

# 基于植保无人机与复配药剂的芒果蓟马 绿色精准防控技术



王林惠<sup>1</sup> 谭永宏<sup>1</sup> 刘志壮<sup>1</sup> 杨 钰<sup>1</sup> 唐志好<sup>1</sup> 曾文定<sup>2</sup>  
潘海军<sup>1\*</sup> 何雄奎<sup>2,3\*</sup>

(1. 湖南科技学院智能制造学院, 永州 425199; 2. 中国农业大学三亚研究院, 海南 三亚 572019;  
3. 中国农业大学理学院, 北京 100193)

**摘要:** 为解决芒果蓟马防治中药剂抗性突出、施药精度不足的问题, 围绕精准施药与绿色防控技术创新, 选取0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈和1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺2种复配药剂, 采用叶管药膜法测定其对芒果蓟马成虫的室内毒力, 并利用大疆T40植保无人机开展田间飞防试验, 探索优势复配药剂及无人机协同飞防应用效果。结果表明:0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈和1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺对芒果蓟马均有较强毒力,  $LC_{50}$ 分别为10.72 mg/L和18.36 mg/L; 混用复配药剂对芒果蓟马的杀虫活性介于2种单一复配药剂之间,  $LC_{50}$ 为14.97 mg/L。嫩梢期田间飞防试验中, 0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈施用后1 d的校正防效超过80.00%, 药后3 d的校正防效可达94.97%, 持效性优于其他药剂处理; 药后7 d, 各药剂处理对芒果蓟马的校正防效均有所降低, 但仍保持在70.00%以上。表明本研究所用2种复配药剂对芒果蓟马均有较好的防效, 结合植保无人机施用可用于芒果蓟马的绿色防控。

**关键词:** 蓟马; 复配药剂; 叶管药膜法; 植保无人机; 防效评估

## Green and precision control of mango thrips using plant protection drones and compound pesticide formulations

Wang Linhui<sup>1</sup> Tan Yonghong<sup>1</sup> Liu Zhizhuang<sup>1</sup> Yang Yu<sup>1</sup> Tang Zhihao<sup>1</sup> Zeng Wending<sup>2</sup>  
Pan Haijun<sup>1\*</sup> He Xiongkui<sup>2,3\*</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199,  
Hunan Province, China; 2. Sanya Institute, China Agricultural University, Sanya 572019, Hainan Province,  
China; 3. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To address the prominent problems of pesticide resistance and insufficient application accuracy in mango thrips management, this study focused on innovation in precision application and green control technologies. Two compound formulations, 0.5% emamectin benzoate·4.5% chlorfenapyr and 1% oligosaccharins·10% bifenthrin·25% clothianidin, were selected, and their toxicity to adult mango thrips was determined using the leaf-tube pesticide film method. Field spray trials were conducted using the DJI T40 plant protection UAV to explore the effectiveness of dominant compound pesticides in combination with UAV-based application. The results showed that both compound formulations exhibited strong toxicity to mango thrips, with  $LC_{50}$  values of 10.72 mg/L and 18.36 mg/L, respectively. The

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2024JJ622, 2026JJ80562, 2023JJ50422), 湖南省教育厅科学研究项目(22A0574, 23B0761), 永州市指导性科技计划项目(2023YZ014, 2023YZ015)

\* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: yzphj1976@163.com, xiongkui@cau.edu.cn

收稿日期: 2025-06-20

insecticidal activity of the mixed compound formulation was intermediate between those of the two individual formulations, with an  $LC_{50}$  of 14.97 mg/L. In field trials, the 0.5% emamectin benzoate·4.5% chlorfenapyr treatment achieved a control efficacy exceeding 80.00% at one day after application and reaching 94.97% at three days post-application, showing better persistence than other treatments. Although efficacy declined by seven days after application, control levels remained above 70.00% across all treatments. These findings indicate that the two compound formulations used in this study offer effective control of mango thrips and that their integration with plant protection UAVs is feasible for green and precise management. These results provide technical support for precision pesticide application, chemical-use reduction, efficiency enhancement, and resistance management in mango cultivation.

**Key words:** thrips; compound pesticide; leaf-tube pesticide film method; plant protection drone; control efficacy evaluation

芒果种植区广泛分布在热带和亚热带地区,其中亚洲的芒果产量占全世界芒果产量的72.9%(Venkata Rami Reddy et al., 2018; Manhongo et al., 2021)。由于芒果分布区高温、高湿的气候特征,病虫害暴发频率高,成为芒果植保作业的难点与痛点(叶露等, 2021; 韩冬银等, 2023)。蓟马是为害亚洲芒果的最主要害虫之一,为害方式主要以口器插入芒果叶肉或果肉吮吸汁液,破坏内部组织和叶绿素细胞,进而影响其光合作用所需水分和营养的聚集(韩冬银等, 2019; 周炆, 2020)。芒果蓟马世代周期短,长期单一用药易使其产生抗药性,药剂防效下降(张暄翊等, 2022)。为延缓蓟马抗药性的增长,改善化学药剂对蓟马的防效,复配型药剂的应用越来越广泛(袁琳琳等, 2023)。张永芳等(2023)发现甲维盐与苦参碱复配后对豇豆蓟马的速效性好;沈登荣等(2020)研究结果表明吡虫啉与高效氯氟氰菊酯复配对石榴蓟马有显著增效作用;王胤等(2021)证实无机杀虫剂C610与乙基多杀菌素复配,在辣椒蓟马防治中具有减药增效的作用。这说明药剂的合理复配是克服蓟马抗药性的有效策略。因此,筛选和验证优良复配药剂对芒果蓟马的防治及抗药性管理具有重要意义。

植保无人机施药作为智能植保的重要体现,凭借其高效、灵活、操作简便、人药分离以及对作物损伤小等特点,愈发适应我国农业生产的需求(王胤等, 2021)。目前,全国植保无人机保有量已超过30万架,正逐步成为农作物病虫害绿色防控与统防统治的核心力量(何雄奎, 2020)。无人机施药在多种作物病虫害防治中表现出显著效果与智能化优势。如杨东辉(2020)研究发现,四旋翼无人机低量施药对水田慈姑蚜虫的防效高于传统手动喷雾施

药,兼具省药、节水、低成本和安全优势。沙帅帅(2019)利用P20无人机在棉花各生育期施药对蓟马、蚜虫和叶螨的防效良好,避免了中后期机械进地损伤作物,并可快速响应突发虫情。李扬帆等(2022)研究结果证实应用无人机施药后芒果冠层内药液雾滴沉积覆盖更优,尤其提升了药剂在叶片背面的附着能力。

在药剂应用方面,智能施药结合复配药剂显著提升防控精准度。张栋海等(2023)利用大疆T16无人机喷施吡虫啉与阿维菌素复配药剂,对棉蓟马的防效达100%。Sreenivas et al.(2024)发现无人机在转Bt棉冠层上方1.2 m处作业可减少25%用药量,且仍能保持良好的雾滴沉积与防效,且漂移更少。Zhong et al.(2023)研究结果显示桶混助剂可优化无人机施药时药液在芒果叶片上的展布性能,进而提升对蓟马的防效。综上,植保无人机凭借高精度作业与智能药剂管理,实现了减药增效、精准施药和快速应急防控的目标,是智能植保的重要发展方向。但目前针对芒果蓟马的优势复配药剂筛选及其无人机飞防应用仍缺乏系统研究。本研究通过室内毒力测定和果园飞防试验,全面评估复配药剂对芒果蓟马的触杀效果,并探究植保无人机结合复配药剂在芒果蓟马防治中的可行性,以期为推进精准用药、减药增效和芒果蓟马抗药性治理提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试虫源:芒果蓟马采自海南省三亚市崖州区三公里村的山地芒果种植试验基地,该基地内种植的芒果品种以贵妃芒为主。采集的蓟马为自然发生种群,以茶黄蓟马 *Scirtothrips dorsalis* 和花蓟马

*Frankliniella intonsa* 为优势种, 试验期间不喷施药剂, 保证供试虫源不受任何药剂干扰。柑果嫩稍期的蓟马主要集中在叶片背面取食和繁殖, 摘取附着蓟马的嫩叶返回实验室, 筛选2个优势种蓟马放入温度(25±2)℃、相对湿度(75±10)%、光周期14 L:10 D的光照培养箱中混合饲养。养虫期间每天饲喂新鲜柑果嫩叶, 及时清理饲养盒中的枯叶和排泄物。选择饲养3代后活泼健康、大小一致的蓟马成虫供试。

**供试柑果:**新鲜柑果嫩叶采自海南省三亚市崖州区三公里村的山地柑果种植试验基地内的贵妃柑新枝的第一蓬嫩叶。

**供试药剂:**经过前期文献和市场调研分析, 发现单一药剂对柑果蓟马的防效不佳, 且易使蓟马产生抗药性, 而复配药剂对蓟马若虫和成虫有较强的致死毒力。因此, 本研究选用2种新型复配药剂进行试验, 即0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈(0.5% emamectin benzoate·4.5% chlorfenapyr)和1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺(1% oligosaccharins·10% bifenthrin·25% clothianidin), 金华春禾农业开发有限公司。

**仪器与设备:**HGZ-250智能人工光照培养箱, 上海精密仪器仪表厂; T1-HD206体视显微镜, 深圳市奥斯微光学仪器有限公司; 长37.5 cm、宽24.0 cm、高16.5 cm养虫盒, 北京宝元兴业科技有限公司; 长30 cm、宽30 cm、高30 cm养虫笼, 河南智科弘润环保科技有限公司; 长12.5 cm、宽10.0 cm黄色粘虫板, 济南兴祥绿防科技有限公司; 3WWDZ-40A大疆T40型共轴双旋翼植保无人机, 外形尺寸长280 cm、宽315 cm、高78 cm, 作业箱容积40 L, 最大飞行速度10 m/s, 喷头2个, 喷头类型为双重雾化离心式, 雾化粒径50~500 μm, 有效喷幅4~11 m, 最大喷洒流量6 L/min×2, 深圳市大疆创新科技有限公司。

## 1.2 方法

### 1.2.1 复配药剂对柑果蓟马的室内毒力测定

本研究采用叶管药膜法(韩冬银等, 2017)进行复配药剂对蓟马的室内毒力测定。根据农药室内生测最高浓度和药剂田间推荐使用浓度进行药剂大梯度浓度预试验, 筛选死亡率在0~100%范围的浓度, 在此基础上测定药剂的生物活性。

基于预试验结果, 用清水把供试复配药剂溶解后并配制成不同浓度的母液, 搅拌均匀。其中, 0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈母液稀释至浓度分别为125.00、62.50、31.25、15.63、7.81、3.91、1.95 mg/L; 1%

氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺母液稀释至浓度分别为225.00、112.50、56.25、28.13、14.06、7.03、3.52 mg/L; 将0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈和1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺2种复配药剂按照质量比为1:1混合成母液, 稀释至浓度分别为256.25、128.13、64.04、32.03、16.01、8.01、4.00 mg/L; 设清水处理为空白对照。将上述药液分别用移液枪吸取4 mL加入到5 mL离心管中, 来回晃动后倾倒药液, 保证药液均匀挂在离心管内壁上, 在27℃下风干形成药膜后, 用0号昆虫针在离心管盖上扎9个小孔确保离心管内空气流通。把清洗干净的柑果嫩叶切割成1 cm×2 cm左右大小, 分别将叶片放入各药剂稀释液中浸泡15 s, 取出晾干后放入上述对应药液处理过的离心管中组成叶管药膜。用细软毛笔快速蘸取接入30头健康、大小一致的柑果蓟马成虫, 接虫后迅速盖上离心管盖, 防止蓟马逃逸。每管为1个重复, 每个浓度重复3次。将所有离心管置于温度(25±2)℃、相对湿度(65±2)%、光周期14 L:10 D的培养箱中。饲养48 h后观察记录各处理组柑果蓟马成虫的存活情况, 用细软毛笔轻触蓟马虫体, 若2次无反应则判定为死亡。

计算各处理组柑果蓟马的死亡率和校正死亡率, 若空白对照组的死亡率在10%以上, 则此次试验为无效试验, 需要重复试验。其中, 死亡率=死虫数/处理前虫数×100%, 校正死亡率=(处理组死亡率-对照组死亡率)/(1-对照组死亡率)×100%。使用SPSS 27.0.1软件采用概率值法计算供试复配药剂的毒力回归方程、致死中浓度 $LC_{50}$ 及95%置信区间。

### 1.2.2 无人机施用复配药剂对柑果蓟马的飞防试验

为验证植保无人机喷洒复配型药剂防治柑果蓟马的有效性, 在海南省三亚市崖州区三公里村的山地柑果种植试验基地开展田间飞防试验。试验区土质为砂壤土, 海拔150 m, 年平均气温25.7℃, 年平均降水量1 279 mm, 年平均蒸发量1 950 mm, 年平均相对湿度79%。试验区域内柑果树品种为贵妃柑, 树龄7~8年, 平均株高2.70~2.90 m, 冠径3.2 m, 株距4.5 m, 行距5 m。试验区分为面积大小一致的12个小区, 每个小区长约18.0 m, 宽约10.2 m, 含12株柑果树, 各处理间设置2~3行缓冲隔离带。试验前在每个小区周围挂上3 m高的纱网, 避免由于蓟马迁飞导致试验误差。

分别于柑果嫩稍期(2024年9月29日上午09:00—12:00)和花期(2024年12月23日上午09:00—12:00)进行无人机施药。参考1.2.1复配药剂室内

毒力测定结果和药剂推荐飞防浓度开展飞防试验,共设置4个处理组,第1组为0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈,用药量375 mL/hm<sup>2</sup>;第2组为1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺,用药量375 mL/hm<sup>2</sup>;第3组为0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈和1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺质量比1:1的混合药剂,用药量375 mL/hm<sup>2</sup>;第4组为施用等量清水的空白对照组。所有处理组的用水量均为75 L/hm<sup>2</sup>。每个处理重复3次,每个重复为1个小区。植保无人机的飞行速度均设定为2 m/s,飞行高度3 m,离心喷头粒径参数设置为“细”,药液流速7.2 L/min。在每个试验小区内通过悬挂黄色粘虫板获取蓟马数据。在每株柞果树两侧离植株30 cm处,将竹杆插入土壤中固定后作为支撑,在竹杆上与植株树冠中部等高的位置悬挂黄色粘虫板,每个小区悬挂3个。

柞果嫩梢期飞防试验数据记录方法:在施药前进行柞果新梢蓟马基数统计,每个小区随机选择3株柞果树,从东南西北4个方位分别统计3条新梢第1~4叶(新梢第1~4叶受害最严重,具有代表性)的蓟马数量,统计完后进行药剂试验。分别在施药后1、3、7 d的10:00时左右统计黄色粘虫板上诱集到的蓟马数量,每次调查结束及时更换新的粘虫板。因柞果树不同位点统计的蓟马虫口数差异较大,各处理组取3个位点的平均虫口数值作为该组的虫口数,根据平均虫口数计算虫口减退率和校正防效。虫口减退率=(施药前虫口数-施药后虫口数)/施药前虫口数×100%,校正防效=(药剂处理区虫口减退率-空白对照区虫口减退率)/(100-空白对照区虫口减退率)×100%。

柞果花期飞防试验数据记录方法:在施药前每个小区随机选3株柞果树,从东西南北4个方位各随机选取1个生育期一致的花穗,用手轻轻拍打花穗3次使蓟马落入白盘中,迅速统计并记录白盘中的蓟马数量。分别在施药后1、3、7 d的10:00时左右统计黄色粘虫板上诱集到的蓟马数量,每次调查结束及时更换新的粘虫板。计算虫口减退率和校正防效,公式同上。

### 1.3 数据分析

试验数据采用SPSS 27.0.1软件进行统计分析,应用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 复配药剂对柞果蓟马的室内毒力

由复配药剂对柞果蓟马成虫的生物测定结果

可知,空白对照的柞果蓟马死亡率为5.56%,小于10.00%(表1),表明本试验为有效试验,可用于校正0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈和1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺处理下柞果蓟马的死亡率。另外,与1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺处理、1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺+0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈混合处理相比较,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈处理的浓度致死效应更明显,较小的浓度变化便可引起柞果蓟马的死亡率剧烈波动,表明0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈对柞果蓟马种群个体间的毒力差异小,药效稳定可预测。基于表1中浓度与校正死亡率数据关系计算得到0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈、1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺和二者混合药液的毒力回归方程分别为 $y=2.16x-1.07$ 、 $y=1.15x-1.54$ 及 $y=1.33x-0.77$ 。

供试2种复配药剂单一处理时对柞果蓟马成虫的毒力明显,致死中浓度LC<sub>50</sub>均小于20.00 mg/L,其中0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈对柞果蓟马的毒杀作用最强,LC<sub>50</sub>为10.72 mg/L,而1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺对柞果蓟马的LC<sub>50</sub>为18.36 mg/L;2种复配药剂混用处理组对柞果蓟马成虫的毒力同样明显,LC<sub>50</sub>为14.97 mg/L,介于2种复配药剂的LC<sub>50</sub>之间(表2),表明混用复配药剂对柞果蓟马成虫的室内毒力较1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺的室内毒力更强,但低于0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈的室内毒力。

### 2.2 嫩梢期植保无人机飞防效果

在柞果嫩梢期施药后柞果蓟马虫口数量明显减少,从施药前的60~100头/板降至施药后7 d的0~40头/板(图1-A)。不同复配药剂的药效发挥时间存在差异,其中0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈比1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺更快产生作用,施药后1 d,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈处理对柞果蓟马的校正防效已达80.00%以上,而1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺及两者混合处理的校正防效不足50.00%;施药后3 d,2种复配药剂处理的校正防效均超过70.00%,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈表现最佳,校正防效达到94.97%;施药后7 d,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈及两种复配药剂混合处理的校正防效虽略有下降,但仍维持在70.00%以上,而1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺处理的校正防效保持稳定,与施药后3 d的校正防效70.08%相近(图1-B)。

表1 复配药剂对芒果蓟马成虫的生物测定结果

Table 1 Bioassay results of compound pesticide formulations against adult mango thrips

药剂 Pesticide	浓度 Concentration/(mg/L)	死亡率 Mortality/%	校正死亡率 Adjusted mortality/%
0.5% 甲维盐·4.5% 虫螨腈 0.5% emamectin benzoate·4.5% chlorfenapyr	125.00	98.89	98.82
	62.50	93.33	92.94
	31.25	86.67	85.88
	15.63	67.78	65.88
	7.81	44.44	41.18
	3.91	18.89	14.12
	1.95	10.00	4.71
1% 氨基寡糖素·10% 联苯菊酯·25% 噻虫胺 1% oligosaccharins·10% bifenthrin·25% clothianidin	225.00	91.11	90.59
	112.50	80.00	78.82
	56.25	73.33	71.76
	28.13	62.22	60.00
	14.06	46.67	43.53
	7.03	37.78	34.12
	3.52	23.33	18.82
0.5% 甲维盐·4.5% 虫螨腈+1% 氨基寡糖素·10% 联苯菊酯·25% 噻虫胺 0.5% emamectin benzoate·4.5% chlorfenapyr+ 1% oligosaccharins·10% bifenthrin·25% clothianidin	256.25	97.78	97.67
	128.13	88.89	88.37
	64.06	78.89	77.91
	32.03	63.33	61.63
	16.01	47.78	45.35
	8.01	38.89	36.05
	4.00	24.44	20.93
空白对照 Blank control		5.56	

表2 2种复配药剂对蓟马成虫的室内毒力

Table 2 Indoor toxicity of two compound pesticide formulations against adult thrips

药剂 Pesticide	斜率±标准误 Slope±SE	LC <sub>50</sub> (95% 置信限) LC <sub>50</sub> (95% confidence limits)/ (mg/L)	相关系数 Correlation coefficient	卡方值 Chi-square value
0.5% 甲维盐·4.5% 虫螨腈 0.5% emamectin benzoate·4.5% chlorfenapyr	2.16±0.28	10.72(8.07–13.83)	0.986	0.65
1% 氨基寡糖素·10% 联苯菊酯·25% 噻虫胺 1% oligosaccharins·10% bifenthrin·25% clothianidin	1.15±0.18	18.36(11.45–27.27)	0.996	0.36
0.5% 甲维盐·4.5% 虫螨腈+1% 氨基寡糖素·10% 联苯菊酯·25% 噻虫胺 0.5% emamectin benzoate·4.5% chlorfenapyr+ 1% oligosaccharins·10% bifenthrin·25% clothianidin	1.33±0.18	14.97(9.98–20.93)	0.957	1.07

### 2.3 花期植保无人机飞防效果

在芒果花期施药前芒果蓟马平均虫口数为300~500头/板,施药后1 d虫口数均低于180头/板,防效较明显(图2-A)。其中,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈处理下虫口数减少最显著,校正防效达到了78.00%,而1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺处理的校正防效仅为51.13%,2种复配药剂混

用处理的校正防效为66.21%,药效发挥相对较慢;施药后3 d,因试验区周边蓟马集中暴发,果园中蓟马迁飞明显,导致虫口数迅速回升,所有处理的校正防效均低于50.00%,防控效果不理想;施药后7 d蓟马数量已无法控制,呈现暴发态势,导致试验结果与预想值偏差较大(图2-B)。综合来看,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈处理对芒果蓟马的防控效果最好。

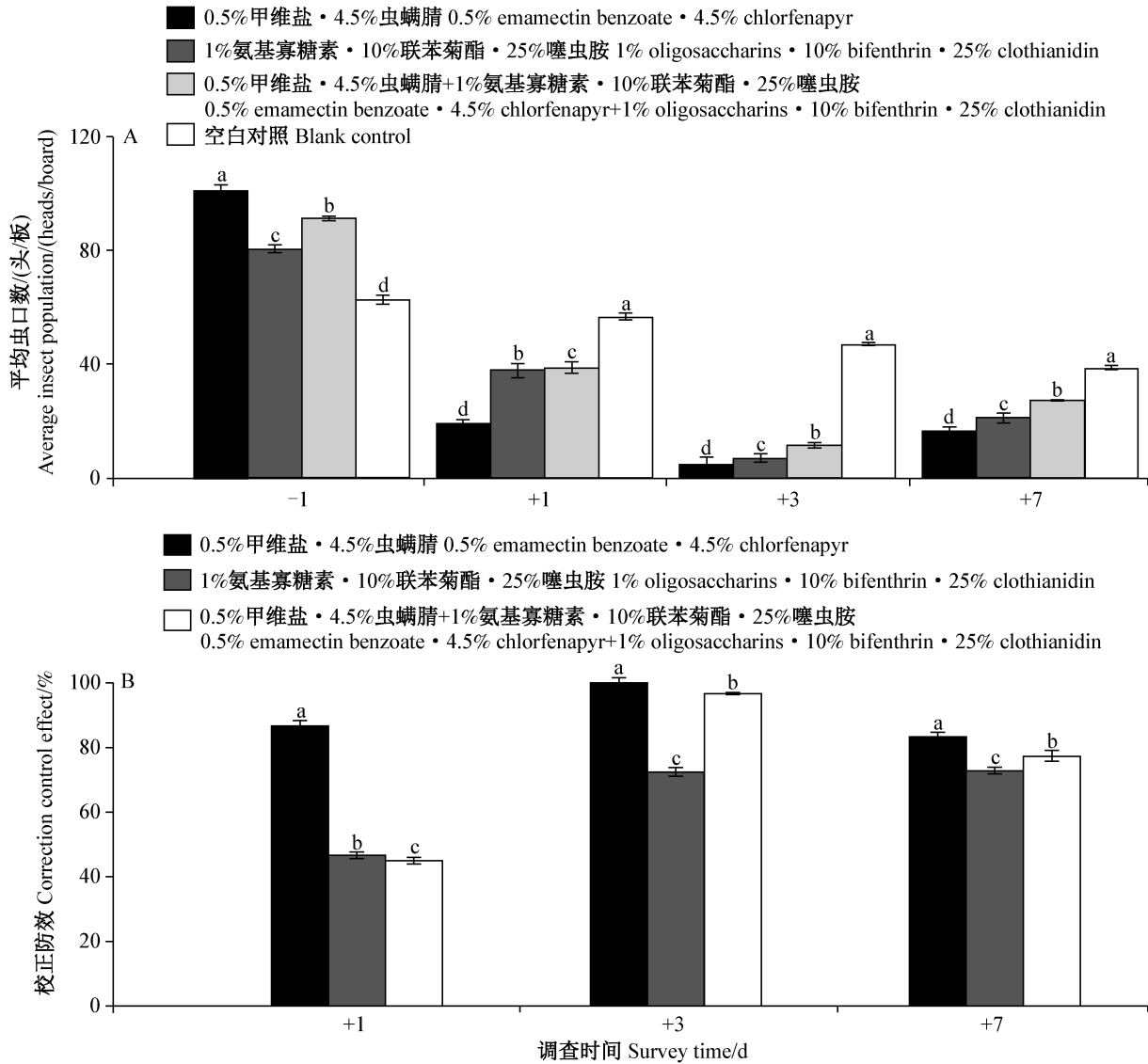


图1 杧果嫩稍期不同复配药剂处理下蓟马的虫口数(A)及校正防效(B)变化趋势

Fig. 1 Changes in thrips population (A) and corrected control efficacy (B) under different compound pesticide treatments during the mango tender shoot stage

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示相同调查时间下不同处理间经Duncan氏新复极差法检验差异显著( $P < 0.05$ )。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the same survey time according to Duncan's new multiple range test ( $P < 0.05$ ).

### 3 讨论

本研究通过室内毒力测定与田间飞防试验系统评估了2种复配药剂及其混合处理在植保无人机施用条件下对杧果蓟马的防控效果。室内毒力测定结果表明,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈对杧果蓟马的毒力( $LC_{50}=10.72$  mg/L)显著高于1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺( $LC_{50}=18.36$  mg/L),且其浓度致死效应更明显,对蓟马种群个体间的毒力差异小,药效稳定可预测。这种毒力差异主要源于药剂作用

机理与组分特性的不同。甲维盐作为大环内酯类衍生物,主要通过激活谷氨酸门控氯离子通道来增强神经递质释放,导致害虫迅速麻痹死亡(董金慧等, 2024);虫螨腈则为吡咯类化合物,作用于昆虫线粒体进而干扰呼吸链,具有触杀和胃毒作用(王胤等, 2021)。2种不同作用机理的药剂复配可能产生了协同效应,延缓了杧果蓟马抗药性的发展。而1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺复配药剂中的联苯菊酯与噻虫胺虽分别属于拟除虫菊酯类和新烟碱类,但其作用靶标均以神经系统为主,长期单一

使用易导致靶标抗性。本研究所用2种复配药剂对杧果蓟马毒力较低的原因可能与三亚市蓟马种群已对菊酯类及新烟碱类药剂产生田间抗性有关,这与袁琳琳等(2023)在海南省监测到普通大蓟马 *Megalurothrips usitatus* 对拟除虫菊酯类药剂产生抗性的

结论相符。本研究所用2种复配药剂按质量比1:1混用后,其对杧果蓟马的 $LC_{50}$ 介于2种复配药剂之间,未表现出显著协同增效作用,未来需进一步优化混配比例或筛选更具增效潜力的药剂组合。

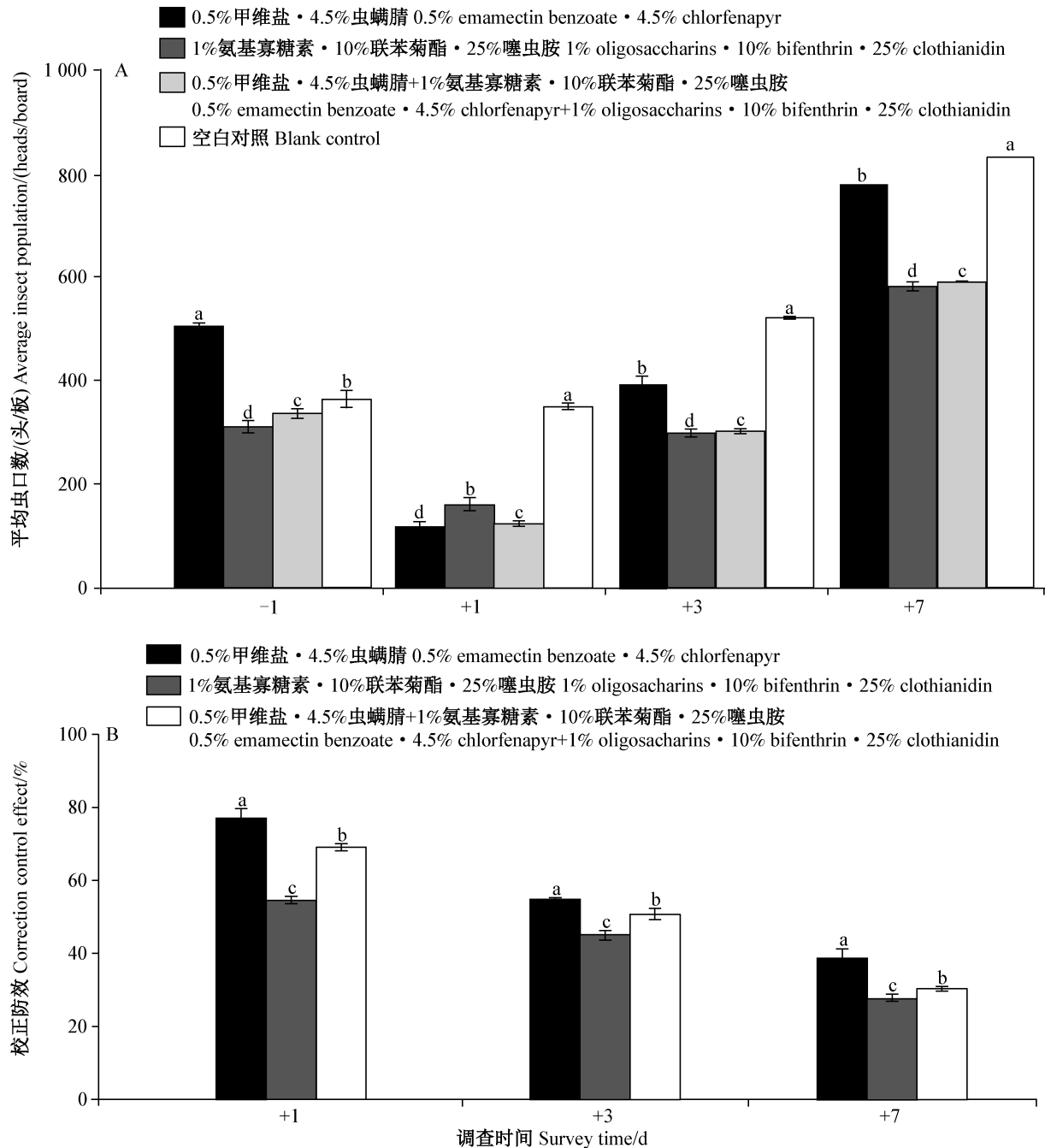


图2 杧果花期不同复配药剂处理下蓟马的虫口数(A)及校正防效(B)变化趋势

Fig. 2 Changes in thrips population (A) and corrected control efficacy (B) under different compound pesticide treatments during the mango flowering stage

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示相同调查时间下不同处理间经Duncan氏新复极差法检验差异显著( $P < 0.05$ )。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the same survey time according to Duncan's new multiple range test ( $P < 0.05$ ).

在芒果嫩稍期飞防试验中,0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈表现出优异的速效性与持效性,施药后1d校正防效超过80.00%,3d后达94.97%。这不仅进一步印证了其室内毒力优势,也凸显了植保无人机在精准递送触杀型药剂方面的技术适配性。闫晓静等(2021)研究发现无人机施药能显著提升药液在果树冠层中下部和叶片背面的沉积量,这对栖息于叶背的害虫至关重要。本研究所用大疆T40无人机配备双重雾化离心喷头,雾化粒径可调,有助于形成适宜穿透冠层的小雾滴,提升药剂与害虫的接触效率。相比之下,1%氨基寡糖素·10%联苯菊酯·25%噻虫胺的速效性较差,可能与其内含的氨基寡糖素主要起诱导植物抗性作用、直接杀虫活性较弱有关,其在施药初期难以快速降低蓟马种群基数。至药后7d,各处理对芒果蓟马的校正防效仍维持在70.00%以上,表明植保无人机施药结合所选复配药剂具有良好的持效性,这与张栋海等(2023)利用大疆T16无人机施药防治棉蓟马取得良好的持效性的结果一致。

在芒果花期的飞防试验结果出现较大波动,施药后3d所有药剂处理对芒果蓟马的校正防效均低于50.00%。这与试验区域芒果花期蓟马种群数量激增、外部虫源迁飞入侵密切相关。花期芒果植株的花器为蓟马提供了大量的繁殖场所和食物来源,极易吸引周边蓟马迁入,导致试验区域防治效果被稀释。尽管试验小区设置了纱网隔离,但仍难以完全阻断蓟马成虫的迁飞,这在花期虫口基数大、活动能力强的背景下尤为突出。该结果提示对于花期蓟马的防控,仅依靠单次药剂处理难以实现持久控制,需采取园内精准施药+园外周缘阻隔的综合策略,或与统防统治作业相结合,在更大尺度上降低区域虫源基数。此外,Zhong et al.(2023)研究表明,在无人机施药时添加桶混助剂可显著改善药液在芒果叶片表面的展布与附着性能,未来研究可探索通过添加功能助剂来延长药剂的持效期,以应对花期蓟马的暴发为害。

综合来看,本研究将植保无人机施药技术与新型复配药剂相结合,验证了其在芒果蓟马绿色精准防控中的应用潜力。特别是0.5%甲维盐·4.5%虫螨腈复配药剂,在室内毒力和田间防效方面均表现优异,为应对当前芒果蓟马抗药性挑战提供了新的药剂选择。植保无人机的高效作业模式,也为实现芒果病虫害的减药增效和精准防控提供了可靠的技术路径。未来研究可围绕以下方面展开:一是进一

步筛选不同作用机理的药剂进行科学复配,并系统评估其协同增效作用;二是优化植保无人机的飞行参数与施药模式,提升药剂在复杂冠层内的沉积分布均匀性;三是探索将无人机飞防与天敌释放、理化诱控等绿色技术相结合,构建芒果蓟马全程绿色防控技术体系。

## 参 考 文 献 (References)

- Dong JH, Song LD, Li FX, Wang ZD, Niu XP, Nan JL, Cheng WN. 2024. Occurrence dynamics and key control techniques of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in maize field of Xingping City, Shaanxi Province, China. *Journal of Plant Protection*, 51(3): 619–628 (in Chinese) [董金慧, 宋梁栋, 李方向, 王忠娣, 牛晓萍, 南江磊, 成卫宁. 2024. 陕西省兴平市玉米田地贪夜蛾的发生动态及关键防治技术. *植物保护学报*, 51(3): 619–628]
- Han DY, Li L, Chen JY, Xing CM, Zhang FP, Niu LM, Fu YG. 2017. Toxicity and control effect of nine insecticides on thrip compound of mango. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 33(16): 141–145 (in Chinese) [韩冬银, 李磊, 陈俊谕, 邢楚明, 张方平, 牛黎明, 符悦冠. 2017. 9种杀虫剂对芒果蓟马的毒力测定及田间防效. *中国农学通报*, 33(16): 141–145]
- Han DY, Li L, Niu LM, Chen JY, Zhang FP, Ding SF, Fu YG. 2019. Spatial distribution pattern and sampling of thrips on mango trees. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 40(2): 323–327 (in Chinese) [韩冬银, 李磊, 牛黎明, 陈俊谕, 张方平, 丁山峰, 符悦冠. 2019. 蓟马复合种在芒果植株上的空间分布和理论抽样. *热带作物学报*, 40(2): 323–327]
- Han DY, Li L, Niu LM, Zhang FP, Chen JY, Ye ZP, Wang JY, Fu YG. 2023. Changes of community structure of thrips during mango fruiting period. *Journal of Environmental Entomology*, 45(6): 1570–1578 (in Chinese) [韩冬银, 李磊, 牛黎明, 张方平, 陈俊谕, 叶政培, 王建赞, 符悦冠. 2023. 芒果花果期蓟马群落结构变化. *环境昆虫学报*, 45(6): 1570–1578]
- He XK. 2020. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China. *Smart Agriculture*, 2(1): 133–146 (in Chinese) [何雄奎. 2020. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议. *智慧农业*, 2(1): 133–146]
- Li YF, He XK, Han L, Huang Z, He M. 2022. Comparison of droplet deposition performance between caterpillar mist sprayer and six-rotor unmanned aerial vehicle in mango canopy. *Smart Agriculture*, 4(3): 53–62 (in Chinese) [李扬帆, 何雄奎, 韩冷, 黄战, 何苗. 2022. 地面弥雾机与六旋翼植保无人机在芒果冠层中雾滴沉积性能对比. *智慧农业*, 4(3): 53–62]
- Manhongo TT, Chimphango A, Thornley P, Röder M. 2021. Techno-economic and environmental evaluation of integrated mango waste biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, 325: 129335
- Sha SS. 2019. Occurrence regularity of pests in cotton fields and evaluation of UAV operation effect in Maigaiti reclamation area. Master thesis. Alaer: Tarim University (in Chinese) [沙帅帅.

2019. 麦盖提垦区棉田害虫发生规律及无人机作业效果评价. 硕士学位论文. 阿拉尔: 塔里木大学]
- Shen DR, He C, Zhang R, Yuan SY, Tian XJ, Zhang HR. 2020. Co-toxicity of imidacloprid with three insecticides against thrips on pomegranate. *Northern Horticulture*, (15): 15–20 (in Chinese) [沈登荣, 何超, 张睿, 袁盛勇, 田学军, 张宏瑞. 2020. 吡虫啉与三种杀虫剂复配对石榴蓟马的联合毒力作用. *北方园艺*, (15): 15–20]
- Sreenivas AG, Ranganath, Wazid, Vijayalakshmi, Shivayogiyappa. 2024. Unmanned aerial vehicle (UAVs): a novel spraying technique for management of sucking insect pests in cotton ecosystem. *Journal of Biosystems Engineering*, 49(2): 103–111
- Venkata Rami Reddy P, Gundappa B, Chakravarthy AK. 2018. Pests of mango//Omkar. *Pests and their management*. Singapore: Springer, pp. 415–440
- Wang Y, Hu B, Li J, Zhang XY, Li YL, Sun H, Zheng JQ, Cao JJ, Wang JX. 2021. Control effect of new inorganic insecticide C610 on thrips of pepper. *Vegetables*, (7): 63–66 (in Chinese) [王胤, 胡彬, 李锦, 张欣颖, 李云龙, 孙海, 郑建秋, 曹金娟, 王俊侠. 2021. 新型无机杀虫剂 C610 对辣椒蓟马的防治效果. *蔬菜*, (7): 63–66]
- Yan XJ, Shi X, Liu XH, Du YH, Yang DB, Yuan HZ. 2021. The spray drift risk of plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) spraying neonicotinoid pesticides to honey bees. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 477–482 (in Chinese) [闫晓静, 石鑫, 刘晓慧, 杜亚辉, 杨代斌, 袁会珠. 2021. 多旋翼植保无人机喷施新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的飘移风险. *植物保护学报*, 48(3): 477–482]
- Yang DH. 2020. Study on the control of diseases and insect pests of arrowhead in paddy field based on the application technology of plant protection UAV. Master thesis. Yangzhou: Yangzhou University (in Chinese) [杨东辉. 2020. 基于植保无人机施药技术的水田慈姑病虫害防治研究. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学]
- Ye L, Li YP, Li MF, Liang WH, Liu EP. 2021. Spatiotemporal change of mango production distribution and its response to labor market in China. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 34(5): 1054–1061 (in Chinese) [叶露, 李玉萍, 李茂芬, 梁伟红, 刘恩平. 2021. 我国芒果布局时空变迁及对劳动力市场的反应研究. *西南农业学报*, 34(5): 1054–1061]
- Yuan LL, Pan XL, Lu RC, Chen LW, Xi Y, Wu SY. 2023. Detection of the resistance of *Megalurothrips usitatus* to pyrethroids and sodium channel mutation in Hainan. *Plant Protection*, 49(3): 60–67 (in Chinese) [袁琳琳, 潘雪莲, 陆容材, 陈龙威, 席羽, 吴少英. 2023. 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. *植物保护*, 49(3): 60–67]
- Zhang DH, Wei JM, Chen B, Ji GP, Wang F, Niu LL, Wu YR, Cui JQ. 2023. Screening of aerial control insecticides and dosage for controlling thrips in cotton fields in southern Xinjiang. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (8): 106–109 (in Chinese) [张栋海, 魏俊梅, 陈兵, 吉光鹏, 王凡, 牛岭磊, 吴玉蓉, 崔建强. 2023. 新疆棉田蓟马飞防药剂及用量筛选. *农业科技通讯*, (8): 106–109]
- Zhang XY, Guojia R, Zhang YL, Sun JW, Hong B, Jia YX. 2022. Synergistic effect and field efficacy of insecticide combinations on *Frankliniella intonsa*. *Agrochemicals*, 61(7): 537–541 (in Chinese) [张暄翊, 郭佳茹, 张愉力, 孙建伟, 洪波, 贾彦霞. 2022. 药剂复配对花蓟马的增效作用及田间防效. *农药*, 61(7): 537–541]
- Zhang YF, Zhao JY, Wang H. 2023. Pesticide efficiency experiment of 5.7% emamectin benzoate micro-emulsion and 0.5% matrine aqueous solution against cowpea thrips. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 29(12): 98–102 (in Chinese) [张永芳, 赵劲宇, 王华. 2023. 5.7% 甲氨基阿维菌素微乳剂和 0.5% 苦参碱防治豇豆蓟马的药效试验. *安徽农学通报*, 29(12): 98–102]
- Zhong Y, Jin Y, Xu SQ, Liu XR, Song JL. 2023. Efficacy of two tank-mix adjuvants to control mango thrips using a UAV sprayer. *Agriculture*, 13(9): 1805
- Zhou Y. 2020. Evaluation of the adaptability and control effect of *Neoseiulus barkeri* Hughes on *Scirtothrips dorsalis* Hood of mango. Master thesis. Haikou: Hainan University (in Chinese) [周炆. 2020. 巴氏新小绥螨对芒果茶黄蓟马的控制作用及适应性评价. 硕士学位论文. 海口: 海南大学]

(责任编辑: 李美娟)