烟粉虱的诊断试剂盒中选择诊断时间为 3 h; 徐志峰等(2019)研究甲氰菊酯和丁氟螨酯对朱砂

叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 的诊断试剂盒选择的诊断时间为 4 h; 而在吕敏等 (2018) 研究烯啶虫胺和噻虫嗪对灰飞虱 *Laodelphax striatellus* 的选药试剂盒中, 在诊断剂量下观察了 1、2 以及 3 h 里灰飞虱的死亡率, 最后确定了 3 h 为最佳的诊断时间。在本研究中的诊断剂量选择了 1 h 作为诊断时间, 首先是因为在敏感种群对不同杀虫杀螨剂敏感性的快速检测中选择了 1 h 作为死亡率、毒力回归曲线以及 LC_{99} 的计算时间, 在诊断剂量的验证过程中均采用了 1 h 作为诊断时间; 其次, 1 h 的诊断时间相对较短, 更加便于诊断试剂盒的田间应用以及推广。

按照 WHO 更新的白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 的抗性评价标准: 敏感种群, 死亡率为 98%-100%; 可能抗性种群, 死亡率为 90%-97%; 抗性种群, 死亡率 < 90%。殷劭鑫等 (2016) 用诊断剂量法测得死亡率低于 80% 时是小菜蛾 *Plutella xylostella* 产生抗药性的标准。本研究中, 利用生物测定法和诊断剂量法测定相同状态下的柑桔红蜘蛛雌成螨, 根据两种试验方法的结果划分敏感性标准, 由此可知柑桔红蜘蛛平均死亡率 < 88% 时表明该种群对该药剂处于非敏感状态, 此时建议该地区选用其它非交互抗性的高效低毒药剂。

从本研究结果可知测定的广东省 8 个地区柑桔红蜘蛛对阿维菌素均处于非敏感状态, Döker 等 (2021) 研究表明土耳其的 9 个柑桔红蜘蛛种群对阿维菌素、乙螨唑、螺螨酯、哒螨灵均处于非敏感状态; 韩旸 (2021) 研究发现 2019-2020 年我国柑橘主要产区的柑桔红蜘蛛对阿维菌素的敏感性明显下降。由此可知, 阿维菌素在我国柑橘种植区是常用的药剂, 因此这 8 个地区应减少阿维菌素的使用频率。TFC、QXQ、QY、YN 4 个地区柑桔红蜘蛛对丁氟螨酯处于敏感状态, 其他 4 个地区则处于敏感性下降状态, 丁氟螨酯是一种新型酰基乙腈类手性杀螨剂, Feng 等 (2018) 研究发现丁氟螨酯对哒螨灵的交互抗性达到 63.8 倍。本研究中, HH、PT、SQC、DB 4 个地区柑桔红蜘蛛田间种群对哒螨灵均处于敏感性下降或非敏感状态, 因此这 4 个地区柑

桔红蜘蛛对丁氟螨酯处于敏感性下降状态可能是和哒螨灵产生了交互抗性。HH、SQC、QXQ、DB 4 个地区柑桔红蜘蛛对乙螨唑处于非敏感状态。因此 4 个地区柑桔红蜘蛛对乙螨唑处于非敏感状态的原因很有可能是乙螨唑自 2012 年进入中国市场后被广泛应用, 其次是柑桔红蜘蛛对噻螨酮有很强的抗性, 而乙螨唑和噻螨酮的作用方式一样, 产生了交互抗性。HH、SQC、DB 3 个地区柑桔红蜘蛛对螺螨酯处于非敏感状态, 其他 5 个地区对螺螨酯均处于敏感性下降状态。在我国很多地方柑桔红蜘蛛对螺螨酯均处于非敏感状态 (丁天波, 2014; Döker *et al.*, 2021; 陈婷玉, 2023), 在不同地区表现出较大的差异可能是不同柑橘园使用螺螨酯的频率不同。HH、QXQ、YN、DB 4 个地区柑桔红蜘蛛对炔螨特处于非敏感状态, 其他 4 个地区柑桔红蜘蛛对炔螨特则处于敏感性下降状态。柴文杰 (2023) 研究发现重庆潼南地区对炔螨特的敏感性较差, 不推荐其用来防治柑桔红蜘蛛。HH、PT、QY、YN、DB 5 个地区柑桔红蜘蛛对哒螨灵处于非敏感状态, SQC 和 QXQ 地区柑桔红蜘蛛对哒螨灵处于敏感性下降状态。Döker 等 (2021) 发现土耳其 9 个柑桔红蜘蛛种群对哒螨灵处于非敏感状态。罗秋娟 (2023) 研究发现四川、重庆、云南、江西及广西等 13 个地区的柑桔红蜘蛛对哒螨灵的敏感性很差, 和本文研究结果一致。HH 和 QXQ 地区柑桔红蜘蛛对毒死蜱处于非敏感状态, QY 地区柑桔红蜘蛛对毒死蜱处于敏感状态, 其他 5 个地区柑桔红蜘蛛对毒死蜱处于敏感性下降状态。钟锐 (2014) 研究发现重庆地区柑桔红蜘蛛对毒死蜱的抗性为敏感种群的 12 倍。毒死蜱用于螨类害虫防治已经很多年了, 长期不正确的使用导致很多地区对它敏感性极差, 因此不推荐用于螨类害虫的防治。除 HH 以外的 7 个地区, 柑桔红蜘蛛对苦参碱均处于敏感状态。苦参碱是植物源农药, 姜立 (2022) 研究发现苦参碱对黄果柑红蜘蛛的毒力效果很好, 因此苦参碱可以在田间用来防治柑桔红蜘蛛。QY 和 YN 地区柑桔红蜘蛛对螺虫乙酯处于敏感性下降状态, 其他 6 个地区柑桔红蜘蛛对螺虫乙酯处于非敏感状态。

Döker 等 (2021) 发现土耳其 9 个柑桔红蜘蛛种群对螺虫乙酯处于非敏感状态。SQC、TFC 和 QY 3 个地区柑桔红蜘蛛对联苯肼酯处于敏感状态, HH、PT 和 YN 3 个地区柑桔红蜘蛛对联苯肼酯处于敏感性下降状态, 其他两个地区柑桔红蜘蛛对联苯肼酯处于非敏感状态。韩旸 (2021) 研究发现我国 5 省 7 个地区柑桔红蜘蛛对联苯肼酯的敏感性都有不同程度的下降。因此通过诊断结果可知田间柑桔红蜘蛛种群对各杀螨剂的敏感状态, 为田间选用防效更好的药剂提供了参考, 本研究诊断试剂盒的方法具有快速、操作简单以及高效等优点, 但是检测杀螨剂范围有限, 后期需要扩充药剂品类。

参考文献 (References)

- Cheng TY, 2023. Acaricide resistance and underlying targets and metabolic resistance mechanisms in field populations of *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae). Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [陈婷玉, 2023. 柑橘全爪螨田间种群抗性监测及其潜在靶标和代谢抗性机制分析. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Chai WJ, 2023. Research on intelligent monitoring and rapid drug selection technology of *Panonychus citri* in Tongnan, Chongqing. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [柴文杰, 2023. 重庆潼南地区柑桔全爪螨智能监测与快速选药技术研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Ding TB, 2014. Identification and transcription profile analysis of P450 and its relative genes in citrus red mite, *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae). Doctor dissertation. Chongqing: Southwest University. [丁天波, 2014. 柑橘全爪螨细胞色素 P450 及其相关基因的鉴定和表达模式研究. 博士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Döker İ, Kazak C, 2012. Detecting acaricide resistance in Turkish populations of *Panonychus citri* McGregor (Acari: Tetranychidae). *Systematic and Applied Acarology*, 17(4): 368–377.
- Döker İ, Kazak C, Ay R, 2021. Resistance status and detoxification enzyme activity in ten populations of *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) from Turkey. *Crop Protection*, 141: 105488.
- Faez R, Fathipour Y, Shojaii M, Ahadiyat A, 2018. Effect of initial infestation on population fluctuation and spatial distribution of *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) on Thomson navel orange in Ghaemshahr, Iran. *Persian Journal of Acarology*, 7(3): 265–278.
- Fan RJ, Gao Y, Feng YT, Zhang YT, Yu Q, Liu ZF, Guo RF, Shi GC, Guo XJ, 2014. Diagnostic kit for rapid determination of acetamiprid sensitivity of *Aphis citricola* and its application method. China, Invention Patent, CN20131063-6371.4. 2014-03-26. [范仁俊, 高越, 封云涛, 张润祥, 庾琴, 刘中芳, 郭瑞峰, 史高川, 郭晓君, 2014. 快速测定苹果黄蚜对啉虫脒敏感性的诊断试剂盒及使用方法. 中国, 发明专利, CN20131063-6371.4. 2014-03-26.]
- Fu JW, Xu DM, Wu W, You MS, 2005. Preference of different vegetable insect pests to color. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(5): 532–533. [傅建伟, 徐敦明, 吴玮, 尤民生, 2005. 不同蔬菜害虫对色彩的趋性差异. 昆虫知识, 42(5): 532–533.]
- Feng KY, Wen X, He XL, Wei P, Shi L, Yang YW, He L, 2018. Resistant inheritance and cross-resistance of cyflumetofen in *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval). *Pesticide Biochemistry & Physiology*, 148: 28–33.
- Hu JF, Wang CF, Wang J, You Y, Chen F, 2010. Monitoring of resistance to spiroticlofen and five other acaricides in *Panonychus citri* collected from chinese citrus orchards. *Pest Management Science*, 66(9): 1025–1030.
- Han Y, 2021. Resistance monitoring in *Panonychus citri* McGregor and *Tetranychus urticae* Koch and risk assessment of *Tetranychus urticae* Koch to spiromesifen. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [韩旸, 2021. 柑橘全爪螨和二斑叶螨的抗药性监测及二斑叶螨对螺甲螨酯的抗性风险评估. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Jiang L, 2022. Study on the control effect and toxicity of several chemicals on *Panonychus citri* in huangguo citrus. Master dissertation. Sichuan: Sichuan Agricultural University. [姜立, 2022. 几种药剂对黄果柑红蜘蛛防治效果与毒力研究. 硕士学位论文. 四川: 四川农业大学.]
- Liao CY, Feng YC, Li G, Shen XM, Liu SH, Dou W, Wang JJ, 2018. Antioxidant role of PcGSTd1 in fenpropathrin resistant population of the *Panonychus citri* (McGregor). *Frontiers in Physiology*, 9: 314.
- Lü M, Zhao BH, Liu HA, Lu YR, Zhang CM, 2018. Study on the pesticides selection kit of *Laodelphax striatellus*. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 39(3): 91–94. [吕敏, 赵步洪, 刘怀阿, 陆玉荣, 张春梅, 2018. 灰飞虱配方选药试剂盒的研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 39(3): 91–94.]
- Luo QJ, 2023. Investigation of resistance and sensitive gene resources of *Panonychus citri* to pesticides. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [罗秋娟, 2023. 柑橘全爪螨抗药性和敏感基因资源调查. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Mcgegor EA, 1948. Classification, food plants, and distribution of

- the spider mites. *Journal of Economic Entomology*, 41(5): 684–687.
- Migeon A, Nougier E, Dorkeld F, 2010. Spider mites web: A comprehensive database for the Tetranychidae. <https://www1.montpellier.inra.fr/CBGP/spmweb/>.
- Pan D, Dou W, Yuan GR, Zhou QH, Wang JJ, 2020. Monitoring the resistance of the *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) to four acaricides in different *Citrus* orchards in China. *Journal of Economic Entomology*, 113(2): 918–923.
- Rong L, Lin FY, Meng GF, 2022. The occurrence and integrated control technology of *Panonychus citri* (McGregor). *Seed Science & Technology*, 40(12): 61–63. [容利, 林芳羽, 蒙干芳, 2022. 浅谈柑橘红蜘蛛的发生与综合防治技术. 种子科技, 40(12): 61–63.]
- Shen JL, Wu YD, 1995. Insecticide Resistance of *Helicoverpa armigera* and Its Control. Beijing: China Agriculture Press. 190–230. [沈晋良, 吴益东, 1995. 棉铃虫抗药性及其治理. 北京: 中国农业出版社. 190–230.]
- Shen XM, 2017. Characterization and functional analysis of carboxylesterases in the citrus red mite, *Panonychus citri* (McGregor) (Acari: Tetranychidae). Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [沈晓敏, 2017. 柑橘全爪酸酯酶对甲氧菊酯解毒代谢功能的研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Van Leeuwen T, Tirry L, Yamamoto A, Nauen R, Dermauw W, 2015. The economic importance of acaricides in the control of phytophagous mites and an update on recent acaricide mode of action research. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121: 12–21.
- Wang SL, Zhang YJ, Tie MY, Hu XC, Xu BY, 2012. The kit and film glass tube for rapid detection of insecticide toxicity to *Bemisia tabaci*. China, Utility Model Patent, CN201120220-222.6. 2012-03-14. [王少丽, 张友军, 铁敏媛, 胡小超, 徐宝云, 2012. 用于快速检测杀虫剂对烟粉虱毒力的试剂盒及药膜玻璃管. 中国, 实用新型专利, CN201120220-222.6. 2012-03-14.]
- Xu ZF, He L, Hu Y, Liu J, Zhang MY, 2019. The field rapid detection kit and usage method for sensitivity of Tetranychidae micro pests. China, Invention Patent, CN201910460281.1. 2019-08-16. [徐志峰, 何林, 胡缘, 刘杰, 张梦宇, 2019. 叶螨类微小害虫敏感性田间快速检测试剂盒及使用方法. 中国, 发明专利, CN201910460281.1. 2019-08-16.]
- Yin SX, Zhang CN, Zhang YL, Li XC, 2016. Monitoring of resistance of Shaanxi diamondback moth to 9 insecticides. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 44(1): 102–110. [殷劭鑫, 张春妮, 张雅林, 李显春, 2016. 陕西小菜蛾对 9 种杀虫剂的抗药性监测. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 44(1): 102–110.]
- Zanardi OZ, Bordini GP, Franco AA, Morais MR, Yamamoto PT, 2018. Spraying pyrethroid and neonicotinoid insecticides can induce outbreaks of *Panonychus citri* (Trombidiformes: Tetranychidae) in *Citrus* groves. *Experimental & applied acarology*, 76(3): 339–354.
- Zeng XY, Lv SJ, 2004. Drug resistance and management of cotton bollworm. *China Cotton*, 2004(3): 44. [曾献英, 吕双俊, 2004. 棉铃虫的抗药性及其治理. 中国棉花, 2004(3): 44.]
- Zhang K, Ding TB, Yang JM, Dou W, Wang JJ, 2013. Pesticide susceptibility and carboxylesterase activity in two field populations of *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 362–367. [张昆, 丁天波, 杨爵铭, 豆威, 王进军, 2013. 柑橘全爪螨两个田间种群抗性监测及羧酸酯酶生化特性研究. 应用昆虫学报, 50(2): 362–367.]
- Zhong R, 2014. Differential proteomic study on the response of *Panonychus citri* to abamectin stress. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [钟锐, 2014. 柑橘全爪螨响应阿维菌素胁迫的差异蛋白质组学研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]