

植保无人机作业参数、作业方式对防治井冈蜜柚园柑橘全爪螨效果的影响

林臻^{1,2,3,4}, 范小龙^{1,2,3,4}, 邓孔洪^{1,2,3,4},

林键沁^{1,2,3,4}, 周志艳^{1,2,3,4*}

(1. 华南农业大学工程学院/岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心, 广州 510642; 2. 广东省农业人工智能重点实验室, 广州 510642; 3. 广东省农业航空应用工程技术研究中心, 广州 510642; 4. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为探究使用植保无人机对井冈蜜柚果树冠层雾滴沉积分布的影响, 本文以 DJI-T50 植保无人飞机为施药试验的载体, 在选用不同的飞行速度、相对冠层高度、雾滴粒径和助剂类型下, 通过比较各组试验的雾滴沉积分布情况, 对不同作业参数组合进行了优选。然后, 基于得到的较优参数组合对比了 3 种不同航线的作业方式。最后, 根据筛选最优作业方式及作业参数组合对井冈蜜柚果树进行了柑橘全爪螨 *Panonychus citri* 飞防试验, 探究了在 4 种不同药剂作业下井冈蜜柚柑橘全爪螨虫口的减退情况。结果表明: 当设置飞行相对冠层高度为 3 m、飞行速度为 3 m/s、雾滴粒径为 210 μm 、助剂选用为植健、作业方式为定点旋转作业时, 植保无人飞机雾滴沉积效果较好; 在柑橘全爪螨防治效果方面, 选用阿维·乙螨唑悬浮剂效果更佳, 于施药后第 7 天可达到 88.34%; 乙唑螨腈悬浮剂起效较快, 而虱螨脲水乳剂前期会造成柑橘全爪螨数量激增, 然后缓慢下降。本文结论可为井冈蜜柚飞防作业提供数据支持, 并为提高井冈蜜柚柑橘全爪螨防治效果提供理论依据。

关键词: 植保无人机; 雾滴沉积; 井冈蜜柚; 柑橘全爪螨防治

中图分类号: Q968.1;S433

文献标识码: A

Influence of plant protection unmanned aircraft operation parameters and operation mode on the effectiveness of controlling *Panonychus citri* mite in Jinggang Honeydew

LIN Zhen^{1,2,3,4}, FAN Xiao-Long^{1,2,3,4}, DENG Kong-Hong^{1,2,3,4}, LIN Jian-Qin^{1,2,3,4}, ZHOU Zhi-Yan^{1,2,3,4*}(1. College of Engineering, South China Agricultural University and Heyuan Branch of Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Heyuan 517000, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence (GDKL-AAI), Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application (ERCAAA), Guangzhou 510642, China; 4. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment (South China Agricultural University),

基金项目: 广东省科技计划 (2023B10564002); 江西省井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”课题 (20222-20-051256-01); 吉安市科技计划 (吉财教指[2020]83 号)

作者简介: 林臻, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业航空工程, E-mail: 735020349@qq.com

*通讯作者 Author for correspondence: 周志艳, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为农业航空工程, E-mail: zyzhou@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-03-11; 接受日期 Accepted: 2024-03-28

Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to investigate the effect of using plant protection unmanned aircraft on the canopy droplet deposition distribution of Jinggang honeydew fruit trees, this paper used DJI-T50 as the carrier for the application test, and different combinations of operational parameters were optimized by comparing the droplet deposition distribution of each group of tests under the selection of different flight speeds, relative canopy heights, droplet particle sizes, and additive types. Then, three different flight paths were compared based on the optimal parameter combinations obtained. Finally, based on the screening of the optimal operation mode and operation parameter combinations, a *Panonychus citri* fly control test was carried out on the fruit trees of Jinggang honeydew, and the reduction of *P. citri* mite infestation under the operation of four different agents was investigated. The results showed that when the relative canopy height was 3 m, the flight speed was 3 m/s, the droplet size was 210 μm , the additive was Plant Health, and the operation mode was fixed-point rotary operation, the effect of droplet deposition by plant protection unmanned aerial vehicles (UAVs) was better; in the control of *P. citri* mites, the effect of avibenzoxazole suspension was better, and it could reach 88.34% on the 7th day after the application of the drug, while the effect of acetazolamide suspension was faster. The water emulsion of lufenuron caused a surge of *P. citri* mite population in the early stage, and then decreased slowly. The conclusions of this paper can provide data support for the fly-control operation of Jinggang honeydew, and provide theoretical basis for improving the control effect of *P. citri* in Jinggang honeydew.

Key words: Plant protection unmanned aircraft; fog droplet deposition; Jinggang honeydew; *Panonychus citri* mite control

柑橘全爪螨 *Panonychus citri* (McGregor), 属蛛形纲 *Arachnida* 蜱螨亚纲 *Acari* 叶螨科 *Tetranychidae* (唐涛等, 2021), 是一种全球性害螨, 是柑橘类果树的主要虫害之一, 全年都可造成危害, 在春秋两季最为严重。柑橘全爪螨以吸汁方式危害嫩叶、果皮, 严重时会使整个叶片变成灰白色, 甚至出现落叶、落果现象, 严重影响果树树势以及产量 (冯秀杰等, 2015)。目前主要以生物防治 (宋子伟等, 2019; 张娜等, 2019; 李晓杨等, 2021; 宋子伟等, 2022) 和化学防治 (何恒果等, 2016; 王彦博等, 2019; 程明明等, 2021) 的手段来防控柑橘全爪螨。井冈蜜柚是原产于江西省吉安市周边区县并以“井冈山”为品牌的地方良种甜柚的统称, 目前包括金沙柚、金兰柚和桃溪蜜柚 3 种。截止 2020 年, 全市井冈蜜柚种植面积达 2.86 万 ha, 产量达 8 万 t (陈勇强等, 2022)。近年来, 井冈蜜柚产业迎来了较快的发展, 而当地种植户对果园管理比较粗放, 导致井冈蜜柚产业受柑橘全爪螨等虫害威胁日渐严峻。因此, 一套有效的柑橘全爪螨防治策略对井冈蜜柚的保产稳产有着十分重要的意义。

目前, 植保无人飞机航空施药不仅是大田作物的首选植保作业方式 (周志艳等, 2017), 在果树植保作业领域也迅速发展 (Yanhua *et al.*, 2020)。姚伟祥等 (姚伟祥等, 2019) 探究了 HB-Y-15L 和 DN-18N 2 种单旋翼电动无人飞机在对莲雾和荔枝等作物喷施时的雾滴沉积

分布情况，筛选出了较优作业参数以及喷头喷雾角；陈盛德等（2017）通过正交试验探究了小型六旋翼植保无人机在橘树喷施作业时的较优飞行高度、飞行速度、喷施流量；刘琪等（2020）优选出植保无人机在苹果树上喷施作业的飞行高度、飞行速度以及喷头设置，提高了雾滴的穿透率和分布均匀性。

由于井冈蜜柚的树势以及树形与其他果树有着一定差异，其差异主要表现在：井冈蜜柚果树其叶片面积相对较大，枝叶硬度大，树冠层内枝叶更密。目前还没有形成可靠的植保无人机作业参数，且柑橘全爪螨飞防药剂缺乏效果监测数据。因此，本文开展正交试验，分析基于 DJI-T50 植保无人机不同相对冠层高度、飞行速度、雾滴粒径、飞防助剂类型的作业参数对井冈蜜柚果树喷施作业的雾滴沉积分布情况所造成的影响，优选出合适的作业参数，并进一步监测 4 种飞防农药对井冈蜜柚柑橘全爪螨的防效，以期对此类树种和虫害开展植保无人机植保作业提供参考和指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试果园：果树品种为井冈蜜柚金沙柚，8 年生树龄，株行距 4 m×5 m，树高 2.5~3 m。试验果园位于江西省吉安市吉州区兴桥镇 67 号井冈山农业科技园北区蜜柚园（东经 114.86°，北纬 27.14°），果园多为小缓坡地，作物长势均一，果园管理规范且周边少障碍物，适合无人机进行飞防作业，果园航拍图如图 1 所示。试验果园内主要虫害为柑橘全爪螨，世代重叠严重。



(a) 作业果园航拍图

(a) Aerial view of operational orchard



(b) 作业果园实拍图

(b) Actual photo of the operational orchard

图 1 作业果园情况

Fig. 1 Situation of operational orchards

供试杀虫剂：（1）30%乙唑螨腈（Cyetpyrafen）悬浮剂（沈阳科创化学品有限公司，中国沈阳）；（2）24%阿维·乙螨唑（Avermectin·etoxazole）悬浮剂（浙江威尔达化工有限

公司，中国浙江），有效成分：乙螨唑（含量 20%）、阿维菌素（含量 4%）；（3）29% 螺螨酯(Spirodiclofen)悬浮剂(河北成悦化工有限公司,中国河北);(4)5%虱螨脲(Lufenuron)水乳剂（山东亿嘉农化有限公司，中国山东）。

供试飞防助剂：（1）聚合物类助剂：商品名“为植健”（山东七圣财供应链管理有限公司，中国山东），主要成分萜烯和甲胺素；（2）植物油类助剂：商品名“中保”（北京中保绿农业科技集团有限公司，中国北京），主要成分脂肪酸甲酯乳油；（3）有机硅类助剂：商品名“立占”（山东顶满仓智能科技有限公司，中国山东）。

供试机器：DJI-T50 植保无人机（深圳市大疆创新科技有限公司，中国深圳），药箱容积 50 L，采用离心式喷头（2 个），喷头流量为 16 L/min，雾滴粒径 50~500 μm ，喷幅 4~11 m。

1.2 试验方法

1.2.1 参数优选

试验采用 DJI-T50 植保无人机作为喷施作业机器，试验期间天气晴，温度为 34~38 $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 44%~69%，自然风速 \leq 2 级，符合作业条件。

本试验选取飞行速度、相对冠层高度、雾滴粒径和助剂种类为影响因素，设计 4 因素 3 水平的正交试验，正交试验方案设计 L₉ (3⁴) 正交表，如表 1 所示，共设计 9 个处理，分别对应 9 个小区，每个小区包含 3 行 3 列共 9 棵果树，不设重复。每组试验于每排选取 1 棵果树，取每棵果树上中下 3 层各 3 片叶片，将水敏纸（先正达公司，瑞士）放置于每片叶片正面和背面处。其中处理 1~9 为飞行速度（2、3、4，分别对应飞行速度水平的 1、2 和 3）、相对冠层高度（2、2.5、3，分别对应相对冠层高度水平的 1、2 和 3）、雾滴粒径（小、中、大，分别对应雾滴粒径水平的 1、2 和 3）和助剂种类（立占有有机硅助剂、为植健聚合物助剂、中保植物油助剂，分别对应助剂种类水平的 1、2 和 3）。每组试验施药量为 0.80 L/ha，配比助剂浓度为 0.1%（即 1 L 兑助剂 1 g）。

表 1 正交试验表

Table 1 Table of orthogonal tests

试验组数 Number of test groups	飞行速度 (m/s) Flight speed	相对冠层高度 (m) Relative canopy height	雾滴粒径 (μm) Particle size of droplets	助剂类型 Type of additives
E1	2 (1)	2.0 (1)	210 (1)	立占 (1)
E2	2 (1)	2.5 (2)	320 (2)	为植健 (2)
E3	2 (1)	3.0 (3)	420 (3)	中保 (3)
E4	3 (2)	2.0 (1)	320 (2)	中保 (3)
E5	3 (2)	2.5 (2)	420 (3)	立占 (1)
E6	3 (2)	3.0 (3)	210 (1)	为植健 (2)
E7	4 (3)	2.0 (1)	420 (3)	为植健 (2)
E8	4 (3)	2.5 (2)	210 (1)	中保 (3)
E9	4 (3)	3.0 (3)	320 (2)	立占 (1)

作业完成后自然风干 2 min 并将水敏纸收集并用密封袋进行密封处理，在室内进行数据

处理。通过扫描仪扫描成图像后通过处理软件 Image J(National Institutes of Health, Bethesda) 进行分析, 获取雾滴覆盖率 (%)、雾滴沉积密度 (droplets/cm²)、雾滴穿透率 (%)、D_{v10}、D_{v50} 和 D_{v90} 等雾滴沉积参数, 计算并记录各组试验中各项评价指标的平均值。

1.2.2 作业航线优选

试验采用 DJI-T50 植保无人机作为喷施作业机器, 试验期间温度为 34~38℃, 相对湿度为 44%~69%, 自然风速≤2 级, 符合作业条件。且在试验前使用 DJI-T50 植保无人飞机测绘得到的作业果园三维图 (图 2), 可为植保无人飞机规划航线和自动作业提供依据。



图 2 作业果园三维图

Fig. 2 3D map of the working orchard

对 1.2.1 节中参数优选试验数据进行分析之后, 优选出最佳的飞行速度、相对冠层高度、雾滴粒径和助剂种类的参数组合, 并在此参数下, 进行 3 种航线作业方式 (直飞 H1、定点 H2、定点旋转 H3) 的单因素试验。部分航线如图 3 所示, 试验每组施药量、水敏纸布置方法、数据扫描和收集处理方式均与 1.2.1 节中参数优选试验一致。



图 3 作业果园部分航线图

Fig. 3 Operational orchard partial route map

1.2.3 蚜防治作业与效果监测方法

试验采用 DJI-T50 植保无人飞机作为喷施作业机器, 试验期间温度 34~38℃; 相对湿度

44%~69%；自然风速 ≤ 2 级，施药前后1 d内均无降雨，符合作业条件。本次试验于2023年7月16日15:00进行虫害发生情况调查，并于2023年7月17日16:00开始飞防试验。

对1.2.2节中作业航线优选试验数据进行分析之后，优选出最佳的飞行航线作业方式，并在此作业方式下，进行井冈蜜柚飞防试验。试验所设4个作业组和1个对照组，每组包含6棵果树。试验采用DJI-T50植保无人机对每棵树喷施0.5 kg药液。其中1组施加乙唑螨腈悬浮剂（飞防配比浓度300倍，即1 kg兑3.3 g）；2组施加阿维·乙唑螨腈悬浮剂（飞防配比浓度800倍，即1 kg兑1.25 g）；3组施加螺螨酯悬浮剂（飞防配比浓度500倍，即1 kg兑2 g）；4组施加虱螨脲水乳剂（飞防配比浓度500倍，即1 kg兑2 g），对照组施加等量清水。作业参数为1.2.1节中参数优选试验所得较优参数。

参照《农药田间药效试验准则（一）》《杀螨剂防治桔全爪螨》（GB/T17980.11-2000）中的调查取样方法和药效计算方法，于施药前以及施药后的第3天、第5天、第7天、第10天、第15天调查虫情1次，在每组中抽取2棵树进行统计，每棵树分上中下3层，在东南西北4个方位，从靠近树干和远离树干方向抽取2枚叶片，即抽查18棵树，每棵树选取24枚叶片，挂上标签纸并标记。根据下列公式计算虫口减退率 D 与防治效果 T ，同时观察叶片及果实是否产生药害，即是否出现斑点、灼烧、枯萎和畸形等症状。

$$D = \frac{(F_Q - F_H)}{(F_Q)} \times 100\% \quad (1)$$

$$T = \frac{(D_i - D_{CK})}{(100\% - D_{CK})} \times 100\% \quad (2)$$

其中： F_Q 表示防前叶片虫口数； F_H 表示防后叶片虫口数； D_i 表示作业组虫口减退率； D_{CK} 表示对照组虫口减退率。

1.3 数据分析

为了表征各组试验各采样点间雾滴沉积特性，本文采用穿透率 C 、分布均匀度 RSF 和变异系数 CV 值为各组试验雾滴沉积分布均匀性的衡量标准。在对试验数据进行加权处理前，均采用Min-Max归一化预处理的方式，以便不同指标之间的比较，且不改变数据之间的分布情况（Panda *et al.*, 2015; Patro *et al.*, 2015）。

$$C = \frac{F_{ZX}}{F_{SZX}} \times 100\% \quad (3)$$

$$RSF = \frac{DV_{90} - DV_{10}}{DV_{50}} \quad (4)$$

$$CV = \frac{S}{X} \times 100\% \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

$$X_{\text{new}} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

$$M_i = 100 \times X_{\text{new}} \times \text{加权系数} \quad (8)$$

$$M_{\text{zong}} = M_{\text{iz}} + M_{\text{ib}} \quad (9)$$

其中： F_{zx} 为中下两层覆盖率总和； F_{szx} 为上中下3层覆盖率总和； S 为样本标准差； X_i 为各采集点水敏纸分析出的数据； \bar{X} 为各组试验采集点数据的平均值； n 为各组试验采集点个数； X_{new} 为归一化后的各组数据值； X_{\min} 为各组数据中的最小值； X_{\max} 为各组数据中的最大值； M_i 为该项指标加权分数； M_{zong} 为总加权分数； M_{iz} 和 M_{ib} 分别为叶片正面和背面的加权分数。

2 结果与分析

2.1 较优参数

使用穿透率 C 、分布均匀度 RSF 与变异系数 CV 作为评价指标，对 1.2.1 中参数优选试验数据进行评价，其中 C 越接近 100% 表示雾滴中下部分布更多，穿透效果更好； RSF 越接近 1 表明雾滴的均匀性越好、雾滴谱窄（臧禹, 2019）；变异系数越大则表达不同采样点雾滴分布间的离散程度越大。试验结果见表 2。

表 2 参数优选试验结果

Table 2 Parameter optimization test results

试验组数 Number of test groups	覆盖率 (%) Site coverage	沉积密度 (droplets/cm ²) Sedimentation density	穿透率 (%) Penetration rate	RSF	CV (%)
E1 正 Blade front E1	8.21±14.11 bc	87.00±27.76 abc	64.38±0.23 bcd	0.94±0.29 cdef	171.95
E1 背 Back of blade E1	3.12±3.76 cdef	76.30±20.11 abcd	59.88±0.26 abcd	1.16±0.43 bcdef	120.68
E2 正 Blade front E2	9.96±9.88 b	105.20±20.85 a	66.56±0.27 abcd	1.26±0.39 ab	120.68
E2 背 Back of blade E2	2.81±4.52 cdef	44.60±14.14 cdf	69.74±0.25 abc	1.27±0.57 abcde	160.66
E3 正 Blade front E3	8.44±11.89 bc	75.60±20.82 abcd	60.22±0.29 cd	1.37±0.66 a	140.93
E3 背 Back of blade E3	1.88±2.82 def	35.40±10.82 df	79.09±0.20 ab	1.12±0.49 bcdef	149.85
E4 正 Blade front E4	4.88±5.30 cdef	83.00±17.60 bcd	55.46±0.27 abcd	1.23±0.53 bcdef	144.86
E4 背 Back of blade E4	1.77±1.75 f	48.00±10.43 f	86.79±0.11 a	0.93±0.44 def	146.32
E5 正 Blade front E5	18.53±22.36 a	85.00±16.72 abc	63.93±0.16 abcd	1.12±0.27 abcd	150.70

E5 背	3.48±7.43 cdef	55.30±20.25 bcd ^f	61.85±0.33 abcd	1.42±0.65 abc	213.58
Back of blade E5					
E6 正	7.69±11.80 bcd	82.10±23.85 abc	61.57±0.20 bcd	1.23±0.53 abcd	153.63
Blade front E6					
E6 背	2.51±2.69 cdef	59.50±18.90 bcd ^f	63.46±0.18 abcd	1.09±0.73 bcdef	107.37
Back of blade E6					
E7 正	7.71±9.86 bcd	81.10±22.06 abc	57.79±0.24 abcd	1.35±0.48 abc	128.03
Blade front E7					
E7 背	1.28±3.09 f	24.60±9.31 f	88.12±0.04 a	1.03±0.39 ef	241.63
Back of blade E7					
E8 正	3.66±7.62 def	53.80±23.20 abc	57.10±0.31 bcd	1.16±0.51 abcde	156.35
Blade front E8					
E8 背	1.20±2.22 bcdef	31.70±15.86 bcd ^f	89.32±0.30 ab	1.00±0.43 f	120.53
Back of blade E8					
E9 正	7.56±10.74 bcde	92.30±18.62 ab	49.21±0.12 d	1.30±0.31 abcd	172.33
Blade front E9					
E9 背	1.65±2.85 ef	36.20±14.60 df	47.97±0.25 abcd	0.91±0.45 f	142.05
Back of blade E9					

注：表中覆盖率、沉积密度、穿透率和 RSF 数据为平均数±标准差。同列数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。Note: Coverage, sediment density, penetration, and RSF data in the table were means ± standard deviation. Different lowercase letters after data in the same column indicated significant differences as tested by Duncan's new complex polarity method ($P<0.05$).

因本试验需综合考虑作业参数组合对覆盖率、沉积密度、穿透率和均匀性等雾滴沉积分布特性的影响，且经统计分析后发现结果差异多为不显著。故本试验通过对当地农户和农场管理人员开展调研，对所得覆盖率、沉积密度、穿透率和均匀性进行加权处理（其中覆盖率加权系数 20%、沉积密度加权系数 30%、穿透率加权系数 10%、均匀性加权系数 40%），根据加权总分高低优选较优试验组数。所计算出每组试验的加权分数见表 3。

表 3 参数优选试验加权分数表

Table 3 Table of weighted scores for parameter preference tests

试验组数	覆盖率 (20%)	沉积密度 (30%)	穿透率 (10%)	均匀性 (40%)	总分
Number of test groups	Site coverage	Sedimentation density	Penetration rate	Uniformity	Total points
E1	22.96	49.38	9.21	36.38	117.93
E2	22.60	41.63	11.61	42.24	118.07
E3	12.39	19.00	8.37	55.69	95.46
E4	6.64	30.60	6.18	53.20	96.62
E5	40.00	36.04	9.36	27.89	113.28
E6	16.91	36.76	7.76	56.88	118.31
E7	6.15	15.96	7.92	40.00	70.03
E8	0.00	4.16	7.44	50.51	62.10
E9	9.19	29.26	0.00	29.67	68.12

根据试验结果所示：试验组数 E6（相对冠层高度为 3 m、飞行速度为 3 m/s、雾滴粒径 210 μm 、助剂选用为植健）加权总分最高，为较优参数。

2.2 较优作业航线

运用如 2.1 节中的加权评价方法，对 1.2.2 节中作业航线优选试验数据进行评价，得到表 4 所示试验结果及表 5 所示加权分数。结果表明，识别树心的自动定点旋转喷雾作业方式

即试验组 H3，其覆盖率、沉积密度、穿透率均超过航线直飞作业方式 H1 和自动定点作业方式 H2，均匀性较低于试验组 H1。因此选定识别树心的自动定点旋转作业方式为较优航线作业模式。

表 4 航线优选试验结果

Table 4 Results of route preference test

试验组数 Number of test groups	覆盖率 (%) Site coverage	沉积密度 (droplets/cm ²) Sedimentation density	穿透率 (%) Penetration rate	RSF	CV (%)
H1 正 Blade front H1	7.69±11.80 b	82.10±23.85 b	61.57±0.20 a	1.23±0.53 ab	153.63
H1 背 Back of blade H1	2.51±2.69 b	59.50±18.90 b	63.46±0.18 a	1.09±0.73 ab	107.37
H2 正 Blade front H2	6.60±13.41 b	61.60±19.79 b	76.84±0.16 a	1.11±0.40 ab	203.29
H2 背 Back of blade H2	4.76±7.56 b	76.90±22.29 b	70.36±0.23 a	1.13±0.39 b	158.86
H3 正 Blade front H3	18.87±18.56 a	164.90±26.27 a	66.86±0.28 a	1.33±0.43 a	98.39
H3 背 Back of blade H3	4.62±8.21 b	76.90±21.06 b	71.33±0.22 a	1.08±0.37 b	177.57

注：表中覆盖率、沉积密度、穿透率和 RSF 数据为平均数±标准差。同列数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。Note: Coverage, sediment density, penetration, and RSF data in the table were means ± standard deviation. Different lowercase letters after data in the same column indicated significant differences as tested by Duncan's new complex polarity method ($P<0.05$).

表 5 航线优选试验加权分数

Table 5 Weighted scores for route preference tests

试验组数 Number of test groups	覆盖率 (20%) Site coverage	沉积密度 (30%) Sedimentation density	穿透率 (10%) Penetration rate	均匀性 (40%) Uniformity	总分 Total points
H1	1.78	5.96	0.00	58.93	66.67
H2	20.00	30.00	18.75	10.66	79.41
H3	38.79	59.93	13.75	40.00	152.48

2.3 防治效果监测

施药前、后天气情况如表 6 所示，柑橘全爪螨调查统计情况见表 7，并计算出防治效果（表 8）。根据调查结果可知：DJI-T50 植保无人机施用 4 种药剂对柑橘全爪螨的防治效果随着时间的增长而增加，其中：施用 30%乙唑螨腈的防治效果相比其余 3 种药剂在第 3 天起效较快，在施药第 7 天防治效果为 87.47%；施加 24%阿维·乙唑螨腈联合配比的防治效果更优，第 7 天到达最高防治效果为 88.34%；施加 29%螺螨酯的配比生效滞后，第 7 天最高防效为 84.42%；施加 5%虱螨脲前期会造成柑橘全爪螨数量的提升，后期第 15 天防效可达 25.47%。

表 6 施药前后天气情况

Table 6 Weather conditions before and after application

气象条件 Meteorological condition	施药前 Pre-application	第 3 天 Day 3	第 5 天 Day 5	第 7 天 Day 7	第 10 天 Day 10	第 15 天 Day 15

天气	晴	晴	雨	阴	雨	阴
Climatic	Clear day	Clear day	Rainy day	Cloudy day	Rainy day	Cloudy day
温度 (°C)	34~36	24~32	28~36	24~29	25~34	26~34
Temp						
风向和风速	北风 2 级	南风 2 级	南风 2 级	东风 1 级	东风 2 级	南风 2 级
Wind direction and wind speed	North Wind Level 2	South Wind Level 2	South Wind Level 2	East Wind Level 1	East Wind Level 2	South Wind Level 2

表 7 柑橘全爪螨虫口减退率

Table 7 Rate of reduction of the population of *Panonychus citri* mites

作业组数 Number of operating groups	施用药剂 Application of pharmaceuticals	防前百叶虫口数	第 3 天 (%)	第 5 天 (%)	第 7 天 (%)	第 10 天 (%)	第 15 天 (%)
		(头) Pre-Proofing Centipede Population	Day 3	Day 5	Day 7	Day 10	Day 15
1	乙唑螨腈悬浮剂 Cyetpyrafen	2 002.1	76.14±0.01 a	87.72±0.02 a	91.38±0.01 a	94.20±0.00 a	90.67±0.04 a
2	阿维·乙螨唑悬浮剂 Avermectin·ctoxazole	3 216.7	74.42±0.03 ab	87.62±0.00 a	91.97±0.00 a	94.32±0.00 a	91.33±0.00 a
3	螺螨酯悬浮剂 Spirodiclofen	2 743.7	69.32±0.03 ab	84.54±0.06 ab	89.27±0.00 a	92.65±0.00 a	82.12±0.03 b
4	虱螨脲水乳剂 Lufenuron	1 714.5	13.46±0.03 d	35.21±0.03 e	38.75±0.01 c	62.04±0.05 c	60.70±0.02 c
CK	清水 Clear water	1 458.3	15.44±0.13 c	38.64±0.02 d	31.14±0.03 d	53.95±0.07 c	47.24±0.06 d

注：表中虫口减退率数据为平均数±标准差。同列数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Data on the rate of worm mouth reduction in the table were the mean ± standard deviation. Different lowercase letters after data in the same column indicated significant differences as tested by Duncan's new complex polarity method ($P<0.05$).

表 8 柑橘全爪螨校防治效果

Table 8 Effectiveness of school control of *Panonychus citri* mites

作业组数 Number of operating groups	第 3 天 (%) Day 3	第 5 天 (%) Day 5	第 7 天 (%) Day 7	第 10 天 (%) Day 10	第 15 天 (%) Day 15
1	71.79±2.21 a	79.99±3.95 a	87.47±2.66 a	87.43±0.94 a	82.30±6.43 a
2	69.77±3.59 ab	79.82±0.77 a	88.34±0.26 a	87.66±1.82 a	83.56±1.17 a
3	63.73±4.69 b	74.80±10.39 a	84.42±0.78 a	84.04±0.81 ab	66.09±5.45 b
4	-2.29±0.22 c	-5.59±5.07 b	11.04±2.18 c	17.56±12.00 c	25.47±3.90 c

注：表中数据为平均数±标准差。同列数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。Note: Data in the table were mean ± standard deviation. Different lowercase letters after data in the same column indicated significant differences as tested by Duncan's new complex polarity method ($P<0.05$).

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究的主要工作是在井冈蜜柚金沙柚挂果期以 DJI-T50 植保无人飞机为喷施作业载体，通过正交试验研究飞行速度、相对冠层高度、雾滴粒径水平设置及助剂种类这 4 种植保无人飞机作业参数对井冈蜜柚果树冠层雾滴沉积分布的影响，并设计试验对比直飞、定点及

定点旋转 3 种航线作业方式对蜜柚喷施效果的影响, 根据覆盖率、沉积密度、穿透率、均匀性 4 个方面结果进行加权计算, 优选出较优参数。使用植保无人飞机在此参数下进行 30% 乙唑螨腈悬浮剂、24%阿维·乙螨唑悬浮剂、29%螺螨酯悬浮剂、5%虱螨脲水乳剂 4 种农药对井冈蜜柚柑橘全爪螨飞防作业的防效验证, 根据防治效果对 4 种农药进行药效排名, 并定期观察是否出现斑点、畸形、枯萎脱落和生长停滞等药害情况。

通过上述研究, 得到以下结论:

(1) 当无人飞机飞行速度为 3 m/s、相对冠层高度为 3 m、雾滴粒径 210 μm 、助剂选用为植健、作业方式为定点旋转时, DJI-T50 型植保无人飞机对井冈蜜柚果树冠层雾滴沉积分布效果更佳;

(2) 4 种农药在自动识别树心定点旋转喷施药液 0.5 kg 且施药前后 1 d 无降雨的情况下, 药效排名为: 24%阿维·乙螨唑悬浮剂 > 30%乙唑螨腈悬浮剂 > 29%螺螨酯悬浮剂 > 5%虱螨脲水乳剂。其中 30%乙唑螨腈悬浮剂起效更快, 而 5%虱螨脲水乳剂前期会造成柑橘全爪螨数量的激增, 并于后期缓慢下降。

(3) 试验期间各药剂处理对井冈蜜柚金沙柚本身的生长情况无不良影响, 未出现药害现象, 因此可以得出, 在本次试验配比浓度下, 4 种药剂对蜜柚的安全性较好。本次试验结果可为井冈蜜柚飞防作业提供数据支撑。

3.2 讨论

通过以上试验, 结果表明植保无人飞机飞行参数的变化对井冈蜜柚冠层雾滴沉积的分布有显著影响, 而雾滴的沉积会对防治井冈蜜柚柑橘全爪螨的农药药效有显著影响。在井冈蜜柚参数优选试验中, 无人飞机完成喷施作业后, 叶片正面的沉积密度大于叶片背面, 出现这种情况的原因可能是: (1) 井冈蜜柚果树其叶片面积相对较大, 枝叶硬度大, 不易在风场中被扰动或者翻转, 导致叶背不易沉积雾滴; (2) 井冈蜜柚果树冠层较厚, 郁闭度较高, 叶片与叶片间相互遮掩, 而本次试验处在挂果期, 叶片和蜜柚果实之间存在遮掩, 导致雾滴较难穿透外部叶片抵达内部冠层, 因此所测数据变异系数较大, 雾滴均匀性较低。

在地理气候方面, 由于吉安地处赣江中游的地理位置原因, 四季分明, 雨量充沛(康成英等, 2007)。蜜柚飞防试验的 15 d 中, 在第 4 天、第 8~10 天中出现下雨甚至是暴雨天气, 雨水对柑橘全爪螨虫口有着洗刷作用, 因此在对应雨水天气期间对照组柑橘全爪螨虫口数相对较少, 虫口减退率较大。同时, 根据防治效果可知, 3 种药剂(30%乙唑螨腈悬浮剂、24%阿维·乙螨唑悬浮剂和 29%螺螨酯悬浮剂)均能在施药前后 1 d 内不下雨的前提下, 对柑橘全爪螨有着较好防效。

在药效的持续时间方面, 本次试验除去 5%虱螨脲水乳剂外的 3 种药剂均在第 7 天达到最佳防效, 施药后平均每片叶片上柑橘全爪螨虫口数小于 3 头, 符合柑橘全爪螨防治要求, 第 7 天之后柑橘全爪螨虫口数有上升趋势, 可能原因是雾滴均匀性较低, 部分叶片上仍存在少量柑橘全爪螨在继续叠代繁殖, 此时可根据果园实际情况决定是否需要补施作业。

参考文献 (References)

- Chen SD, Lan YB, Zhou ZY, *et al.* Effects of spraying parameters of small plant protection UAV on droplets deposition distribution in citrus canopy [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38 (5): 97-102. [陈盛德, 兰玉彬, 周志艳, 等. 小型植保无人机喷雾参数对橘树冠层雾滴沉积分布的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2017, 38 (5): 97-102]
- Chen YQ, Yan HL. Research on brand construction of Jinggang Sweet Pomelo under the background of rural revitalization [J]. *Journal of Jinggangshan University (Social Sciences)*, 2022, 43 (5): 103-110. [陈勇强, 颜海兰. 乡村振兴背景下井冈山蜜柚品牌建设路径研究 [J]. 井冈山大学学报(社会科学版), 2022, 43 (5): 103-110]
- Cheng MM, Chen LY, Wang L, *et al.* Sublethal effects of cyetpyrafen and cyenopyrafen on *Panonychus citri* (Acari: Tereanychidae) [J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38 (5): 782-791. [程明明, 成禄艳, 王莉, 等. 乙唑螨腈和腈吡螨酯对柑橘全爪螨的亚致死效应 [J]. 果树学报, 2021, 38 (5): 782-791]
- Feng XJ, Zhang GB, Zhou XY, *et al.* Bioactivity of lansiumamide B against *Panonychus citri* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2015, 42 (5): 763-769. [冯秀杰, 张国宾, 周星洋, 等. 黄皮新肉桂酰胺 B 对柑橘全爪螨 *Panonychus citri* 的生物活性 [J]. 植物保护学报, 2015, 42 (5): 763-769]
- He HG, Yan XH, Wang JJ, *et al.* Sublethal effects of fenpropathrin and avermectin on *Panonychus citri* (Acari: Tereanychidae) [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (8): 2629-2635. [何恒果, 闫香慧, 王进军, 等. 甲氰菊酯和阿维菌素对柑橘全爪螨的亚致死效应 [J]. 应用生态学报, 2016, 27 (8): 2629-2635]
- Kang SY, Liao JY. The present situation and the demand of the automatic monitoring system of rainfall information and the feather of the freshet disaster of Ji'An city [J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2007, 1: 46-49. [康成英, 廖金源. 吉安市山洪灾害及其雨水情自动监测系统现状与要求 [J]. 江西水利科技, 2007, 1: 46-49]
- Li XY, Zhao WJ, Deng WW, *et al.* Predation Abilities of the *Amblyseius charai* on Different Prey Species [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, 37 (3): 443-450. [李晓杨, 赵文娟, 郑薇薇, 等. 江原钝绥螨对三种橘园害虫的捕食能力 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37 (3): 443-450]
- Liu Q, Lan YB, Shan CF, *et al.* The influence of spraying parameters of aerial application on droplet deposition characteristics for apple fields [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42 (9): 173-180. [刘琪, 兰玉彬, 单常峰, 等. 航空植保喷施参数对苹果树雾滴沉积特性影响 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (9): 173-180]
- Panda SK, Jana PK. Efficient task scheduling algorithms for heterogeneous multi-cloud environment [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2015, 71 (4): 1505-1533.
- Patro SGK, Sahu KK. Normalization: A preprocessing stage [J]. *Iarjset*, 2015.
- Song ZW, Deng Y, Zhang BX, *et al.* Population dynamics of predatory mites and citrus red mites on three different citrus varieties [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2022, 59 (6): 1436-1446. [宋子伟, 郑苑, 张宝鑫, 等. 三种柑橘品种上捕食螨和柑橘全爪螨种群发生动态调查 [J]. 应用昆虫学报, 2022, 59 (6): 1436-1446]
- Song ZW, Fang XD, Zhang BX, *et al.* Pilot study of the population dynamics of predatory mites and pest leaf mites in citron-lemon orchards [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (4): 766-771. [宋子伟, 方小端, 张宝鑫, 等. 香柠檬捕食螨和叶螨发生动态初报 [J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (4): 766-771]
- Tang T, Zhao MP, Huang SK, *et al.* Evaluation of control efficacy of cyetpyrafen mixed spirodiclofen against citrus red mite, *Panonychus citri* McGregor under field conditions [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (4): 282-287. [唐涛, 赵明平, 黄生空, 等. 乙唑螨腈与螺螨酯混用对柑橘全爪螨的田间防治效果评价 [J]. 植物保护, 2021, 47 (4): 282-287]
- Wang YB, Cheng X, Wang DR, *et al.* Toxicity test and field efficacy of seven acaricides against *Panonychus citri* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (6): 292-294. [王彦博, 程曦, 王郑睿, 等. 7 种药剂对柑橘全爪螨的室内毒力及田间防效 [J]. 植物保护, 2019, 45 (6): 292-294]
- Yanhua M, Jinya S, Jianli S, *et al.* Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 170: 105282.
- Yao WX, Lan YB, Wang J, *et al.* Experiments on the effectiveness of a single-rotor motorized drone in spraying lotus and lychee [J]. *South China Fruits*, 2019, 48 (6): 64-71. [姚伟祥, 兰玉彬, 王娟, 等. 单旋翼电动无人机对莲雾及荔枝喷雾效果的试验 [J]. 中国南方果树, 2019, 48 (6): 64-71]
- Zang Y. Study on the Mechanism and Application Effect of the Adjuvants for Aviation Plant Protection [D]. Guangzhou: South China Agricultural University. [臧禹. 植保无人机飞防助剂的作用机理及其应用效果研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2019]
- Zhang N, Liu YS, Xie LX, *et al.* Advances in research on *Stethorus punctillum*, an important predator of the spider mite [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (4): 662-671. [张娜, 刘玉升, 谢丽霞. 叶螨的重要天敌——深点食螨瓢虫的研究进展 [J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (4): 662-671]

Zhou ZY, Ming R, Zhang Y, *et al.* Development status and countermeasures of agricultural aviation in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (20): 1-13. [周志艳, 明锐, 臧禹, 等. 中国农业航空发展现状及对策建议 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (20): 1-13]