



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.

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

陈盛德¹, 兰玉彬¹, 周志艳¹, 廖娟¹, 朱秋阳²

(1 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心/广东省农业航空应用工程技术研究中心/国际农业航空施药技术联合实验室/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 广州天翔航空科技有限公司, 广东 广州 511442)

摘要:【目的】探索小型植保无人机对果树喷施作业的雾滴沉积分布效果及应用前景, 研究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。【方法】采用三因素(飞行高度、飞行速度、喷施流量)的正交试验, 应用小型六旋翼植保无人机进行喷雾试验。【结果】根据雾滴沉积密度和雾滴沉积均匀性结果, 较佳的作业参数是喷头流量 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、作业高度 2.5 m 、作业速度 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 影响雾滴沉积密度的主次顺序依次为作业速度、作业高度、喷头流量; 根据雾滴沉积穿透性结果, 作业高度均为 2.0 m 的试验号 2(作业速度 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 喷头流量 $0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)和试验号 8(作业速度 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 喷头流量 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)中雾滴沉积穿透性分别为 22.21% 和 22.41% , 其雾滴覆盖密度大且穿透性较好; 影响雾滴沉积穿透性的因素主次顺序为作业高度、作业速度、喷头流量。【结论】针对植保无人机旋翼风场的影响和橘树独特的树形结构, 对植保无人机的作业参数进行了优选, 以保证航空喷施作业雾滴在橘树冠层的有效沉积分布。本试验研究可为小型无人机对果树的合理喷施、提高喷施效率提供参考和指导。

关键词: 植保无人机; 橘树; 航空喷施; 雾滴沉积; 喷雾参数; 正交试验
中图分类号: S25 文献标识码: A 文章编号: 1001-411X(2017)05-0097-06

Effects of spraying parameters of small plant protection UAV on droplets deposition distribution in citrus canopy

CHEN Shengde¹, LAN Yubin¹, ZHOU Zhiyan¹, LIAO Juan¹, ZHU Qiuyang²

(1 National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology/Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application / International Laboratory of Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology/College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Guangzhou Tianxiang Aviation Technology Co. Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: 【Objective】To explore droplet deposition distribution patterns from aerial spraying and the application prospect of small plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) for fruit trees, and study the influence of spraying parameters of UAV on droplets deposition distribution in citrus canopy. 【Method】Spray test with six-rotor plant protection UAV was arranged by an orthogonal test of three factors (flight height, flight velocity, nozzle flow rate). 【Result】Preferred spraying operation parameters for small plant protection UAV were 2.5 m flight height, $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ flight speed and $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ nozzle flow rate based on the test results of density and uniformity of deposited droplets. The factors that affected the density of deposited droplets were in order of flight velocity, flight height, and nozzle

收稿日期: 2017-01-04 优先出版时间: 2017-07-14
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20170714.0859.034.html>
作者简介: 陈盛德(1989—), 男, 博士研究生, E-mail: 1163145190@qq.com; 通信作者: 兰玉彬(1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: ylan@scau.edu.cn
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200700), 广东省自然科学基金(2015A030313420)

flow rate. Test No.2 with 2.0 flight height, 4 m·s⁻¹ flight speed, 0.6 L·min⁻¹ nozzle flow rate and No.8 with 2.0 m flight height, 1 m·s⁻¹ flight speed, 1.0 L·min⁻¹ nozzle flow rate resulted in relatively high density and penetrability of deposited droplets, and the penetrability of droplets were 22.21% and 22.41% respectively. The factors that affected the penetrability of deposited droplets were in order of flight height, flight velocity, and nozzle flow rate. 【Conclusion】 Due to the influence of the wind field of UAV rotor and the unique structure of citrus, the operating parameters of plant protection UAV should be optimized to ensure effective deposition and distrubition of droplets in citrus canopy from aerial spraying. This research can provide reference and guidance for reasonable spraying using small UAV on fruit trees, for improving the spraying efficiency.

Key words: plant protection UAV; citrus; aerial spraying; droplet deposition; spraying parameter; orthogonal test

2007 年中国柑橘种植面积和产量均跃居世界第 1, 柑橘也是中国南方栽培面积最大、涉及就业人口最多的果树^[1-2]。随着近年来柑橘种植面积的不断扩大, 果树病害的发生日趋严重, 中国乃至世界柑橘产业的稳定和发展都受到了影响^[3-4]。因此, 加强柑橘果树病虫害的有效化学防治对确保柑橘保产和丰产具有十分重要的意义。

目前, 中国农药喷施方式主要包括人工喷施、地面机械喷施和航空喷施^[5-6]。传统的人工喷施方式作业劳动强度大、效率低、耗时长, 当突发式病虫害暴发时, 需要在较短时间内进行快速全覆盖式的喷雾才能取得较好的防控实效^[7], 采用传统的人工喷雾作业显然难以达到防控要求, 甚至可能延误防控时机。地面机械喷施方式作业成本高、药剂有效利用率低, 且我国现有柑橘园大多位于丘陵或山地, 行走式施药机械难以在这类果园中运行^[8-9]。农用航空喷施作为我国近年来的新型喷施方式, 消除了中国传统喷施方式的弊端, 农用航空喷施作业效率高、成本低、喷施效果好, 且可解决地面机械在山地果园难以作业的问题等^[10-12], 正逐渐成为人们首选的喷施作业方式。

作为农业航空重要标志之一的无人机喷施作业在近年来的迅速发展和应用引起了人们的广泛关注^[13-14]。随着航空喷施方式的应用, 针对农用无人机在不同种类作物上的作业质量和雾滴沉积分布效果, 学者均进行了一些探索。陈盛德等^[15]研究了 HY-B-10L 型单旋翼电动无人直升机在不同作业参数下对杂交水稻植株冠层喷施作业的雾滴沉积分布效果; 邱白晶等^[16]采用 2 因素 3 水平试验方法研究了 CD-10 型无人直升机对小麦植株的喷雾沉积浓度、沉积均匀性与飞机飞行高度、飞行速度及两因素间的交互作用的关系, 并建立了相应的关系模型; 秦维彩等^[17]通过改变 N-3 型无人直升机的作业高度和喷洒幅度对玉米作物进行喷施试验, 研究

了喷洒参数对玉米层的雾滴沉积分布的影响。目前, 农用无人机喷施作业技术在水稻、小麦、玉米等作物上的应用趋于成熟, 但对果园喷雾作业的研究还鲜见报道, 难以满足果树产业现代化发展的迫切需求。因此, 本试验采用小型六旋翼植保无人机在不同作业参数的条件下对橘树进行喷施作业来研究其雾滴沉积分布效果, 以期准确地找出对雾滴沉积分布情况的影响因素, 为农业航空技术在果树产业中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设备

本次喷雾作业采用的是广州天翔航空科技有限公司提供的 TXA-翔农六旋翼电动无人直升机, 如图 1 所示, 其外形尺寸(长×宽×高)为 2 400 mm×600 mm×300 mm, 最大载药量为 16 L, 作业速度范围为 2~6 m·s⁻¹, 作业高度范围为 0.5~3.0 m, 有效喷幅宽度≥6 m; 且此无人机机身装有 2 种作业喷头类型, 015 和 020 型喷头, 喷头喷雾压力均为 1 MPa, 其中, 喷头 015 和喷头 020 的喷施流量分别为 0.6 和 1.0 L·min⁻¹。

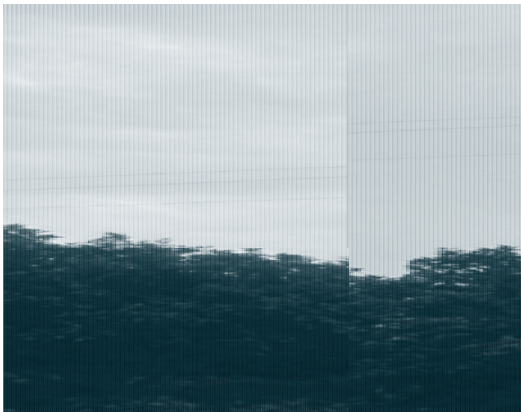


图 1 无人机喷雾试验现场
Fig. 1 UAV spray test site
<http://xuebao.scau.edu.cn>

环境监测系统包括便携式风速风向仪 Kestrel 4500(美国 NK 公司)和试验用数字温湿度表 LS-204(中山市朗信电子有限公司)。

雾滴收集处理设备包括夹子、回形针、橡胶手套、密封袋、标签纸等。

1.2 试验设计

试验于广东省肇庆市怀集县冷坑镇将军岭砂糖橘种植基地进行, 试验作物橘树平均株高 2~3 m。

1.2.1 采样点布置 飞行器沿作物行飞行, 每组试验选择 1 棵果树进行采样。根据果树冠层形状和枝叶疏密程度确定采样点个数和位置, 在竖直 z 方向将树冠层分为上、中、下 3 层。以靠近施药机具前进方向一侧最左端的采样点作为起始采样点, 以顺时针方向在橘树冠层布置 8 个采样点, 最上层的 8 个采样点作为 a 层, 并以同样的分别方式布置 b、c 2 层的 8 个采样点。在树冠中间布置最顶端、上、中、下 4 个采样点。每棵树共采集 9 列, 28 个采样点。每个采样点用回形针将雾滴采集卡卡在树叶上, 用于收集叶片表面雾滴沉积量和覆盖率。采样点布置如图 2 所示。

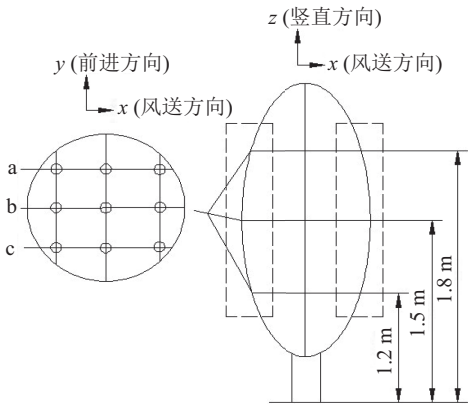


图 2 采样点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sample point

采集卡编号规则如下: 1-O: 第 1 棵树的树冠顶层外叶; 1-M-1; 1-M-2; 1-M-3: 依次表示第 1 棵树中列上层、中层、下层采样点; 1-a-1; 1-a-2; ...; 1-a-8: 顺时针依次表示第 1 棵树上层 8 个采样点; 1-b-1; 1-b-2; ...; 1-b-8: 顺时针依次表示第 1 棵树中层 8 个采样点; 1-c-1; 1-c-2; ...; 1-c-8: 顺时针依次表示第 1 棵树下层 8 个采样点; 第 2 株、3 株.....树的编号方式依次类推。

1.2.2 作业方式 通过设计 1 因素 2 水平和 2 因素 3 水平正交试验, 考察飞行器喷头流量、飞行高度和作业速度对雾滴沉积的影响。试验因素、水平如表 2 所示。

由于因素 A 只有 2 个水平, 为满足正交试验设

计要求, 因此, 本文通过拟水平法设计正交试验方案, 即以因素 A 中的第 2 水平代替第 3 水平进行正交试验, 如表 3 所示。

表 2 试验因素与水平
Tab. 2 Test factors and levels

水平	因素		
	喷头流量(A)/ (L·min ⁻¹)	作业高度(B)/ m	作业速度(C)/ (m·s ⁻¹)
1	0.6	1.5	2
2	1.0	2.0	4
3	1.0	2.5	6

表 3 正交试验方案
Tab. 3 Orthogonal design

试验组号	因素A	因素B	因素C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

1.3 数据采集与处理

每次试验完成, 待采集卡上的雾滴干燥后, 按照序号收集雾滴采集卡, 并逐一放入相对应的密封袋中, 带回实验室进行数据处理。

将收集的雾滴采集卡逐一用 HP Scanjet 200 扫描仪(惠普公司)扫描, 扫描后的图像通过图像处理软件 Deposit Scan(V1.2)进行处理分析, 根据文献[18]的方法, 得出在不同的航空喷施作业参数下的雾滴覆盖率、覆盖密度及单位面积上的沉积量。

为表征试验中各采集点之间的雾滴沉积均匀性和沉积穿透性^[19], 本研究以飞机有效喷幅区内每层不同采集点上雾滴沉积密度的变异系数(CV)来衡量 3 组试验中雾滴的沉积均匀性, 以飞机有效喷幅区内每个采集点上层、中层、下层雾滴沉积量的 CV 来衡量雾滴沉积穿透性; 其中, 变异系数值越小表示雾滴沉积越均匀, 穿透性越好。

2 结果与分析

2.1 雾滴沉积密度

表 4 为果树施药的雾滴沉积密度试验结果,

从雾滴沉积密度角度可以看出,喷头流量为 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、作业高度为 2.5 m 、作业速度为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时雾滴在果树上、中、下 3 层的平均雾滴沉积密度分别为 196.11 、 114.76 、 $73.60\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-2}$,均基本优于其他试验组号,因此,试验号 9 为较佳的作业方式。

另外,从雾滴沉积密度试验结果直观来看,当作业速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或作业高度为 1.5 m 时,雾滴沉

积密度值均较小,且当作业速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和作业高度为 1.5 m 时,雾滴沉积密度值达到最小。这说明无人机的飞行速度和飞行高度影响着喷施作业过程中的雾滴沉积分布,当飞行速度较慢和飞行高度较低时,无人机下方的旋翼风场过强,果树树枝和树叶会沿着风场中心向四周倒伏,不能较好地收集到沉积的雾滴。

表 4 雾滴沉积分布试验结果
Tab. 4 Test results of droplet deposition distrubition

试验组号	因素 A	因素 B	因素 C	雾滴沉积密度/($\text{个}\cdot\text{cm}^{-2}$)			均匀性/%			穿透性/%
				上层	中层	下层	上层	中层	下层	
1	1	1	1	60.44	66.97	69.61	83.12	100.90	72.56	5.87
2	1	2	2	124.31	72.64	91.46	62.00	62.22	54.75	22.21
3	1	3	3	161.69	97.24	60.04	69.12	64.59	44.73	39.50
4	2	1	2	162.24	92.46	75.04	52.66	76.06	70.95	25.33
5	2	2	3	125.35	57.43	47.66	45.78	67.16	69.45	44.98
6	2	3	1	85.76	43.83	47.33	64.20	70.69	36.04	32.22
7	3	1	3	77.55	76.54	52.81	36.74	85.15	81.27	16.57
8	3	2	1	108.23	91.63	154.15	60.65	94.33	65.82	22.41
9	3	3	2	196.11	114.76	73.60	45.58	68.65	51.13	39.72

表 5 为雾滴覆盖密度的极差分析结果,由表 5 可以看出,影响雾滴在果树冠层的沉积密度的因素较优水平结果一致,且较优的作业水平为 $A_3B_3C_2$ 的试验号 9,即喷头流量为 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、作业高度为

2.5 m 、作业速度为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与表 4 中雾滴覆盖密度试验结果的初步分析相一致;且根据极差值可知,这 3 种因素影响雾滴沉积密度的主次顺序依次为作业速度、作业高度、喷头流量。

表 5 雾滴沉积密度极差分析
Tab. 5 Range analysis of droplet deposition density

指标 ¹⁾	因素A			因素B			因素C		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层	上层	中层	下层
K_1	346.44	236.85	221.11	300.23	235.97	297.46	254.43	202.43	271.09
K_2	373.35	193.72	270.03	357.89	221.70	293.27	482.66	279.86	340.10
K_3	381.89	282.93	280.56	443.56	255.83	180.97	364.59	231.21	160.51
$\overline{K}_1$	115.48	78.95	73.70	100.08	78.66	99.15	84.81	67.48	90.36
$\overline{K}_2$	124.45	64.57	90.01	119.30	73.90	97.76	160.89	93.29	113.37
$\overline{K}_3$	127.30	94.31	93.52	147.85	85.28	60.33	121.53	77.07	53.50
极差	11.82	29.74	19.82	47.77	11.38	38.82	76.08	25.81	59.87
较优水平	A_3	A_3	A_3	B_3	B_3	B_2	C_2	C_2	C_2

1) K_i 表示 i 水平时各因素所对应的试验结果之和。

2.2 雾滴沉积均匀性

表 6 为雾滴沉积密度变异系数的极差分析结果,可以表示雾滴沉积密度的均匀性。由表 4 可以看出,较优的作业水平为 $A_2B_3C_2$ 的试验号 9,即喷头流量为 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、作业高度为 2.5 m 、作业速度

为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其雾滴在果树上层、中层、下层的沉积均匀性分别为 45.58% 、 68.65% 、 51.13% ;且根据极差值的大小(表 6)可以知道,这 3 种因素在不同果树的高度上影响雾滴均匀性的主次顺序不一致,其中,上层的主次顺序依次为喷头流量、作业速度、作业

http://xuebao.scau.edu.cn

高度; 中层的主次顺序依次为作业速度、作业高度、喷头流量; 下层的主次顺序依次为作业高度、喷头流量、作业速度。

3 种因素在不同果树冠层上影响雾滴均匀性的主次顺序出现不一致可能是试验误差所导致的, 由分析及实际作业结果我们可以得知, 影响雾滴沉积均匀性的主次顺序依次为作业速度、作业高度、喷

头流量; 且当作业速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或作业高度为 1.5 m 时, 雾滴在果树每层的沉积均匀性均非常差。这很好的从雾滴沉积均匀性角度论证了无人机的作业速度和作业高度均影响着喷施作业过程中雾滴的沉积分布, 当作业速度较慢和作业高度较低时, 无人机下方的旋翼风场过强, 使其雾滴沉积在果树冠层的均匀性较差。

表 6 雾滴沉积均匀性极差分析
Tab. 6 Range analysis of droplet deposition uniformity

指标 ¹⁾	因素 A			因素 B			因素 C		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层	上层	中层	下层
K_1	214.24	227.71	172.04	172.52	262.11	224.78	207.97	265.92	174.42
K_2	162.64	213.91	176.44	168.43	223.71	190.02	160.24	206.93	176.83
K_3	142.97	248.13	198.22	178.90	203.93	131.90	151.64	216.90	195.45
$\bar{K}_1$	71.41	75.90	57.35	57.51	87.37	74.93	69.32	88.64	58.14
$\bar{K}_2$	54.21	71.30	58.81	56.14	74.57	63.34	53.41	68.98	58.94
$\bar{K}_3$	47.66	82.71	66.07	59.63	67.98	43.97	50.55	72.30	65.15
极差	23.75	11.41	8.72	3.49	19.39	30.96	18.77	19.66	7.01
较优水平	A ₃	A ₂	A ₂	B ₂	B ₃	B ₃	C ₃	C ₂	C ₁

1) K_i 表示 i 水平时各因素所对应的试验结果之和。

2.3 雾滴沉积穿透性

表 7 为雾滴沉积密度穿透性极差分析结果, 综合雾滴沉积密度数值大小及变异系数可以看出, 喷头流量为 $0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、作业高度为 2.0 m 、作业速度为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验号 2 和喷头流量为 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、作业高度为 2.0 m 、作业速度为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验号 8 中雾滴沉积穿透性分别为 22.21% 和 22.41%, 其雾滴覆盖密度大且穿透性较好, 均可视为较佳的作业方式。另外, 由极差大小可以看出, 影响雾滴覆盖密度穿透性大小的因素主次顺序为作业高度、作业速度、喷头流量。

表 7 雾滴沉积穿透性极差分析
Tab. 7 Range analysis of droplet deposition penetrability

指标 ¹⁾	因素A	因素B	因素C
K_1	67.58	47.77	60.50
K_2	102.53	89.60	87.26
K_3	78.70	111.44	101.05
$\bar{K}_1$	22.53	15.92	20.17
$\bar{K}_2$	34.18	29.87	29.09
$\bar{K}_3$	26.23	37.15	33.68
极差	11.65	21.23	13.51

1) K_i 表示 i 水平时各因素所对应的试验结果之和。

试验号 2 和 8 的作业高度均为 2.0 m 时, 雾滴穿透性较佳; 由分析可以知道, 当作业高度过低时, 无人机旋翼下方风场过强, 造成果树上层树枝向周围摆动倾斜, 影响雾滴在果树上层的沉积; 当作业高度过高时, 无人机旋翼下方风场减弱, 使雾滴难以到达果树下层; 这与雾滴沉积结果相一致。

3 讨论与结论

本研究根据雾滴沉积密度和雾滴沉积均匀性结果, 得出较佳的作业水平为试验号 9, 即喷头流量为 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、作业高度 2.5 m 、作业速度 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 根据极差值可知, 影响雾滴沉积密度和沉积均匀性的主次顺序依次为作业速度、作业高度、喷头流量; 根据雾滴沉积穿透性结果, 作业高度均为 2.0 m 的试验号 2 和试验号 8 中雾滴沉积穿透性分别为 22.21% 和 22.41%, 其雾滴沉积密度大且穿透性较好; 影响雾滴沉积穿透性的因素主次顺序为作业高度、作业速度、喷头流量。由于植保无人机旋翼风场的影响和不同种类果树独特的树形结构, 应对植保无人机的作业参数进行优选, 来保证航空喷施作业雾滴在果树冠层的有效沉积分布。

随着现代农业的快速发展, 农用无人机正在成为规模化农业生产基地高效省工、节本管理的重要

平台,其对农场的高精度控制、大范围快速喷洒作业,更是深受广大农场主的信赖^[20]。本研究通过农用无人机对果树进行喷施作业,所采用的材料为圆头形橘树,雾滴在植株冠层的沉积趋势基本上是植株上层的雾滴沉积密度大于树冠中、下层区域,即农用无人机喷施沉积效应自上而下逐渐减弱,这主要与果树树形的结构状态有关。但值得注意的是,在以上的 9 次试验中,其中有若干次试验的雾滴沉积效应并非呈自上而下逐渐减弱的趋势,相反地,在果树植株冠层下层或中层的雾滴沉积密度高于上层的雾滴沉积密度;另外,雾滴在果树冠层每一层上的沉积均匀性和穿透性均较差。我们分析认为造成这一现象的主要原因是农用无人机旋翼下方的风场过强,造成果树植株上部的树枝向四周倾斜,大部分雾滴均随着风场到达果树植株的中下部,冠层上层四周沉积的雾滴较少,且倾斜的树枝会对雾滴在果树叶片上的沉积造成影响,使其在倒伏方向叶片上的雾滴沉积量较少。

综合上述分析,为改善农用无人机在果树喷施作业上的应用,提升雾滴沉积质量,应从以下 2 个方面着手:首先,对农用无人机的作业参数进行优选,不同作业参数下无人机的旋翼风场强度不同,不同农作物的倾斜程度不一样,因此,适合不同农作物的作业参数也会不一样,包括作业高度、作业速度等,较优的作业参数会提升雾滴在果树冠层上的沉积质量;其次,在果园试验航空喷施作业的同时,还需考虑农机与农艺技术的有效结合,例如对果树植株进行开心或篱壁形修剪,在增加植株的通风透光、提高果实品质的同时^[21],可使航空喷施的雾滴更易穿透树冠,减少树枝的过度倾斜,促使雾滴在植株冠层间各部位的均匀分布。

参考文献:

[1] 梅慧兰, 邓小玲, 洪添胜, 等. 柑橘黄龙病高光谱早期鉴别及病情分级[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 140-147.

[2] 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.

[3] BASSANEZI R B, MONTESINO L H, STUCHI E S. Effects of huanglongbing on fruit quality of sweet orange cultivars in Brazil[J]. Eur J Plant Pathol, 2009, 125(4): 565-572.

[4] DENG X L, GAO Y D, CHEN J C, et al. Current situ-

ation of “Candidatus Liberibacter asiaticus” in Guangdong China, where citrus Huanglongbing was first described[J]. J Integr Agr, 2012, 11(3): 424-429.

[5] 周志艳, 袁旺, 陈盛德. 中国水稻植保机械现状与发展趋势[J]. 广东农业科学, 2014, 41(15): 178-183.

[6] 杨学军, 严荷荣, 徐赛章, 等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 129-131.

[7] 李鸿筠, 刘浩强, 冉春, 等. 不同喷雾器械对柑橘害虫的防治研究[J]. 农机化研究, 2015, 4: 150-154.

[8] 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民, 等. 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.

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

[10] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.

[11] LAN Y B, HOFFMANN W C, FRITZ B K, et al. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants[J]. Appl Eng Agric, 2008, 24(1): 5-10.

[12] HUANG Y B, HOFFMANN W C, LAN Y B, et al. Development of a spray system an unmanned aerial vehicle platform[J]. Appl Eng Agric, 2009, 25(6): 803-809.

[13] 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 194-201.

[14] 周志艳, 臧英, 罗锡文, 等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 1-10.

[15] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 40-46.

[16] 邱白晶, 王立伟, 蔡东林, 等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 25-32.

[17] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50-56.

[18] ZHU H P, MASOUD S, ROBERT D F. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. Comput Electron Agr, 2011, 76(1): 38-43.

[19] 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.

[20] HUANG Y B, THOMSON S J, HOFFMANN W C, et al. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management[J]. Int J Agric Biol Eng, 2013, 6(3): 1-9.

[21] 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.

【责任编辑 霍 欢】