

植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验

陈盛德^{1,2}, 兰玉彬^{1,2*}, 李继宇^{1,2}, 徐小杰^{1,2}, 王志国³, 彭斌⁴

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心/国际农业航空施药技术联合实验室, 广州 510642; 3. 安阳全丰航空植保科技有限公司, 安阳 455001; 4. 广州极飞科技有限公司, 广州 510663;

摘要: 植保无人机有效喷幅宽度的准确评定是农业航空精准作业的前提, 对其作业航线的规划及喷施作业质量的提升均有着重要意义。该文以不同参数的单旋翼植保无人机和多旋翼植保无人机为例, 分别通过 12 架次不同飞行参数下的航空喷施试验及目前国内常用的雾滴密度判定法和 50%有效沉积量判定法来评定植保无人机的有效喷幅宽度, 并根据雾滴处理软件 DepositScan 对水敏纸等采集卡上的图像处理原理对不同评定方法进行了深入分析。结果表明: 50%有效沉积量判定法更适于雾滴粒径相对较大的 3WQF120-12 型植保无人机有效喷幅宽度的评定, 且评定的平均有效喷幅宽度为 ≥ 4.44 m; 雾滴密度判定法更适于雾滴粒径相对较小的 P-20 型植保无人机有效喷幅宽度的评定, 且评定的平均有效喷幅宽度为 ≥ 2.58 m; 评定的有效喷幅结果与实际情况相符合。另外, 由分析可知, 由于当前图像处理技术的限制, 不同粒径大小的雾滴斑点图像, 软件 DepositScan 所产生的相对误差不同, 因此, 应根据植保无人机喷施雾滴粒径的范围选择合适的有效喷幅宽度评定方法。该结果为不同参数的植保无人机选择较优的有效喷幅评定方法提供了指导, 降低了航空喷施作业的重喷率和漏喷率, 提高了植保无人机航空喷施作业质量, 可为植保无人机精准喷施作业的实施提供参考。

关键词: 无人机; 喷雾; 试验; 有效喷幅; 评定方法; 优选; 精准作业

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.011

中图分类号: S49

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0082-09

陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 徐小杰, 王志国, 彭斌. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 82—90. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.011 <http://www.tcsae.org>

Chen Shengde, Lan Yubin, Li Jiuyu, Xu Xiaojie, Wang Zhiguo, Peng Bin. Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 82—90. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.011 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是一个农业大国, 保证粮食安全是中国的基本国策。然而, 中国受农业自然灾害严重, 特别是生物灾害发生频繁^[1-3]。病虫害化学防除是重要的农业生产技术, 但中国目前普遍存在的农药“粗放式”喷洒, 不仅导致农药有效利用率低, 而且为保证防效过度施用的农药形成大量残留, 严重污染生态环境, 威胁食品和生命安全^[4-5]。据统计, 中国单位面积农药使用量是世界平均水平的 2.5 倍, 受污染的耕地面积达 1×10^7 hm², 约占可耕种面积的 1/10^[6]。

而近年来, 中国农业航空产业发展迅速, 特别是农业航空产业的重要组成部分之一的植保无人机在近年来的迅猛发展和应用引起了人们广泛地关注^[7-8]。植保无人机航空施药技术作为中国近年来的新型植保作业方式, 改变

了中国传统植保作业方式的弊端, 植保无人机喷施作业效率高、雾化效果好、成本低、采用低容量或超低容量喷雾, 且可解决水稻生长过程中地面机械难以下田作业的问题等等, 正逐渐成为人们首选的植保作业方式^[9-11]。因此, 植保无人机航空喷施是减少农药用量, 降低农药残留, 提升农药防效的有力手段。

随着植保无人机在中国的广泛应用, 其低空低量航空施药技术研究逐步成为研究热点^[12-14]。目前, 国内关于植保无人机喷施应用研究主要在于航空喷施作业参数对雾滴沉积分布特性影响的层面上^[15-19], 而忽略了植保无人机航空喷施作业的有效喷幅宽度的评定, 植保无人机有效喷幅宽度的准确评定对其作业航线的规划及喷施作业质量的提升均有着重要意义。茹煜等^[20-21]分别通过雾滴分布试验台在实验室测试了单个不同类型的航空雾化喷头在不同作业参数条件下的喷幅宽度等性能参数; 崔瑾等^[22]应用喷雾性能综合试验台对喷杆式果树苗圃打药机在设置喷头不同间距条件下的有效喷幅宽度进行了研究和试验; 张海星等^[23]曾通过雾滴沉积密度判定法来对喷杆喷雾机进行了有效喷幅宽度性能测试; Zhang 等^[24]曾对有人驾驶飞机 M-18B 和画眉鸟 510G 在不同作业参数下进行了喷施试验, 通过不同的评定方法对其有效喷幅宽度进行了评定; 而学者对植保无人机航空喷施作业中有效喷幅宽度的评定及研究却鲜有报道。

收稿日期: 2016-12-27 修订日期: 2017-04-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200700)

作者简介: 陈盛德, 男 (汉), 湖北, 博士生, 主要从事农业航空喷施技术研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

Email: 1163145190@qq.com

*通信作者: 兰玉彬, 男 (汉), 吉林, 国家“千人计划”特聘专家, 教授, 中国农业工程学会农业航空分会常务副主任, 主要从事精准农业航空方向研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。Email: ylan@scau.edu.cn。中国农业工程学会高级会员: 兰玉彬 (E041200725S)。

本文以单旋翼植保无人直升机和多旋翼植保无人直升机为例，通过不同飞行参数下的航空喷施试验及目前国内常用的不同有效喷幅评定方法来评定不同参数无人机的有效喷幅，以期在评定植保无人机有效喷幅宽度的同时，为不同参数和类型的植保无人机选择较优的有效喷幅评定方法，降低航空喷施作业的重喷率和漏喷率，提高植保无人机航空喷施作业质量，为植保无人机的精准航空作业提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

本次测定试验的植保无人机分别是安阳全丰航空植保科技有限公司提供的 3WQF120-12 型智能悬浮植保机（下文简称为“3WQF120-12 型植保机”）和广州极飞科技有限公司提供的 P-20 型农业植保无人机（下文简称为“P-20 型植保机”），如图 1 所示，主要性能指标如表 1 所示。

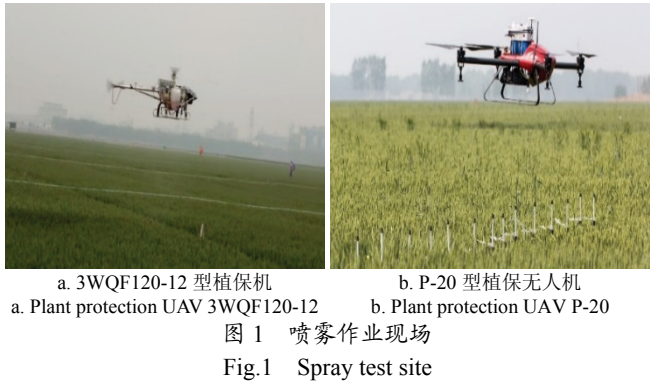


表 1 植保无人机主要性能指标		
Table 1 Main performance index of plant protection UAV		
主要技术参数 Main parameter	3WQF120-12 型智能 悬浮植保机 Plant protection UAV 3WQF120-12	P-20 型农业植保 无人机 Plant protection UAV P-20
型号 Type	单旋翼油动无人直升机	四旋翼电动 无人直升机
作业速度 Flight speed/(m·s ⁻¹)	0~15	5
作业高度 Flight height/m	2~6	1~3
有效喷幅 Effective spraying width/m	4~6	2.5~5
总喷施流量 Total spraying flow/(mL·min ⁻¹)	1 200	340
最大载药量 Maximum load/L	12	6
喷头数量 Number of nozzles	2	2
喷头类型 Nozzle type	液压式	离心式
喷头间距 Nozzle spacing/cm	120	118

北斗定位系统为航空用北斗系统 UB351，具有 RTK 差分定位功能，平面精度达 $(10+5\times D\times 10^{-7})$ mm，高程精度达 $(20+1\times D\times 10^{-6})$ mm，其中， D 表示该系统实际测量的距离值，km。农用无人机搭载该系统移动站给作业航线绘制轨迹及给各个风场采样点和雾滴采样点坐标

定位，通过北斗系统绘制的作业轨迹来观察实际作业航线与各采集点之间的关系，并获取农用无人机喷施作业的飞行参数。

环境监测系统包括便携式风速风向仪和试验用数字温湿度表，风速风向仪用于监测和记录试验时环境的风速和风向，温湿度表用于测量试验时环境的温度及湿度。雾滴收集处理设备包括三脚架、扫描仪、夹子、橡胶手套、密封袋、标签纸等。

1.2 试验方法

1.2.1 试验场地

3WQF120-12 型植保机测试试验于河南省新乡市七里营镇中国农业科学院实验基地进行，P-20 型植保机测试试验于河南省周口市西华县奉母镇小麦地进行进行，小麦生长期为冬小麦杨花灌浆期。

1.2.2 采样点布置

如图 2 所示，在足够大的地块中设置一条雾滴采集带，计划设置采集带上采集点之间的间距为 0.5 m。由于通过观察 3 次 3WQF120-12 型植保机有效喷幅测试预试验的结果可知，离航线中心两侧 0.5 m 处的采集点上的雾滴数量较多；考虑到 3WQF120-12 型植保机的有效喷幅较大，P-20 型植保机有效喷幅较小，因此，设置如图 2 所示的试验方案。图 2a 为 3WQF120-12 型植保机测试试验方案图，以中心航线处记为 0，左右对称布置 8 个采集点，左右两边的采集点分别依次记为-1、-1.5、-2、-2.5、-3、-3.5、-4、-4.5 和 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5 m；如图 2b 所示为 P-20 型植保机测试试验方案图，以中心航线处记为 0 m，左右对称布置 8 个采集点，左右两边的采集点分别依次记为-0.5、-1、-1.5、-2、-2.5、-3、-3.5、-4 和 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 m。

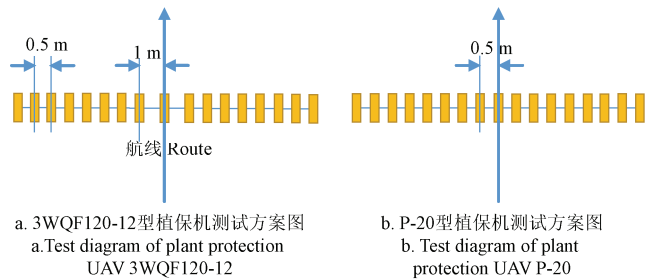


图 2 试验方案示意图
Fig.2 Test diagram

1.2.3 作业参数设计

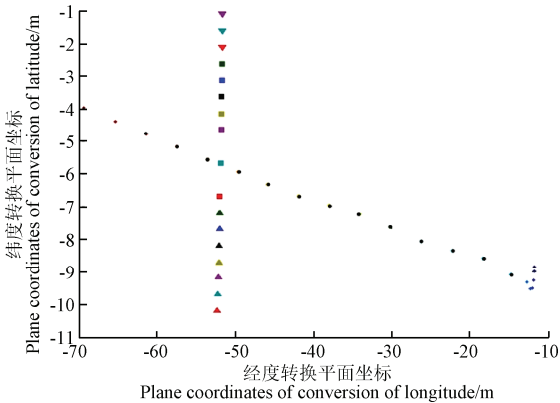
由于此次试验是为了判定植保无人机喷施作业时的有效喷幅宽度，所以试验作业参数应在正常作业范围内。据飞控手之前的喷施作业经验，推荐较佳的作业高度为 2 m 左右，作业速度为 4 m/s 左右；且考虑到飞控手的平时操作误差，将作业参数设置为作业高度 1~3.5 m，作业速度 2~5 m/s。在此作业参数范围内每种机型选择了 12 次不同的飞行参数进行喷施试验。

1.3 数据处理

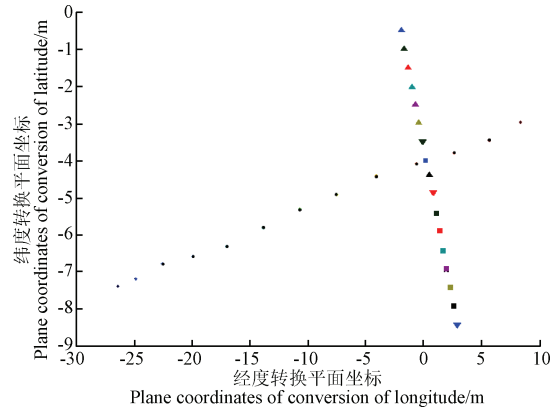
1.3.1 作业参数及轨迹处理

如图 3a、3b 所示，分别取试验时由北斗定位系统

UB351 对 3WQF120-12 型植保机、P-20 型植保机其中一次测试试验所绘制成的布点图及飞行轨迹图作示意图, 其中, 北斗定位系统 UB351 在喷施作业时的轨迹定位频率为 1 Hz。由于无人机的飞行操作存在误差, 3WQF120-12 型植保机的第 5、7 次飞行航线在采集位置 -1 m 处上方, 其余架次均通过采集位置 0 处上方; P-20 型植保机的第 5 次飞行航线在采集位置 0 处上方, 其余架次均通过采集位置 -0.5 m 处上方。



a. 3WQF120-12 型植保无人机飞行轨迹
a. Test trajectory of plant protection UAV 3WQF120-12



b. P-20 型植保无人机飞行轨迹
b. Test trajectory of plant protection UAV P-20

注: 图中小三角和小方块代表采集带上不同位置的采集点, 小圆点代表无人机在航线上不同时刻的位置。
Note: Small triangles and squares represent collection points at different locations, and small dots represent the location of UAV at different times.

图 3 试验飞行轨迹
Fig.3 Test trajectory

如表 2 所示, 分别为 3WQF120-12 型植保机 12 次飞行试验的飞行参数及环境参数 (试验当天上午的温度为 21 ℃ 左右, 湿度为 58% 左右, 环境风向为东北风向) 及 P-20 型植保机 12 次飞行试验的飞行参数及环境参数 (试验当天上午的温度为 30 ℃ 左右, 湿度为 54% 左右, 环境风向为西南风向), 风速采集高度约为 2 m。

1. 3. 2 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扫描仪扫描, 扫描后的

图像通过图像处理软件 DepositScan 进行分析, 得出在不同的航空施药参数下雾滴的覆盖密度、沉积量及雾滴粒径大小等参数^[25]。

表 2 试验参数
Table 2 Test parameters

试验架次 Test flights	3WQF120-12 型植保机作业参数 Test parameters of plant protection UAV 3WQF120-12			P-20 型植保机作业参数 Test parameters of plant protection UAV P-20		
	飞行速度 Flight speed/ (m·s ⁻¹)	飞行高度 Flight height/m	环境风速 Wind velocity/ (m·s ⁻¹)	飞行速度 Flight speed/ (m·s ⁻¹)	飞行高度 Flight height/m	环境风速 Wind velocity/ (m·s ⁻¹)
1	4.91	1.85	1.2	3.22	1.84	1.5
2	3.77	1.72	1.0	4.60	1.42	1.2
3	3.90	2.27	0.8	3.85	1.44	1.6
4	3.84	1.05	1.4	3.31	1.72	2.2
5	2.98	1.70	0.5	3.90	1.70	1.8
6	2.94	2.04	1.5	4.75	1.60	1.9
7	2.90	1.02	0.8	3.42	2.21	2.0
8	2.86	3.43	2.2	3.45	2.06	0.8
9	4.76	2.36	1.5	4.71	2.19	2.0
10	4.88	1.12	0.8	4.45	1.72	1.5
11	5.01	3.60	0.5	4.55	2.05	1.6
12	3.92	2.35	1.2	3.87	1.49	2.5

1. 4 有效喷幅判定方法

雾滴密度判定法: 根据《中华人民共和国民用航空行业标准》中《农业航空喷洒作业质量技术指标》规定: 在飞机进行超低容量的农业喷洒作业时, 作业对象的雾滴覆盖密度达到 15 个/cm² 以上就达到有效喷幅^[26]。

50%有效沉积量判定法: 根据《中华人民共和国民用航空行业标准》中《航空喷施设备的喷施率和分布模式测定》规定: 以沉积率为纵坐标, 以航空设备飞行路线两侧的采样点为横坐标绘制分布曲线, 曲线两侧各有一点的沉积率为最大沉积率的一半, 这两点之间的距离可作为有效喷幅宽度^[27]。

2 结果与分析

2. 1 3WQF120-12 型植保机航空喷施雾滴沉积分布与有效喷幅测定

2. 1. 1 雾滴沉积结果

如表 3、4 所示, 分别表示 3WQF120-12 型植保机在 12 个架次喷施试验中雾滴在不同采样位置的雾滴沉积密度、雾滴沉积率。

根据表 3 的雾滴密度沉积结果及雾滴密度判定法对 3WQF120-12 型植保机的有效喷幅进行评定, 12 个架次试验的有效喷幅分布范围分别为 2.0~2.5、-1.0~1.5、-1.5~2.0、0~1.5、-2.5~1.5、-1.5~3.0、-1.5~1.5、1.0~4.0、0~1.5、-1.0~1.5、0、2.0~2.5 m; 而根据表 4 的雾滴沉积率结果及 50%有效沉积量判定法对 3WQF120-12 型植保机的有效喷幅进行评定, 12 个架次试验的有效喷幅分布范围分别为 -1.5~3.0、-1.0~3.0、-1.5~2.5、0~1.5、-2.5~1.5、-1.0~2.5、-1.5~1.0、0~4.5、-2.0~3.5、-1.0~1.0、-2.5~2.5、-1.5~3.0 m。根据有效喷幅宽度的判定结果可得表 5。

表 3 雾滴沉积密度
Table 3 Density of droplet deposition

采集位置 Sampling location/m	试验架次 Test flights no.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.5	1.1	1.4	1.3	2.0	1.8	4.9	1.4	12.0	4.6	2.8	2.7	4.1
4.0	1.3	3.3	2.1	2.5	2.5	8.6	1.3	18.3	6.0	2.1	4.0	4.2
3.5	3.7	5.2	2.1	1.7	2.1	14.6	1.5	22.2	9.2	2.8	4.5	4.8
3.0	9.4	18.4	5.7	1.3	1.8	15.0	1.7	21.7	10.7	5.8	2.9	11.4
2.5	14.9	13.9	14.4	2.3	1.7	35.2	1.1	16.1	9.9	4.5	4.8	17.1
2.0	15.3	14.3	21.3	2.5	8.9	47.9	4.2	15.3	10.9	10.8	7.1	40.3
1.5	8.9	30.8	40.4	26.0	22.1	34.6	14.9	22.3	17.6	20.6	5.6	9.9
1.0	13.7	30.6	20.0	48.0	42.0	39.6	30.3	30.3	16.1	49.5	7.5	13.1
0	10.5	15.1	19.9	15.6	38.4	46.0	43.1	11.1	16.3	39.6	11.1	12.9
-1.0	9.8	27.7	22.3	11.5	24.2	30.2	55.3	3.4	7.9	35.1	6.8	29.3
-1.5	8.6	4.6	17.2	3.7	38.0	26.4	33.0	0.9	8.2	4.5	4.7	14
-2.0	3.2	4.4	5.0	2.9	26.1	14.1	5.6	0	11.7	3.5	5.3	4.5
-2.5	1.3	4.7	3.1	2.9	17.2	5.6	2.3	0	4.8	4.8	5.2	7.0
-3.0	0	4.6	4.4	1.8	11.3	3.3	3.1	0	2.1	4.3	1.5	3.5
-3.5	0	1.2	3.9	0	5.8	0	0	0	0	6.0	0.9	2.3
-4.0	0	0	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注：表中加粗部分数字表示此处采集点属于评定的有效喷幅内。下同。
Note: Portions in bold indicate that collection point is in effective spraying width. Same as below.

表 4 雾滴沉积率
Table 4 Droplet deposition rate

采集位置 Sampling location /m	试验架次 Test flights no.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.5	0.007	0.009	0.011	0.005	0.006	0.023	0.004	0.112	0.024	0.017	0.009	0.044
4.0	0.007	0.028	0.033	0.004	0.012	0.058	0.004	0.129	0.024	0.01	0.016	0.043
3.5	0.040	0.061	0.044	0.005	0.013	0.081	0.004	0.181	0.057	0.012	0.021	0.039
3.0	0.096	0.146	0.07	0.006	0.011	0.109	0.006	0.152	0.065	0.021	0.031	0.086
2.5	0.153	0.144	0.156	0.007	0.009	0.201	0.004	0.114	0.062	0.027	0.045	0.096
2.0	0.184	0.145	0.180	0.006	0.074	0.325	0.051	0.110	0.071	0.081	0.062	0.142
1.5	0.125	0.224	0.286	0.237	0.175	0.233	0.142	0.174	0.106	0.162	0.059	0.093
1.0	0.154	0.267	0.206	0.332	0.328	0.272	0.215	0.217	0.106	0.342	0.068	0.085
0	0.112	0.164	0.198	0.265	0.234	0.301	0.273	0.109	0.095	0.281	0.088	0.087
-1.0	0.105	0.239	0.202	0.095	0.202	0.203	0.314	0.021	0.086	0.226	0.052	0.128
-1.5	0.092	0.064	0.163	0.023	0.231	0.158	0.213	0.003	0.095	0.024	0.046	0.079
-2.0	0.054	0.054	0.068	0.023	0.185	0.078	0.062	0	0.095	0.025	0.069	0.035
-2.5	0.008	0.057	0.03	0.032	0.165	0.026	0.016	0	0.031	0.025	0.058	0.034
-3.0	0	0.043	0.039	0.001	0.121	0.013	0.029	0	0.023	0.014	0.007	0.019
-3.5	0	0.012	0.033	0	0.032	0	0	0	0	0.038	0.007	0.007
-4.0	0	0	0.013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5 3WQF120-12 型植保机有效喷幅判定结果
Table 5 Results of effective spraying width of plant protection UAV 3WQF120-12

试验架次 Test flights	有效喷幅判定结果	
	Evaluation results of effective spraying width/m	
	雾滴密度判定法 Evaluation method of droplet density	50%有效沉积量判定法 Evaluation method of 50% effective deposition
1	≥0.5	≥4.5
2	≥2.5	≥4.0
3	≥3.5	≥4.0
4	≥1.5	≥1.5
5	≥4.0	≥4.0
6	≥4.5	≥4.0
7	≥3.0	≥2.5
8	≥3.0	≥4.5
9	≥1.5	≥5.5
10	≥2.5	≥1.0
11	≥0	≥5.0
12	≥0.5	≥4.5

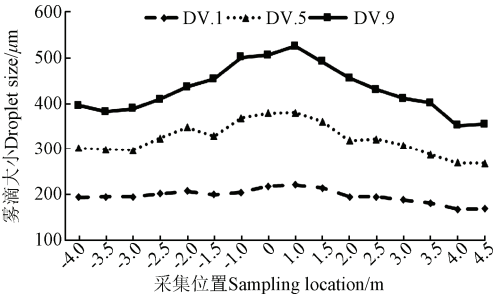
从表 5 可以看出，对于 3WQF120-12 型植保机来说，随着不同架次中飞行作业参数的改变，其有效喷幅宽度也发生了变化；但是，在同一架次中，不同评定方法所评定出的有效喷幅宽度结果不同；雾滴密度判定法评定的有效喷幅宽度的结果波动范围从 ≥0.5 m 到 ≥4.5 m，结果极不稳定。且第 11 架次飞行试验的有效喷幅宽度结果为 0，难以评定，而这一架次的飞行速度为 5.01 m/s，飞行高度为 3.60 m，因此，出现这一情况的原因可能是由于无人机在这一架次的飞行参数过大而导致雾滴在农作物冠层的沉积量达不到评定要求。

50%有效沉积量判定法评定的有效喷幅宽度结果与雾滴密度判定法评定的结果相比，喷幅宽度范围更稳定，剔除第 4、7、10 架次出现的异常值，其喷幅宽度结果均在提供参考的有效喷幅宽度 4.0~6.0 m 范围之内，平均有效喷幅宽度 ≥4.44 m。因此，根据 3WQF120-12 型植保机的有效喷幅宽度评定结果，50%有效沉积量判定法与雾滴密度判定法相比，50%有效沉积量判定法更适合于 3WQF120-12 型植保机有效喷幅宽度的评定。而第 4、7、10 架次中的飞行速度分别为 3.84、2.90、4.88 m/s，飞行高度分别为 1.05、1.02、1.12 m，飞行高度均明显低于其他飞行架次的飞行高度，飞行高度是影响植保无人机喷幅宽度的重要因素，因此，造成喷幅宽度低于正常值的原因可能是由于这 3 个架次的飞行高度过低。

另外，从图 3a 可以看出，植保机的飞行航线经过采集位置 0 m 处附近，即表明此处为无人机的中心航线；根据表 4 中的雾滴沉积量结果来看，航空喷施雾滴的沉积中线均发生了偏移，除第 5、7 架次外，有效喷幅区内中心航线下风向的雾滴沉积量都多于上风向的雾滴沉积量，且下风向的雾滴沉积飘移距离也大于上风向的雾滴沉积飘移距离；而造成第 5、7 架次雾滴沉积结果不同其它架次的主要原因是 2 个架次的飞行航线中线经过采集位置-1 m 处，航线发生了较大偏差，且 2 个架次作业时环境风速较小，使雾滴在沉积过程中发生了较小范围内的飘移。

2.1.2 雾滴粒径分布

图 4 为 3WQF120-12 型植保机在 12 个架次喷施作业中雾滴在不同采样位置处的平均雾滴粒径分布情况。



注：DV.1 表示 10%累积体积直径，DV.5 表示体积中值直径，DV.9 表示 90%累积体积直径。下同。
Note: DV.1 represents the diameter of 10% droplet cumulative volume, DV.5 represents the volume median diameter, DV.9 represents the diameter of 90% droplet cumulative volume. Same as below.

图 4 3WQF120-12 型植保机平均雾滴粒径分布
Fig.4 Average droplet size distribution of plant protection UAV 3WQF120-12

由图 4 可以看出, 3WQF120-12 型植保机喷施作业的雾滴体积中值直径 (DV.5) 主要分布在 270~380 μm 之间; 且较大粒径的雾滴 (雾滴体积中值直径在 370 μm 左右) 主要沉积在中心航线附近, 较小粒径的雾滴 (雾滴体积中值直径在 300 μm 左右) 主要分布在中心航线远处的两侧, 这一现象的主要原因是粒径较大的雾滴受环境侧向水平风场的影响较小, 更容易沉降; 粒径较小的雾滴更容易受到环境侧向水平风场的影响而发生较大范围内飘移。

2.2 P-20 型植保机航空喷施雾滴沉积分布与有效喷幅测定

2.2.1 雾滴沉积结果

如表 6、7 所示, 分别表示 P-20 型植保机在 12 个架次喷施试验中雾滴在不同采样位置的雾滴沉积密度、雾滴沉积率。

表 6 雾滴沉积密度
Table 6 Density of droplet deposition

采集位置 Collection location/m	试验架次 Test flights no.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.0	1.8	0.8	2.2	1.3	2.7	0.8	1.7	0.3	1.4	1.3	1.3	2.1
3.5	2.0	2.4	2.3	1.3	0.6	2.0	1.5	0.3	1.5	1.6	0.9	2.2
3.0	1.8	2.8	1.1	1.0	0.8	3.2	1.4	1.4	7.9	1.4	2.9	6.1
2.5	7.2	2.5	0.9	9.7	3.1	2.7	2.2	9.3	8.6	4.2	13.7	15.6
2.0	16.2	3.9	10.3	22.5	6.8	12.2	19.3	21.7	15.7	16.9	22.3	33.5
1.5	26.0	17.5	24.3	33.4	26.8	25.1	34.2	33.4	24.3	33.2	44.9	36.3
1.0	40.3	41.8	49.4	41.8	46.8	40.6	54.2	39.8	38.5	41.9	68.3	45.6
0.5	38.7	50.2	53.5	59.3	62.3	47.7	51.1	52.1	41.8	55.3	47.5	52.1
0	62.4	62.5	55.3	57.0	45.9	61.8	63.0	58.3	49.4	66.6	20.5	42.3
-0.5	35.3	57.7	46.8	20.9	33.6	36.3	30.1	37.3	15.4	33.9	11.2	34.9
-1.0	26.1	31.0	17.9	6.1	23.9	13.3	11.2	32.2	8.5	10.8	3.8	12.1
-1.5	8.7	12.1	7.1	1.7	12.8	0.5	3.5	16.2	5.5	5.9	1.5	4.8
-2.0	1.4	1.9	1.6	0.7	1.0	2.5	1.0	6.2	4.5	2.3	0.6	3.8
-2.5	0	2.0	0	0	0	3.3	0	2.8	2.1	1.2	0	1.6
-3.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.9	0	0	0
-3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3	0	0	0
-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0

表 7 雾滴沉积率
Table 7 Droplet deposition rate

采集位置 Collection location/m	试验架次 Test flights no.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.0	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.002
3.5	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.003	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002
3.0	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.006	0.003	0.002	0.008	0.002	0.003	0.012
2.5	0.007	0.003	0.002	0.011	0.004	0.004	0.002	0.015	0.013	0.008	0.021	0.029
2.0	0.027	0.008	0.016	0.034	0.011	0.02	0.025	0.028	0.026	0.02	0.032	0.044
1.5	0.045	0.026	0.035	0.066	0.032	0.028	0.056	0.046	0.037	0.043	0.058	0.065
1.0	0.072	0.062	0.102	0.088	0.910	0.039	0.091	0.055	0.042	0.079	0.107	0.078
0.5	0.046	0.048	0.088	0.122	0.112	0.070	0.091	0.085	0.050	0.073	0.066	0.101
0	0.091	0.073	0.094	0.103	0.042	0.096	0.107	0.105	0.062	0.087	0.038	0.073
-0.5	0.046	0.066	0.084	0.037	0.046	0.042	0.044	0.061	0.028	0.038	0.021	0.046
-1.0	0.035	0.036	0.027	0.011	0.046	0.03	0.021	0.043	0.01	0.018	0.006	0.022
-1.5	0.008	0.017	0.008	0.002	0.025	0.001	0.004	0.027	0.009	0.01	0.002	0.009
-2.0	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.01	0.007	0.003	0.001	0.007
-2.5	0	0.001	0	0	0	0.004	0	0.004	0.005	0.002	0	0.002
-3.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0
-3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0
-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0

根据表 6 的雾滴密度沉积结果及雾滴密度判定法对 P-20 型植保机的有效喷幅进行评定, 12 个架次试验的有效喷幅分布范围分别为-1.0~2.0、-1.0~1.5、-1.0~1.5、-0.5~2.0、-1.0~1.5、-0.5~1.5、-0.5~2.0、-1.5~2.0、-0.5~2.0、-0.5~2.0、0~2.0、-0.5~2.5 m; 而根据表 7 的雾滴沉积率结果及 50%有效沉积量判定法对 P-20 型植保机的有效喷幅进行评定, 12 个架次试验的有效喷幅分布范围分别为-0.5~1.5、-1.0~1.0、-0.5~1.0、0~1.5、0.5~1.0、0~0.5、0~1.5、-0.5~1.0、0~1.5、0~1.5、0.5~1.5、0~1.5 m。根据有效喷幅的判定结果可得表 8。

表 8 极飞无人机有效喷幅判定结果
Table 8 Result of effective spraying width of plant protection UAV 3WQF120-12

试验架次 Test flights no.	有效喷幅判定结果 Evaluation results of effective spraying width / m	
	雾滴密度判定法 Evaluation method of droplet density	50%有效沉积量判定法 Evaluation method of 50% effective deposition
1	≥3.0	≥2.0
2	≥2.5	≥2.0
3	≥2.5	≥1.5
4	≥2.5	≥1.5
5	≥2.5	≥1.0
6	≥2.0	≥1.0
7	≥2.5	≥1.5
8	≥3.5	≥1.5
9	≥2.5	≥1.5
10	≥2.5	≥1.5
11	≥2.0	≥1.0
12	≥3.0	≥1.5

同样, 从表 8 可以看出, 随着不同架次中飞行作业参数的改变, 其有效喷幅宽度也发生了变化; 但是, 在同一架次中, 不同评定方法所评定出的有效喷幅宽度结果并不相同; 50%有效沉积量判定法评定的有效喷幅宽度的结果波动范围从≥1.0 m 到≥2.0 m, 平均有效喷幅宽度≥1.46 m。而雾滴密度判定法判定的有效喷幅宽度结果波动范围从≥2.0 m 到≥3.5 m, 平均有效喷幅宽度≥2.58 m。对于 P-20 型植保机来说, 雾滴密度判定法判定的有效喷幅宽度结果与 50%有效沉积量判定法相比, 其评定的喷幅宽度结果与提供参考的有效喷幅宽度更接近, 且在参考范围 2.5~5.0 m 范围之内。因此, 根据 P-20 型植保机的有效喷幅宽度评定结果, 雾滴密度判定法与 50%有效沉积量判定法相比更适合于 P-20 型植保机有效喷幅宽度的评定。

与 3WQF120-12 型植保机喷施雾滴沉积结果一样, P-20 型植保机的雾滴沉积中线也发生了偏移。从图 3b 可以看出, 植保机的飞行航线经过采集位置-0.5 m 处, 即表明此处为无人机的中心航线; 根据表 6 的雾滴沉积密度结果来看, 有效喷幅区内中心航线下风向的雾滴沉积数量远远多于上风向的雾滴沉积数量, 且下风向的雾滴沉积飘移距离也远远大于上风向的雾滴沉积飘移距离。

2.2.2 雾滴粒径分布

如图 5 所示, 表示 P-20 型植保机在 12 个架次喷施作业中雾滴在不同采样位置的平均雾滴粒径大小分布情

况。由图 5 可以看出, P-20 型植保机喷施作业的雾滴粒径的体积中值直径(DV.5) 主要分布在 130~175 μm 之间; 其次, 由于无人机的中心航线在雾滴采集位置-0.5 m 处附近, 而较大粒径的雾滴(雾滴体积中值直径大于 160 μm) 主要沉积在中心航线下风向的 0.5~1.0 m 附近, 较小粒径的雾滴(雾滴体积中值直径在 130 μm 左右) 主要分布在中心航线远处的两侧, 这主要是由于 P-20 型植保机的雾滴粒径的整体值较小, 相对较大粒径的雾滴随着环境侧向风场的影响而向下风向方向发生了小范围的飘移, 相对较小粒径的雾滴受到环境侧向风场的影响而发生了较大范围的飘移。

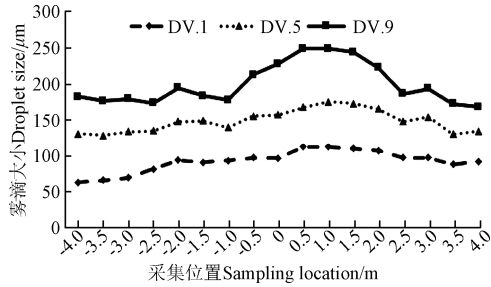


图 5 P-20 型植保无人机试验平均雾滴粒径分布
Fig.5 Average droplet size distribution of plant protection UAV P-20

3 讨 论

植保无人机有效喷幅宽度的准确评定是精准农业航空作业的前提, 对其作业效率和作业质量的保证和提升均有着重要作用。本文通过 50%有效沉积量判定法和雾滴密度判定法分别对单旋翼植保无人机和多旋翼植保无人机在正常作业参数范围内的不同作业参数条件下进行多次试验重复测定。基于本文的试验条件下得出的评定结果表明, 不同参数的植保无人机适于评定其有效喷幅宽度的方法不一样, 对于 3WQF120-12 型植保无人机而言, 更适合于 50%有效沉积量判定法; 对于 UAV P-20 型农业植保无人机而言, 则更适合于雾滴密度判定法。

从雾滴粒径分布结果来看, 3WQF120-12 型植保无人机喷施的雾滴粒径范围要远远大于 P-20 型植保无人机的雾滴粒径范围。因此推断不同参数的植保无人机适于不同的有效喷幅宽度判定方法可能是由于其雾滴粒径大小范围的不同而造成的。首先, 航空喷施喷量小, 但其雾化程度较高, 对于较大粒径的雾滴来说, 由于有效喷幅内雾滴数量较多, 极易造成沉积在水敏纸表面的雾滴铺展后而发生雾滴斑点部分重叠现象[28-29], 而当前雾滴图像处理技术难以分割和识别重叠雾滴, 无法准确计数, 导致产生误差的较大, 从而造成雾滴密度判定方法不适用于对于雾滴粒径较大的植保无人机有效喷幅宽度的评定。进一步地, 根据雾滴图像处理软件 DepositScan 对水敏纸上雾滴的沉积量计算公式为

$$V = \frac{\pi}{6} d^3 \quad (1)$$

式中 V 为单个雾滴的体积, μm^3 ; d 为雾滴的直径, μm 。

由式(1)可知, 雾滴沉积量主要是通过雾滴斑点的直径计算得到的。根据 Zhu 等[25]对标准粒径大小为 50、100、250、500、1000 μm 的斑点测量结果可知, 软件 DepositScan 测量的结果与标准值相比, 相对偏差分别为 34.1%、16.3%、7.8%、1.4%、1.2%, 表明软件 DepositScan 对雾滴尺寸的测量误差会随着雾滴粒径的减小而增大。因此, 对于雾滴粒径体积中值为 370 μm 左右的 3WQF120-12 型植保无人机来说, 雾滴粒径测量误差在 1.4%~7.8%之间, 从而对雾滴沉积量的计算误差影响较小, 即 50%有效沉积量判定法更适于雾滴粒径相对较大的 3WQF120-12 型植保无人机有效喷幅宽度的评定。对于雾滴粒径体积中值为 150 μm 左右的 P-20 型农业植保无人机来说, 雾滴粒径的测量误差在 10%以上, 从而对雾滴沉积量的计算影响较大; 其次, 由式(1)可知, 当雾滴粒径大小减小 1 倍, 雾滴沉积量的计算体积就会相应减小 8 倍, 而单位面积内雾滴的累积沉积量计算公式为

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

式中 V_t 为单位采样面积内的雾滴累积沉积量, μm^3 ; V_i 为第 i 个雾滴沉积量, μm^3 ; n 为单位采样面积内的雾滴个数。

由于计算结果中有效数字位数的限制, 导致会忽略粒径较小的雾滴沉积量, 因此, 对于极小的雾滴来说, 雾滴沉积量计算公式也会造成雾滴沉积量的计算结果偏小, 产生计算误差。由图 5 可知, 粒径较大的雾滴基本上沉积在采集位置 0.5~1.0 m 处附近, 极小的雾滴则沉积在两侧, 且从表 6、7 看出, 雾滴的沉积中线也在采集处 0.5~1.0 m 附近, 随着两侧雾滴粒径的减小, 两侧的雾滴沉积量也发生骤减, 导致 50%有效沉积量判定法评定的有效喷幅宽度值较给出的参考值偏小; 而较小粒径的雾滴在水敏纸表面不容易发生重叠等现象, 单位面积内的雾滴个数的计算结果误差较小。因此, 雾滴密度法与 50%有效沉积量判定法相比, 更适于雾滴粒径相对较小的 P-20 型植保无人机有效喷幅宽度的评定。

另外, 本文需要指出的是, 首先, 植保无人机飞行作业参数的不同在一定程度上必然会引起其有效喷幅宽度的波动和变化, 随着不同架次中飞行作业参数的改变, 其有效喷幅宽度也发生了变化; 但是, 在同一架次中, 不同评定方法所评定出的有效喷幅宽度结果不同, 因此, 我们可以认为, 不同参数的植保无人机适于评定其有效喷幅宽度的方法不一样, 这一结论是有效和可靠的。

其次, 本次试验结果是在正常飞行参数范围内和一定外界环境条件内 12 次不同作业参数条件下进行测定的, 由于外界环境和结果处理误差的影响, 不同参数的植保无人机有效喷幅的判定结果会存在一定的误差。因此, 将来的研究工作需要在多种外界环境影响的情况下增加试验次数, 在采集大样本量数据的基础上, 对不同参数的植保无人机的有效喷幅进行准确的判定, 以期降低航空喷施作业的重喷率和漏喷率, 提高植保无人机航空喷施作业质量, 为植保无人机的精准航空作业提供理

论指导和数据支持。

最后, 目前对雾滴沉积效果检测方法主要有图像测量法和示踪剂洗脱测量法, 由于图像测量法对雾滴沉积结果的检测具有简单快速、成本低等特点^[30-31], 因此, 对雾滴斑点重叠或部分重叠图像处理技术^[32]的改进应作为未来农业航空领域的另一研究重点。

4 结 论

本文以单旋翼植保无人直升机和多旋翼植保无人直升机为例, 通过不同飞行参数下的航空喷施试验及目前国内常用的有效喷幅评定方法来评定不同参数植保无人机的有效喷幅, 并对评定的有效喷幅结果分析可得如下结论:

1) 50%有效沉积量判定法适于 3WQF120-12 型植保无人机有效喷幅宽度的评定, 且评定的平均有效喷幅宽度为 ≥ 4.44 m;

2) 雾滴密度判定法适于 P-20 型农业植保无人机有效喷幅宽度的评定, 且评定的平均有效喷幅宽度为 ≥ 2.58 m;

3) 对于通过雾滴在水敏纸等采集卡上的图像来计算雾滴沉积结果的方法而言, 由于当前图像处理技术的限制, 不同雾滴粒径参数的植保无人机应选择合适的有效喷幅宽度评定方法; 50%有效沉积量判定法更适用于雾滴粒径相对较大的植保无人机, 雾滴密度判定法更适用于雾滴粒径相对较小的植保无人机。

[参 考 文 献]

- [1] 张竞成, 袁琳, 王纪华, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 1—11.
Zhang Jingcheng, Yuan Lin, Wang Jihua, et al. Research progress of crop diseases and pests monitoring based on remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 1—11. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵庆展, 靳光才, 周文杰, 等. 基于移动 GIS 的棉田病虫害信息采集系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 183—190.
Zhao Qingzhan, Jin Guangcai, Zhou Wenjie, et al. Information collection system for diseases and pests in cotton field based on mobile GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 183—190. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王艳青. 近年来中国水稻病虫害发生及趋势分析[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 343—347.
Wang Yanqing. Analysis on the occurrence and development of rice diseases and insects in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(2): 343—347. (in Chinese with English abstract)
- [4] 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14—20.
Yuan Huizhu, Yang Daibin, Yan Xiaojing, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. Plant Protection, 2011, 37(5): 14—20. (in Chinese with English abstract)
- [5] 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 13—15.
He Xiongkui. Improving severe dragging actuality of plant protection machinery and its application techniques[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [6] 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国国土资源部和环境保护部, 2014.
- [7] 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.
Zhou Zhiyan, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 1—10. (in Chinese with English abstract)
- [8] Huang Y, Hoffmann W C, Lan Y, et al. Development of a spray system an unmanned aerial vehicle platform[J]. Applied Engineering Agriculture, 2009, 25(6): 803—809.
- [9] 薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 中国农机化, 2008(5): 27—28.
Xue Xinyu, Liang Jian, Fu Ximin. Prospect of aviation plant protection in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(5): 27—28. (in Chinese with English abstract)
- [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.
Zhang Dongyan, Lan Yubin, Chen Liping, et al. Current Status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53—59. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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(增刊 2): 38—46.
Liao Juan, Zang Ying, Zhou Zhiyan, et al. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.2): 38—46. (in Chinese with English abstract)
- [12] Xue X, Tu K, Qin W, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2014, 7(4): 23—28.
- [13] Qin W, Xue X, Cui L, et al. Optimization and test for spraying parameters of cotton defoliant sprayer[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2016, 9(4): 63—72.
- [14] 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 无人植保机施药雾滴空间质量平衡测试方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 54—61.
Wang Changling, He Xiongkui, Wang Xiaonan, et al. Testing method of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2016, 32(11): 54—61. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 基于空间质量平衡法的植保无人机施药雾滴沉积分布特性测试[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 89—97.
Wang Changling, He Xiongkui, Wang Xiaonan, et al. Distribution characteristics of pesticide application droplets deposition of unmanned aerial vehicle based on testing method of spatial quality balance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 89—97. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 等. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 117—123.
Wang Xiaonan, He Xiongkui, Wang Changling, et al. Spray drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(1): 117—123. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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.
Qiu Baijing, Wang Liwei, Cai Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 25—32. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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.
Qin Weicai, Xue Xinyu, Zhou Lixin, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 50—56. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
Chen Shengde, Lan Yubin, Li Jiyu, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 40—46. (in Chinese with English abstract)
- [20] 茹煜, 金兰, 周宏平, 等. 航空施药旋转液力雾化喷头性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 50—55.
Ru Yu, Jin Lan, Zhou Hongping, et al. Performance experiment of rotary hydraulic atomizing nozzle for aerial spraying application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 50—55. (in Chinese with English abstract)
- [21] 范庆妮. 小型无人直升机农药雾化系统的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
Fan qingni. The Research on the Pesticide Spray System Using for the Mini Unmanned Helicopter[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [22] 崔瑾, 杨欣, 刘俊峰, 等. 喷杆式果树苗圃打药机喷头间距设置与研究[J]. 农机化研究, 2014(5): 184—187.
Cui Jin, Yang Xin, Liu Junfeng, et al. Setting and study on nozzle spacing of spray rod type of orchard and nursery spraying machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(5): 184—187. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张海星, 茹煜. 自走式旋翼气流静电喷杆喷雾机喷雾性能测试[J]. 农机化研究, 2017(7): 164—168.
Zhang Haixing, Ru Yu. Spray performance test of a self-propelled with rotary wing air-flow assisted electrostatic spray boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017(7): 164—168. (in Chinese with English abstract)
- [24] Zhang D, Chen L, Zhang R, et al. Evaluating effective swath width and droplet distribution of aerial spraying systems on M-18B and Thrush 510G airplanes[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2015, 8(2): 21—30.
- [25] Zhu H, Masoud S, Robert D F. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011(76): 38—43.
- [26] 中国民用航空总局运输管理局. 中华人民共和国民用航空行业标准: 第1部分 农业航空作业质量技术指标: MH/T 1002-1995 [S]. 北京: 中国民用航空局, 1995: 11.
- [27] 中国民用航空总局运输管理局. 中华人民共和国民用航空行业标准: 第1部分 航空喷施设备的喷施率和分布模式测定: MH/T 1040-2011 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011: 10.
- [28] Cunha M, Carvalho C, Marcal A R S. Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(1): 11—23.
- [29] Hoffmann W C. Comparison of three imaging systems for water-sensitive papers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(6): 961—964.
- [30] 兰玉彬, 彭瑾, 金济. 农药喷雾粒径的研究现状与发展[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 1—9.
Lan Yubin, Peng Jin, Jin ji. Research status and development of pesticide spraying droplet size [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(6): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [31] Marcal A R S. Image processing of artificial targets for automatic evaluation of spray quality[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 51(3): 811—821.
- [32] Wei X, Cao Y, Fu G, et al. A counting method for complex overlapping erythrocytes-based microscopic imaging[J]. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 2015, 8(6): 1550033.

Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV

Chen Shengde^{1,2}, Lan Yubin^{1,2*}, Li Jiayu^{1,2}, Xu Xiaojie^{1,2}, Wang Zhiguo³, Peng Bin⁴

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology / International Laboratory of Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology, Guangzhou 510642, China; 3. Quanfeng Aviation Plant Protection Technology Co., LTD, Anyang 455001, China; 4. XAIRCRAFT Co., LTD, Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the extensive application of plant protection UAV (unmanned aerial vehicle) in China, the research of its low-attitude and low-volume spray technology has gradually become a research hotspot. At present, the domestic research on the aerial spraying application of plant protection UAV mainly focuses on the effect of aerial spraying operation parameters on the distribution of droplet deposition, while neglecting the evaluation and test of the effective spraying width of aerial spraying by plant protection UAV. It is a prerequisite for precision spraying operation of agricultural aviation to evaluate the effective spraying width of plant protection UAV accurately, and it has great significance to the planning of operation route and the improvement of spraying quality. Therefore, the effective spraying width of single-rotor and multi-rotor plant protection UAV was evaluated with the evaluation method of droplet density and 50% effective deposition amount method which were commonly used in China by the tests of 12 times with different flight parameters; and different evaluation methods were deeply analyzed with the image processing principle of DepositScan, which is an image processing software used to analyze the results of droplet deposition with the image of water-sensitive paper and other cards. The test results showed that: The evaluation method of 50% effective deposition amount was more suitable than the evaluation method of droplet density for evaluating the effective spraying width of plant protection UAV 3WQF120-12, which had a relatively larger droplets size, and the volume median diameter of droplet was about 270-380 μm . The average effective spraying width of plant protection UAV 3WQF120-12 was greater than or equal to 4.44 m with the evaluation method of 50% effective deposition amount. The evaluation method of droplet density was more suitable than the evaluation method of 50% effective deposition amount for evaluating the effective spraying width of plant protection UAV P-20, which had a relatively smaller droplets size, and the volume median diameter of droplet was about 130-175 μm . The average effective spraying width was greater than or equal to 2.58 m with the evaluation method of droplet density. The evaluating results of the effective spraying width of plant protection UAV P-20 were in accordance with the actual situation. At the same time, the droplet deposition midline of plant protection UAV 3WQF120-12 had shift with the wind direction, as well as plant protection UAV P-20. In addition, the analysis showed that the relative error produced by the software of DepositScan was different with the spot image produced by the droplets of different size due to the limitation of current image processing techniques. The relative differences of average diameters between the software of DepositScan and the stereoscopic microscope were 34.1%, 16.3%, 7.8%, 1.4% and 1.2% for 50, 100, 250, 500 and 1 000 μm spots, respectively, and the relative measurement error of droplet diameter would increase with the droplet size decreasing. Therefore, we should choose the suitable evaluation method for the effective spraying width based on different droplets size of plant protection UAV. The evaluation method of 50% effective deposition amount should be chosen by plant protection UAV with a relatively larger droplets size, and the evaluation method of droplet density should be chosen by plant protection UAV with a relatively smaller droplets size. The results provide a guidance for selecting the more suitable evaluating method of effective spraying width for plant protection UAVs with different parameters, reduce the re-spraying rate and the missing spraying rate of aerial spraying operation, and improve the spraying quality of aerial spraying operation. The results provide the theoretical guidance and data support for precision spraying operation of plant protection UAV.

Keywords: unmanned aerial vehicles; spraying; experiments; effective spraying width; evaluation method; choose; precision operation