

灌浆期六旋翼无人机喷幅和喷液量对玉米群体内雾滴沉积分布、漂移特性的影响

杜嘉瑞¹, 张翼飞^{1,2}, 肖珊珊¹, 李泽松¹, 李桂彬¹, 杨贺麟¹, 常达森¹, 杨克军¹

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院/黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江 大庆 163319;

2. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 采用大疆 T30 无人机在玉米灌浆期进行喷施作业, 探讨喷幅和喷液量对雾滴在群体内沉积分布影响。采用两因素试验设计, 设置 3 个喷幅[4(G1)、5(G2)、6.5 m(G3)]和 5 个喷液量[15、30、45、60、75 L/hm²(R1~R5)], 将玉米群体从上至下分为 5 层(A~E)。结果表明, 在不同喷幅和喷液量处理组合下, 随着喷液量增加, 雾滴总沉积量、覆盖率、覆盖密度显著增加, 随着喷幅的升高呈先增后降的趋势, 其中 G2R5、G3R5 和 G1R5 处理的雾滴总沉积量较大, 但雾滴的地面损失量增多、沉积量均匀性和穿透性不佳、漂移加重, 总体上 G2 喷幅下各叶层的雾滴沉积分布较优。在实际生产中喷液量选择不宜过大, 应结合施药属性及农田环境等因素, 确定适宜的喷液量。

关键词: 玉米; 多旋翼无人机; 喷液量; 喷幅; 雾滴沉积量; 漂移

中图分类号: S513

文献标识码: A

Effect of Spray Amplitude and Volume of Six Rotor UAV in Filling Stage on Droplet Deposition Distribution and Drift Characteristics in Maize Population

DU Jia-rui¹, ZHANG Yi-fei^{1,2}, XIAO Shan-shan¹, LI Ze-song¹, LI Gui-bin¹,

YANG He-lin¹, CHANG Da-sen¹, YANG Ke-jun¹

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University/Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Daqing 163319; 2. Key Laboratory of Low Carbon Green Agriculture in Northeast Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Daqing 163319, China)

Abstract: Dji T30 UAV was used to spray maize during the filling period, and the influence of spray width and spray liquid quantity on the deposition distribution of droplets in the population was discussed. Using a two-factor experimental design, three spray ranges[4(G1), 5(G2), 6.5 m(G3)] and five spray volumes[15–75 L/ha(R1–R5)] were set, and the maize population was divided into five layers(A–E) from top to bottom. The results showed that, Under the treatment combination of different spray amplitudes and spray volume, the total deposition amount, coverage rate and coverage density of fog drops increased significantly with the increase of spray volume, and showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of spray amplitude. The total deposition amount of G2R5, G3R5 and G1R5 was large, but it led to the increase of ground loss of fog drops, poor uniformity and penetration of deposition volume, and aggravated drift of fog drops. In general, the distribution of droplets deposition in each leaf layer under the spray amplitude of G2 is superior. However, the selection of spray quantity should not be too large in actual production. The appropriate spray liquid amount should be scientifically determined during UAV operation, combined with the functional properties of spraying agents and farmland environment and other factors.

Key words: Maize; Multi rotor UAV; Spray volume; Spray amplitude; Droplet deposition; Drift

录用日期: 2023-02-20

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划(GA20B102)、国家重点研发计划(2017YFD0300302-04)、黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2020037)、黑龙江省博士后面上经费项目(LBH-Z19196)、黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2021-NXY20)

作者简介: 杜嘉瑞(1998-), 黑龙江双鸭山人, 硕士, 主要研究方向为玉米高产理论与栽培技术。Tel: 13314591975 E-mail: 735780503@qq.com
杨克军和张翼飞为本文通信作者。E-mail: byndykj@163.com E-mail: byndzyf@163.com

玉米是我国主要的粮食作物之一,对我国粮食安全、畜牧业生产和工业发展都具有十分重要的战略作用^[1]。玉米灌浆期科学管理是保障丰产优质的关键,由于此时期植株生长高大,群体内叶片交叠、叶层繁厚,依靠人工和传统地面农机装备实施叶面养分供给、化控、化保等农艺措施操作难度大、作业效率低、劳动强度高、耗时长^[2]。无法在短时间内快速全覆盖式的及时完成喷雾作业,可能会错过技术最佳应用时机^[3],从而限制玉米生育后期丰产优质生产技术的全程机械化大面积应用推广和区域玉米产业的高质量发展。近年来,随着我国农用航空设备与技术的不断发展,小型农用无人机作为一种先进的新型农机装备,在场地适应能力、机动灵活性、作业效率等方面优势明显,在水稻、小麦、大豆等矮秆作物各关键生育时期的作业技术趋于成熟^[4],在玉米、甘蔗、茶树、棕榈树等高秆作物及高大乔木的应用也取得了一定进展^[5-7]。由于高秆作物生育后期冠层茂密,药剂雾滴穿透能力、分布均匀性受物种及种植制度等差异所导致的冠层厚度、密度影响较大,若喷施不当,不仅无法达到技术措施应有的防、促、控效果,还会由于药剂过量喷施或雾滴漂移等对作物自身及周围环境造成损害,增加生产成本投入和资源浪费^[8]。因此,不断探索和优化农用无人机的喷施性能参数和作业质量之间的关系,对于高秆作物生产配套调控和保护技术的大面积高效实施具有重要意义。

无人机作业质量技术指标主要涉及雾滴覆盖密度、雾滴分布均匀性、雾滴谱宽度等,飞行高度和速度、施药量、雾滴粒径等均可影响无人机的喷雾质量和技术作用效果^[9]。前人针对目前农用无人机喷洒过程中沉积率相对较低、防治效果差等问题,开展了大量研究。陈盛德等^[10]基于三因素正交试验分析了小型无人机喷雾参数与橘树冠层雾滴密度、均匀性之间的关系,认为影响雾滴沉积密度的作业参数顺序依次为作业速度、作业高度、喷头流量。刘德江等^[11]比较了4种农用无人机在3种不同果园施药后的雾滴沉积分布情况,发现不同机型在不同果树上的雾滴沉积分布均有显著性差异。杨莉等^[12]通过开展B-7451型直升机喷雾参数对枣树冠层雾滴沉积分布的影响研究,确定了飞行高度为6 m时,雾滴均匀性最好。王冰洁等^[13]针对多旋翼无人机在火龙果树上作业参数的优选试验中,发现无人机施药过程中航线平行于种植行、作业高度1.5 m、作业速度1.5 m/s条件下,火龙果树各叶层雾滴沉积密度、覆盖率最大。潘波等^[14]发现,飞行高度和速度对雾滴

在荔枝冠层的沉积分布和穿透性有显著影响。

此外,在玉米生产上,秦维彩等基于雾滴沉积特性和喷施效果,筛选出了N-3型无人直升机在玉米生长后期的最优作业参数,为提高无人直升机农药喷施后的有效利用率提供了重要数据支持。与单旋翼无人直升机相比,多旋翼无人机采用圆形对称结构布局,具有结构简单、振动小、平衡性好、成本低易维护、自动化程度高、操作简单等优点,是目前我国农用无人机的主力机型^[15]。前人分别从多旋翼无人机施药量、飞行速度、喷头类型和助剂选择^[16]等方面,评价了不同作业参数对玉米田喷施效果的影响,但在玉米生长后期多旋翼无人机的喷液量与喷幅对作业质量的交互影响研究还未见报道。因此,本研究在寒地玉米密植高产栽培条件下,选用生产上应用较多的六旋翼无人机,探讨灌浆期不同喷液量与喷幅参数组合下的雾滴穿透性能,从优化雾滴在玉米群体内各层的沉积分布特征、喷幅对接均匀性、降低漂移损失等角度出发,明确玉米灌浆期无人机喷雾参数与密植群体的雾滴沉积分布关系,筛选出适宜玉米灌浆期多旋翼无人机喷施参数,为寒地玉米密植高产群体生育后期化控、植保等田间精准管理技术的高效航空作业提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况

试验于黑龙江八一农垦大学试验实习基地(安达,125.352 E,46.402 N)进行,田块开阔无遮挡,试验时玉米生育期为吐丝后20 d,植株长势较为一致,平均株高为300 cm,行距65 cm,群体有效密度约为7.0万株/hm²。

1.1.2 仪器设备

如图1所示,试验喷雾作业采用T30农用无人机(Shenzhen DaJiang Innovation Technology Co., Ltd, China),药液喷洒系统由防震荡药箱、水泵、药液管、陶瓷喷头构成,主要性能详见表1。利用FT-PQX5便捷式移动气象站(山东风途物联网科技有限公司,中国山东)监测无人机作业关键环境信息。雾滴采集卡为Droplet counting aid水敏纸(26 mm×76 mm, Syngenta Crop Protection AG, Switzerland)。

1.2 试验方法

1.2.1 无人机飞行参数设计

本试验以清水代替药液进行喷施作业,采用两因素试验设计,在同一高度下(距作物顶端2.5 m),以喷幅为主处理,分别设置4(G1)、5(G2)和6.5 m(G3)



图1 供试无人机及其田间喷施作业图

Fig.1 UAV for this experiment and its spraying operation diagram

表1 无人机主要性能指标参数

Table 1 Main performance index parameters of UAV

主要参数 Main parameter	规格及数值 Norms and numerical	主要参数 Main parameter	规格及数值 Norms and numerical
机型型号	T30 六旋翼电动无人机	喷头型号	SX110015VS
外型尺寸(mm×mm×mm)	2858×2685×790	喷头数量	16
最大载药量(L)	40	最大喷洒流量(L/min)	4.5
作业速度(m/s)	0 ~ 8	有效喷幅(m)	4 ~ 7
作业高度(m)	1 ~ 30	作业效率(hm²/h)	12
有效喷幅(m)	4 ~ 9	悬停精度(cm)	水平±10,垂直±10

表2 不同处理组合作业及气象环境相关参数

Table 2 Operating and meteorological parameters related to different treatment combinations

主处理 Main treatment (m)	副处理(L) Secondary treatment	喷 幅 (m) Spray	喷液量 (L/hm²) Spray volume	飞行速度 (m/s) Fly speed	空气温度 (°C) Temperature	空气湿度 (%) Humidity	风 速 (m/s) Wind speed	风 向 Wind direction
G1	R1	4.0	15	7.0	24.0	59	0.9	东南
G1	R2	4.0	30	6.7	23.0	57	0.8	东南
G1	R3	4.0	45	4.4	24.0	63	0.9	东南
G1	R4	4.0	60	3.3	24.5	56	1.0	东南
G1	R5	4.0	75	2.7	23.8	55	1.6	东南
G2	R1	5.0	15	7.0	24.7	54	1.2	东南
G2	R2	5.0	30	5.3	24.4	59	0.9	东南
G2	R3	5.0	45	3.5	24.8	60	0.9	东南
G2	R4	5.0	60	2.7	23.9	57	1.5	东南
G2	R5	5.0	75	2.1	23.5	61	0.9	东南
G3	R1	6.5	15	7.0	24.0	55	0.9	东南
G3	R2	6.5	30	4.1	24.1	59	0.9	东南
G3	R3	6.5	45	2.7	23.9	56	1.4	东南
G3	R4	6.5	60	2.0	24.0	57	1.7	东南
G3	R5	6.5	75	1.6	23.0	50	1.9	东南

3个喷幅处理;以喷液量为副处理,分别设置喷液量15(R1)、30(R2)、45(R3)、60(R4)和75 L/hm²(R5)5个喷液量处理,共计15个处理组合。如图2所示,选取70.00 m×46.15 m的田块作为1个处理试验区,每个处理试验区4边留有6.5 m缓冲区,避免处理间雾滴干扰。无人机按照预定航线进行往返作业,为使喷

洒更加稳定,保障采集数据的有效性与可对比性,无人机在离雾滴采集卡布设区 25 m 处悬停起飞,在飞离雾滴采集卡布设区 25 m 时停止喷洒。在各处理组合喷施作业时,每隔 1 min 记录距田块地面垂直高度 5.0 m 处的空气温湿度、风速和风向等气象数据。各处理组合关键作业及环境相关参数见表 2。

1.2.2 采样点布置

如图 2 所示,各作业小区中间设置 1 个无人机靶区(长 70.00 m×宽 20.15 m),两侧分别设置 1 个非靶区(即漂移检测区,长 70.00 m×宽 13.00 m)。在无人机靶区,垂直于飞行航线设置 3 条雾滴采集带,每条

采集带分别设置 4 个采集样点(间隔 1.95 m),共计 12 个采集点;在非靶区分别设置 3 条漂移雾滴采集带,垂直于飞机航线各采集带从靶区边缘行开始每隔 4 行(2.6 m)设置 1 个雾滴采集点,共计 30 个采集点。喷施作业前,于每个雾滴采集卡布设点,选择具有代表性玉米植株,在靶区分别在地表(株间垄沟和垄台)、穗位叶及其上部的第 3、5 片,下部的第 3、6 片叶中央,各放置 1 张雾滴采集卡(从上到下依次编号为 A、B、C、D、E、F、G);在非靶区采集点第 2 片叶处布置 1 张雾滴采集卡用于收集漂移雾滴。

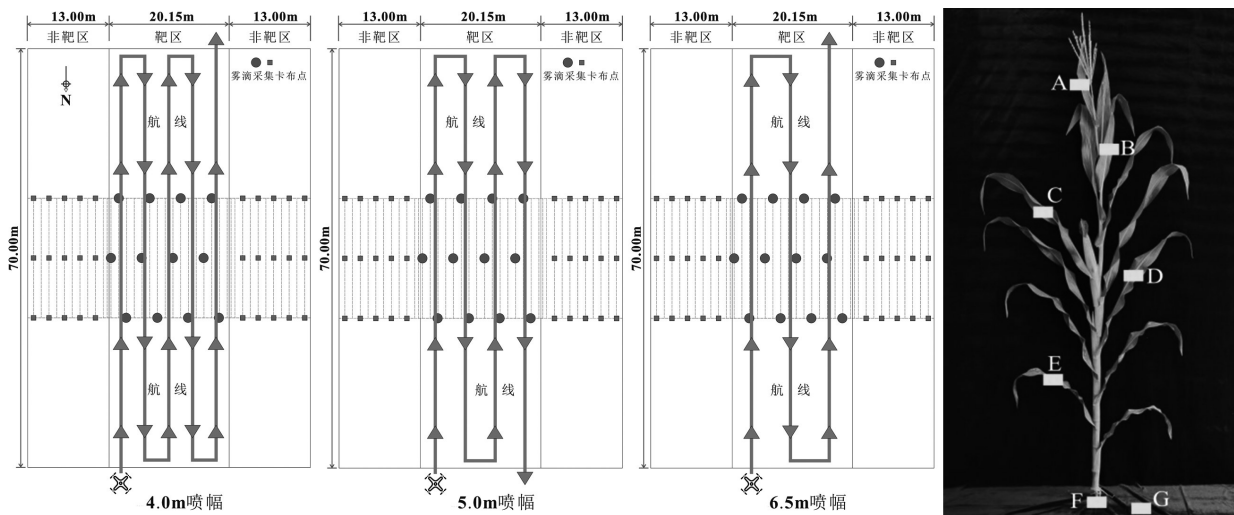


图2 无人机航线及雾滴采集卡布设示意图

Fig.2 UAV route and droplet collection card layout diagram

1.3 数据采集与处理

喷施完成且待雾滴采集卡晾干后,戴防水手套逐一收集雾滴采集卡并做好标记,最后放入自封袋中保存,迅速带回实验室分析。使用 HP Scanjet 扫描仪(Hewlett-Packard, USA)对每个雾滴采集卡进行扫描,获得 600 dpi 图像;利用图像分析软件 Deposit Scan 获取不同喷施参数处理组合下,各样点的雾滴沉积量、覆盖率、雾滴密度等指标值。

参照 Zhang^[17]和 Wang 等^[18]的方法,试验中各个采集点之间雾滴沉积均匀性通过变异系数 CV 进行评估,其数值越小表示均匀性越佳。计算公式如下:

$$CV=\frac{S}{\bar{X}}\times100\%$$
$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(X_i-\bar{X})^2}{n-1}}$$

式中,S 为每组采集样本雾滴沉积量的标准差;X 为平均雾滴沉积量,X_i为每个采集样本的雾滴沉积量;n 为采集样本数。CV 值越小,雾滴沉积分布越

均匀。穿透性分别用各层(B、C、D、E)与群体顶层(A)的沉积量比值来表示。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据处理,采用 SPSS 22.0 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 喷幅和喷液量对玉米群体内雾滴总体分布的影响

由表 3 可知,无人机喷液量和喷幅单因素对雾滴在玉米群体内总体分布特性有极显著影响(P<0.01),但两者的交互效应不明显。随着喷液量的增加,雾滴总沉积量、覆盖率、覆盖总雾滴密度逐渐增大,在 R5 水平达最大值;随着喷幅的增加,雾滴总体分布指标值呈先增后降趋势,于 G2 水平达峰值。从不同喷幅和喷液量处理组合来看,在各喷幅水平下,随着喷液量的增加均会促进玉米群体内雾滴总体沉积量、覆盖率和覆盖总雾滴密度的显著增加,且以

G2R5 处理下最高,分别为 0.709 ug/cm²、22.07%和 101.02 个/cm²,相比于其他处理增幅比例达 5.10% ~ 85.39%、5.71% ~ 75.05%、2.06% ~ 81.01%,且除 G1R5 和 G3R5 处理的覆盖总雾滴密度外,差异均达显著水平(图 3)。

表 3 喷幅和喷液量对玉米群体内雾滴总体分布的交互效应
Table 3 Interaction effects of spray amplitude and volume on droplet deposition distribution

处理因子 Treatment factor	处理水平 Treatment level	总沉积量(ug/cm ²) Deposition	总覆盖率(%) Ratio of coverage	总雾滴密度(个/cm ²) Total droplet density
G	G1	0.419 b	12.622 b	66.802 b
	G2	0.451 a	14.098 a	69.321 a
	G3	0.427 b	13.084 b	68.032 ab
R	R1	0.147 e	5.634 e	19.899 e
	R2	0.162 d	9.138 d	57.126 d
	R3	0.417 c	13.562 c	73.570 c
	R4	0.612 b	17.031 b	90.132 b
	R5	0.823 a	20.977 a	99.532 a
F 值及显著性	G	16.494**	18.424**	7.215**
	R	3 063.578**	722.185**	2 690.882**
	G×R	1.081	1.527	1.124

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平;*表示 $P<0.05$ 水平上显著,**表示 $P<0.01$ 水平上显著。下表同。
Note: Data followed by different letters within a column indicate significant difference at the 0.05 level between treatments; * means significant difference at 0.05 level, ** means significant difference at 0.01 level. The same below.

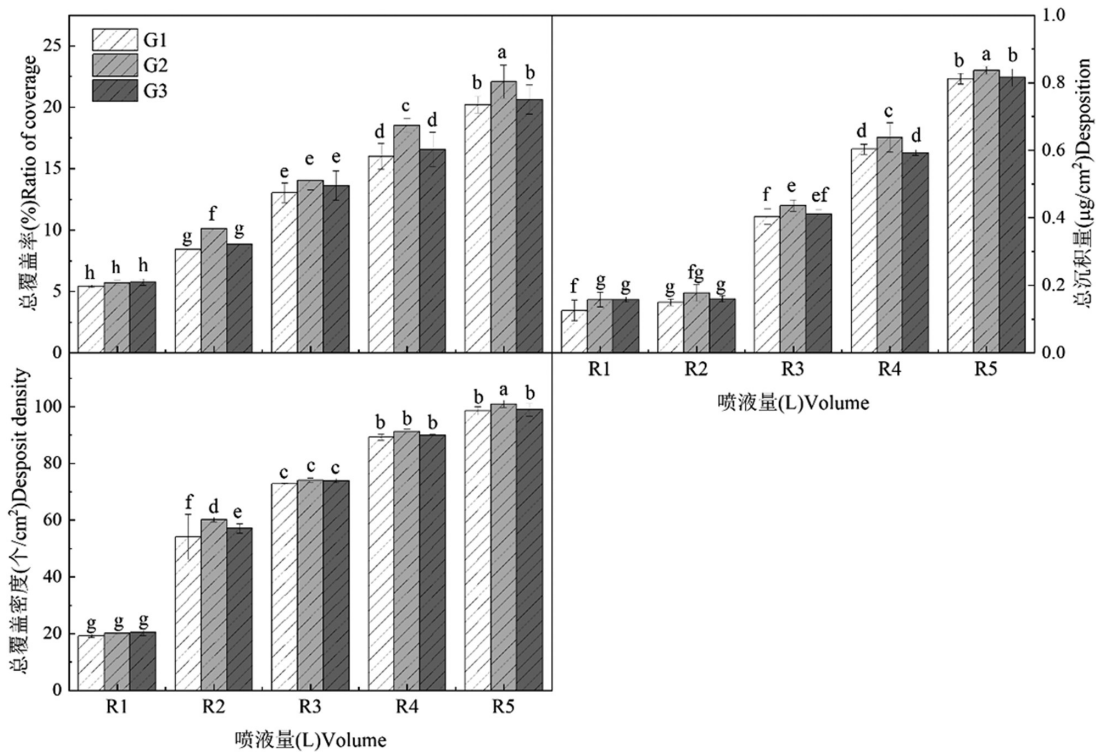


图 3 不同处理组合下玉米群体内雾滴沉积分布特性指标的分差分析

Fig.3 Variance analysis of droplet deposition distribution characteristics in maize population under different treatment combinations

2.2 喷幅和喷液量对玉米不同叶层覆盖雾滴密度和覆盖率的影响

由表 4 可知,喷液量对玉米不同叶层雾滴覆盖率、覆盖雾滴密度均有极显著影响($P<0.01$),随着喷

液量的增加,群体内 A ~ E 层的雾滴覆盖率分别为 1.6% ~ 6.88%、1.32% ~ 6.28%、0.85% ~ 4.38%、0.77% ~ 3.25%、0.31% ~ 2.57%,覆盖雾滴密度分别为 4.99 ~ 27.93、3.14 ~ 27.41、2.90 ~ 22.92、2.31 ~

表4 不同处理组合下玉米各叶层雾滴覆盖率和覆盖雾滴密度
Table 4 Effects of different treatment combinations on the deposition and distribution of fog droplets in each canopy of maize plants

处理组合 Treatment combination	覆盖率(%) Ratio of coverage					覆盖雾滴密度(个/cm ³) Droplet density				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
G1R1	1.72±0.55 e	1.32±0.23 h	0.91±0.18 d	0.79±0.11 e	0.73±0.09 fg	5.84±2.05 f	5.54±1.06 gh	3.79±0.36 f	3.10±1.83 e	1.67±1.26 ef
G1R2	2.41±0.66 de	1.80±0.65 gh	1.39±0.37 d	0.95±0.29 e	0.78±0.38 efg	11.18±6.53 de	10.66±6.39 efg	9.68±3.13 e	7.97±2.37 cde	5.81±3.27 cdef
G1R3	4.01±0.75 bc	3.11±0.57 def	2.32±0.29 c	1.84±0.33 bcd	1.57±0.48 cd	16.87±2.74 bcd	16.95±3.23 cd	16.01±9.70 d	10.28±3.46 bcd	8.08±3.06 c
G1R4	4.65±1.02 b	3.91±0.85 cd	3.16±0.75 b	2.57±0.70 ab	1.72±0.52 bcd	20.70±7.43 b	20.13±10.35 bc	18.81±8.47 b	12.31±5.13 bcd	13.20±5.95 ab
G1R5	6.31±0.24 a	4.75±0.93 bc	4.01±0.99 ab	2.37±1.07 bc	2.16±0.67 abc	27.39±10.80 ab	24.98±10.07 ab	20.74±7.27 ab	19.52±6.81 a	14.19±5.60 ab
G2R1	1.90±0.27 e	1.50±0.40 gh	0.85±0.28 d	0.77±0.21 e	0.69±0.30 fg	6.76±0.70 ef	5.91±0.96 gh	3.82±0.47 f	3.16±1.03 e	2.63±0.35 def
G2R2	4.37±0.43 bc	2.64±0.47 efg	1.71±0.31 cd	1.33±0.48 de	1.18±0.27 def	14.31±1.56 cd	12.79±1.96 def	9.91±2.26 e	7.93±2.12 cde	6.40±1.47 cde
G2R3	4.88±0.61 b	3.71±0.33 cde	2.32±0.42 c	1.53±0.37 cde	1.48±0.44 cde	20.04±5.22 bc	17.34±3.95 bc	16.42±4.51 cd	11.85±3.65 bcd	9.93±3.14 bc
G2R4	6.10±0.94 a	4.47±0.76 c	3.55±0.82 b	2.17±0.38 bcd	1.71±0.16 bcd	21.88±9.56 ab	20.57±5.51 bc	19.08±11.09 b	16.18±6.08 ab	13.59±5.08 ab
G2R5	6.88±0.77 a	6.28±1.68 a	4.38±0.39 a	3.25±0.76 a	2.57±0.82 a	27.93±13.52 a	27.41±1.53 a	22.92±11.61 a	20.03±4.67 a	15.19±4.73 a
G3R1	1.60±0.65 e	1.75±0.65 gh	1.29±0.54 d	0.81±0.43 e	0.31±0.10 g	4.99±2.38 ef	3.14±1.79 h	2.90±1.57 f	2.31±1.56 e	1.54±1.22 f
G3R2	1.98±1.08 e	2.34±0.93 fgh	1.88±0.31 cd	1.58±0.81 bcd	1.07±0.29 def	12.74±7.30 d	9.15±4.05 fg	9.03±3.07 e	7.71±2.86 de	5.12±1.49 cdef
G3R3	3.36±0.86 cd	3.62±0.64 cde	3.32±0.83 b	1.84±0.40 bcd	1.47±0.26 cde	17.16±2.97 bcd	16.23±4.88 cde	14.65±5.33 d	8.80±5.34 cde	6.69±2.22 cd
G3R4	4.04±0.97 bc	3.40±0.66 cd	3.58±1.13 ab	2.59±0.97 ab	1.97±0.79 ab	20.78±11.46 b	19.78±5.79 bc	18.39±4.78 bc	14.66±0.97 abc	12.77±3.99 ab
G3R5	6.40±1.24 a	5.60±1.30 ab	3.91±0.41 ab	2.58±0.71 ab	2.36±1.01 abc	22.23±7.26 a	21.47±4.61 bc	20.11±4.25 ab	16.69±4.75 ab	14.10±1.98 ab
F值及显著性										
G	21.36**	5.33**	3.151*	3.30*	1.95	3.25*	4.03*	3.25*	3.47*	0.97
R	78.80**	55.59**	89.85**	24.39**	25.19**	40.78**	46.41**	44.45**	22.17**	33.98**
G×R	2.17*	0.55	1.82	0.86	1.37	2.27*	0.47	0.67	1.24	0.80

20.03、1.54 ~ 15.19 个/cm²;喷幅对玉米 A、B、C、D 层覆盖雾滴密度和覆盖率的影响达显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$),而两者的交互效应仅对 A 层雾滴覆盖率和覆盖雾滴密度有显著作用。在不同喷幅作业条件下,各喷液量处理下雾滴覆盖率和覆盖雾滴密度之间的差异较为显著,但随着叶层位置的下移,不同喷液量处理间的差异逐渐缩小。在不同处理组合中,各叶层总体以 G2R5 处理的雾滴覆盖率和覆盖雾滴密度较高,相比于其他处理的 A、B、C、D、E 层增幅比例分别达 6.97% ~ 79.04%、10.82% ~ 78.98%、8.45% ~ 80.59%、20.93% ~ 76.31%、8.17% ~ 87.94% 和 1.93% ~ 82.13%、8.87% ~ 88.54%、9.51% ~ 87.35%、2.55% ~ 88.47%、7.04% ~ 89.86%。此外,根据农业航空作业质量技术指标规定的雾滴覆盖密度 ≥ 20 个/cm² 要求^[19],R3 水平下 G2 喷幅的 A 层达标;R4 水平下 G1 ~ G2 喷幅的 A ~ B 层和 G3 喷幅的 A 层达标;R5 水平下 G1、G3 喷幅的 A ~ C 层达标,G2 喷幅的 A ~ D

层达标。
2.3 喷幅和喷液量对玉米不同叶层雾滴沉积量和地面损失的影响

由表 5 可知,仅喷液量对玉米不同叶层雾滴沉积量和地面损失量有极显著影响($P<0.01$),玉米群体内各叶层的雾滴沉积量和地面损失量均随喷液量的增加而增多,喷液量和喷幅无明显交互效应。总体来看,G2 喷幅的各叶层雾滴沉积量占优势,且随叶层位置下移雾滴沉积量呈下降趋势,所有处理组合中 A ~ E 叶层雾滴沉积量均在 G2R5 处理下达到峰值,分别为 0.269、0.219、0.187、0.127 和 0.095 ug/cm²。此外,尽管在同一喷幅条件下,随着喷液量的增加雾滴地面损失量随之增大,且 G1R5、G2R5 和 G3R5 处理较高(0.062 ~ 0.065 ug/cm²),除了显著($P<0.05$)高于 G1R1 和 G2R1 处理外,与其他处理差异未达显著水平。

表 5 不同处理组合下玉米各叶层雾滴沉积量和地面损失量
Table 5 Effects of different treatment combinations on the amount of fog droplets deposited in different parts of maize canopy

处理组合 Treatment combination	沉积量 Deposition					地面损失量 Ground loss
	A	B	C	D	E	
G1R1	0.031±0.011 e	0.028±0.011 e	0.027±0.011 d	0.021±0.010 d	0.019±0.010 de	0.007±0.003 c
G1R2	0.040±0.014 fe	0.041±0.017 e	0.031±0.013 d	0.027±0.013 d	0.023±0.012 de	0.024±0.022 abc
G1R3	0.123±0.046 d	0.106±0.045 d	0.086±0.039 cd	0.049±0.025 cd	0.031±0.017 cde	0.035±0.014 abc
G1R4	0.165±0.063 cd	0.136±0.060 cd	0.129±0.061 bc	0.083±0.043 bc	0.059±0.034 b	0.051±0.023 abc
G1R5	0.240±0.097 ab	0.187±0.073 abc	0.181±0.089 ab	0.110±0.064 ab	0.092±0.059 a	0.062±0.062 ab
G2R1	0.039±0.012 e	0.034±0.013 e	0.027±0.011 d	0.024±0.011 d	0.022±0.011 de	0.008±0.006 bc
G2R2	0.061±0.018 e	0.044±0.017 e	0.031±0.014 d	0.028±0.014 d	0.025±0.013 de	0.023±0.010 abc
G2R3	0.139±0.046 d	0.109±0.044 d	0.100±0.047 c	0.071±0.037 bc	0.033±0.018 cde	0.036±0.031 abc
G2R4	0.207±0.072 bc	0.168±0.071 abc	0.144±0.069 ab	0.087±0.048 abc	0.063±0.036 bc	0.049±0.000 abc
G2R5	0.269±0.109 a	0.219±0.096 a	0.187±0.090 a	0.127±0.073 a	0.095±0.057 a	0.063±0.073 a
G3R1	0.038±0.013 e	0.029±0.013 e	0.026±0.011 d	0.023±0.012 d	0.018±0.010 e	0.015±0.010 abc
G3R2	0.056±0.022 e	0.037±0.017 e	0.029±0.013 d	0.026±0.014 d	0.024±0.014 de	0.049±0.042 abc
G3R3	0.132±0.051 d	0.100±0.047 d	0.085±0.040 bc	0.053±0.030 cd	0.034±0.020 cde	0.050±0.024 abc
G3R4	0.181±0.072 cd	0.146±0.070 bcd	0.127±0.062 bc	0.073±0.042 bc	0.048±0.030 bcd	0.058±0.054 abc
G3R5	0.244±0.103 ab	0.197±0.104 ab	0.148±0.085 ab	0.098±0.059 ab	0.070±0.045 ab	0.065±0.050 a
F 值及显著性						
G	1.016	0.735	0.973	0.084	0.990	0.197
R	65.77**	45.20**	44.22**	22.50**	28.60**	4.05**
G×R	0.483	0.268	0.321	0.527	0.515	1.00

2.4 喷幅和喷液量对玉米不同叶层雾滴沉积均匀性和穿透性的影响

雾滴沉积分布均匀性、穿透性是衡量无人机喷施作业效果的关键指标。由表 6 可知,在不同处理组合下,雾滴在 A ~ E 层雾滴沉积量分布的变异系

数分别为 27.80% ~ 42.25%、38.81% ~ 52.87%、40.74% ~ 57.75%、46.15% ~ 9.84%、50% ~ 64.28%,以叶片 A 层的变异系数小于其他叶层,雾滴沉积分布均匀性依次表现为 A>B>C>D>E。当喷幅为 G2 时,玉米各叶层的雾滴沉积量变异系数均较小。在

不同喷幅条件下,各叶层雾滴沉积量变异系数随着喷液量的升高而变大,雾滴分布均匀性逐渐变差。本试验条件下,以各叶层雾滴沉积量与冠层顶部A层的雾滴沉积量比值作为衡量雾滴穿透性能时,雾滴穿透性比例介于24.46%~92.50%。总体上看,随着叶层位置下移,各处理组合的雾滴沉积穿透效果

逐渐减弱,雾滴在B层的沉积量穿透性达72.13%~92.50%、在C层达55.35%~83.87%、在D层达39.84%~67.74%、在E层达24.46%~58.06%,且随着喷幅的增加及喷液量的升高,雾滴穿透性能整体呈下降趋势。

表6 不同处理组合下玉米各叶层雾滴沉积均匀性和穿透性
Table 6 Deposition uniformity and penetration of fog droplets in each leaf layer of maize under different treatment combinations

处理组合 Treatment combination	沉积量均匀性 Uniformity of droplet deposition					沉积量穿透性 Penetrability			
	A	B	C	D	E	B:A	C:A	D:A	E:A
G1R1	34.36	39.29	40.74	47.62	52.63	90.32	83.87	67.74	58.06
G1R2	35.89	41.17	42.31	48.15	52.17	92.50	72.50	65.00	55.00
G1R3	37.12	42.45	45.35	51.02	54.84	80.48	69.11	39.84	25.20
G1R4	38.01	43.03	47.26	51.81	58.73	82.42	76.97	44.24	29.09
G1R5	40.40	44.17	49.24	58.18	64.21	77.92	61.67	40.83	27.92
G2R1	29.80	38.81	41.93	46.15	50.00	87.18	69.23	64.10	56.41
G2R2	30.00	39.29	44.83	50.00	52.00	72.13	55.36	45.90	39.34
G2R3	33.33	40.37	47.00	52.11	54.54	78.41	71.94	51.08	24.46
G2R4	34.72	41.99	48.21	55.50	57.63	81.16	69.57	41.55	30.43
G2R5	40.61	43.87	48.86	57.14	59.78	81.41	69.52	47.21	35.31
G3R1	35.08	44.26	43.48	51.85	55.55	76.32	71.05	60.53	50.00
G3R2	38.71	45.00	45.95	53.57	58.33	73.21	55.35	48.21	41.07
G3R3	38.82	47.00	46.73	56.60	58.82	80.30	65.15	40.15	25.00
G3R4	40.10	48.06	48.91	57.53	62.50	80.66	71.27	45.86	32.60
G3R5	42.25	52.87	57.75	59.84	64.28	80.73	74.18	45.08	37.70

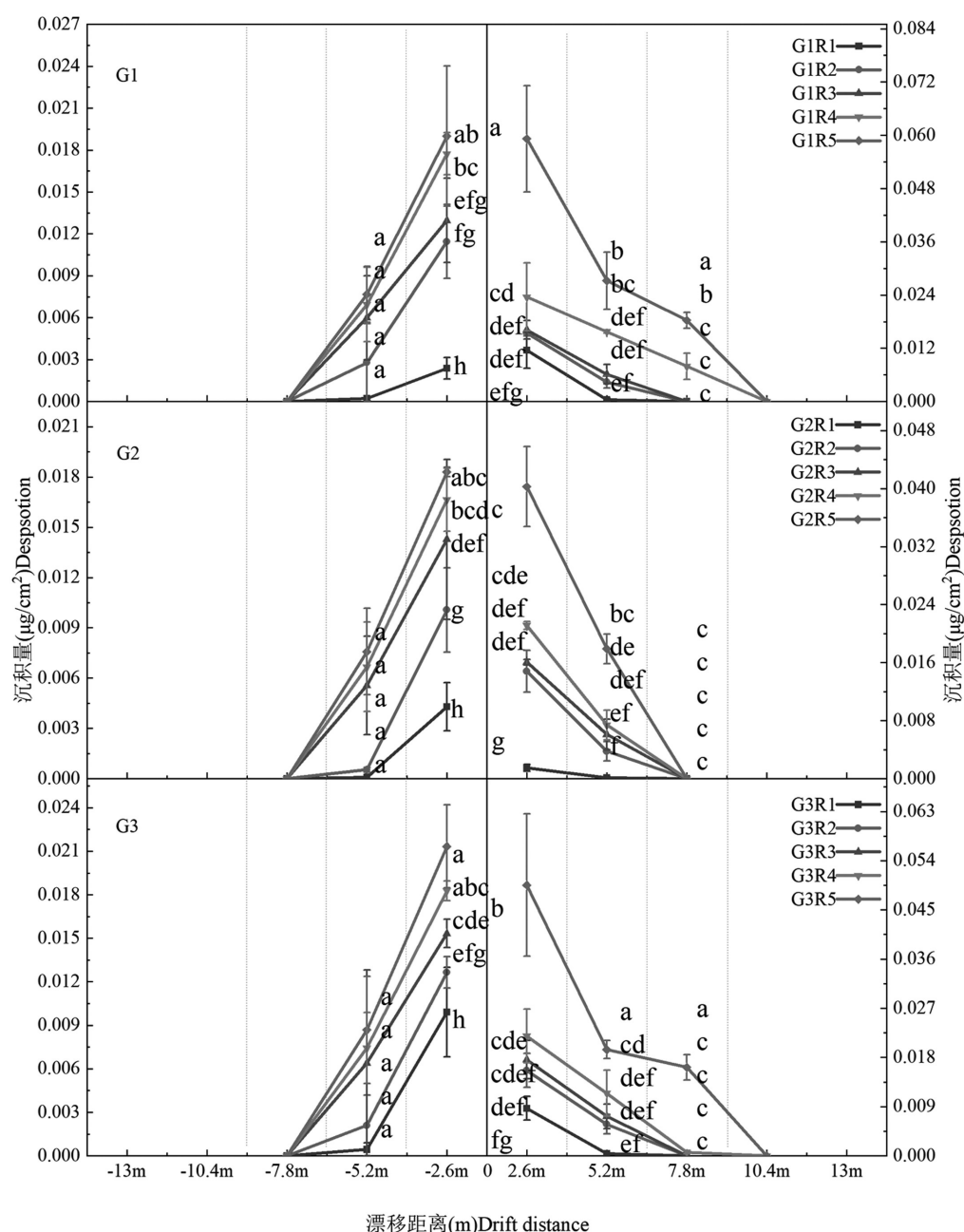
2.5 喷幅和喷液量对雾滴漂移特性的影响

由图4可知,在无人机喷施靶区的东、西两侧非靶区,不同处理组合作业后的雾滴漂移特性,均表现为西侧漂移雾滴沉积量显著高于东侧,且西侧雾滴漂移的距离也大于东侧,西侧靶区在10.4 m采集点位置上仍有雾滴漂移出现,而东侧观测到的最远雾滴漂移位置在7.8 m。同时,在不同喷幅条件下,随着喷液量的增大,雾滴漂移量均有所增加,且在2.6~7.8 m采集点各处理组合间差异显著。在喷液量为R5时,西侧非靶区G1、G2、G3喷幅采集点均在2.6 m位置时雾滴漂移量达到最大,分别为0.059、0.040、0.049 ug/cm²。当无人机以G2喷幅进行喷洒时,东西两侧最大漂移距离均在7.8 m的采集点位置,西侧漂移距离小于G1和G3喷幅。

3 结论与讨论

大量研究表明,农用无人机喷施作业的雾滴沉积受风速、作物形态结构、作业参数、助剂等影响较

大。若参数设置或操作控制不当,会导致药液滴漏、雾滴漂移等药液损失现象发生,不仅会使作业效果大大降低,还会造成农业资源过度消耗和农业生态环境的负面影响。农用无人机的喷施效果检测与评估一直是航化作业领域的研究热点与难点。袁会珠等^[20]报道认为,适宜的雾滴覆盖密度、沉积量即可产生良好的防治效果。Wang等^[21]测试了3种施液量下小麦冠层的雾滴沉积特性,结果显示,喷液量为9.0 L/hm²时雾滴沉积量较小,喷液量为28.1 L/hm²时雾滴沉积量最大。胡红岩等^[22]研究认为,加大喷液量可以达到提高雾滴沉积的作用。胡传峰等研究表明,在飞行高度为2.5 m时,随着喷幅的增大雾滴密度呈先增加后降低的变化趋势。本试验以六旋翼农用无人机为喷施载体,研究结果发现,随着喷幅的增加,雾滴在玉米群体内的总沉积分布呈先增后降趋势,雾滴总沉积量、总覆盖率、总覆盖密度随着喷液量的增加而增大,喷幅和喷液量对雾滴总沉积分布特性的影响无明显交互效应。



注:同一竖列虚线数据后不同字母表示处理间差异达0.05显著水平;从上到下代表喷液量减少顺序;同一横图表示同一喷幅左右两侧漂移沉积结果;漂移距离数据为零的已省略。

Note: Different letters after the dashed line data in the same vertical column indicate a significant difference of 0.05. From top to bottom represents the order of liquid injection volume reduction; The same horizontal figure represents the drift deposition results on the left and right sides of the same jet amplitude. Omission of drift distance data of zero.

图4 不同处理组合下对玉米冠层雾滴漂移特性的影响

Fig.4 Effects of different treatment combinations on drift characteristics of fog droplets in maize canopy

前人在水稻田通过设置不同施药剂量和飞行作业高度试验,发现无人机作业后雾滴覆盖率和覆盖密度随水稻叶层下移逐渐减小;施液量也显著影响雾滴在水稻冠层各部位的覆盖密度,且随着施液量的增加,雾滴在水稻各叶层的雾滴覆盖密度呈增加趋势,并主要集中于上层和中层^[23]。本研究中,在喷

幅和喷液量共同作用下,雾滴沉积在玉米群体各叶层总体呈现A>B>C>D>E的分布特征,说明增大喷液量有助于增加玉米各部位叶层的雾滴沉积效果。与秦维彩和高圆圆等^[24]关于无人直升机的研究结果有所差异,这可能由于多旋翼无人机与直升机产生的下方风场强度不同,使玉米植株向四周倾斜的程

度有别,导致雾滴在群体内不同叶层的沉积分布特性存在差异。同时,本研究发现,随着叶层位置的下移,不同喷液量处理间雾滴覆盖率、覆盖密度和沉积量的差异逐渐缩小。根据农业航空作业质量技术指标规定的雾滴覆盖密度 ≥ 20 个/ cm^2 要求,R3水平下G2喷幅的A层达标;R4水平下G1~G2喷幅的A~B层和G3喷幅的A层达标;R5水平下G1、G3喷幅的A~C层达标,G2喷幅的A~D层达标。总体上G2喷幅下各叶层的雾滴沉积分布占优势。

无人机在施药过程中并不能全都落到植株上,雾滴漂移及地面流失、粒径较小的雾滴容易蒸发都是不利雾滴有效沉积的重要因子。玉米群体高达3 m,群体内叶层间相互交错,中下部叶片雾滴分布少、不均匀,同样制约玉米生育中后期农艺技术措施的防、促、控整体效果。郭祥雨等^[25]研究了喷头流量、飞行速度、飞行高度对棕榈树雾滴沉积的影响,发现喷头流量和飞行速度对地面损失量没有显著影响,而飞行高度对地面流失量有显著影响。本研究发现,随着喷液量的增多,不同程度增加了雾滴在玉米各部位叶片表面的沉积量,但雾滴在地面的流失也有增大趋势,且在G3R5处理下达最大值 0.065 ug/cm^2 。尽管作物叶片都有一定的持液能力,但超过一定的喷液量,药液就会发生聚集并产生流失^[26]。同时,雾滴沉积量变异系数在一定程度上可以反映雾滴分布的离散程度和均匀性。曾文等^[27]针对水稻减量施药防治稻纵卷叶螟的研究表明,冠层上部雾滴的均匀性明显优于冠层下部。在本研究中随着喷液量的增大,雾滴沉积量变异系数呈线性增长趋势,雾滴均匀性从A到E层依次变差^[28],且随着喷幅的增加,雾滴沉积分布均匀性总体呈先升后降趋势,且在G2喷幅时,玉米各部位叶层的雾滴沉积量变异系数均最小。这可能是当无人机喷幅过小会导致喷头角度较小,雾滴多集中于正下方附近,相邻喷头中间位置雾滴少,导致雾滴分布不均匀,喷幅之间衔接不佳;当无人机喷幅逐渐增大相邻喷头之间喷出雾滴更充分,沿喷杆方向不同位置雾滴沉积量差异减小,雾滴沉积均匀性能得到明显优化;当喷幅过大、喷头角度较大时,同样会引起边缘雾滴沉积分布不均问题^[29]。

已有研究认为,小雾滴可以更好穿透到植株中下部^[30,31]。也有部分研究认为,提高一定的飞行高度会使雾滴穿透性更好^[32]。本研究发现,以玉米各叶层与顶部叶层雾滴沉积量比值作为衡量雾滴沉积量穿透性的指标时,多旋翼无人机的沉积量穿透性比例在24.46%~90.32%,雾滴沉积量穿透性上部叶

层高于下部叶层,E层叶片介于24.46%~58.06%,且随着喷液量的升高雾滴穿透性整体上有下降趋势。此外,雾滴漂移特性也是衡量农用无人机雾滴作业质量的重要因素之一。陈盛德等^[33]通过探讨飞行高度对水稻冠层的雾滴沉积分布试验的结果表明,飞行高度增加将引起雾滴漂移增大,在同一作业高度下,不同采集带上雾滴沉降趋势相同。本研究中,G2喷幅下雾滴漂移距离最小,优于G1和G3喷幅,各喷幅条件下随着喷液量的增加雾滴漂移量均增大,在G1喷幅R5水平喷施条件下,西侧非靶区2.6 m采集点处的雾滴漂移沉积量最大,为 0.059 ug/cm^2 ,不同处理组作业后的雾滴漂移特性,均表现为西侧漂移雾滴沉积量显著高于东侧。这可能由于无人机作业时外界风场方向为东南风,因此,可以推断此现象主要是由侧风风场因素引起的,也进一步说明了航空喷施作业的雾滴容易受外界风场因素影响^[34]。

综上可知,喷幅和喷液量是影响玉米灌浆期多旋翼农用无人机作业后雾滴沉积分布的关键参数,结合不同处理组合下雾滴在玉米群体内的沉积分布特性,此时期无人机作业的最佳喷幅为5 m。随着喷液量的增加,玉米群体内不同部位叶层的雾滴沉积量、覆盖率和覆盖密度有所增加,满足最小沉积需求的叶层部位由上至下逐渐增多,在一定范围内,喷液量越大,飞行速度越慢,作业效率降低,雾滴沉积量均匀性、穿透性变差,地面流失、漂移增多,因此不宜追求过大的喷液量,应根据无人机作业的雾滴沉积特性,并结合喷施药剂的具体功能属性及田块周边环境条件等因素,确定适宜的喷液量以更好达到技术措施应有的防、促、控效果。

参考文献:

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50 (11): 1941-1959. (in Chinese)
- [2] 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 W C, XUE X Y, ZHOU L X, 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, 2014, 30(5): 50-56. (in Chinese)
- [3] 李鸿筠,刘浩强,冉春,等. 不同喷雾器械对柑橘害虫的防治研究[J]. 农机化研究,2015,37(4):150-154.
LI H J, LIU H Q, RAN C, et al. Studies on the control of 4 type of sprayers against citrus insect pests[J]. Research on Agricultural Mechanization, 2015, 37(4): 150-154. (in Chinese)

- [4] 闫晓静,褚世海,杨代斌,等. 给农业插上科技的翅膀:植保无人机低容量喷雾技术助力农药减施增效[J]. 植物保护学报, 2021, 48(3):469-476.
YAN X J, CHU S H, YANG D B, et al. Agriculture on the wings of science and technology: plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) low-volume spraying technology reduces pesticide use and boosts control efficacy[J]. Journal of Plant Protection, 2021, 48(3): 469-476. (in Chinese)
- [5] 郭爽,兰玉彬,许童羽,等. 寒地玉米植保无人机航空施药雾滴沉积效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(4):451-459.
GUO S, LAN Y B, XU T Y, et al. Droplet deposition effectiveness of plant protection UAV aerial application on corn in cold region[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(4): 451-459. (in Chinese)
- [6] 张小秋,梁永检,宋修鹏,等. 植保无人机喷施甘蔗的雾滴沉积量与农药残留量分析[J]. 农药, 2020, 59(10):750-753.
ZHANG X Q, LIANG Y J, SONG X P, et al. Analysis on droplet deposition and pesticide residue of sugarcane sprayed by unmanned aerial vehicle[J]. Agrochemicals, 2020, 59(10): 750-753. (in Chinese)
- [7] 胡传峰. 植保无人机作业参数对茶树冠层雾滴沉积分布特性的影响[J]. 种业导刊, 2022(5):4.
HU C F. Effect of plant protection UAV operating parameters on the characteristics of droplet deposition and distribution in tea canopy [J]. Journal of Seed Industry Guide, 2022(5): 4. (in Chinese)
- [8] YAO W, LAN Y, WEN S, et al. Evaluation of droplet deposition and effect of variable-rate application by a manned helicopter with AG-NAV Gva system[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(1): 172-178.
- [9] 黄曦泽,梁晓宇,任赛豪,等. 喷施参数对四旋翼植保无人机雾滴在橡胶林中分布的影响[J]. 热带作物学报, 2022(6):43.
HUANG X Z, LIANG X Y, REN S H, et al. Effects of spraying parameters of four-rotor plant protection uav on droplets distribution in rubber plantations[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022(6): 43. (in Chinese)
- [10] 陈盛德,兰玉彬,周志艳,等. 小型植保无人机喷雾参数对橘树冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 97-102.
CHEN S D, LAN Y B, ZHOU Z Y, et al. Effects of spraying parameters of small plant protection UAV on droplets deposition distribution in citrus canopy[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(5): 97-102. (in Chinese)
- [11] 刘德江,龚艳,王果,等. 果园航空喷雾的农药沉积分布比较[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6):207-211.
LIU D J, GONG Y, WANG G, et al. Comparison of pesticide deposition distribution in orchard aviation spray[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(6): 207-211. (in Chinese)
- [12] 杨莉,施英俊,冯宏祖,等. B-7451型直升机喷雾参数对枣树冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(3):338-346.
YANG L, SHI Y J, FENG H Z, et al. Effect of flight parameters of B-7451 helicopter on distribution pattern of droplet deposition in jujube canopy[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(3): 338-346. (in Chinese)
- [13] 王冰洁,潘波,姜蕾,等. 植保无人机作业参数对雾滴在火龙果树冠层沉积分布的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(10):101-109.
WANG B J, PAN B, JIANG L, et al. Effects of spraying parameters of plant protection unmanned aerial vehicle on deposition distribution of droplets in pitaya canopy[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(10): 101-109. (in Chinese)
- [14] 潘波,姜蕾,王冰洁,等. 飞行参数对六旋翼植保无人机雾滴在荔枝树冠层沉积分布的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(1):213-219.
PAN B, JIANG L, WANG B J, et al. Effects of flight parameters of diesel six-rotor UAV on deposition distribution of fogdrops in litchi tree canopy[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(1): 213-219. (in Chinese)
- [15] 翁晓星,徐锦大,赵晋,等. 多旋翼无人机辅助籼粳杂交稻制种授粉研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9):24-29.
WENG X X, XU J D, ZHAO J, et al. Study on seed production and pollination of indica-japonica hybridrice assisted by multi-rotor UAV[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 24-29. (in Chinese)
- [16] 包斐,韩海亮,徐红星,等. 植保无人机喷雾参数组合对鲜食玉米草地贪夜蛾防效的影响[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(10): 51-56.
BAO F, HAN H L, XU H X, et al. Effect of plant protection UAV spray parameter combination on control efficiency of Armyworm in fresh corn grassland[J]. China Plant Protection Guide, 2021, 41(10): 51-56. (in Chinese)
- [17] ZHANG S, QIU B, XUE X, et al. Effects of crop protection unmanned aerial system flight speed, height on effective spraying width, droplet deposition and penetration rate, and control effect analysis on wheat aphids, powdery mildew, and head blight[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 712.
- [18] WANG Z, HUSSIAN M, HUANG G, et al. Better droplet deposition and internode shortening effects of plant growth regulator edah on maize applied by small unmanned aerial vehicle than electric knapsack sprayer[J]. Agriculture, 2022, 12(3): 404.
- [19] 中国民用航空总局运输管理司. 中华人民共和国民用航空行业标准:第一部分农业航空作业质量技术指标:MH/T1002-1995[S]. 北京:中国民用航空局, 1995:11.
- [20] 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, 41(6):9-16.
YUAN H Z, WANG G B. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. Plant Protection, 2015, 41(6): 9-16. (in Chinese)
- [21] WANG G B, YU B L, QI H, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle(UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat[J]. Pest Management Science, 2019, 75(6): 1546-1555.
- [22] 胡红岩,任相亮,姜伟丽,等. 植保无人机棉田喷洒农药沉积分布研究[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(5):59-64.
HU H Y, REN X L, JIANG W L, et al. Pesticide spray distribution of plant protection UAV in cotton field[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(5): 59-64. (in Chinese)

- [23] 韩冲冲,李飞,李保同,等. 无人机喷施雾滴在水稻群体内的沉积分布及防效研究[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(1): 58-67.
HAN C C, LI F, LI B T, et al. A study on deposition distribution of droplets by UAV spray in rice population and its efficacy[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41(1): 58-67. (in Chinese)
- [24] 高圆圆,张玉涛,赵西城,等. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. 植物保护, 2013, 39(2): 152-157.
GAO Y Y, ZHANG Y T, ZHAO Y C, et al. Primary studies on spray droplet distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle(UAV) against the corn borer[J]. *Plant Protection*, 2013, 39(2): 152-157. (in Chinese)
- [25] 郭祥雨,薛新宇,秦维彩,等. 植保无人机作业参数对棕榈树雾滴沉积的影响[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 35-40.
GUO X Y, XUE X Y, QIN W C, et al. Effect of operation parameters of plant protection UAV on droplet deposition of palmtree[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(6): 35-40. (in Chinese)
- [26] 袁会珠,齐淑华,杨代斌. 药液在作物叶片的流失点和最大稳定持留量研究[J]. 农药学学报, 2000, 2(4): 66-71.
YUAN H Z, QI S H, YANG D B. Study on the point of run-off and the maximum retention of spray liquid on crop leaves[J]. *Chinese Journal of Pest Iicide Science*, 2000, 2(4): 66-71. (in Chinese)
- [27] 曾文,邓继忠,高启超,等. 用P20型植保无人机减量施药防治稻纵卷叶螟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 53-59.
ZENG W, DENG J Z, GAO Q C, et al. P20 plant protection UAV to control *enaphalocrocis medinalis* by reduced pesticide application [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(15): 53-59. (in Chinese)
- [28] 李艳大,叶春,曹中盛,等. 无人机与人工喷施雾滴在水稻冠层内沉积特征及效益比较[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(5): 513-518.
LI Y D, YE C, CAO Z S, et al. Comparison of droplet deposition characteristics in rice canopy and benefit between unmanned aerial vehicle spray and artificial spray[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(5): 513-518. (in Chinese)
- [29] 王昌陵,宋坚利,何雄奎,等. 植保无人机飞行参数对施药雾滴沉积分布特性的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 109-116.
WANG C L, SONG J L, HE X K, et al. Effect of flight parameters on distribution characteristics of pesticide spraying droplets deposition of plant-protection unmanned aerial vehicle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 109-116. (in Chinese)
- [30] KNOCHE M. Effect of droplet size and carrier volume on performance of foliage-applied herbicides[J]. *Crop Protection*, 1994, 13(3): 163-178.
- [31] WOLF R E, DAGGUPATI N P. Nozzle type effect on soybean canopy penetration[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(1): 23-30.
- [32] 潘波,王冰洁,姜蕾,等. 两种植保无人机对火龙果冠层的作业参数优化[J]. 植物保护学报, 2021, 48(3): 528-536.
PAN B, WANG B J, JIANG L, et al. Optimization of the operational parameters of two types of plant protection unmanned aerial vehicles(UAVs) application to the pitaya canopy[J]. *Journal of Plant Protection*, 2021, 48(3): 528-536. (in Chinese)
- [33] 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 S D, LAN Y B, LI J Y, 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*, 2016, 32(17): 40-46. (in Chinese)
- [34] 陈盛德,兰玉彬, F B K, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105-113.
CHEN S D, LAN Y B, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 105-113. (in Chinese)

(责任编辑: 栾天宇)