

单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响

王娟^{1,2} 兰玉彬^{1,3} 姚伟祥^{1,3} 陈鹏超^{1,3} 林晋立^{1,3} 燕颖斌^{1,3}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 海南大学机电工程学院, 海口 570228;
3. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642)

摘要: 为了阐明 3WQF120-12 型单旋翼无人植保机喷施槟榔树的雾滴沉积效果、地面流失雾滴沉积分布、飘移及可应用性,研究了无人机不同作业高度对槟榔树冠层及地面喷施效果的影响。试验选用诱惑红染色剂,并配制成质量分数为 0.5% 的水溶液,代替农药;用铜版纸进行雾滴采集,并利用图像处理软件 DepositScan 分析得出雾滴沉积结果。结果表明:作业高度对槟榔树各层采样点的雾滴沉积量没有显著性影响,同一高度作业时,树冠上层与树冠下层、树冠上层与树果层之间的雾滴沉积量有显著差异,树冠上层雾滴沉积水平最高可达 53.27%,树冠下层和树果层可达树冠上层的 59.19% 和 27.91%;地面流失采样点雾滴沉积结果显示,不同作业高度对地面 3 列采样点的雾滴沉积量有显著性影响,最低平均沉积水平约 19.9%;飘移区数据显示,3 个作业高度对飘移带采样点的雾滴沉积量没有显著性影响,当作业高度为 12.09 m 时,飘移带测得的飘移量最大,作业高度 10.40 m 时飘移量最小。同时测试发现,飘移距离最远可达 36.35 m,因此实际作业时必须留出足够的安全距离。

关键词: 单旋翼无人机; 喷施; 槟榔树; 雾滴; 沉积; 飘移规律

中图分类号: S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0109-11

Effects of Working Height of Single-rotor Unmanned Aerial Vehicle on Drift and Droplets Deposition Distribution of Areca Tree

WANG Juan^{1,2} LAN Yubin^{1,3} YAO Weixiang^{1,3} CHEN Pengchao^{1,3} LIN Jinli^{1,3} YAN Yingbin^{1,3}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. Mechanical and Electrical Engineering College, Hainan University, Haikou 570228, China
3. National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology (NPAAC), Guangzhou 510642, China)

Abstract: Aiming to elucidate the effects of 3WQF120-12 single-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) on the effect of droplet, deposition distribution, ground loss droplets, drift, and applicability when spraying areca palm. The impact of different working heights of UAV on the spraying effect of areca palm canopy was mainly studied. In this experiment, the red stain aqueous solution with a mass fraction of 0.5% was selected and instead of pesticides. The droplets were collected on coated paper and analyzed by an image processing software (DepositScan). The results showed that when the operation height was 12.09 m, 11.46 m and 10.40 m, respectively, the operation height had no significant influence on the droplets deposition amount of the sampling points in each layer of the areca palm. Meanwhile, the deposition level in the upper canopy could reach 53.27%, that of the lower canopy and fruit layer can reach 59.19% and 27.91% of the upper canopy. The results of the droplets deposition at the ground loss sampling points showed that the droplets deposition of the three column sampling points on the ground was significantly affected by different operation heights. When the operation height was 10.40 m, the droplets loss on the ground was the least, and the average deposition level was about 19.9%. The data of the drift area showed that the three working heights had no significant influence on the droplets deposition of the

收稿日期: 2019-01-14 修回日期: 2019-01-28

基金项目: 广东省教育厅重点平台及科研项目(2015KGJHZ007)、广州市科技计划项目(201807010039)、高等学校学科创新引智计划项目(D18019)、广东省引进领军人才项目(2016LJ06G689)、国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)和广东省自然科学基金项目(2017A030310383)

作者简介: 王娟(1982—),女,博士生,海南大学副教授,主要从事精准农业航空雾滴飘移模型研究,E-mail: 49792740@qq.com

通信作者: 兰玉彬(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事精准农业航空研究,E-mail: ylan@scau.edu.cn

sampling points in the drift line. When the working height was 12.09 m, the drift line sample location measured the largest amount of drift and the working height of 10.40 m had the smallest. At the same time, it was found that the downwind distance corresponding to 90% drift accumulation could reach as far as 36.35 m. Therefore, sufficient safety distance must be left for practical operation. The areca aerial spraying was very different from that of conventional crops, mainly in working speed and height. The speed of areca aerial spraying was about 1.5 m/s, which was much lower than usual speed (3 ~ 5 m/s), and the working height can usually be more than 10 m. The wake vortices were mainly influenced by working height, as the working height increased, the amount of droplets deposition was decreased, especially in the upper layer of the areas' canopy. Due to the operation speed was slow, the acting time of the rotor wind field was relatively long. The combined action of downwash airflow and crosswind in the rotor wind field can significantly improve the penetration of droplets. In this experiment, there were three different working heights, and the droplet volume median diameter (VMD) of droplets in each layer was changed significantly with the working heights. With the increase of crosswind and working height, the droplet volume median diameter (VMD) of droplets in each layer was decreased, and the mean deposition and percent area coverage rate in the fruit layer could increase by up to 53.75% and 62.20%, respectively. In actual operations, appropriate operation parameters can be selected according to the growing period and the occurrence part of diseases and pests.

Key words: single rotor UAV; spraying; areca; droplet; deposition; drift law

0 引言

槟榔主要分布在我国海南省、台湾省和云南省,大部分种植在丘陵坡地上。槟榔具有很高的药用价值,是四大南药(槟榔、砂仁、益智、巴戟)之首^[1],槟榔的果实、种子(又名榔玉)、皮、花等均可入药^[2-3]。2018年,海南省种植槟榔 15.5 万 hm^2 ,占全国槟榔种植面积 95% 以上。我国的槟榔病虫害主要有槟榔黄化病(Areca nut yellow leaf disease, AYLD)、细菌性叶斑病、果腐病、红脉穗螟、椰心叶甲、红棕象甲等^[4]。其中,AYLD 在实际生产中主要以预防为主,发病部位主要集中在叶片及花茎部位^[5-6],可危害槟榔植株任何生长阶段,目前尚无根治办法。一般槟榔园发病率为 10% ~ 30%,重病区可达 90%,造成减产 70% ~ 80%。叶斑病和果腐病主要集中在叶片、果实、心叶及茎秆上,槟榔褐根病及黑纹根腐病则主要集中在根部及根茎部位,其他槟榔常见病亦主要集中在这些部位。笔者在当地农户调查中发现,一般槟榔的发病部位多集中在叶面及叶心、花果部位。进入成熟期后,槟榔树树高可达 10 ~ 20 m,近几年培育的槟榔新品种,7 ~ 8 年树龄树高可控制在 8 ~ 9 m^[7]。槟榔树在幼苗时期可人工施药,树高超过 2 m 时人工施药难度大大增加,且因大部分树生长在丘陵地带,施药更加困难。在槟榔树高度 3 m 以上时,果农大都采用粗放式管理,急性患病时便带来灾难性损害。

日本是较早研发植保无人机技术的国家,其代表机型雅马哈 RMAX 系列属于单旋翼植保无人机机型。单旋翼植保无人机具有以下优点:载重能力较强,续航时间较长,单旋翼所形成的风场能吹动叶

面提高冠层穿透性,并有效控制喷洒药剂的飘移问题。近几年无人机飞防在中国蓬勃发展,无人机飞防可以适应丘陵、山区和坡地等复杂地形,也可适用于大田区和果树区。航空喷雾具有机动、灵活、喷雾作业效率高等特点^[8-11],植保无人机应用之初国内外学者便针对各种作物的航空喷雾效果做了大量研究,得出不同作业参数对喷施效果的影响^[12-23]。农业航空作业不可避免都会考虑雾滴飘移问题。兰玉彬等^[24-27]研究了航空助剂和航空作业参数对作物冠层沉积和飘移的影响,航空作业中的作业速度、高度及是否使用助剂对雾滴飘移的影响亦非常明显^[28]。目前植保无人机在低矮作物的喷施应用中已经取得较好的效果,对高秆作物的喷施效果还在研究之中。国内一些学者如秦维彩、薛新宇等^[29-30]已在玉米、甘蔗等高秆作物上使用单旋翼无人机喷施,对不同参数下的雾滴沉积分布规律进行了总结,得出玉米生长后期喷施高度与雾滴沉积效果的关系,并给出了最佳作业高度。

目前海南槟榔病虫害防治已经开始采用无人机作业,由于受槟榔树外形和生长高度限制,导致测试难度大,关于槟榔树的无人机飞防试验尚未见报道。本文基于单旋翼无人机在不同作业高度参数下,从提高冠层沉积分布、沉积穿透性、降低地面流失等角度出发,筛选出适合槟榔树作业的单旋翼无人机作业参数,为单旋翼无人机在槟榔树上的飞防应用提供数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

本次试验采用安阳全丰生物科技有限公司生产

的全球鹰 3WQF120-12 型智能悬浮植保机,飞控系统为全自主方式,可定高定速作业。喷洒杆长度为 1.25 m,最大起飞质量 47 kg,如图 1 所示。无人机主要参数及性能指标如表 1 所示,喷头为德国 LECHLER 公司生产的 Lu120-015 型扇形喷嘴。



图 1 单旋翼无人机喷施槟榔现场

Fig.1 Physical scene map of single wing unmanned aerial vehicle (UAV) spraying areca test

表 1 3WQF120-12 型无人机主要参数

Tab.1 Main parameter and performance index of UAV

参数	数值
整机尺寸/(mm×mm×mm)	2 130×700×670
主旋翼直径/mm	2 410
最大载药量/L	12
喷头数量/个	3
喷洒幅宽/m	4~6
续航时间/min	≥25

试验环境监测系统使用 Kestrel 气象计(美国 NK 公司),型号为 NK-5500,用于监测和记录环境风速、风向和温湿度等。气象计放置在上风向距离槟榔田 5 m 的空地上,采集数据时间间隔为 5 s。气象计从试验预备活动时即启动直至所有试验测试完毕后关闭,每个架次的精准作业时刻由北斗系统记录,根据北斗记录时刻从全部气象数据中截取试验时间段的环境气象数据。北斗定位系统为华南农业大学精准农业航空团队研发的轻型机载北斗 RTK 差分系统,平面精度达 $(10+5\times10^{-7}D)$ mm,高程精

度达 $(20+1\times10^{-6}D)$ mm,其中 D 表示该系统实际测量的距离,单位为 km,数据采集间隔 0.1 s,能够实时记录无人机飞行实时轨迹^[31]。

1.2 试验方法

1.2.1 试验场地

试验场地位于海南省澄迈县国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心槟榔示范基地(北纬 19°57'57",东经 110°08'58")。槟榔树龄 6 年,花果期(树干上即将鼓包开花)。树高范围为 4.7~6.3 m,种植密度为 1 800 株/hm²,郁闭度约为 0.4,叶面积指数范围为 1.01~1.91,槟榔树之间的行列间距为 2.0 m×2.5 m。采样槟榔植株及采样点布置如图 2 所示。



图 2 槟榔植株采样

Fig.2 Sampling areca plant

1.2.2 采样点设计

由于槟榔树种植方式、生长习性、植株外形、冠层结构和水稻等大田作物不同,预试验显示雾滴沉积量测试结果变异系数较大,为了保证试验数据的准确性,在林地的前、中、后各取 3 排,每排 3 棵树形、树高、叶面积指数均相近共 9 棵树作为布点对象,9 个重复,以便获取更客观和具有参考价值的数据。平均树高 4.9 m,叶面积指数表征植物叶片总面积与土地面积的比值,它与植被的密度、树木的生物学特性和环境条件有关,使用 CI-110 型植物冠层图像分析仪(美国 CID 公司)得到采样植株平均叶面积指数为 1.27,平均叶面积指数由 9 棵采样植株叶面积指数平均求得。如图 3 所示,采样分为 3 部分:第 1 部分为槟榔树冠层和树果层雾滴采样;第 2 部分为地面流失雾滴采样;第 3 部分为飘移带雾滴采样。

1.2.2.1 槟榔树冠层和树果层雾滴采样布置方式

槟榔树冠层顶部横向面积较小,树叶与树干夹角较小,属于容易发生病虫害的叶心部位;中部横向面积较大,树叶与树干夹角增加且数量密集,是槟榔树叶片易发生病虫害的重要部位;槟榔果实结在树干上为病虫害重点防治部位。槟榔采样共分为 3 层,冠层雾滴采样分为 2 层,第 1 层布置在距离树顶约 0.5 m 的上层位置,叶面与树干夹角 30°~50°,圆形布置,直径约 1.2 m,包括圆心和圆周等间距布

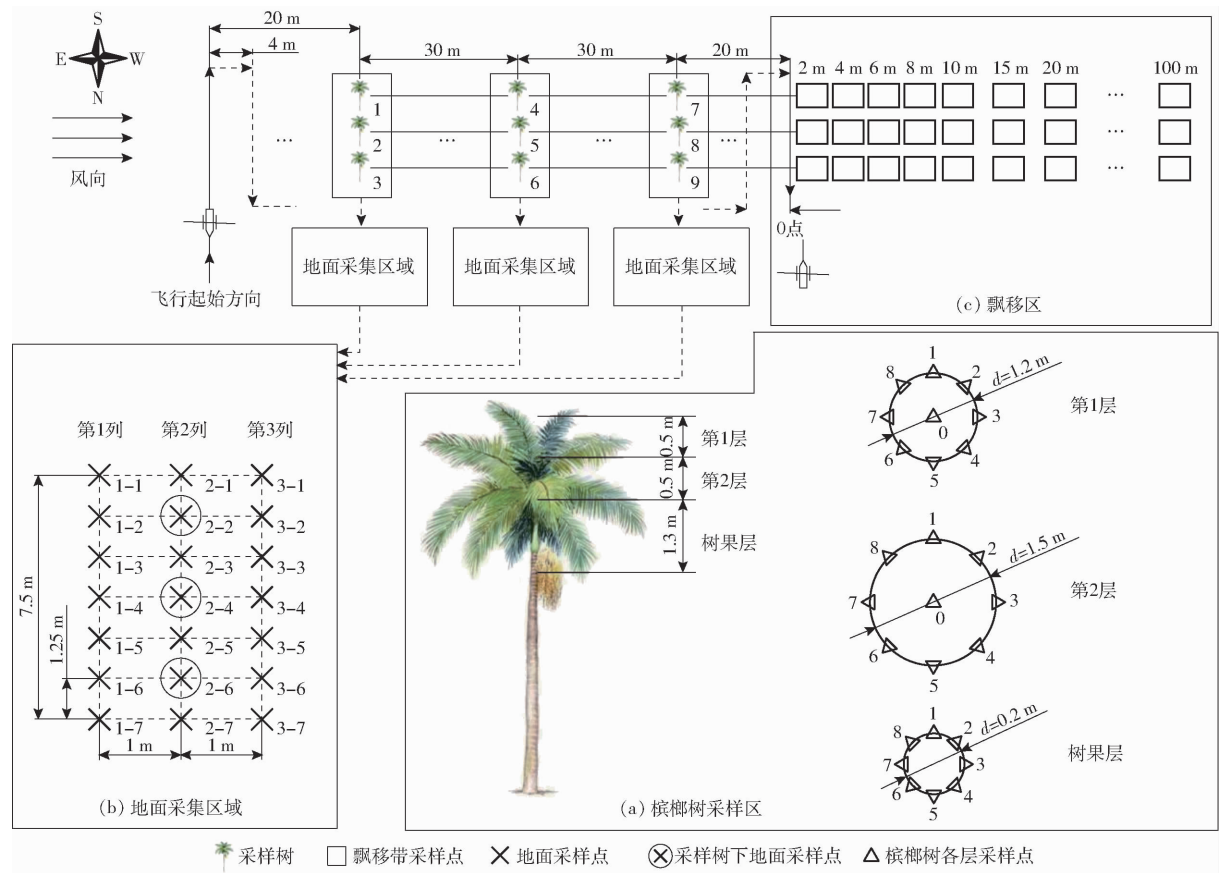


图 3 试验方案示意图
Fig. 3 Schematic diagram of test

置 8 个点共 9 个采样点;第 2 层布置在距离第 1 层约 0.5 m 的树冠下层位置,从树顶数约第 3 个叶片,圆形布置,直径约 1.5 m,叶面与树干夹角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,包括圆心和圆周等间距布置 8 个点共 9 个采样点;第 3 层布置在树果层,距离第 2 层约 1.3 m 的位置,直接用图钉布点在树干上,圆形布置,直径约 0.2 m,圆周等间距布置 8 个采样点。圆周等间距布置 8 个采样点,圆心 1 个采样点,较传统病虫害取样东南西北中 5 个取样位置多 4 个采样点。每棵树共计布置采样点 26 个,9 棵树共计 234 个采样点。每点事先用已编号的白色滤纸订在树上做好标记,以便准确收取样本和放置样本。

1.2.2.2 地面雾滴流失采样布置方式

地面采样分为 A、B、C 3 块,作为 3 个重复。每块地面雾滴采样区域包含 3 棵采样槟榔树,布置 3 列,每列 7 个共 21 个采样点,第 1 列为上风向位置,第 2 列包含了槟榔树根部 3 个采样点,第 3 列为下风向位置。其他点按照树距等间距布置,综合考虑了槟榔树之间的空隙地面流失和受槟榔树冠层截取雾滴后的槟榔树根部区域地面流失。采样点布置在万向夹上,万向夹固定在插入地里的 PVC 管上,距地面约 30 cm 处,每个架次飞过,共计 63 个采样点。

1.2.2.3 飘移带采样布置方式

航线终止位置右侧 2 m 处为累计飘移起始位置,航线终止线设为 0 点,依次在 2、4、6、8、10、15、20、30、40、50、60、80、100 m 共 13 处设置采样点,采样点布置在万向夹上,万向夹固定在插入地里的 PVC 管上,距离地面约 30 cm 处。飘移采集带共 3 条作为 3 个重复,每个架次飞过,总计 39 个采样点。

1.2.3 作业参数

由于槟榔树高及重复 9 棵样本限制,试验布点难度大,危险性高,每次试验布点消耗时间约 2.5 h,为获得客观稳定的测试结果,需要在同一天环境气象相近的条件下作业,结合单旋翼无人机飞手、农户喷施槟榔及文献中前期经验发现飞行高度对喷施效果影响较大,故本次试验主要针对无人机在相同面积喷量下通过改变飞行高度进行测试,无人机作业速度与飞手实际田间作业时一致,定为 1.5 m/s。无人机作业模式与田间实际作业模式一致,即从地头第 1 列槟榔树上方开始起飞,飞行间距为 4 m,往复式作业,飞行区域总宽度为 100 m,飞行长度为 30 m。为了保证试验样本采集雾滴的准确性,无人机每个架次起落都在采样区域 20 m 以外。飞行高度定为 10.5、11.5、12.0 m (距离地面高度),每公顷喷量定为 75 L。由于需要在同一个采样位置进行重复

喷施试验,避免农药重复喷施产生药害,故采用质量分数为 0.5% 的诱惑红染色剂代替液体农药进行喷施。雾滴采集卡为铜版纸,卡片尺寸为 75 mm × 25 mm。无人机作业完毕根据北斗实时轨迹图处理得 3 个架次最终作业参数如表 2 所示。

表 2 试验相关参数
Tab.2 Test parameters

参数	第 1 架次	第 2 架次	第 3 架次
平均速度/(m·s ⁻¹)	1.46	1.43	1.42
平均高度/m	12.09	11.46	10.40
每公顷喷量/L	79.05	80.70	81.30
喷头总流量/(L·min ⁻¹)	2.77	2.77	2.77
平均温度/℃	26.35	27.20	24.89
平均相对湿度/%	57.65	59.86	65.50
平均风速/(风向)/(m·s ⁻¹)	2.48/ (东南)	1.78/ (东南)	1.89/ (东南)

2 数据处理方法

无人机作业每个架次执行完毕后,待采集卡完全干燥后,试验人员戴一次性手套将各采样位置的采集卡收入指定信封中,收齐后再用自封袋封装放入冰盒保存。试验结束后,将收集到的采集卡带回实验室用扫描仪按照规定设置相应参数逐一扫描。扫描后的图像通过图像处理软件 DepositScan(美国

农业部)进行分析,即可得出雾滴沉积量、雾滴粒径及覆盖率等数据。

2.1 变异系数

变异系数可以描述一组数据的均匀性,在本文中,可以描述每个样本数据之间变异程度,变异系数越大,代表数据变化幅度越大,均匀性越差。

2.2 沉积水平

沉积水平是指雾滴沉积量占喷雾量的百分比(%),即实测沉积量与设定每公顷喷量计算的平均理论沉积量之比,沉积水平越高则回收率越高。沉积水平(*k*)计算公式为

$$k = 100 \frac{\beta_{dep}}{\beta_v} \times 100\%$$
 (1)

式中 β_{dep} ——雾滴沉积量,μL/cm²
 β_v ——喷雾量,L/hm²

3 结果与分析

3.1 无人机不同作业高度时雾滴在槟榔树各层的沉积量分布状况

试验时将铜版纸按照叶片生长角度布置,雾滴在铜版纸的分布能够近似表达叶面的沉积量状况且各个架次之间的差异能够说明作业参数对沉积量的影响。铜版纸扫描图像及数据测试界面如图 4 所示。

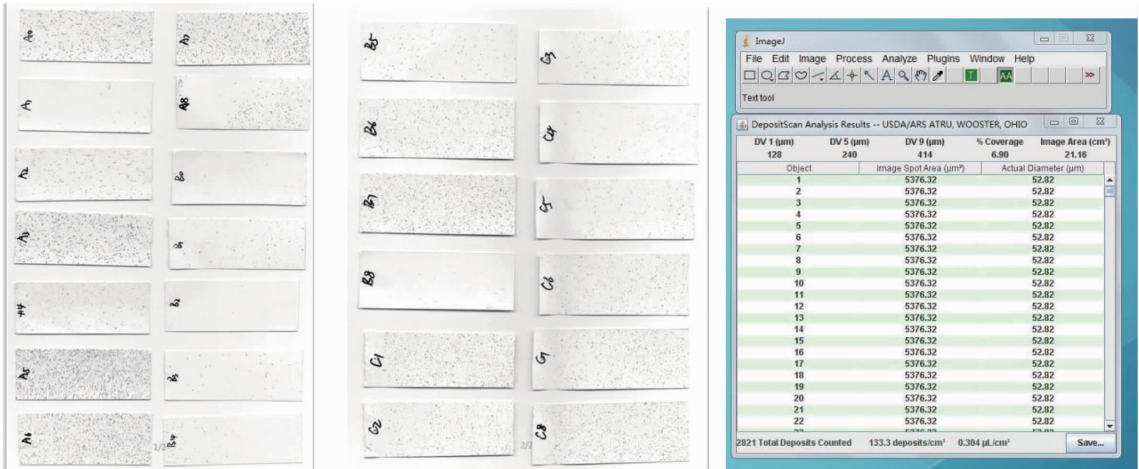


图 4 采样点样本及软件测试界面

Fig.4 Sampling points and software testing interface

利用 Dunn – Sidak(Pro)及 Tukey 对试验数据进行数理统计分析显示:本次试验 3 个高度对槟榔树同一层雾滴沉积量没有显著性影响,但是同一架次下各层之间的雾滴沉积量分布具有显著性差异,将同一架次各层的平均沉积量和雾滴分布均匀性进行统计,如表 3 所示,雾滴分布均匀性用变异系数表示,变异系数越小,说明雾滴分布均匀性越好^[32]。从表 3 中可以得出,各个架次在各层分布的雾滴沉

积量显著性差异情况相同,均为第 1 层与第 2 层有显著性差异($P < 0.05$);第 1 层与树果层有极显著性差异($P < 0.01$);第 2 层与树果层无显著性差异($P > 0.05$)。

图 5a、5b、5c 为各层采样位置在不同架次下的雾滴沉积分布情况,不同无人机作业高度对槟榔树上同一采样层的雾滴沉积量影响十分明显。第 3 架次在 3 个采样层的平均雾滴沉积量最大,在第 1 层

表 3 雾滴沉积参数

Tab.3 Droplet deposition characteristics and distribution uniformity

作业架次	作业高度/m	采样位置	沉积量均值/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	沉积量 变异系数/%	单位面积 覆盖率均值/%	单位面积覆盖率 变异系数/%	雾滴体积中径 均值 $D_{V50}/\mu\text{m}$	雾滴体积中 径变异系数/%
1	12.09	第 1 层	(0.267 ± 0.034) ^a	38.18	(5.13 ± 0.58) ^a	33.68	(272 ± 13) ^a	14.16
		第 2 层	(0.152 ± 0.025) ^b	49.51	(3.68 ± 0.70) ^{ab}	57.26	(276 ± 11) ^a	11.70
		树果层	(0.117 ± 0.020) ^b	47.40	(2.52 ± 0.40) ^b	44.51	(245 ± 7) ^a	8.18
2	11.46	第 1 层	(0.397 ± 0.088) ^a	66.45	(4.78 ± 0.61) ^a	38.27	(309 ± 11) ^a	10.61
		第 2 层	(0.162 ± 0.016) ^b	30.09	(4.16 ± 0.78) ^a	56.08	(277 ± 15) ^a	16.62
		树果层	(0.076 ± 0.016) ^b	57.92	(1.56 ± 0.29) ^b	53.24	(226 ± 8) ^b	9.74
3	10.40	第 1 层	(0.433 ± 0.042) ^a	29.07	(6.62 ± 0.53) ^a	23.84	(368 ± 15) ^a	11.86
		第 2 层	(0.256 ± 0.047) ^b	55.72	(4.28 ± 0.75) ^b	52.59	(318 ± 13) ^b	12.46
		树果层	(0.121 ± 0.025) ^b	59.32	(2.40 ± 0.44) ^b	51.42	(230 ± 7) ^c	8.74

注:数据为均值 ± 标准差,数字后不同小写字母表示经 Dunn - Sidak (Pro) 及 Tukey 检验法在 0.05 水平上的差异显著,下同。

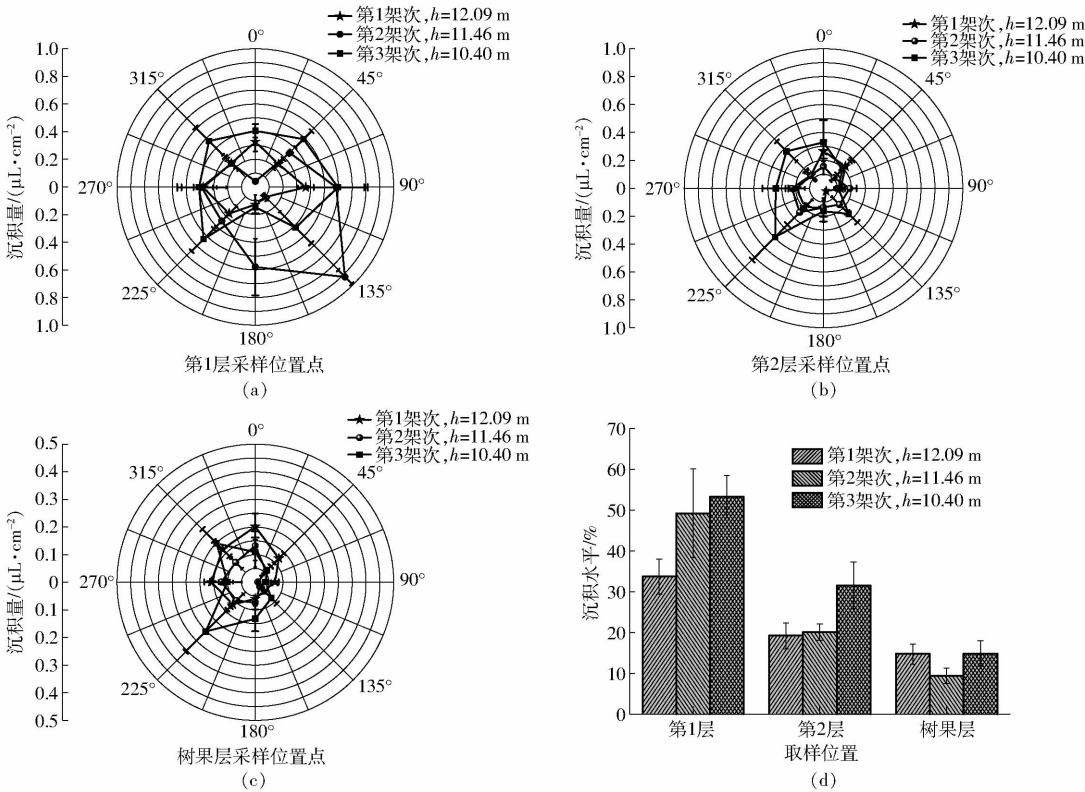


图 5 不同作业高度时槟榔树采样位置的雾滴分布

Fig.5 Distributions of deposition of sampling areca plant at different working heights

的雾滴沉积量均匀性最好,变异系数为 29.07%;第 2 架次雾滴沉积量在第 1 层各个采样点的变异系数最大,达到 66.45%,分布最不均匀;第 1 架次总雾滴沉积量最小,第 1 层平均雾滴沉积量比其他两个架次明显减小。通过计算各个架次 3 层雾滴沉积量变异系数平均值并以此来反映雾滴沉积穿透性,经计算得知,3 个架次中,第 1 架次穿透性最好,变异系数为 43.92%;第 2 架次穿透性最差,变异系数为 78.50%;第 3 架次穿透性居中,变异系数为 57.95%。第 2 架次和第 3 架次环境风速基本相同,雾滴沉积量数值差异主要由无人机作业高度决定,作业高度为 10.40 m 时,雾滴沉积量明显增加,总体

均值提高 25% 以上,特别是第 2 层和树果层的雾滴沉积量均值分别提高 58.02% 和 59.21%,穿透性提高约 20%,由于无人机作业速度很慢,约为 1.43 m/s,旋翼风场作用时间相对较长,在 10.40 m 的作业高度,环境风速 2 m/s 以下,垂直向下的旋翼风场能够显著提高平均雾滴沉积量和穿透性水平,同样由于旋翼风场的下洗气流影响,第 2 层雾滴沉积量分布不均性也明显增加,树果层的雾滴沉积量分布均匀性相差不大,由于树果层距离第 1 层高度约 1.8 m 且上层空间被叶面覆盖,着药主要依靠树叶间隙中的细小雾滴。对比第 1 个架次和第 2 个架次,第 1 架次环境风速相对较大,作业高度相对第 2 架次增

加约 60 cm,第 1 架次第 1 层雾滴沉积量虽较第 2 架次有所减少,但均匀性更好;第 2 层雾滴沉积量两个架次相差不多;树果层雾滴沉积量较第 2 架次增加与第 3 架次相近;第 1 架次总的雾滴分布均匀性与穿透性在 3 个架次中最好,主要为旋翼风场与自然风速的联合作用。图 5d 为 3 个架次雾滴沉积量的沉积水平,3 个架次在第 1 层的沉积水平分别为 33.70%、49.21% 和 53.27%。第 1 架次在第 2 层和树果层的沉积水平分别为第 1 层的 56.93% 和 43.82%;第 2 架次在第 2 层和树果层的沉积水平分别为第 1 层的 40.81% 和 19.14%;第 3 架次的第 2 层沉积水平达到第 1 层的 59.19%,树果层达第 1 层的 27.91%。综上所述,作业高度越低,雾滴在第 1 层的沉积量越大。在环境风速 2 m/s 以内,作业高度 10.40 m 时的雾滴沉积水平最高,平均雾滴沉积量最大。在环境风速高于 2.5 m/s 时,旋翼风场、环境风速联合作用下作业高度 12.09 m 时雾滴穿透性更好,雾滴分布均匀性好,但是总体雾滴沉积量及沉积水平都有所下降。

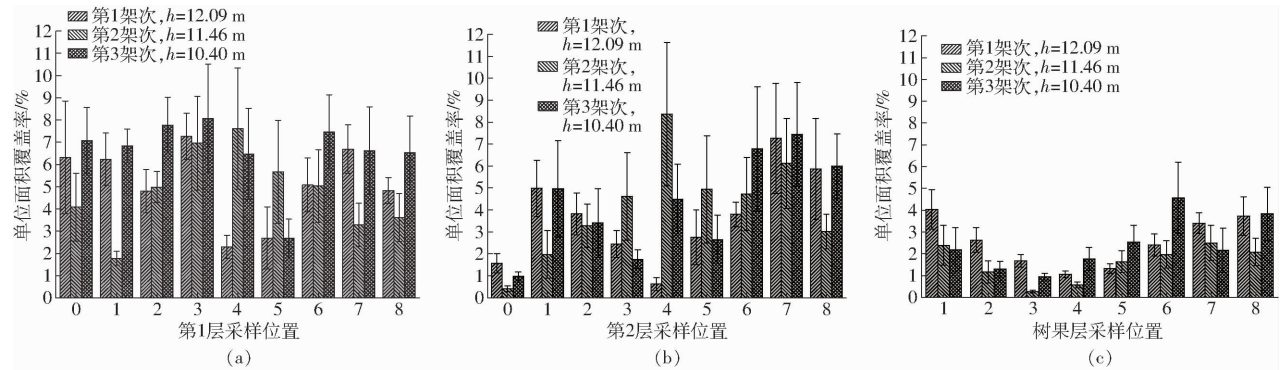


图 6 不同作业高度下槟榔树采样位置的单位面积覆盖率分布
Fig. 6 Distributions of percent area coverage of sampling areca plant at different working heights

第 3 架次最高,为 4.43%。第 1 架次和第 2 架次相比,第 1 层和树果层平均覆盖率均高于第 2 架次,特别是树果层平均覆盖率比第 2 架次提高了约 61.53%,与前文沉积量均值对比,第 1 层覆盖率的提高主要与雾滴粒径及环境风速增大有关。

3.3 无人机不同作业高度时雾滴粒径在槟榔树各层分布状况

利用 Dunn – Sidak (Pro) 及 Tukey 检验法对试验数据进行数理统计分析显示:第 1 架次和第 3 架次在槟榔树第 1 层的雾滴体积中径均值 (D_{v50}) 有极显著性差异 ($P < 0.01$), D_{v50} 均值分别为 272 μm 和 368 μm ,即高度和风速同时变化时对上层雾滴体积中径影响非常显著。第 2 架次和第 3 架次在槟榔树第 1 层的平均雾滴体积中径有显著性差异, D_{v50} 均值分别为 309 μm 和 368 μm ,即高度对上层雾滴体积中径的影响显著。第 1 架次和第 2

3.2 无人机不同作业高度时雾滴在槟榔树各层的单位面积覆盖率分布状况

3 个架次的雾滴单位面积覆盖率在各层的分布情况如图 6 所示。利用 Dunn – Sidak (Pro) 及 Tukey 对试验数据进行数理统计分析显示:3 个架次对槟榔树同一层雾滴单位面积覆盖率没有显著性差异,3 个架次均显示在同一高度下第 1 层和树果层的单位面积覆盖率均具有显著性差异,如表 3 所示。第 3 架次在第 1 层和第 2 层的平均单位面积覆盖率最高,树果层略低于第 1 个架次,分别为 6.62%、4.28% 和 2.40%,第 1 层的覆盖率分布均匀性最好,变异系数为 23.84%,其他层覆盖率分布均匀性和其他架次相近,第 1 层和其他两层覆盖率在采样点上有显著性差异。第 2 架次和第 3 架次环境风速相近,覆盖率变化主要由作业高度不同引起,在 2 m/s 以下的风速下,10.40 m 作业高度较 11.46 m 在第 1 层的覆盖率均值提高了 38.49%,第 2 层相差不大,树果层提高了 53.84%。3 个架次总平均覆盖率为:第 2 架次最小为 3.50%,第 1 架次为 3.78%,

架次在槟榔树第 1 层的雾滴体积中径则没有显著性差异 ($P > 0.05$)。3 个架次在第 2 层和树果层的雾滴体积中径没有显著性差异,3 个架次在槟榔树第 2 层的 D_{v50} 平均分别为 276、277、318 μm 。同一无人机架次下不同层采样点的雾滴体积中径有显著性差异,对各层的平均雾滴体积中径 D_{v50} 分布均匀性及差异性进行统计,如表 3 所示。在作业高度 12.09 m 时,3 个采样层的雾滴粒径没有显著性差异,与此时自然风速提高、旋翼风场与自然侧风相结合有关,雾滴飘散更均匀且此时雾滴穿透性也较好。作业高度 11.46 m 时,树果层与前两层的雾滴体积中径均值有显著性不同。作业高度 10.40 m 时,3 个采样层的雾滴体积中径彼此之间均有显著性差异,在 3 个架次中此参数所得雾滴体积中径最大。值得注意的是 3 个架次在树果层的雾滴体积中径均值相差不大,在 226 ~ 245 μm

之间,树果层距离树冠约 2.3 m,要提高树果层的着药率,雾滴粒径控制在 240 μm 左右具有更高穿透性。

3.4 无人机不同作业高度时地面流失雾滴分布状况

3 个架次的地面流失雾滴沉积量在各列的分布如图 7 所示。从图中可以看出,前两个架次总雾滴沉积量基本趋势相同,处于上风向第 1 列的总雾滴沉积量较小,处于下风向的第 3 列总雾滴沉积量高于前两列。第 3 架次的雾滴沉积量在各列相差不大。利用 Dunn – Sidak (Pro) 及 Tukey 检验法对试验数据进行数理统计分析显示,作业高度 11.46 m 时对第 1 列和第 3 列间、第 2 列和第 3 列间地面采样点雾滴沉积量有显著性影响,第 1 列和第 2 列地面采样点雾滴沉积量间没有显著性不同;作业高度为 12.09 m 和 10.40 m 时,作业高度对各列的雾滴沉积量均没有显著性影响。作业高度越大,风速越大,下风向地面雾滴沉积量越大。不同架次对同一列的地面流失雾滴沉积量显著性影响如表 4 所示。数据显示,作业高度分别为 12.09 m 和 10.40 m 时对第 1

列地面雾滴沉积有显著性影响,作业高度越大,上风向位置的第 1 列地面流失雾滴沉积量越大,作业高度分别为 12.09 m 和 11.46 m 时在第 1 列的雾滴沉积量分别为第 3 架次的 1.72 倍和 1.30 倍;作业高度 12.09 m 和 11.46 m 相对作业高度 10.40 m 对第 2 列的雾滴沉积量有显著性影响,作业高度 10.40 m 时在第 2 列地面雾滴沉积量最小,约为 12.09 m 作业高度的 50%,约为 11.46 m 作业高度的 58%,第 2 列布置在槟榔树根部,间接反映了槟榔树冠层截取雾滴的程度;作业高度 12.09 m 和 11.46 m 相对作业高度 10.40 m 对第 3 列的雾滴沉积量有显著性影响,即风速 2 m/s 以下时,第 2 架次相对第 3 架次作业高度增加约 1 m 对下风向地面沉积有显著性影响,作业高度 10.40 m 在第 3 列雾滴沉积量约为作业高度 11.46 m 时的 42%,作业高度 12.09 m 较作业高度 11.46 m 对下风向地面沉积没有显著性影响,两者相差不大。3 个架次的地面沉积水平有很大区别,平均沉积水平分别为 40.3%、35.7% 和 19.9%。

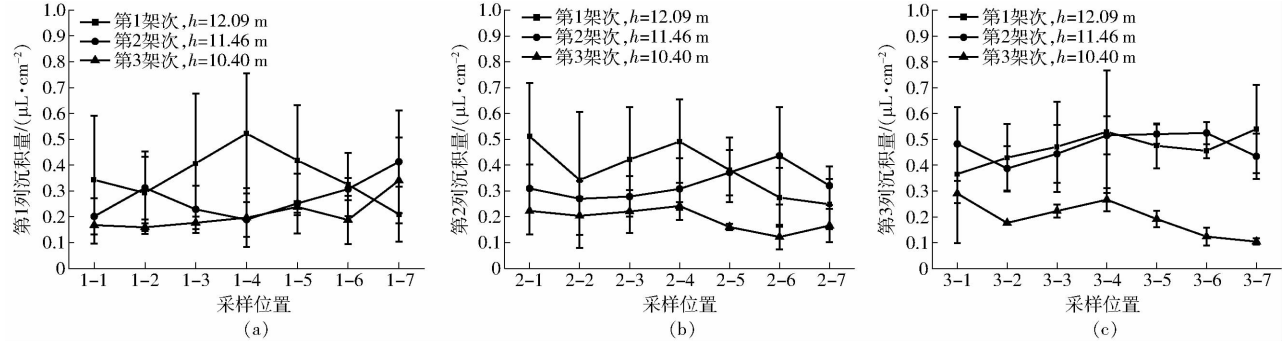


图 7 不同作业高度下地面流失采样位置的雾滴分布

Fig. 7 Droplet distributions in sampling locations of ground loss at different operating heights

表 4 地面流失雾滴沉积量均值及变异系数			
Tab. 4 Mean deposition and distribution uniformity of ground sample site zone			
采样位置	作业架次	雾滴沉积量均值/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	沉积量变异 系数/%
第 1 列	1	(0.360 $\pm$ 0.038) ^a	27.93
	2	(0.272 $\pm$ 0.030) ^{ab}	28.80
	3	(0.210 $\pm$ 0.024) ^b	30.14
第 2 列	1	(0.383 $\pm$ 0.038) ^a	26.44
	2	(0.328 $\pm$ 0.022) ^a	17.72
	3	(0.191 $\pm$ 0.016) ^b	22.38
第 3 列	1	(0.466 $\pm$ 0.023) ^a	12.77
	2	(0.473 $\pm$ 0.020) ^a	11.09
	3	(0.196 $\pm$ 0.026) ^b	35.18

3.5 无人机不同作业高度时飘移采集带雾滴分布状况

3 个架次的雾滴飘移分布情况如图 8 所示,

图 8a 为 3 个架次在飘移带各采样点的飘移沉积量均值,3 个架次在 50 m 以后均没有测出飘移沉积量。利用 Dunn – Sidak (Pro) 及 Tukey 检验法对 3 个架次的飘移带数据进行统计分析发现,3 个架次对飘移带的雾滴沉积量没有显著性影响。经计算得知第 1 架次雾滴飘移总量最大,第 2 架次雾滴飘移总量为第 1 架次的 80.36%,第 3 架次雾滴飘移总量为第 1 架次的 41.38%。计算 3 个架次飘移带采样点沉积量沉积水平和累计飘移占测试总飘移量 90% 的位置,如图 8a、8b、8c 所示。3 个架次的测试总飘移量 90% 位置分别发生在 26.60、36.35、27.40 m。第 1 架次和第 3 架次 90% 飘移距离相差不大,第 2 架次 90% 飘移距离最远,达 36.35 m。XUE 等^[33]研究发现水稻等低矮作物在风速 5 m/s 以下、飞行高度 5 m 以下时,90% 飘移量发生在 8 m 以内,槟榔树飞防作业与之相比明显增高。

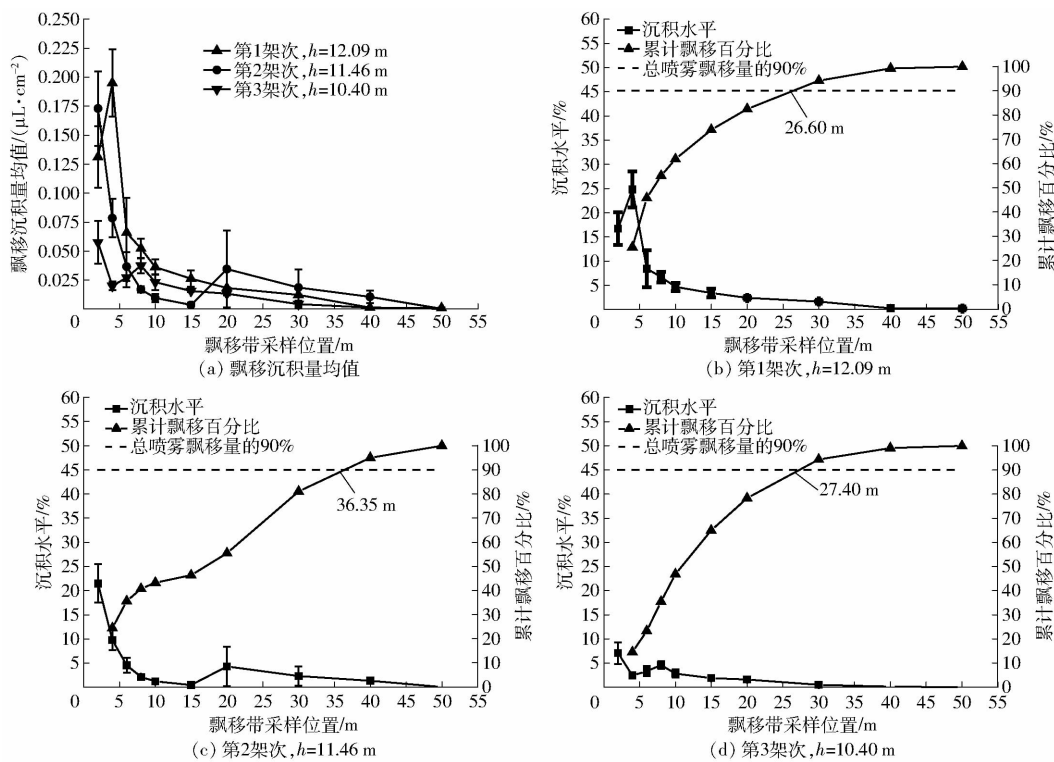


图 8 不同高度下飘移采集带下风向飘移特性
Fig. 8 Downwind drift characteristics for each drift sampling line at different heights

4 讨论

由旋翼动量理论可知单旋翼无人机运行时通过旋翼拍击空气并将空气推向下方,空气加给旋翼的反作用力即旋翼产生的拉力提供了无人机飞行时的升力、推进力和操控力,此种独特的升力产生方式是单旋翼无人机与其它飞行器最根本的区别。单旋翼无人机旋翼风场较为稳定,风场横向面积大,下压风场更强,有利于提高穿透性,瞬时飞行姿态直接影响旋翼风场分布和雾滴沉积,如何保持高精度的飞行姿态是亟待解决的问题。旋翼风场受作业参数、机型和环境气象等影响,与不同喷头类型相结合时雾滴粒径及运动规律均不同,是影响作物喷施效果的重要因素。在不同作业高度时,旋翼通过桨叶旋转运动与空气相互干扰产生升力,桨叶的不同半径处来流速度不同,螺旋线尾涡亦不同,进而改变雾滴运动轨迹,使雾滴沉积量、雾滴粒径、单位面积覆盖率等均产生变化。无人机作业速度较慢时,旋翼风场对雾滴沉积到作物的影响时间较长,旋翼风场的下洗气流和侧风共同作用能明显提高雾滴穿透性。

文晟等^[34]研究发现,单旋翼植保无人机的翼尖涡流形成尾涡之后对雾滴飘移影响较大,速度越大,尾涡高度越高,越易引起雾滴飘移,作业高度越高,尾涡向无人机后方的雾滴飘移扩散也越明显,槟榔

飞防高度 10 m 以上,尾涡主要由高度影响。此外,常规的飞防测试试验主要关注作物冠层的沉积、穿透性和飘移等,鲜有地面雾滴流失报道,槟榔树飞防时雾滴在冠层的分布均匀性和沉积分布均匀性还有待提高。飞防喷施效果与作业机型、作业参数、喷头型号、叶面积指数、种植密度、环境条件等相关,本次测试中无人机作业参数及作业方式均从实践出发,确保能够得到更客观和接近实际喷施的数据。

5 结论

- (1)环境侧风和作业高度对雾滴体积中径均值影响显著,雾滴沉积量和覆盖率最大可增加 53.75% 和 62.20%,应根据病虫害发生位置选择合适的作业参数,雾滴体积中径均值 240 μm 左右更有利于雾滴穿透到树干位置。
- (2)作业高度 10.40 m 时,作物冠层顶部和树冠直径最大处的雾滴沉积水平可达 53.27% 和 31.53%,地面流失雾滴沉积水平 19.9%,应优先选用此作业参数。作业高度增加至 12.09 m 时,地面流失雾滴沉积与其他作业高度有显著不同,且此时冠层雾滴沉积量最低。
- (3)飘移带测试结果显示,无人机作业高度大于 10 m、风速低于 2.5 m/s 时,飘移距离最远可达 36.35 m,在槟榔飞防实际作业中必须设置足够的缓冲区。

参 考 文 献

- [1] 符之学,刘立云,李艳,等. 槟榔农业生产技术研究[J]. 安徽农业科学,2014,42(14): 4229-4230,4292.
FU Zhixue, LIU Liyun, LI Yan, et al. On agricultural production technology of betelnut[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(14): 4229-4230, 4292. (in Chinese)
- [2] 董志国,刘立云,王萍,等. 槟榔寒害调查研究[J]. 安徽农学通报,2008(14): 98-99.
- [3] 卢琨,李国胜. 中国槟榔产业现状及其发展对策分析[J]. 热带农业工程,2010,34(3): 34-37.
LU Kun, LI Guosheng. Analysis of areca nut industrial situations and their countermeasures in China[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2010, 34(3): 34-37. (in Chinese)
- [4] 丁晓军,唐庆华,严静,等. 中国槟榔产业中的病虫害现状及面临的主要问题[J]. 中国农学通报,2014,30(7): 246-253.
DING Xiaojun, TANG Qinghua, YAN Jing, et al. Current pest status and key problems in areca nut palm industry in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(7): 246-253. (in Chinese)
- [5] TANG Q H, YU F Y, ZHANG S Q, et al. First report of *Burkholderia andropogonis* causing bacterial leaf spot of betel palm in Hainan Province, China[J]. Plant Disease, 2013, 97(12): 1654.
- [6] 车海彦. 海南省植原体病害多样性调查及槟榔黄化病植原体的分子检测技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
CHE Haiyan. Diversity of phytoplasma disease and molecular detection of phytoplasma associated with areca nut yellow leaf in Hainan Province[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [7] 郭志涛,马杰,曾叶伟. 海南槟榔树高度测量及对输电线路的造价影响[J]. 电子测试,2017(23): 102, 99.
GUO Zhitao, MA Jie, ZENG Yewei. Height measurement of areca tree in Hainan and its influence on the cost of transmission line[J]. Electronic Test, 2017(23): 102, 99. (in Chinese)
- [8] GLASS C R, WALTERS K F, GASKELL P H, et al. Recent advances in computational fluid dynamics relevant to the modelling of pesticide flow on leaf surfaces[J]. Pest Management Science, 2010, 66(1): 2-9.
- [9] HILZ E, AWP V. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. Crop Protection, 2013, 44(1): 75-83.
- [10] LAN Y B, CHEN S D, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2017, 10(3): 1-17.
- [11] FRITZ B K, KIRK I W, HOFFMANN W C, et al. Aerial application methods for increasing spray deposition on wheat heads[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 22(3): 357-364.
- [12] KIRK L W, TESKE M E, THISTLE H W. What about upwind buffer zones for aerial applications? [J]. Journal of Agricultural Safety & Health, 2002, 8(3): 333-336.
- [13] TESKE M E, THISTLE H W. Release height and far-field limits of Lagrangian aerial spray models[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4): 977-983.
- [14] HEWITT A J, MABER J, PRAAT J P. Drift management using a GIS system[C] // Proceedings of the World Congress of Computer in Agriculture and Natural Resources, 2002: 290-296.
- [15] 邱白晶,王立伟,蔡东林,等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(24): 25-32.
QIU Baijing, WANG Liwei, CAI Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 25-32. (in Chinese)
- [16] 陈盛德,兰玉彬,李继宇,等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2016, 32(17): 40-46.
CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiyu, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 40-46. (in Chinese)
- [17] 陈盛德,兰玉彬,FRITZ 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/OL]. 农业机械学报,2017, 48(8): 105-113.
CHEN Shengde, LAN Yubin, FRITZ B K, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170811&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011. (in Chinese)
- [18] 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5): 194-199.
XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 194-199. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034. (in Chinese)
- [19] ALLAN S F, VINCENT R H. The Washington aerial spray drift study: modeling pesticide spray drift deposition from an aerial application[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(33): 6194-6203.
- [20] 张京,何雄奎,宋坚利,等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(12):

94 – 96.

ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (12): 94 – 96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121217&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.017. (in Chinese)

- [21] HUANG Y, HOFFMANN W C, LAN Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(6): 803 – 809.
- [22] TANG Y, HOU C J, LUO S M, et al. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 148(5): 1 – 7.
- [23] RICHARDSON B, THISTLE H W. Measured and prediction aerial spray interception by a young pinus radiate canopy[J]. Transactions of the ASABE, 2005, 49(1): 15 – 23.
- [24] LAN Y, HOFFMANN W C, FRITZ B K, et al. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1): 5 – 10.
- [25] CREECH C F, HENRY R S, HEWITT A J, et al. Herbicide spray penetration into corn and soybean canopies using air-induction nozzles and a drift control adjuvant[J]. Weed Technology, 2018, 32(1): 1 – 8.
- [26] 张宋超, 薛新宇, 秦维彩, 等. N-3 型农用无人直升机航空施药飘移模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 87 – 93.
- ZHANG S C, XUE X Y, QIN W C, et al. Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N-3 unmanned spraying helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 87 – 93. (in Chinese)
- [27] 王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 等. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 117 – 123.
- WANG Xiaonan, HE Xiongkui, WANG Changling, et al. Spray drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 117 – 123. (in Chinese)
- [28] 姚伟祥, 兰玉彬, 王娟, 等. AS350B3e 直升机航空喷施雾滴飘移分布特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 75 – 83.
- YAO Weixiang, LAN Yubin, WANG Juan, et al. Droplet drift characteristics of aerial spraying of AS350B3e helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 75 – 83. (in Chinese)
- [29] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50 – 56.
- QIN Weicai, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 50 – 56. (in Chinese)
- [30] 薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 农业技术与装备, 2010(5): 27 – 28.
- [31] 兰玉彬, 陈盛德, 李继宇, 等. 基于北斗定位系统对飞控手飞行质量的评价系统: 205563277U[P]. 2016 – 09 – 07.
- [32] 傅泽田, 祁力钧, 王秀, 等. 农药喷施技术的优化[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 109 – 111.
- [33] XUE X Y, TU K, QIN W C, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2014, 7(4): 23 – 28.
- [34] 文晟, 韩杰, 兰玉彬, 等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 127 – 137, 160.
- WEN Sheng, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Influence of wing tip vortex on drift of single rotor plant protection unmanned aerial vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 127 – 137, 160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180815&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.015. (in Chinese)