

多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响

陈盛德^{1,2} 兰玉彬^{1,2} BRADLEY K F³ 李继宇^{1,2} 刘爱民⁴ 毛越东⁵

(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, 广州 510642;

3. 美国农业部农业研究服务局, 大学城 TX 77845; 4. 湖南隆平种业有限公司, 长沙 410006;

5. 深圳高科新农技术有限公司, 深圳 518057)

摘要: 风场是影响航空喷施雾滴沉积分布特性的重要因素之一。为了揭示多旋翼无人机旋翼下方风场对雾滴沉积分布的影响机理,通过无人机旋翼风场测量系统测量多旋翼电动无人机旋翼下方的风场分布,同时结合航空喷施雾滴在水稻冠层的沉积情况,分析旋翼下方 X、Y、Z 3 个方向的风场对雾滴沉积分布的影响,并对试验结果进行了方差分析和回归分析。结果表明:在无人机旋翼下方 3 向风场中,X 和 Y 向风速对有效喷幅区内雾滴沉积量的影响不显著,Z 向风速的影响极显著;X 向风速对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响不显著,Y 和 Z 向风速的影响分别为显著和极显著;X 和 Y 向风速对雾滴沉积飘移的影响均不显著,Z 向风场的影响显著;且当水平方向上 X、Y 向风速峰值越小、垂直方向上 Z 向风速峰值越大时,雾滴沉积均匀性越好,最佳值达到 36.44%。另外,有效喷幅区内雾滴沉积量与因素 Z 向风速之间的回归模型及有效喷幅区内雾滴沉积穿透性与因素 Y 和 Z 向风速之间的回归模型的决定系数 R^2 分别为 0.868 和 0.842,表明模型可以为实际作业提供指导。

关键词: 多旋翼无人机;旋翼下方风场;雾滴沉积

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0105-09

Effect of Wind Field below Rotor on Distribution of Aerial Spraying Droplet Deposition by Using Multi-rotor UAV

CHEN Shengde^{1,2} LAN Yubin^{1,2} BRADLEY K F³ LI Jiyu^{1,2} LIU Aimin⁴ MAO Yuedong⁵

(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), Guangzhou 510642, China

3. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, College Station TX 77845, USA

4. Hunan Longping Seed Industry Co., Ltd., Changsha 410006, China

5. Shenzhen Hi-tech New Agriculture Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: Currently, studies about aerial spraying application of agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) in China mainly focus on the effect of aerial spraying operation parameters (flight height and flight velocity) of single-rotor UAV on droplet deposition distribution. In fact, the main factor that affects the droplet deposition distribution of aerial spraying is the wind field below the UAV rotor, which is made up of wind field generated by rotating rotor and wind field of external environment. The effect of wind field below agricultural UAV rotor needs to be taken into account in the study of the distribution regularity of aerial spraying droplet deposition. Moreover, the wind field generated by multi-rotor electric UAV during operation is the result of multiple rotor interaction. The distribution of wind field and the effect of wind field on the distribution regularity of droplet deposition are different with single-rotor UAV. In order to reveal the impact mechanism of droplet deposition distribution by the wind field below the multi-rotor electric UAV rotor, wind field distribution below multi-rotor electric UAV was measured by using a wireless wind speed sensor network measurement system for unmanned helicopter, and the impact on the distribution of droplet deposition was analyzed by the wind field in X, Y and Z directions below rotor

收稿日期: 2017-04-19 修回日期: 2017-06-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)和广东省自然科学基金项目(2015A030313420)

作者简介: 陈盛德(1989—),男,博士生,主要从事农业航空喷施技术研究,E-mail: 1163145190@qq.com

通信作者: 兰玉彬(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事精准农业航空技术研究,E-mail: ylan@scau.edu.cn

combined with the condition of aerial spraying droplets deposition in rice canopy, and the regression model was established by making the variance analysis and regression analysis of experiment results. The results showed that the trends of droplet deposition in the plant layers were basically similar, the deposition amount of droplet was decreased from upper layer to lower layer. Because of the different operating parameters, the distribution of wind field below rotor in each experiment were different, but the value of wind speed in different directions showed the decreasing trend in Z , Y and X directions. Among the three directions wind field below multi-rotor electric UAV rotor, the wind field in X and Y directions had no significant impact on droplet deposition in the effective spray area, the wind field in Z direction had an extremely significant impact on droplet deposition in the effective spray area, the Sig. value was less than 0.001. The wind field in X direction had no significant impact on droplet deposition penetration in the effective spray area, the wind field in Y direction had a significant impact and the wind field in Z direction had an extremely significant impact on droplet deposition penetration in the effective spray area, the corresponding Sig. values were 0.037 and less than 0.001. The wind field in X and Y directions had no significant impact on droplet drift, the wind field in Z direction had a significant impact on droplet drift, the Sig. value was 0.036. Furthermore, the horizontal wind field in X and Y directions and the vertical wind field in Z direction all affected the deposition uniformity in the effective spray area. With the smaller value of horizontal wind field in X and Y directions and the larger value of vertical wind field in Z direction, the uniformity of droplet deposition was better, the best value reached 36.44%. In addition, the corresponding determination coefficient R^2 of the regression model between droplet deposition in effective spray area and the wind speed in Z direction as well as between droplet deposition penetration in effective spray area and the wind speed in Y and Z directions were 0.868 and 0.842, respectively, and these models can provide guidance for the practical application. The result revealed the effect on the distribution of aviation spraying droplet deposition by the wind field below the multi-rotor UAV rotor, and it had an important guiding significance in the practical application such as reducing liquid drift in aerial spraying and improving the utilization rate of pesticide.

Key words: multi-rotor UAV; wind field below rotor; droplet deposition

引言

目前,我国农用植保方式主要包括人工喷施、地面机械喷施和航空喷施^[1];其中,传统的人工喷施方式作业劳动强度大、效率低、耗时长,难以应对突发性病虫害^[2-3];地面机械喷施方式作业成本高、药剂有效利用率低,且存在下田作业困难,易损伤农作物及土壤物理结构,影响农作物后期生长^[4-6];农用无人机低空低量施药技术作为我国新型航空植保作业方式,改变了中国传统植保作业方式的弊端,农用无人机喷施作业效率高、成本低、喷施效果好,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,正逐渐成为首选的植保作业方式^[7-10]。

低空低量航空施药技术已成为研究热点^[11-16]。目前关于农用无人机喷施技术的研究重点主要集中在航空喷施作业参数对雾滴沉积分布特性影响的层面上。研究表明,影响航空喷施雾滴沉积分布特性的主要因素是飞机旋翼下方风场,由旋翼风场和外界环境风场共同构成^[17-19];航空喷施雾滴的沉积规律研究需要从根本上考虑风场的影响。THISTLE等^[20-21]将有人驾驶固定翼飞机尾流、翼尖涡流、旋翼下旋气流和机身周边空气扰动纳入为雾滴沉积的影响因素,将航空施药的喷洒雾滴作为离散对象进

行分析,以此来预测雾滴的运动轨迹和地面沉积效果,并发展成了 AGDISP (Agricultural dispersion) 模型;THOMSON 等^[22]通过试验研究了 Air-Tractor 402B 型有人驾驶飞机推进器不同转动方向产生的尾流风场对雾滴沉积分布的影响;张宋超等^[23]采用计算流体力学 CFD 方法,在约束条件下对作业过程中 N-3 型单旋翼农用无人机旋翼风场和农药喷洒的两相流进行了模拟,并设计了对应试验进行验证;王昌陵等^[24]探究了 3WQF80-10 型单旋翼油动植保无人机飞行方式、飞行参数及侧风等因素对无人机喷雾雾滴空间质量平衡分布和旋翼下旋气流场分布的影响。

与有人驾驶飞机和单旋翼无人直升机相比,多旋翼无人机在作业过程中所产生的风场是多个旋翼共同作用的结果,风场分布情况及风场对雾滴沉积分布特性的影响机理均存在差异^[25]。目前,对于多旋翼无人机在田间实际作业时旋翼下方的风场对航空喷施雾滴沉积分布特性影响的研究还未见相关报道。为此,本文以四旋翼农用无人机为例,通过不同参数下的航空喷施试验及无人机风场无线传感器网络测量系统测得旋翼下方的风场分布情况,来研究不同方向风场因素对航空喷施雾滴沉积分布的影响,以期揭示多旋翼农用无人机航空喷施雾滴沉积

机理,为优化喷施作业参数和减少航空喷施药液飘移提供理论指导和数据支持。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

喷雾作业试验采用深圳高科新农技术有限公司提供的德美特 M234-AT 型四旋翼电动无人机,已在湖南省、河南省、新疆维吾尔自治区、海南省、广东省等进行测试和推广作业,如图 1 所示,主要性能指标如表 1 所示。



图 1 试验机型

Fig. 1 Test model of UAV

表 1 无人机主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of UAV

参数	数值
机身尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	950×950×530
主旋翼直径/mm	768
最大载药量/L	10
作业速度/(m·s ⁻¹)	0~8
作业高度/m	0.5~3.0
有效喷幅/m	4~6

喷雾系统由药箱、微型水泵、喷杆、管路、喷头 etc 构成,喷头为扇形喷头,数量为 4 个,喷头沿喷杆方向垂直于飞机中轴线等间距分布,间距为 600 mm,喷头方向朝下,喷洒总流量为 2.4 L/min。

微轻型无人机机载北斗卫星导航定位系统由北斗 UB351 板卡和高速调频双向电台组成,具有 RTK 差分定位功能,平面精度达 $(10 + 5 \times 10^{-7} D)$ mm,高程精度达 $(20 + 1 \times 10^{-6} D)$ mm,其中, D 表示该系统实际测量的距离,单位为 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。

无人机风场测量系统采用无人直升机风场无线传感器网络测量系统^[26],该系统包括叶轮式风速传感器、风速传感器无线测量节点。叶轮式风速传感器测量每一个采样点处无人机喷施作业时产生的立体三向风速,测量范围为 0~45 m/s,精度为 $\pm 3\%$,分辨率为 0.1 m/s。风速传感器无线测量节点由

490 MHz 无线数传模块、微控制器以及供电模块组成,实现将风速数据传输到计算机的智能总控汇聚节点。

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。

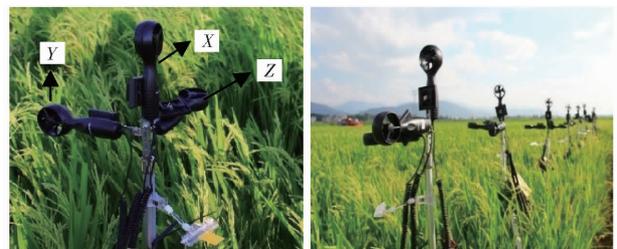
1.2 试验方法

1.2.1 试验场地

试验在湖南省武冈市隆平种业公司杂交水稻制种基地进行,作物生育期为拔节孕穗期,平均高度为 80 cm,水稻采用机械插秧,水稻植株之间的行列间距为 17 cm × 14.5 cm。

1.2.2 无人机风场测量系统布置

风速传感器无线测量节点的田间布置参照汪沛等^[27]提出的 3 向线阵风场测量方法。风速传感器无线测量节点两两间隔 1 m 沿垂直于无人机航线排列成一行,依次编号 1~10,节点 10 用于同步测量对应方向的自然风风速,放置在距离节点 9 约 15 m 处的远端,且农用无人机沿节点 5 正上方进行喷施作业。如图 2 所示,每个节点上布置 3 个风速传感器,风速传感器轴心的安装方向分别为: X 向,平行于飞行方向; Y 向,垂直于飞行方向; Z 向,垂直于地面方向。



(a) 单个测量系统

(b) 整套测量系统

图 2 风场测量系统现场布点图

Fig. 2 Wind field measurement system layouts

1.2.3 雾滴采样点布置

如图 3 所示,雾滴采集带与风场测量带为同一条采集带,即在每个风速传感器无线测量节点处设置 1 处雾滴采样点,每层雾滴采样点数量与风速传感器无线测量节点数量相同,即每层布置 9 个雾滴采样点,雾滴采样点两两间隔 1 m;且在每个雾滴采样点处的竖直方向上沿水稻植株冠层分上、中、下 3 层布置雾滴采样点,其中,上层与中层、中层与下层均间距 25 cm 左右,下层与地面间距 20 cm 左右。

1.2.4 试验设计

此次试验以清水代替药液进行喷施作业,每次

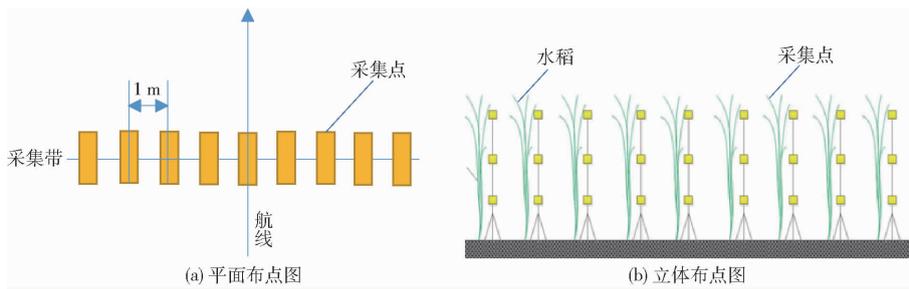


图3 布点示意图

Fig. 3 Sample point layouts

试验药箱内的液体体积为 5 L, 试验采用 Syngenta 牌水敏纸作为雾滴采集卡以收集喷施雾滴, 尺寸为 26 mm × 76 mm。

为保障沉积数据的有效性及试验的可对比性, 根据操控手的经验和建议, 作业速度选取在 2.5 ~ 5.0 m/s 范围内, 作业高度选取在 1.5 m 左右, 且试验分成 4 次进行。

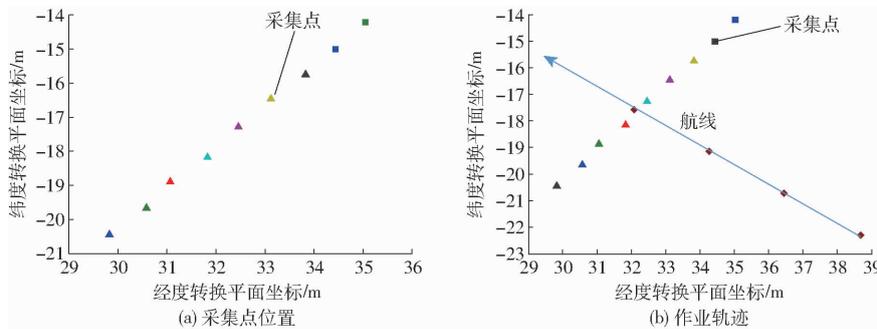


图4 雾滴采集点与飞行轨迹图

Fig. 4 Droplet collection point and flight trajectory

频率为 1 Hz。

表 2 为由飞机搭载北斗定位系统 UB351 获取无人机喷施作业时通过采集带的瞬时飞行参数及作业过程中飞行高度的变化程度。试验时间为 16:00—18:00, 环境温度为 30 ℃ 左右, 环境湿度为 65% 左右, 环境风向(西南)。

表 2 试验参数
Tab. 2 Test parameters

作业参数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
飞行速度/(m·s ⁻¹)	3.42	3.11	2.80	2.86
飞行高度/m	1.43	1.08	1.01	2.28
高度变化率/%	4.12	4.04	4.47	1.20
自然风速/(m·s ⁻¹)	0.3	0.6	0	0.8

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率、覆盖

1.3 数据处理

1.3.1 作业参数及轨迹处理

由北斗定位系统 UB351 对布置的各采集点进行定位获取地理数据后绘制结果如图 4a 所示, 由飞机飞行时搭载北斗定位系统 UB351 而获取的无人机其中一次喷施作业的飞行轨迹如图 4b 所示; 其中, 北斗定位系统 UB351 在喷施作业时的轨迹定位

密度及沉积量^[28]。

为了表征试验中各采集点之间的雾滴沉积均匀性, 采用变异系数 C_V 来衡量试验中各采集点之间的雾滴沉积均匀性^[29], 变异系数为

$$C_V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

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

式中 S ——同组试验采集样本标准差

X_i ——各采集点沉积量, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$

\bar{X} ——各组试验采集点沉积量平均值, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$

n ——各组试验采集点个数

为进一步表明多旋翼农用无人机旋翼下方风场对水稻冠层上方雾滴沉积的影响, 揭示雾滴沉积分布与旋翼下方三向风场分布之间的关系, 对所有试验结果(雾滴沉积结果及风场分布结果)通过 SPSS 16.0 软件采用逐步回归法进行回归分析, 建立雾滴沉积分布与风场分布之间的回归方程, 并检验其显著性($P < 0.05$)^[30]。

2 结果与分析

2.1 数据处理结果

2.1.1 雾滴沉积数据

图 5 为农用无人机 4 次喷施作业试验雾滴在水稻植株上层、中层、下层的雾滴沉积分布情况。

从图 5 中雾滴在水稻植株各层的分布情况可以看出,航空喷施雾滴在植株各层的沉积趋势基本相同,沉积量从上层到下层依次减少,上层沉积量略高于中层沉积量,而中层沉积量高于下层沉积量;且雾滴主要沉积在水稻植株上层的采集点 4、5、6、7,且

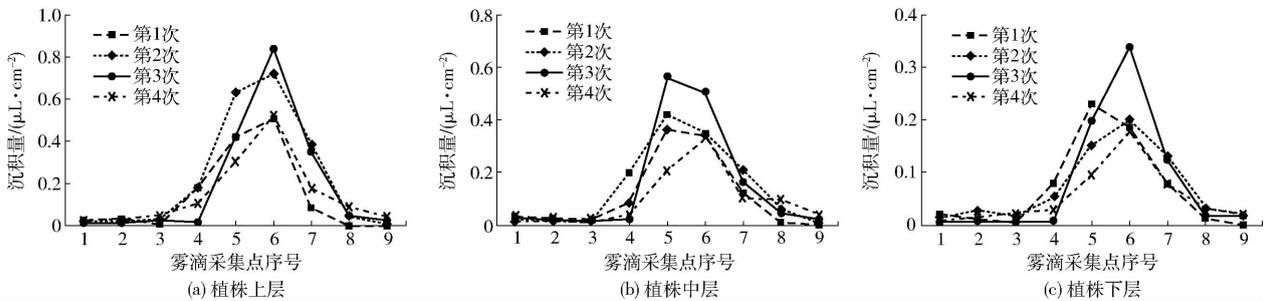


图 5 雾滴沉积分布

Fig. 5 Distributions of droplets deposition

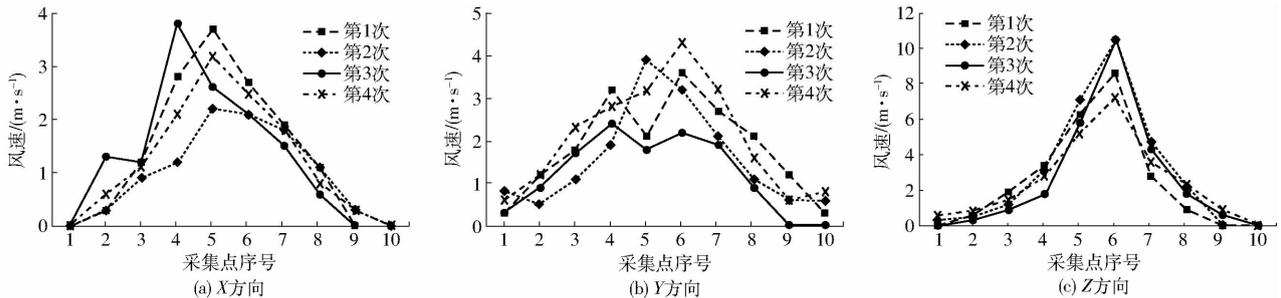


图 6 风场分布

Fig. 6 Distributions of wind field

从图 6 中水稻冠层上方 X、Y、Z 方向的风场分布情况可以看出,由于喷施作业飞行参数的不同,每次试验的风场分布情况也存在差异,但风速由大到小总体表现出 Z 向、Y 向、X 向的趋势。

2.2 风场对有效喷幅区内雾滴沉积量的影响

表 3 为雾滴在有效喷幅区内的沉积分布情况。

由以上试验结果进行逐步回归分析,表 4 为农用无人机旋翼下方风场对有效喷幅区内雾滴沉积量影响的方差分析及回归分析结果。由方差分析结果可知,因素 X 和 Y 向风速对应的显著性水平值分别为 0.477 和 0.114,因素 Z 向风速对应的显著性水平值 $P < 0.01$,表明 X 和 Y 向风速对有效喷幅区内雾滴沉积量的影响不显著,Z 向风速对有效喷幅区内雾滴沉积量的影响极显著;且回归方程显著性检验的概率 $P < 0.01$,因此被解释变量与解释变量全体的线性关系是极显著的,可建立线性方程。

根据雾滴密度评价农用无人机有效喷幅的方法,第 1 次试验和第 2 次试验中的采集点 4、5、6、7,第 3 次试验中的采集点 5、6、7,第 4 次试验中的采集点 4、5、6、7、8,其上层的雾滴沉积密度均满足评价要求^[31],因此,可以将上述雾滴采集点作为本次喷施试验中农用无人机有效喷幅宽度内的采集点。

2.1.2 风场分布数据

图 6 为农用无人机 4 次喷施作业试验时风场测量系统所测得水稻冠层上方 X、Y、Z 方向的风场分布情况。

表 3 有效喷幅区内雾滴沉积分布

Tab. 3 Distribution of droplets deposition in effective spray area

试验组号	采集点序号	平均沉积量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	下层沉积量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)
1	4	0.151	0.081
	5	0.356	0.231
	6	0.348	0.187
	7	0.096	0.079
2	4	0.108	0.055
	5	0.383	0.152
	6	0.423	0.201
3	7	0.242	0.130
	5	0.400	0.199
	6	0.564	0.340
4	7	0.214	0.125
	4	0.059	0.030
	5	0.204	0.097
	6	0.347	0.179
	7	0.121	0.081
	8	0.072	0.029

表4 沉积量方差分析及回归分析结果
Tab.4 Results of deposition variance and regression analysis

差异源	回归系数	标准误差	<i>P</i>	显著性	<i>R</i>	<i>R</i> ²
常数项	-0.036	0.033	0.301		0.932	0.868
Z向风速	0.053	0.006	<0.000 1	**		

注:*P*表示因素对结果影响的显著性水平值,本文取显著性水平 $\alpha=0.05$,**表示因素对试验结果有极显著影响。

对于雾滴沉积量而言,由回归分析结果可知,回归方程的回归系数依次为-0.036、0.053,但常数项的显著性水平 $P>0.05$,应予以剔除,因此,指标有效喷幅区雾滴沉积量 y_1 与因素Z向风速 v_z 之间的关系模型为

$$y_1 = 0.053v_z \quad (R^2 = 0.868) \quad (3)$$

在所建立的关系模型中,因素Z向风速的系数大于0,为正,表示旋翼下方Z向垂直风速与有效喷幅区内的雾滴沉积量是正相关,Z向风速越大,有效喷幅区内雾滴受垂直下旋风场的影响沉积的越多。这与雾滴沉积机理分析和实际作业情况是相一致的。

2.3 风场对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响

为表示农用无人机旋翼下方风场对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响,取雾滴在有效喷幅区内采集点下层的沉积量来表征雾滴穿透性的性能。表5为农用无人机旋翼下方三向风场对有效喷幅区内雾滴在水稻植株冠层沉积穿透性影响的方差分析及回归分析结果。由方差分析结果可知,因素X向风速对应的显著性水平值为0.056,因素Y向风速对应的显著性水平值 $P<0.05$,因素Z向风速对应的显著性水平值 $P<0.01$;表明X向风速对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响不显著,Y向风速对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响显著,Z向风速对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响极显著;且回归方程显著性检验的概率 $P<0.01$,因此被解释变量与解释变量全体的线性关系是极显著的,可建立线性方程。

表5 沉积穿透性方差分析及回归分析结果
Tab.5 Results of deposition penetration variance and regression analysis

差异源	回归系数	标准误差	<i>P</i>	显著性	<i>R</i>	<i>R</i> ²
常数项	0.045	0.033	0.200			
Y向风速	-0.028	0.004	0.037	*	0.918	0.842
Z向风速	0.031	0.045	<0.000 1	**		

对于雾滴沉积穿透性而言,由回归分析结果可知,回归方程的回归系数依次为0.045、-0.028、0.031,但常数项的显著性水平值 $P>0.05$,应予以剔除,因此,指标有效喷幅区雾滴沉积穿透性 y_2 与

因素Y向风速和Z向风速之间的关系模型为

$$y_2 = -0.028v_y + 0.031v_z \quad (R^2 = 0.842) \quad (4)$$

在所建立的模型中,因素Y向风速的系数小于零,为负,表示有效喷幅区内雾滴沉积穿透性与Y向风速呈负相关;因素Z向风速的系数大于零,为正,表示有效喷幅区内雾滴沉积穿透性与Z向风速呈正相关。水平方向上的风场会阻碍雾滴在植株间的穿透,垂直方向上的风场会促进雾滴在植株间的穿透,即Y向风速越大、Z向风速越小,有效喷幅区内雾滴沉积穿透性越差;Y向风速越小、Z向风速越大,有效喷幅区内雾滴沉积穿透性越好。此模型与雾滴沉积机理分析互为补充。

2.4 风场对有效喷幅区内雾滴沉积均匀性的影响

为表明农用无人机旋翼下方风场对有效喷幅区内雾滴沉积均匀性的影响,取每次试验中旋翼下方风场X向、Y向、Z向的峰值来研究三向风场与雾滴沉积均匀性之间的关系^[25,32]。表6为农用无人机旋翼下方有效喷幅区内三向风场峰值与雾滴在水稻植株冠层沉积均匀性结果。由表中数据可以看出,当X、Y、Z向风速分别为2.60、2.20、10.50 m/s时,有效喷幅区内的雾滴沉积均匀性最佳,为36.44%;当X、Y、Z向风速分别为3.20、4.30、7.20 m/s时,有效喷幅区内的雾滴沉积均匀性最差,为66.28%;说明旋翼下方水平方向上的X、Y向风速和垂直方向上的Z向风速共同影响着有效喷幅区内的雾滴沉积均匀性,当水平方向上的X、Y向风速峰值越大、垂直方向上的Z向风速峰值越小,雾滴沉积均匀性越差;当X、Y向风速峰值越小、Z向风速峰值越大,雾滴沉积均匀性越好。这表明当水平方向上的风场较大时,会扰乱垂直方向上的风场而造成旋翼下方出现紊流,从而降低雾滴沉积均匀性;而垂直方向上的Z向风场较大时则会减弱其他方向上风场的影响,从而提高雾滴沉积均匀性。此现象与实际作业情况相吻合。

表6 有效喷幅区内风场最大值及雾滴沉积均匀性
Tab.6 Maximum value of wind field and deposition uniformity in effective spray area

试验组号	最大风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			沉积均匀性/%
	X向	Y向	Z向	
1	3.70	3.60	8.60	48.64
2	2.20	3.90	10.40	42.97
3	2.60	2.20	10.50	36.44
4	3.20	4.30	7.20	66.28

2.5 风场对雾滴飘移的影响

表7为左、右飘移区内雾滴的飘移量及风场在有效喷幅区两侧边缘采集点处的分布情况。

表 7 左、右飘移区内雾滴飘移量及有效喷幅区两侧边缘处风场分布

Tab. 7 Droplets deposition in left and right drift areas and wind field distribution at edge of effective spray area

试验组号		有效喷幅区边缘风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			雾滴飘移量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)
		X 向	Y 向	Z 向	
1	左边	2.80	3.20	3.40	0.166
	右边	1.90	2.70	2.80	0.230
2	左边	1.20	1.90	3.10	0.197
	右边	1.80	2.10	4.70	0.164
3	左边	2.60	1.80	5.80	0.156
	右边	1.50	1.90	4.30	0.172
4	左边	2.10	2.80	2.80	0.203
	右边	0.80	1.60	2.30	0.320

为清楚地揭示出农用无人机旋翼下方风场对雾滴沉积飘移的影响,取每次试验中有效喷幅两侧边缘处的旋翼下方风场 X 向、Y 向、Z 向的风速值来研究风场与雾滴沉积飘移之间的关系。表 8 为有效喷幅区内左右边缘处的三向风场对左右飘移区雾滴飘移影响的方差分析及回归分析结果。由方差分析结果可知,因素 X 向风速对应的显著性水平值为 0.179,因素 Y 向风速对应的显著性水平值为 0.051,因素 Z 向风速对应的显著性水平值 $P < 0.05$;表明有效喷幅内边缘处 X 和 Y 向风速对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响均不显著,有效喷幅内边缘处 Z 向风速对雾滴沉积飘移的影响显著,即农用无人机旋翼下方 Z 向风场对雾滴沉积飘移的影响显著;且回归方程显著性检验的概率 $P < 0.05$,因此被解释变量与解释变量全体的线性关系是显著的,可建立线性方程。

表 8 雾滴飘移方差分析及回归分析结果

Tab. 8 Results of droplets drift variance and regression analysis

差异源	回归系数	标准误差	P	显著性	R	R ²
常数项	0.324	0.048	0.001	**	0.738	0.545
Z 向风速	-0.034	0.013	0.036	*		

对于雾滴沉积飘移而言,由回归分析结果可知,回归方程的回归系数依次为 0.324、-0.034,因此,雾滴沉积飘移量 y_3 与 Z 向风速之间的关系模型为

$$y_3 = -0.034v_z + 0.324 \quad (R^2 = 0.545) \quad (5)$$

在雾滴沉积飘移模型中,因素 Z 向风速的系数小于零,为负,表示雾滴沉积飘移量与 Z 向风速呈负相关,即说明旋翼下方垂直方向上的风场对雾滴飘移有抑制作用;垂直风场越强,雾滴飘移量越少,此现象与雾滴沉积机理是极其吻合的。

另外值得注意的是,此回归模型的决定系数 R^2 为 0.545,低于标准值 0.7。根据已有的试验结果表明,在实际航空喷施作业中,垂直于飞行方向的水平

Y 向风速对雾滴飘移有一定程度的影响^[22,27]。但在此次模型中,因素 Y 向风速并没有包含在此回归模型之中,而 Y 向风速对应的显著性水平值 $P = 0.051$,因此,可以认为是由于航线中心两侧采集点的距离不同以及一定试验误差的影响,从而造成此回归模型的相关系数较低。

3 讨论

通过 4 次航空喷施试验初步证实了多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积分布的影响作用是真实存在的,即无人机旋翼下方风场对雾滴在作物植株上的沉积有着不同程度的影响;因此,航空喷施雾滴沉积规律的探寻需要从其根本上研究无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响机理,风场分布与雾滴沉积分布之间的关系是未来农业航空喷施基础领域研究的重点。

本次试验所采用的雾滴沉积采集范围为 9 m。为揭示出农用无人机旋翼下方风场对雾滴沉积飘移的影响,故取有效喷幅区外左右飘移区内的雾滴沉积量来表征其影响关系。通过雾滴沉积分布结果可以看出,离有效喷幅区越远,雾滴的沉积量越少,较远处的雾滴飘移量占雾滴飘移总量很少的一部分;本文所采取的研究方法对试验结果会存在一定的误差,但在一定程度上反映出了农用无人机旋翼下方风场对雾滴沉积飘移的影响关系。

4 结论

(1)旋翼下方 X 向和 Y 向风场对有效喷幅区内雾滴沉积量的影响不显著,Z 向风场的影响极显著,且有效喷幅区内雾滴沉积量与 Z 向风场之间的回归模型决定系数 R^2 为 0.868,可以为实际作业提供指导。

(2)旋翼下方 X 向风场对有效喷幅区内雾滴沉积穿透性的影响不显著,Y 向风场的影响显著,Z 向风场的影响极显著;且有效喷幅区内雾滴沉积穿透性与 Y 向和 Z 向风场之间的回归模型决定系数 R^2 为 0.842,可以为实际作业提供指导。

(3)旋翼下方水平方向上的风场和垂直方向上的风场共同影响着有效喷幅区内的雾滴沉积均匀性,当水平方向上的 X、Y 向风速峰值越大、垂直方向上的 Z 向风速峰值越小,雾滴沉积均匀性越差;当 X、Y 向风速峰值越小、Z 向风速峰值越大,雾滴沉积均匀性越好。

(4)旋翼下方 Z 向风场对雾滴沉积飘移的影响显著,且对雾滴飘移有一定的抑制作用,即垂直风场越强,雾滴飘移量越小。

参 考 文 献

- 1 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(15):178-183.
ZHOU Zhiyan, YUAN Wang, CHEN Shengde. Current status and future directions of rice plant protection machinery in China[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014(15): 178-183. (in Chinese)
- 2 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.
YANG Xuejun, YAN Herong, XU Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 129-131. (in Chinese)
- 3 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 CSAE, 2004, 20(1): 13-15. (in Chinese)
- 4 宋淑然,夏侯炳,刘洪山,等.风送式喷雾机喷筒结构优化数值模拟与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(6):73-78.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130614&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.014.
SONG Shuran, XIA Houbing, LIU Hongshan, et al. Numerical simulation and experiment of structural optimization for air-blast sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 73-78. (in Chinese)
- 5 宋淑然,阮耀灿,洪添胜,等.宽喷幅风送式喷雾机扩幅喷筒优化设计及试验[J].农业工程学报,2013,29(18):34-42.
SONG Shuran, RUAN Yaocan, HONG Tiansheng, et al. Optimal design and test on expanding duct of wide-swath air-blast sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 34-42. (in Chinese)
- 6 林立恒,侯加林,吴彦强,等.高地隙喷杆喷雾机研究和发展趋势[J].中国农机化学报,2017,38(2):38-42.
LIN Liheng, HOU Jialin, WU Yanqiang, et al. Review and development trend of high clearance boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(2): 38-42. (in Chinese)
- 7 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 CSAE, 2016, 32(11): 54-61. (in Chinese)
- 8 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,2008,29(5):72-74.
XUE Xinyu, LIANG Jian, FU Ximin. Prospect of aviation plant protection in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008, 29(5): 72-74. (in Chinese)
- 9 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/OL].农业机械学报,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.
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. (in Chinese)
- 10 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 CSAE, 2013, 29(24): 1-10. (in Chinese)
- 11 XUE X Y, TU K, QIN W C, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(4): 23-28.
- 12 XUE X Y, LAN Y B, SUN Z, et al. Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128: 58-66.
- 13 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 CSAE, 2013, 29(24): 25-32. (in Chinese)
- 14 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 CSAE, 2014, 30(5): 50-56. (in Chinese)
- 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.
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)
- 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 CSAE, 2017, 33(1): 117-123. (in Chinese)
- 17 HUANG Y, ZHAN W, FRITZ B K, et al. Optimizing selection of controllable variables to minimize downwind drift from aeri ally applied sprays[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 28(3): 307-314.

- 18 FRITZ B K, HOFFMANN W C. Update to the USDA – ARS fixed-wing spray nozzle models[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(2): 281 – 295.
- 19 FRITZ B K, HOFFMANN W C, BAGLEY W E, et al. Influence of air shear and adjuvants on spray atomization[J]. ASTM International, 2014, 33: 151 – 173.
- 20 THISTLE H W, TESKE M E, DROPPA J G, et al. AGDISP as a source term in far field atmospheric transport modeling and near field geometric assumptions[C]//ASAE Annual Meeting, Paper No.051149, 2005.
- 21 ZANNETTI P. Environmental modeling Vol. II: Computer methods and software for simulating environmental pollution and its adverse effect[M]//TESKE M E, BARRY H W. ‘Aerial spray drift modeling’. Computational Mechanics Publications, 1994: 11 – 12.
- 22 THOMSON S J, WOMAC A R, MULROONEY J E. Reducing pesticide drift by considering propeller rotation effects from aerial application and near buffer zones[J]. Sustainable Agriculture Research, 2013, 2(3): 41 – 51.
- 23 张宋超, 薛新宇, 秦维彩, 等. N-3 型农用无人直升机航空施药雾滴飘移模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 87 – 93.
ZHANG Songchao, XUE Xinyu, QIN Weicai, et al. Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N-3 unmanned spraying helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 87 – 93. (in Chinese)
- 24 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 CSAE, 2016, 32(24): 89 – 97. (in Chinese)
- 25 李继宇, 周志艳, 胡炼, 等. 圆形多轴多旋翼电动无人直升机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 1 – 9.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, HU Lian, et al. Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using round multi axis multi-rotor electric unmanned helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 1 – 9. (in Chinese)
- 26 胡炼, 周志艳, 罗锡文, 等. 无人直升机风场无线传感器网络测量系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 221 – 226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.034.
HU Lian, ZHOU Zhiyan, LUO Xiwen, et al. Development and experiment of a wireless wind speed sensor network measurement system for unmanned helicopter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 221 – 226. (in Chinese)
- 27 汪沛, 胡炼, 周志艳, 等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 54 – 61.
WANG Pei, HU Lian, ZHOU Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 54 – 61. (in Chinese)
- 28 ZHU Heping, MASOUD Salyani, ROBERT D Fox. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76: 38 – 43.
- 29 MH/T 1008—1997 飞机喷施设备性能技术指标[S]. 1997.
- 30 王颀. 试验设计与 SPSS 应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 31 MH/T 1002—1995 农业航空作业质量技术指标[S]. 1995.
- 32 李继宇, 周志艳, 胡炼, 等. 单旋翼电动无人直升机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 10 – 17.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, HU Lian, et al. Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using uniaxial single-rotor electric unmanned helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 10 – 17. (in Chinese)