

张海艳, 兰玉彬, 文晟, 等. 植保无人机水稻田间农药喷施的作业效果[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(1): 116-124.
ZHANG Haiyan, LAN Yubin, WEN Sheng, et al. Operational effects of unmanned helicopters for pesticide spraying in rice field[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 116-124.

植保无人机水稻田间农药喷施的作业效果

张海艳¹, 兰玉彬¹, 文 晟¹, 尹选春¹, 梁 冰², 田维逵³

(1 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642;
2 南京善思生物科技有限公司, 江苏 南京 211316; 3 勐海县植保植检站, 云南 西双版纳 666200)

摘要:【目的】测试和对比电动单旋翼与电动多旋翼植保无人机在水稻田间的作业效果。【方法】测试的植保无人飞机为 HY-B-15L 型单旋翼植保无人机 (单旋翼机) 和 MG-1S 型多旋翼植保无人机 (多旋翼机)。以一定比例的罗丹明 B 与善思纳米农药的混合溶液作为喷施溶液, 通过改变无人机作业高度和农药喷洒量进行田间喷施试验, 采用荧光示踪剂法和图像分析法获得 2 种无人机在不同喷施条件下喷施的雾滴在靶标上的沉积效果。按田间药效调查准则, 调查不同处理下的纳米农药对水稻病虫害的防治效果。【结果】2 种无人机喷施的雾滴在各采样点上的沉积量随农药喷洒量的增加而增加, 当农药喷洒量为 66.67 和 100.00 mL·hm⁻² 时, 单旋翼机在各采样点上的沉积量比喷洒量为 46.67 mL·hm⁻² 时的分别增加了 48.50% 和 137.73%, 多旋翼机分别增加了 66.60% 和 111.88%。作业高度影响了无人机喷施雾滴在采样点上的沉积量和沉积均匀性, 当作业高度由 1.5 m 增加至 2.5 m 时, 单旋翼机喷施的雾滴在采样点上的沉积量和沉积均匀性分别降低了 19.3% 和 53.6%、多旋翼机分别降低了 48.7% 和 22.9%。在 4 种喷施条件下, 单旋翼机在采样点上的沉积量比多旋翼机同条件下分别高出 85.8%、26.5%、59.4% 和 123.4%。单旋翼机在 1.5 m 和 46.67 mL·hm⁻² 作业条件下, 农药对稻飞虱 *Nilaparvata lugens*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、稻秆潜蝇 *Chlorops oryzae*、细菌性条纹病及稻瘟病 5 种水稻病虫害的防治效果最好, 防效分别为 87.63%、76.67%、84.08%、59.26% 和 82.33%; 多旋翼机在 1.5 m 和 66.67 mL·hm⁻² 作业条件下, 农药对上述水稻病虫害的防治效果最好, 防效分别为 86.54%、78.62%、89.47%、66.67% 和 83.33%。【结论】2 种植保无人机由于旋翼风场不同, 导致雾滴沉积效果不同, 单旋翼植保无人机喷施效果更好; 2 种无人机喷施的农药最终对水稻病虫害的防治效果无明显差异, 且防治效果均达到国家防效标准。

关键词: 多旋翼无人机; 单旋翼无人机; 纳米农药; 施药量; 水稻病虫害; 田间药效
中图分类号: S49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)01-0116-09

Operational effects of unmanned helicopters for pesticide spraying in rice field

ZHANG Haiyan¹, LAN Yubin¹, WEN Sheng¹, YIN Xuanchun¹, LIANG Bing², TIAN Weikui³
(1 National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology/College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Nanjin Shansi Biological Technology Co., Ltd., Nanjing 211316, China; 3 Plant Protective Station of Menghai County, Xishuangbanna 666200, China)

Abstract: 【Objective】To test and compare the operation effects of single-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) type HY-B-15L and multi-rotor UAV type MG-1S on pest and disease control in rice field. 【Method】The mixing solution of rhodamine-B and nano-pesticide was selected to spray in rice field, and field spraying

experiments were carried out by changing the working altitude of helicopter and the amount of pesticide spraying. The polyester fiber cards and water-sensitive papers deposited by droplets were collected and analyzed by fluorescence spectrophotometer and image analysis software “DepositScan” to obtain deposition effects of the droplets. 【Result】 The deposition of droplets increased with the increase of pesticide application. Compared with 46.67 mL·hm⁻² pesticide, when pesticide application was 66.67 or 100.00 mL·hm⁻², the deposition of droplets sprayed by single-rotor UAV increased by 48.50% or 137.73% respectively, while the deposition of droplets sprayed by multi-rotor UAV increased by 66.60% or 111.88% respectively. The spraying height of UAV influenced the deposition and uniformity of droplets on the sampling point. When the spraying height ascended from 1.5 m to 2.5 m, the deposition and uniformity of droplets decreased by 19.3% and 53.6% respectively for single-rotor UAV, and decreased by 48.7% and 22.9% respectively for multi-rotor UAV. The spraying performances of single-rotor UAV were better than those of multi-rotor UAV under four spraying conditions. Compared with multi-rotor UAV, the deposition of single-rotor UAV increased by 85.8%, 26.5%, 59.4% and 123.4% from treatment 1 to treatment 4. When single-rotor UAV worked at the height of 1.5 m and a dosage of 46.67 mL·hm⁻², the preventive effect of pesticide was the best which were 87.63%, 76.67%, 84.08%, 59.26% and 82.33% respectively against *Nilaparvata lugens*, *Cnaphalocrocis medinalis*, *Chlorops oryzae*, bacterial leaf streak and rice blast. When multi-rotor UAV worked at 1.5 m and a dosage of 66.67 mL·hm⁻², the preventive effects against those rice pests and diseases were close to the former and were 86.54%, 78.62%, 89.47%, 66.67% and 83.33% respectively. 【Conclusion】 Because of different wind field below the UAV rotor, the droplet deposition of two UAVs are different. The spraying effect of single-rotor UAV is better than that of multi-rotor UAV, but there is no significant difference of control effect between two UAVs. The preventive effects of pesticides sprayed by both UAVs can reach the criterion of China.

Key words: multi-rotor UAV; single-rotor UAV; nano-insecticide; pesticide application; rice pest and disease; pesticide effect in field

水稻 *Oryza sativa* L.是我国主要的粮食作物之一,种植面积广泛,总种植面积约占粮食作物种植面积的 1/3,病虫害种类繁多,高达 139 余种^[1-2],主要的病害包括稻瘟病、纹枯病和病毒病等,主要的虫害包括稻飞虱 *Nilaparvata lugens*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 和螟虫等,稻纵卷叶螟寄生于水稻中部的叶片上,以幼虫为害水稻,缀叶成纵苞,躲藏其中取食上表皮及叶肉,仅留下白色下表皮;稻飞虱则聚生于水稻中下部吸食植株,造成水稻大面积的“冒穿”^[3]。水稻生长后期株叶茂盛,传统植保技术喷洒药剂难以穿透水稻冠层而沉积到水稻中下部,导致对生存于水稻中下部的病虫害防治效果不佳,严重影响水稻的产量与质量^[2]。农用无人机施药技术是近几年逐渐兴起的一种植保技术,解决了传统植保技术受作物长势和地理因素限制等弊端^[4-7],无人机旋翼产生的旋翼风场,不仅加速药液的沉积、减少雾滴飘移,同时扰动水稻冠层,使水稻冠层出现间隙,有利于药液沉积到水稻中下部,从而提高药液对寄生于水稻中下部病虫害的防治效果^[8]。薛新宇等^[9]研究结果表明,N-3 型农

用植保无人机喷施对稻飞虱和稻纵卷叶螟的防治效果均优于传统担架式喷雾机,并探究了 N-3 型农用植保无人机防治水稻病虫害的应用前景。陈盛德等^[10-12]针对无人机旋翼风场、无人机作业参数等因素对雾滴在水稻上沉积和分布的影响规律进行了多次试验研究分析,积累了大量无人机在水稻田的作业参数数据,为无人机水稻植保作业参数的选择提供指导。对植保无人机大田作业规律的探究中,大部分工作都是将不同机型的植保无人机分开研究,虽在理论上明确了各机型植保无人机的旋翼风场特点,但在田间试验中,验证并对比拥有不同旋翼风场的各植保无人机田间作业效果的试验研究较少,机型对植保无人机作业效果的影响尚不明确。本研究对 HY-B-15L 型电动单旋翼与 MG-1S 型电动多旋翼 2 款不同机型的植保无人机进行田间试验,探究植保无人机机型、作业高度和农药喷洒量等因素对雾滴在水稻冠层沉积分布规律及对稻飞虱、稻纵卷叶螟等 5 种主要水稻病虫害防治效果的影响,以期为植保无人机在水稻田田间作业中无人机机型和作业参数的选择等提供理论支撑和技术指导。

1 材料与方法

1.1 无人机机型和作业参数

植保无人机机型有 2 个, 分别为 HY-B-15L 型电动单旋翼植保无人机(手动飞行方式)和 MG-1S 型电动多旋翼植保无人机(手/自动飞行方式)各 1 架。无人机主要性能参数如表 1 所示。具体作业参数设

计如表 2 所示, 农药喷洒量设计了 3 个水平值, 分别为 46.67、66.67 和 100.00 mL·hm⁻², 3 个喷洒量中, 纳米农药与水的体积比分别为 2:5、1:4 和 2:13; 根据田间作业经验, 无人机作业高度设计了 2 个水平: 1.5 和 2.5 m。每组试验重复 3 次, 试验过程中, 温度 27 ℃ 左右, 湿度 78% 左右, 风速在 0.8~1.2 m·s⁻¹ 之间变化。

表 1 植保无人机的主要性能参数¹⁾
Table 1 Main performance index of protection UAV

机型 Model	作业速度/(m·s ⁻¹) Spraying speed	作业高度/m Spraying height	喷头数量 Nozzle number	单喷头流量/ (mL·min ⁻¹) Single nozzle flow	总喷施流量/ (mL·min ⁻¹) Total flow	最大载重量/L Maximum load
HY-B-15L	1~8	1~3	5	200~400	1 000~2 000	15
MG-1S	1~7	1~5	4	379	1 516	10

1) 喷头类型均为扇形喷头, 有效喷幅 4~7 m
1) The nozzle type was fan-shaped nozzle and the effective spraying swaths ranged from four to seven meters

表 2 试验参数的设置
Table 2 The setting of test parameters

机型 Model	处理 Treatment	喷洒量/(mL·hm ⁻²) Spray application	作业速度/(m·s ⁻¹) Spraying speed	作业高度/m Spraying height
HY-B-15L	T1	46.67	6.0	1.5
	T2	66.67	4.2	1.5
	T3	100.00	2.8	1.5
	T4	46.67	4.0	2.5
MG-1S	T5	46.67	3.2	1.5
	T6	66.67	2.2	1.5
	T7	100.00	1.5	1.5
	T8	46.67	2.3	2.5

1.2 试验药剂

喷施的农药为善思纳米农药(善思纳米农药公司提供), 其主要成分包括辛菌胺、氨基寡糖素和呋虫胺等, 不含任何有机溶剂和基酚结构, 完全以水为介质, 对环境友好, 是基于纳米农药技术研制推出的纳米级航空植保专用药剂, 可以解决植保无人机喷施高浓度传统农药时所出现的喷头堵塞问题, 提高植保无人机作业效率和防治效果。按 1 L 善思纳米农药中掺入 5 g 罗丹明 B 粉末的比例配置成含荧光示踪剂的农药试剂。采用水敏纸和麦乐卡收集雾滴, 水敏纸尺寸为 25 mm×75 mm, 麦乐卡尺寸为 50 mm×80 mm。

1.3 无人机施药试验与防治效果调查

试验在云南省勐海县农业部指定的水稻重大病虫害绿色防控示范区内进行。作业对象是分蘖期的水稻, 水稻株高 30 cm。试验进行前, 在 3.33 hm²

水稻田中用彩带规划出 25 个矩形小区 (25 m×27 m), 其中, 1 个小区为空白对照小区, 其他 24 个小区为施药小区, 每个小区间都留有 0.5 m 的保护带 (图 1a)。

为了测试不同作业参数条件下 2 架植保无人机喷施的药液在靶标上沉积分布情况, 按图 1b 所示的布点方式在 1~8 施药小区布置采样点, 并按表 2 的试验参数依次进行施药试验。

无人机作业和田间布点图如图 2 所示。试验前, 请勐海县植保质检站工作人员调查田间的病虫害发生情况, 发现水稻患有的虫害主要有稻秆潜蝇 *Chlorops oryzae*、稻飞虱、稻纵卷叶螟等, 病害主要有细菌性条斑病和稻瘟病等。为了测试植保无人机作业参数对上述水稻病虫害防治效果的影响, 结束图 1a 中第 1 行 1~8 小区的植保无人机喷施雾滴的沉积分布试验后, 在剩余的 16 个小区完成 8 个处

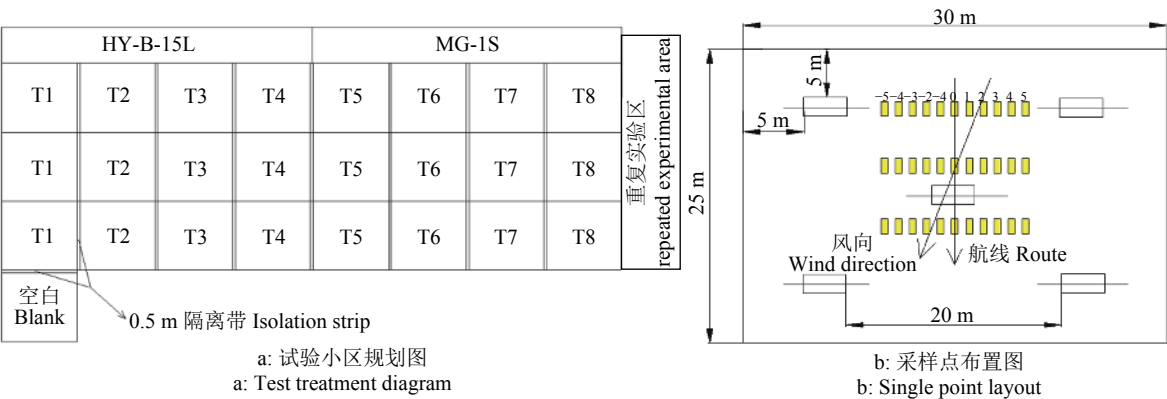


图 1 试验方案示意图
Fig. 1 The schematic diagram of test plan



a: 无人机作业图; b: 布点图; c: 水敏纸和麦乐卡布置图; d: 病虫害调查图
a: Spray test site; b: Single point layouts; c: Droplet collection card layouts; d: Rice diseases and pests survey

图 2 田间试验布点图
Fig. 2 The diagram of test layouts in field

理的重复试验,并在施药前和施药 3 d 后,统计 24 个试验小区和空白对照组中稻飞虱等水稻病虫害的防治情况,计算不同施药条件下,农药对水稻病虫害的防治效果:

1) 稻飞虱: 每试验小区采用平行跳跃法调查施药前虫口基数,施药 3 d 后,调查每个试验小区内稻飞虱数量。调查时用 15 cm×40 cm 白瓷盘每小区随机拍 15 盘,每盘拍 2 丛水稻,每个试验小区共调查 30 丛水稻。不区分稻飞虱种类和虫龄,计算总稻飞虱防效。稻飞虱的调查、记录参考农药田间药效试验准则^[13]。根据各小区施药前和施药后调查的活虫数,计算虫口减退率和校正防效。

虫口减退率 = (施药前活虫数 - 施药后活虫数) / 施药前活虫数 × 100%,

校正防效 = (施药区虫口减退率 - 对照区虫口减退率) / (100 - 对照区虫口减退率) × 100%。

2) 稻纵卷叶螟和稻秆潜蝇: 施药前和施药 3 d 后,各调查 1 次试验小区内稻纵卷叶螟的病害情况。每个小区采用五点平行取样的方法,每个点 5 穴,共 25 穴。调查、记录总叶片数和卷叶数,计算卷叶率和相对防效。调查时采下所有虫苞,带回实验室检查残留活虫数。计算虫口下降率和活虫防效。稻纵卷叶螟的调查、记录参考农药田间药效试验准则^[14]。

保叶效果 = (对照区虫苞数 - 防治区虫苞数) / 对照区虫苞数 × 100%,

防治效果 = (对照区活虫数 - 施药区活虫数) / 对照区活虫数 × 100%。

3) 稻瘟病: 施药前调查病情基数, 施药 3 d 后, 调查病害的防治情况, 每个小区采用五点平行取样的方法, 每点取 50 株, 每株调查旗叶及旗叶以下 2 片叶。记录总叶片数和发病叶片数, 确定稻瘟病的发病级别, 计算稻瘟病的病情指数和防治效果。稻瘟病的调查、记录参考农药田间药效试验准则^[15]。

病情指数 = $\sum$ (各级病叶穗数×相对级数值)/(调查总数×9)×100,

防治效果= $\left(1-\frac{CK_0\times PT_1}{CK_1\times PT_0}\right)\times 100\%$,

式中, CK₀ 为空白对照区施药前病情指数, CK₁ 为空白对照区施药后病情指数, PT₀ 为药剂处理区施药前病情指数, PT₁ 为药剂处理区施药后病情指数。

4) 细菌性条斑病: 施药前调查病情基数, 施药 3 d 后, 调查病害的防治情况。每个小区采用五点平行取样的方法, 每点调查 25 丛, 记录水稻总叶片数和发病叶片数, 确定细菌性条斑病的发病级别, 计算细菌性条斑病的病情指数和防治效果。细菌性条斑病的调查、记载参考农药田间药效试验准则^[16]

1.4 喷嘴雾滴粒径信息测定

雾滴粒径是影响雾滴在靶标上沉积的重要因素之一^[17-18]。为了更全面地分析不同浓度的纳米农药在水稻上的沉积结果, 大田试验前在实验室内通过激光粒度仪对 2 个型号喷嘴雾化的雾滴粒径信息进行采集、计算和分析。试验时, 喷嘴放置于激光粒度仪的激光发射装置与激光接收装置正中间、激光光束正上方 0.35 m 处, 试验过程中, 11001 VS 型喷嘴和 110-015-VP 型喷嘴的喷施流量分别为 250 和 300 mL·min⁻¹, 2 种喷嘴的喷施流量保持不变, 仅改变农药的喷施浓度, 每次试验采样时间为 1 min。

1.5 数据处理

每次试验完成, 待采集卡上的雾滴干燥后, 按照序号收集雾滴采集卡, 并逐一放入相对应的密封

袋中。回到酒店后, 将收集的水敏纸逐一用扫描仪扫描, 扫描后的图像通过图像分析软件 DepositScan 进行分析, 获得纳米农药不同喷施条件下在水稻上的沉积密度。由于荧光分光光度计体积过大, 无法携带, 因此麦乐卡采集回来后放入冰盒, 低温收藏, 带回实验室处理, 处理方法为: 根据麦乐卡的着色情况, 预估示踪剂的沉积浓度在 1.500 μg·mL⁻¹ 以内, 因此本次处理配置了 6 个质量浓度的标准溶液, 分别为 0.005、0.300、0.600、0.900、1.200 和 1.500 μg·mL⁻¹, 用这 6 个标准溶液完成标准浓度曲线拟合(拟合度为 0.996 7)。然后, 用蒸馏水清洗麦乐卡 2~3 次, 将麦乐卡上的荧光示踪剂洗净, 转移到对应编号的比色管内, 用比色皿装样, 利用已经拟合好的标准曲线逐点进行测量。

2 结果与分析

2.1 无人机有效沉积区域的判定

表 3 是 2 架无人机上安装的喷嘴雾化的雾滴粒径测定信息。从表 3 可以看出, 随着药液喷洒量的增加, 2 个喷嘴的雾滴体积中径 (D_{V0.5}) 均减小, 但减小趋势较平缓, 喷洒量为 100.00 mL·hm⁻² 时, 2 个喷嘴雾化的雾滴体积中径最小, 11001VS 喷嘴的体积中径为 108.20 μm, 110-015-VP 喷嘴的体积中径为 123.60 μm; 在相同喷洒量条件下, 110-015-VP 喷嘴雾化的雾滴体积中径均大于 11001 VS 喷嘴雾化的雾滴的体积中径。

表 4 为 2 架无人机在各个采样点上的雾滴沉积密度结果。根据表 4 的结果及有效沉积区域的判定方法, 对 2 架无人机的有效沉积区域进行判定, 2 架无人机的有效沉积区域结果如表 5 所示。由表 5 可见, 在 1.5 m 的作业高度下, HY-B-15L 型单旋翼植保无人机在 46.67、66.67 和 100.00 mL·hm⁻² 喷洒量的喷施条件下有效沉积区域分别为-2~-2、-2~-2 和

表 3 不同喷洒量条件下 2 种机型喷嘴的雾滴粒径
Table 3 The droplet diameters of two kinds of nozzles under different spray applications

机型 Model	喷嘴型号 Nozzle model	雾滴分类 Droplet classification	雾滴粒径 Droplet diameter/μm		
			46.67 mL·min ⁻¹	66.67 mL·min ⁻¹	100.00 mL·min ⁻¹
MG-1S	11001 VS	Dv _{0.1}	50.65	49.22	49.57
		Dv _{0.5}	111.80	111.20	108.20
		Dv _{0.9}	193.10	200.10	174.10
HY-B-15L	110-015-VP	Dv _{0.1}	57.62	60.89	60.29
		Dv _{0.5}	132.20	127.90	123.60
		Dv _{0.9}	238.20	208.00	203.10

表 4 不同处理 2 种机型无人机在各个采样点的雾滴沉积密度

Table 4 The droplet deposition densities of two UAVs on different sample points under different treatments									个·cm ⁻²
采样点 Sample point	HY-B-15L				MG-1S				
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
-5	4.80	2.85	4.10	4.00	3.05	1.25	0.50	3.65	
-4	4.10	1.60	2.40	12.35	7.80	6.90	9.10	8.65	
-3	5.75	4.65	15.80	21.35	16.65	23.45	42.15	15.05	
-2	21.65	46.65	27.90	34.20	34.50	49.25	69.65	31.10	
-1	80.45	137.85	88.70	77.60	86.65	98.45	78.70	58.35	
0	64.20	86.10	55.60	58.35	78.50	88.55	66.30	42.10	
1	48.15	68.50	62.70	20.35	56.85	65.05	53.45	58.35	
2	30.30	37.20	34.00	17.80	31.70	30.00	55.20	23.35	
3	8.30	11.90	19.80	5.30	12.20	5.50	25.85	14.00	
4	0	0	0	0	0.80	5.90	10.00	3.90	
5	0	0	0	0	0	0	21.00	4.25	

-3~3, MG-1S 型多旋翼植保无人机分别为-3~2、-3~2 和-3~3; 在 2.5 m 作业高度和 46.67 mL·hm⁻² 的喷施条件下, 2 架无人机的有效沉积区域分别为-3~2 和-3~2。

由表 5 可见, 当农药喷洒量为 46.67 和 66.67 mL·hm⁻² 时, 2 架植保无人机的有效沉积区域并未随农药喷洒量的增加而发生变化, 但当农药喷

洒量增加至 100.00 mL·hm⁻² 时, 2 架植保无人机的有效沉积区域均增加, 且 2 架植保无人机有效沉积区域相同; 当植保无人机作业高度为 1.5 m、农药喷洒量为 46.67 mL·hm⁻² 时, HY-B-15L 型单旋翼植保无人机的有效沉积区域为-2~2, MG-1S 型多旋翼植保无人机的有效沉积区域为-3~2; 当植保无人机作业高度增加至 2.5 m 时, 2 架植保无人机的有效沉积区域均为-3~2, HY-B-15L 型植保无人机有效沉积区域增加, 而 MG-1S 型植保无人机的有效沉积区域未发生变化; 在前 2 个处理条件下, MG-1S 型多旋翼植保无人机的有效沉积区域高于 HY-B-15L 型单旋翼植保无人机, 但在后 2 个处理中, 2 架无人机的有效沉积区域相同。

以表 5 中 2 架植保无人机的有效沉积区域为参考, 对有效沉积点上的沉积量数据进行统计学处理, 得到表 6 所示的结果。

表 5 不同作业高度下 2 种无人机的有效沉积区域

Table 5 The effective spray area of two UAVs under different operating heights			
作业高度/m Spraying height	喷洒量/(mL·min ⁻¹) Spray application	HY-B-15L	MG-1S
1.5	46.67	-2~2	-3~2
	66.67	-2~2	-3~2
	100.00	-3~3	-3~3
2.5	46.67	-3~2	-3~2

表 6 不同处理 2 种无人机的雾滴沉积结果

Table 6 The droplet deposition results of two UAVs under different treatments				
机型 Model	处理 Treatment	沉积量/(mg·cm ⁻²) Deposition	极差值/(mg·cm ⁻²) Extreme range	变异系数/% Coefficient of variation
HY-B-15L	T1	0.239 0	0.166 6	29.91
	T2	0.354 8	0.262 8	29.50
	T3	0.568 1	0.569 4	36.27
	T4	0.192 8	0.250 1	45.94
MG-1S	T5	0.168 3	0.142 0	29.19
	T6	0.280 4	0.342 1	42.18
	T7	0.356 5	0.238 8	25.65
	T8	0.086 3	0.082 5	35.60

2.2 农药喷洒量对雾滴沉积效果的影响

在 1.5 m 作业高度下, 无人机在各个采样点的雾滴沉积量见图 3。由图 3 可以看出, 随着喷洒量的增加, 2 架无人机喷施的雾滴在各采样点上的沉积量均出现增加趋势, 当喷洒量为 66.67 和 100.00 mL·hm⁻² 时, HY-B-15L 型无人机在采样点上的平均沉积量比喷洒量为 46.67 mL·hm⁻² 时分别增加了 48.50% 和 137.73%, MG-1S 型无人机分别增加了 66.60% 和 111.88%。2 架无人机喷施的雾滴在采样点上沉积的均匀性随喷洒量的增加出现波动, 其中, HY-B-15L 型无人机在喷洒量为 66.67 mL·hm⁻² 时, 雾滴的均匀性最好, 雾滴沉积量变异系数为 29.50%; MG-1S 型无人机在喷洒量为 100.00 mL·hm⁻² 时, 雾滴沉积均匀性最好, 雾滴沉积量的变异系数为 25.65%(表 6)。

从图 3 也可以看出, 在各喷施条件下, HY-B-15L 型单旋翼无人机在采样点上的沉积量均高于 MG-1S 型多旋翼无人机。结合表 6 可知, 在 T1~T3 的 3 个喷洒条件下, HY-B-15L 型单旋翼无人机喷施的雾滴在采样点上的沉积量比 MG-1S 型多旋翼无人机依次高出 85.8%、26.5% 和 59.4%。原因可能是: 多旋翼植保无人机的旋翼风场由多个无人机旋翼产生的旋翼风场及自然风场等多个风场耦合形成, 使多旋翼的旋翼风场较复杂, 存在多个协迫雾滴沉降的方向, 使有效沉积方向上的雾滴数量减少; 单旋翼植保无人机的旋翼风场仅由 1 个旋翼产生, 旋翼风场结构相比于多旋翼的旋翼风场简单, 由翼尖涡等非有效旋翼风卷走的雾滴数量较少。同时, 由表 3 可知, 单旋翼无人机上的喷嘴所雾化的雾滴粒径较大, 抗风场干扰能力较强, 使得翼尖涡等非沉积方

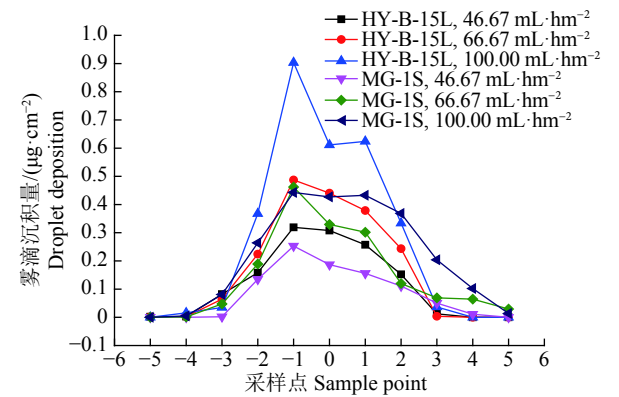


图 3 不同喷洒量下 2 架无人机的雾滴沉积量曲线图 (作业高度 1.5 m)

Fig. 3 The curves of droplet depositions of two UAVs under different spray applications(Spraying height was 1.5 m)

向的风力携带走的雾滴较少, 因此, 单旋翼无人机喷施的农药在采样点上的沉积量高于多旋翼无人机。

仅从沉积量角度考虑, 在 3 个喷洒量中, 喷洒量为 100.00 mL·hm⁻² 时, 善思纳米农药在靶标上的沉积量最高; HY-B-15L 型单旋翼在靶标上的沉积效果稍好于 MG-1S 型多旋翼无人机。

2.3 无人机作业高度对雾滴沉积效果的影响

图 4 描述了 2 架无人机在 1.5 和 2.5 m 作业高度条件下, 雾滴在各个采样点上的沉积量情况。由图 4 知, 2 架无人机在 1.5 m 作业高度时, 雾滴在采样点上的沉积量和沉积均匀性均高于 2.5 m 作业高度。当作业高度由 1.5 m 增加至 2.5 m 时, HY-B-15L 型单旋翼无人机和 MG-1S 型多旋翼无人机在采样点上的沉积量分别降低了 19.3% 和 48.7%, 雾滴沉积均匀性降低了 53.6% 和 22.9%。

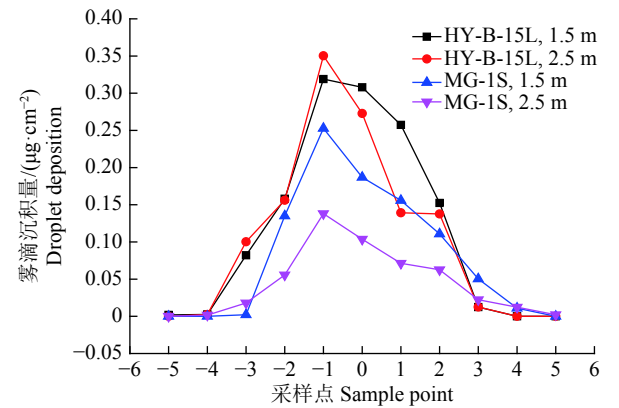


图 4 不同作业高度下 2 架无人机在各个采样点的雾滴沉积量曲线图

Fig. 4 The curves of droplet depositions of two UAVs under different spraying heights

结合表 6 中 T4 和 T8 的试验结果可知, 在 2.5 m 作业高度时, HY-B-15L 型单旋翼无人机喷施的雾滴在采样点上的沉积量高于 MG-1S 型多旋翼无人机, 且增加了 123.4%。出现这个现象的原因与“2.2”中阐述的原因一样: 单旋翼植保无人机的旋翼风场分布较简单, 协迫雾滴沉积于靶标上的气流较强, 因此, 单旋翼植保无人机喷施的雾滴中, 在旋翼风场下洗气流的协迫下沉降的雾滴数量更多, 且这些雾滴的沉降速度更快、沉降时间更短, 蒸发和飘移损失的雾滴数量减少, 所以, 雾滴沉降量更大。

2.4 农药喷洒量对水稻病虫害防效的影响

从图 5a 可以看出, 当农药喷洒量为 46.67 mL·hm⁻² 时, HY-B-15L 型电动单旋翼植保无人机喷施的农药对稻飞虱、稻纵卷叶螟、稻秆潜蝇、细菌性条纹病和稻瘟病等水稻病虫害的防治效果最好, 防效分别为 87.63%、76.67%、84.08%、59.26% 和 82.33%。从

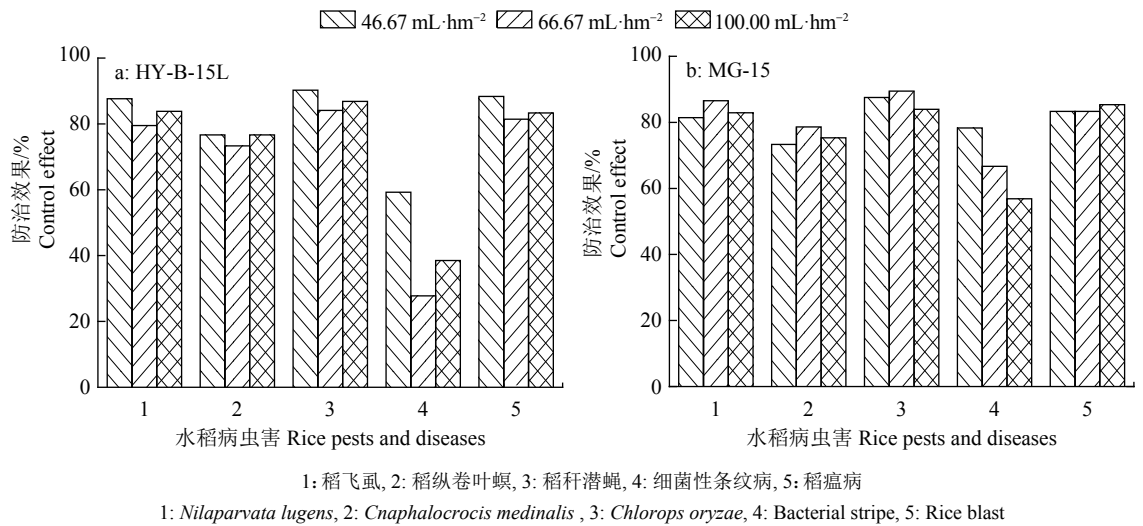


图 5 不同喷施量 2 种无人机对水稻病虫害防治效果

Fig. 5 The control efficacy of two UAVs against rice pests and diseases under different pesticide applications

图 5b 可以看出, 在喷洒量为 66.67 mL·hm⁻² 时, MG-1S 型电动多旋翼植保无人机喷施的农药对稻飞虱等水稻病虫害防治效果最好, 防效分别为 86.54%、78.62%、89.47%、66.67% 和 83.33%。

2.5 无人机作业高度对水稻病虫害的影响

从图 6 可以看出, 2 架植保无人机在 1.5 m 作

业高度条件下, 农药对稻飞虱等水稻病虫害的防治效果更好; 综合“2.4”的结果表明, HY-B-15L 型单旋翼植保无人机在 1.5 m 和 46.67 mL·hm⁻² 的喷施条件下的作业效果最好, MG-1S 型电动多旋翼植保无人机在 1.5 m 和 66.67 mL·hm⁻² 的喷施条件下的作业效果最好。

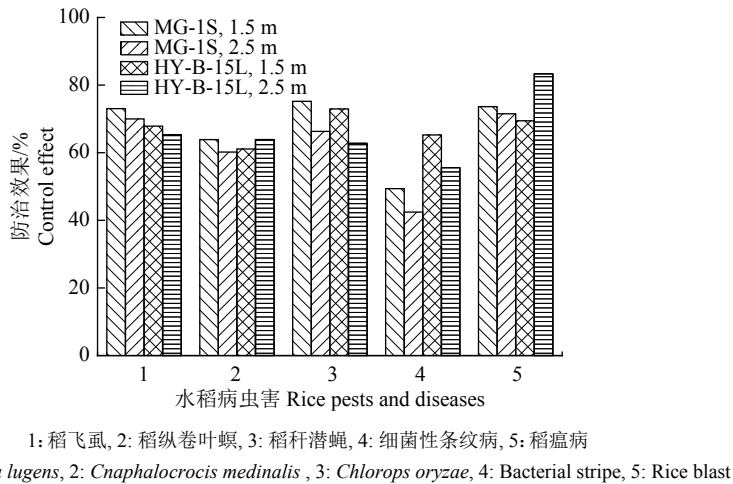


图 6 不同作业高度条件下 2 种无人机对水稻病虫害的防治效果

Fig. 6 The control efficacy of two UAVs against rice pests and diseases of under different spraying heights

3 结论

HY-B-15L 型单旋翼植保无人机和 MG-1S 型多旋翼植保无人机喷施的雾滴在各采样点上的沉积量随农药喷洒量的增加而增加, 当喷洒量为 66.67 和 100.00 mL·hm⁻² 时, HY-B-15L 型单旋翼无人机在各采样点上的沉积量比喷洒量为 46.67 mL·hm⁻² 的分别增加了 48.50% 和 137.73%, MG-1S 型多旋翼无人机分别增加 66.60% 和 111.88%。2 架植保无人机在 1.5 m 作业高度条件下, 喷施的雾滴在采

样点上的沉积量和沉积均匀性均高于 2.5 m 作业高度, 当作业高度为 2.5 m 时, HY-B-15L 型单旋翼无人机和 MG-1S 型多旋翼无人机喷施的雾滴在采样点上的沉积量比作业高度 1.5 m 时分别降低了 19.3% 和 48.7%, 沉积均匀性分别降低了 53.6% 和 22.9%。在 4 个喷施条件下, HY-B-15L 型单旋翼无人机在采样点上的沉积量比 MG-1S 型多旋翼无人机同条件下高出 85.8%、26.5%、59.4% 和 123.4%, 喷施效果稍好。

HY-B-15L 型单旋翼无人机在 1.5 m 和 46.67 mL·hm⁻²

作业条件下, 农药对稻飞虱、稻纵卷叶螟、稻秆蝇、细菌性条纹病和稻飞虱等水稻病虫害防治效果最好, 防效分别为 87.63%、76.67%、84.08%、59.26% 和 82.33%; MG-1S 型多旋翼无人机在 1.5 m 和 66.67 mL·hm⁻² 作业条件下, 农药对稻飞虱、稻纵卷叶螟稻秆蝇、细菌性条纹病和稻飞虱等水稻病虫害的防治效果最好, 防效分别为 86.54%、78.62%、89.47%、66.67% 和 83.33%。2 种型号植保无人机喷施农药对水稻病虫害的防治效果差异不大。

参考文献:

[1] 贺奇, 杨锋, 马洪文, 等. 1991—2010 年宁夏水稻病虫害发生特征与经济损失分析[J]. 环境昆虫学报, 2016, 38(3): 500-507.

[2] 吕信河, 肖丽萍, 李涛斌, 等. 我国水稻植保机械存在的问题及相应对策[J]. 南方农机, 2016, 47(3): 47-49.

[3] 陈富启, 刘暮莲, 马德发, 等. 几种药剂对水稻稻飞虱的田间防效试验[J]. 广西植保, 2017, 30(1): 28-29.

[4] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.

[5] 薛新宇. 农业航空植保技术现状[J]. 农业技术与装备, 2014(5): 16-18.

[6] LAN Y B, CHEN S D, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. Int J Agric Biol, 2017, 10(3): 1-17.

[7] WANG Z G, LAN Y B, HOFFMANN W C, et al. Low altitude and multiple helicopter formation in precision agriculture/[C]. ASABE Annual International Meeting, Kansas City, USA, 2013.

[8] 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 基于空间质量平衡法的植保无人机施药雾滴沉积分布特性测试[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 89-97.

[9] 薛新宇, 秦维彩, 孙竹, 等. N-3 型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. 植物保护学报, 2013, 40(3): 273-278.

[10] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, et al. 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.

[11] 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.

[12] CHEN S D, LAN Y B, LI J Y, et al. Effect of wind field below unmanned helicopter on droplet deposition distribution of aerial spraying[J]. Int J Agric Biol, 2017, 10(3): 67-77.

[13] 中华人民共和国农业部农药检定所. 农药田间药效试验准则 (一) 杀虫剂防治水稻稻飞虱: GB/T179804—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.

[14] 中华人民共和国农业部农药检定所. 农药田间药效试验准则 (一) 杀虫剂防治稻纵卷叶螟: GB/T179802—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.

[15] 中华人民共和国农业部农药检定所. 稻瘟病测报调查规范: GB/T15790—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[16] 中华人民共和国农业部农药检定所. 农药田间药效试验准则 (二) 第 105 部分: 杀菌剂防治水稻细菌性条斑病: GB/T17980105—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

[17] 贾卫东, 薛飞, 李成, 等. 荷电雾滴群撞击界面过程的 PDPA 测试[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 78-82.

[18] GUPTA A, KUMAR R. Droplet impingement and breakup on a dry surface[J]. Comput Fluids, 2010, 39(9): 1696-1703.

【责任编辑 周志红】