

# 植保无人机雾滴飘移率影响因素的Meta分析



李卓成<sup>1</sup> 杨碧菲<sup>1</sup> 刘亚佳<sup>2</sup> 何雄奎<sup>2</sup> 李红军<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学图书馆,北京 100083; 2. 中国农业大学理学院,北京 100193)

**摘要:** 为明确植保无人机雾滴飘移的影响因素及其规律,采用Meta分析方法对22篇论文中的187组数据进行提取和分析。结果显示:雾滴直径与雾滴飘移呈负相关关系,风速、飞行高度和飞行速度与其呈正相关关系;风速和雾滴直径对雾滴飘移的影响要大于飞行速度和飞行高度;0~2 m近飘移距离的雾滴飘移受到的影响比远距离更复杂。基于统计数据,该文确定植保无人机最佳风速不超过4 m/s,最佳飞行高度为2~3 m、最佳飞行速度为2~4 m/s。

**关键词:** 植保无人机; 雾滴飘移; Meta分析; 飘移规律; 影响因素

## Meta analysis of influencing factors on droplet drift rate of plant protection unmanned aerial vehicle

Li Zhuocheng<sup>1</sup> Yang Bifei<sup>1</sup> Liu Yajia<sup>2</sup> He Xiongkui<sup>2</sup> Li Hongjun<sup>1\*</sup>

(1. China Agricultural University Library, Beijing 100083, China; 2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To clarify the influencing factors and their inherent laws governing droplet drift of agricultural plant protection unmanned aerial vehicle (UAV), a meta-analysis approach was employed to extract and analyze 187 datasets retrieved from 22 published papers. The results demonstrated that droplet diameter was negatively correlated with droplet drift, whereas wind speed, flight altitude, and flight speed showed positive correlations with this phenomenon; wind speed and droplet diameter exerted more substantial impacts on droplet drift than flight speed and flight altitude did; the influencing mechanisms of droplet drift within the short-distance range of 0–2 m were more intricate than those in long-distance scenarios. Based on the statistical data, this study has determined that the optimal operational wind speed for agricultural plant protection UAV should not exceed 4 m/s, the optimal flight altitude is 2–3 m, and the optimal flight speed ranges from 2 to 4 m/s.

**Key words:** plant protection UAV; droplet drift; Meta analysis; drift pattern; influencing factor

我国耕地面积约1.28亿 $\text{hm}^2$ ,每年病虫害发生面积超4.67亿公顷次,防治面积达5.67亿公顷次,植保防控压力很大(胡维月等,2022)。此外,地形复杂、劳动力短缺等问题严重,在新形势下传统背负式喷雾的作业方式难以应对上述挑战。植保无人机具有作业效率高、农药利用率高、安全可靠等特点,既能提升病虫害的防控能力,也能克服地形对喷洒作

业的限制,还能缓解劳动力不足,减少农药对操作人员的伤害(陈盛德等,2023)。因此,植保无人机将成为我国农业病虫害防控的主要工具。

在植保无人机应用的过程中,关于提升无人机作业性能的研究较多。在精准导航技术方面,利用图像处理等单一导航技术具有局限性,会影响施药精度(唐涛和孙强,2025),而利用惯性导航与视觉导

航组合则可使位姿数据更稳定,误差更小(于坤林, 2021);在路线规划方面,张之红(2023)采用视觉处理技术和大型稀疏线性方程组计算方法实现对障碍物定位和飞行轨迹动态规划;在导航系统方面,为植保无人机安装了我国自主研发的北斗导航定位系统(王高亮等, 2017)。雾滴的沉积与飘移是评价植保无人机作业效果的最终指标,因此提升雾滴沉积和降低雾滴飘移备受关注。例如,雾滴沉积会随飞行高度的增加而下降(周莉萍, 2017),而喷雾助剂、喷雾量、喷雾模式也会影响雾滴密度、覆盖率与穿透性(Shan et al., 2024);飞行速度、飞行方向、飞行高度、环境等因素影响植保无人机雾滴沉积(陈菁等, 2025),这些外部因素比较随机但可通过人为控制调整规避风险,避免对作业效果产生影响。影响雾滴飘移的因素较多,包括机具属性、药液属性、自然属性以及飞机状态等。雾滴大小和喷雾量显著影响雾滴的飘移(Lan et al., 2024);通常情况下雾滴越大,飘移越小,而影响雾滴大小的因素又包括溶液性质、喷头类型和喷雾压力等(林金元等, 2022)。自然风对雾滴飘移有着不可忽略的影响(鲁文霞等, 2021),而王潇楠等(2017)指出侧风风速对飘移率的影响大于无人机飞行高度和飞行速度。飞行速度和飞行高度是植保无人机的两个主要飞行参数,它们对飘移也产生一定影响;通常情况下降低飞行速度有助于提升喷雾飘移潜力(Wang et al., 2020);单旋翼植保无人机的飞行速度对雾滴飘移影响更明显,当飞行速度超过 5 m/s 时,机身后方雾滴飘移量显著增大(文晟等, 2018);飞行速度对雾滴尺寸也有显著影响,随飞行速度增加,靶标上的雾滴尺寸增大,从而间接影响雾滴飘移;飞行时无人机会在三维空间方向上产生分布不同的下洗气流,随飞行高度增加,下洗气流分布趋于分散,强度减弱,而随载荷增加,下洗气流更集中、强度更大(Zhan et al., 2022),这些下洗气流会对雾滴的飘移产生不同的影响,因此实际应用中需依据靶标植物的高度选择适宜的飞行高度。在此基础上,有些研究开始尝试定量分析环境风速及飞行参数对雾滴飘移特性的影响,例如石鑫等(2021)系统探讨了侧风条件下飞行高度和飞行速度变化对多旋翼植保无人机雾滴飘移率与飘移距离的影响规律。尽管在植保无人飞机雾滴飘移等方面的研究越来越深入,部分规律也得到阐述(Wang et al., 2021;唐虎等, 2025);但影响雾滴飘移的因素众多,各因素对飘移影响的关系仍不明确。

目前的研究多是基于特定参数下个体植保无人

机的测试结果,这些结果可以证明个体机具的性能和雾滴飘移情况(王娟等, 2019),但结果的普遍性较低,不能对其他机具或者不同作业条件下的雾滴飘移做出较准确的判断。而 Meta 分析方法通过对若干个案数据进行统计学分析可以获得可信度较高的结论(司星星等, 2025;庄万兰等, 2025),从而为进一步的科学研究或生产实践提供参考依据。基于此,本研究拟采用 Meta 分析方法探究植保无人机雾滴飘移分布规律、主要影响因素及各因素的影响能力,以期对雾滴飘移的研究提供新思路。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

文献收集:从 Web of Science、工程索引(Engineering Index, EI)、中国知网、万方数据 4 个数据库检索 2025 年 6 月 26 日期刊上发表的植保无人机相关的研究论文,中文检索式为(植保 AND 无人机) AND (雾滴 OR 飘移 OR 沉积),英文检索式为(plant protection OR crop protection) AND (unmanned air vehicle OR UAV OR drone OR unmanned helicopter OR unmanned aircraft system OR UAS OR remotely piloted aircraft OR PPA OR remotely piloted aircraft system OR PPAS OR unmanned aircraft OR UA OR autonomous aerial vehicle OR AAV) AND (droplet OR drift OR deposit\* )。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 数据提取及处理

共检索到 600 多篇研究论文,通过题目、关键词和摘要对其进行初步判断,对于符合要求的 326 篇文献进行全文下载,人工阅读下载的文献,对有雾滴飘移数据的 22 篇文献进行标记,用于人工数据的提取与分析。提取 22 篇文献的雾滴飘移或者飘移率、风速和风向、飞行速度和飞行高度、作物种类和高度、雾滴尺寸或雾滴大小分类、施药量、喷施压力、无人机类型、喷头类型等(表 1)。对于正文或者表格中的这些数据,直接记录;对于图中的这些数据,使用 WebPlotDigitizer 4.5 软件来获取;所有的这些数据均按照文献原始数据如实记录,共获得 187 组数据。为便于后续比较,本研究将风速、风向、飞行速度、飞行高度、雾滴大小按照区间进行分类,当数值介于某个区间时,就计入该类。由于各文献使用的计量单位、呈现的数据不一致,在对原始数据进行分类的基础上,本研究对各类数据进行标准化处理,以使各组数据可以进行比较。对于雾滴飘移

率,本研究指的是靶标范围之外的飘移雾滴量与靶标内喷施药液量的比值,即飘移率=飘移雾滴量/喷施药液量 $\times 100\%$ 。如果文献中提供的飘移率与本

研究定义一致,则直接记录该数据;如果文献中提供的是飘移量和喷雾量,则使用该公式计算飘移率。

表1 不同飘移距离下不同组别直径雾滴的飘移率比值

Table 1 Ratio of drift rates of droplets in different diameter groups under different drift distances

文献 Reference	是否有飘移数据 Availability of drift data	是否有风速 Availability of wind speed data	作物种类 Crop type	室内试验/室外试验 Laboratory test/field test	是否有飘移率 Availability of drift rate
Wang et al., 2021	是 Yes	是 Yes	/	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Lan et al., 2024	是 Yes	是 Yes	金椰子 Golden coconut	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Wang et al., 2020	是 Yes	是 Yes	/	室内试验(风洞试验) Laboratory experiment (wind tunnel experiment)	是 Yes
Zhan et al., 2022	是 Yes	是 Yes	棉花 Cotton	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
王潇楠等,2017 Wang et al., 2017	是 Yes	是 Yes	小麦 Wheat	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
王娟等,2019 Wang et al., 2019	是 Yes	是 Yes	槟榔 Areca nut	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Li et al., 2022	是 Yes	是 Yes	桃 Peach	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Brown & Giles, 2018	是 Yes	是 Yes	葡萄 Grape	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Xue et al., 2023	是 Yes	是 Yes	柑橘 Citrus	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Eun et al., 2024	是 Yes	是 Yes	水稻 Rice	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Chen et al., 2020	是 Yes	是 Yes	水稻 Rice	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Jerome et al., 2024	是 Yes	是 Yes	玉米、裸土 Maize, bare soil	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Baek et al., 2024	是 Yes	是 Yes	水稻 Rice	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Wang XN et al., 2018	是 Yes	是 Yes	小麦 Wheat	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Lou et al., 2018	是 Yes	否 No	棉花 Cotton	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Pan et al., 2025	是 Yes	是 Yes	芒果 Mango	室外试验和室内试验 Outdoor and laboratory experiments	是 Yes
Wang J et al., 2018	是 Yes	是 Yes	菠萝 Pineapple	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
Zeesan et al., 2024	是 Yes	是 Yes	棉花 Cotton	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
王志翀等,2020 Wang et al., 2020	是 Yes	是 Yes	/	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
王昌陵等,2020 Wang et al., 2020	是 Yes	是 Yes	葡萄 Grape	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes
石鑫等,2021 Shi et al., 2021	是 Yes	是 Yes	/	室外试验 Outdoor experiment	是 Yes

### 1.2.2 植保无人机雾滴飘移率的空间分布

在187组数据中,田间试验数据有147组,室内试验有40组。将靶标区域外的雾滴视为飘移雾滴,将到靶标边缘的距离视为飘移距离。按照飘移距离0~2、>2~4、>4~6、>6~8、>8~10、>10~15、>15~20、>20~25、>25~30和>30 m共10个区间统计植保无人机雾滴飘移率。

### 1.2.3 雾滴直径对植保无人机雾滴飘移率的影响

雾滴直径是影响雾滴飘移的重要因素。通常认为雾滴直径越大,抗飘移能力越强,而雾滴直径越小,越容易飘移。美国农业工程师学会将雾滴分为很细(50~150  $\mu\text{m}$ )、细(>150~240  $\mu\text{m}$ )、中等(>240~350  $\mu\text{m}$ )、粗(>350~400  $\mu\text{m}$ )、很粗(>400~500  $\mu\text{m}$ )和极粗(>500~660  $\mu\text{m}$ )6个等级。按照上述6个雾滴等级统计132组数据的植保无人机雾滴飘移率。

### 1.2.4 风速对植保无人机雾滴飘移率的影响

植保无人机喷雾作业的建议风速为3级风以下,即风速要小于5.4 m/s,否则雾滴飘移较严重。在统计到标明风速的162组数据中,有158组数据的风速未超过5.4 m/s,有4组风速超过5.4 m/s,最高风速为7.0 m/s。按照风速0~1.0、>1.0~2.0、>2.0~3.0、>3.0~4.0、>4.0 m/s五个区间分别统计162组数据的植物无人机雾滴飘移率。

### 1.2.5 飞行速度对植保无人机雾滴飘移率的影响

无人机飞行产生的紊流会干扰雾滴的运行轨迹,进而影响雾滴的飘移,因此主流植保无人机的建议飞行速度为3.0~7.0 m/s。在统计到标明飞行速度的147组数据中,低于3.0 m/s的数据有36组,其他111组的飞行速度介于3.0~5.4 m/s之间。按照飞行速度>0~2.0、 $\geq 2.0$ ~3.0、 $\geq 3.0$ ~4.0和 $\geq 4.0$  m/s四个区间统计147组数据的植物无人机雾滴飘移率。

### 1.2.6 飞行高度对植保无人机雾滴飘移率的影响

植保无人机建议的飞行高度为2~5 m,飞行高度过低会造成雾滴分布不均匀,飞行高度过高会增加雾滴飘移。在统计到标明飞行高度的123组数据中,低于2 m的数据有32组,高于4 m的数据有23组,其他68组的飞行高度介于2~4 m之间。按照飞行高度>0~2、 $\geq 2$ ~3、 $\geq 3$ ~4和 $\geq 4$  m四个区间分别统计123组数据的植保无人机雾滴飘移率。

### 1.2.7 影响植保无人机雾滴飘移率的因素比较

雾滴飘移是多种因素综合影响的结果。为探究雾滴直径、风速、飞行速度、飞行高度对飘移率的影响,将雾滴直径、风速、飞行速度、飞行高度按照从小到大的顺序排列,分别计算它们与雾滴飘移率之间

的相关系数。由于不同距离内的飘移有较大差异,并且10 m之外的飘移相当少,且可获得数据较少,因此本文只列出10 m内的4个区间的相关系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 植保无人机雾滴飘移率的空间分布

飘移距离小于6 m的雾滴飘移是绝大部分试验的重点关注对象,其中飘移距离为0~2、>2~4、>4~6 m的分别有120、160和145组数据;飘移距离>6~20 m的雾滴飘移是次要关注对象,其中飘移距离>6~8 m的数据有102组数据,飘移距离为>8~10、>10~15和>15~20 m的数据分别有97、86和74组;飘移距离超过20 m的数据只有33组(图1),其原因是长距离飘移的雾滴极少,很少有研究人员关注。当飘移距离为0~2 m时雾滴飘移率高达13.7%,当飘移距离为>2~4 m时雾滴飘移率快速下降到7.8%,当飘移距离为>4~8 m时雾滴飘移率在5.0%上下浮动,当飘移距离为>8~15 m时雾滴飘移率略高于2.0%,而飘移距离超过15 m时雾滴飘移率小于2.0%且保持稳定,表明雾滴飘移率随着飘移距离的增加而变小,并且短距离内飘移率的下降幅度明显(图1)。

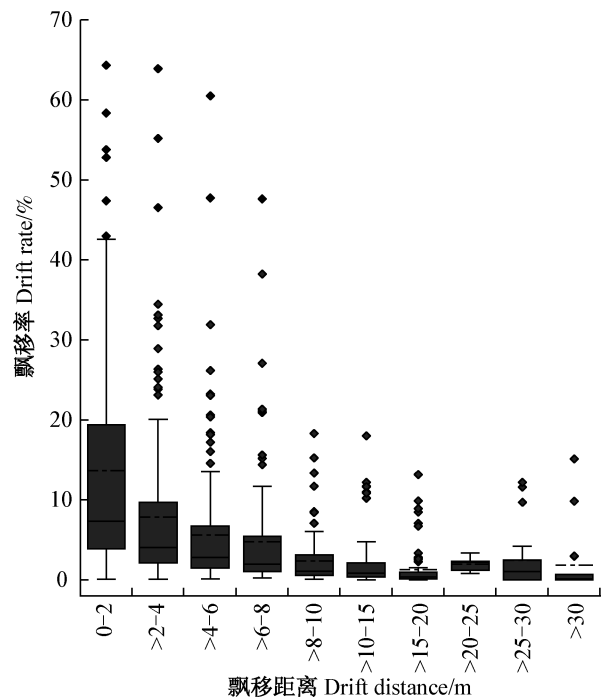


图1 植保无人机雾滴飘移率的箱体分布图

Fig. 1 Box plot of droplet drift rate of plant protection UAV

### 2.2 雾滴直径对植保无人机雾滴飘移率的影响

很细雾滴飘移率是细雾滴飘移率的2.00~6.00倍,是中雾滴的2.00~10.00倍,是粗雾滴的3.00~22.00倍,

并且差异性随着距离的增加而变大(表2)。飘移率随雾滴直径的增加而变小以及不同直径雾滴差异性随着飘移距离的增加而变大的现象也显著存在于细雾滴、中雾滴、粗雾滴和很粗雾滴之间(表2)。很粗

雾滴及极粗雾滴的飘移和远距离的雾滴飘移有限,飘移率不超过5.0%,大部分在1.0%上下浮动,不是研究关注的重点。

表2 不同飘移距离下不同组别直径雾滴的飘移率比值

Table 2 The ratio of drift rates for droplets of different diameters across different groups and at different drift distances

飘移距离 Drift distance/m	很细雾滴与其他雾滴的比值 Ratio of very fine droplets to other droplet classes			细雾滴与其他雾滴的比值 Ratio of fine droplets to other droplet classes	
	细雾滴 Fine droplet	中雾滴 Medium droplet	粗雾滴 Coarse droplet	中雾滴 Medium droplet	粗雾滴 Coarse droplet
0~2	2.00	2.30	3.48	1.15	3.15
>2~4	2.47	3.62	11.15	3.56	11.42
>4~6	2.53	3.74	11.55	5.34	11.41
>6~10	4.21	8.20	21.07	2.13	10.08
>10	5.84	9.61	15.30	2.64	7.69

飘移距离 Drift distance/m	中雾滴与其他雾滴的比值 Ratio of medium droplets to other droplet classes			粗雾滴与很粗雾滴的 比值 Ratio of coarse droplets to very coarse droplet classes	很粗雾滴与极粗雾 滴的比值 Ratio of very coarse droplets to extremely coarse droplet classes
	粗雾滴 Coarse droplet	很粗雾滴 Very coarse droplet	极粗雾滴 Extremely coarse droplet		
0~2	1.50	2.02	19.43	-	10.54
>2~4	3.51	3.51	17.47	0.84	4.19
>4~6	2.68	10.08	51.76	1.00	4.02
>6~10	6.10	9.84	12.03	1.00	1.11
>10	6.75	0.09	0.13	-	4.13

-表示没有相应数据。- indicates no corresponding data.

### 2.3 风速对植保无人机雾滴飘移率的影响

当风速从1.0 m/s增加到4.0 m/s时,植保无人机雾滴飘移率从4.6%增加到19.9%(图2)。当飘移距离为0~2.0 m时雾滴飘移率随风速增加而稳步上升,其中当风速为0~1.0 m/s时雾滴飘移率为9.1%,当风速分别为>1.0~2.0、>2.0~3.0和>3.0~4.0 m/s时雾滴飘移率分别为11.5%、17.8%和21.4%,当风速超过4.0 m/s时雾滴飘移率高达33.4%(图2)。当飘移距离超过10 m时,3个较低风速区间的雾滴飘移率仍呈现递增的趋势,但两个较高风速区间的雾滴飘移率有所下降(图2),其原因可能是,飘移距离越远,雾滴飘移量较低,而风速对飘移的影响就更微乎其微。

### 2.4 飞行速度对植保无人机雾滴飘移率的影响

当飞行速度分别为>0~2.0、≥2.0~3.0、≥3.0~4.0和≥4.0 m/s时,植保无人机雾滴飘移率的平均值分别为14.7%、4.1%、4.0%和8.2%,即较低和较高的飞行速度会产生较多的雾滴飘移(图3)。在不同飘移距离中,当飞行速度小于2.0 m/s时植保无人机雾滴

飘移率均最大,其中飘移距离为0~2.0 m时雾滴飘移率高达49.3%,远高于同飘移距离的其他3组飞行速度时的雾滴飘移率,也远高于飘移距离超过2.0 m的相同飞行速度时的雾滴飘移率(图3)。当飞行速度为≥2.0~4.0 m/s时植保无人机雾滴飘移率相差不大,在0~2、>2~4、>4~6、>6~10和>10 m五个距离区间的雾滴飘移率分别在11%、6%、3%、2%和1%上下浮动;但当飞行速度≥4.0 m/s时,雾滴飘移率有所增加,在0~2、>2~4、>4~6、>6~10和>10 m五个距离区间的雾滴飘移率分别为17.2%、11.0%、8.1%、5.8%和3.6%(图3)。表明适宜的飞行速度有利于减少雾滴飘移。

### 2.5 飞行高度对植保无人机雾滴飘移率的影响

当飞行高度分别为>0~2、≥2~3、≥3~4和≥4 m时,植保无人机雾滴飘移率的平均值分别为4.1%、2.6%、8.3%和7.2%,表明当飞行高度较高时雾滴飘移率较大(图4)。在不同飘移距离中,当飞行高度为≥2~3 m时,植保无人机雾滴飘移率均最低,在0~2、>2~4、>4~6、>6~10和>10 m五个飘移距离区间的

飘移率分别为8.0%、4.1%、2.4%、1.3%和0.5%；当飞行高度为>0~2 m时雾滴飘移率较飞行高度为≥2~3 m时要高(图4),可能是喷头与靶标之间的距离过近,气流运动较激烈,有较多的雾滴发生飘移。当飞行高度超过3 m时,雾滴飘移率明显增加,其中当飞行高度为≥3~4 m时,在0~2、>2~4、>4~6、>6~10和>10 m五个飘移距离区间的雾滴飘移率分别为17.1%、

10.4%、7.2%、6.5%和4.4%；而飞行高度超过4 m时,近飘移距离(0~2 m和>2~4 m)的飘移率分别为20.7%和8.20%,比飞行高度为≥3~4 m时的雾滴飘移率要大,但当距离为>4~6 m时雾滴飘移率与飞行高度≥3~4 m时相当,而当飘移距离超过6 m时雾滴飘移率又低于飞行高度为≥3~4 m的飘移率(图4)。表明适宜的飞行高度可以减少雾滴飘移。

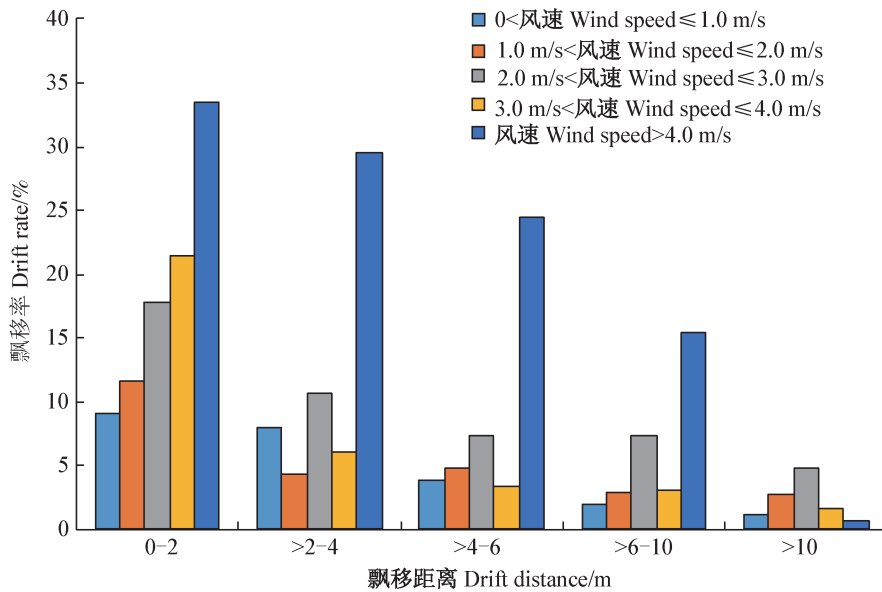


图2 不同风速下植保无人机雾滴飘移率

Fig. 2 Droplet drift rate of agricultural plant protection UAV under different wind speeds

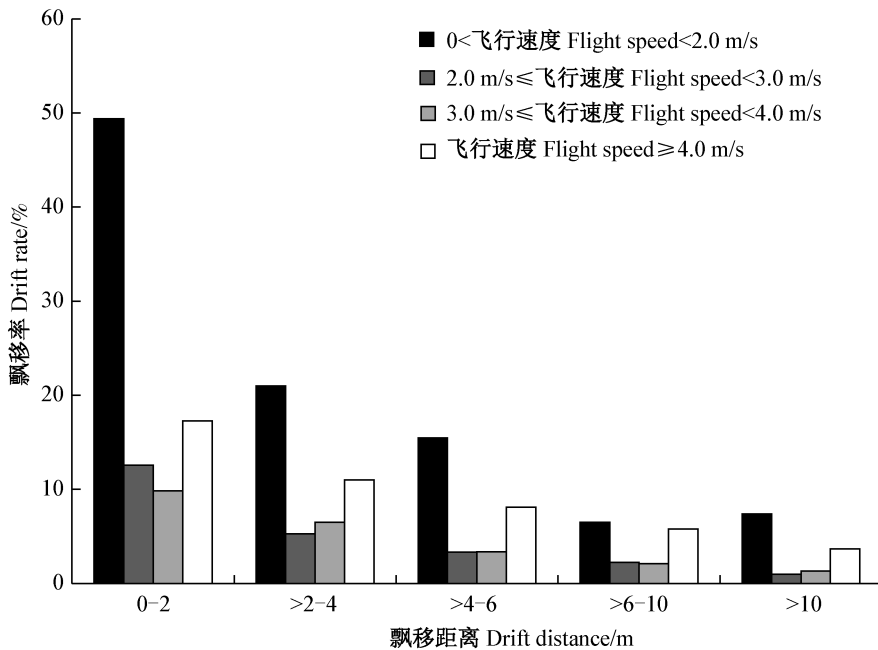


图3 不同飞行速度下植保无人机雾滴飘移率

Fig. 3 Droplet drift rates of agricultural plant protection UAV under different flight speeds

2.6 影响植保无人机雾滴飘移率的因素比较

在雾滴直径、风速、飞行速度、飞行高度4个影

响因素中,只有雾滴直径与植保无人机雾滴飘移率相关系数为负数,为-0.20,其他3个因素与植保无

人机雾滴飘移率的相关系数均为正数,分别为0.29、0.08、0.19(表3),表明雾滴直径越大,雾滴飘移率越少,而风速大、飞行速度快、飞行高度高均会增加雾

滴飘移率;与雾滴直径和风速相比,飞行速度与植保无人机雾滴飘移率的相关系数非常低(表3),表明飞行速度对植保无人机雾滴飘移率的影响相对较小。

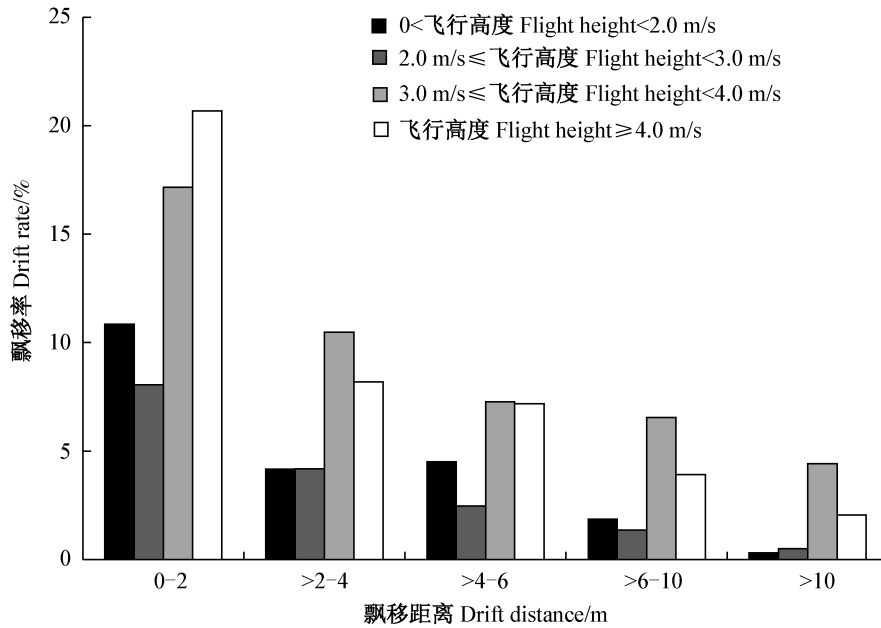


图4 不同飞行高度下植保无人机雾滴飘移率

Fig. 4 Droplet drift rates of agricultural plant protection UAV at different flight altitudes

当飘移距离为0~2 m时,雾滴直径、飞行速度与植保无人机雾滴飘移率的相关系数极低,分别为-0.03和-0.04,与当飘移距离为>2~4、>4~6、>6~10 m时雾滴直径、飞行速度与植保无人机雾滴飘移率的相关系数有较大差异(表3),表明飘移距离为0~2 m时雾滴飘移率的影响因素较复杂。当飘移距离不同

时,风速与植保无人机雾滴飘移率的相关系数比较稳定,均在0.30左右(表3),表明飘移距离为0~10 m时风速对植保无人机雾滴飘移率有持续稳定的影响。飞行高度与植保无人机雾滴飘移率的相关系数随着飘移距离的增加而变小(表3),其中飞行高度对其影响主要集中在0~4 m飘移距离范围内。

表3 雾滴直径、风速、飞速、飞高与植保无人机雾滴飘移率的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between droplet diameter, wind speed, flight speed, flight altitude and droplet drift rate of agricultural plant protection UAV

影响因素 Influencing factor	与不同飘移距离的飘移率的相关系数 Correlation coefficient with drift rates at different distances				
	0-10 m	0-2 m	>2-4 m	>4-6 m	>6-10 m
雾滴直径 Fog droplet diameter	-0.20	-0.03	-0.24	-0.26	-0.29
风速 Wind speed	0.29	0.29	0.33	0.33	0.32
飞行速度 Flight speed	0.08	-0.04	0.11	0.14	0.18
飞行高度 Flight height	0.19	0.24	0.20	0.10	0.16

雾滴直径介于60~527 μm之间,风速介于0.70~3.36 m/s之间,飞行速度介于1.0~5.0 m/s,飞行高度介于1.5~5.0 m之间。Droplet diameter ranges from 60 to 527 μm, wind speed ranges from 0.70 to 3.36 m/s, fly speed ranges from 1.0 to 5.0 m/s, and fly altitude from 1.5 to 5.0 m.

### 3 讨论

本研究结果显示随距离增加而雾滴飘移率迅速衰减,与多数田间试验结果一致。例如,Brown &

Giles (2016)研究发现距靶标边缘7.5 m处飘移沉积量仅为理论施药量的0.4%,距靶标边缘48 m处降至0.03%,约82%的飘移物质集中在田间边缘7.5 m范围内沉降;Xue et al.(2023)仅聚焦大疆 T40 机型在特

定作业参数(飞行高度 2~4 m、液滴粒径 60~140  $\mu\text{m}$ )下的飘移特性。与部分单一机型的试验相比,本研究结果通过 Meta 分析发现飘移距离小于 2 m 内的飘移率总体高于某些特定试验的结果(Pan et al., 2025),究其原因可能是,Meta 分析整合了 24 种不同飞行条件的组合(石鑫等, 2021)、搭载两种喷头的 4 种典型植保无人机(王昌陵等, 2020)的多种机型及多样的作业条件,例如较强下洗流场与细雾滴工况,这导致近地飘移整体偏高。此外,本研究通过 Meta 分析显示,在植保无人机研发与作业规范制定中应尤其重视 2 m 内飘移的控制。

本研究结果显示风速增大、雾滴减小均会导致飘移增加。Zeeshan et al. (2024) 研究证实较大粒径的雾滴能显著降低飘移率,同时提升棉田冠层内的沉积效果,而粒径较小雾滴的飘移风险显著升高。此外,本研究发现风速超过 4.0 m/s 后雾滴飘移明显,而 Wang et al. (2023) 报道当风速超过 3.0~3.5 m/s 后雾滴的飘移明显,略低于本研究结果报道的阈值风速。本研究通过 Meta 分析发现雾滴直径对飘移有负向影响,而王国宾等 (2021) 研究发现直径为 150~200  $\mu\text{m}$  的雾滴在覆盖度与沉积量上表现最优,且在该粒径范围内雾滴飘移风险相对可控。因此,在实践中应结合具体作物与药剂类型确定适宜粒径范围,雾滴粒径的选择需兼顾飘移防控与沉积效果。此外,本研究指出飞行速度与飞行高度对于雾滴飘移的影响均为次要因素。而 Lou et al. (2018) 研究表明飞行高度对无人机喷雾液滴飘移有极显著的影响,与本研究结果存在差异。本研究关于 2 m 内近距离飘移的复杂性,与近年来关于无人机湍流场影响的研究趋势相吻合。

本研究首次利用 Meta 方法而非具体试验对植保无人机的雾滴飘移进行研究,存在以下不足:第一,影响因素不够全面,例如喷雾压力、喷头类型、助剂类型等未纳入考虑范畴;第二,数据的差异化重视不够,例如尽管 0.5、1.0 和 1.5 m 飘移距离内的数据存在差异,但为统计需要,这些数据都被统一到 0~2 m 区间,而忽略自身的差异性;第三,Meta 分析方法所得出的结论是基于多组数据的统计结果,不能直接套用到个体植保无人机在特定作业条件下的雾滴飘移,即不能代替真实的测试结果。尽管统计数据存在以上不足,但所得结论可用于以下研究:首先在研究层面能给植保无人机研发人员提供雾滴飘移率的事先预判,不需要从零开始对各个参数逐一进行测试,而在较小的阈值范围内开展研究;其次在实践层

面能够给植保无人机喷雾提供更理想的作业条件,即在符合植保无人机作业国家标准的情况下,最佳风速不超过 4 m/s,最佳飞行高度为 2~3 m,最佳飞行速度为 2~4 m/s。孙涛等 (2021) 研究结果显示当飞行高度为 2 m、飞行速度为 4 m/s 时植保无人机在保证作业效率的同时也能维持较好的雾滴覆盖与防治效果,与本研究建议的作业窗口基本吻合。下一步研究可结合张瑞瑞等 (2021) 所提的格子玻尔兹曼方法高精度仿真与实时监测技术,进一步融合多源数据,构建更全面的飘移预测模型,推动植保无人机在精准施药、减药飘移与智能监管方面的深入应用。

### 参 考 文 献 (References)

- Baek JW, Eun HR, Kim SH, Lee YH, Jeong MJ, Han XZ, Min YG, Noh HH, Shin Y. 2024. Reduction of pesticide dosage and off-target drift with enhanced control efficacy in unmanned aerial vehicle-based application using lecithin adjuvants. *Pest Management Science*, <https://doi.org/10.1002/ps.8551>
- Brown CR, Giles DK. 2018. Measurement of pesticide drift from unmanned aerial vehicle application to a vineyard. *Transactions of the ASABE*, 61(5): 1539–1546
- Chen J, He XK, Shan HD, Han L, Su WB, Zhang X. 2025. Research progress on the deposition effect of plant protection UAV droplets. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, (3): 67–68 (in Chinese) [陈菁, 何雄奎, 山弘道, 韩雷, 苏文博, 张旭. 2025. 植保无人机雾滴沉积效果研究进展. *农业科技与装备*, (3): 67–68]
- Chen SD, Lan YB, Zhou ZY, Ouyang F, Wang GB, Huang XY, Deng XL, Cheng SN. 2020. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, 10(2): 195
- Chen SD, Liao LJ, Xu XJ, Chen WR, Li ZH, Zhou ZY, Lan YB. 2023. Research status and trends of plant protection UAV and its key technology of spraying in China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 54(4): 502–512 (in Chinese) [陈盛德, 廖玲君, 徐小杰, 陈威任, 黎志宏, 周志艳, 兰玉彬. 2023. 中国植保无人机及其施药关键技术的研究现状与趋势. *沈阳农业大学学报*, 54(4): 502–512]
- Eun HR, Kim SH, Lee YH, Kim SM, Lee YJ, Jung HY, Min YG, Noh HH, Shin Y. 2024. Comparison of off-target pesticide drift in paddy fields from unmanned aerial vehicle spraying using cellulose deposition sampler. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 285: 117075
- Hu WY, Xi YQ, Yin XM. 2022. Research progress on pesticide application technology of agricultural plant protection UAV in China. *Modern Agricultural Science and Technology*, (10): 95–99 (in Chinese) [胡维月, 席玉强, 尹新明. 2022. 中国农用植保无人机施药技术研究进展. *现代农业科技*, (10): 95–99]
- Jerome GF, He QW, Donaldson F, Gottesbueren B, Wang GB, Lan YB, Gao BB, Gan WJ, Jiang YN, Laabs V. 2024. Evaluating spray

- drift from uncrewed aerial spray systems: a machine learning and variance-based sensitivity analysis of environmental and spray system parameters. *Science of the Total Environment*, 934: 173213
- Lan XG, Wang J, Chen PC, Liang QF, Zhang LJ, Ma C. 2024. Risk assessment of environmental and bystander exposure from agricultural unmanned aerial vehicle sprayers in golden coconut plantations: effects of droplet size and spray volume. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 282: 116675
- Li LL, Hu ZH, Liu QJ, Yi TC, Han P, Zhang RR, Pan LG. 2022. Effect of flight velocity on droplet deposition and drift of combined pesticides sprayed using an unmanned aerial vehicle sprayer in a peach orchard. *Frontiers in Plant Science*, 13: 981494
- Lin JY, Wang GB, Kuang HY, Sun PD, Hu YX, Sun J, Zheng HJ, Zang XY. 2022. Effects of spray additives on droplet size, evaporation inhibition and droplet drift of UAV application. *Acta Agriculturae Shanghai*, 38(2): 81–87 (in Chinese) [林金元, 王国宾, 况慧云, 孙萍东, 胡颖雄, 孙建, 郑洪建, 臧晓韵. 2022. 喷雾助剂对雾滴粒径、抗蒸发及植保无人机喷施雾滴飘移的影响. *上海农业学报*, 38(2): 81–87]
- Lou ZX, Xin F, Han XQ, Lan YB, Duan TZ, Fu W. 2018. Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9): 187
- Lu WX, Lan YB, Wang GB, Shan CF, Xie YJ, Chen MM, Wang BJ. 2021. Study on the influence of wind speed on the drift of four-rotor plant protection UAV. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 43(7): 187–193 (in Chinese) [鲁文霞, 兰玉彬, 王国宾, 单常峰, 谢英杰, 陈蒙蒙, 王宝聚. 2021. 环境风速对四旋翼植保无人机喷施雾滴飘移的影响研究. *农机化研究*, 43(7): 187–193]
- Pan B, Wang BJ, Liu D, Lin Y, Jiang L. 2025. Does the self-developed fatty acid esters-based aerial spray adjuvant really work on improving the targetability of pesticide liquid sprayed by unmanned aerial vehicles (UAVs)? *Pest Management Science*, 81(8): 4690–4704
- Shan CF, Xue C, Zhang LC, Song CC, Kaousar R, Wang GB, Lan YB. 2024. Effects of different spray parameters of plant protection UAV on the deposition characteristics of droplets in apple trees. *Crop Protection*, 184: 106835
- Shi X, Chen YX, Du YH, Liu XH, Yang DB, Yuan HZ, Yan XJ. 2021. The influences of wind speed and flight parameters on droplet drift characteristics of multi-rotor plant protection unmanned aerial vehicle. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 546–553 (in Chinese) [石鑫, 陈奕璇, 杜亚辉, 刘晓慧, 杨代斌, 袁会珠, 闫晓静. 2021. 环境风速及飞行参数对多旋翼植保无人机雾滴飘移特性的影响. *植物保护学报*, 48(3): 546–553]
- Si XX, Xu XH, Wang XM, Wang LP, Huang JH. 2025. Antimicrobial resistance of *Streptococcus* strains isolated from dairy cow mastitis: a systematic review and meta-analysis. *Chinese Journal of Zoonoses*, 41(2): 208–217 (in Chinese) [司星星, 徐祥瀚, 王晓明, 王丽平, 黄金虎. 2025. 我国奶牛乳房炎链球菌对常用抗菌药物耐药性的Meta分析. *中国人兽共患病学报*, 41(2): 208–217]
- Sun T, Zhang SC, Xue XY, Gu W, Jiao YX, Sun XD. 2021. Optimization of operation parameters for single-rotor plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) at different growth stages of wheat. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 501–509 (in Chinese) [孙涛, 张宋超, 薛新宇, 顾伟, 焦雨轩, 孙向东. 2021. 小麦不同生育期单旋翼植保无人机施药作业参数优化. *植物保护学报*, 48(3): 501–509]
- Tang H, Xu Y, Yang BB, Zhou JP. 2025. Effects of operational parameters of plant protection UAVs on droplet deposition distribution in cotton canopy in Xinjiang. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 46(3): 64–70 (in Chinese) [唐虎, 许燕, 杨冰冰, 周建平. 2025. 植保无人机作业参数对新疆地区棉花冠层雾滴沉积分布的影响. *中国农机化学报*, 46(3): 64–70]
- Tang T, Sun Q. 2025. Study on UAV navigation system for plant protection based on visual processing technology. *China Agricultural Machinery Equipment*, (1): 67–70 (in Chinese) [唐涛, 孙强. 2025. 基于图像处理技术的植保无人机导航系统研究. *中国农机装备*, (1): 67–70]
- Wang CL, He XK, Zeng AJ, Herbst A, Wongsuk S, Qiao BY, Zhao C, Yuan SK, Zhong L, Overbeck V, et al. 2020. Measuring method and experiment on spray drift of chemicals applied by UAV sprayer based on an artificial orchard test bench. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(13): 56–66 (in Chinese) [王昌陵, 何雄奎, 曾爱军, Andreas Herbst, Supakorn Wongsuk, 乔白羽, 赵钺, 袁善奎, 钟玲, Verena Overbeck, 等. 2020. 基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验. *农业工程学报*, 36(13): 56–66]
- Wang CL, Herbst A, Zeng AJ, Wongsuk S, Qiao BY, Qi P, Bonds J, Overbeck V, Yang Y, Gao WL, et al. 2021. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. *Science of the Total Environment*, 777: 146181
- Wang CL, Zeng AJ, He XK, Song JL, Herbst A, Gao WL. 2020. Spray drift characteristics test of unmanned aerial vehicle spray unit under wind tunnel conditions. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(3): 13–21
- Wang GB, Wang SZ, Chen PC, Han XQ, Shan CF, Chen SD, Lan YB. 2021. Effect of spraying droplet size with drones on deposition, penetration, and cotton harvest-aid efficacy. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 493–500 (in Chinese) [王国宾, 王十周, 陈鹏超, 韩小强, 单常峰, 陈盛德, 兰玉彬. 2021. 植保无人机喷施不同雾滴粒径药剂对其在棉花冠层沉积、穿透及脱叶催熟效果的影响. *植物保护学报*, 48(3): 493–500]
- Wang GB, Zhang TS, Song CC, Yu XQ, Shan CF, Gu HZ, Lan YB. 2023. Evaluation of spray drift of plant protection drone nozzles based on wind tunnel test. *Agriculture*, 13(3): 628
- Wang GL, Wang Q, Luo JW, Sun XH. 2017. Positioning design of plant protection unmanned aerial vehicle based on Beidou navigation. *Intelligent Computer and Applications*, 7(5): 46–49 (in Chinese) [王高亮, 王强, 罗嘉伟, 孙晓红. 2017. 基于北斗导航的植保无人机定位设计. *智能计算机与应用*, 7(5): 46–49]
- Wang J, Lan YB, Yao WX, Chen PC, Lin JL, Yan YB. 2019. Effects of working height of single-rotor unmanned aerial vehicle on drift and droplets deposition distribution of areca tree. *Transactions of*

- the Chinese Society for Agricultural Machinery, 50(7): 109–119 (in Chinese) [王娟, 兰玉彬, 姚伟祥, 陈鹏超, 林晋立, 燕颖斌. 2019. 单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响. 农业机械学报, 50(7): 109–119]
- Wang J, Lan YB, Zhang HH, Zhang YL, Wen S, Yao WX, Deng JJ. 2018. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(6): 5–12
- Wang XN, He XK, Song JL, Wang ZC, Wang CL, Wang SL, Wu RC, Meng YH. 2018. Drift potential of UAV with adjuvants in aerial applications. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(5): 54–58
- Wang XN, He XK, Wang CL, Wang ZC, Li LL, Wang SL, Bonds J, Herbst A, Wang ZG. 2017. Spray drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(1): 117–123 (in Chinese) [王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 王志翀, 李龙龙, 王士林, Bonds J, Herbst A, 王志国. 2017. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性. 农业工程学报, 33(1): 117–123]
- Wang ZC, Herbst A, Bonds J, Zeng AJ, Zhao C, He XK. 2020. Stereoscopic test method for low-altitude and low-volume spraying deposition and drift distribution of plant protection UAV. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(4): 54–62 (in Chinese) [王志翀, Andreas Herbst, Jane Bonds, 曾爱军, 赵铖, 何雄奎. 2020. 植保无人机低空低量施药雾滴沉积飘移分布立体测试方法. 农业工程学报, 36(4): 54–62]
- Wen S, Han J, Lan YB, Yin XC, Lu YH. 2018. Influence of wing tip vortex on drift of single rotor plant protection unmanned aerial vehicle. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 49(8): 127–137, 160 (in Chinese) [文晟, 韩杰, 兰玉彬, 尹选春, 卢玉华. 2018. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响. 农业机械学报, 49(8): 127–137, 160]
- Xue XY, Tian Y, Yang ZY, Li Z, Lyu SL, Song SR, Sun DZ. 2023. Research on a UAV spray system combined with grid atomized droplets. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1286332
- Yu KL. 2021. Agricultural plant protection UAV based on inertial navigation and visual navigation research on autonomous flight technology. *Software*, 42(9): 55–57 (in Chinese) [于坤林. 2021. 基于惯性导航与视觉导航组合的农业植保无人机自主飞行技术研究. 软件, 42(9): 55–57]
- Zeeshan M, Li HR, Yousaf G, Ren H, Liu YP, Arshad M, Dou ZC, Han XQ. 2024. Effect of formulations and adjuvants on the properties of acetamiprid solution and droplet deposition characteristics sprayed by UAV. *Frontiers in Plant Science*, 15: 1441193
- Zhan YL, Chen PC, Xu WC, Chen SD, Han YF, Lan YB, Wang GB. 2022. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution. *Bio-systems Engineering*, 216: 32–45
- Zhang RR, Li LL, Chen LP, Wen Y, Tang Q, Wang WJ. 2021. Design and application of a monitoring system for spray deposition and drift by plant protection unmanned aerial vehicle (UAV). *Journal of Plant Protection*, 48(3): 537–545 (in Chinese) [张瑞瑞, 李龙龙, 陈立平, 文瑶, 唐青, 王维佳. 2021. 植保无人机施药沉积飘移监测系统设计与应用. 植物保护学报, 48(3): 537–545]
- Zhang ZH. 2023. Navigation system of agricultural plant protection UAV based on large sparse linear equation. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 45(7): 201–205 (in Chinese) [张之红. 2023. 基于大型稀疏线性方程的农业植保无人机导航系统. 农机化研究, 45(7): 201–205]
- Zhou LP. 2017. Research of spraying characteristics and effecting factors in UAV airborne spray system. Master thesis. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese) [周莉萍. 2017. 无人机机载喷雾系统喷雾特性及影响因素的研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学]
- Zhuang WL, Gao YD, Wang X, Guo XY, Ran T. 2025. Meta-analysis of effects of supplemental feeding on the growth and slaughter performance of Tibetan sheep. *Pratacultural Science*, 42(2): 467–481 (in Chinese) [庄万兰, 高一丹, 王旭, 郭新羽, 冉涛. 2025. 补饲对藏羊生长和屠宰性能影响的Meta分析. 草业科学, 42(2): 467–481]

(责任编辑:张俊芳)