

植保无人机作业参数对雾滴在芒果冠层沉积分布的影响

王冰洁^{1,2}, 潘波^{1,2}, 杜长远³, 姜蕾^{1,2*}, 林勇^{1,2*}, 张少帅⁴

1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南海口 571101; 2. 农业农村部热带作物病虫害综合治理重点实验室, 海南海口 571101; 3. 华中农业大学植物科学技术学院, 湖北武汉 430070; 4. 中国热带农业科学院, 海南海口 571101

摘要: 植保无人机作业参数对无人机喷洒过程中的雾滴分布有显著影响, 从而影响农药的利用率和病虫害的防治效果。为探究多旋翼植保无人机作业参数对芒果树冠层喷雾质量与效果的影响, 以提高植保无人机施药的对靶高效沉积, 本研究应用大疆 T40 型植保无人机采用正交试验对芒果树进行喷雾作业, 对主要作业参数雾滴粒径 (80、100、120 μm)、作业高度 (2.0、2.5、3.0 m)、作业速度 (3.0、4.0、5.0 m/s) 进行优选。结果表明: 施药参数为雾滴粒径 80 μm 、作业高度 2.0 m、作业速度 3.0 m/s 时, 植保无人机雾滴在芒果树各个冠层的雾滴沉积密度、覆盖率、雾滴均匀性等均显著大于其他处理组。雾滴沉积密度、覆盖率、作业高度与作业速度呈负相关。极差分析结果显示, 雾滴粒径是影响芒果树冠层雾滴沉积密度的主要因素; 作业高度是影响芒果树下层叶片正面与内层叶片背面雾滴覆盖率的主要因素; 作业速度是影响芒果树上层叶片背面雾滴覆盖率的主要因素; 其余各层叶片正面与背面的喷雾粒径是影响雾滴覆盖率的主要因素。植保无人机在芒果树冠层的雾滴分布差异性较大, 影响雾滴均匀性的主要因素是雾滴粒径, 其次是作业速度、作业高度。根据 T40 多旋翼植保无人机在芒果树冠层的雾滴沉积密度、雾滴覆盖率、雾滴均匀性结果综合得到植保无人机在芒果树上作业的最佳参数组合为雾滴粒径 80 μm , 作业高度 2.0 m, 作业速度 3.0 m/s, 为小型植保无人机在芒果及其他类似果园空中喷洒作业提供指导。

关键词: 植保无人机; 芒果; 作业参数; 雾滴; 沉积分布

中图分类号: S436.67; S494

文献标志码: A

Effects of Spraying Parameters for Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle on Deposition Distribution of Droplets in Mango Canopy

WANG Bingjie^{1,2}, PAN Bo^{1,2}, DU Changyuan³, JIANG Lei^{1,2*}, LIN Yong^{1,2*}, ZHANG Shaoshuai⁴

1. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Key Laboratory of Integrated Pest Management of Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China; 3. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 4. Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: Plant protection unmanned aerial vehicle (UAVs) operational parameters have remarkable effects on droplet distribution in UAVs spraying, which significantly affects pesticide utilization rate and treatment effectiveness. The study was aimed to explore the effects of operating parameters of electric UAVs on droplet deposition distribution in mango trees canopy and to enhance the efficiency of targeted deposition by UAVs. The DJI T40 multi-rotor electric plant protection UAV was used and the main operational parameters including droplet sizes (80, 100, 120 μm), flight height (2.0, 2.5, 3.0 m) and flight speed (3.0, 4.0, 5.0 m/s) were optimized by an orthogonal test. When the droplet size was 80 μm with 2.0 m of flight height and 3.0 m/s of flight speed, the droplet deposition density, coverage rate and uniformity in each canopy of mango trees were significantly larger than those of the other groups. There was a negative correlation between droplet deposition density, coverage rate and flight height, flight speed. The results of range analysis showed that droplet size was the main factor affecting the deposition density of droplet in mango canopy. The flight

收稿日期 2024-04-11; 修回日期 2024-04-22

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 321MS074); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630042022011)。

作者简介 王冰洁 (1993—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 现代施药技术与农药毒理。*通信作者 (Corresponding author): 姜蕾 (JIANG Lei), E-mail: tina266045@126.com; 林勇 (LIN Yong), E-mail: linyongty@163.com。

height was the main factor affecting the coverage rate of spray droplets on the front side of the lower canopy leaves and the back side of the inner canopy leaves of mango trees. The flight speed was the main factor affecting the coverage rate of spray droplets on the back side of the upper canopy leaves of mango trees. The spray diameter of the front and back of the leaves of the other layers was the main factor affecting the droplet coverage rate. The droplet distribution within mango canopy exhibited significant variation, with droplet size being the primary factor determining uniformity, followed by flight speed and flight height. In our current study, according to the droplet deposition density, coverage rate and uniformity in mango canopy, the best operating parameters of T40 multi-rotor electric plant protection UAV were obtained as follows: droplet size of 80 μm , operation height of 2.0 m, and operation speed of 3.0 m/s. It could provide fundamental guidance of the operation of small UAVs for the aerial spraying of mango trees and other similar orchards.

Keywords: plant protection UAV; mango; operational parameters; droplet; deposition distribution

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.11.018

芒果被称为“热带水果之王”，是世界上最重要的五大水果之一^[1]。我国芒果种植面积位居世界第二，主产区在海南、广西、广东、云南和四川等地^[2]。农业农村部农垦局数据显示，2021 年我国芒果种植面积为 37.46 万 hm^2 ，产量 395.8 万 t，其中海南的芒果种植面积为 6.62 万 hm^2 ，产量 55.5 万 t。然而，热区高温高湿的气候环境导致病虫害的滋生蔓延，农药年均使用量也相应地高于温带地区，施药次数与施药作业强度较大。海南芒果种植区多为丘陵山地，传统地面施药方式，包括背负式手动喷雾器和地面机械喷雾器，效率低，劳动强度大，面临严峻挑战^[3-4]。并且传统施药器械属于大雾滴、大容量喷洒，农药浪费严重，有效利用率仅为 35% 左右^[5-7]。目前热区果树种植人工成本的 30%（甚至更高）为施药作业所消耗，芒果园劳动力短缺与管理技术落后等问题日益突出，植保无人机是一种高效的现代化施药器械，合理使用可以及时、快速、有效地对农作物病虫害进行防控，同时也能缓解果园劳动力短缺问题，从而提高农药利用率，实现节本增效^[8-10]。

大量研究发现，植保无人机作业参数对喷雾质量与效果有很大的影响。极飞 P20 无人机作业速度和作业高度越低在火龙果树上的喷雾效果越好^[11]；影响极飞 P20 无人机雾滴在荔枝树冠层穿透性的主要因素是作业高度^[12]。TH-X60 油动无人机作业高度和作业速度显著影响其在荔枝树上的喷雾效果^[13]。六旋翼植保无人机不同喷头类型影响樱桃树冠中下层的雾滴沉积分布和均匀性^[14]。3WQF120-12 无人机作业速度越低沉积越多，对不同树形桃树喷雾的均匀性有显著性差异^[15]。极飞 XP 20 无人机不同作业参数对库尔勒香梨的授粉有显著差异^[16-17]。3WYD-4-22A 无人机作业速度为 2 m/s 时，桃树

冠层雾滴沉积量最大^[18]。韦加 JF01-20 无人机作业速度越低，在苹果树上的喷雾效果越好^[19]。极飞 XP 20 无人机作业速度的改变对主干型红枣花期冠层雾滴沉积密度影响最大^[20]。

小型电动多旋翼植保无人机具有使用成本低，操作保养简单，起降灵活，不需要专用的机场等优点，市场占有率较高。因此，本研究以小型四旋翼植保无人机（大疆 T40）为研究对象，通过 3 因子 3 水平正交试验，结合雾滴沉积密度、雾滴覆盖率、均匀性等指标，优选出适用于芒果园的四旋翼无人机作业参数，以提高植保无人机雾滴在芒果冠层的有效沉积，推动我国果树施药器械与技术向现代化、智能化、轻简化方向发展。

1 材料与方法

1.1 材料

研究对象为春梢生长期的贵妃芒果树（芒果树平均株高 2.0 m，果园行距 4~6 m）。于 2023 年 4 月 23 日在海南省三亚市崖州区开展试验。

主要设备：大疆 T40 四旋翼电动无人机，载药量为 40 L，最大作业速度为 7 m/s，最大有效喷幅为 11 m，可调离心喷头；AVM-01 型风速仪（台湾泰仪电子股份有限公司）；LS-204 型温湿度仪（中山市朗信电子有限公司）；雾滴测试卡（重庆六六山下植保科技有限公司）；卫生纸；回形针和自封袋等。

1.2 方法

1.2.1 正交试验 参考植保无人机芒果园喷洒情况，设定喷液量为 30 L/hm^2 ，喷幅为 5 m，设置 3 个因子（雾滴粒径、作业高度、作业速度），每个变量为 3 个水平（表 1），按照 3 因子 3 水平正交设计，设计 9 组试验，进行 T40 植保无人飞

机芒果园作业参数优化试验。各处理的相关气象参数见表 2。

表 1 试验因素与水平
Tab. 1 Test factors and levels

水平 Leve	因素 Factor		
	A 雾滴粒径 Droplet size/ μm	B 作业高度 Working height/m	C 作业速度 Working speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	80	2.0	3
2	100	2.5	4
3	120	3.0	5

注：作业高度为离芒果冠层高度。
Note: The working height is the height from the mango canopy.

表 2 相关气象参数
Tab. 2 Relevant meteorological parameters

处理 Treatment	风速 Wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	湿度 Humidity/%
A ₁ B ₁ C ₁	0.2	32.4	64
A ₁ B ₂ C ₂	1.2	32.8	61
A ₁ B ₃ C ₃	0.8	33.1	54
A ₂ B ₁ C ₂	1.4	33.2	57
A ₂ B ₂ C ₃	2.2	34.3	54
A ₂ B ₃ C ₁	2.3	35.5	45
A ₃ B ₁ C ₃	1.8	35.9	37
A ₃ B ₂ C ₁	1.2	35.2	41
A ₃ B ₃ C ₂	1.0	35.2	37

1.2.2 采样点布设 随机选择植保无人机中间 2 条航线的 3 株大小、树形相似的芒果树进行取样，芒果树的上层、下层和内层分别按照图 1 布设雾滴测试卡。在取样芒果冠层上层和下层的 4 个方位分别布设 1 个采样点，内层自上往下布设 3 个采样点，每株树布设 11 个采样点，每个采样点分别在叶片正面和背面各布设 1 张雾滴测试卡，每组试验共布设 33 个采样点，66 张雾滴测试卡。用回形针将雾滴测试卡固定在每个采样点芒果叶片正面和背面。每次试验结束后收集雾滴测试卡。

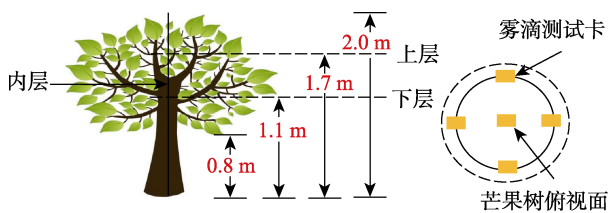


图 1 采样示意图
Fig. 1 Schematic diagram of sample

1.3 数据处理

扫描各个处理组的雾滴测试卡，并参照 ZHU 等^[21]的方法，使用 Deposit Scan (V1.2)软件进行分析处理，获得各个处理的雾滴沉积密度及覆盖率。采用 SPSS 20.0 软件处理数据，使用最小显著性差异法 (LSD) 比较差异显著性。

变异系数 (CV) 可以用来表征雾滴沉积的均匀性，若变异系数与雾滴沉积分布的均匀性呈负相关，则 CV 越小，雾滴沉积分布均匀性越好。变异系数计算公式为：

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

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

式中，S 为同处理组采集样本标准差；X_i 为每个采样点雾滴密度，即覆盖率； $\bar{X}$ 为各处理组雾滴密度，即覆盖率平均值；n 为各处理组采样点个数。

2 结果与分析

2.1 植保无人机雾滴在芒果树冠层的沉积密度

结果显示，在不同参数下，植保无人机雾滴在芒果树各个冠层的沉积密度有显著差异。在各处理中，A₁B₁C₁ (雾滴粒径 80 μm ，作业高度 2.0 m，作业速度 3.0 m/s) 处理的芒果树冠层上层、下层和内层叶片正面和背面的雾滴沉积密度均最大，叶片正面的雾滴沉积密度分别为 82.433 $\pm$ 18.208、71.519 $\pm$ 13.199、97.315 $\pm$ 4.655 个/ cm^2 ，叶片背面的雾滴沉积密度分别为 8.936 $\pm$ 3.071、23.920 $\pm$ 6.705、20.615 $\pm$ 0.958 个/ cm^2 ，显著高于其他处理组 ($P<0.05$ ，表 3)。

由极差分析结果显示，影响芒果树内层叶片正面雾滴沉积密度的因素从大到小依次为：喷雾粒径>作业速度>作业高度。对其余冠层叶片正面与背面雾滴沉积密度的影响从大到小依次为：喷雾粒径>作业高度>作业速度。雾滴粒径是影响芒果树植保无人机雾滴沉积密度的主要因素，当雾滴粒径为 80 μm ，作业高度为 2.0 m，作业速度为 3.0 m/s 时，芒果各冠层的雾滴沉积密度达到最大值 (表 4)。根据雾滴沉积密度获得无人机的最优作业参数为 A₁B₁C₁。

2.2 植保无人机雾滴在芒果树冠层的雾滴覆盖率

如表 5 所示，无人机不同作业参数下，除芒

表 3 无人机不同作业参数下的雾滴沉积密度

Tab. 3 Droplet deposition density under different operating parameters of UAV 个/cm²

处理 Treatment	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
A ₁ B ₁ C ₁	82.433±12.208 ^a	71.519±11.199 ^a	97.315±4.655 ^a	8.936±2.071 ^a	23.920±4.705 ^a	20.615±0.958 ^a
A ₁ B ₂ C ₂	46.364±8.889 ^b	48.403±10.565 ^b	53.197±1.230 ^b	5.742±2.553 ^{abc}	3.524±1.291 ^{cd}	2.607±0.370 ^{cd}
A ₁ B ₃ C ₃	36.911±2.101 ^{bc}	28.153±15.430 ^c	22.545±8.022 ^c	6.556±3.659 ^{ab}	4.980±0.608 ^{cd}	4.527±0.820 ^{bc}
A ₂ B ₁ C ₂	23.713±1.100 ^{de}	31.165±7.727 ^c	21.148±4.435 ^c	4.619±0.579 ^{bc}	8.145±2.158 ^{bc}	4.732±1.015 ^b
A ₂ B ₂ C ₃	12.805±3.075 ^e	29.233±8.352 ^c	10.975±2.285 ^{de}	2.915±1.270 ^{bc}	2.826±1.261 ^d	4.457±0.843 ^{bc}
A ₂ B ₃ C ₁	17.995±4.983 ^{de}	20.079±1.334 ^c	14.855±2.008 ^{cde}	3.580±0.168 ^{bc}	7.335±0.283 ^{bc}	4.910±0.617 ^b
A ₃ B ₁ C ₃	15.444±5.769 ^e	21.473±4.050 ^c	7.378±1.018 ^e	2.884±2.411 ^c	2.108±1.165 ^d	3.288±0.968 ^{bcd}
A ₃ B ₂ C ₁	12.199±3.734 ^e	20.539±5.916 ^c	7.625±1.405 ^e	2.859±1.564 ^c	2.353±0.875 ^d	1.785±0.428 ^d
A ₃ B ₃ C ₂	30.885±5.158 ^{cd}	23.041±6.554 ^c	19.663±3.840 ^{cd}	3.489±1.169 ^{bc}	1.976±1.081 ^d	2.345±0.688 ^d

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

表 4 雾滴沉积密度极差分析

Tab. 4 Range analysis of droplet deposition density 个/cm²

项目 Item	A 雾滴粒径 Droplet size					
	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
K_1	165.708	148.074	173.057	21.235	32.423	27.748
K_2	54.513	80.476	46.978	11.114	18.306	14.098
K_3	58.528	65.053	34.667	9.231	6.436	7.418
$\bar{K}_1$	55.236	49.358	57.686	7.078	10.808	9.249
$\bar{K}_2$	18.171	26.825	15.659	3.705	6.102	4.699
$\bar{K}_3$	19.509	21.684	11.556	3.077	2.145	2.473
极差	37.065	27.674	46.130	4.001	8.663	6.776
较优水平	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁

项目 Item	B 作业高度 Working height					
	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
K_1	121.589	124.156	125.842	16.439	34.173	28.632
K_2	71.368	98.174	71.797	11.516	8.703	8.848
K_3	85.791	71.273	57.063	13.625	14.291	11.782
$\bar{K}_1$	40.530	41.385	41.947	5.480	11.391	9.545
$\bar{K}_2$	23.789	32.725	23.932	3.839	2.901	2.949
$\bar{K}_3$	28.597	23.758	19.021	4.542	4.764	3.927
极差	16.741	17.627	22.926	1.641	8.490	6.596
较优水平	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁

项目 Item	C 作业速度 Working speed					
	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 In layer
K_1	112.626	112.136	119.795	15.375	33.608	27.310
K_2	100.961	102.609	94.008	13.850	13.645	9.683
K_3	65.160	78.858	40.898	12.355	9.914	12.272
$\bar{K}_1$	37.542	37.379	39.932	5.125	11.203	9.103
$\bar{K}_2$	33.654	34.203	31.336	4.617	4.548	3.228
$\bar{K}_3$	21.720	26.286	13.633	4.118	3.305	4.091
极差	15.822	11.093	26.299	1.007	7.898	5.875
较优水平	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁

注： K_i 表示*i*水平时各因素所对应的试验结果之和； $\bar{K}_i$ 表示*i*水平时各因素所对应的试验结果的平均值。

Note: K_i represents the sum of the results of each factor at the *i* level; $\bar{K}_i$ represents the average of the results of each factor at the *i* level.

表 5 无人机不同作业参数下的雾滴覆盖率

Tab. 5 Droplet coverage ratio under different operating parameters of UAV %

处理 Treatment	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
A ₁ B ₁ C ₁	12.784±0.173 ^a	7.248±1.513 ^a	11.516±2.514 ^a	0.412±0.163 ^a	1.077±0.342 ^a	0.792±0.104 ^a
A ₁ B ₂ C ₂	4.109±0.3343 ^c	5.215±2.434 ^{ab}	6.166±1.771 ^b	0.219±0.131 ^a	0.233±0.132 ^{cd}	0.185±0.079 ^{cd}
A ₁ B ₃ C ₃	4.294±0.193 ^c	3.778±2.255 ^b	2.140±0.635 ^c	0.412±0.139 ^a	0.459±0.118 ^{bc}	0.436±0.036 ^b
A ₂ B ₁ C ₂	3.099±0.589 ^{cd}	4.269±1.285 ^{ab}	2.658±1.644 ^c	0.362±0.027 ^a	0.573±0.067 ^b	0.284±0.022 ^{bcd}
A ₂ B ₂ C ₃	1.795±0.043 ^d	4.654±2.404 ^{ab}	1.310±0.348 ^c	0.245±0.080 ^a	0.286±0.126 ^{cd}	0.325±0.102 ^{bc}
A ₂ B ₃ C ₁	2.817±1.365 ^{cd}	2.285±0.209 ^b	1.843±0.887 ^c	0.421±0.131 ^a	0.583±0.021 ^b	0.323±0.170 ^{bc}
A ₃ B ₁ C ₃	3.479±1.151 ^{cd}	4.969±1.600 ^{ab}	1.255±0.074 ^c	0.303±0.125 ^a	0.193±0.112 ^d	0.394±0.041 ^b
A ₃ B ₂ C ₁	2.290±1.218 ^d	4.214±2.484 ^{ab}	1.297±0.947 ^c	0.395±0.350 ^a	0.216±0.050 ^{cd}	0.162±0.098 ^d
A ₃ B ₃ C ₂	6.828±1.356 ^b	4.515±0.009 ^{ab}	3.084±0.113 ^c	0.330±0.052 ^a	0.140±0.098 ^d	0.132±0.060 ^d

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

果树下层叶片正面的雾滴覆盖率外，杧果树上、下、内层的雾滴覆盖率有组间显著性差异。在各处理中，A₁B₁C₁（雾滴粒径 80 μm，作业高度 2.0 m，作业速度 3.0 m/s）处理的杧果树冠层上层、下层和内层叶片正面和背面的雾滴覆盖率均最大，叶片正面的雾滴覆盖率分别为(12.784±0.173)%、(7.248±1.513)%和(11.516±2.514)%，叶片背面的雾滴覆盖率分别为(0.412±0.163)%、(1.077±0.342)%和(0.792±0.104)%。

由雾滴覆盖率极差分析结果显示，作业高度是影响杧果树下层叶片正面与内层叶片背面雾滴覆盖率的主要因素，作业速度是影响杧果树上层叶片背面雾滴覆盖率的主要因素，喷雾粒径是影响其余各层叶片正面与背面雾滴覆盖率的主要因素。当无人机作业参数为雾滴粒径 80 μm，作业高度 2.0 m，作业速度 3.0 m/s 时，其雾滴覆盖率最优（表 6）。雾滴覆盖率与雾滴沉积密度的试验结果一致。

表 6 雾滴覆盖率极差分析

Tab. 6 Range analysis of droplet coverage ratio %

项目 Item	A 雾滴粒径 Droplet size					
	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
K ₁	21.187	16.240	19.822	1.043	1.769	1.414
K ₂	7.711	11.208	5.810	1.028	1.442	0.932
K ₃	12.597	13.697	5.636	1.028	0.549	0.688
$\bar{K}_1$	7.062	5.413	6.607	0.348	0.589	0.471
$\bar{K}_2$	2.570	3.736	1.937	0.343	0.480	0.311
$\bar{K}_3$	4.199	4.566	1.879	0.343	0.183	0.229
极差	4.492	1.677	4.728	0.005	0.406	0.242
较优水平	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁	A ₁

项目 Item	B 作业高度 Working height					
	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
K ₁	19.361	16.486	15.428	1.077	1.843	1.470
K ₂	8.194	14.082	8.773	0.860	0.735	0.672
K ₃	13.939	10.577	7.067	1.163	1.182	0.891
$\bar{K}_1$	6.454	5.495	5.143	0.359	0.614	0.490
$\bar{K}_2$	2.731	4.694	2.924	0.286	0.245	0.224
$\bar{K}_3$	4.647	3.526	2.356	0.388	0.394	0.297
极差	3.723	1.970	2.787	0.102	0.369	0.266
较优水平	B ₁	B ₁	B ₁	B ₃	B ₁	B ₁

续表 6 雾滴覆盖率极差分析

Tab. 6 Range analysis of droplet coverage ratio (continued) %

项目 Item	C 作业速度 Working speed					
	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
K_1	17.890	13.747	14.656	1.229	1.876	1.277
K_2	14.036	13.999	11.908	0.911	0.946	0.602
K_3	9.569	13.400	4.704	0.959	0.938	1.155
$\bar{K}_1$	5.963	4.582	4.885	0.410	0.625	0.426
$\bar{K}_2$	4.679	4.466	3.969	0.304	0.315	0.201
$\bar{K}_3$	3.190	4.467	1.568	0.320	0.313	0.385
极差	2.773	0.116	3.317	0.106	0.312	0.225
较优水平	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁

注： K_i 表示*i*水平时各因素所对应的试验结果之和； $\bar{K}_i$ 表示*i*水平时各因素所对应的试验结果的平均值。

Note: K_i represents the sum of the results of each factor at the *i* level; $\bar{K}_i$ represents the average of the results of each factor at the *i* level.

2.3 植保无人飞机雾滴在杧果树上的均匀性

由雾滴沉积密度变异系数（CV）得出，植保无人飞机在杧果树相同冠层水平面的雾滴分布存在较大差异（表 7）， $A_1B_1C_1$ 处理中，其内层叶片正面的均匀性最佳； $A_1B_2C_2$ 处理中，其内层叶片正面的均匀性最佳； $A_2B_1C_2$ 处理中，其上层叶片正面的均匀性最佳； $A_2B_3C_1$ 处理中，其上层叶片

背面和下层叶片背面的均匀性均较好； $A_1B_1C_1$ 、 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_3C_1$ 处理的冠层综合均匀性相对较好。雾滴沉积密度均匀性极差分析得出，影响雾滴均匀性的因素主要是雾滴粒径，其次是作业速度、作业高度。并且作业参数分别为雾滴粒径 80 μm ，作业高度 2.0 m，作业速度 3.0 m/s 时，雾滴均匀性最好（表 8）。

表 7 雾滴沉积密度变异系数

Tab. 7 Coefficient of variation (CV) of droplet deposition density %

处理 Treatment	叶正面 Front of leaf			叶背面 Back of leaf		
	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer	上层 Upper layer	下层 Under layer	内层 Inner layer
$A_1B_1C_1$	14.809	15.658	4.783	23.178	19.670	4.649
$A_1B_2C_2$	10.783	21.827	2.312	44.449	36.644	14.194
$A_1B_3C_3$	4.532	54.809	35.581	55.806	12.199	18.115
$A_2B_1C_2$	2.980	24.795	20.971	12.530	26.489	21.451
$A_2B_2C_3$	12.968	28.573	20.820	43.568	44.626	18.923
$A_2B_3C_1$	38.911	6.643	53.910	4.679	3.851	12.559
$A_3B_1C_3$	32.058	18.861	13.802	83.615	55.279	29.448
$A_3B_2C_1$	24.176	28.805	18.426	54.700	37.194	23.996
$A_3B_3C_2$	42.279	28.444	19.529	33.501	54.712	29.353

3 讨论

无人飞机的作业参数对液滴的分布和均匀性有很大影响。在植保无人飞机喷洒过程中，如果忽视作业参数优化，使用过高的飞行速度，或者选用过高的飞行高度，不仅难以达到良好的防治效果，还会增加农药飘移风险^[22-25]。本研究通过对雾滴沉积密度、覆盖率、均匀性进行分析，优选出大疆 T40 型四旋翼无人飞机杧果园作业参数为雾滴粒径 80 μm ，作业高度 2.0 m，作业速度

3.0 m/s。植保无人飞机参数的改变，对雾滴在杧果树不同冠层的沉积密度、覆盖率和均匀性均有一定影响。研究发现，植保无人飞机参数的改变，导致雾滴在不同果树不同冠层的分布有显著差异^[11-20]。

作业速度和作业高度的降低可以有效减少飘移，提高液滴沉积量，从而提高喷洒质量^[12]。本研究得出相似的结论，雾滴沉积密度、覆盖率和作业高度、作业速度存在负相关关系。可能是由于杧果采后修剪等农事操作，春梢生长期的贵妃

表 8 雾滴沉积均匀性极差分析

Tab. 8 Range analysis of droplet deposition homogeneity

项目 Item	A 雾滴粒径 Droplet size	B 作业高度 Working height	C 作业速度 Working speed
K_1	65.666	70.838	65.100
K_2	66.541	81.165	74.541
K_3	104.696	84.902	97.263
$\bar{K}_1$	10.944	11.806	10.850
$\bar{K}_2$	11.090	13.527	12.423
$\bar{K}_3$	17.449	14.150	16.211
极差	6.505	2.344	5.361

注： K_i 表示*i*水平时各因素所对应的试验结果之和； $\bar{K}_i$ 表示*i*水平时各因素所对应的试验结果的平均值。

Note: K_i represents the sum of the results of each factor at the *i* level; $\bar{K}_i$ represents the average of the results of each factor at the *i* level.

杧果树冠层较薄，植保无人机自身旋翼产生的风场对其影响较小。较低的作业高度和作业速度，导致更多的喷雾雾滴向靶标生物运动。然而，由于杧果种植环境、植保无人机机型特性、安全和效率问题，操作高度和速度不能过低。有研究发现，飞行速度与植保无人机在火龙果^[11]、桃树^[15]、枣树^[20]、小麦^[26]和苹果树^[19, 27]冠层雾滴沉积密度存在负相关关系；随着植保无人机作业速度的提高，雾滴飘移风险也随之增大^[15, 19, 28]；作业高度较低时，植保无人机喷雾液滴在火龙果树^[11]、荔枝树^[13]的沉积密度较好。本研究发现，植保无人机在杧果树冠层的雾滴分布差异较大，影响雾滴均匀性的主要因素是雾滴粒径。本研究结果与试验的天气条件、杧果冠层大小密切相关。也有研究发现，作业高度是影响植保无人机液滴在荔枝树上分布均匀性的主要因素^[12]，可能是因为荔枝树冠层相对较大，植保无人机对靶下压风场对其影响较大，所以作业高度是均匀性的主要影响因素。不同果树的冠层特性差异较大，植保无人飞机的施药效果也有差异。

本研究通过对 T40 多旋翼植保无人机在杧果树冠层的雾滴沉积密度、雾滴覆盖率、雾滴均匀性的综合分析，得到适合杧果树的植保无人飞机的最佳作业参数组合，研究结果为小型植保无人机在杧果及其他类似果园的空中喷洒作业提供一定的基础指导。

参考文献

[1] 刘德兵, 刘国银, 魏军亚. 海南杧果产业发展及分析[J].

中国热带农业, 2022(2): 11-18.

LIU D B, LIU G Y, WEI J Y. Development and analysis of mango industry in Hainan province[J]. China Tropical Agriculture, 2022(2): 11-18. (in Chinese)

[2] YANG Y, DONG G R, WANG M, XIAN X W, WANG J, LIANG X Y. Multifungicide resistance profiles and biocontrol in *Lasiodiplodia theobromae* from mango fields[J]. Crop Protection, 2021, 145: 105611.

[3] 苏丽旭, 刘莉滋. 我国果园植保机械的现状与发展趋势[J]. 农业装备技术, 2022, 48(4): 4-8.

SU L X, LIU L Z. Current situation and development trend of plant protection machinery in orchards in China[J]. Agricultural Equipment and Technology, 2022, 48(4): 4-8. (in Chinese)

[4] LI Z X, ZHANG Y H, ZHAO Q Y, WANG C Q, CUI Y L, LI J, CHEN A H, LIANG G L, JIAO B N. Occurrence, temporal variation, quality and safety assessment of pesticide residues on citrus fruits in China[J]. Chemosphere, 2020, 258: 127381.

[5] 宋坚利, 何雄奎, 曾爱军, 刘亚佳. 三种果园施药机械施药效果研究[J]. 中国农机化, 2006(5): 79-82.

SONG J L, HE X K, ZENG A J, LIU Y J. Spraying quality of three kinds of orchard plant protection equipments[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2006(5): 79-82. (in Chinese)

[6] 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民, 吴萍, 丁素明, 邱威. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化, 2009(6): 10-13, 17.

FU X M, LYU X L, DING W M, WU P, DING S M, QIU W. Current situation and technical demand of orchard plant protection machinery in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009(6): 10-13, 17. (in Chinese)

[7] 李鸿筠, 刘浩强, 冉春, 王联英, 姚廷山, 胡军华. 不同喷雾器械对柑橘害虫的防治研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(4): 150-154.

LI H J, LIU H Q, RAN C, WANG L Y, YAO T S, HU J H. Studies on the control of 4 type of sprayers against citrus insect pests[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4): 150-154. (in Chinese)

[8] 王冰洁, 刘奎, 吕宝乾, 姜蕾, 潘波, 梁敬琦, 林勇. 东南亚芒果主产区的施药器械与技术现状与展望[J]. 热带农业科学, 2020, 40(增刊 1): 94-98.

WANG B J, LIU K, LYU B Q, JIANG L, PAN B, LIANG J Q, LIN Y. Present status and prospect of plant protection machinery and technology of mango in southeast Asia[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020, 40(Suppl. 1): 94-98. (in Chinese)

[9] LAN Y, HOFFMANN W C, FRITZ B K, MARTIN D E,

- LOPEZ J D. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008, 24(1): 5-10.
- [10] HUANG Y, HOFFMANN W C, LAN Y, WU W, FRITZ B K. Development of a spray system an unmanned aerial vehicle platform[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(6): 803-809.
- [11] 王冰洁, 潘波, 姜蕾, 林勇, 赵帅, 莫宇星. 植保无人机作业参数对雾滴在火龙果树冠层沉积分布的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(10): 101-109.
- WANG B J, PAN B, JIANG L, LIN Y, ZHAO S, MO Y X. Effects of spraying parameters of plant protection unmanned aerial vehicle on deposition distribution of droplets in pitaya canopy[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(10): 101-109. (in Chinese)
- [12] 王冰洁, 潘波, 姜蕾, 梁敬琦, 林勇. 四旋翼无人机作业参数对荔枝冠层雾滴沉积分布的影响[J]. *中国南方果树*, 2020, 49(6): 61-66.
- WANG B J, PAN B, JIANG L, LIANG J Q, LIN Y. Effects of operating parameters of quad-rotor UAV on droplets deposition distribution in litchi canopy[J]. *South China Fruits*, 2020, 49(6): 61-66. (in Chinese)
- [13] 潘波, 姜蕾, 王冰洁, 梁敬琦, 朱宏宇, 白先权, 林勇. 飞行参数对六旋翼植保无人机雾滴在荔枝树冠层沉积分布的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(1): 213-219.
- PAN B, JIANG L, WANG B J, LIANG J Q, ZHU H Y, BAI X Q, LIN Y. Effects of flight height and speed of diesel multi-rotor UAV on deposition distribution and penetration of fogdrops in litchi tree canopy[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(1): 213-219. (in Chinese)
- [14] CHOJNACKI J, PACHUTA A. Impact of the parameters of spraying with a small unmanned aerial vehicle on the distribution of liquid on young cherry trees[J]. *Agriculture*, 2021, 11(11): 1-11.
- [15] MENG Y H, SU J Y, SONG J L, CHEN W H, LAN Y B. 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.
- [16] WANG Y Q, BAI R, LU X Y, QUAN S W, LIU Y, LIN C X, WEI J, SU Y F, YAO R Y. Pollination parameter optimization and field verification of UAV-based pollination of 'Kuerle Xiangli'[J]. *Agronomy*, 2022, 12: 2561.
- [17] 王璐, 吉光鹏, 宋伟, 牛岭磊, 张栋海, 赵思峰. 无人机喷雾参数对雾滴在香梨花期冠层沉积分布的影响[J]. *农业科技通讯*, 2022(6): 175-179.
- WANG L, JI G P, SONG W, NIU L L, ZHANG D H, ZHAO S F. Effects of UAV spray parameters on the deposition distribution of droplets in the canopy of fragrant pear flowering phase[J]. *Agricultural Technology Communication*, 2022(6): 175-179. (in Chinese)
- [18] LI L L, HU Z H, LIU Q J, YI T C, HAV P, ZHANG R R, PAN L. Effect of flight velocity on droplet deposition and drift of combined pesticides sprayed using an unmanned aerial vehicle sprayer in a peach orchard[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 981494.
- [19] 张亚莉, 白禄超, 陈鹏超, 兰玉彬, 于保宏. 无人机作业参数对苹果树雾滴沉积分布的影响[J]. *农机化研究*, 2023, 46(4): 183-187.
- ZHANG Y L, BAI L C, CHEN P C, LAN Y B, YU B H. Effects of operating parameters on the droplets distribution by unmanned aerial vehicle in apple trees[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2023, 46(4): 183-187. (in Chinese)
- [20] 常心怡, 张栋海, 吉光鹏, 牛岭磊, 常学艳, 尔热斯白克·塔米力, 钱丹丹, 王刚. 无人机喷雾参数对雾滴在红枣花期冠层沉积分布的影响[J]. *果树资源学报*, 2023, 4(2): 15-19, 23.
- CHANG X Y, ZHANG D H, JI G P, NIU L L, CHANG X Y, ERGESBEK T M L, QIAN D D, WANG G. Effects of UAV spraying parameters on droplet deposition and distribution in canopy of Chinese jujube at flowering stage[J]. *Journal of Fruit Resources*. 2023, 4(2): 15-19, 23. (in Chinese)
- [21] ZHU H P, SALYANI M, FOX R D. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2011, 76(1): 38-43.
- [22] 袁会珠, 薛新宇, 闫晓静, 秦维彩, 孔肖, 周洋洋, 王明, 高赛超. 植保无人飞机低空低容量喷雾技术应用与展望[J]. *植物保护*, 2018, 44(5): 152-158.
- YUAN H Z, XUE X Y, YAN X J, QIN W C, KONG X, ZHOU Y Y, WANG M, GAO S C. Applications and prospects in the unmanned aerial system for low-altitude and low-volume spray in crop protection[J]. *Plant Protection*, 2018, 44(5): 152-158. (in Chinese)
- [23] HHANG Y, OUELLET-PLAMONDON C M, THOMSON S J, REDDY K N. Characterizing downwind drift deposition of aerially applied glyphosate using RbCl as tracer[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(3): 31-36.
- [24] QIN W C, XUE X Y, ZHANG S M, GU W, WANG B K. Droplet deposition and efficiency of fungicides sprayed with small UAV against wheat powdery mildew[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(2): 27-32.
- [25] AHMAD F, ZHANG S C, QIU B J, MA J, XIN H, QIU W, AHMED S, CHANDIO F A, KHALIQ A. Comparison of water sensitive paper and glass strip sampling approaches to access spray deposit by UAV sprayers[J]. *Agronomy*, 2022,

- 12(6): 1302.
- [26] 蒙艳华, 兰玉彬, 李继宇, 刘琳琳, 郭永旺, 王志国, 周国强. 单旋翼油动植保无人机防治小麦蚜虫参数优选[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(12): 66-71.
- MENG Y H, LAN Y B, LI J Y, LIU L L, GUO Y W, WANG Z G, ZHOU G Q. Optimization of operation parameters of single-rotor gas-powered UAV for controlling wheat aphid[J]. China Plant Protection, 2017, 37(12): 66-71. (in Chinese)
- [27] 乔春雨. 苹果园无人机喷药技术方案优化及效果分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- QIAO C Y. Optimization and effect analysis of spraying technology of UAV in apple orchard[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [28] 王军锋, 徐文彬, 闻建龙, 王晓英, 罗博韬. 大载荷植保无人直升机喷雾气液两相流动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 62-69.
- WANG J F, XU W B, WEN J L, WANG X Y, LUO B T. Numerical simulation on gas-liquid phase flow of large-scale plant protection unmanned aerial vehicle spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 62-69. (in Chinese)