

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

陈盛德^{1,2}, 兰玉彬^{1,2*}, 李继宇^{1,2}, 周志艳^{1,2}, 金 济^{1,2}, 刘爱民³

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 广东省农业航空应用工程技术研究中心, 广州 510642;
3. 湖南隆平种业有限公司, 长沙 410006)

摘 要: 为了初探小型无人直升机航空喷施雾滴在水稻冠层沉积分布规律, 主要通过不同的飞行参数研究了不同喷雾作业参数对水稻冠层的雾滴沉积分布的影响。该试验以 HY-B-10L 型单旋翼电动无人机搭载北斗定位系统 UB351 绘制作业轨迹, 以质量分数为 5% 的丽春红 2R 水溶液模拟生长调节剂喷施沉积情况, 以图像处理软件 DepositScan 来分析靶区和非靶区的雾滴沉积参数得出雾滴的沉积分布结果。结果表明: 3 次试验中的雾滴沉积分布趋势均相似, 且飞行高度和飞行速度对靶区内采集点上雾滴平均沉积量影响均显著, 对雾滴沉积均匀性影响并不显著。3 次试验中靶区的雾滴沉积量随着高度的增加而减少, 总雾滴沉积量分别为 2.380、1.905、1.156 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$, 采集点的平均沉积量分别为 0.198、0.159、0.064 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; 在作业高度为 1.92 m 时雾滴沉积平均均匀性最佳, 且非靶区的雾滴漂移总量最少, 为 0.174 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。另外, 第 1、2 条采集带上靶区内的雾滴沉积量均明显多于作业速度较大的第三条采集带上的雾滴沉积量, 3 次试验中, 第一、2 条采集带上雾滴沉积总量的平均值分别高于第 3 条采集带上雾滴沉积总量的 184.27%、53.51%、72.31%; 且由于外界风场的影响, 作业航线下风向的雾滴沉积量和漂移距离均大于作业航线上风向的雾滴沉积量和漂移距离; 以及由于飞行速度的影响, 非靶区航线下风向第 3 条雾滴采集带上的雾滴漂移量均大于第 1、2 条雾滴采集带上的雾滴漂移量。该结果较好地全面揭示了作业参数对航空喷施雾滴沉积分布结果的影响, 并从风场因素方面推测了对雾滴沉积的影响, 对药液的合理喷施、提高喷施效率具有十分重要的指导意义。

关键词: 喷雾; 机械化; 作物; 无人直升机; 雾滴; 沉积

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.006

中图分类号: S252

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0040-07

陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 周志艳, 金 济, 刘爱民. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.006 <http://www.tcsae.org>
Chen Shengde, Lan Yubin, Li Jiyu, Zhou Zhiyan, Jin Ji, Liu Aimin. 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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.006 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

杂交水稻的推广应用, 开拓了中国粮食增产的新途径, 为解决 13 亿人口的吃饭问题发挥了重大作用^[1]。杂交水稻制种技术则为杂交水稻的稳步发展起到了决定性的作用。在杂交水稻制种的过程中, 除重视培育壮秧等稻作传统技术对穗粒结构和植株异交性状的影响外, 还普遍采用在穗部喷施赤霉素等生长调节剂和微量元素解决母本包颈, 提高柱头外露率^[2], 增强柱头活力, 使母本穗层、穗粒的异交结构大为改善, 异交结实率从 10% 迅速提高到 30%^[3], 因此, 在杂交水稻孕穗期, 生长调节剂

的适当适时喷施是杂交水稻制种技术的重大突破, 对提高制种结实率具有十分重要的意义。

随着杂交水稻制种面积的迅速扩大, 如何实现对生长调节剂的快速有效喷施已成为人们普遍关心的问题。目前, 中国农用喷施方式主要包括人工喷施、地面机械喷施和航空喷施^[4-5]; 其中, 传统的人工喷施方式作业劳动强度大、效率低、耗时长, 由于杂交水稻孕穗期较短, 一旦错过最适喷施时期, 将不能得到最佳的异交结实率; 地面机械喷施方式作业成本高、药剂有效利用率低^[6-7], 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; 而农用航空喷施作为中国近年来的新型喷施方式, 改变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, 且可解决水稻生长过程中地面机械难以下田作业的问题等等^[8-9], 正逐渐成为人们首选的喷施作业方式。

目前, 作为农业航空的重要标志之一的航空喷施作业在近年来的迅速发展和应用引起了人们广泛关注^[10]。随着航空喷施方式的应用, 针对其作业质量和雾滴沉积分布效果, 国内外学者均进行了一些探索^[11-14]。邱白晶等通过采用二因素三水平试验方法研究了 CD-10 型无人

收稿日期: 2015-11-22 修订日期: 2016-06-26

基金项目: 国际农业航空施药技术联合实验室建设 (2015B050501009), 广东省自然科学基金自由申请项目 (2015A030313420)

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。广东省广州市天河区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, 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。广东省广州市天河区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 (E041200725S)

直升机喷雾沉积浓度、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^[15]；秦维彩等通过改变 N-3 型无人直升机的作业高度和喷洒幅度对玉米进行喷施试验，研究了喷洒参数对玉米冠层的雾滴沉积分布的影响^[16]；Fritz 等通过试验评估了风场和喷嘴对航空喷施雾滴沉积和漂移分布效果的影响^[14,17]；Huang 等通过研究影响因素对雾滴沉积分布独立影响的特性，预测并试图选出最大影响因子控制和减少药液雾滴漂移^[18]。在中国南方主要是以小型无人直升机作业为主，对于小型无人直升机，目前还未见在各种不同作业参数的条件下深度分析对雾滴在水稻冠层沉积与漂移影响的相关报导。因此，本文通过在不同飞行参数和外界风场条件下对杂交水稻冠层的喷施试验以及北斗系统得出的精确作业参数来研究影响因素对雾滴沉积分布情况的影响，比较准确地找出了 HY-B-10L 型单旋翼电动无人直升机航空喷施雾滴在不同喷雾参数下的沉积分布规律，为减少航空喷施药液漂移提供理论指导和数据支持。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

本次喷雾作业采用的是深圳高科新农技术有限公司提供的主流机型——HY-B-10L 型单旋翼电动无人直升机，如图 1a 所示，主要性能指标如表 1 所示。

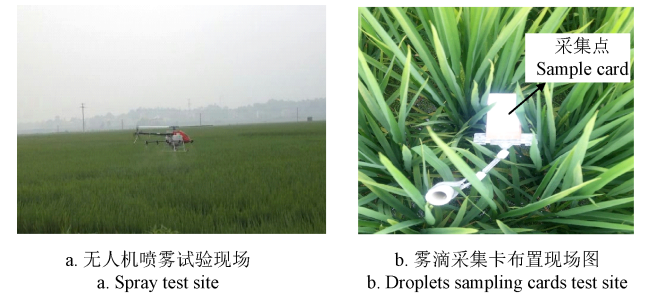


图 1 试验装置实物现场图
Fig.1 Test set-up photo site

表 1 无人机主要性能指标

Table 1 Main performance index of UAV	
主要参数 Main parameter	规格及数值 Norms and numerical
机型型号 Type	HY-B-10L 单旋翼电动无人机 HY-B-10L single rotor electric UAV
外形尺寸 Size/mm×mm×mm	17 60×580×750
主旋翼/尾旋翼直径 Main/Tail rotor diameter/mm	2 080/350
最大载药量 Maximum load/L	10
作业速度 Flight speed/(m·s ⁻¹)	0~8
作业高度 Flight height/m	0.5~3
有效喷幅 Spraying width/m	4~6

喷雾系统由 U 型药箱、微型水泵、喷杆、管路、喷头构成，喷头为扇形喷头，数量为 5 个，喷头沿喷杆方向垂直于飞机中轴线等间距分布，间距为 450 mm，喷头方向朝下，喷洒总流量为 2.4 L/min。

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。

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 $(10+5\times D\times 10^{-7})\text{mm}$ ，高程精度达 $(20+1\times D\times 10^{-6})\text{mm}$ ，其中， D 表示该系统实际测量的距离值，单位为 km。无人机搭载该系统移动站给作业航线绘制轨迹及给各个雾滴采样点定位，通过北斗系统绘制的作业轨迹来观察实际作业航线与各雾滴采集点之间的关系。

1.2 试验方法

1.2.1 试验场地

该试验于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 60~80 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 采样点布置

如图 2 所示，在足够大的地块中设置不同间隔距离的 3 条雾滴采集带（第一条采集带与第二条采集带之间间隔 5 m，第二条采集带与第三条采集带之间间隔 15 m），每条采集带上设置无人机的靶区及在靶区的左右设置 2 个非靶区，其中，靶区根据无人机的有效喷幅宽度设置雾滴采集点，根据给出的无人机有效喷幅参数为 4~6 m，因此预设靶区的宽度为 5 m，在非靶区同样采取此种采集布点方法，即每块非靶区也设置宽度为 5 m 的雾滴采集区，此外，2 个雾滴采集点之间间隔 1 m。

根据以上布点方法，每条采集带有 16 处雾滴采集点，从航线的左侧到右侧依次编号为 1#~16#，试验区域共有 48 处雾滴采集点，在每处采集点按照杂交水稻喷施生长调节剂的实际情况在水稻植株的穗层高度布置雾滴采集卡以收集喷洒雾滴。

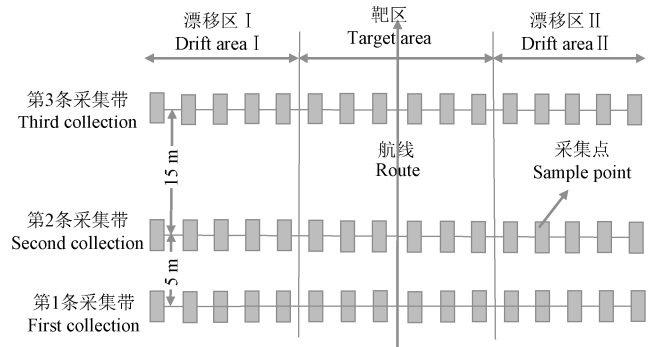


图 2 试验方案示意图
Fig.2 Schematic diagram of test

1.2.3 试剂与采集卡

试剂采用丽春红 2R 食品添加剂现场配制质量分数为 5%的水溶液代替液体农药进行喷施试验，试验采用白纸卡片作为雾滴采集卡以收集喷施雾滴，卡片尺寸为 700 mm×300 mm。

1.2.4 作业参数设计

由于此次试验是研究无人机在不同飞行高度参数下

雾滴在各个作业影响因素下的沉积分布规律，所以试验主要围绕高度参数来进行试验设计。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，因此，在推荐的作业高度左右来设置本次喷施试验的 3 个飞行高度，预定该试验的飞行高度分别为 1、2 和 3 m。

1.3 数据处理

1.3.1 作业参数及轨迹处理

如图 3 所示，图 3a 表示由北斗定位系统 UB351 对布置的各采集点进行定位获取地理数据后绘制所得，图 3b、c、d 分别表示由飞机飞行时搭载北斗定位系统 UB351 而获取的无人机第 1 次、第 2 次、第 3 次喷施作业的飞行轨迹；其中，北斗定位系统 UB351 在第 1 次和第 2 次作业的轨迹定位频率为 2 Hz，第 3 次作业的轨迹定位频率为 10 Hz。另外，通过直观观察第 1 次、第 2 次的试验结果得知雾滴主要向航线左侧漂移，由于综合考虑到外界风场的风向及飞行高度的增加，因此将第 3 次试验中的飞行航线右移至采集点 10# 与 11# 之间，以更有效地收集漂移至航线左侧区域的雾滴。

表 2 为由飞机搭载北斗定位系统 UB351 获取无人机喷施作业参数（平均飞行高度及不同航线段的平均飞行速度）及环境监测系统获取试验相应的气象参数。

表 2 试验相关参数表
Table 2 Test parameters

试验号 Test number	平均温度 Mean temperature/℃	平均湿度 Mean humidity/%	平均风速及风向 Mean air velocity/(m·s ⁻¹)	平均速度 Mean flight speed/(m·s ⁻¹)		平均高度 Mean flight height/m	高度变异系数 Variation coefficient of height/%
				第 1、2 条采集带 First and second collection	第 3 条采集带 Third collection		
1	30.3	63	1.2/NE	2.2	3.4	1.33	15.32
2	32.0	56	1.6/NE	2.3	3.7	1.92	12.26
3	29.2	52	1.7/NE	2.7	4.5	3.15	22.01

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、覆盖密度及沉积量。

为了表征试验中各采集点之间的雾滴沉积均匀性，本文采用变异系数 CV 值来衡量 3 组试验中飞机有效喷幅区内的各采集点之间的雾滴沉积均匀性，变异系数为

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%, \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}. \tag{2}$$

式中 S 为同组试验采集样本标准差；X_i 为各采集点沉积浓度，μL/cm²； \bar{X} 为各组试验采集浓度平均值，μL/cm²；n 为各组试验采集点个数。

1.3.3 喷雾参数影响显著性分析

为进一步表明飞行速度参数和飞行高度参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响，需对试验结果中影响因

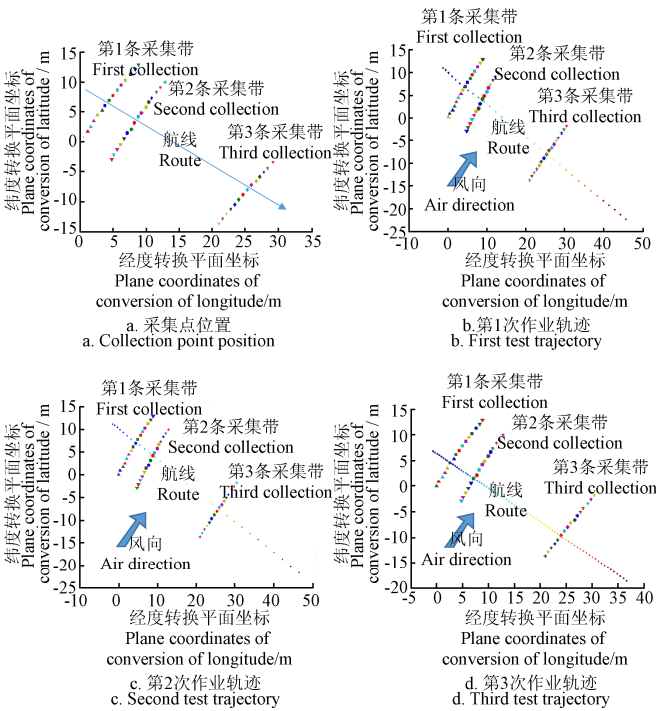


图 3 雾滴采集点及飞行轨迹图
Fig.3 Droplet collection point and flight trajectory

素对靶区内雾滴沉积量、雾滴沉积均匀性及雾滴漂移量进行显著性分析。数据采用数据统计软件 SPSS 16.0 进行方差分析，其中，将飞行速度分为 3 个水平：2~3 m/s 为 1 水平，3~4 m/s 为 2 水平，4~5 m/s 为 3 水平。

2 结果与分析

2.1 试验结果及因素显著性分析

图 4 为 3 次试验的雾滴沉积情况分布图，图中横坐标表示每条雾滴采集带上按等间距分布的 1#~16# 采集点，纵坐标表示在每个采集点上的雾滴沉积量。由图可以看出，第 1 次、第 2 次试验的有效雾滴沉积区域主要集中在采集点 7#~10#，其中，随着飞行高度的增加，无人机的有效喷幅也随着增加，第 3 次试验的有效雾滴沉积区域主要集中在采集点 8#~13#。

由以上试验结果根据方差分析可得表 3，表 3 为靶区内雾滴沉积结果方差分析结果，表示喷雾作业过程中飞行高度和飞行速度因素对靶区内采集点雾滴平均沉积量和雾滴沉积分布均匀性的影响显著性，由表知，飞行高度和飞行速度对靶区内采集点上雾滴平均沉积量影响均显著，而飞行高度和飞行速度对靶区内雾滴分析均匀性影响并不显著。

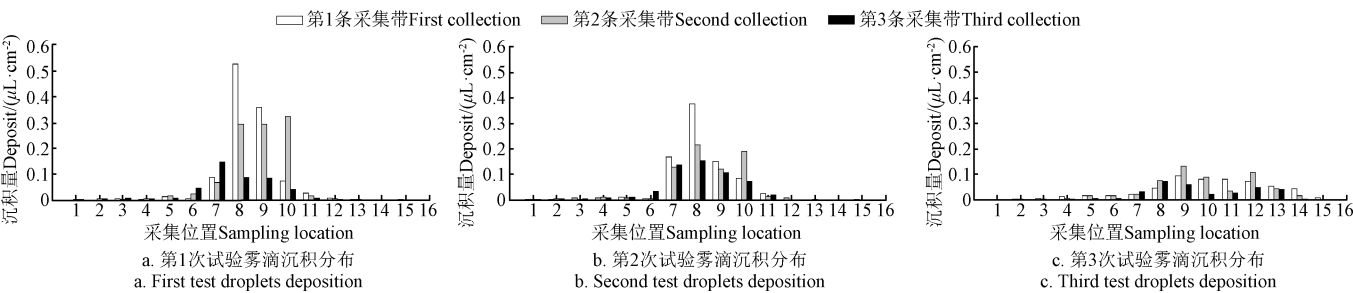


图 4 雾滴沉积分布情况
Fig.4 Droplets deposition

表 3 有效喷幅区内雾滴沉积结果方差分析表
Table 3 Analysis of variance of droplets deposition in effective spray area

因素 Factor	采集点上雾滴平均沉积量 Deposition on each collection point		雾滴分布均匀性 Uniformity of droplet distribution	
	Sig.	显著性 Significance	Sig.	显著性 Significance
飞行高度 Height	0.015	*	0.344	-
飞行速度 Velocity	0.035	*	0.613	-

注：表中 Sig. 表示因素对结果影响的显著性水平值，本文取显著性水平 $\alpha=0.05$ ，表中“*”代表因素对试验结果有显著影响，表中“-”代表因素对试验结果无显著影响。
Note: This article take significance level $\alpha=0.05$, “*” in table represent factors has significant impact on test result, “-” in table represent factors has no significant impact on test result.

2.1.1 不同飞行高度下雾滴沉积量分布

由表 2 和图 4 可以知道，高度不同，靶区内的雾滴沉积量不同。第 1 次、第 2 次和第 3 次试验的平均飞行高度分别为 1.33、1.92 和 3.15 m，而靶区内的总雾滴沉积量分别为 2.380、1.905、1.156 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，每个采集点的雾滴平均沉积量为 0.198、0.159、0.064 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，第 1 次与第 2 次试验的雾滴沉积量明显高于第 3 次试验的雾滴沉积量。这一现象说明，随着高度的增加，植株冠层上方的垂直风场减弱，靶区内的雾滴沉积量会逐渐减少。

2.1.2 不同飞行高度下雾滴沉积均匀性分布

表 4 表示在 3 次不同试验下靶区内每条采集带上的雾滴平均沉积量与雾滴分布均匀性情况。由表可以看出，在不同飞行高度下，靶区内的雾滴沉积均匀性不同。在平均飞行高度为 1.33 m 的第 1 次试验中，雾滴沉积分布的均匀性最差，其中，在第 1 条雾滴采集带上各采集点之间的雾滴沉积量变异系数达到 84.10%，造成这一现象的原因可能是由于无人机飞行高度过低，在靶区内飞机与水稻植株之间产生较强的紊流，使得雾滴沉降不均匀。在平均飞行高度分别为 1.92、3.15 m 的第 2 次、第 3 次试验中，第 2 次试验的雾滴分布均匀性优于第 3 次试验的雾滴分布均匀性，其中，第 2 次试验中第 2 条采集带上的雾滴沉积量均匀性最佳，其变异系数为 29.00%，这一现象说明，当飞行高度过高时，飞机下方的雾滴受无人机旋翼引起的紊流风场及外界风场影响较大，使其垂直向下的风场不稳定，造成下方的雾滴不能较均匀地沉积在正下方的植株冠层上。

表 4 靶区内雾滴沉积分布情况
Table 4 Droplets deposition in effective spray area

试验组号 Test number	采集带位置 Collection position	总沉积量 Deposition/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	每个采集点上雾滴平均沉积量 Deposition on each collection point/($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	雾滴分布均匀性 Uniformity of droplet distribution/%
1	第 1 条 First collection	1.048	0.262	84.10
	第 2 条 Second collection	0.976	0.244	48.71
	第 3 条 Third collection	0.356	0.089	49.35
	第 1 条 First collection	0.781	0.195	65.10
2	第 2 条 Second collection	0.656	0.164	29.00
	第 3 条 Third collection	0.468	0.117	30.35
	第 1 条 First collection	0.423	0.070	26.62
	第 2 条 Second collection	0.473	0.079	47.88
3	第 3 条 Third collection	0.260	0.043	44.67

2.2 同一飞行高度下雾滴沉积分布

由图 4 和表 4 可以看出，在同一种飞行高度下，不同采集带上的雾滴沉降趋势相同。

首先，在每次的试验中，第 1 条与第 2 条雾滴采集带上的雾滴沉积总量及每个采样点上的雾滴平均沉积量差别不大，3 次试验的结果分别为 1.048 和 0.976、0.781 和 0.656、0.423 和 0.473 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ；而第 1 条、第 2 条雾滴采集带上的雾滴沉积总量及每个采样点上的雾滴平均沉积量均明显高于第 3 条雾滴采集带上的雾滴沉积量，在 3 次试验中，第 1 条和第 2 条雾滴采集带上雾滴平均沉积总量分别高于第 3 条雾滴采集带上的雾滴沉积总量的 184.27%、53.51%、72.31%。由表 2 可以知道，在 3 次试验中，前 2 条雾滴采集带上方的作业速度均低于第 3 条雾滴采集带上方的作业速度，因此，出现这一现象主要是由于无人机在喷施作业时经过 3 条雾滴采集带的速度不同而导致的，作业速度越低，沉积在飞机下方的雾滴量就越多。

其次，每条雾滴采集带上的雾滴沉积分布均表现出，飞机作业航线左侧的雾滴沉积量均多于作业航线右侧的雾滴沉积量，经统计可知，在 3 次试验中，飞机作业航线左侧的雾滴沉积总量分别为 1.209、1.181、0.658 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，

而航线右侧的雾滴沉积总量分别为 1.171、0.724、0.498 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ；由图 3 和表 2 可知，由于试验时自然风的风向均为从作业航线的右侧吹向左侧，风速为 1~2 m/s，因此，这一现象可能是由于试验时自然环境中的侧风而引起的，这说明飞机下方的雾滴容易受到侧风的影响而引起雾滴沿着侧风风向而漂移。

2.3 不同飞行高度下雾滴漂移分布

如图 5 所示，在不同飞行高度的 3 次试验中，作业航线左右两侧的非靶区内的雾滴总沉积量分别为 0.142 和 0.063、0.121 和 0.053、0.205 和 0.065 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，第 3 次试验雾滴的总漂移量最大，第 1 次试验次之，第 2 次最少，且由表 2 可以知道，3 次试验时的平均风速分别为 1.2、1.6、1.7 m/s，风场因素相差不大，出现这一现象的原因可能是因为在第 3 次试验中，飞行高度过高，植株冠层上方的垂直风场减弱，在侧风的影响下而引起较大的雾滴漂移；而由图 5 还可以看出，第 1 次试验中在靠近靶区的边缘采集位置 1~2 m 处的雾滴沉积量分别为 0.034、0.074、0.046 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，均多于第 2 次试验中的 0.029、0.039、0.044 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，因此可以认为，第 1 次试验是因为

高度过低，飞机下方与植株上方之间较强的旋翼风场向两侧卷起雾滴而引起漂移。

2.4 同一飞行高度下雾滴漂移分布状况

如图 5 所示，在 3 次试验的雾滴漂移区域，作业航线的左侧漂移区的雾滴沉积量分别为 0.142、0.121、0.205 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，右侧漂移区的雾滴沉积量分别为 0.063、0.053、0.065 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，可以看出无人机作业航线左侧雾滴漂移区内的漂移雾滴沉积量明显多于右侧的漂移雾滴沉积量，且航线左侧的雾滴漂移距离也明显大于航线右侧的雾滴漂移距离。由于当时外界风场方向为东北方向，即从作业航线的右侧吹向航线的左侧，因此可以推断此现象主要是由于侧风风场因素引起的，进一步说明了航空喷施雾滴容易受外界风场因素的影响。

另外，笔者还可以发现，在 3 次试验中作业航线左侧的非靶区内，第 3 条雾滴采集带上的雾滴漂移量分布为 0.070、0.061、0.075 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ ，均大于第 1、2 条雾滴采集带上的雾滴漂移量。而无人机在第 3 条采集带上方的速度大于前两条采集带上方的速度，这一现象说明，在有侧风影响的情况下，作业速度的增加，加大了雾滴的漂移量。

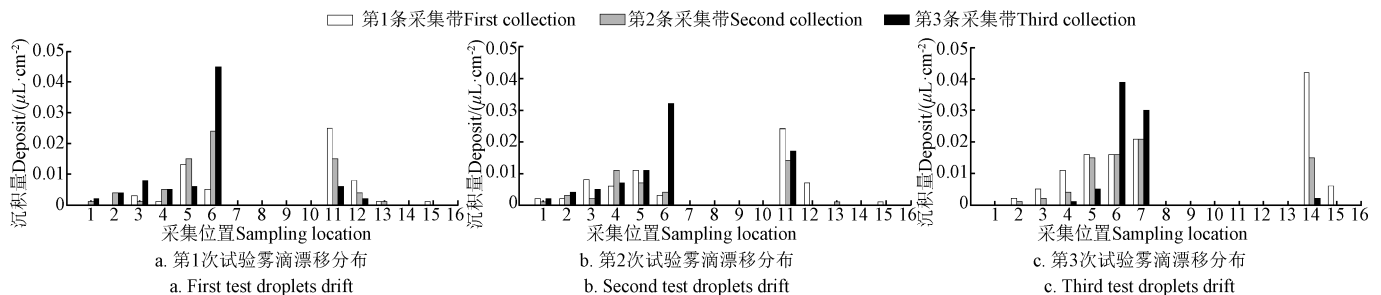


图 5 雾滴漂移分布情况
Fig.5 Droplets drift distribution

3 讨论

本文通过农用无人机结合高精度的北斗导航系统对杂交水稻进行喷施作业，主要结合农用无人机在不同的作业参数及外界风场来研究分析雾滴在杂交水稻冠层的沉积分布规律。

首先，由图 5 中的非靶区内的雾滴沉积分布情况可以发现，每次试验时的风向为航线右侧吹向左侧，而靠近靶区右侧 1 m 处采集位置上的雾滴沉积量均明显高于漂移区左侧的雾滴采集量，结合试验现场的雾滴沉积现象和试验结果，我们可以知道，出现此种现象的原因主要是因为单旋翼无人机旋翼边缘的涡流风场而导致雾滴卷起后再沉积在喷幅区的两侧。

其次，由试验分析我们可以知道，农用无人机喷施作业的飞行高度对靶区和非靶区的雾滴沉积量和均匀性有较大的影响，飞行速度对雾滴沉积量有较大影响，但通过表 3 的结果可以看出，飞行速度对试验中各采集带上的雾滴沉积均匀性影响并不明显，第 2 条采集带上的雾滴沉积均匀性与第 3 条采集带上的沉积均匀性相差非常接近，而第 1 条采集带上的雾滴沉积均匀性与第 2 条

和第 3 条采集带上的沉积均匀性相差较大。我们推断出现这一现象的原因是由于试验操作误差而引起的，由于第 1 条采集带距离无人机悬时停准备喷施作业的起点较近，缓冲距离过短不足以使旋翼下方的风场分布均匀而造成第 1 条采集带上的雾滴沉积均匀性与后面采集带上的沉积均匀性相差较大。因此，喷施作业时留出足够长的缓冲距离对雾滴沉积均匀是十分重要的。

通过对以上试验结果的分析可知：航空喷雾的雾滴沉积分布情况不仅与无人机的作业参数有关，还与风场（旋翼风场和外界风场）存在着根本上的关系。由于雾滴在空中极易受到漂移，且之前的国内外学者在无人机的作业参数优选方面已做了大量工作^[19-20]，而航空喷雾雾滴沉积规律的探寻需要从其根本上研究其雾场分布和风场分布的规律，所以，以后在航空喷雾方向上应更着重于研究风场因素与雾滴沉积分布规律之间的关系，并找出在不同外界的条件下能合理地选择最优的作业参数以供指导。

4 结论

本试验应用电动单旋翼无人直升机喷施质量分数为

5%的丽春红 2R 水溶液来模拟生长调节剂溶液对处于孕穗期的杂交水稻冠层进行低空喷洒沉积情况, 通过对比雾滴在水稻冠层的沉积与漂移情况, 得出如下结论:

1) 飞行高度和飞行速度对靶区内采集点上雾滴平均沉积量影响均显著, 而飞行高度和飞行速度对靶区内雾滴分析均匀性影响并不显著。

2) 在 3 次飞行高度分别为 1.33、1.92、3.15 m 的无人机航空喷施试验中, 靶区内的雾滴沉积量随着高度的增加而减少, 平均沉积在靶区内单个采集点上的雾滴量分别为 0.198、0.159、0.064 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; 而漂移区内, 在飞行高度为 3.15 m 条件下的雾滴总漂移量最大, 为 0.270 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; 飞行高度为 1.33 m 时漂移量次之, 为 0.205 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; 飞行高度为 1.92 m 时漂移量最少, 为 0.174 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; 且此时靶区内的雾滴沉积均匀性最佳。

3) 在同一高度的飞行试验中, 靶区内的第 1、2 条采集带上的雾滴沉积量均明显多于飞行速度较大的第 3 条采集带上的雾滴沉积量。

4) 由于外界风场的影响, 无人机作业靶区内下风向的每条雾滴采集带上的雾滴沉积量均多于上风向的雾滴沉积量, 非靶区内下风向的雾滴漂移量和雾滴漂移距离明显大于上风向的漂移雾滴沉积量和雾滴漂移距离; 且在下风向的非靶区内, 作业速度较大的第 3 条采集带上的雾滴漂移量均大于第 1、2 条采集带上的雾滴漂移量。

致谢: 在本文所述试验的开展过程中, 得到了袁隆平农业高科技股份有限公司、深圳高科新农技术有限公司、相关技术人员及华南农业大学王建伟、郑梅州、梁振业等的大力支持和帮助, 在此表示深深的谢意!

参 考 文 献

- [1] 谭长乐, 王宝和, 薛良鹏, 等. 杂交水稻机械化制种现状与技术思路[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(6): 98—100.
- [2] 肖层林, 刘爱民, 张海清, 等. 中国杂交水稻制种技术的进步与发展方向[J]. 杂交水稻, 2010(增刊 1): 46—50.
Xiao Cenglin, Liu Aimin, Zhang Haiqing, et al. Progress and developing direction of hybrid rice seed production technology in China[J]. Hybrid Rice, 2010(Supp.1): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [3] 徐庆国, 黄丰. 杂交水稻机械化种子生产技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 37—41.
Xu Qingguo, Huang Feng. Studies and progress on seed production mechanization technology in hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.1): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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(5): 178—183. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 of Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 129—131. (in Chinese with English abstract)
- [6] 弋晓康. 我国植保机械的现状与发展趋势探讨[J]. 农机化研究, 2007(3): 218—220.
Yi Xiaokang. Discussion on the present situation and development trends of plant protection equipment in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(3): 218—220. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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)
- [8] 薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 农业技术与装备, 2010, (185): 27—28.
- [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]. 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)
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 1—10. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.
Xue Xinyu, Lan Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 194—201. (in Chinese with English abstract)
- [12] Lan Yubin, Hoffmann W C, Fritz B K, et al. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1): 5—10.
- [13] Zhang Dongyan, Chen Liping, Zhang Ruirui, 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.
- [14] 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.
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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.
- [18] Huang Y, Zhan W, Fritz B K, et al. Optimizing selection of controllable variables to minimize downwind drift from aerially applied sprays[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 28(3): 307—314.
- [19] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 94—96.
- Zhang Jing, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2012, 43(12): 94—96. (in Chinese with English abstract)
- [20] Huang Y B, Thomson S J. Characterization of In-Swath spray deposition for CP-11TT Flat-Fan nozzles used in low-volume aerial application of crop production and protection materials[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(6): 1973—1979.

Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy

Chen Shengde^{1,2}, Lan Yubin^{1,2*}, Li Jiye^{1,2}, Zhou Zhiyan^{1,2}, Jin Ji^{1,2}, Liu Aimin³

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application (ERCAA), Guangdong, Guangzhou 510642, China;

3. Hunan Longping Seed Industry Co.LTD, Changsha 410006, China)

Abstract: In order to find out the distribution regularity of droplet deposition of small unmanned helicopter in rice canopy, spray test with different flight parameters was carried out to study the effect of different operation parameters on the distribution of droplet deposition. The distribution regularity of droplet deposition was obtained by drawing the operation trajectory with BeiDou Navigation Satellite System carried by one-rotor small unmanned helicopter HY-B-10L. The spraying and deposition of the growth regulator (Poncau 2R solution with the mass fraction of 5‰) were simulated, and the parameters results of droplet deposition in the target areas and non-target areas were analyzed by Image processing software Deposit-Scan. The analysis results showed that: The trends of droplet deposition were similar in the 3 trials, the parameters of flight height and flight speed both had a great influence on the mean droplet deposition amount in the collection point of target areas but had not significant influence on the uniformity of droplet deposition. In the target area, the droplet deposition decreased with the increase of the flight height in the 3 trials. The total droplet deposition was respectively 2.380, 1.905 and 1.156 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$, and the average droplet deposition of collection point was respectively 0.198, 0.159 and 0.064 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$. The uniformity of droplets deposition was the best in the flight height of 1.92 m, the best value of uniformity could reach 29%, and the amount of droplets drift was 0.174 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$, which was the least in the drift area in this case, while the amount of droplets drift in the flight height of 3.15 m was 0.270 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$, which was the largest value. The larger value of droplet drift was 0.205 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ in the flight height of 1.33 m, and it had the worst uniformity in the 3 trials. In addition, the amounts of the droplet deposition in the first and second collection zone were clearly more than the amount of the third collection zone which had a faster flight speed in the target area. In the 3 trials, the average amount of droplet deposition in the first and second collection zone was higher than the amount in the third collection zone by 184.27%, 53.51% and 72.31% respectively. Due to the effect of environmental wind field, the amount of droplets deposition and the drift distance of droplets on the left side of flight route were more than that on the right side of flight route, and with the effect of flight speed, the amount of droplet deposition in the third collection zone on the left side of flight route was more than the droplet deposition in the first and second collection zone on the right side in the drift area. The results have fully revealed the effect of operation parameters on the distribution regularity of droplet deposition and drift, and surmised the impact on the droplet deposition from the perspective of wind field factor. It also has an important guiding significance for the reasonable spraying and increasing the spraying efficiency.

Keywords: spraying; mechanization; crops; small unmanned helicopter; droplet; deposition