

陈吟, 齐浩亮, 张龙, 等. 大田环境中不同助剂和喷头对无人机喷洒雾滴分布和漂移的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(6): 50-58.
CHEN Yin, QI Haoliang, ZHANG Long, et al. Effects of different adjuvants and nozzles on droplet distribution and drift when applied with UAV[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(6): 50-58.

大田环境中不同助剂和喷头对无人机喷洒雾滴分布和漂移的影响

陈 吟^{1,2}, 齐浩亮^{1,2}, 张 龙^{1,2}, 马金龙², 靳尚杰², 李广泽¹, 兰玉彬³
(1 深圳诺普信农化股份有限公司研究院, 广东 深圳 518102; 2 深圳雨燕智能科技服务有限公司, 广东 深圳 518102; 3 华南农业大学 电子工程学院/人工智能学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探索在大田环境中不同助剂和喷头型号对无人机喷洒雾滴分布和漂移的影响。【方法】利用色素染色法染色雾滴,使用大疆 MG-1S 无人机进行喷洒作业,并收集雾滴卡进行扫描分析。喷洒中使用 φ 为 1% 的不同助剂溶液或不同种类喷头,以比较助剂和喷头对雾滴分布的影响。【结果】室内喷洒 φ 为 1% 助剂溶液时,雨燕油性助剂、禾大助剂提高雾滴粒径的效果较优。IDK 120-01 喷头增大雾滴粒径效果最明显。在大田测试中,所有的助剂相比清水对照都降低了漂移。大部分雾滴集中于距离喷洒航线 2 m 距离内。离地 80 cm 处的雾滴沉积量比离地 50 cm 的雾滴沉积量少 40%~60%。雨燕油性助剂在目标区域沉积较多。目标区域内使用 IDK 120-01 喷头的雾滴沉积量最大,但单位面积的雾滴数量较少。【结论】使用助剂和大粒径喷头均可以明显降低雾滴漂移,提高目标区域雾滴沉积量。不同助剂抗漂移效果有明显差异。

关键词: 无人机喷洒; 助剂; 喷头; 雾滴分布; 雾滴漂移
中图分类号: S252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)06-0050-09

Effects of different adjuvants and nozzles on droplet distribution and drift when applied with UAV

CHEN Yin^{1,2}, QI Haoliang^{1,2}, ZHANG Long^{1,2}, MA Jinlong², JIN Shangjie², LI Guangze¹, LAN Yubin³
(1 Shenzhen Noposion Agrochemicals Co., Ltd., Shenzhen 518102, China; 2 Shenzhen Yuyan Intelligent Technology Services Co. Ltd., Shenzhen 518102, China; 3 College of Electronic Engineering/College of Artificial Intelligence, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To explore the influences of different adjuvants and nozzles on the distribution and drift of droplets when applied with UAV in the field environment. 【Method】The droplets were dyed by pigment staining. DJI MG-1S was used for spraying. The droplet reception cards were collected, scanned and analyzed. The solutions of different adjuvants ($\varphi=1\%$) and different nozzles were used to compare the influences of adjuvant and nozzle on distribution of droplets. 【Result】In the lab spraying experiments, the solutions of Yuyan oily and Heda adjuvants ($\varphi=1\%$) showed better effect on increasing droplet size. The IDK 120-01 nozzle increased droplet size most significantly. In the field test, compared with clear water control, all adjuvants reduced drift, most droplets were within two meters of the spraying route. The amount of droplets at 80 cm

above the ground was 40%–60% less than that at 50 cm above the ground. Yuyan oily adjuvant had more deposition in the target area. The IDK 120-01 nozzle showed the most deposition in the target area with less droplet number per unit area. 【Conclusion】 Using adjuvants and large droplet size nozzles can significantly reduce drift and increase deposition in the target area. The anti-drift effects of different adjuvants are significantly different.

Key words: UAV spraying; adjuvant; nozzle; droplet distribution; droplet drift

随着全国人口的增长、农村劳动人口的逐渐减少,在保证农产品产量和质量的基础上推进农业机械化和现代化越来越重要。近十年里,中国农业现代化迅猛发展,其中,农业无人机产业发展尤为迅速,无人机在农业植保中的应用越来越广泛^[1-2]。截止 2016 年,已经有不少于 178 种农用无人机被开发^[3]。农用植保无人机的应用已经逐渐从水稻、小麦等主要大宗粮食作物^[4]扩展到了果树、蔬菜、茶叶等经济作物上^[5-7]。植保无人机的工作效率可达人工喷洒的 60 倍^[8],并且操作灵活,在作业过程中不会破坏土壤结构,也不会直接碰触到作物,非常适合中小面积田块、丘陵山区的植保作业。但由于无人机载液量的限制,无人机喷洒时流量偏小,且一般配备小粒径的扇形喷头或者离心喷头,雾滴粒径较小(100 μm 左右)。由于技术原因和安全性考量,目前植保无人机喷洒最低高度有一定限制。以大疆植保无人机为例,一般推荐最低飞行高度为 1.0~1.5 m,相较于传统喷洒方式(拖拉机和人工喷雾器),喷洒高度更高,因此,无人机在喷洒农药过程中更容易产生雾滴漂移的现象。根据相关研究,在农药喷洒中约有 25% 的细小雾滴可漂移到非靶标区域^[9-11]。农药雾滴的漂移可造成环境污染,对周边生物造成危害。相比杀虫剂和杀菌剂,除草剂的漂移更可能严重影响周边作物的产量甚至造成绝收。在 2004 年,美国 40 个州内曾发生不少于 1 700 起农药漂移引起的农作物损失报告,其中 1 207 起是由除草剂漂移引起的^[12-13]。McNaughton 等^[14]曾在研究中指出,仅推荐剂量的 2.5% 的草甘膦漂移雾滴即可造成番茄苗伤害率达 23%。不同的除草剂有不同的非靶标敏感作物,除草剂品类亦会影响漂移的程度和对非靶标作物的毒性。如 2,4-D 和麦草畏等生长素类除草剂对双子叶植物高毒,且极易因蒸发漂移到远距离非靶标区域。即便无人机喷洒除草剂可以达到较为满意的除草效果^[15],但漂移问题严重限制了无人机喷洒除草剂的可行性和应用推广。而助剂和喷头型号是影响喷洒中雾滴漂移的重要因素。喷头型号直接影响雾滴的雾化性质,助剂的添加可通过

改变溶液的性质而间接改变雾化性质^[16-22]。目前,大部分的研究为使用风洞等设备进行的室内研究,大田喷洒环境的研究较少。本文使用不同型号品牌的喷头和不同厂家品类的助剂,在大田环境中测定其影响雾滴漂移的特点,对比助剂和喷头在抗漂移效果上的表现及其与粒径的关联。为进一步优化抗漂移助剂和喷头提供数据和理论依据,也为农业生产上田间农药喷洒中控制漂移提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

本次测试的植保无人机为大疆 MG-1S 八旋翼无人机(深圳大疆创新科技有限公司,中国)。环境监测使用华谊 PM6252A 风速仪(深圳市新华谊仪表有限公司,中国)测量,温度和湿度由希玛 AS817 手持式温湿度计(东莞万创电子制品有限公司,中国)测量。配备不同的喷头在田间环境进行喷洒试验。所测试喷头包括 TeeJet XR110-01[特杰特喷雾技术(天津)有限公司,中国],Lechler LU120-01、LU120-015、IDK120-01[莱克勒喷嘴系统(北京)有限公司,中国]。所测试喷洒助剂包括红雨燕第一代增效水性助剂、红雨燕防漂移增效油性助剂(深圳雨燕智能科技服务有限公司,中国)、激健增效助剂(四川蜀峰化工有限公司,中国)、禾大 DRT-NIS-AP(禾大公司,英国)和亨斯迈 5 960 助剂(亨斯迈公司,美国),在文中分别简称为雨燕水性、雨燕油性、激健、禾大和亨斯迈。试验中使用质量浓度为 1 g·L⁻¹ 的诱惑红溶液(6-羟基-5-(2-甲氧基-4-磺酸-5-甲基)偶氮苯-2-磺酸二钠盐)(上海狮头染料研究所有限公司,中国),并使用佳能 pp-208 喷墨打印机相纸(佳能有限公司,中国)接收雾滴。雾滴接收卡由惠普(HP)Scanjet G3110 照片扫描仪(惠普有限公司,中国)扫描,由雾滴覆盖率分析软件 Depositscan 进行分析。室内试验使用 DP-02 型喷雾粒度分析仪(珠海市欧美克仪器有限公司,中国)对不同喷头和助剂溶液产生的雾滴进行粒径测试。

1.2 方法

1.2.1 不同助剂溶液的配制 在实验室内测试不同喷头雾滴粒径时,喷洒清水测量。测试不同助剂溶液雾滴粒径时,将不同的助剂分别以体积比(φ)1% 添加到不同的清水中,混匀后取中间层液体进行测量。田间不同喷头的雾滴漂移试验中,使用 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的诱惑红水溶液,并按体积比 1% 添加红雨燕水性助剂,混匀备用。田间不同助剂的雾滴漂移试验中,则将不同助剂分别以体积比 1% 加入到混匀后的 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的诱惑红水溶液中,混匀备用。

1.2.2 不同助剂溶液和喷头对雾滴粒径的影响 试验在深圳诺普信农化股份有限公司研究院智能喷洒实验室内进行,按照“1.2.1”配制溶液,预热 DP-02 型喷雾粒度分析仪 30 min。依次使用相应的溶液(φ 为 1% 的雨燕水性、雨燕油性、激健、禾大和亨斯迈)进行雾滴粒径测试。使用喷头 XR110-01、LU120-01、LU120-015 和 IDK120-01 分别喷洒清水进行雾滴粒径测试。喷雾时间 10 s,喷雾压力为 0.48 MPa,每个测试重复 3 次。

1.2.3 无人机喷头流量测试 在田间试验时,每次更换喷头后进行喷头流量测试。安装好 4 个喷头后,将清水灌入无人机药箱,设定好无人机参数(飞行速度、喷幅和单位面积喷洒量),在清水填充所有管道后,用 4 个量杯对准喷头口启动喷洒一定时间(本试验中时间为 20 s)。停止喷洒,用量筒测量所收集液体体积:

$$V = tvwV_t,$$

(1)

式中: V 为理论喷液体积; t 为喷液时间, s; v 为设定无人机飞行速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; w 为设定无人机喷幅, m; V_t 为设定无人机单位面积喷液量, $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ 。每个喷头的喷液体积理论上为 $V/4$ 。当实际收集液量在理论

液量 $\pm 5\%$ 的范围内时,可进行漂移测试。

1.2.4 不同助剂溶液和喷头在大田环境中喷洒的雾滴漂移 试验于 2018 年在江苏省兴化市田间进行。试验过程中实时测试瞬时风速、温度以及湿度。不同助剂试验时温度为 $12\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$,空气湿度 45%,风速 $0\sim 1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风速较为稳定(图 1)。不同喷头试验时温度为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$,空气湿度 40%,风速 $1.7\sim 3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。试验期间,基本无云。使用大疆 MG-1S 无人机和 XR 110-01 喷头,搭载“1.2.1”描述的不同助剂溶液进行直线航线单方向飞行喷洒,清水喷洒作为对照。飞行参数设置为:高度 1.5 m,喷幅 3.5 m,飞行速度 $4.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,单位面积喷洒量 $18.75\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。飞行方向与风向垂直,正式测试飞行距离为 100 m,喷洒区始末端设置 50 m 的加减速缓冲区。每个 PC 管上固定 2 张雾滴卡,分别离地 0.5 和 1.0 m。在 100 m 的飞行沿线上均匀设置雾滴接收点,卡片正面对风向,平行于飞行方向。根据风向,在下风区以不同间距设置雾滴接收点,分别离喷洒边界 1、2、5、10、20 和 50 m。在航线下方均匀固定雾滴接收卡 25 个,雾滴接收卡排列如图 2 所示。每个测试重复 3 次,更换 3 次雾滴接收卡,故而每个距离点和离地高度共有 15 个重复,航线下方地表共收集 75 张雾滴卡(75 个重复)。每次喷洒完后将雾滴接收卡装入自封袋,在实验室中进行扫描和分析。获取雾滴覆盖密度、沉积量和粒径分布。在喷头测试中,使用按体积比 1% 添加红雨燕水性助剂的质量浓度为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的诱惑红水溶液,依次用不同的喷头进行喷洒。用同样方法布置、收集雾滴接收卡并进行扫描分析。喷头测试时每个测试重复 4 次,更换 4 次雾滴接收卡,故而每个距离点和离地高度共有 20 个重复,航线下方地表共收集 100 张雾滴卡(100 个重复)。

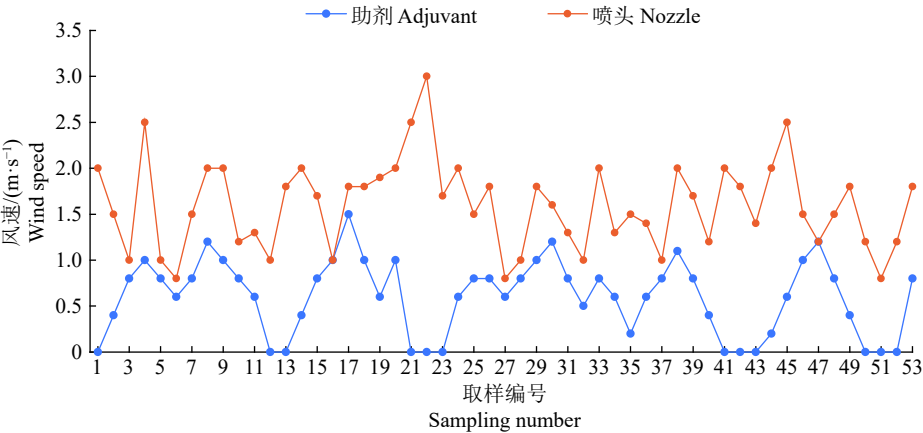
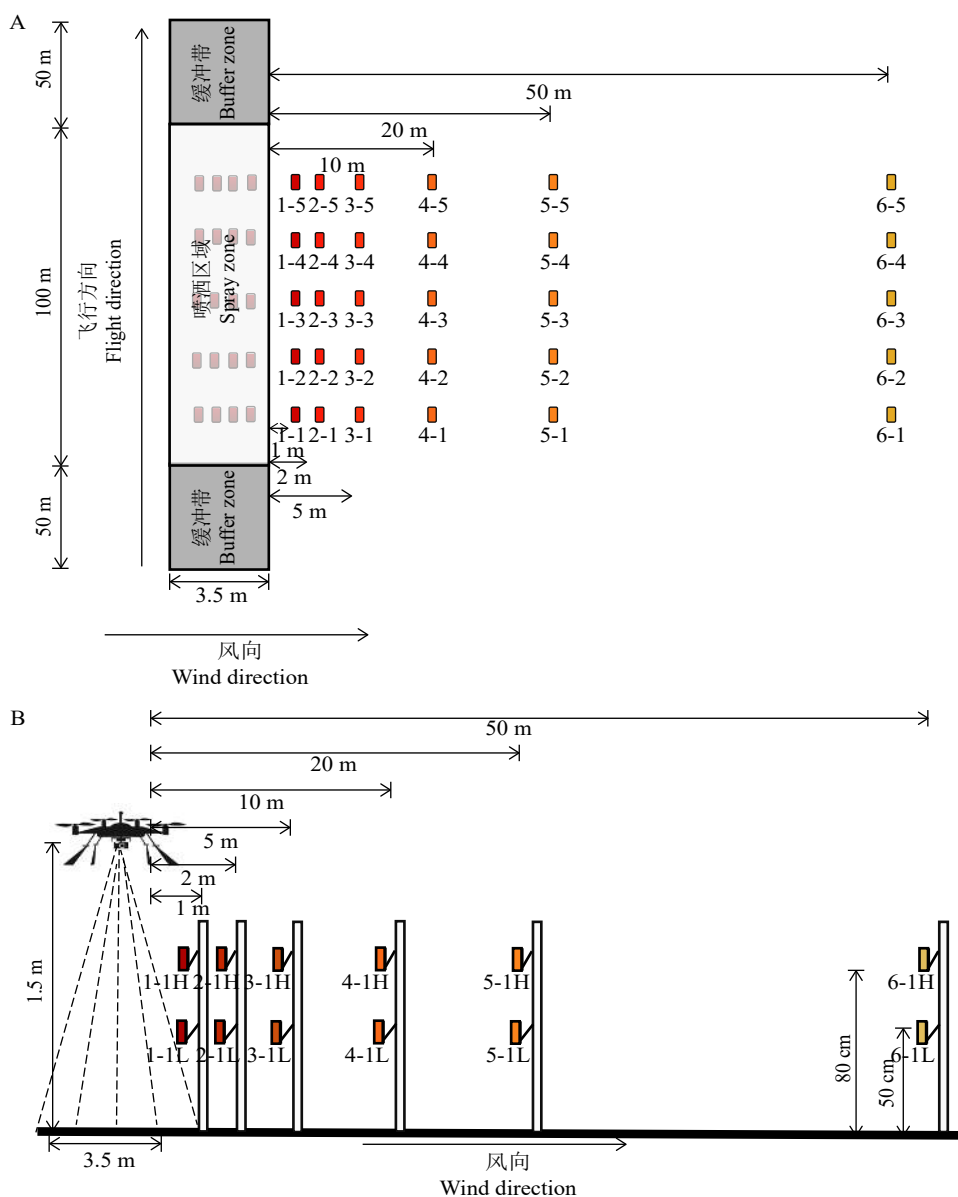


图 1 试验过程中的风速变化(随机测试)

Fig. 1 Wind speed changes during experiments (random test)



A: 植保无人机喷洒航线、风向和分布的俯瞰示意图; B: 无人机喷洒、风向和雾滴卡分布的侧面示意图

A: Schematic diagram of aerial view of plant protection UAV spraying routes, wind direction and distribution of droplet; B: Lateral diagram of UAV spraying, wind direction and distribution of droplet reception card

图2 雾滴漂移量田间评估试验布置示意图

Fig. 2 Experimental arrangement diagram in field for droplet drift amount estimation

1.2.5 不同助剂对粒径均匀度的影响 为了研究不同助剂对粒径均匀度的影响,按下式计算雾滴粒径分布均匀度(Relative SPAN factor, RSF)值:

$$\text{RSF} = (D_{90} - D_{10}) / D_{50}, \quad (2)$$

式中, D_{90} 、 D_{10} 和 D_{50} 分别为累积分布为 90%、10% 和 50% 最大颗粒的等效粒径。RSF 值越小, 说明雾滴粒径越集中。

2 结果与分析

2.1 不同助剂溶液和不同喷头对雾滴粒径的影响

由图 3A 可见,当喷洒不同助剂溶液 (φ 为 1%) 时,雨燕油性 ($D_{50}=162\text{ }\mu\text{m}$)、禾大 ($D_{50}=146\text{ }\mu\text{m}$) 助剂

提高雾滴粒径的效果要优于雨燕水性 ($D_{50} = 126 \mu\text{m}$)、亨斯迈 ($D_{50} = 126 \mu\text{m}$) 和激健 ($D_{50} = 127 \mu\text{m}$) 助剂。由图 4 可见, 雨燕油性和禾大助剂可将粒径小于 $103 \mu\text{m}$ 的雾滴比例降低至 17.73% 和 20.16%。而雨燕水性、亨斯迈和激健助剂喷洒时粒径小于 $103 \mu\text{m}$ 的雾滴比例达 34.15%、34.51% 和 34.87%。同时, 图 3A 还显示了不同助剂对粒径均匀度 (RSF) 的影响, RSF 值越小, 说明雾滴粒径越集中, 因此禾大和雨燕油性助剂溶液的粒径均匀度较其他 3 种助剂好。由图 3B 可以看出, 在 4 个喷头中, IDK 120-01 喷头喷洒的雾滴粒径约为其他 3 个喷头的 2 倍, 明显增大了粒径。而其余 3 个喷头喷洒的雾滴粒径无明显差异。

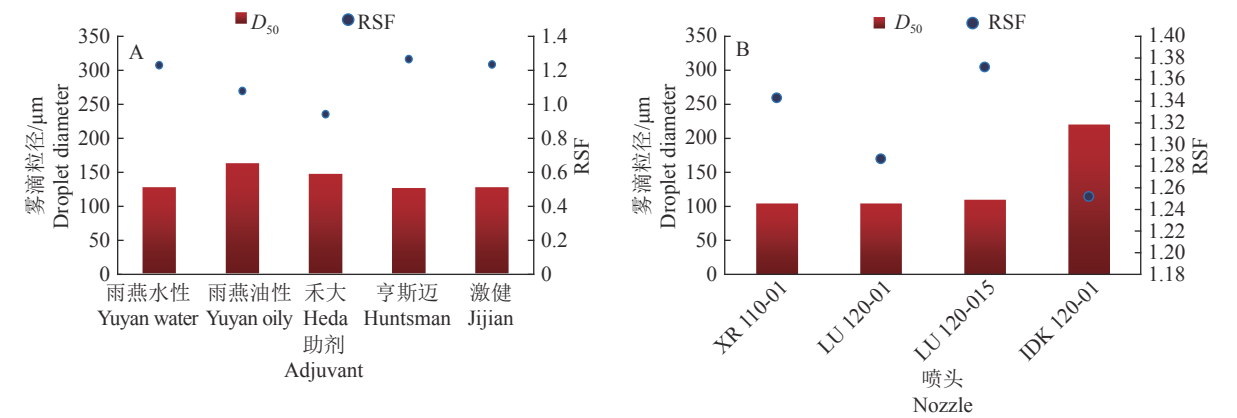


图 3 ϕ 为 1% 的不同助剂溶液 (A) 和不同喷头喷洒 (B) 的雾滴粒径 (D_{50}) 及分布均匀度 (RSF)

Fig. 3 Droplet diameter (D_{50}) and relative span factor (RSF) of $\phi=1\%$ solution of different adjuvants (A) and nozzles (B)

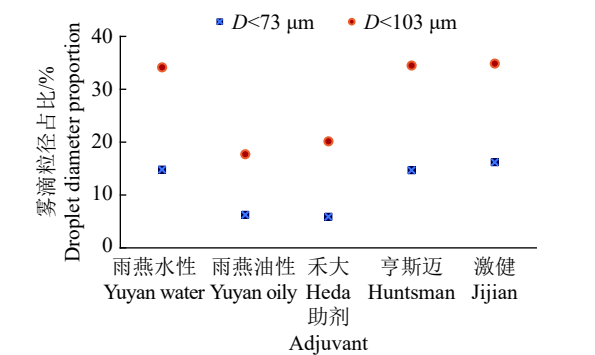


图 4 不同助剂溶液 (ϕ 为 1%) 的雾滴粒径 (D) 占比

Fig. 4 Droplet diameter (D) proportion of $\phi=1\%$ solutions of different adjuvants

2.2 不同助剂溶液在大田环境下对无人机喷洒雾滴分布的影响

对比 5 种助剂溶液 (ϕ 为 1%) 和清水在离喷洒区域不同距离的雾滴密度分布 (图 5) 可见, 所有助剂都明显减少了雾滴的漂移。雾滴沉积量随着离喷洒区域距离的增加而减少, 大部分的雾滴集中于离喷洒区域 1 和 2 m 距离的雾滴卡上。雾滴在 5 m 处急剧减少。总体来说, 离地 50 cm 处的雾滴沉积量比离地 80 cm 处的雾滴沉积量增加约 40%~60%。在离地 80 cm 处, 距离喷洒区域 1~50 m 距离内漂移雾滴密度总和由多到少依次为清水 ($0.5395 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>禾大助剂 ($0.4075 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>激健助剂 ($0.3789 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>雨燕水性助剂 ($0.3170 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>雨燕油性助剂 ($0.2832 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>亨斯迈助剂 ($0.2349 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)。在离地 50 cm 处, 距离喷洒区域 1~50 m 距离内漂移雾滴量由多到少依次为清水 ($0.9018 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>激健助剂 ($0.7116 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>雨燕油性助剂 ($0.6791 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>禾大助剂 ($0.6330 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>雨燕水性助剂 ($0.5771 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>亨斯迈助剂 ($0.3959 \mu\text{L}/\text{cm}^2$)。总体来看, 亨斯迈助剂漂移总雾滴密度最低, 其次是雨燕水性和油性助

剂。雨燕油性助剂在离地 50 cm 处的雾滴沉积量大于雨燕水性助剂, 而在离地 80 cm 处的雾滴沉积量少于雨燕水性助剂, 且雨燕油性助剂雾滴比水性助剂更集中于距喷洒区域 1、2 和 5 m 的距离, 占总雾滴沉积量的 98.6%, 而在 10、20 和 50 m 距离范围内的雾滴沉积量为 $0.0135 \mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。雨燕水性助剂雾滴距喷洒区域 1、2 和 5 m 的雾滴沉积量占总量的 96.9%, 在 10、20 和 50 m 距离范围内的雾滴沉积量为 $0.0281 \mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。说明雨燕油性助剂沉降性较水性助剂强, 漂移多集中于喷洒区附近, 在抗漂移方面效果较好。禾大助剂的雾滴漂移量在离地 50 cm 处和雨燕油性助剂差不多, 但在离地 80 cm 处雾滴漂移量则明显高于雨燕水性助剂和油性助剂。激健助剂的抗漂移性略低于其他几个助剂, 在距离喷洒区域 10 m 处仍有较多雾滴, 和清水的雾滴沉积量相近。

由图 6 可见雾滴粒径和漂移距离的关系。由于雾滴卡在收集和扫描之间需要时间, 因此雾滴卡上雾滴有一定程度的扩散, 雾滴粒径比实际粒径偏大。随着离喷洒区域距离的增大, 漂移的雾滴粒径也减少。每个助剂中, 同一距离, 离地 50 cm 处收集的雾滴粒径大于离地 80 cm 收集的雾滴粒径, 说明较大粒径的雾滴更容易沉降到较低的位置。但随着距离增大, 2 个离地高度处收集的雾滴粒径趋于相近, 在离喷洒区域 5 m 处 2 个高度的雾滴粒径已经非常相近。在离喷洒区域 1~2 m 范围内收集的雾滴粒径大小大致为清水>激健助剂>雨燕水性助剂~雨燕油性助剂~禾大助剂>亨斯迈助剂。可见助剂有效地提高了漂移的粒径阈值, 减少了较大粒径雾滴的漂移。

为了进一步确定添加助剂后, 能否提高航线下方喷洒目标区域雾滴的沉积量, 试验中在航线下方喷幅内区域设置了雾滴卡, 对喷洒区域的雾滴进行

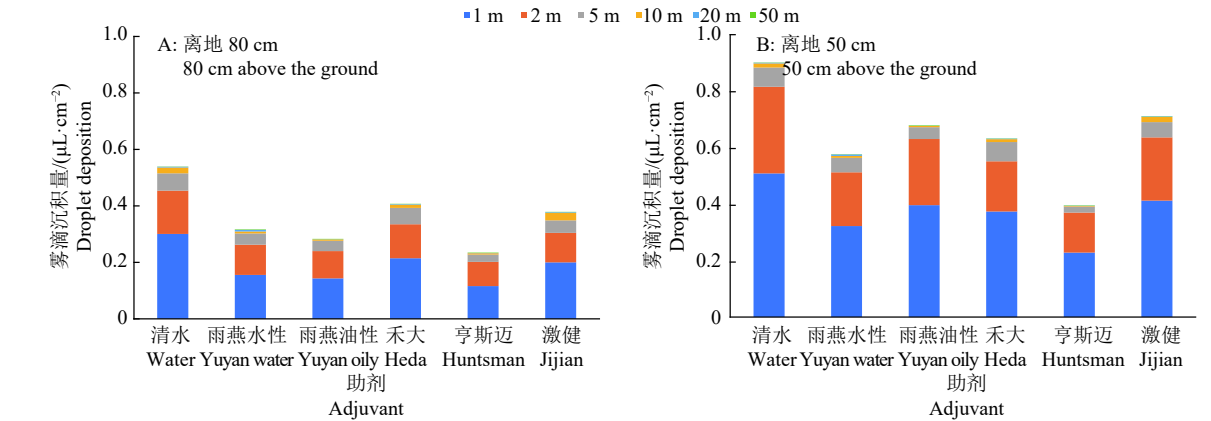


图 5 无人机喷洒不同助剂溶液 (φ 为 1%) 后离喷洒区域不同距离的雾滴沉积量

Fig. 5 Droplet deposition of $\varphi=1\%$ solutions of different adjuvants at different distances from the spraying area when sprayed with UAV

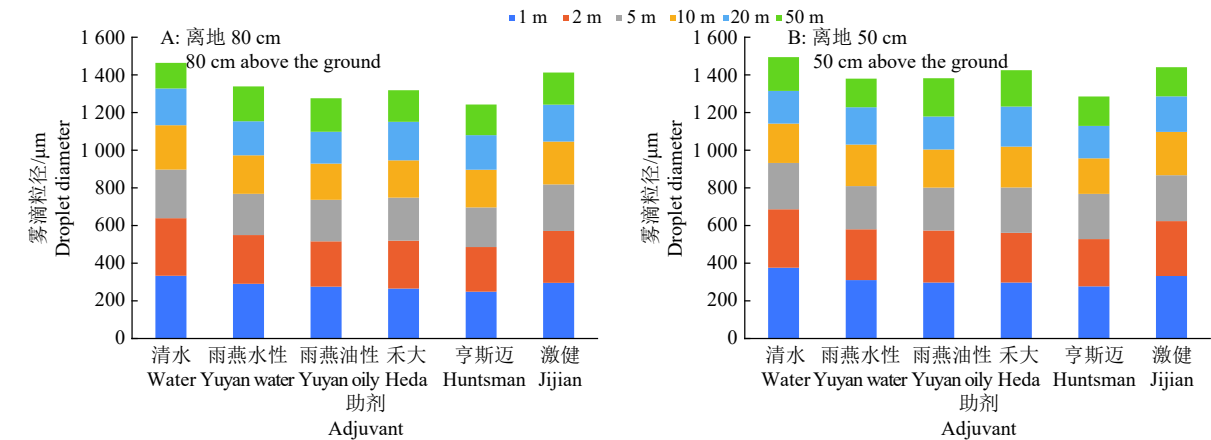
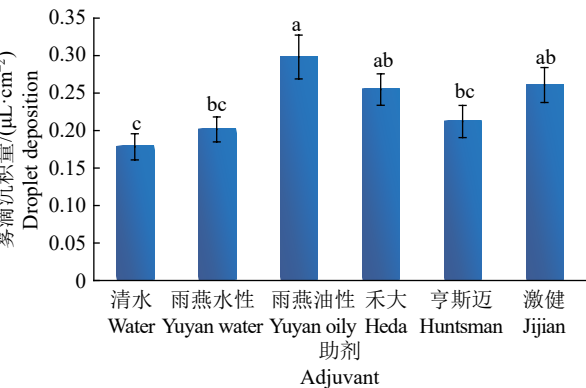


图 6 无人机喷洒不同助剂溶液 (φ 为 1%) 后离喷洒区域不同距离的雾滴粒径

Fig. 6 Droplet diameter of $\varphi=1\%$ solutions of different adjuvants at different distances from the spraying area when sprayed with UAV

收集检测, 结果如图 7 所示。在喷洒区域, 添加了雨燕油性助剂的溶液在目标区域的沉积量多于其他



图中数据为平均值±标准差, 柱子上方具有相同字母表示差异不显著 ($\alpha=0.05$, Student-Newman-Keuls)

Date in the figure represent mean value $\pm$ standard deviation, bars with the same lowercase letters are not significantly different according to Student-Newman-Keuls ($\alpha=0.05$)

图 7 无人机喷洒不同助剂溶液 (φ 为 1%) 后喷洒区域内的雾滴沉积量

Fig. 7 Droplet deposition of $\varphi=1\%$ solutions of different adjuvants in spraying area when sprayed with UAV

助剂溶液以及清水。各助剂雾滴沉积量大致为雨燕油性助剂 ($0.298\ 2\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>激健助剂 ($0.260\ 8\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$) $\approx$ 禾大助剂 ($0.254\ 7\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>亨斯迈 ($0.212\ 1\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$) $\approx$ 雨燕水性助剂 ($0.201\ 5\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$)>清水 ($0.178\ 3\ \mu\text{L}/\text{cm}^2$)。但雨燕油性助剂与激健、禾大助剂的沉积量在统计学上无显著差异。激健、禾大、亨斯迈助剂间无显著差异。亨斯迈、雨燕水性助剂与清水间无显著差异。因此, 对雾滴沉降到目标区域效果提升较大的为雨燕油性助剂。亨斯迈助剂和雨燕水性助剂对雾滴在目标区域的沉降帮助较小。由此可见, 在所测试的 5 种助剂中, 雨燕油性助剂对目标区域沉积量的提升效果表现较佳。所有助剂都能明显降低漂移, 而雨燕油性、激健和禾大助剂都能显著提高雾滴在目标区域的沉积量。

2.3 使用不同喷头在大田环境下对无人机喷洒雾滴分布的影响

对比 4 种不同的喷头在离喷洒区域不同距离处的喷雾量, 由图 8 可见, 雾滴沉积量在各喷头间和离地高度间的变化规律性相比助剂测试更弱。这

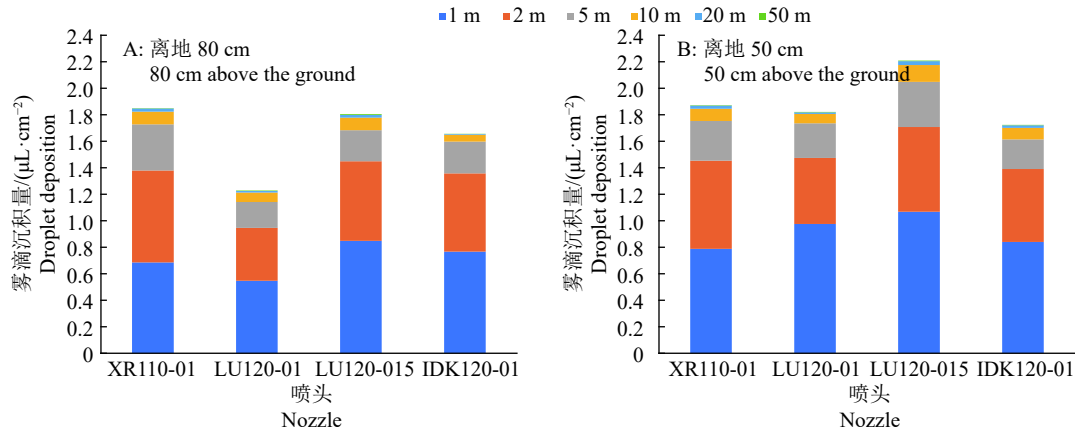


图 8 无人机配备不同喷头进行喷洒后离喷洒区域不同距离的雾滴沉积量

Fig. 8 Droplet deposition at different distances from spray area when UAV is equipped with different nozzles

可能是由测试喷头期间风速相比助剂测试期间较不稳定导致的。XR 110-01 喷头喷洒在离地 50 和 80 cm 的雾滴总量相近, IDK 120-01 喷头也是这样。XR 110-01 喷头在各个距离时 2 个离地高度的雾滴沉积量都相近, 但 IDK 120-01 喷头在距离喷洒区域 10 m 以上的位置时, 离地 80 cm 处雾滴沉积量明显少于离地 50 cm 处雾滴沉积量。说明该喷头的雾滴在 10~50 m 时倾向于沉降到低位置。LU 120-01 和 LU 120-015 喷头的雾滴在离地 80 cm 的总雾滴量明显少于离地 50 cm 处的总雾滴量。其中 LU 120-01 喷头处于距离喷洒点 1~50 m 的总雾滴量少于 LU 120-015 喷头的总雾滴量。

由图 9 可见不同喷头的雾滴粒径, 以及粒径和漂移距离的关系。由于雾滴卡在收集和扫描之间需要时间, 因此雾滴卡上雾滴有一定程度的扩散, 雾滴粒径比实际粒径偏大。随着离喷洒区域距离的增大, 各喷头漂移的雾滴粒径也减少。XR 110-01 和 LU 120-01 喷头在各个距离点离地 50 和 80 cm 处的雾滴粒径均相近。LU 120-015 喷头的雾滴粒径

在各个距离均大于 XR 110-01 和 LU 120-01 喷头的雾滴粒径, 在离喷洒区域 2 m 范围内离地 50 cm 处的雾滴粒径略大于 80 cm 处, 说明该喷头的较大粒径的雾滴更容易沉降到低的位置。随着距离增大, 在离喷洒区域 5 m 处不同离地高度收集的雾滴粒径已经趋于相近。IKD 120-01 喷头的雾滴粒径在 2 个离地高度相近, 且接近 50 cm 高度的 LU 120-015 喷头雾滴粒径。在距离 1~50 m 范围内收集的雾滴粒径大小大致为 IDK 120-01≈LU 120-015>LU 120-01≈XR 110-01。可见 IDK 120-01 和 LU 120-015 喷头可提高雾滴粒径。结合图 10 可见, 雾滴粒径的增加也相应增加了目标区域的雾滴沉积量。同样的单位面积喷洒量下, IDK 120-01 喷头在目标喷洒区域 (航线下方) 的雾滴沉积量最大 (0.395 3 μL/cm²), LU 120-015 喷头目标区域雾滴沉积量次之 (0.325 2 μL/cm²), 两者均高于 LU 120-01 (0.206 0 μL/cm²) 和 XR 110-01 喷头 (0.197 7 μL/cm²) 在目标区域的雾滴沉积量。因此, 能增大雾滴粒径的喷头可有效地增加目标区域的雾滴沉积量。但是

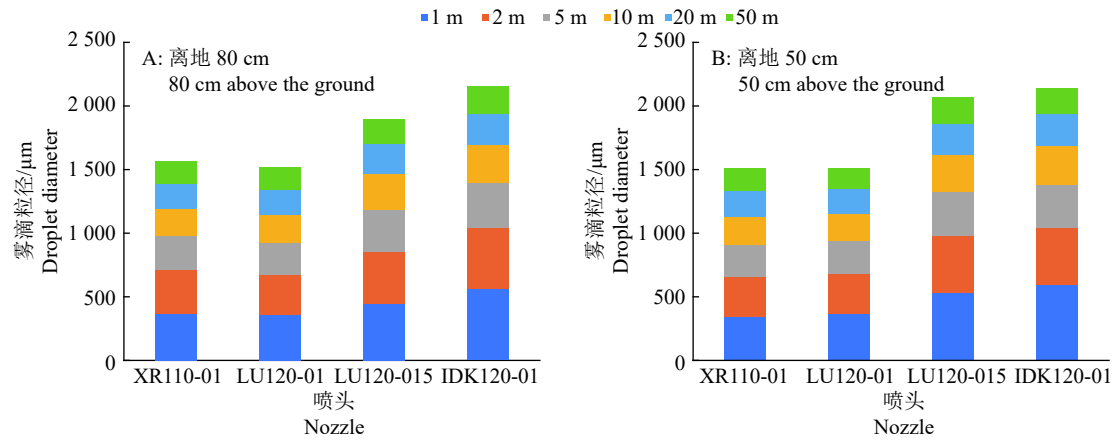
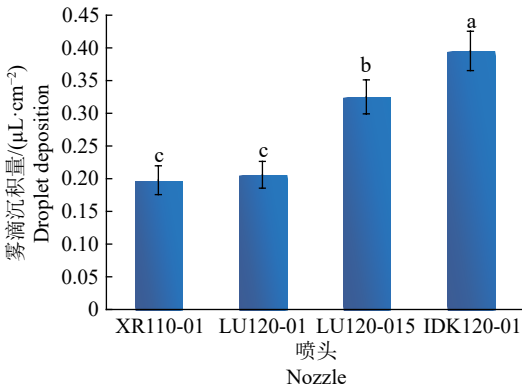


图 9 无人机配备不同喷头进行喷洒后离喷洒区域不同距离的雾滴粒径

Fig. 9 Droplet diameter at different distances from spray area when UAV is equipped with different nozzles

增大雾滴粒径亦会大大减少单位面积雾滴数量(图 11), 影响覆盖率。

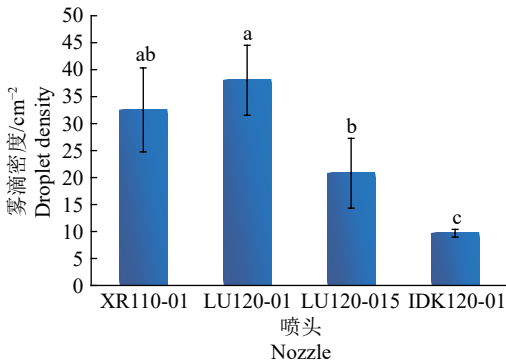


图中数据为平均值±标准差, 柱子上方具有相同字母表示差异不显著 ($\alpha=0.05$, Student-Newman-Keuls)

Date in the figure represent mean value ± standard deviation, bars with the same lowercase letter are not significantly different according to Student-Newman-Keuls ($\alpha=0.05$)

图 10 无人机配备不同喷头进行喷洒后喷洒区域内的雾滴沉积量

Fig. 10 Droplet deposition in spraying area when UAV is equipped with different nozzles



图中数据为平均值±标准差, 柱子上方具有相同字母表示差异不显著 ($\alpha=0.05$, Student-Newman-Keuls)

Date in the figure represent mean value ± standard deviation, bars with the same lowercase letter are not significantly different according to Student-Newman-Keuls ($\alpha=0.05$)

图 11 无人机配备不同喷头进行喷洒后喷洒区域内的雾滴密度

Fig. 11 Droplet density in spraying area when UAV is equipped with different nozzles

3 讨论与结论

本文结合了实验室雾滴喷洒测试仪和真实的大田喷洒环境, 比较分析了 5 种助剂(雨燕水性助剂、雨燕油性助剂、禾大助剂、激健助剂和亨斯迈助剂), 以及 4 种喷头(XR 110-01、LU 120-01、LU 120-015 和 IDK 120-01)的喷雾粒径和漂移特点。本研究中的雾滴分布趋势与 Ding 等^[23]的室内研究结果类似。有研究显示, 雾滴的粒径与雾滴漂移程度密切相关, 漂移主要是由微小的雾滴引起^[24]。助剂能

起到一定的增加粒径、减少喷雾角的作用^[25], 从而减少雾滴漂移和增加目标区域沉积量。不同的助剂抗漂移、促沉降的效果差异较大, 这可能是由助剂的成分差异造成的。从雨燕 2 种助剂的试验可以看出, 油性助剂增加粒径效果明显优于水性助剂。助剂不仅能够起到降低雾滴漂移的作用, 还能提高雾滴附着和吸收等效果^[26], 因此在无人机喷洒时, 推荐加入助剂。而相比于助剂, 喷头型号对雾滴形态的影响更加明显, 能明显影响雾滴粒径和在目标区域的沉积量^[17]。然而雾滴粒径过大也会导致单位面积雾滴数量的减少, 影响雾滴覆盖率, 可能对药剂防效有影响^[27], 因此在选择喷头时应作综合考虑。本次试验所得结论如下:

1) 在室内测试中, 当喷洒不同助剂溶液 (φ 为 1%) 时, 雨燕油性和禾大助剂提高雾滴粒径的效果优于雨燕水性、亨斯迈和激健助剂。IDK 120-01 喷头相比其他 3 款喷头明显增大了雾滴粒径。XR 110-01、LU 120-01 和 LU 120-015 喷头的 D_{50} 大致为 105 μm , 而 IDK 120-01 达 221 μm 。

2) 在大田测试中, 所有的助剂都一定程度上降低了漂移。大部分的雾滴集中于离喷洒区域 1 和 2 m 距离的雾滴卡上。离地 80 cm 处的雾滴沉积量比离地 50 cm 的雾滴沉积量少 40%~60%。雨燕油性助剂沉降性较雨燕水性助剂更强, 漂移更集中于喷洒区附近。对比在航线下方喷洒目标区域收集的雾滴沉积量, 雨燕油性助剂在目标区域的沉积量最大。所有助剂的沉积量均大于清水。

3) 大田环境下, 喷洒区域以外的雾滴沉积量在各喷头间的变化和离地高度间的变化规律性较弱, 但目标区域内的雾滴沉积量 IDK 120-01 喷头最大, 约高于 XR 110-01 喷头 1 倍。LU 120-015 喷头次之。沉积量和喷头粒径的规律相似, 能有效增大粒径的喷头在目标区域的沉积量也较大(漂移量较小)。但大粒径喷头雾滴的覆盖率(单位面积的雾滴数量)较低。

本研究为进一步探讨如何利用助剂和喷头减少漂移提供了基础数据, 也为助剂和喷头在不同目的喷洒中的选择提供了参考依据。

参考文献:

[1] WANG M, JIN H. Spray-induced gene silencing: A powerful innovative strategy for crop protection[J]. *Trends Microb*, 2017, 25(1): 4-6.
[2] QIN W C, QIU B J, XUE X Y, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers[J]. *Crop*

- Prot, 2016, 85: 79-88.
- [3] WANG G B, LAN Y B, QI H X, 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 Manag Sci*, 2019, 75(6): 1546-1555.
- [4] YAN X J, YUAN H Z, ZHOU X X, et al. Control efficacy of different pesticide formulations and fan-nozzle model on wheat aphids by UAVs[J]. *Int J Precis Agric Aviat*, 2020, 3(2): 35-39.
- [5] ZHOU L P, HE Y. Simulation and optimization of multi spray factors in UAV[C]//ASABE. 2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting. Michigan: ASABE, 2016: 1.
- [6] ZHANG P, DENG L, LYU Q, et al. Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution[J]. *Int J Agric Biol Eng*, 2016, 9(4): 45-52.
- [7] ZHANG P, WANG K, QIANG L, et al. Droplet distribution and control against citrus leafminer with UAV spraying[J]. *Int J Robot Autom*, 2017, 32(3): 299-307.
- [8] 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.
- [9] YUAN H Z, YANG D B, YAN X J, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. *Plant Prot*, 2011, 37(5): 14-20.
- [10] XIE C, HE X K, SONG J L, et al. Comparative research of atomization process for two kinds of flat fan nozzle[J]. *Trans CSAE*, 2013, 29(5): 25-30.
- [11] 王潇楠, 何雄奎, 宋坚利, 等. 助剂类型及浓度对不同喷头雾滴飘移的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 49-55.
- [12] LEE S J, MEHLER L, BECKMAN J, et al. Acute pesticide illnesses associated with off-target pesticide drift from agricultural applications: 11 states, 1998-2006[J]. *Environ Health Perspect*, 2011, 119(8): 1162-1169.
- [13] CHEN Y, JIANG L J, DOOHAN D. Response of glyphosate-resistant and conventional soybean grafted plants to glyphosate[J]. *Weed Sci*, 2018, 66(4): 433-438.
- [14] MCNAUGHTON K E, SIKKEMA P H, ROBINSON D E. Response of processing tomato to simulated glyphosate drift followed by in-crop metribuzin application[J]. *Weed Technol*, 2012, 26(4): 757-762.
- [15] CHEN Y, QI H L, LI G Z, et al. Weed control effect of unmanned aerial vehicle (UAV) application in wheat field[J]. *Int J Precis Agric Aviat*, 2019, 2(2): 25-31.
- [16] NITA M, ELLIS M A, WILSON L L, et al. Evaluation of the curative and protectant activity of fungicides and fungicide adjuvant mixtures on *Phomopsis* and leaf spot of grape: A controlled environment study[J]. *Crop Prot*, 2007, 26(9): 1377-1384.
- [17] VANZYL S A, BRINK J C, CALITZ F J, et al. Effects of adjuvants on deposition efficiency of fenhexamid sprays applied to Chardonnay grapevine foliage[J]. *Crop Prot*, 2010, 29(2): 843-852.
- [18] SHI L L, CHEN F L, ZHENG F N, et al. The influence of triazophos deposition on rice leaves by adding spray adjuvants[J]. *Sci Agric Sin*, 2009, 42(12): 4228-4233.
- [19] ROBERT N K, JEFFREY A G. The effect of spray particle size and distribution on drift and efficacy of herbicides[J]. *Asp Appl Biol*, 2004, 71(2): 44-51.
- [20] FERGUSON J C, O'DONNELL C C, CHAUHAN B S, et al. Determining the uniformity and consistency of droplet size across spray drift reducing nozzles in a wind tunnel[J]. *Crop Prot*, 2015, 76(8): 1-6.
- [21] HILZ E, VERMEER A W P. Spray drift review: The extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. *Crop Prot*, 2013, 44(20): 75-83.
- [22] BUTLER E M C, TUCK C R, MILLER P C H. The effect of some adjuvants on sprays produced by agricultural flat fan nozzles[J]. *Crop Prot*, 1997, 16(1): 41-50.
- [23] DING S M, XUE X Y, QIN W C, et al. Influencing factors research and performance experiment on droplets deposition at low wind speed[J]. *Int J Precis Agric Aviat*, 2019, 2(1): 46-51.
- [24] 吕晓兰, 何雄奎, 宋坚利, 等. 标准扇形雾喷头雾化过程测试分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 95-100.
- [25] DEXTER R W. The effect of fluid properties on the spray quality from a flat fan nozzle[M]// *Pesticide Formulations and Application Systems*. ASTM International. 2001: 27-43.
- [26] WANG G B, LI X, ANDALORO J, et al. Deposition and biological efficacy of UAV-based low-volume application in rice fields[J]. *Int J Precis Agric Aviat*, 2020, 3(2): 65-72.
- [27] 王国宾. 杀虫剂雾滴大小及覆盖密度与麦蚜防效关系研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

【责任编辑 李晓卉】