

核桃园植保无人机作业参数优选

朱晓锋^{1*}, 王 明², 徐兵强¹, 宋 博¹, 闫晓静², 杨 森¹, 袁会珠^{2*}

(1. 新疆农业科学院植物保护研究所, 农业农村部西北荒漠作物有害生物综合治理重点实验室, 特色林果产业国家地方联合工程研究中心, 乌鲁木齐 830091; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要 为探究植保无人机在核桃园低空低容量喷雾最优作业参数, 本文采用三因素三水平正交试验设计, 研究了植保无人机喷雾后核桃树上雾滴沉积分布情况。结果表明: 影响雾滴覆盖密度和沉积量的主要因素是飞行速度, 其次是飞行高度和施药液量; 在树高 6~7 m 的核桃园中植保无人机喷雾效果较优的作业参数是飞行速度 2.2~3.0 m/s, 飞行高度 2.0~2.5 m, 施药液量 22.5~30.0 L/hm², 其平均雾滴覆盖密度和沉积量分别为 26.36~37.94 个/cm²、0.24~0.29 μg/cm²; 不同冠层雾滴覆盖密度和沉积量分布为上层>中层>下层, 外围>内膛; 喷头型号对雾滴覆盖密度和雾滴直径有显著影响; 中等喷头(Teejet110015)处理的沉积量最大, 但粗、中、细 3 种喷头处理间的沉积量无显著性差异; 植保无人机和地面人工+机动喷杆喷雾的农药地面流失率分别为 3.61% 和 23.69%, 两处理间有显著性差异。本文对无人机在核桃园喷雾作业参数进行了优选, 可为无人机对高冠果树的合理喷施、提高喷施效果提供参考和指导。

关键词 植保无人机; 作业参数; 核桃园; 雾滴覆盖密度; 沉积量

中图分类号: S 499 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2019220

Optimization of unmanned aerial vehicle (UAV) operation parameters in walnut orchards

ZHU Xiaofeng^{1*}, WANG Ming², XU Bingqiang¹, SONG Bo¹, YAN Xiaojing², YANG Sen¹, YUAN Huizhu^{2*}

(1. Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northwestern Oasis, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Local Joint Engineering Research Center of Special Forestry and Fruit Industry, Urumqi 830091, China;
2. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract In order to explore the optimal operation parameters of unmanned aerial vehicle (UAV) spraying in walnut orchards, the deposition distribution of droplets on the walnut trees after UAV spraying was studied using three factors and three levels orthogonal tests. The results showed that the main factor affecting the droplet density and deposition was flight speed, followed by flight height and spray volume. In walnut orchards, where the tree height was 6–7 m, the operation parameters with better spray effect of UAV were flying speed of 2.2–3.0 m/s, flying height of 2.0–2.5 m and spray volume of 22.5–30.0 L/hm², and the average droplet density and deposition were 26.36–37.94 deposits/cm² and 0.24–0.29 μg/cm², respectively. The droplet density and deposition on different canopies were distributed from high to low in the upper canopy, middle canopy, lower canopy and outer canopy and inner canopy. The type of nozzle had a significant influence on the droplet density and diameter. Medium nozzle (Teejet110015) had the largest deposition, but there was no significant difference between the three nozzles (Teejet11001, Teejet110015 and Teejet11002). The ground loss rates of pesticides sprayed with UAV and spray boom were 3.61% and 23.69%, respectively, and there was significant difference between the two treatments. In this study, the spraying operation parameters of UAV were optimized in walnut orchards, which could provide a reference and guidance for the rational spraying of UAV on high-crowned fruit trees and the improvement of spraying effect.

收稿日期: 2019-04-28

修订日期: 2019-08-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技支撑项目计划(指令性)项目(2018E02028)

* 通信作者 朱晓锋 zxf5117@163.com; 袁会珠 hzyuan@ippcaas.cn

Key words UAV; operation parameter; walnut orchard; droplet density; deposition

核桃是世界上重要的坚果之一,栽培历史悠久。我国核桃栽培面积和总产量均居世界第一,主要分布在云南、新疆、陕西、山西、河北等地。截至 2016 年底,新疆核桃种植面积已达 36.9 万 hm^2 ,年产核桃 48.6 万 t,已成为中国核桃的重要产区之一^[1]。在新疆,核桃病虫害主要有核桃黑斑蚜 *Chromaphis juglandicola* (Kaltenbach)、叶螨 *Tetranychus* spp.、核桃腐烂病 *Cytospora juglandis*、核桃叶枯病 *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl 等^[2-5]。目前生产上主要使用大容量、粗雾滴机动高压喷雾器喷雾防治核桃主要病虫,由于核桃树冠高大(树高多数在 3~10 m 之间),这种淋洗式的施药方法作业强度大,效率低($6\,667\text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),用水量大,药液流失严重,作业人员易中毒,土壤环境和生态环境易受到污染和破坏。

植保无人机除作业效率高、节约人力物力外,还可节约农药使用量和用水量,且作业不受作物长势和地形的限制^[6]。目前植保无人机的应用和研究多集中在棉花、粮食作物方面^[7-11],有广阔的应用前景^[12],而在林果树木上的应用研究较少,且主要集中在树冠较小的柑橘、茶树等树木上^[13-15]。为探究植保无人机在核桃园喷雾较优的作业参数,为核桃生产中植保无人机的合理应用提供依据,本文研究了植保无人机在不同作业参数下雾滴在核桃树上的沉积分布,以期找出影响雾滴覆盖密度和药剂沉积分布的因素和较优的作业参数,现将结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在新疆阿克苏阿瓦提县多浪乡多浪村三组,核桃种植面积 13.5 hm^2 ,2008 年定植,株行距为 3 m×5 m,冠幅 5 m,树高 6~7 m。选择大小均一,长势一致的核桃园作为试验用地。

1.2 试验设计

小区约 700 m^2 ,每小区间设 5 m 宽的隔离带,试验药剂为 43%联苯肼酯悬浮剂,陕西恒田化工有限公司。指示剂为诱惑红 85,浙江吉高德色素科技有限公司,用量为 450 g/ hm^2 。

1.2.1 作业参数筛选

植保无人机选用大疆植保无人机 MG-1P,采用

三因素三水平正交试验设计具体如下(表 1),共 9 个处理,喷头为 Teejet110015。

表 1 试验处理设置

Table 1 Treatment setting

处理 Treatment	施药液量/ $\text{L} \cdot (\text{hm}^2)^{-1}$ Spray volume	飞行高度/m Flight height	飞行速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ Flight speed	
1	22.5	1.5	1.2	慢
2	30.0	2.0	1.1	慢
3	37.5	2.5	1.1	慢
4	37.5	2.0	1.4	中
5	22.5	2.5	2.1	中
6	30.0	1.5	1.6	中
7	30.0	2.5	2.2	快
8	37.5	1.5	1.8	快
9	22.5	2.0	3.0	快

1.2.2 喷头筛选

飞行参数采取中等水平,即施药液量 30.0 L/ hm^2 ,飞行高度 2.0 m,飞行速度 2.0 m/s。喷头分别使用粗(Teejet 11002)、中(Teejet 110015)、细(Teejet 11001)3 种(美国喷雾系统公司产品)。

1.3 雾滴覆盖密度、沉积量分布和农药地面流失率测定

喷雾前,在每个小区选择 3 株核桃树,将每株树树冠分为东、西、南、北、中 5 个方位,每方位又分为上、中、下 3 层,其中下层再分内、外 2 个方位,共 19 个采样点。每采样点分别布置雾滴覆盖密度测试卡和雾滴采集卡(直径 9 cm 的定性滤纸);并以树干为中心,分别在树干下方、树冠下方四周和树冠外(株行间)四周地面均匀设置 1、4、4 个雾滴采集卡。并以地面人工+机动喷杆喷雾处理为对照。喷雾结束后,收取雾滴覆盖密度测试卡及定性滤纸并装入自封袋,带回实验室利用“DePosit scan”软件(美国农业部)测定雾滴覆盖密度。

药剂沉积分布测定:将定性滤纸装入 1# 自封袋中,加 5 mL 的蒸馏水洗涤滤纸上的诱惑红。根据示踪剂的标准曲线和样品的吸光度计算出样品示踪剂的浓度,计算沉积量(d)。

$$d = (c \times V) / a,$$

式中 $d(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$ 为沉积量, $c(\mu\text{g}/\text{mL})$ 为示踪剂浓度, $V(\text{mL})$ 为洗脱液体积; $a(\text{cm}^2)$ 为滤纸面积。

农药地面流失率计算:本文采取如下公式,测得农药地面流失率。

$$D = \frac{m_2}{M} \times 100\%,$$

式中 $D(\%)$ 为农药地面流失率, $m_2(\mu\text{g})$ 为单位面积地面农药沉积量, $M(\mu\text{g})$ 为单位面积喷施农药总量。

2 结果与分析

2.1 主效应分析

利用 SPSS 17.0 对影响雾滴覆盖密度和沉积量三因素主体间效应进行分析, 检验结果见表 2。

表 2 三因素主体间效应检验¹⁾
Table 2 Test of intersubjective effect of the three factors

因变量 Dependent variable	方位 Position	P 值 P value			均方值 Mean square		
		施药液量 Spray volume	飞行高度 Flight height	飞行速度 Flight speed	施药液量 Spray volume	飞行高度 Flight height	飞行速度 Flight speed
雾滴覆盖密度 Droplet density	上层	0.081	0.043 *	0.000 **	302.522	393.446	3 574.152
	中层	0.195	0.256	0.000 **	100.381	82.437	1 447.971
	下层	0.206	0.443	0.043 *	111.136	54.976	242.143
	内膛	0.149	0.571	0.005 **	135.819	37.210	467.032
	外围	0.121	0.080	0.000 **	118.695	145.112	1 536.396
	平均	0.092	0.112	0.000 **	100.191	91.192	1 053.288
沉积量 Deposition	上层	0.128	0.601	0.846	0.047	0.011	0.004
	中层	0.908	0.058	0.198	0.001	0.048	0.026
	下层	0.958	0.086	0.047 *	0.000	0.008	0.010
	内膛	0.193	0.034 *	0.592	0.005	0.011	0.002
	外围	0.622	0.302	0.150	0.006	0.016	0.027
	平均	0.128	0.601	0.846	0.005	0.009	0.010

1) * 代表有显著影响; ** 代表有极显著影响。
* represents significant influence, and ** represents extremely significant influence.

由表 2 可以看出:三个因素对不同方位雾滴覆盖密度的均方值显示,在测试范围内飞行速度的均方值最大,说明飞行速度是影响雾滴覆盖密度的主要因素,其次是施药液量和飞行高度;其中飞行速度对核桃不同方位雾滴覆盖密度的影响达到了显著水平($P<0.05$);飞行高度对核桃树上层雾滴覆盖密度的影响达到了显著水平($P=0.043$);三个因素对不同方位沉积量的均方值显示:飞行速度对整株平均沉积量影响最大,其次是飞行高度和施药液量;其中飞行速度对下层沉积量达到了显著水平,飞行高度对内膛叶片沉积量的影响也达到了显著水平。

综上所述,在植保无人机施药过程中,影响药液密度和沉积量分布的主要因素是飞行速度,其次是飞行高度和施药液量。

2.2 不同方位雾滴覆盖密度和沉积量分析

2.2.1 雾滴覆盖密度及均匀性分析

对 9 个处理核桃树不同方位叶片雾滴覆盖密度方差分析结果见表 3。

由表 3 可以看出:7 个处理中核桃树不同冠层雾滴覆盖密度分布为上层>中层>下层,8 个处理中核桃树冠层的雾滴覆盖密度分布为外围>内膛;

其中处理 9 的叶片平均雾滴覆盖密度最高,为 37.94 个/ cm^2 ,与处理 1、处理 2、处理 3、处理 4、处理 5、处理 6 和处理 7 有显著性差异,但均匀性较差;因此,通过叶片雾滴覆盖密度分析可以初步确定处理 9 植保无人机喷雾效果最好。

2.2.2 沉积量及穿透性分析

对 9 个处理不同方位叶片沉积量方差分析及变异系数分析结果见表 4。

由表 4 可以看出:在 9 个处理中,7 个处理核桃树不同冠层沉积量分布为上层>中层>下层,8 个处理沉积量分布为外围>内膛;其中处理 7 核桃树平均沉积量最高,为 0.29 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,与处理 1、处理 5 和处理 8 有显著差异,其次是处理 9 和处理 4,均为 0.24 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$;处理 9 的变异系数最低,为 8.86%,表明其喷雾穿透性最好。因此,通过叶片沉积量分析处理 7 喷雾效果较好。

综合雾滴覆盖密度和沉积量分析以及分析参数(表 1)可知,在核桃园中植保无人机喷雾效果较好的飞行参数是飞行速度为快速(2.2~3.0 m/s),飞行高度为中、高等水平(2.0~2.5 m),施药液量为中低水平(22.5~30.0 L/ hm^2)。

表 3 雾滴覆盖密度及均匀性分析¹⁾

Table 3 Analysis of droplet density and uniformity

处理 Treatment	雾滴覆盖密度/个·(cm ²) ⁻¹				变异系数/(%) (均匀性)				Variable coefficient (uniformity)			
	上层 Upper canopy	中层 Middle canopy	下层 Lower canopy	内膛 Inner canopy	外围 Outer canopy	平均 Mean	上层 Upper canopy	中层 Middle canopy	下层 Lower canopy	内膛 Inner canopy	外围 Outer canopy	平均 Mean
1	(11.19±3.28)cd	(14.40±6.65)cd	(10.83±4.00)b	(12.59±5.07)bc	(11.17±3.36)de	(11.72±3.93)cd	50.75	79.99	64.07	69.78	52.04	58.09
2	(10.09±3.27)d	(6.44±2.49)d	(4.44±1.21)b	(4.47±0.26)c	(7.63±3.30)e	(6.52±2.11)d	56.05	66.97	47.10	10.05	74.92	55.94
3	(12.38±1.93)cd	(10.36±1.19)d	(6.36±0.73)b	(3.97±0.52)c	(11.93±0.33)de	(8.99±0.39)cd	26.98	19.96	19.81	22.50	4.73	7.45
4	(43.17±5.76)ab	(19.47±0.97)cd	(17.92±6.24)ab	(19.88±6.18)ab	(27.98±3.54)bc	(24.64±1.93)b	23.11	8.64	60.32	53.81	21.93	13.56
5	(31.54±13.01)bc	(17.48±5.64)cd	(13.90±5.00)ab	(15.11±6.82)abc	(22.01±8.23)bcd	(19.43±4.84)bc	71.44	55.91	62.29	78.14	64.78	43.16
6	(15.87±2.60)cd	(16.63±3.79)cd	(10.66±0.93)b	(9.71±1.00)bc	(15.97±3.76)cde	(13.58±1.95)cd	28.37	39.49	15.03	17.89	40.76	24.91
7	(44.43±6.61)ab	(27.04±1.71)bc	(15.90±0.71)ab	(20.19±4.58)ab	(29.94±3.74)bc	(26.36±1.10)b	25.77	10.98	7.70	39.29	21.61	7.23
8	(49.56±9.61)ab	(36.01±5.27)ab	(10.76±0.68)b	(16.86±2.17)abc	(33.89±1.92)ab	(27.61±1.97)ab	33.58	25.33	11.02	22.32	9.84	12.39
9	(58.29±9.66)a	(41.50±7.77)a	(24.67±10.24)a	(26.73±7.51)a	(44.49±8.21)a	(37.94±7.95)a	28.70	32.43	71.88	48.68	31.98	36.28

1) 表中数据为平均值±标准误差。同列数字后不同小写字母表示同一方位不同水平间有显著差异(LSD, $P=0.05$); 下同。

Data in the table are presented as averages±SE. Data followed by different lowercase letters in the same column are significant difference at 0.05 level (LSD). The same below.

表 4 沉积量及穿透率分析

Table 4 Analysis of deposition and penetrability

处理 Treatment	沉积量/ $\mu\text{g} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$				变异系数/(%) (穿透性)				Variable coefficient (penetrability)			
	上层 Upper canopy	中层 Middle canopy	下层 Lower canopy	内膛 Inner canopy	外围 Outer canopy	平均 Mean	上层 Upper canopy	中层 Middle canopy	下层 Lower canopy	内膛 Inner canopy	外围 Outer canopy	平均 Mean
1	(0.23±0.03)b	(0.14±0.02)bc	(0.08±0.01)b	(0.11±0.04)ab	(0.16±0.00)a	(0.14±0.01)b	19.04	27.04	28.53	59.43	5.11	17.42
2	(0.27±0.11)ab	(0.16±0.10)bc	(0.10±0.03)b	(0.16±0.06)a	(0.16±0.07)a	(0.16±0.07)ab	68.76	106.14	48.07	65.82	74.96	70.61
3	(0.27±0.03)ab	(0.20±0.04)bc	(0.08±0.00)b	(0.04±0.01)b	(0.23±0.03)ab	(0.16±0.02)ab	20.20	32.07	10.13	29.77	23.75	19.64
4	(0.34±0.02)ab	(0.33±0.04)ab	(0.15±0.02)ab	(0.12±0.02)ab	(0.32±0.03)ab	(0.24±0.02)ab	12.66	19.59	29.59	34.81	13.84	15.33
5	(0.12±0.03)b	(0.20±0.08)bc	(0.07±0.02)b	(0.04±0.01)b	(0.17±0.06)a	(0.12±0.04)b	41.27	73.77	49.03	29.68	58.50	54.33
6	(0.29±0.03)ab	(0.13±0.04)c	(0.15±0.04)ab	(0.08±0.02)ab	(0.23±0.04)ab	(0.18±0.03)ab	17.43	50.72	44.50	38.90	27.47	29.03
7	(0.47±0.18)a	(0.41±0.11)a	(0.13±0.03)ab	(0.11±0.03)ab	(0.39±0.13)b	(0.29±0.09)a	67.10	45.99	45.45	51.69	56.05	53.46
8	(0.16±0.03)b	(0.14±0.03)c	(0.13±0.05)ab	(0.07±0.01)b	(0.18±0.06)a	(0.14±0.04)b	33.34	40.07	69.13	33.63	57.25	50.06
9	(0.24±0.03)b	(0.28±0.03)bc	(0.21±0.03)a	(0.11±0.03)ab	(0.31±0.02)ab	(0.24±0.01)ab	20.31	21.23	25.00	42.69	13.08	8.86

2.2.3 雾滴覆盖密度和沉积量边际均值估算

对正交试验数据进行分析,获得不同因素不同水平不同方位叶片雾滴覆盖密度和沉积量估算边际均值(表 5)。

由表 5 可以看出:在飞行速度为高水平下,核桃树不同方位雾滴覆盖密度的估算边际均值为最大,显著高于低飞行速度的雾滴覆盖密度估算边际均值;不同方位(内膛除外)的沉积量估算边际均值也是最大,其中在下层的沉积量估算边际均值显著高于低速水平下的沉积量估算边际均值。由此可知植保无人机高速飞行速度有利于雾滴的附着和沉积。

飞行高度在中等水平下(距树顶 2.0 m)不同方位雾滴覆盖密度的估算边际均值均为最大,但未达到显著水平;在下层、内膛以及全株平均沉积量的估算边

际均值也是最大,部分方位显著高于其他水平。由此可知植保无人机在核桃园作业过程中用飞行高度在中等水平(2.0 m)有利于不同方位雾滴的附着和沉积。

施药液量在低水平(22.5 L/hm²)下不同方位(除上层外)的雾滴覆盖密度的估算边际均值最大,部分方位与其他水平存在显著差异;而施药液量在中等水平(30.0 L/hm²)下不同方位沉积量的估算边际均值最大,部分方位显著高于其他水平。由此可知植保无人机在核桃园作业过程中用药液喷洒药量在中、低水平(22.5~30.0 L/hm²)下有利于不同方位雾滴的附着和沉积。

综上所述,植保无人机在核桃园中的最佳飞行参数是:飞行速度为 2.2~3.0 m/s,飞行高度为 2.0 m,施药液量为 22.5~30.0 L/hm²。

表 5 不同因素、水平下核桃树各方位叶片雾滴覆盖密度和沉积量边际均值估算¹⁾
Table 5 Estimation of marginal mean values of the droplet density and deposition in different positions of walnut leaves under different factors and levels

方位 Position	变量 Variable	估算边际均值±SD Estimation of marginal mean value±SD					
		飞行速度 Flight speed		飞行高度 Flight height		施药液量 Spray volume	
		雾滴覆盖密度/ 个·(cm ²) ⁻¹	沉积量/ μg·(cm ²) ⁻¹	雾滴覆盖密度/ 个·(cm ²) ⁻¹	沉积量/ μg·(cm ²) ⁻¹	雾滴覆盖密度/ 个·(cm ²) ⁻¹	沉积量/ μg·(cm ²) ⁻¹
		Droplet density	Deposition	Droplet density	Deposition	Droplet density	Deposition
上层 Upper canopy	低	(11.222±3.985)c	(0.258±0.048)a	(25.539±3.985)a	(0.225±0.048)a	(33.673±3.985)a	(0.198±0.048)b
	中	(30.190±3.985)b	(0.249±0.048)a	(37.182±3.985)a	(0.282±0.048)a	(23.462±3.985)a	(0.342±0.048)a
	高	(50.758±3.985)a	(0.287±0.048)a	(29.448±3.985)a	(0.288±0.048)a	(35.036±3.985)a	(0.255±0.048)ab
中层 Middle canopy	低	(10.402±2.565)b	(0.169±0.040)a	(22.347±2.565)a	(0.137±0.040)b	(24.641±2.565)a	(0.208±0.040)a
	中	(17.858±2.565)b	(0.219±0.040)a	(22.471±2.565)a	(0.259±0.040)a	(16.702±2.565)b	(0.234±0.040)a
	高	(34.850±2.565)a	(0.276±0.040)a	(18.292±2.565)a	(0.268±0.040)a	(21.947±2.565)ab	(0.222±0.040)a
下层 Lower canopy	低	(7.206±2.645)b	(0.087±0.018)b	(10.748±2.645)a	(0.120±0.018)ab	(16.465±2.645)a	(0.121±0.018)a
	中	(14.164±2.645)ab	(0.122±0.018)ab	(15.676±2.645)a	(0.152±0.018)a	(10.334±2.645)a	(0.125±0.018)a
	高	(17.107±2.645)a	(0.155±0.018)a	(12.053±2.645)a	(0.092±0.018)b	(11.678±2.645)a	(0.118±0.018)a
内膛 Inner canopy	低	(7.009±2.693)b	(0.103±0.018)a	(13.053±2.693)a	(0.086±0.018)ab	(18.143±2.693)a	(0.086±0.018)a
	中	(14.093±2.693)ab	(0.079±0.018)a	(17.026±2.693)a	(0.132±0.018)a	(11.456±2.693)a	(0.120±0.018)a
	高	(21.259±2.693)a	(0.099±0.018)a	(13.090±2.693)a	(0.063±0.018)b	(13.571±2.693)a	(0.075±0.018)a
外围 Outer canopy	低	(10.244±2.636)c	(0.184±0.038)a	(20.344±2.636)a	(0.190±0.038)a	(25.890±2.636)a	(0.211±0.038)a
	中	(21.987±2.636)b	(0.240±0.038)a	(26.699±2.636)a	(0.262±0.038)a	(17.848±2.636)b	(0.263±0.038)a
	高	(36.103±2.636)a	(0.293±0.038)a	(21.291±2.636)a	(0.265±0.038)a	(24.596±2.636)ab	(0.243±0.038)a
平均 Mean	低	(9.079±2.057)c	(0.154±0.027)a	(17.640±2.057)a	(0.152±0.027)a	(23.031±2.057)a	(0.164±0.027)a
	中	(19.217±2.057)b	(0.181±0.027)a	(23.035±2.057)a	(0.214±0.027)a	(15.488±2.057)b	(0.210±0.027)a
	高	(30.640±2.057)a	(0.221±0.027)a	(18.261±2.057)a	(0.189±0.027)a	(20.417±2.057)ab	(0.181±0.027)a
较优水平 Better level	上层	高					中
	中层	高			中、高	低	
	下层	高	高		中		
	内膛	高			中		
	外围	高				低	
	平均	高				低	

1) 较优水平表示在该水平下的雾滴覆盖密度或沉积量的估算边际均值显著高于在其他水平的雾滴覆盖密度或沉积量的估算边际均值。
The better level indicated that the estimation marginal mean value of droplet density or deposition at this level was significantly higher than that at other levels.

2.3 最佳喷头筛选

对各处理的雾滴覆盖密度、体积中值直径 ($D_{v0.5}$) 和沉积量的方差分析结果见表 6。

由表 6 可以看出:细喷头(Teejet11001)在核桃树不同方位雾滴覆盖密度最大,其中下层和全株平均雾滴覆盖密度显著大于粗喷头(Teejet11002)的雾滴覆盖密度;粗喷头雾滴的 $D_{v0.5}$ 在核桃树不同方

位均最大,在上层、外围和全树平均显著大于细喷头的 $D_{v0.5}$;中等喷头(Teejet110015)在核桃树不同方位的沉积量最大,但与其他处理未达到显著性差异。由此可知,中等喷头(Teejet110015)的雾滴覆盖密度和雾滴直径中等,但沉积量最大,应是植保无人机核桃园中作业时的最优选择。

表 6 不同类型喷头对雾滴覆盖密度、体积中值直径 ($D_{v0.5}$) 和沉积量的影响

Table 6 Effects of different types of nozzles on droplet density, volume median diameter ($D_{v0.5}$) and deposition

方位 Position	处理 Treatment	雾滴覆盖密度/个·(cm ²) ⁻¹ Droplet density		$D_{v0.5}/\mu\text{m}$ Volume median diameter		沉积量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{cm}^2)^{-1}$ Deposition	
		均值±SE Mean±SE	变异系数 Variable coefficient	均值±SE Mean±SE	变异系数 Variable coefficient	均值±SE Mean±SE	变异系数 Variable coefficient
上层 Upper canopy	细	(30.827±8.952)a	50.296	(232.933±17.934)b	13.335	(0.130±0.064)a	84.505
	中	(13.678±3.616)a	45.784	(292.300±27.711)ab	16.421	(0.164±0.021)a	22.176
	粗	(14.780±7.163)a	83.946	(504.200±85.981)a	29.537	(0.072±0.005)a	11.867
中层 Middle canopy	细	(14.967±7.298)a	84.454	(252.800±22.382)a	15.335	(0.184±0.092)a	86.361
	中	(12.532±5.258)a	72.672	(251.283±20.561)a	14.172	(0.220±0.106)a	83.320
	粗	(12.507±4.097)a	56.744	(304.733±36.080)a	20.507	(0.139±0.065)a	81.263
下层 Lower canopy	细	(25.022±2.928)a	20.270	(234.778±5.061)a	3.733	(0.053±0.029)a	93.258
	中	(20.437±7.683)ab	65.115	(246.704±5.924)a	4.159	(0.078±0.018)a	39.483
	粗	(4.437±1.232)b	48.075	(313.482±41.298)a	22.818	(0.053±0.011)a	35.942
内膛 Inner canopy	细	(28.438±3.168)a	19.297	(233.710±5.571)a	4.129	(0.037±0.014)a	65.700
	中	(14.162±3.800)b	46.474	(248.476±4.141)a	2.886	(0.078±0.019)a	42.593
	粗	(4.762±1.304)b	47.436	(325.381±58.311)a	31.040	(0.051±0.027)a	90.430
外围 Outer canopy	细	(21.258±1.439)a	11.723	(242.139±16.744)b	11.977	(0.149±0.065)a	75.715
	中	(18.208±7.009)a	66.678	(265.533±17.357)ab	11.322	(0.174±0.044)a	44.369
	粗	(11.919±3.491)a	50.727	(382.361±35.956)a	16.287	(0.098±0.020)a	35.057
平均 Mean	细	(23.904±1.981)a	14.357	(239.035±8.778)b	6.360	(0.108±0.046)a	74.450
	中	(16.520±5.067)ab	53.130	(258.406±8.967)ab	6.010	(0.139±0.035)a	43.064
	粗	(9.282±2.645)b	49.363	(361.368±2.373)a	1.137	(0.080±0.022)a	47.651

2.4 农药地面流失率

对无人机喷雾和地面人工+机动喷杆喷雾的地表沉积量和农药地面流失率计算和分析结果见表 7。由表 7 可以看出:无人机喷雾的地面沉积量平均为 0.16 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,地面人工+机动喷杆喷雾为1.07 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,

二者之间具有极显著差异($P<0.01$);无人机喷雾的农药地面流失率平均为 3.61%,地面人工喷雾为 23.69%,二者之间具有极显著差异($P<0.01$)。由此可知,植保无人机与地面人工喷雾相比可显著降低农药的地面流失。

表 7 无人机和地面人工+机动喷杆喷雾的农药地表沉积量和地面流失率

Table 7 Ground deposition and loss rate of pesticide sprayed with UAV and artificial spray boom

处理 Treatment	地面沉积量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{cm}^2)^{-1}$ Ground deposition	P 值 P value	农药地面流失率/% Ground loss rate of pesticide	P 值 P value
无人机喷雾 UAV spray	0.16±0.03	0.000	3.61±0.66	0.000
地面人工+机动喷杆喷雾 Artificial spray boom	1.07±0.04		23.69±0.83	

3 结论与讨论

通过对多旋翼植保无人机在核桃园进行喷雾作业进行研究,结果表明:在中等树体大小核桃园(树

高 6~7 m),影响雾滴覆盖密度和沉积量的主要因素是飞行速度,其次是飞行高度、施药液量;植保无人机的最佳作业参数是施药液量 22.5~30.0 L/hm²、飞行高度 2.0~2.5 m、飞行速度 2.2~3.0 m/s;不同核桃

冠层雾滴覆盖密度和沉积量分布为上层>中层>下层,外围>内膛;喷嘴型号对雾滴覆盖密度和粒径有显著影响,中等喷头(Teejet110015)处理沉积量最大;植保无人机低空低容量喷雾与地面人工+机动喷杆喷雾相比可显著降低农药地面流失。影响航空喷施效果的因素有很多,机型、喷嘴型号、环境、作业高度、作业速度等对雾滴在作物表面的沉积均有影响^[16-17]。陈盛德、万品俊等研究表明,影响植保无人机雾滴沉积分布的主要因素是飞行速度,其次是作业高度、喷头流量^[13,18],此结果与本研究结果基本一致。本文仅研究了中等树体大小核桃园植保无人机作业技术参数,植保无人机在其他树体大小核桃园作业时可以参考本文研究结果,根据实际情况选择合适的飞行速度和施药液量等参数。

植保无人机防治玉米螟时,雾滴覆盖密度为 (25.5 ± 4.9) 个/ cm^2 时,防治效果为 $(83.3 \pm 5.1)\%$ ^[19];在麦田防治吸浆虫时,上部雾滴覆盖密度为 $7.1 \sim 20.3$ 个/ cm^2 、中部为 $4.3 \sim 7.7$ 个/ cm^2 、下部为 $0.8 \sim 6.3$ 个/ cm^2 ,防治效果达 81.6% ^[20];在防治棉花蚜虫时,上、中、下部的雾滴覆盖密度分别为 $19.8, 30.7$ 个/ cm^2 和 15.5 个/ cm^2 ,防治效果在 96.3% 以上^[8]。Alm等研究指出,雾滴粒径为 $200 \mu\text{m}$ 、雾滴覆盖密度 18 个/ cm^2 时,二斑叶螨死亡率为 80% ^[21]。在本研究中处理9(飞行速度为 3.0 m/s 、飞行高度为 2.0 m 、施药液量为 22.5 L/hm^2)在不同方位的平均雾滴覆盖密度分别为 $24.67 \sim 58.29$ 个/ cm^2 ,全株平均为 37.94 个/ cm^2 。因此,推测在本文研究筛选的飞行参数下防治核桃黑斑蚜等害虫的防治效果应在 80% 以上,但具体的防治效果还需进一步研究和验证。

选择合适的喷头也有利于植保无人机喷施的高效作业。细喷头的雾滴覆盖密度较大,但易受风速、风向、气温、湿度等因素影响,尤其是风速、风向的影响较大,随着风速的加大,喷雾蒸发速度加快,且雾滴更细小,更容易产生漂移^[22]。根据本研究结果,中等喷头(Teejet110015)的雾滴覆盖密度 $(16.520$ 个/ $\text{cm}^2)$ 和雾滴中直径 $(258.406 \mu\text{m})$ 中等,且沉积量最大;并结合新疆特殊的高温干旱气候条件,为达到更好的喷雾作业效果,中等喷头(Teejet110015)为最佳选择类型。

开发航空喷雾雾滴蒸发抑制剂是改进农业航空喷雾效果的重要手段^[23]。在无人机喷施过程中添加助剂可以提高农药利用率,减少农药使用量^[24]。

赵冰海等研究表明:加入总药液量 1.5% 的飞防助剂能增加对棉蚜的防治效果,并能减少 30% 的农药用量^[8]。植保无人机在防治玉米锈病时添加助剂后,在减量 30% 时达到正常用药量防治效果^[25]。为避免植保无人机在喷施核桃树过程中的雾滴飘失和蒸发的影响,加入适量的助剂有利于提高喷施作业的效果,对不同助剂的作用效果有待进一步探究。

参考文献

- [1] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴 2017[M]. 北京:中国统计出版社, 2017.
- [2] 朱晓锋, 宋博, 徐兵强, 等. 间作作物对核桃黑斑蚜及主要天敌种群的影响[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(6): 1170-1175.
- [3] 岳朝阳, 孔婷婷, 阿衣夏木·亚库甫, 等. 核桃腐烂病主要发病因子研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 154-157.
- [4] 彭刚, 朱晓峰, 张兵, 等. 早实核桃害螨监测防控技术研究[J]. 北方果树, 2013(2): 7-9.
- [5] 徐阳, 刘雪峰, 蒋萍, 等. 和田地区核桃叶枯病病原菌的鉴定[J]. 西部林业科学, 2012(3): 102-105.
- [6] 姜尚易, 薛新宇, 顾伟, 等. 农用植保无人机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 1-6.
- [7] 苏小记, 罗振坚, 魏静, 等. 不同施药器械防治小麦蚜虫效果对比试验[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(1): 6-8.
- [8] 赵冰梅, 张强, 朱永, 等. 多旋翼植保无人机在棉蚜防治中的应用效果[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(2): 61-63.
- [9] 董雪娟, 许中怀, 刘慧强. 小型植保无人机在水稻全程病虫害防治中的应用[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(S1): 47-48.
- [10] 杨帅, 王国宾, 杨代斌, 等. 无人机低空喷施苯氧威防治亚洲玉米螟初探[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(2): 59-62.
- [11] WANG Guobin, LAN Yubin, QI Haixia, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat [J]. Pest Management Science, 2019, 75(6): 1546-1555.
- [12] 蒙艳华, 周国强, 吴春波, 等. 我国农用植保无人机的应用与推广探讨[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(S1): 33-39.
- [13] 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.
- [14] 王明, 王希, 何玲, 等. 植保无人机低空低容量喷雾在茶园的雾滴沉积分布及对茶小绿叶蝉的防治效果[J]. 植物保护, 2019, 45(1): 62-68.
- [15] 张盼, 吕强, 易时来, 等. 小型无人机对柑橘园的喷雾效果研究[J]. 果树学报, 2016, 33(1): 34-42.
- [16] 祁力钧, 傅泽田. 影响农药施药效果的因素分析[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(2): 80-84.
- [17] 廖娟, 臧英, 周志艳, 等. 作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S2): 38-46.
- [18] 万品俊, 王国荣, 袁三跃, 等. 不同植保机械雾滴在水稻上的分

布研究[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(12): 1976-1979.

- [19] 杨帅. 无人机低空喷雾雾滴在作物冠层的沉积分布规律及防治效果研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [20] 高圆圆, 张玉涛, 张宁, 等. 小型无人机低空喷洒在小麦田的雾滴沉积分布及对小麦吸浆虫的防治效果初探[J]. 作物杂志, 2013(2): 139-142.
- [21] ALM S R, REICHARD D L, HALL F R. Effects of spray drop size distribution of drops containing bifenthrin on *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 1987, 80(2): 517-520.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 11 页)

- [49] TEMPLE T N, DU TOIT L J, DERIE M L, et al. Quantitative molecular detection of *Xanthomonas hortorum* pv. *carotae* in carrot seed before and after hot-water treatment [J]. Plant Disease, 2013, 97(12): 1585-1592.
- [50] 冯建军, 刘杰, 王飞, 等. PMA 结合实时荧光 PCR 进行玉米细菌性枯萎病菌细胞活性检测初步研究[J]. 植物检疫, 2014, 28(2): 27-32.
- [51] 王帅, 徐进, 许景升, 等. PMA-qPCR 定量检测青枯菌活菌方法的建立[J]. 植物保护, 2018, 44(6): 122-128.
- [52] 肖妍, 刘芸宏, 高贵田, 等. PMA-qPCR 方法检测陕西猕猴桃溃疡菌优势病原菌活菌的研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 48-53.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 24 页)

- [10] 巩焕然. 云南和广西省胜红蓟黄脉病的病原研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [11] XIONG Qing, FANG Sanwei, WU Jianxiang, et al. Ageratum yellow vein China virus is a distinct begomovirus species associated with a DNA β molecule [J]. Phytopathology, 2007, 97(4): 405-411.
- [12] JIAO Xiaoyang, GONG Huanrang, LIU Xuejian, et al. Etiology of Ageratum yellow vein diseases in South China [J]. Plant Disease, 2013, 97(11): 1497-1503.
- [13] YANG Xiuling, GUO Wei, MA Xinying, et al. Molecular characterization of tomato leaf curl China virus, infecting tomato plants in China, and functional analyses of its associated betasatellite [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(9): 3092-3101.
- [14] MARTIN D P, MURRELL B, GOLDEN M, et al. RDP4: Detection and analysis of recombination patterns in virus genomes [J/OL]. Virus Evolution, 2015, 1(1): vev003. DOI: 10.1093/ve/vev003.
- [15] LI Zhenghe, XIE Yan, ZHOU Xueping, et al. Tobacco curly shoot virus DNA β is not necessary for infection but intensifies symptoms in a host-dependent manner [J]. Phytopathology, 2005, 95(8): 902-908.
- [16] ROJAS M R, MACEDO M A, MALIANO M R, et al. World

- [22] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 9-16.
- [23] 杨帅, 王国宾, 杨代斌, 等. 无人机低空喷施苯氧威防治亚洲玉米螟初探[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(2): 59-62.
- [24] 高赛超, 周晓欣, 秦维彩, 等. 利用风洞评价助剂对杀虫剂航空喷雾雾滴飘移的影响[J]. 应用昆虫学报, 2018, 55(4): 654-658.
- [25] 张龙, 马金龙, 陈树茂, 等. 小型多旋翼无人机在玉米植株上雾滴沉积分布及对玉米锈病防治效果的影响初探[J]. 农业工程技术, 2018(9): 84-87.

- [53] VILANOVA L, USALL J, TEIXIDÓ N, et al. Assessment of viable conidia of *Monilinia fructicola* in flower and stone fruit combining propidium monoazide (PMA) and qPCR [J]. Plant Pathology, 2017, 66(8): 1276-1287.
- [54] CHRISTOFOROU M, PANTELIDES I S, KANETIS L, et al. Rapid detection and quantification of viable potato cyst nematodes using qPCR in combination with propidium monoazide [J]. Plant Pathology, 2014, 63(5): 1185-1192.
- [55] AL-DAOUD F, GOSSEN B D, ROBSON J, et al. Propidium monoazide improves quantification of resting spores of *Plasmidiophora brassicae* with qPCR [J]. Plant Disease, 2017, 101(3): 442-447.

(责任编辑: 田 喆)

- management of geminiviruses [J]. Annual Review Phytopathology, 2018, 56: 637-677.
- [17] QING Ling, ZHOU Xueping. Trans-replication of, and competition between, DNA β satellites in plants inoculated with *Tomato yellow leaf curl China virus* and *Tobacco curly shoot virus* [J]. Phytopathology, 2009, 99(6): 716-720.
- [18] ZHANG Tong, XU Xiongbiao, HUANG Changjun, et al. A novel DNA motif contributes to selective replication of a geminivirus-associated betasatellite by a helper virus-encoded replication-related protein [J]. Journal of Virology, 2016, 90(4): 2077-2089.
- [19] XU Xiongbiao, QIAN Yajuan, WANG Yaqin, et al. Iterons homologous to helper geminiviruses are essential for efficient replication of betasatellites [J/OL]. Journal of Virology, 2019, 93(5): e01532-18. DOI: 10.1128/JVI.01532-18.
- [20] ZHOU Xueping, LIU Yule, CALVERT L, et al. Evidence that DNA-A of a geminivirus associated with severe cassava mosaic disease in Uganda has arisen by interspecific recombination [J]. Journal of General Virology, 1997, 78(Pt8): 2101-2111.
- [21] MUBIN M, BRIDDON R W, MANSOOR S, et al. Diverse and recombinant DNA betasatellites are associated with a begomovirus disease complex of *Digera arvensis*, a weed host [J]. Virus Research, 2009, 142(1/2): 208-212.

(责任编辑: 田 喆)