

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.034

果园施药机械资源消耗水平评价模型研究

陈炳太¹ 郑永军¹ 江世界¹ 杨圣慧¹ 吕昊瞰¹ 康峰²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 在施药机械满足喷雾质量前提下,为降低果园施药综合成本,需要对果园施药机械资源消耗水平进行评估。本文选择典型地面风送喷雾机、单旋翼和六旋翼植保无人机进行果树施药试验,对比分析冠层雾滴沉积分布、雾滴穿透性、地面雾滴流失等主要喷雾效果指标,结果表明:3种施药机械在树冠纵向各层、横向各层雾滴沉积密度均大于25滴/cm²,能够满足果园植保要求;比较冠层雾滴分布/沉积均匀性,树冠纵向沿送风方向整体呈下降趋势,树冠横向由外到内整体呈下降趋势,变异系数最高分别达63.54%和79.19%;对比雾滴穿透性,风送喷雾机较优,纵向与横向变异系数最大为5.35%,单旋翼植保无人机横向最差,变异系数为35.20%,而六旋翼植保无人机纵向最差,变异系数达40.77%。但单旋翼和六旋翼植保无人机地面雾滴流失量分别是风送喷雾机的2.78%和12.50%,减少了农药浪费。进一步综合施水量、施药量、用工量、作业时长和作业能耗等指标,采用基于变异系数客观赋权法与主观赋权法两种线性加权方法,构建了施药装备资源消耗水平评价模型,验证结果均表明,综合资源消耗由小到大依次为单旋翼植保无人机、六旋翼植保无人机、风送喷雾机;两种评价方法的资源消耗综合评价指标值变异系数分别为110.2%和74.2%,说明基于变异系数客观赋权法的评价模型,综合指标值之间差异更明显、评价效果更符合实际。

关键词: 果园; 施药机械; 喷雾效果; 资源消耗; 评价模型; 变异系数

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0289-09

Resource Consumption Evaluation Model of Orchard Spray Machinery

CHEN Bingtai¹ ZHENG Yongjun¹ JIANG Shijie¹ YANG Shenghui¹ LÜ Haotun¹ KANG Feng²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reduce the comprehensive cost of orchard spray, it is necessary to evaluate the resource consumption level of application machinery. A typical air-assisted sprayer, a single-rotor and a six-rotor plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) were applied for spray test. The results showed that the droplet deposition density of three spraying machines in each layer were all more than 25 droplets/cm². The droplet distribution uniformity decreased in vertical canopies seen from the direction of blowing. Observed from the horizontal direction, the droplet distribution uniformity was also decreased from outside to inside layers. The highest coefficient of variation (CV) values were separately 63.54% and 79.19%. In terms of the droplet penetration, the air-assisted sprayer was superior with the low CV value nearby 5.35%. While the CV value of the single-rotor plant protection UAV was 35.20% in the horizontal direction and the CV value of six-rotor plant protection UAV was 40.77% in vertical direction with bad penetration. The droplet loss on the ground of the single-rotor and six-rotor plant protection UAV were 2.78% and 12.50% of that of the air-assisted sprayer, respectively, which reduced the pesticide waste. Then, two resource consumption evaluation models of application machinery were constructed using two linear weighting methods (objective weighting method based on coefficient of variation and subjective weighting method) with the evaluation indexes of water, pesticide, labor, time, and energy consumption. The results showed the descending order with resource consumption of the single-rotor plant protection UAV, the six-rotor plant protection UAV and the air-assisted sprayer. The

收稿日期: 2020-08-11 修回日期: 2020-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0700603)和山东烟台校地融合发展项目

作者简介: 陈炳太(1989—),男,博士生,主要从事果园精准植保研究,E-mail: cbt2017@126.com

通信作者: 吕昊瞰(1983—),男,讲师,博士,主要从事果园智能装备应用研究,E-mail: lvhaotun@cau.edu.cn

CV values of comprehensive evaluation index in two evaluation methods were 110.2% and 74.2%, which indicated that the evaluation model based on the objective weighting method was better. The conclusions provided a reference for farmers to choose a suitable application machinery and reduce the comprehensive cost in orchard.

Key words: orchard; spray machinery; spraying effect; resource consumption; evaluation model; coefficient of variation

0 引言

果园喷施化学农药是果树病虫害防治的重要手段^[1]。与传统人工施药相比,机械施药在降低劳动强度、提高生产效率、减少环境污染等方面具有突出优势,是果园植保发展的必然趋势^[2-4]。目前,围绕果园施药机械喷雾效果(雾滴沉积、雾滴飘移)的研究已有很多^[5-10],但对果园施药机械资源消耗水平的研究还鲜见报道。果园施药机械资源消耗水平指单台施药机械喷施单位面积果园消耗资源的多少。在满足喷雾质量前提下,资源消耗越少,果园施药综合成本越低,果农可获经济收益越高。因此,研究果园施药机械资源消耗水平对衡量施药机械综合性能具有重要意义。

从资源消耗角度讲,农药、水、劳动力为施药作业中主要成本投入指标,此外作业效率(其倒数为作业时长)直接影响投入成本,加之国家倡导节能降耗,所以作业时长和能源消耗也需重点考虑。邱威等^[11]设计了风送定向喷雾机,试验表明其作业时长为 0.98 h/hm^2 ;丁素明等^[12]研制了低矮果园用自走式风送喷雾机,试验结果表明作业时长为 1.10 h/hm^2 ;姜红花等^[13]利用超声波传感器设计了对靶风送喷雾机并开展了对靶喷雾与普通喷雾施药液量对比试验,结果表明对靶喷雾比普通喷雾综合省药率达30%以上;李龙龙等^[14-15]利用激光传感器研制了仿形变量喷雾机并通过田间试验对比了与定向、传统风送喷雾机 100 m 药液消耗量,结果表明该机施药液量为 285 L/hm^2 ,较其他两种连续喷雾机分别节省施药量45.7%和43.8%;薛杨春等^[16]研制单人操作车载式果园静电

喷雾机,试验表明其施药量达 3400 L/hm^2 、作业时长为 0.60 h/hm^2 。已有报道中,多数学者仅对施药机械作业中一项或两项资源消耗情况进行了研究,而对综合资源消耗水平论及较少。

本文选取典型地面风送喷雾机、单旋翼和六旋翼植保无人机为研究对象,以单台施药机械喷施单位面积果园的施水量、施药量、用工量、作业时长和作业能耗为评价指标,构建果园施药机械资源消耗水平评价模型,通过田间试验在测试各施药机械喷雾质量基础上对评价模型进行实证分析,为果农选择适宜施药机械、降低果园施药综合成本提供参考。

1 材料与方法

1.1 果园概况

单旋翼植保无人机田间施药试验于2019年7月在山西省万荣县轹源果业合作社进行,苹果园行距 3.0 m ,株距 2.5 m ,最大冠幅 3.3 m ,株高 $3.5 \sim 4.0 \text{ m}$;风送喷雾机和六旋翼植保无人机田间施药试验于2019年7月在北京平谷绿水峡谷果蔬产销专业合作社进行,苹果园行距 4.0 m ,株距 3.0 m ,最大冠幅 3.5 m ,株高 $3.5 \sim 4.0 \text{ m}$ 。

1.2 试验设备

试验设备为SSA-E541型风送喷雾机(Air blast sprayer, ABS, 丸山)、Z-3N型油动力单旋翼植保无人机(Single rotor unmanned aerial vehicle, SRUAV, 江苏南京模拟技术研究所)和3WWDZ-10型电动六旋翼植保无人机(Six rotors unmanned aerial vehicle, Six-RUAV, 北京韦加智能科技股份有限公司),如图1所示。



图1 田间试验设备

Fig. 1 Equipment of field test

风送喷雾机喷头采用环形布置形式,既可单侧喷雾作业,也可双侧同时作业,还可通过改变导风板

角度调节喷雾高度;单旋翼植保无人机由无人直升机平台、地面设备和药液喷洒系统3部分组成,具有

一键起飞、仿地形飞行、作业航线自主规划等功能；六旋翼植保无人机最大起飞质量 27 kg, 单次作业电池满载续航时间约 8 min; 试验设备主要参数如表 1 所示。

表 1 试验设备主要参数

Tab. 1 Main parameters of test equipment

施药机械	尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	喷头数量/支	药箱容积/L	喷洒幅宽/m	喷雾流量/(L·min ⁻¹)
ABS	2 990 × 1 225 × 1 120	16	500	8	43.2
SRUAV	3 600 × 850 × 1 100	8	30	8	4.5
Six-RUAV	1 760 × 1 760 × 700	2	10	3	5.0

试验环境监测系统包括希玛 AR856 风速风量仪(深圳富兰克电子有限公司)与得力温湿度计(得

力集团有限公司), 用于监测和记录环境风速、风向、温湿度等气象参数。雾滴采集卡选用先正达水敏纸(76 mm × 26 mm)。此外, 试验材料还包括雾滴分析软件 Deposit scan、回形针、塑封袋、标签纸、橡胶手套和口罩等。

1.3 试验设计

试验方案如图 2 所示。在果园选取面积(长 × 宽)为 40.0 m × 12.0 m 的区域作为试验区(图 2a), 为保证试验数据的准确性, 每次试验分别在试验区内选取树形结构、树冠高度、冠层幅度相近的 3 棵果树作为靶标果树, 其中风送喷雾机和六旋翼植保无人机所用 3 棵靶标果树一致。靶标果树位于相同作业行且远离行头和行尾, 以减小施药机械驶至行头和行尾时, 因减速、转弯等操作引起的误差。

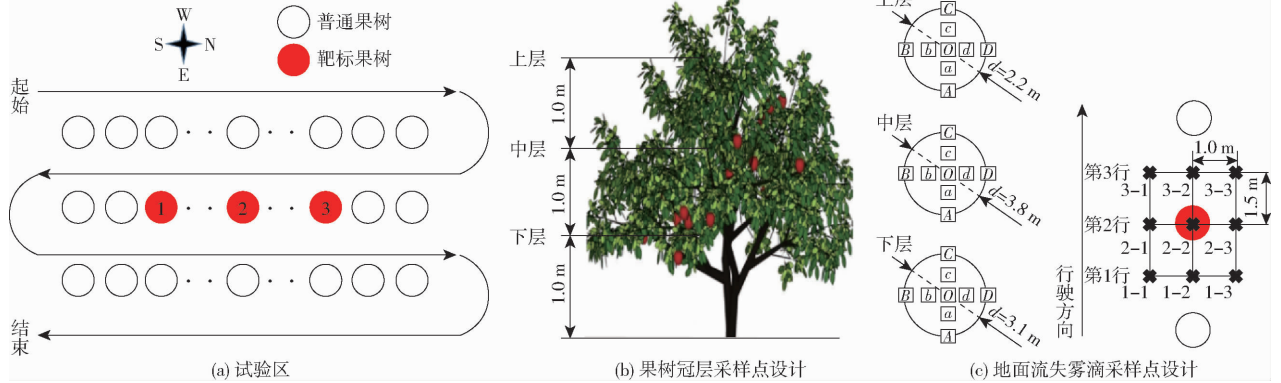


图 2 试验方案示意图

Fig. 2 Schematics of test

果树冠层雾滴采样如图 2b 所示。每棵靶标果树根据植株高度及树冠形状, 采样均分为上、中、下 3 层, 相邻两层之间间隔 1.0 m, 下层距地面 1.0 m; 每层设置 9 个采样点, 其中外层和内层在东、南、西、北 4 个方向各布置 1 个采样点, 标记为 A、B、C、D 和 a、b、c、d; 主干层布置 1 个采样点, 标记为 O; 每个采样点叶片正面与背面分别布置 1 张水敏纸, 每棵果树冠层共计 27 个采样点, 共布置 54 张水敏纸。

果树地面流失雾滴采样设计如图 2c 所示。每棵靶标果树地面流失雾滴采样区域沿施药机械前进方向分为 3 行, 每行 3 个采样点。考虑果树株间空隙区和冠层根部区均有雾滴沉积, 故第 1 行和第 3 行位于株间空隙区, 第 2 行位于包含根部区域的冠层正下方, 各行之间间隔 1.5 m, 相同行各采集点之间间隔 1.0 m。采样点处固定竹竿和万向夹, 用万向夹夹持水敏纸, 其高度与地面间隔 0.2 m, 每棵果树地面共计 9 个采样点, 布置 9 张水敏纸。

采样苹果树植株及采样点布置如图 3 所示。为获得客观试验结果, 试验时每种施药机械作业模式均与田间实际作业模式一致, 试验相关参数如表 2

所示。



图 3 采样苹果树植株

Fig. 3 Sampling apple tree

1.4 数据处理

每次试验结束, 按照编号顺序逐一收集雾滴干燥的水敏纸, 放入塑封袋中, 带回实验室处理。水敏纸采用 LASERJET PRO MFP M132 型扫描仪进行扫描, 扫描后的图像采用 Deposit scan 雾滴分析软件进行数据读取, 得到果树冠层的雾滴沉积量、沉积密度和覆盖率等参数。

试验数据采用 Excel 2016 进行记录和整理, 采用 SPSS 21.0 进行方差分析, 采用 Origin 9.1 进行图

形绘制。

为测试对比不同施药机械的喷雾质量,本文以同层树冠采样点雾滴沉积密度变异系数来衡量冠层的雾滴分布均匀性,以不同层树冠采样点雾滴覆盖率变异系数来衡量冠层的雾滴穿透性^[17],变异系数越小表示冠层雾滴分布越均匀,穿透性越好。

表2 试验相关参数

Tab.2 Related parameters of test

施药机械	作业速度/ (m·s ⁻¹)	作业 高度/m	平均温 度/℃	平均相对 湿度/%	平均风速/ (m·s ⁻¹)	风向
ABS	0.6	0	32.6	52	0	无
SRUAV	4.0	3.5	21.2	34	1.65	西北
Six-RUAV	1.0	1.5	27.0	33	1.16	西北

2 资源消耗水平评价模型构建

2.1 评价指标构建

根据实地调查和专家意见,本文确定果园施药机械资源消耗水平评价指标为施水量、施药量、用工量、作业时长和作业能耗。其中,施水量根据施药机械常规作业参数下,喷施单位面积果园消耗的水量来确定;为简化计算,施药量以所用的农药(有效成分苯醚甲环唑含量10%,剂型为水分散粒剂)为例,实地调研发现,风送喷雾机作业施药量为765 g/hm²,单旋翼植保无人机作业施药量为300 g/hm²,六旋翼植保无人机作业施药量为375 g/hm²;用工量根据实际作业时单台施药机械常规配置人员数量来确定;实际作业时,作业时长由配药辅助时间和作业时间共同构成,本文配药辅助时间与作业时间之比(简称配作比)按1:1计算,因此作业时长为作业时间的2倍;作业能耗为作业时间内的能量消耗,配药辅助期间施药机械停止作业,因此作业能耗由作业时间和施药机械额定功率来确定。施药试验完成后,将3种施药机械各项资源消耗评价指标换算为每公顷消耗量后,其原始值如表3所示。

表3 评价指标原始值

Tab.3 Original value of each evaluation index

施药机械	每公顷施 水量/L	每公顷 施药量/g	用工量/ 人	每公顷作 业时长/h	每公顷作业能 耗/(kW·h)
ABS	2 295	765	2	2.32	42.65
SRUAV	65	300	3	0.35	3.06
Six-RUAV	150	375	3	1.85	3.69

2.2 评价指标类型一致化与无量纲处理

多指标综合评价^[18]在对评价对象进行综合评价之前,首先要将各项评价指标类型作一致化处理。因为本文确定的5项评价指标类型一致,均为“极

小型”(即取值越小越好)指标,故无需再作处理。为避免因各项评价指标量纲不同对资源消耗综合评价指标值产生影响,需对评价指标作无量纲处理,原则是处理后的数据能较好地保留原数据的全部信息。借鉴他人研究成果,本文各项评价指标原始值均为通过试验所得客观值,因此采用均值化方法(又称线性比例法)对各项评价指标进行无量纲处理^[19-20]。计算公式为

$$x'_{kj} = \frac{x_{kj}}{\bar{x}_j} \quad (1)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 x_{kj} \quad (2)$$

其中 x_{kj} ——资源消耗评价指标原始值,其中 k 取1、2、3,分别表示风送喷雾机、单旋翼植保无人机和六旋翼植保无人机; j 取1、2、3、4、5,分别表示施水量、施药量、用工量、作业时长和作业能耗

x'_{kj} ——资源消耗评价指标均值化数值

\bar{x}_j ——3种施药机械的第 j 项指标均值

根据式(1)、(2)计算得到各项资源消耗评价指标均值化数值如表4所示。

表4 评价指标均值化数值

Tab.4 Equalization value of each evaluation index

施药机械	每公顷施 水量	每公顷施 药量	用工量	每公顷作 业时长	每公顷 作业能耗
ABS	2.743	1.594	0.750	1.540	2.590
SRUAV	0.078	0.625	1.125	0.232	0.186
Six-RUAV	0.179	0.781	1.125	1.228	0.224

2.3 评价指标权重确定

权重表示各项评价指标对综合评价指标的贡献程度,其确定方法一般分为主观赋权法和客观赋权法。

主观赋权法是依据评价者的知识结构、工作经验、个人偏好等确定,具有较强的主观色彩,透明性和再现性差。文中5项评价指标对施药机械资源消耗的综合评价指标都起作用,采用主观赋权法时可取权重为1/5。

为使确定的权重更加客观,通常采用客观赋权法。其中基于变异系数的客观赋权法^[21]得到广泛应用,它根据各项评价指标变异系数来确定权重,计算公式为

$$w_j = C_j / \sum_{j=1}^5 C_j \quad (3)$$

$$C_j = \frac{S_j}{\bar{x}_j} \quad (4)$$

$$S_j = \left[\frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (x_{kj} - \bar{x}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^5 w_j = 1 \quad (0 \leq w_j \leq 1) \quad (6)$$

式中 w_j ——第 j 项指标权重

C_j ——第 j 项指标变异系数

S_j ——3 种施药机械的第 j 项指标标准差值

2.4 评价模型

评价过程中,多指标综合评价模型通常分为两种,即非线性加权函数模型和线性加权函数模型;非线性加权函数模型适用于各项指标间有较强关联的场合,且要求无量纲指标值均大于或等于 1;而线性加权函数模型适用于各项指标间相互独立的场合,对无量纲指标数据没有特定要求^[20]。根据上述模型特性,本文采用线性加权函数模型对施药机械资源消耗进行综合评价。线性加权综合法可使评价指标间得以线性补偿,保证综合评价的公平性,计算简便、操作性强,广泛应用于农业工程等领域^[22]。计算公式为

$$R_k = \sum_{j=1}^5 w_j x'_{kj} \quad (7)$$

式中 R_k ——资源消耗综合评价指标

综合评价指标越小表示施药机械资源消耗越少。

3 结果与讨论

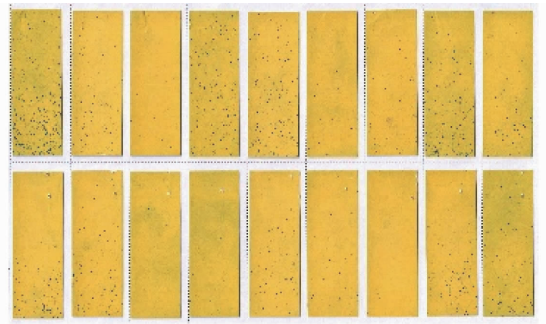
3.1 不同施药机械雾滴分布均匀性分析

试验中按照果树叶片生长角度布置水敏纸,雾滴在水敏纸上的分布能够近似表达药液在叶片上的分布。不同施药机械作业下的部分采样点水敏纸扫描图像及数据读取界面如图 4 所示。

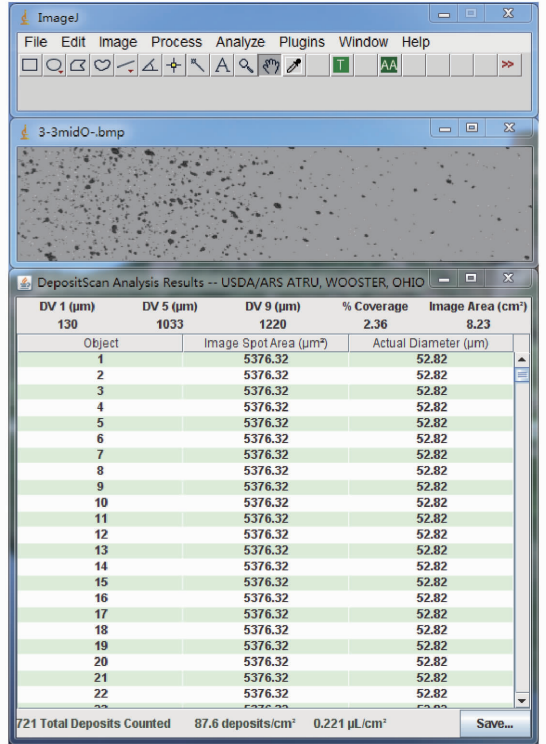
3.1.1 不同施药机械纵向冠层雾滴分布均匀性分析

图 5 为不同施药机械作业时树冠上层、中层和下层雾滴沉积密度及其分布均匀性。

从图 5 中可以看出,3 种施药机械喷雾效果均达到作业质量要求^[23],即雾滴沉积密度大于 25 滴/cm²。其中风送喷雾机作业树冠纵向各层雾滴沉积密度在 50 ~ 100 滴/cm²之间,且上层和中层雾滴沉积密度低于下层;上层雾滴分布最不均匀,变异系数最大,其值达 63.54%。单旋翼植保无人机作业树冠纵向各层雾滴沉积密度非常接近,最大值之差仅为 16 滴/cm²,但各层雾滴分布均匀性较差,变异系数均在 45% 以上。六旋翼植保无人机作业树冠上层雾滴沉积密度略低于中层,但均大于 100 滴/cm²,高于同层的单旋翼植保无人机且雾滴分布较均匀;树冠下层雾滴密度约为 42 滴/cm²,变异系数为 42.18%。



(a) 采样点扫描图像



(b) 数据读取

图 4 采样点与数据读取

Fig. 4 Sampling points and data reading

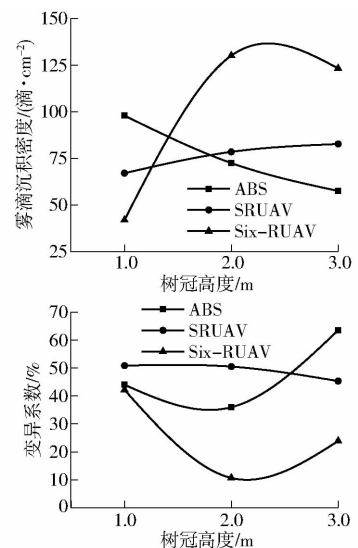


图 5 树冠上层中层和下层雾滴沉积及分布均匀性

Fig. 5 Droplet deposition and distribution uniformity in upper, middle and lower layers of crown

分析其原因可能在于,风送喷雾机采用喷头环形布置方式,喷雾时雾滴呈放射状分散,随着树冠高度的增加,雾滴飘失增多,同时因风力逐渐减小,导致树冠上层雾滴沉积密度最小,分布最不均匀;单旋翼植保无人机旋翼直径为 3.13 m,接近果树最大冠幅,旋翼风场穿透能力强,使得各个冠层雾滴沉积密度接近,但由于在喷洒幅宽范围内,风场风速分布不均匀^[24],导致相同冠层雾滴分布不均匀;相比于单旋翼

植保无人机,六旋翼植保无人机作业高度低,使得中上层雾滴沉积密度高于单旋翼植保无人机,又因其旋翼直径小、相对风力弱,喷洒果树时冠层枝叶对旋翼下洗气流的阻挡作用强^[25],导致树冠下层雾滴沉积密度明显低于中上层。

3.1.2 不同施药机械横向冠层雾滴分布均匀性分析

图 6 为不同施药机械作业时树冠外层、内层和主干层雾滴沉积密度及其分布均匀性。

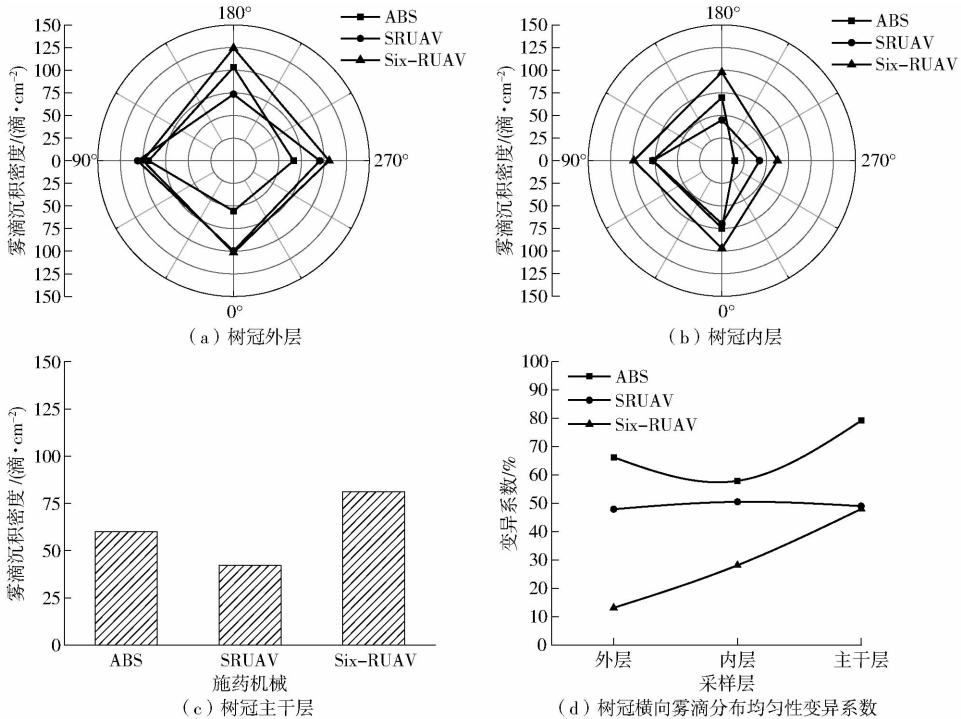


图 6 树冠外层、内层和主干层雾滴沉积及分布均匀性

Fig. 6 Droplet deposition and distribution uniformity in outer, inner and stem layers of crown

从图 6 中可以看出,3 种施药机械的树冠横向各层雾滴沉积效果同样达到了作业质量要求。其中单旋翼和六旋翼植保无人机作业,雾滴沉积密度呈现从树冠外层、内层到主干层逐级递减的分布趋势;而风送喷雾机作业,内层和主干层雾滴沉积密度接近且均低于外层,雾滴分布总体趋势与植保无人机相同。从雾滴分布均匀性角度看,风送喷雾机和单旋翼植保无人机作业树冠横向各层雾滴分布较不均匀,变异系数在 45% ~ 80% 之间,其中风送喷雾机主干层变异系数最高达 79.19%;六旋翼植保无人机作业,外层雾滴分布较均匀、内层次之、主干层最差,变异系数分别为 13.16%、28.18% 和 48.06%。

并不十分明显,偶尔也会出现内层变异系数大于主干层变异系数的情况。

3.1.3 不同施药机械叶面叶背层雾滴分布均匀性分析

图 7 为不同施药机械作业时树冠叶面与叶背层的雾滴沉积密度及其分布均匀性。

分析其原因可能在于,树冠外层叶片相对稀疏,对各施药机械风力阻挡小,雾滴沉积密度较高;树冠内层和主干层,叶片茂密、枝干粗壮,对风场阻挡作用更强,导致雾滴沉积密度越来越小;同时也导致雾滴分布均匀性从外层到主干层越来越差,变异系数逐级递增,因内层和主干层枝叶生长程度有时区别

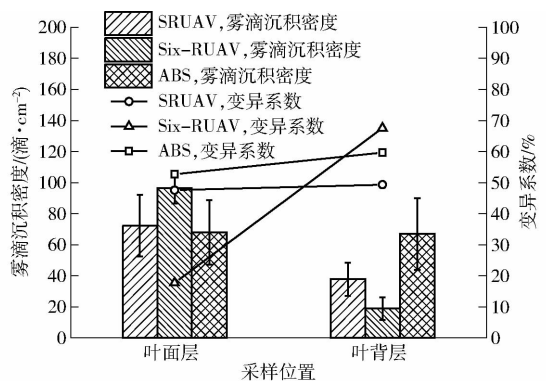


图 7 树冠叶面和叶背雾滴沉积分布均匀性

Fig. 7 Droplet deposition and distribution uniformity on front and back of leaves

从图 7 中可以看出,3 种施药机械作业叶面层雾滴沉积密度均高于叶背层,其中六旋翼植保无人机作业叶背层雾滴沉积密度仅为 19 滴/cm²。从雾滴分布均匀性角度看,仅六旋翼植保无人机在叶面层雾滴分布均匀性较好,变异系数为 17.73%;其余雾滴分布均匀性均较差,变异系数均在 45% 以上。

分析其原因可能在于,自然生长状态下,绝大多数情况是叶面对着雾滴沉降方向,虽然在风送喷雾机气流和无人机风场作用下,叶片翻动使叶背能够受药,但仍然不能完全改变叶面雾滴沉积密度高于叶背的情况。因风送喷雾机作业时风机出口与树冠距离相对较近,气流驱动叶片作用强,使得叶片叶背雾滴沉积密度较为接近;相比而言,无人机作业受作业高度、作业速度、风场方向和风速等影响,叶面叶背雾滴沉积密度相差较大。

3.2 不同施药机械雾滴穿透性分析

图 8 为不同施药机械作业时树冠纵向与横向雾滴覆盖率、变异系数,变异系数越小,穿透性越好。

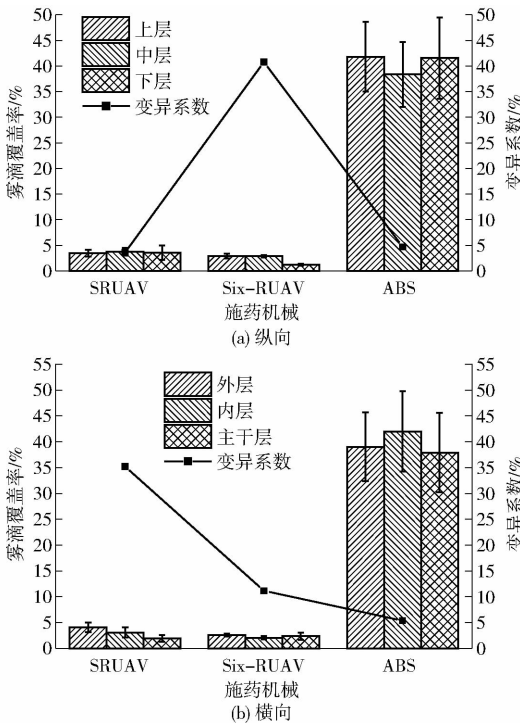


图 8 树冠纵向和横向雾滴覆盖率与变异系数
Fig. 8 Droplet coverage and coefficient of variation of longitudinal and transverse crown

通过计算每种施药机械作业下树冠上层、中层、下层雾滴覆盖率均值的变异系数来反映树冠纵向雾滴穿透性,并通过计算每种施药机械作业下树冠外层、内层、主干层雾滴覆盖率均值的变异系数来反映树冠横向雾滴穿透性。变异系数越小,雾滴穿透性越好。由图 8 可知,单旋翼植保无人机横向雾滴穿透性最差,六旋翼植保无人机纵向雾滴穿透性最差,

变异系数分别为 35.20% 和 40.77%;风送喷雾机横向雾滴穿透性最好,变异系数为 5.35%。单旋翼植保无人机和风送喷雾机纵向雾滴穿透性水平相当且较好,变异系数分别为 3.62% 和 4.71%。

分析其原因可能在于,单旋翼植保无人机喷洒幅宽范围内垂直风场穿透能力强,上层、中层和下层雾滴分布均匀,纵向雾滴穿透性较好;由于旋翼水平方向风速分布不均匀,使得外层、内层和主干层雾滴分布差异较大,横向雾滴穿透性较差。六旋翼植保无人机相比单旋翼植保无人机,风场穿透能力弱,导致纵向雾滴穿透性差。风送喷雾机气流能够基本覆盖纵向采样层高度和横向采样层深度,故其纵向和横向雾滴穿透性均较好。

3.3 不同施药机械地面雾滴流失分析

图 9 为不同施药机械作业下地面各采样点雾滴沉积量分布。

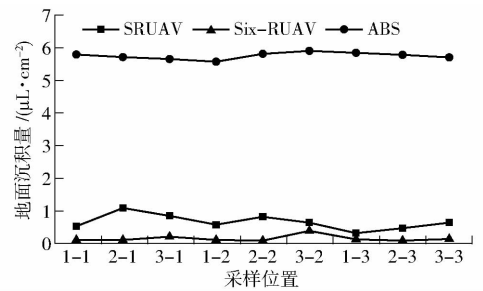


图 9 地面采样点雾滴沉积量分布
Fig. 9 Droplet deposition distribution of ground sample site

从图 9 中可以看出,植保无人机作业时的地面采样点雾滴沉积量明显低于风送喷雾机,其中单旋翼植保无人机的地面采样点平均雾滴沉积量约是风送喷雾机的 2.78%,而六旋翼植保无人机的地面采样点平均雾滴沉积量约是风送喷雾机的 12.50%。

表 5 为不同施药机械作业时地面各行采样点雾滴沉积量及其分布均匀性系数。

表 5 地面采样点雾滴沉积分布均匀性系数
Tab. 5 Droplet deposition and distribution uniformity of ground sample site

施药机械	采样位置	雾滴沉积量均值/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	沉积量分布 均匀性系数/%
ABS	第 1 行	5.73 ± 0.08	2.46
	第 2 行	5.77 ± 0.03	0.87
	第 3 行	5.75 ± 0.08	2.26
SRUAV	第 1 行	0.48 ± 0.08	29.17
	第 2 行	0.79 ± 0.18	39.24
	第 3 行	0.71 ± 0.07	16.90
Six-RUAV	第 1 行	0.12 ± 0.01	10.91
	第 2 行	0.10 ± 0.01	11.55
	第 3 行	0.25 ± 0.07	52.00

从表5中可以看出,风送喷雾机和单旋翼植保无人机株间空隙区(第1行、第3行)雾滴沉积量均值均低于冠层根部区(第2行),六旋翼植保无人机株间空隙区雾滴沉积量高于冠层根部区。

综合上述情况,分析其原因可能在于风送喷雾机喷头流量大,雾滴到达叶面形成大雾滴或液滴,大量滴落到地面所致;又因为冠层根部区枝干多,对雾滴的吸收弱于叶片,雾滴滴落到地面使其高于株间空隙区。六旋翼植保无人机相比单旋翼植保无人机虽然喷头流量接近,但其风场冠层穿透能力弱,导致沉降到地面的雾滴量比单旋翼植保无人机少;又因为冠层根部区较植株空隙区的树冠枝叶对风场阻挡作用强,导致其雾滴沉积量低。

3.4 不同施药机械资源消耗水平分析

根据表4中3种施药机械各项资源消耗评价指标均值化数值,结合式(3)~(6)计算得到不同赋权方法下的风送喷雾机、单旋翼植保无人机和六旋翼植保无人机的综合评价指标和排序结果,如表6所示。

表6 施药机械综合评价指标值

Tab.6 Comprehensive evaluation index of every sprayer

权重确定	施药机械	综合评价指标值	排序
主观赋权法	ABS	1.843	3
	SRUAV	0.449	1
	Six-RUAV	0.707	2
客观赋权法	ABS	2.265	3
	SRUAV	0.255	1
	Six-RUAV	0.479	2

从表6中可以看出,无论采用主观赋权法还是客观赋权法,3种施药机械资源消耗水平排序结果均相同,单旋翼植保无人机排名第1,说明其综合资源消耗最少;六旋翼植保无人机居中,风送喷雾机综合资源消耗最多。分析其原因可能在于,植保无人机与风送喷雾机相比,植保无人机作业速度相对较快,使得作业时长相对较短,加之喷头喷洒流量低,使得施水量、施药量同时降低,另外植保无人机额定功率普遍低于风送喷雾机,所以其作业能耗相对也低。因此,植保无人机施药的综合评价指标数值明显低于风送喷雾机。由于单旋翼植保无人机的多项

评价指标性能优于六旋翼植保无人机,所以其综合评价指标值更低,综合资源消耗最少。

此外,综合评价是从整体上综合体现各被评价对象之间的差异,评价对象之间的差异越大越好,所以权重确定的原则也是综合评价指标值之间相差越大越好,能够说明被评价对象之间有良好的区分度。根据上述原则,从表6中可以看出,采用客观赋权法所得各施药机械综合评价指标值之间差异大于主观赋权法,前者综合评价指标值变异系数为110.2%,后者为74.2%,很好地证明了上述观点。所以,本文认为采用基于变异系数的客观赋权法评价效果更好。

4 结论

(1)3种施药机械作业效果均能够满足果园植保作业要求。树冠纵向各层、横向各层雾滴沉积密度均大于25滴/cm²,但叶背层雾滴沉积密度仍然偏低,其中六旋翼植保无人机作业叶背层雾滴沉积密度仅为19滴/cm²。从树冠纵向角度看,风送喷雾机中下层雾滴分布均匀性低于六旋翼植保无人机,但优于单旋翼植保无人机,纵向各层中变异系数最高为63.54%;而从树冠横向角度看,风送喷雾机各层雾滴分布均匀性均低于植保无人机,其主干层雾滴分布最不均匀,变异系数高达79.19%。

(2)单旋翼植保无人机横向雾滴穿透性最差,六旋翼植保无人机纵向雾滴穿透性最差,变异系数分别为35.20%和40.77%;风送喷雾机横向雾滴穿透性最好,变异系数为5.35%;单旋翼植保无人机和风送喷雾机纵向雾滴穿透性水平相当且较好,变异系数分别为3.62%和4.71%。

(3)六旋翼植保无人机地面雾滴流失量是风送喷雾机的12.50%,单旋翼植保无人机是其2.78%,航空施药减少了农药浪费。

(4)采用基于变异系数的客观赋权法和采用主观赋权法的线性加权函数模型均说明单旋翼植保无人机综合资源消耗最少,六旋翼植保无人机居中,风送喷雾机综合资源消耗最多;且前者综合评价指标值变异系数为110.2%,后者为74.2%,前者综合评价指标值之间差异更明显,评价效果更好。

参 考 文 献

- [1] 王万章,洪添胜,李捷,等. 果树农药精确喷雾技术[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 98-101. WANG Wanzhang, HONG Tiansheng, LI Jie, et al. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 98-101. (in Chinese)
- [2] 赵映,肖宏儒,梅松,等. 我国果园机械化生产现状与发展策略[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(6): 116-127. ZHAO Ying, XIAO Hongru, MEI Song, et al. Current status and development strategies of orchard mechanization production in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(6): 116-127. (in Chinese)
- [3] 张晓辉,郭清南,李法德,等. 3MG-30型果园弥雾机的研制与试验[J]. 农业机械学报, 2002, 33(3): 30-33. ZHANG Xiaohui, GUO Qingnan, LI Fade, et al. Development of 3MG-30 orchard mist sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3): 30-33. (in Chinese)

- [4] 张晓辉,姜宗月,范国强,等.履带自走式果园定向风送喷雾机[J/OL].农业机械学报,2014,45(8):117-122,247. ZHANG Xiaohui, JIANG Zongyue, FAN Guoqiang, et al. Self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 117-122,247. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140819&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.019. (in Chinese)
- [5] 张京,宋坚利,何雄奎,等.“II”型循环喷雾机防飘性能试验[J/OL].农业机械学报,2012,43(4):37-39. ZHANG Jing, SONG Jianli, HE Xiongkui, et al. Anti-drift performance experiment of II-type recycling tunnel sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 37-39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120408&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.008. (in Chinese)
- [6] 王娟,兰玉彬,姚伟祥,等.单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):1-14. WANG Juan, LAN Yubin, YAO Weixiang, et al. Effects of working height of single-rotor unmanned aerial vehicle on drift and droplets deposition distribution of areca tree[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190711&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.011. (in Chinese)
- [7] ZHANG Pan, DENG Lie, LÜ Qiang, et al. Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 45-52.
- [8] QIU Wei, ZHAO Sanqin, DING Weimin, et al. Effects of fan speed on spray deposition and drift for targeting air-assisted sprayer in pear orchard[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 53-62.
- [9] TANG Yu, HOU Chaojun, LUO Shaoming, et al. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 1-7.
- [10] LÜ Meiqiao, XIAO Shupe, TANG Yu, et al. Influence of UAV flight speed on droplet deposition characteristics with the application of infrared thermal imaging[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3): 10-17.
- [11] 邱威,丁为民,汪小昂,等.3WZ-700型自走式果园风送定向喷雾机[J/OL].农业机械学报,2012,43(4):26-30. QIU Wei, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. 3WZ-700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 26-30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120406&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.006. (in Chinese)
- [12] 丁素明,傅锡敏,薛新宇,等.低矮果园自走式风送喷雾机研制与试验[J].农业工程学报,2013,29(15):18-25. DING Suming, FU Ximin, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 18-25. (in Chinese)
- [13] 姜红花,白鹏,刘理民,等.履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):189-195. JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 189-195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s029&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.029. (in Chinese)
- [14] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等.果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J].农业工程学报,2017,33(16):56-63. LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 56-63. (in Chinese)
- [15] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等.基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):70-76. LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70-76. (in Chinese)
- [16] 薛杨春,崔恩,党革荣.车载式果园静电喷雾机的研制[J].安徽农业科学,2018,46(19):188-190. XUE Yangchun, CUI En, DANG Gerong. Research and development of electrostatic sprayer for car-bearing orchard[J]. Anhui Agricultural Science, 2018, 46(19): 188-190. (in Chinese)
- [17] ZHENG Yongjun, YANG Shenghui, ZHAO Chunjiang, et al. Modelling operation parameters of UAV on spray effects at different growth stages of corns[J]. International Journal of Agriculture and Biology Engineering, 2017, 10(3): 57-66.
- [18] 杜栋,庞庆华.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [19] 叶宗裕.关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择[J].统计科学与实践,2003,10(4):25-26. YE Zongyu. Selection methods of positive and dimensionless indicators in comprehensive evaluation of multiple indicators[J]. Statistical Theory and Practice, 2003, 10(4): 25-26. (in Chinese)
- [20] 郭亚军.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2007.
- [21] 宇洁,叶勤,林怡.多光谱影像混合像元解混的加权变异系数分析法[J/OL].农业机械学报,2018,49(9):154-159. YU Jie, YE Qin, LIN Yi. Novel weighted coefficient of variation analysis approach for endmember variability issue in unmixing process of multi-spectral imagery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 154-159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180918&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.018. (in Chinese)
- [22] LIU Jun'an, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Comprehensive effect of different subsoilers on fuel consumption, soil condition and yield based on field experiments and linear weighted model[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(4): 38-51.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 17997—2008 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [24] ZHANG Songchao, XUE Xinyu, SUN Zhu, et al. Downwash distribution of single-rotor unmanned agricultural helicopter on hovering state[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(5): 14-24.
- [25] 张豪,祁力钧,吴亚垒,等.基于 Porous 模型的多旋翼植保无人机下洗气流分布研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(2):112-122. ZHANG Hao, QI Lijun, WU Yalei, et al. Spatio-temporal distribution of downwash airflow for multi-rotor plant protection UAV based on Porous model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 112-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190212&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.012. (in Chinese)