

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.017

气流作业下雾滴粒径稻株间分布特性与风洞模拟试验

李继宇^{1,2} 郭爽^{1,2} 姚伟祥^{1,2} 展义龙^{1,2} 李一凡^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642)

摘要: 为探究气流涡旋作业方式对航空喷施雾滴粒径分布的影响,以 XR-Teejet 110015 型压力式扇形航空喷头为研究对象,在风洞和田间环境中进行了雾滴粒径测试试验。风洞测试模拟田间环境风速设置气流速度,同时设置了3种喷施压力,使用激光粒度分析仪测量雾滴粒径。田间试验以四旋翼无人飞机为施药载体,对杂交水稻进行精准对靶喷施,并对各架次无人飞机旋翼气流与冠层互作程度不同所形成的涡旋形态对应的雾滴粒径分布特性进行了分析。结果表明:风洞条件下,各测试喷头均处于非常细的雾化等级,雾化性能良好且稳定;田间试验中,涡旋形态对雾滴粒径分布影响显著;3种涡旋形态下,小于 200 μm 的雾滴粒径综合平均占比分别为 73.52%、74.21% 和 84.20%,与风洞测试结果较为一致,但田间试验所得雾滴粒径值明显偏高;明显的涡旋形态与小范围涡旋形态雾滴粒径在作物各层位分布趋势较为平缓,各层雾滴体积中径变异系数均处于 3.96%~10.66% 之间,无涡旋形态各层雾滴粒径分布则体现较大的波动性,变异系数也较高,处于 9.49%~17.11% 之间,说明较为明显的涡旋形态有助于雾滴在作物冠层垂直空间的穿透,达到更好的施药效果。研究结果可为农用无人机田间精准喷施作业提供参考。

关键词: 雾滴粒径分布; 风洞; 无人机; 涡旋形态; 对靶喷施; 气流作业

中图分类号: S252⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0148-09

Distribution Characteristics of Droplet Size in Rice Field and Wind Tunnel Simulation Test under Airflow Operation

LI Jiyu^{1,2} GUO Shuang^{1,2} YAO Weixiang^{1,2} ZHAN Yilong^{1,2} LI Yifan^{1,2}

(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 (NPAAC), South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to investigate the effect of airflow vortex operation on the droplets size distribution of aerial spray, the XR-Teejet 110015 pressure fan-shaped nozzle was used as an example, and was tested in the wind tunnel and field respectively. The wind speed in the field was simulated by the airflow velocity of the wind tunnel test, and three spray pressures were set, the droplet size were measured by the laser particle size analyzer. In the field experiment, a four-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) was used as the platform to spray on target, then the droplet size distribution regular of each vortex shape formed by different interaction between rotor airflow and canopy were analyzed. The results showed that under the conditions of wind tunnel, each test nozzle was in a very fine atomization level, and the atomization performance was well and stable. The formation of vortex state had a significant effect on the droplets size distribution in the field test. Under the three vortex states, the comprehensive average proportion of droplet size less than 200 μm was 73.52%, 74.21% and 84.20%, respectively, which was consistent with the wind tunnel test results, but the $D_{10,1}$, $D_{10,5}$ and $D_{10,9}$ of the droplet in the field test were significantly higher than that in the wind tunnel test. The droplets size of the obvious vortex state and small range vortex had a relatively flat distribution trend in the various layers of the crop, and the variation coefficient of volume median diameter in each layer was between 3.96% and 10.66%, but the no vortex state showed a large volatility, and the coefficient of variation was in the range of 9.49%~17.11%, which indicated that the relatively obvious vortex state was conducive to the penetration of

收稿日期: 2019-05-15 修回日期: 2019-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31771682)和高等学校学科创新引智计划项目(D18019)

作者简介: 李继宇(1979—),男,副教授,博士,主要从事精准农业航空研究,E-mail: lijyuscau@qq.com

droplets in the vertical space and achieved better application effect. The research results can provide reference and guidance for the accurate spraying operation of agricultural UAV, and have important significance for improving the utilization rate of pesticides in aerial spraying operations.

Key words: droplet size distribution; wind tunnel; UAV; vortex state; target spray; airflow operation

0 引言

农业是人类赖以生存的基础,人类社会的进步与农业的发展有着密不可分的关系^[1]。近几十年来,随着科学技术的突飞猛进,农业机械化水平也在稳步提升^[2-4],农用无人机作为一种新型的现代化航空施药工具,正在逐步进入大众的视野^[5]。农用无人机采用低容量、高浓度的施药方式,单位面积的施药量远低于传统的地面机械和人工喷雾施药量,确保无人机具有良好的喷施效果显得尤为重要^[6-7]。农用无人机航空施药的本质是农药雾滴或颗粒在喷头的喷施及无人机周身的作业气流场作用下,从空中沉降到靶标作物上进行病虫害防治的运动过程^[8]。通常以沉积量、沉积密度或覆盖率等特性参数评估农用无人机施药的喷施效果,很容易忽略雾滴粒径这一特性参数,雾滴粒径同样是表征喷施效果的重要指标。已有研究表明,只有雾滴粒径处在最佳生物粒径范围时,靶标作物才能最大限度地捕获雾滴,防治效果也最佳;雾滴粒径过大或过小,均会造成不同程度的农药流失浪费或局部药害等环境污染问题^[9-10]。

目前,关于航空喷施雾滴粒径的特性研究主要采用风洞模拟测试和田间实地测试两种方法。相较于田间试验,风洞试验能够准确控制风速风向等参数,模拟出飞行器真实飞行速度,在雾滴粒径相关的基础理论研究中备受青睐^[11]。翟长远等^[12]设计了一种风送喷雾雾滴粒径测量系统,并探究了风速及喷施压力对雾滴粒径的影响;唐青等^[13]在风洞121.7~305.5 km/h的高速气流条件下对扇形压力喷头和空气诱导喷头的雾化特性进行了分析,结果表明,气流速度对雾滴粒径分布影响显著,其中空气诱导喷头在较大风速变化范围内具有更大的雾滴体积中径,总体来说更适合作为航空喷头使用;FERGUSON等^[14]在风洞中对21个喷头的雾滴粒径分布均匀性及防飘特性进行了测试,结果表明,所测试的大多数类型的喷嘴均存在个体差异,但具有相似的雾滴分布跨度,同时还发现,较大粒径尺寸的雾滴在低速条件下有较好的防飘移效果;张慧春等^[15]在风洞中对几种扇形喷头的雾滴粒径进行了测试,结果表明,压力、风速、喷头与激光粒度仪之间距离的增大,都会导致扇形喷头的雾滴体积中径变小,增

加农药脱靶飘移的可能性。这些研究均是在风洞中进行的模拟试验,虽然风洞试验屏蔽掉复杂的外界环境影响,容易得到稳定且理想的试验结果,但风洞试验结果并不能直接等同于田间试验结果,只能作为田间试验的定性参考以及规律性预测依据。实际的田间作业易受外界环境因素多变的影响,测试结果通常具有较大的不确定性^[16],风洞试验结果只是实际田间试验理想化结果中的一种典型表现。

因此,相关学者就风洞和田间试验进行了结合研究。GULER等^[17]分别在风洞和温室中对比测试了空气导流扁平扇形喷头和常规型扁平扇形喷头的喷施性能。茹煜等^[18]首先在风洞中进行了适用于载人固定翼飞机的GP-81A系列航空喷头的雾滴粒径分布特性试验,探究了气流速度与雾滴粒径之间的关系;之后又进行了实际飞行喷施试验,并与风洞试验对比,结果表明,在喷雾压力基本相同的条件下,二者整体变化趋势类似,但风洞条件下的雾滴粒径及雾滴谱相对宽度测试结果略高于田间飞行试验结果。

此外,作业气流场也会对喷施效果造成影响^[19]。农用无人机进行喷施作业时,旋翼高速旋转产生强烈的下洗气流,同时,雾滴自喷头喷出,不可避免地会被裹挟到流场中,作业气流场夹杂着雾滴向下运动与作物冠层相互作用,迫使作物中央出现一个锥形的涡旋形状,这亦是无人机低空作业的典型特征^[20-21]。只有当作业气流场有效作用到作物冠层时,雾滴才易于附着沉积到作物叶片上。作业气流场与作物冠层有效作用的体现则是涡旋,其形态大小能够直接反映风场与冠层互作程度,不同的互作程度对附着到作物叶片上的雾滴同样具有重要影响^[22-23]。但何种尺寸的雾滴粒径能够随着作业气流场的运动,更多且更加有效地附着到作物叶片上,进而达到最佳喷施效果,目前未见有相关研究报道,涡旋形态与相应的雾滴粒径之间关系亟待探明。

本文以国内无人机常用的压力式扇形雾化喷头为研究对象,首先在风洞稳定的模拟环境中采用激光粒度分析仪对各待测喷头进行喷雾效果性能测试,初步掌握其在不同喷施压力下的雾滴粒径分布特性。之后以杂交水稻为靶标作物,通过田间试验探究不同涡旋形态与雾滴粒径之间的关系。通过借鉴风洞测试与田间试验各自的优势,以期优化航空

施药方案,提高作业效率,为农用无人机田间精准喷施作业提供参考与指导。

1 材料与方 法

1.1 试验设置及试验对象

本试验由两部分组成:风洞测试和田间试验。测试使用的航空喷头为目前国内农用无人机喷施作业常用的 XR-Teejet 110015 型压力式扇形航空喷头(美国 Spraying System 公司),数量为 4 个,依次命名为 110015-1、110015-2、110015-3、110015-4。

1.2 风洞测试

1.2.1 风洞

试验所用风洞为华南农业大学国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心的农业航空专用高低速复合风洞。该风洞采用直流闭口式设计,主要由动力段、过渡段、扩散段、稳定段、收缩段和试验段 6 部分组成。风洞洞体为全钢结构,试验段两侧设置有观察窗和喷雾操作平台,洞体内对应设置有可移动调节的喷雾轨道,能够满足风洞内常规喷雾测试要求。风洞详细技术指标如表 1 所示,风洞实物图见图 1。

表 1 风洞技术指标

Tab.1 Parameters of wind tunnel

参数	数值
测试段尺寸/(m×m×m)	20×2.0×1.1
风速/(m·s ⁻¹)	2~52
湍流度/%	<1
轴向静压梯度	<0.01
动压稳定性系数/%	<1
平均气流偏角/(°)	<1



图 1 风洞实物图

Fig.1 Physical scene map of wind tunnel

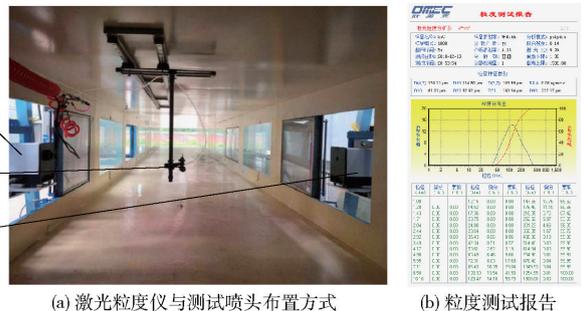
1.2.2 喷雾测试

试验采用的喷雾系统是华南农业大学国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心自主设计的喷雾控制系统。该系统由储水罐、增压泵、安全阀、减压阀、流量计、压力表和喷头组成。喷施压力采用安全阀和减压阀两级调压的方式调节,可根据测试需求精确控制调节喷施压力。

雾滴粒径分布测量装置采用 DP-02 型激光粒

度分析仪(珠海欧美克仪器有限公司),发射器和接收器分别水平放置在风洞试验段两侧观察窗处的专用工作平台上。激光粒度分析仪与测试喷头具体布置方式如图 2a 所示,激光粒度分析仪发射器和接收器间距设置为 180 cm,喷头水平放置,距风洞洞体上下层的距离均为 55 cm,且与激光线处于同一水平面,间距 30 cm,喷雾羽流与激光线垂直、与风洞观察窗平行,距激光粒度分析仪发射器 90 cm。

激光粒度分析仪能够利用激光衍射原理,对喷雾粒径进行测定,中值粒径重复精度为 ±3%,测量范围为 1~1 500 μm,每次测量结束后,可对应生成粒度测试报告(图 2b)。



(a) 激光粒度仪与测试喷头布置方式 (b) 粒度测试报告

图 2 喷雾雾滴粒径测试及对应测试报告

Fig.2 Measurement method of spray droplet size

and corresponding test report

1. 接收器 2. 喷头 3. 发射器

1.2.3 风洞试验设计

设置 0.30、0.35、0.40 MPa 3 种喷施压力,同时为参考无人机日常作业田间环境风速,将风洞风速设定为 2.5 m/s 的恒定风速。风洞试验前,首先将各待测喷头安装到风洞测试段内特定喷雾导轨上并与喷雾系统连通,依次进行 3 种喷施压力下的流量测试,每个喷头测定 5 次,取平均值记为喷洒流量。

流量测定结束后,利用激光粒度分析仪对待测喷头的喷雾雾滴粒径进行测量。测试过程中室温及空气湿度均保持恒定,试验介质为清水。4 个喷头依次在前述条件下进行粒径测试,同一组试验重复 3 次,每次采集时间为 30 s。

1.3 田间试验

1.3.1 试验机型及搭载设备

田间试验所用无人机为华南农业大学国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心自制的四旋翼电动无人机。喷施试验现场如图 3 所示,喷施试剂为清水,雾滴采集卡为水敏纸(瑞士先正达作物保护有限公司),卡片尺寸为 76 mm×26 mm。无人机所安装的喷头为前述风洞测试所使用的喷头,方向朝下,数量为 4 个,沿喷杆方向垂直于飞机中轴线间距 600 mm 等距分布。



(a) 试验现场 (b) 采样点布置图

图 3 无人机喷施试验现场

Fig. 3 UAV and test site

无人机同时搭载华南农业大学国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心研制的轻型机载北斗 RTK 差分系统, 系统具有 RTK 差分定位功能, 数据采集间隔 0.1 s, 能够实时记录飞行参数并绘制出实际作业轨迹作为喷施效果的参考分析。无人机及搭载设备的主要性能指标如表 2 所示。

表 2 无人机及搭载设备主要性能指标

Tab. 2 Specifications of UAV and carrying equipment

参数	数值
外形尺寸/(mm × mm × mm)	1 000 × 1 000 × 495
旋翼直径/mm	750
最大载药量/L	10
作业高度/m	1 ~ 6
作业速度/(m · s ⁻¹)	0 ~ 8
有效喷幅/m	4 ~ 6
北斗平面精度/mm	10 + 5d × 10 ⁻⁷
北斗高程精度/mm	20 + d × 10 ⁻⁶

注: d 表示该系统实际测量的距离, km。

1.3.2 试验地点及方案设计

试验地点为海南省东方市感城镇不磨村杂交水稻制种基地 (18°53'52.65"N, 108°40'54.92"E), 选取 60 m × 60 m 空旷无遮挡的水稻田作为测试地块。水稻品种为隆两优 534, 试验时水稻所处的生长期为结实成熟期, 平均株高 100 ~ 115 cm, 采用宽窄行密植 (140 cm + 60 cm), 行距 25 cm, 株距 15 cm, 种植密度为 1.8 × 10⁵ 株/hm²。

如图 4 所示, 在测试区域内设有 3 条 2.8 m 长的雾滴采集带, 3 条雾滴采集带之间间距 10 m, 第 1 条雾滴采集带前预留有足够的起飞加速距离。每条雾滴采集带等间距设置 5 个采样点, 按无人机航线方向由左至右分别以 -2、-1、0、1、2 标记, 每个点位竖直方向布置 3 张水敏纸, 离地高度分别为 10、50、100 cm, 所有水敏纸均沿着水稻叶片长势正面迎风向布置。设置 0 点处为无人机航线, 同时在田边远离航线离地 2 m 处布置 Kestrel 5500 Link 微型气象站 (美国 Kestrel 公司), 记录间隔为 2 s, 用于实时记录试验过程中自然环境的温度、湿度、风速及风向

等气象信息。

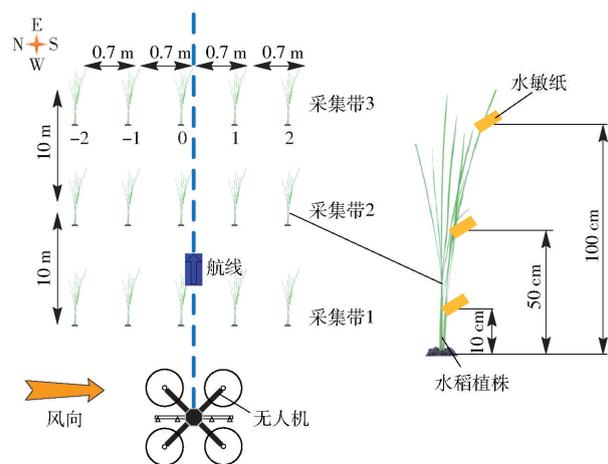


图 4 试验方案示意图

Fig. 4 Schematic of test scheme

试验时, 设置无人机喷施压力为 0.35 MPa, 航线由西至东, 包含单向式喷施作业 6 架次 (1# ~ 6#), 依据实际作业经验随机设定 6 组飞行高度和飞行速度进行喷施试验, 要求各架次能够形成不同的涡旋形态, 由轻型机载北斗 RTK 差分系统采集各架次单向式喷施试验飞行数据。喷施试验同时, 在距离测试地块正上方 20 ~ 25 m 的高空设置 1 架 Phantom 4 Pro 型航拍无人机 (深圳大疆创新科技有限公司), 对喷施全程有效喷幅区域内水稻受旋翼风场影响所形成的涡旋形态进行俯视拍摄记录。每次喷施试验后, 待水敏纸上的雾滴干燥, 戴一次性手套将水敏纸按次序收回, 放入密封袋标记, 置于阴凉处保存, 带回实验室进行分析。将收集到的水敏纸逐一用扫描仪扫描, 扫描后的图像通过图像处理软件 DepositScan 进行分析, 得到各采样点的雾滴粒径数据。

1.4 雾化性能评价方法

试验评价喷头雾化性能参数为 $D_{v0.1}$ 、 $D_{v0.5}$ 、 $D_{v0.9}$ 、 $V_{<100}$ 以及 R_s [24]。 D_{Va} ($a=0.1, 0.5, 0.9$) 表示将一次喷雾过程中全部雾滴按体积从小到大顺序累加, 当累加值等于全部雾滴体积的 ($a \times 100$)% 时所对应的雾滴粒径。其中, $D_{v0.5}$ 也称为雾滴体积中径, 是衡量雾滴粒径大小最常用的指标; $V_{<100}$ 表示雾滴直径小于 100 μm 的雾粒累积体积占全部雾粒体积的百分比; R_s 为雾滴分布跨度, 用于反映喷头雾化雾滴的均一性, R_s 越小说明雾滴均匀性越好。当 $R_s = 1$ 时, 表示雾滴粒径呈对称分布, 雾滴分布跨度计算公式为

$$R_s = \frac{D_{v0.9} - D_{v0.1}}{D_{v0.5}}$$

同时, 为了进一步表明各架次喷施作业不同采样位置处植株及植株冠层间的雾滴穿透效果,

本文以 $D_{10.5}$ 为基础参数,采用变异系数 C_V 来衡量试验中无人机喷施区域内的垂直空间各层采样点之间的雾滴穿透性。变异系数越小表示雾滴穿透性越好。

2 结果与讨论

2.1 风洞内喷头粒径测试

喷雾液滴尺寸是表征农药溶液喷施性能的关键因素,也是喷头设计与选取的参考。为探明试验所使用喷头的喷施性能,更好地了解雾滴粒径的分布特性,参考田间实际作业参数与环境,在风洞 2.5 m/s 的恒定风速条件下,对各喷头进行多次重复的粒径与流量测定结果如表 3 所示。

表 3 3 种喷施压力下各待测喷头粒径与喷施流量测定结果

Tab.3 Determination of droplet size and spray flow rate of each test nozzle under three kinds of spray pressure

喷施压力/MPa	喷头编号	$D_{10.1}/\mu\text{m}$	$D_{10.5}/\mu\text{m}$	$D_{10.9}/\mu\text{m}$	$V_{<100}/\%$	R_s	单喷头测试流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	总测试流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)
0.30	110015-1	(63 ± 0.3) ^a	(120 ± 0.9) ^b	(233 ± 5.7) ^{ab}	(36 ± 0.5) ^b	(1.42 ± 0.04) ^b	0.65	2.60
	110015-2	(63 ± 0.3) ^a	(124 ± 0.9) ^a	(242 ± 2.5) ^a	(35 ± 0.4) ^c	(1.45 ± 0.01) ^{ab}	0.66	
	110015-3	(59 ± 0.3) ^b	(111 ± 1.5) ^c	(226 ± 11.4) ^b	(42 ± 1.0) ^a	(1.50 ± 0.08) ^a	0.64	
	110015-4	(63 ± 0.4) ^a	(117 ± 5.4) ^b	(233 ± 4.6) ^{ab}	(35 ± 0.9) ^c	(1.46 ± 0.07) ^{ab}	0.65	
	均值	62	118	234	37	1.46	0.65	
0.35	110015-1	(61 ± 0.4) ^b	(116 ± 1.1) ^b	(229 ± 9.3) ^b	(39 ± 0.9) ^b	(1.44 ± 0.07) ^a	0.72	2.88
	110015-2	(62 ± 0.1) ^a	(121 ± 0.9) ^a	(242 ± 2.7) ^a	(35 ± 0.2) ^c	(1.48 ± 0.01) ^a	0.74	
	110015-3	(58 ± 0.3) ^c	(107 ± 0.6) ^c	(211 ± 4.7) ^c	(45 ± 0.3) ^a	(1.44 ± 0.04) ^a	0.70	
	110015-4	(61 ± 0.4) ^b	(116 ± 1.2) ^b	(227 ± 10.1) ^b	(38 ± 0.9) ^b	(1.43 ± 0.07) ^a	0.72	
	均值	61	115	227	39	1.45	0.72	
0.40	110015-1	(61 ± 0.5) ^b	(114 ± 1.3) ^b	(228 ± 10.2) ^b	(40 ± 0.6) ^b	(1.47 ± 0.07) ^a	0.78	3.12
	110015-2	(62 ± 0.6) ^a	(119 ± 1.1) ^a	(240 ± 4.7) ^a	(36 ± 0.2) ^c	(1.49 ± 0.04) ^a	0.80	
	110015-3	(57 ± 0.1) ^c	(103 ± 0.2) ^c	(197 ± 3.0) ^c	(48 ± 0.1) ^a	(1.36 ± 0.03) ^b	0.76	
	110015-4	(61 ± 0.4) ^b	(114 ± 1.4) ^b	(227 ± 10.8) ^b	(40 ± 0.7) ^b	(1.46 ± 0.08) ^a	0.78	
	均值	60	113	223	41	1.45	0.78	

注:数据为均值 ± 标准差,同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

由表 3 还可以看出,在 0.30、0.35、0.40 MPa 3 种喷施压力下,单个喷头流量测试均值分别为 0.65、0.72、0.78 L/min,总喷头流量分别为 2.60、2.88、3.12 L/min,说明喷头流量受喷施压力变化影响显著;但在同一喷施压力下,各喷头之间流量差异性较小,偏差不超过 0.04 L/min,表明各喷头喷施性能稳定,符合飞行试验要求。

测定结果(表 3)表明:当风速为 2.5 m/s 时,在 0.30、0.35、0.40 MPa 3 种喷施压力下,测试喷头的 $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 随着喷施压力增大,均呈现出减小的趋势,其中 $D_{10.1}$ 的均值变化范围为 2 μm , $D_{10.5}$ 的均值变化范围为 5 μm , $D_{10.9}$ 的均值变化范围为 11 μm 。根据喷头雾化尺寸分级标准^[25]可知,4 个测试喷头均处于非常细(Very fine)的雾化等级,表明各待测喷头喷施的雾滴粒径尺寸较小,喷施较为稳定。同时,3 种喷施压力下雾滴直径小于 100 μm 的雾粒累积体积占全部雾粒体积的百分比分别为 37%、39% 和 41%; R_s 处于 1.45 ~ 1.46 的范围内,由此进一步表明各喷头具有良好的雾化性能。

2.2 田间试验

2.2.1 气象数据及飞行参数

轻型机载北斗 RTK 差分系统可以精确记录各架次飞行试验的时间以及无人机的飞行参数,同时微型气象站试验全程中每 2 s 记录一次气象数据,表 4 为各试验架次气象数据与飞行参数的汇总。

表 4 各架次气象数据及飞行参数汇总

Tab.4 Summary of meteorological data and flight parameters for each test

架次	作业时间	温度/ °C	相对湿度/ %	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风向	平均飞行 高度/m	平均飞行速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	有效飞行距离/ m
1 [#]	12:02—12:03	27.3	67.1	2.18	NE	1.28	1.30	32.66
2 [#]	14:15—14:16	28.1	66.1	2.32	N	1.51	2.98	31.20
3 [#]	14:55—14:56	27.9	66.6	2.82	NE	2.52	1.68	33.24
4 [#]	15:25—15:26	27.1	68.5	2.29	NE	2.67	2.34	34.70
5 [#]	15:53—15:54	26.4	69.6	2.52	NE	4.23	1.11	35.68
6 [#]	16:27—16:28	25.3	74.1	2.74	N	4.90	3.43	33.21

注:平均飞行高度为无人机喷头与作物冠层顶部的平均距离, m。

由表 4 可知, 试验过程中外界田间环境温度、相对湿度及风速一直较为稳定, 平均温度为 27.0℃、平均相对湿度为 68.7%、风速保持在 2.18 ~ 2.82 m/s 的范围内。同时, 各架次飞行作业参数也处于正常的参数范围内, 且均能够按照试验要求形成不同的涡旋形态。平均飞行高度平均值为 2.85 m, 最小值为 1.51 m (2[#]), 最大值为 4.90 m (6[#]), 极差 3.39 m; 平均飞行速度保持在 1.11 ~ 3.43 m/s 的范围内, 且同一架次 3 条雾滴采集带的实时飞行速度较为接近; 此外, 各架次有效喷施距离均超过 31 m, 符合试验设计要求。

2.2.2 涡旋形态判定

试验过程中, Phantom 4 Pro 型航拍无人机拍摄到的任一架次涡旋形态视频图像如图 5 所示, 图中红色虚线区域即为受无人机作业气流场影响所形成的涡旋区域, 其最长边长度为 D , 图中蓝色虚线区域为喷施无人机, 其横向最长机体旋翼轴距为 L (本试验所用无人机 $L = 1.75$ m)。根据 D/L 来定义涡旋形态, 当 $D/L > 1$ 时, 冠层涡旋形态明显, 该涡旋形态记作 D/L (large); 当 $0 < D/L < 1$ 时, 冠层小范围形成涡旋形态, 该涡旋形态记作 D/L (small); 当 $D/L = 0$ 时, 冠层无涡旋形态, 该涡旋形态记作 D/L (no) [26]。

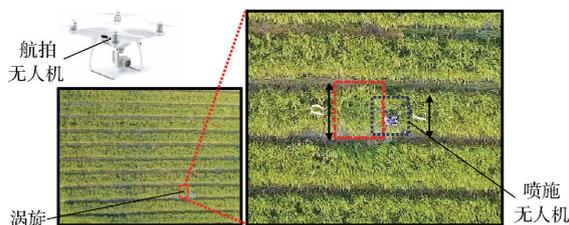


图 5 涡旋形态航拍图

Fig. 5 Aerial photograph of vortex-shape

根据视频图像识别出各架次作业时无人机下方喷施区域内作物冠层涡旋, 对涡旋形态大小进行对比, 得到各架次涡旋形态 D/L 由大到小为 1[#]、4[#]、3[#]、2[#]、5[#]、6[#]。其中, 1[#] 和 4[#] 为明显的涡旋形态; 3[#] 和 2[#] 为小范围的涡旋形态; 5[#] 和 6[#] 为无涡旋形态。

2.2.3 喷施雾滴粒径测试

雾滴沉积的实质是雾滴经喷头释放后向各个方向的移动, 不同粒径的雾滴从喷头喷出后的运动轨迹亦不相同。研究喷施区域内的雾滴粒径分布, 可为航空喷头的设计提供参考, 从而达到减轻飘移, 提高农药利用率的目的。图 6 为 6 个单独作业架次的雾滴粒径分布结果, 由图 6 可知, $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 的最大值分别为 178 (3[#])、333 (4[#])、510 μm (4[#]); $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 的最小值均出现在架次 6[#] 上, 分别为 91、135、195 μm 。

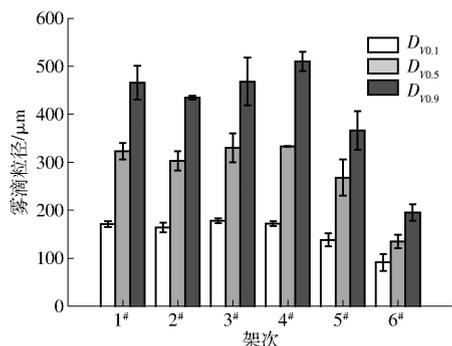


图 6 各架次作业雾滴粒径分布

Fig. 6 Droplet size distribution for each test

6 个架次测得的 $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 极差高达 87、198、315 μm , 同一喷头同一粒径参数的最大值与最小值之间出现了显著差异。在同样的喷施条件下, 靶标区域检测到的有效雾滴粒径即是药液在作物表面沉积量的客观体现 [27]。结合 2.2.2 节判定结果, 可以初步推断, 无人机作业气流场所形成的涡旋形态差异对于不同粒径雾滴的沉降具有显著的影响, 较为明显的涡旋形态有助于雾滴沉降, 进而达到较好的沉积效果。同时, 将图 6 结果与 2.1 节中风洞内喷头粒径测试结果进行对比还可以发现, $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 存在较大的差异。原因是由于二者粒径测量与分析方式的不同所导致, 风洞测试的原理是激光粒度分析仪通过获取分散在液体中的颗粒经激光照射产生的衍射信号或光散射信号进行粒径分析, 测试环境较为封闭稳定, 测量精度较高 [28]。而田间测试采用的是水敏纸雾滴显色方式, 通过图像处理软件对雾滴粒径进行获取分析。由于航空喷施雾化程度较高, 在水敏纸表面极易发生雾滴斑点重叠现象, 而现有的雾滴图像处理技术还难以实现雾滴分割计数和重叠雾滴识别, 进而测得的粒径较大 [29]。已有研究表明雾滴图像处理软件 DepositScan 对雾滴尺寸的测量误差较标准值有不同程度的偏差, 最大偏差高达 34.1% [30]。

为进一步详细描述完整的航空喷施作业各粒径雾滴在测试区域的分布情况, 将雾滴粒径分为 0 ~ 100 μm 、101 ~ 200 μm 、201 ~ 300 μm 、301 ~ 400 μm 和大于 400 μm 5 个粒径谱区间, 对测试区域内各采样点进行雾滴密度统计, 图 7 为采集各次喷施试验的雾滴粒径数据后绘制的 3 种涡旋形态架次的雾滴粒径谱占比。

由图 7 可以看出, 雾滴粒径分布主要集中在 0 ~ 100 μm 和 101 ~ 200 μm 的粒径谱区间内。在 3 种形态下, 小于 200 μm 的粒径综合平均占比分别达到了 73.52%、74.21% 和 84.20%, 其余大粒径谱雾滴在采样区域所占的比例一直较低。

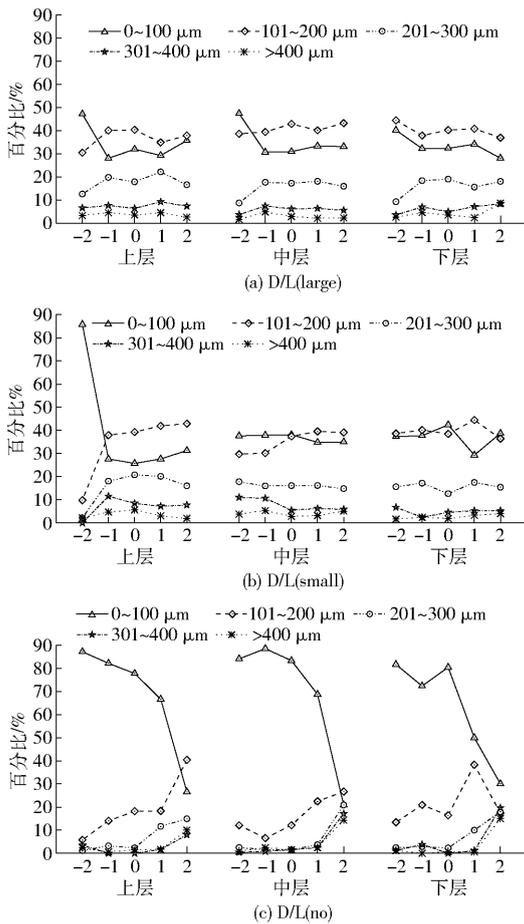


图7 测试区域各涡旋形态雾滴粒径谱所占百分比

Fig. 7 Percentage of droplet size spectrum of each vortex state droplet in test region

结合风洞试验可知,当喷施压力为 0.35 MPa 时,各喷头的 $D_{10.5}$ 分布在 107 ~ 121 μm 的粒径范围内(表 3),即大多数雾滴粒径处于小于 200 μm 的粒径谱区间内,与田间试验测得的喷施区域内的雾滴粒径分布规律相印证,由此进一步增强了试验结果的可靠性。

此外,从图 7 还可以看出, D/L (large) 与 D/L (small) 二者雾滴粒径在各层各点位分布趋势较为平缓, D/L (no) 则体现较大的波动性,呈现出各粒径谱雾滴在下风向采样点位 2 处聚拢的趋势,大粒径雾滴所占比例逐步增大。原因是因为涡旋形态不明显,雾滴没有在无人机下方的测试区域内沉降,而是随自然风在喷施区域自由运动,小粒径雾滴体积小、质量轻易于随风运动,故在上风向采样点位能够检测到,又因为上风向区域整体雾滴沉积较少,故而小粒径雾滴该点位所占比例较大;大粒径雾滴由于体积大,活动性较差,受自然风的裹挟大多都飘移运动到了下风向处,进而下风向处大粒径雾滴所占比例变大,影响了整体的粒径谱分布。

2.2.4 喷施雾滴穿透性

各采样点水敏纸布置分为上、中、下 3 层,离地

高度分别为 100、50、10 cm,以各层雾滴体积中径 $D_{10.5}$ 为衡量指标,得到各架次各层的雾滴穿透性如表 5 所示。

表 5 各架次雾滴穿透性

Tab. 5 Droplet penetration of each test

涡旋形态	架次	冠层层级	$D_{10.5}$ 平均值/ μm	$D_{10.5}$ 标准差/ μm	变异系数/%
D/L (large)	1 [#]	上层	306		
		中层	317	19.83	6.14
		底层	345		
	4 [#]	上层	315		
		中层	317	29.50	8.85
		底层	367		
D/L (small)	3 [#]	上层	318		
		中层	370	35.18	10.66
	底层	302			
D/L (no)	2 [#]	上层	298		
		中层	317	12.02	3.96
		底层	295		
	5 [#]	上层	309		
		中层	277	45.88	17.11
		底层	219		
6 [#]	上层	144			
	中层	141	12.83	9.49	
		底层	120		

6 个飞行架次的雾滴穿透性变异系数(表 5)由小到大依次为: 2[#](D/L (small))、1[#](D/L (large))、4[#](D/L (large))、6[#](D/L (no))、3[#](D/L (small))、5[#](D/L (no))。变异系数越小表示雾滴穿透性越强,本次试验架次形成涡旋形态的 1[#] ~ 4[#] 变异系数处于 3.96% ~ 10.66%; 未形成涡旋形态的架次 5[#]、6[#] 变异系数处于 9.49% ~ 17.11%, 其中架次 5[#] 在 6 个测试架次中穿透性最差,变异系数高达 17.11%, 由此可以看出,较为明显的涡旋形态有助于雾滴在作物冠层垂直空间的穿透,达到更好的施药效果。

3 结论

(1) 模拟田间风速为 2.5 m/s, 喷施压力分别为 0.30、0.35、0.40 MPa 条件下, 风洞测试表明, 各 XR - Teejet 110015 型压力式扇形航空喷头具有良好、稳定的雾化性能, 各测试喷头之间流量偏差不超过 0.04 L/min; 同时, 各测试喷头均处于非常细的雾化等级, $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 均值变化范围为 2 ~ 11 μm , R_s 处于 1.45 ~ 1.46 之间。

(2) 受无人机作业气流场的影响, 田间试验过程中, 在水稻冠层形成 3 种不同的涡旋形态。不同的涡旋形态对雾滴粒径分布有显著影响, 较为明显的涡旋形态有助于大粒径雾滴在靶区的有效沉降, $D_{10.1}$ 、

$D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 的最大值均出现在形成涡旋形态的架次中,最小值则出现在未形成涡旋形态的架次中。

(3)田间试验时,3种涡旋形态下小于 $200\ \mu\text{m}$ 雾滴粒径值的综合平均占比分别高达73.52%、74.21%和84.20%;在相同的喷施压力下,风洞测试同样发现,大多数雾滴的粒径处于小于 $200\ \mu\text{m}$ 的粒径谱区间内,二者试验结果较为一致。与风洞测试相比田间试验所得雾滴的 $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 和 $D_{10.9}$ 显著偏高,造成这一现象的原因主要是粒径测量与分析方式不同,风洞测试结果可作为田间试验的

参考。

(4)田间试验进一步表明,较为明显的涡旋形态同样有助于雾滴在作物冠层垂直空间的穿透,达到更好的施药效果。 $D/L(\text{large})$ 与 $D/L(\text{small})$ 雾滴粒径在作物各层位分布趋势较为平缓, $D/L(\text{no})$ 则体现出了较大的波动性。形成涡旋形态的架次1[#]~4[#]各采样点中,各层雾滴体积中径变异系数均处于3.96%~10.66%的范围内,而未形成涡旋形态的架次5[#]、6[#]变异系数处于较高的9.49%~17.11%范围内。

参 考 文 献

- [1] SCHOONBEEK S, AZADI H, MAHMOUDI H, et al. Organic agriculture and undernourishment in developing countries: main potentials and challenges[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(9): 917–928.
- [2] 杨敏丽,白人朴,刘敏,等. 建设现代农业与农业机械化发展研究[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(7): 68–72.
YANG Minli, BAI Renu, LIU Min, et al. Development of agricultural mechanization and construction of modern agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(7): 68–72. (in Chinese)
- [3] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 1–11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(1): 1–11. (in Chinese)
- [4] 王祎娜,沐森林,顾峰伟,等. 国内外农机化技术发展现状与对策建议[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(3): 227–230.
WANG Yi'na, MU Senlin, GU Fengwei, et al. Current situation and suggestions for the development of agricultural mechanization technology at home and abroad[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(3): 227–230. (in Chinese)
- [5] LAN Y B, CHEN S D. Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China[J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2018, 1(1): 1–9.
- [6] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国航空施药技术研究进展与展望[J/OL]. *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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 53–59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)
- [7] YAO W X, WANG X J, LAN Y B, et al. Effect of UAV prewetting application during the flowering period of cotton on pesticide droplet deposition[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2018, 5(4): 455–461.
- [8] 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 CSAE*, 2016, 32(17): 40–46. (in Chinese)
- [9] HEWITT A J. Droplet size spectra classification categories in aerial application scenarios[J]. *Crop Protection*, 2008, 27(9): 1284–1288.
- [10] 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)
- [11] LIU H S, LAN Y B, XUE X Y, et al. Development of wind tunnel test technologies in agricultural aviation spraying[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(Supp.2): 1–10.
- [12] 翟长远,王秀,葛纪帅,等. 风送喷雾雾滴粒径测量系统设计与影响因素试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 33–38.
ZHAI Changyuan, WANG Xiu, GE Jishuai, et al. Design of droplet size measuring system of air-assisted spraying and experiment on its influencing factors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(19): 33–38. (in Chinese)
- [13] 唐青,陈立平,张瑞瑞,等. 高速气流条件下标准扇形喷头和空气诱导喷头雾化特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 121–128.
TANG Qing, CHEN Liping, ZHANG Ruirui, et al. Atomization characteristics of normal flat fan nozzle and air induction nozzle under high speed airflow conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(22): 121–128. (in Chinese)
- [14] FERGUSON J C, O'DONNELL C C, CHAUHAN B S, et al. Determining the uniformity and consistency of droplet size across spray drift reducing nozzles in a wind tunnel[J]. *Crop Protection*, 2015, 76: 1–6.

- [15] 张慧春, DORR G, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53-57, 52.
ZHANG Huichun, DORR G, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 53-57, 52. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120610&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010. (in Chinese)
- [16] YAO W X, LAN Y B, WEN S, et al. Evaluation of droplet deposition and effect of variable-rate application by a manned helicopter with AG-NAV Gufa system[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2019, 12(1): 172-178.
- [17] GULER H, ZHU H P, OZKAN H E, et al. Spray characteristics and drift reduction potential with air induction and conventional flat-fan nozzles[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 745-754.
- [18] 茹煜, 朱传包, 包瑞, 等. 航空植保作业用喷头在风洞和飞行条件下的雾滴粒径分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 94-98.
RU Yu, ZHU Chuanyin, BAO Rui, et al. Droplet size distribution of aerial nozzle for plant protection in wind tunnel and flight conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 94-98. (in Chinese)
- [19] 李继宇, 周志艳, 兰玉彬, 等. 旋翼式无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 77-86.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, LAN Yubin, et al. Distribution of canopy wind field produced by rotor unmanned aerial vehicle pollination operation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 77-86. (in Chinese)
- [20] LI J Y, LAN Y B, WANG J W, et al. Distribution law of rice pollen in the wind field of small UAV[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2017, 10(4): 32-40.
- [21] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 104-118.
LI Jiyu, LAN Yubin, SHI Yeyin. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 104-118. (in Chinese)
- [22] 杨风波, 薛新宇, 蔡晨, 等. 多旋翼植保无人机悬停下洗气流对雾滴运动规律的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 64-73.
YANG Fengbo, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Effect of down wash airflow in hover on droplet motion law for multi-rotor unmanned plant protection machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 64-73. (in Chinese)
- [23] LI J Y, SHI Y Y, LAN Y B, et al. Vertical distribution and vortex structure of rotor wind field under the influence of rice canopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 159: 140-146.
- [24] FRITZ B K, HOFFMANN W C. Establishing reference nozzles for classification of aerial application spray technologies[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2018, 1(1): 10-14.
- [25] American Society of Agricultural and Biological Engineers. Droplet size classification of aerial application nozzles; ASABE Standards, S641[S]. St. Joseph: ASABE, 2018.
- [26] 华南农业大学. 一种基于冠层涡旋稳态运动的旋翼无人机精准作业方法: 201710300449.3[P]. 2019-05-07.
- [27] 李继宇, 兰玉彬, 彭瑾. 无人机喷雾粒径对水稻冠层雾滴沉积效果的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(4): 442-446.
LI Jiyu, LAN Yubin, PENG Jin. Effect of droplet size spraying by unmanned aerial vehicle on droplet deposition in rice canopy[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(4): 442-446. (in Chinese)
- [28] HOFFMANN W C, FRITZ B K, LAN Y B. Using laser diffraction to measure agricultural sprays; common sources of error when making measurements[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2018, 1(1): 15-18.
- [29] 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.
- [30] 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(1): 38-43.