

# 粳稻多旋翼植保无人机雾滴沉积垂直分布研究

许童羽<sup>1,2</sup> 于丰华<sup>1</sup> 曹英丽<sup>1,2</sup> 杜文<sup>1</sup> 马明洋<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省农业信息化工程技术研究中心, 沈阳 110866)

**摘要:** 为研究多旋翼植保无人机低空喷施作业过程中, 水稻垂直方向雾滴沉积的分布规律, 在水稻冠层叶片、中部叶片、底部叶片分别放置了雾滴测试卡, 收集植保无人机喷洒过程中的雾滴信息。使用清水代替农药来模拟喷施过程, 利用雾滴沉积分析软件 iDAS 分析雾滴测试卡, 得出植保无人机雾滴在水稻垂直方向的分布结果。试验结果表明: 植保无人机低空喷雾在水稻垂直方向的雾滴覆盖率存在显著差异, 有效幅幅内旋翼下方区域的雾滴覆盖效果最好, 而远离旋翼的位置, 雾滴覆盖率较差。从水稻垂直方向的不同位置分析, 雾滴总体覆盖率为冠层 54.86%, 中部 32.69%, 底部 24.7%; 水稻垂直各位置的粒径分布中, 平均粒径范围处于 110 ~ 140  $\mu\text{m}$  之间, 粒径大小适合植物病虫害的防治。冠层的点密度最大, 而水稻中间部位和水稻底部的点密度分布较为相似; 水稻中部雾滴扩散比 (0.465) 优于冠层 (0.38) 和底部 (0.31), 整体喷雾的雾滴扩散比与相对粒谱宽度的数值均低于正常值 (0.67)。

**关键词:** 植保无人机; 雾滴沉积; 粳稻

**中图分类号:** S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0101-07

## Vertical Distribution of Spray Droplet Deposition of Plant Protection Multi Rotor UAV for Japonica Rice

XU Tongyu<sup>1,2</sup> YU Fenghua<sup>1</sup> CAO Yingli<sup>1,2</sup> DU Wen<sup>1</sup> MA Mingyang<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. Liaoning Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** In order to study the vertical distribution of spray droplet deposition of plant protection multi rotor UAV in low altitude spraying operation process, droplet test card were placed in rice canopy leaves, middle leaves and bottom leaves to collect protection UAV spray droplet. Water was used instead of pesticide in spraying process simulation, and iDAS analysis software was used to analyze the droplet deposition on the test card and the distribution of spray droplet deposition at different positions. The results showed that the spray droplet coverage rate of low altitude UAV in vertical direction was significantly different, the droplet coverage effect in the effective range and below rotor was the best, and the droplet coverage effect away from the rotor was poor. From different positions of rice canopy, overall droplet coverage rate in canopy was 54.86%, in middle canopy was 32.69%, and in bottom canopy was 24.7%. The particle size distribution in the vertical position of rice was in the range of 110 ~ 140  $\mu\text{m}$ , and the particle size was suitable for the prevention and control of plant diseases and insect pests. The density of the canopy was the highest, while the density distribution of the middle part and the bottom of rice was similar. The central rice droplet diffusion ratio (0.465) was better than those of the canopy (0.38) and bottom (0.31), the overall spray width and relative numerical diffusion of particle spectrum were lower than the normal value (0.67).

**Key words:** plant protection UAV; deposition of droplets; japonica rice

## 引言

辽宁省是我国重要的粮食主产区, 水稻是辽

宁省主要栽培的粮食作物之一, 近年来随着农药、化肥等用量的不断增加, 造成了土壤退化、环境污染和稻米品质下降等情况, 为此 2015 年农业部制

定了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》。“十三五”期间,对水稻植保进行高效作业和管理,是降低农药化肥使用量、提高效率的关键问题之一<sup>[1]</sup>。多旋翼植保无人机由于其体积小、易操控、安全性高、不需要特殊跑道等特点,近年来在区域级的农作物田间植保作业中得到了快速的发展。茹煜等<sup>[2]</sup>设计了基于无人机的低量喷雾系统,能够进行远距离控制,并进行了离心喷雾效果的性能试验和理论探索。王昌陵等<sup>[3]</sup>基于红外热像仪通过对植保无人机作业前后的冠层温度进行测量,利用温度的变化率来评估雾滴在水稻冠层的沉积情况。杜文等<sup>[4]</sup>分析了采用多旋翼无人机在灌浆期喷施叶面肥的水稻冠层雾滴沉积效果。张宋超等<sup>[5]</sup>利用单旋翼直升机,对玉米栽培过程中的无人机植保作业的雾滴沉积效果进行了研究,为无人机喷雾系统的优化设计,提高喷洒效率等提供了一定的技术依据。邱白晶等<sup>[6]</sup>研究了无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响。袁会珠等<sup>[7]</sup>论述了雾滴粒径大小、覆盖密度与杀虫剂、杀菌剂和除草剂药效之间的关系,为农业生产、无人机精准化施药提供参考。兰玉彬团队<sup>[8-10]</sup>研究了不同喷雾作业参数对水稻冠层雾滴沉积分布的影响,并研究了风场因素对植保作业的影响,对于合理使用无人机植保作业,提高喷湿效率具有重要指导意义。

传统的水稻植保作业的方式主要包括人工喷施、地面机械作业、固定翼飞机植保作业3种方式。在传统的植保作业方式中,人工作业劳动强度大、危险性高、工作效率低、作业时间长。地面机械田间行进困难,容易造成耕地损坏,还会造成一定的水稻破坏<sup>[11]</sup>。固定翼飞机植保作业受场地条件约束较大,同时雾滴漂移情况比较严重,成本也较高。而植保无人机技术作为我国近年来快速发展起来的新型植保方式,能够有效地改善传统植保技术的不足,正在成为水稻植保作业的首选方式。目前植保无人机负载有限,通常情况下药箱容量为5~20 kg。因此无人机在水稻植保作业中,需采用超低容量喷雾技术<sup>[12-13]</sup>。

本文主要针对我国辽宁地区水稻无人机植保的发展现状,利用多旋翼植保无人机进行水稻田间施药作业,研究不同飞行参数条件对水稻植保作业中雾滴沉积分布的影响,探讨雾滴在水稻上的垂直分布特性,为提高无人机植保施药效果、降低农药使用量提供数据支撑和理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器设备

采用深圳大疆创新技术有限公司生产的MG-1八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。



(a) MG-1 植保无人机



(b) 雾滴测试卡现场布点

图1 试验无人机与试验现场

Fig. 1 Test UAV and site

表1 MG-1 植保无人机主要性能参数

Tab. 1 Main performance index of MG-1

性能参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 471×1 471×482
对称电动机轴距/mm	1 520
作业速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0~8
有效喷幅/m	4~6

无人机药液喷洒系统由防震荡药箱、水泵、药业管、陶瓷喷头构成,共有4个离心式喷头,位于左右4个旋翼下方,喷头方向朝下垂直于地面,单个喷头最大流量为0.43 L/min。通过便携式风速计、手持式温湿度检测仪获取试验时的环境信息。本研究采用瑞士先正达公司的雾滴测试卡收集和检验无人机喷洒的雾滴分布、粒径大小及覆盖度等关键信息。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验地点与材料

试验地点位于辽宁省沈阳市“沈阳农业大学水稻育种栽培试验基地”,试验时间为2016年9月7日,水稻生育期为灌浆期,试验区水稻植株平均高度为117 cm,试验品种为沈稻529。水稻采用人工插秧,行间距为30 cm。试验当天环境平均温度为23.45℃,相对湿度32.89%,风速为0.875 m/s。

#### 1.2.2 采样点布置

在试验田选择的26 m×54 m矩形田块中进行试验,无人机飞行高度为水稻冠层上方1 m,设置飞行速度为1.5 m/s,试验共设置3个重复。为了减少稻叶上露水等干扰因素对雾滴测试卡采集数据的影响,试验在08:50开始,沿垂直无人机植保作业方

向,将雾滴测试卡布在水稻垂直空间的冠层叶片、中部叶片(距地面 60 cm)、底部。按照水稻种植的行距分布,每行共布 17 个雾滴采集点。采收带长度约 8 m,大于喷幅范围,以便收集所有雾滴。雾滴测试卡用曲别针夹于水稻叶片的正、反两面。试验中,无人机采用自主作业方式,按照预设的中轴线飞行,为提高飞行定位精度,本研究分别在无人机和地面设置差分模块和定位基站,采用差分 GPS 的方法提高定位精度。为避免雾滴飘移现象造成误差,重复试验之间设置 10 m 的间隔距离,两组试验之间设置 15 m 的间隔距离。植保作业喷洒结束 30 min 后,佩戴一次性手套按顺序收取雾滴测试卡,以保证雾滴测试卡能够充分晾干,并对雾滴测试卡进行编号、封装,带回实验室进行分析。试验布点位置如图 2 所示。

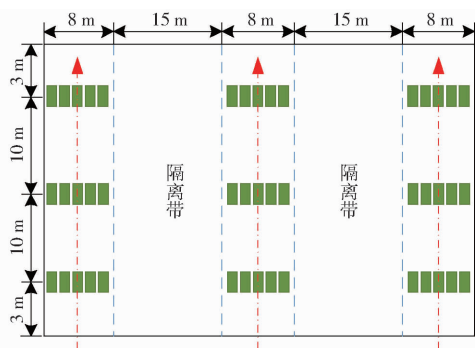


图 2 试验小区布置

Fig. 2 Schematic diagram of test plots layout

### 1.2.3 雾滴测试卡与试剂

本研究所使用的雾滴测试卡底色为黄色,遇水后迅速变为蓝色,颜色变化非常明显,如图 3 所示。雾滴测试卡尺寸为 26 mm × 76 mm,试验使用纯净水替代农药对水稻进行喷洒。

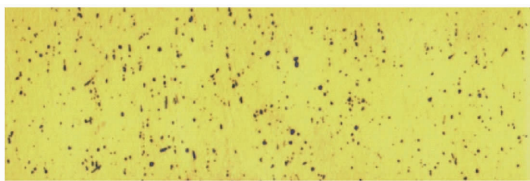


图 3 雾滴测试卡

Fig. 3 Droplet test card

### 1.2.4 无人机作业参数设计

本次试验的目的是研究植保无人机雾滴在水稻垂直方向上的雾滴沉积分布规律,根据先前试验经验和文献资料,设置飞行高度为水稻冠层上方 1 m,喷头流量为 0.25 L/min。飞行速度设置为 1.5 m/s。

### 1.3 数据处理

待雾滴测试卡充分晾干后,将雾滴测试卡按照编号逐一放入塑封袋中,带回实验室进行后续的数据分析。通过扫描仪进行扫描,将扫描后的数据利用图像处理软件 iDAS 进行分析处理,得到多旋翼

植保无人机在相同高度不同速度情况下水稻植保作业的雾滴覆盖率、覆盖密度及沉积量等关键信息。本研究对 3 次重复试验的相同位置采用皮尔森相关性进行分析对比,结果如表 2、3 所示。

表 2 3 个重复试验覆盖率相关性

Tab.2 Correlation of coverage rate for three repeated tests

	试验 1	试验 2	试验 3
试验 1	1	0.768 **	0.792 **
试验 2	0.768 **	1	0.812 **
试验 3	0.792 **	0.812 **	1

注: \*\*表示 2 个变量差异达到  $P < 0.01$  极显著性检验水平。

表 3 3 个重复试验雾滴点数相关性

Tab.3 Droplets correlation of three repeated tests

	试验 1	试验 2	试验 3
试验 1	1	0.782 **	0.749 **
试验 2	0.782 **	1	0.807 **
试验 3	0.749 **	0.807 **	1

注: \*\*表示两个变量达到  $P < 0.01$  极显著性检验水平。

由表 2 和表 3 可知 3 组重复试验的相关性比较理想,均达到了极显著性检验水平,因此本研究将 3 次重复试验求平均进行分析,以降低误差。

## 2 结果与分析

### 2.1 雾滴覆盖率与回收率分析

图 4 为本研究试验的水稻垂直方向不同位置的雾滴覆盖率与回收率的结果,图中的横坐标表示每条雾滴采集带的实际长度。在本研究中覆盖率为浸染面积与采样面积之比,回收率为沉积量与采样面积之比。浸染面积为水敏试纸上被水润湿后发生显色反应的总面积。采样面积为处理的水敏图像的总面积,为浸染面积和未浸染面积之和。而回收率能够反映单位面积上的雾滴沉积量。

由雾滴覆盖率和回收率的分析结果可以看出,植保无人机在作业过程中,雾滴落在水稻叶片上的分布差异比较明显。从图 4 中可知在 6 m 的有效喷幅内,无人机作业均匀性较差,在本研究中喷头所在的位置下方雾滴覆盖率相比其他位置的雾滴覆盖率高。而远离喷头位置的地方雾滴覆盖效果并不理想。

在垂直方向上,雾滴的覆盖分布程度在水稻冠层、中部、底部分布情况较为相似,在 2 ~ 4 m 之间覆盖程度较好。从雾滴覆盖率的数值上可以看出,冠层覆盖率优于水稻中部和底部的覆盖率,如表 4 所示。

### 2.2 雾滴粒径分布分析

图 5 为本研究试验的水稻垂直方向不同位置的雾滴粒径分布情况,图中纵坐标表示雾滴直径和点

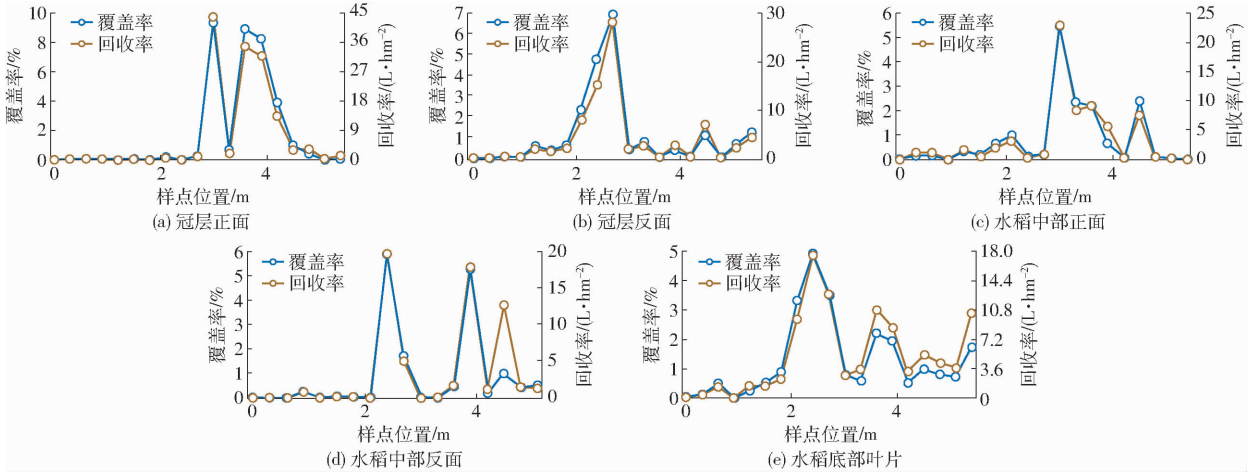


图4 水稻垂直方向的雾滴覆盖率与回收率  
Fig. 4 Droplet coverage rate and recovery rate in vertical direction of rice

表4 水稻垂直方向雾滴覆盖率与回收率分布  
Tab. 4 Droplet coverage rate and recovery rate distributions in vertical direction of rice

布点位置	整体覆盖率/ %	平均覆盖率/ %	回收率/ (L·hm <sup>-2</sup> )
冠层正面	34.02	1.74	7.07
冠层反面	20.84	1.07	4.04
中部正面	16.45	0.83	3.14
中部反面	16.24	0.87	2.76
底部	24.70	1.32	5.30

密度,横坐标为雾滴采集带的实际长度。DV1、DV5、DV9 分别表示体积累加到 10%、50%、90% 时的雾滴直径。雾滴直径可由沉积面积和扩散系数计算得到,点密度可由点数比上采样面积得到。

由于植保无人机在作业过程中,液滴经过喷雾器械雾化部件的作用而分散。但从喷头喷出的雾滴大小并非均匀一致,而是有大有小,呈一定的分布,用 μm 作为单位。雾滴粒径是衡量药液雾化程度和作业质量的重要指标之一。最易被生物体捕获并能

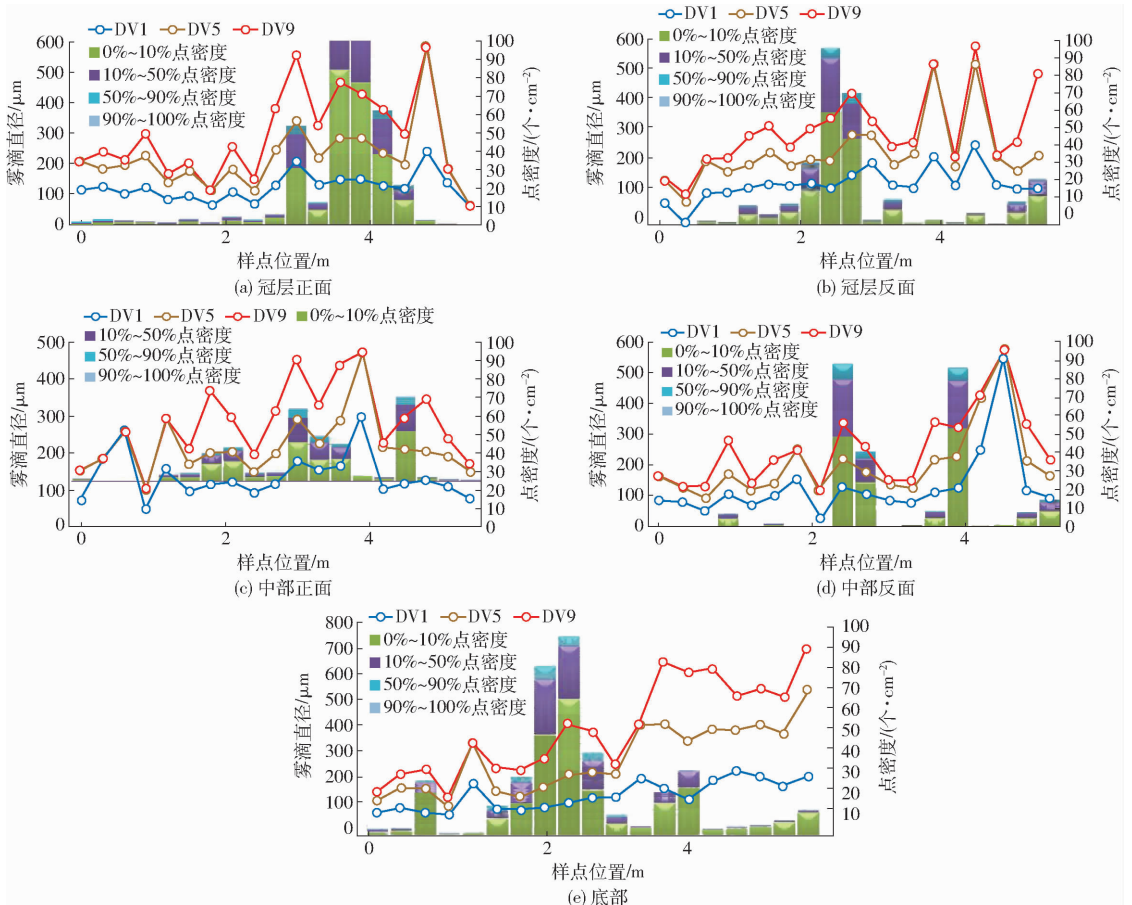


图5 水稻垂直方向的雾滴粒径分布  
Fig. 5 Droplet size distributions in vertical direction of rice

取得最佳防治效果的雾滴粒径称为生物最佳粒径。杀虫剂、杀菌剂、除草剂的最佳粒径范围不同。对于飞行昆虫而言,生物最佳粒径为 10 ~ 50  $\mu\text{m}$ ,作物叶面爬行类害虫幼虫,生物最佳粒径为 30 ~ 150  $\mu\text{m}$ ,对植物病害和杂草生物最佳粒径分别为 30 ~ 150  $\mu\text{m}$  和 100 ~ 300  $\mu\text{m}$ 。从图 5 中可以看出水稻不同位置的粒径分布与点密度的分布情况存在明显差异。植保无人机旋翼下方的点密度较好,而离旋翼较远的雾滴测试卡采集的点密度则相对较小,从分布规律可以看出,粒径分布和点密度的变化受旋翼风场的影响较大。

表 5 为水稻垂直各位置的粒径分布情况,冠层的点密度最大,而水稻中间部位和水稻底部的点密度相差不大。从粒径均值的数据来看,平均粒径范围处于 110 ~ 140  $\mu\text{m}$  之间,适合用于植物病虫害的防治。

### 2.3 扩散比与相对粒谱宽度分析

扩散比与相对粒谱宽度是国际上用来衡量雾滴喷洒效果的常用指标,扩散比为体积中值直径与数

量中值直径之比。相对粒谱宽度为 DV9 与 DV1 差值与 DV5 之比。

雾滴扩散比的理想值为 1,即全部雾滴体积相同;通常情况下扩散比范围在 0.67 ~ 1 内就被认为雾滴分布比较均匀。而相对粒谱宽度数值越小越好,理想值为零,即占总体积 80% 的雾滴体积相同。从图 6 中可以看出水稻不同位置的扩散比和相对粒谱宽度变化差异非常明显,同时在植保无人机的有效喷幅内,2 个数值的分布情况也变化较大。

表 5 水稻垂直方向粒径分布

Tab.5 Droplet size distribution in vertical direction of rice

布点位置	点密度/ (个· $\text{cm}^{-2}$ )	粒径均值/ $\mu\text{m}$	DV1/ $\mu\text{m}$	DV5/ $\mu\text{m}$	DV9/ $\mu\text{m}$
冠层正面	21.4	130	154	199	496
冠层反面	16.2	122	137	265	517
中部正面	10.2	134	148	264	474
中部反面	14.4	118	124	224	349
底部	21.0	112	137	309	640

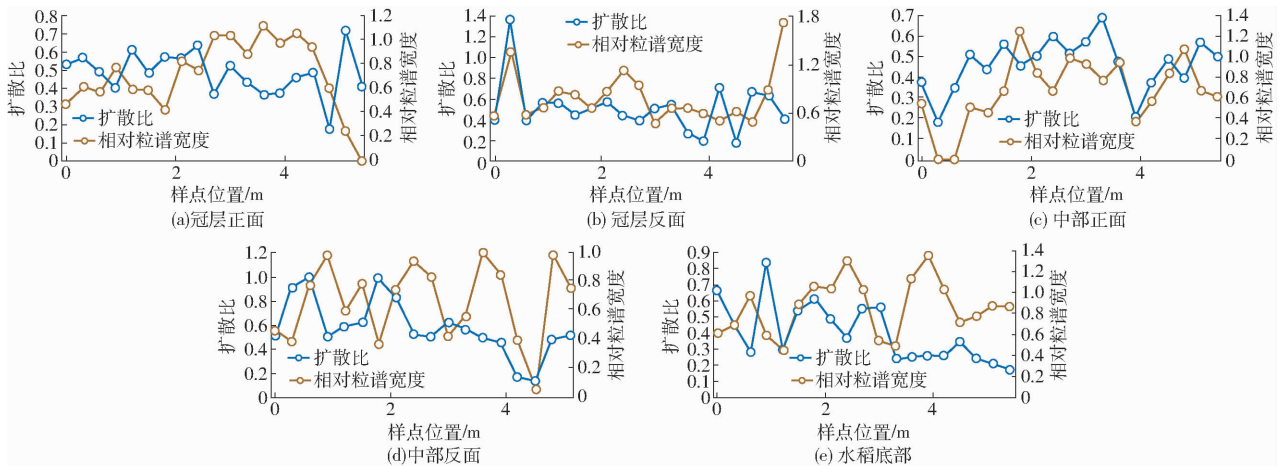


图 6 水稻垂直方向的雾滴扩散比与相对粒谱宽度

Fig. 6 Diffusion ratio and relative width of droplet size in vertical direction of rice

表 6 是雾滴扩散比与相对粒谱宽度在水稻不同位置上的分布情况,从表中可以看出,水稻中部的扩散比和相对粒谱宽度都要优于水稻冠层和水稻底部,但其数值与正常值之间依然存在一定的差距。

表 6 水稻垂直方向扩散比与相对粒谱宽度分布

Tab.6 Distributions of diffusion ratio and relative width of droplet size in vertical direction of rice

布点位置	扩散比	相对粒谱宽度
冠层正面	0.36	1.14
冠层反面	0.40	1.44
中部正面	0.46	1.24
中部反面	0.47	1.01
底部	0.31	1.62

### 3 讨论

通过八旋翼植保无人机对东北粳稻田间管理进行喷施作业,主要通过在水稻植株上不同位置布置雾滴测试卡,来研究分析植保无人机作业过程中雾滴在水稻垂直方向上的沉积分布情况。

通过图 4 的雾滴覆盖率与回收率的分析可知,植保无人机在水稻植保的作业过程中,雾滴覆盖分布情况较差,在植保无人机有效喷幅范围内,覆盖较好的地方通常位于旋翼下方,而旋翼两侧覆盖率较差,造成这样的原因可能是雾滴过细,而旋翼的风场对于雾滴的沉积起到了关键作用。而旋翼风场之外的雾滴其受力情况较为复杂,包括环境风场、旋翼风

场的边界效应,环境温度等多重因素的影响,一部分在还没有落到叶片上就已经在空气中消散,另一部分由于复杂风力的作用发生了飘移<sup>[14-16]</sup>。通过正反面雾滴分布情况可以看出,水稻正反面雾滴分布情况基本一致,这可能是由于东北粳稻叶片较为直立,在多旋翼风场的作用下造成的,本研究未对旋翼风场进行深入研究。通过表4的数据可以看出,水稻冠层覆盖率为54.86%,中部覆盖率为32.69%,底部覆盖率为24.7%,说明植保无人机的穿透性能还是比较理想的,能够很好地在水稻的各个位置进行附着。通过表5的数据可以看出,本次试验的粒径均值在110~140 μm之间,粒径分布情况与雾滴覆盖情况较为相似,本研究所采用的雾滴测试卡存在雾滴聚集的情况,同时采用图像分析的手段进行,因此本研究所得到的雾滴粒径结果可能会包含这样的误差情况<sup>[17]</sup>。图6和表6的扩散比与相对粒谱宽度的数据表明,本研究所采用的植保无人机喷雾效果并不理想,综合指标均低于合理水平,这也是目前植保无人机都存在的问题,造成这样结果是由飞行参数、喷头、作物自身特性等多因素共同造成的,本研究未对此进行深入的研究。

通过对以上试验结果的分析可知:植保无人机作业过程中的雾滴沉积分布规律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

着十分显著的相关性<sup>[18]</sup>。由于植保无人机的雾滴粒径较细,在空中容易飘移,而植保无人机的雾滴沉积规律需要从根本上研究其风场分布的规律,同时需要对雾滴的受力情况开展深入研究。本研究采用软件来识别试验过程中的雾滴粒径,但从实际雾滴在测试卡上的沉积效果来看,当雾滴沉积量较少时能够准确识别出雾滴个数,但当雾滴覆盖较多时,雾滴容易出现重叠、黏连等情况,利用识别软件进行雾滴分析会造成一定的误差,但总体趋势是一致的<sup>[19-21]</sup>。

## 4 结论

(1) 植保无人机低空喷雾,在水稻不同位置的雾滴覆盖率存在着显著差异,有效幅播范围内,旋翼下方区域的雾滴覆盖效果最好,而远离旋翼的位置,雾滴覆盖率较差。从水稻不同位置来看,冠层雾滴总体覆盖率为冠层54.86%,中部32.69%,底部24.7%。

(2) 水稻垂直各位置的粒径分布中,平均粒径范围处于110~140 μm之间,粒径大小适合植物病虫害的防治。冠层的点密度最大,而水稻中间部位和水稻底部的点密度分布较为相似。

(3) 水稻中部雾滴扩散比(0.465)优于冠层(0.38)和底部(0.31),整体喷雾的雾滴扩散比与相对粒谱宽度的数值均低于正常数值(0.67)。

## 参 考 文 献

- 张亚莉,兰玉彬, BRADLEY Fritz, 等. 美国航空静电喷雾系统的发展历史与中国应用现状[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 1-7.  
ZHANG Yali, LAN Yubin, BRADLEY Fritz, et al. Development of aerial electrostatic spraying systems in the United States and applications in China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 1-7. (in Chinese)
- 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 CSAE, 2014, 30(3): 50-55. (in Chinese)
- 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)
- 杜文, 曹英丽, 许童羽, 等. 无人机喷雾参数对粳稻冠层沉积量的影响及评估[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 182-186.  
DU W, CAO Y L, XU T Y, et al. Effect and assessment of UAV spraying parameters at japonica rice canopies[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 182-186. (in Chinese)
- 张宋超, 薛新宇, 秦维彩, 等. N-3型农用无人直升机航空施药飘移模拟与试验[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)
- 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)
- 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015(6): 9-16.  
YUAN Huizhu, WANG Guobin. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides [J]. Plant Protection, 2015(6): 9-16. (in Chinese)
- 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 文晟, 兰玉彬, 张建桃, 等. 农用无人机超低容量旋流喷嘴的雾化特性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 85–93.
- WEN Sheng, LAN Yubin, ZHANG Jiantao, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics of ultra-low-volume swirl nozzle for agricultural unmanned aviation vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 85–93. (in Chinese)
- 10 王玲, 兰玉彬, HOFFMANN W C, 等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 15–22. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160103&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160103&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.003.
- WANG Ling, LAN Yubin, HOFFMANN W C, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 15–22. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 蒋焕煜, 周鸣川, 李华融, 等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 73–77. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150310&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150310&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.010.
- JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, LI Huarong, et al. Experiment on dynamic droplet distribution uniformity for PWM variable spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 73–77. (in Chinese)
- 13 FRITZ B K, HOFFMANN W C, BAGLEY W E, et al. Influence of air shear and adjuvants on spray atomization[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 117(1): 292–294.
- 14 张东彦, 兰玉彬, 陈立平. 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?file\\_no=20141009&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141009&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009.
- ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping. 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)
- 15 ZHANG Jili. Agricultural experimental research of aviation spray system[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2014, 8(5): 56–59.
- 16 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)
- 17 张建桃, 李晟华, 文晟, 等. 农用超声雾化换能器参数优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 8–15.
- ZHANG Jiantao, LI Shenghua, WEN Sheng, et al. Parameter optimization design and experiment of agricultural ultrasonic atomization transducer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 8–15. (in Chinese)
- 18 张瑞瑞, 陈立平, 兰玉彬, 等. 航空施药中雾滴沉积传感器系统设计与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 123–127. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140820&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140820&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.020.
- ZHANG Ruirui, CHEN Liping, LAN Yubin, et al. Development of a deposit sensing system for aerial spraying application[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 123–127. (in Chinese)
- 19 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 194–201. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130534&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130534&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034.
- XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 194–201. (in Chinese)
- 20 GONG Cihun-Siyong A, CHIU H K, HUANG Liren, et al. Low-cost comb-electrode capacitive sensing device for liquid-level measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9): 2896–2897.
- 21 PACZESNY D. The capacitive sensor for liquid level measurement made with ink-jet printing technology[J]. Procedia Engineering, 2015, 38(6): 731–735.