doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.015

香蕉冠层结构特征下无人机施药雾滴沉积规律研究

王　娟[1]　高　振[1]　王树昌[2]　林韶明[1,3]　吉天鹏[1]　张宇航[1]

(1.海南大学机电工程学院,海口 570228;2.中国热带农业科学院环境与植物保护研究所,海口 571101;
3.海南大学信息与通讯工程学院,海口 570228)

摘要:随着植保无人机在热带果树施药中普及,香蕉叶片宽大、层叠等结构特点导致的雾滴沉积不均、药剂利用率低等问题凸显。为优化施药参数,以营养生长期至生殖生长期香蕉为研究对象,采用多旋翼无人机开展正交设计田间试验,以飞行高度、速度及雾滴粒径为关键因素,结合冠层垂直分层与叶片水平分区,解析参数对雾滴沉积的影响规律。结果显示:3 个因素对香蕉冠层上、中、下 3 层叶片正面沉积量均有显著影响($P<0.05$),对反面沉积的影响随冠层层次差异明显,且对正面调控作用强于反面;同时 3 个因素对地面流失率影响极显著($P<0.001$)。基于流失率分级控制目标,提出两类优化参数:30% ~45% 流失率对应较低飞行高度(2 m)、中低速飞行速度(1.5、2.5 m/s)及中到大粒径雾滴(230、310 μm);10% ~30% 流失率则选用较高飞行高度(3、4 m)。本研究明确了施药参数与雾滴沉积、药剂流失的关联规律,为香蕉无人机精准施药提供量化依据,也为热带大叶果树雾滴分布机理研究提供技术支撑。

关键词:香蕉;植保无人机;雾滴沉积;沉积均匀性;地面流失率;正交试验

中图分类号:S224.3;S494　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)03-0153-11　　**OSID**:

Deposition Law of UAV Spraying Droplets under Canopy Structural Characteristics of Banana

WANG Juan[1]　GAO Zhen[1]　WANG Shuchang[2]　LIN Shaoming[1,3]　JI Tianpeng[1]　ZHANG Yuhang[1]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
2. *Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Haikou* 571101, *China*
3. *School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*)

Abstract: With the popularization of plant protection unmanned aerial vehicles (UAVs) in tropical fruit tree spraying, problems such as uneven droplet deposition and low pesticide utilization caused by banana's structural characteristics (e.g., large, overlapping leaves) have become prominent. To optimize spraying parameters, the orthogonal design field tests were conducted by using multi-rotor UAVs on bananas from vegetative to reproductive growth stages. Taking flight height, speed, and droplet size as key factors, combined with vertical canopy stratification and horizontal leaf zoning, the influence of parameters on droplet deposition was analyzed. Results showed that the three factors significantly affected droplet deposition on the adaxial surface of upper, middle, and lower canopy leaves ($P<0.05$), with distinct differences in their impact on abaxial deposition across canopy layers and stronger regulatory effects on the adaxial surface. Meanwhile, the three factors exerted an extremely significant influence on ground loss ratio ($P<0.001$). Based on hierarchical loss ratio control goals, two optimized parameter combinations were proposed: 30% ~45% loss ratio corresponded to lower flight height (2 m), medium-low speed (1.5 m/s and 2.5 m/s), and medium-to-large droplets (230 μm and 310 μm); 10% ~30% loss ratio can use higher flight height (3 m and 4 m). The correlation between spraying parameters, droplet deposition, and pesticide loss was clarified, providing quantitative basis for precise banana UAV spraying and support for droplet distribution mechanism research on tropical large-leaf fruit trees.

Key words: banana; plant protection UAV; droplet deposition; deposition uniformity; ground loss ratio; orthogonal experiments

收稿日期:2025-11-16　修回日期:2025-11-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD1400600)、国家自然科学基金项目(W2412111、32201670)、海南省重点研发项目(ZDYF2022XDNY273)和海南省现代农业产业技术体系项目(HNARS-11-G10)

作者简介:王娟(1982—),女,教授,博士,主要从事热带作物精准农业航空技术与装备研究,E-mail:wj-jdxy@hainanu.edu.cn

通信作者:王树昌(1976—),男,研究员,博士,主要从事热带农业有害生物绿色防控研究,E-mail:wangshuchang2001@163.com

0 引言

随着精准农业理念的深入发展,植保无人机作为农业航空的重要装备,近年来在作物病虫害防治中得到广泛应用[1-2]。与传统人工或地面机械喷药方式对比,植保无人机能够实现快速作业和精准施药,不仅显著降低了劳动强度,还在大面积田间管理中展现出高效、安全的优势。同时,植保无人飞机通常采用低空低量喷施方式,飘移少、可空中悬停、配合 RTK 高精度定位系统可实现高精度轨迹控制,旋翼下洗气流能够增强雾流穿透性,从而提升防治效果并减少漂移[3-6]。

目前,无人机施药效果受到多种因素的影响,包括飞行参数、雾滴粒径、气象条件以及无人机的操作方式等。在棉花的田间试验中发现,当无人机的飞行高度为 2 m 时,雾滴沉积的均匀性和覆盖率最佳[6]。同时,高度和风速的变化会导致沉积区域明显偏移,极端情况下可达 4 m,显示气象因素对漂移距离具有显著影响[7-8]。此外,果树冠层和植株表型特征同样会改变雾滴分布规律,从而影响防治效果[9-11]。这些研究为作物生长监测、森林资源管理以及喷雾作业优化提供了重要参考。

香蕉作为热带和亚热带地区的重要经济和粮食作物,因其营养价值高和消费需求旺盛,已成为全球产量和贸易额最大的水果[12-13]。但香蕉病虫害发生频繁,对产业的稳定性和可持续性发展构成严重威胁[14-15]。与棉花、小麦等常见作物相比,香蕉植株具有粗大圆柱状假茎和螺旋式互生叶片,其叶鞘层层包裹,形成了高度复杂的冠层结构。这种特殊形态对植保无人机施药提出了更高挑战,常导致雾滴在冠层内部分布不均、叶片背面沉积不足以及药剂利用率偏低等问题[16-20]。

针对以上问题,本文以香蕉植株为研究对象,结合其冠层分层和叶片分区特征,设计无人机施药试验方案。通过调控飞行高度、飞行速度和雾滴粒径 3 类关键参数,系统分析不同组合下雾滴在冠层各部位的沉积分布规律,评估其对药剂利用率和防治效果的影响,并提出无人机施药优化参数。

1 材料与方法

1.1 试验装备

本试验采用的多旋翼植保无人机为大疆 T50 型无人机(大疆创新科技有限公司)。该无人机具有共轴双旋翼动力系统,可以提供更高的飞行稳定性和载重能力,喷洒系统方面搭载双重雾化喷洒系统,可以更有效地进行农药喷洒。

1.2 试验地点

试验地点选择在海南省儋州市那大镇的胶蕉间作高效生态示范园(19°31′45″ ~ 19°31′46″N,109°28′15″ ~ 109°29′16″E),该试验田的香蕉垄间距为 3 m,行距为 1.8 m,株距 1.8 m,这片区域种植的香蕉植株品种为“宝岛七号”,种植周期为 8 ~ 9 个月,图 1 展现了试验场地的具体地理位置和种植模式。

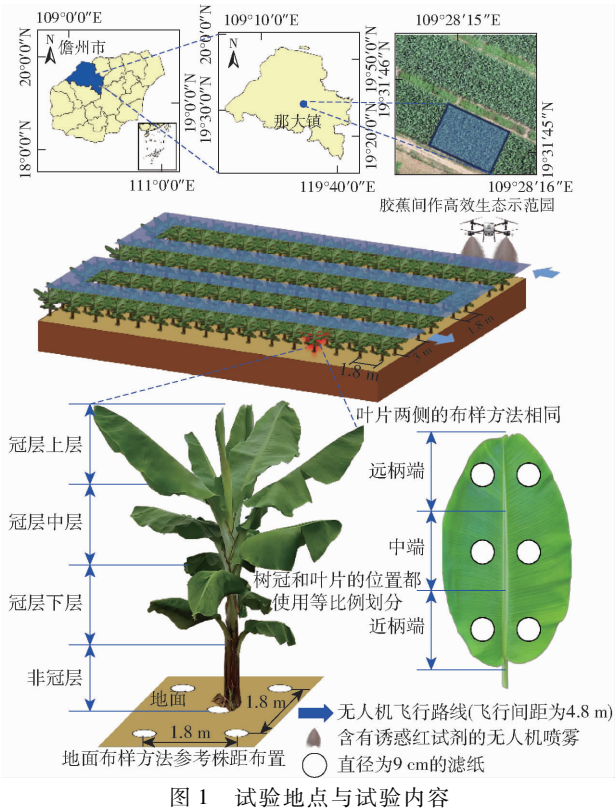

图 1 试验地点与试验内容

Fig. 1 Test site and experiment content

1.3 试验内容

1.3.1 试验设计

本试验于 3 月(香蕉处于营养生长期到生殖生长期之间)开展,选取植保无人机距离冠层顶的飞行高度(2、3、4 m)、飞行速度(1.5、2.5、3.5 m/s)、雾滴粒径(160、230、310 μm)3 个参数作为试验因素,每个因素设 3 个水平,采用正交试验设计安排试验处理,如表 1 所示。飞行高度和飞行速度以当地常用植保无人机施药参数水平为参考,雾滴粒径参考了植保无人机水平级别划分。

样本布置如图 1 所示,试验选取长势一致的香蕉植株为研究对象,以离地面最近的叶片位置为界,将单株香蕉划分为冠层与非冠层两部分;其中冠层采用等比例划分法细分为上层、中层和下层,香蕉叶片同样以等比例划分法分为近柄端、中端和远柄端,此外在试验中,将香蕉叶片向阳面定义为正面,将背阳面定义为反面。试验前,为防止试验相互影响,将

表 1　正交试验设计

Tab. 1　Orthogonal experiment

试验组	飞行高度/m	飞行速度/(m·s^{-1})	雾滴粒径/μm
T1	2	1.5	160
T2	2	2.5	230
T3	2	3.5	310
T4	3	1.5	230
T5	3	2.5	310
T6	3	3.5	160
T7	4	1.5	310
T8	4	2.5	160
T9	4	3.5	230

试验地按正交表随机划分为 9 个区域，每个区域内的植株排布细节一致。对于一组试验，依据冠层划分，在试验区域中为上层、中层和下层位置各选取 6 片叶片，且在同一冠层位置下，通过统一叶片大小控制叶片的一致性，避免因新叶幼嫩、老叶衰退导致的试验误差，每个冠层的 6 片叶片分别来自不同的香蕉植株，每片叶片按上述划分方式布样，为方便沉积显色，在叶片的近柄端、中端和远柄端各布置 2 片直径 9 cm 的定性滤纸（杭州富阳北木浆纸有限公司）用于雾滴沉积采样，叶片背面做相同布置；此外，依据香蕉株距划定地面范围，在一组试验内选取 3 株香蕉，在其地面布置 5 片滤纸以测定地面沉积量。一组试验结束后可收集 231 个样本，所有试验完成后共可收集 2 079 个样本。

试验时，考虑到农药对试验环境及操作人员的危害，以及方便观察试验结果，制备了 8 g/L 的诱惑红溶液来模拟农药喷洒，按照正交试验表的参数设置无人机参数，参考垄间间距设置飞行间距为 4.8 m，喷施量为 150 L/hm^2，在相同气象条件下以平行于垄向的飞行方式进行喷施，无人机试验航线图如图 1 所示。

试验结束后，等待滤纸干燥，然后使用密封袋存储。在实验室中将收集的滤纸逐一用 15 mL 的蒸馏水洗脱处理，并用 752N 型紫外-可见分光光度计（上海仪电分析仪器有限公司）扫描，得出对应溶液的吸光度，最后通过吸光曲线换算后的质量浓度获得相应的沉积量[19]。

1.3.2　试验气象状况

试验期间的气象数据是从安装在试验现场的 NK5500LINK 型风速气象仪（NK Technologies 公司）以每 2 s 记录一次获得的，记录时间是施药前 30 min 至施药后 30 min。风速气象仪设置于施药下风向 50 m 处、距地面 4 m[8]。在不同试验组的试验平均气象数据如表 2 所示。试验过程中，温度为 25.4 ~ 29.9℃，相对湿度为 63.1% ~71.2%，风速为 0.4 ~ 2.6 m/s。获得的气象数据满足 T50 型植保无人机在果树上的喷洒要求。

表 2　不同试验组的平均气象数据

Tab. 2　Different groups' mean meteorological data

试验组	平均温度/℃	平均相对湿度/%	平均风速/(m·s^{-1})
T1	26.2 ±0.8	70.4 ±0.7	1.6 ±0.9
T2	26.2 ±0.7	70.4 ±0.8	1.6 ±0.8
T3	26.2 ±0.4	70.3 ±0.7	1.8 ±0.8
T4	28.9 ±0.9	66.9 ±1.3	1.4 ±0.5
T5	28.9 ±0.4	67.4 ±1.4	1.1 ±0.7
T6	28.9 ±0.3	67.7 ±1.2	1.2 ±0.7
T7	27.6 ±0.7	68.4 ±1.0	1.2 ±0.6
T8	29.3 ±0.6	64.2 ±1.1	1.6 ±1.0
T9	27.6 ±0.5	68.3 ±1.0	1.3 ±0.5

1.3.3　数据分析方法

在测定吸光度前，配置不同浓度的诱惑红溶液，通过分光光度计测定吸光度后建立标准曲线。样品的浓度通过该标准曲线计算获得，通过与样品中类似测定的溶液浓度和相应样品的面积进行比较，对喷雾沉积物进行定量。测定过程中每个独立样本用 15 mL 蒸馏水洗脱，加入蒸馏水后，重复振荡 2 min、静置 3 min，保证每个样本的洗脱程度保持一致，将所得溶液通过分光光度计扫描以测定吸光度。随后，利用预先建立的标准曲线将这些吸光度转换为沉积量，计算公式为

$$D = \frac{FAV_{el}S}{C_{solvent}} \tag{1}$$

式中　D——沉积量，μL/cm^2

F——校正因子，取 27.202

A——吸光度

V_{el}——洗脱所用蒸馏水的体积，μL

$C_{solvent}$——诱惑红溶液的质量浓度，g/L

S——滤纸接触面的表面积，cm^2

在获取初始沉积数据后，为保证数据质量并提升分析结果的可靠性，所有沉积位置均采用相同判定阈值，即先按“正交组 + 沉积位置”分组计算每组数据的下四分位数（Q_1）、上四分位数（Q_3）及四分位距（$I_{QR} = Q_3 - Q_1$），再将低于“$Q_1 - 1.5I_{QR}$”或高于“$Q_3 + 1.5I_{QR}$”的数据点判定为异常值，避免因位置差异导致筛选偏差。考虑到试验数据完整性需求，对识别出的异常值不直接剔除，而是采用该沉积位置下包含异常值在内的整体数据均值进行替换。此方式在保障数据准确性的同时，维护试验数据的完整性与连贯性。

在本研究采用变异系数来量化沉积均匀性，以此评估叶片表面上雾滴沉积均匀程度。其计算

公式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{D}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 $\overline{D}$——叶片表面平均沉积量，μL/cm²

σ——叶片表面沉积量的标准差，μL/cm²

C_v——叶片表面沉积量的变异系数，%

试验过程中的地面流失率指的是未能有效落到作物上，反而掉落至地面的沉积量所占比例。其计算公式为

$$L_g = \frac{D_g}{D_t} \times 100\% \tag{3}$$

式中 L_g——试验后试验区域的地面流失率，%

D_g——试验区域内地面的沉积量，μL/cm²

D_t——无人机总喷施量，μL/cm²

在本研究中，整体采用极差分析和方差分析（Analysis of variance，ANOVA）的方法进行计算分析。极差分析主要通过计算各因素不同水平下的试验结果的极差，来判断因素对试验指标影响的主次顺序及最优水平组合；方差分析则通过分解数据的总变异，进而通过 F 检验判断因素对试验指标的影响是否显著，可更精确地量化因素影响的显著性程度。两种方法结合使用，既能从宏观上把握因素的影响趋势，又能从统计意义上明确其影响的显著程度。在本研究中，方差分析结果 $P<0.05$，说明该差异具有统计学可靠性；极差分析中的 R 表示某因素同一位置下不同水平的极差；在事后比较（本研究采用 LSD 法）中，用不同字母标注各组数据，若两组数据标注的字母不同，代表其差异满足 $P<0.05$，具有统计学显著性；若标注字母相同，则代表组间差异 $P\geqslant0.05$，无统计学显著性。

2 结果与讨论

2.1 不同试验组沉积结果

如图 2～4 所示，呈现了正交试验各组在未筛选异常值情况下叶片正反面及地面的雾滴沉积状况。结果表明，不同试验组合在各部位的沉积量差异显著。从整体趋势看，叶片反面的沉积量均值明显低于正面，且在 T1～T9 各组中仅呈现小幅波动，这说明叶片反面对飞行高度、飞行速度和雾滴粒径等试验因素的响应程度有限，其沉积分布相对稳定。相比之下，叶片正面的沉积量的组间差异更为显著，表明其对无人机作业参数变化的敏感性更强，其受到试验条件变化的影响更大。

各试验组中，地面沉积量的均值普遍高于叶片正反面，且组间差异显著，表明施药参数变化对地面沉积的调控作用更为敏感。在筛选异常值后，叶片

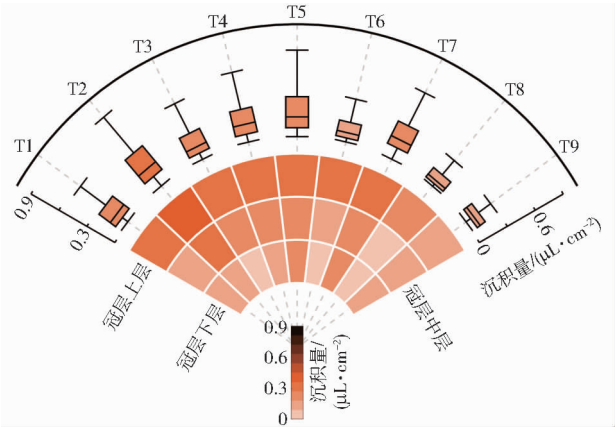

图 2 正交试验分组下的叶片正面沉积

Fig. 2 Orthogonal group adaxial leaf deposition

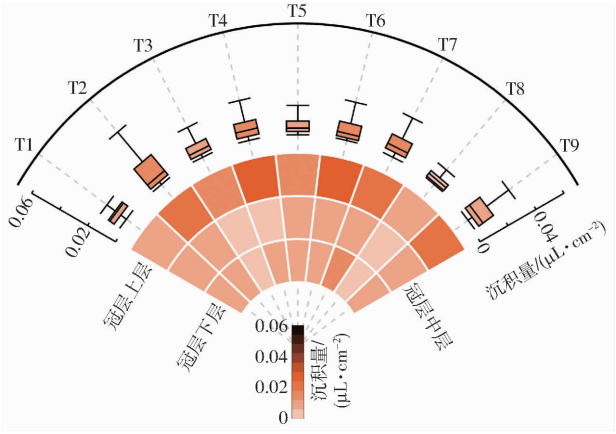

图 3 正交试验分组下的叶片反面沉积

Fig. 3 Orthogonal group abaxial leaf deposition

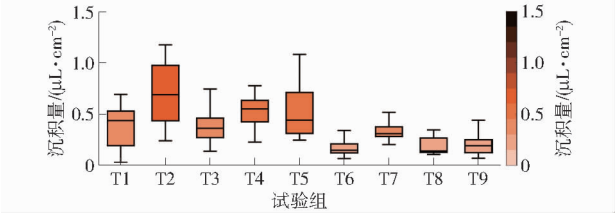

图 4 正交试验分组下的地面沉积

Fig. 4 Orthogonal group ground deposition

正面的平均沉积量由上层到下层分别为 0.285、0.170、0.121 μL/cm²，整体呈现逐层递减趋势，在先前的研究中已经重点分析了香蕉植株 3 个生长阶段，结合先前针对香蕉不同生长阶段的试验结果，可发现两次试验在相近生长期下分层沉积量差异不显著[19]。这表明，在不同试验条件下，冠层分层对正面沉积的影响规律具有一定一致性。相较之下，叶片反面的沉积量均值显著偏低，筛选异常值后的平均沉积量由上层到下层分别为 0.015、0.007、0.007 μL/cm²，再结合不同试验组的结果来看，整体上，冠层上层沉积要高于中层和下层，且中下层的沉积差异不明显。结合不同试验组结果来看，叶片反面的沉积对无人机参数变化的敏感性明显低于正面，其分层差异也更为有限。这进一步印证了叶片

背面沉积不足的普遍性。

2.2　各因素不同水平下的香蕉叶片正面沉积结果

2.2.1　基于冠层分层的香蕉叶片正面沉积

表 3 方差分析结果表明，无人机飞行高度、飞行速度和雾滴粒径对冠层上、中、下层叶片正面沉积量均有显著影响（$P \leqslant 0.040$），且不同层级的响应差异明显：除飞行高度外，冠层下层对各因素的敏感性最强，中层主要受飞行高度和雾滴粒径的显著影响，上层主要受飞行高度和飞行速度的显著影响。这表明，在优化叶片正面沉积效果时，需综合考虑多因素参数组合，而非单一因素调控。这一结果与对芒果冠层的相关研究结果类似，已有研究指出，作业参数变化对芒果下层叶片的雾滴覆盖率等指标影响显著，其主要原因在于下层叶片直接暴露在无人机下洗气流及雾滴沉降路径的初始区域，因而对参数改变表现出更强的响应[21]。相较于芒果，香蕉叶片呈螺旋状排列且间距较大，中上层冠层通风性更强，下洗气流在传递过程中会因空间扩散导致风速衰减，雾滴受气流驱动的定向性减弱，削弱了参数变化对雾滴沉积的调控作用。从工程应用角度看，该规律提示在实际施药作业中，应针对不同冠层层级采取差异化的参数优化策略。

表 3　基于冠层分层的香蕉叶片正面沉积方差分析结果

Tab. 3　ANOVA of adaxial banana leaf deposition by canopy stratification

因素	自由度	冠层上层		冠层中层		冠层下层	
		F	P	F	P	F	P
飞行高度	2	11.464	<0.001	14.191	<0.001	3.803	0.023
飞行速度	2	6.811	0.001	5.142	0.006	24.055	<0.001
雾滴粒径	2	3.251	0.040	19.932	<0.001	24.166	<0.001

如图 5（图中不同字母表示差异显著，下同）所示，极差分析与事后比较结果揭示了这些因素对冠层层级叶片正面沉积分层效应：共性上，雾滴粒径 310 μm 在所有冠层层级表现为最佳，而 160 μm 粒径沉积效果均显著劣于大粒径；在飞行速度上，3.5 m/s 均导致沉积量显著降低，说明过高的速度不利于雾滴在冠层内的有效沉积；在分层差异上，上层最佳参数为 3 m 飞行高度和 1.5 m/s 飞行速度，其中飞行高度为最主要影响因素（$R = 0.118$），且 3 m 飞行高度显著优于 4 m，1.5 m/s 飞行速度显著优于 3.5 m/s；中层需 2 m 飞行高度（显著优于 3 m、4 m）和 2.5 m/s 飞行速度，其中雾滴粒径（$R = 0.104$）为核心影响因素，说明中粒径以上的雾滴显著提高了沉积量，所以推测较大粒径可避免雾滴被拦截，有助于减少雾滴在中层叶片结构中的阻滞与损失；下层则以 3 m 飞行高度和 1.5 m/s 飞行速度最优，沉积量主要受飞行速度与雾滴粒径的共同影响（$R > 0.08$），而飞行高度作用较弱（$R = 0.030$）。其中，1.5 m/s 速度显著优于更高速度，大粒径有助于雾滴穿透冠层，并沉积至下层。

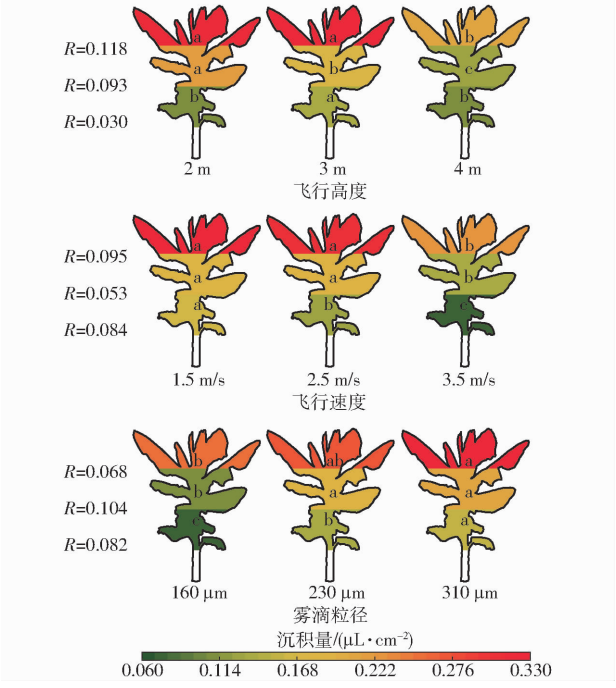

图 5　基于冠层分层的各因素不同水平下的香蕉叶片正面沉积量

Fig. 5　Canopy-stratified adaxial banana leaf deposition by factor levels

2.2.2　基于叶片分区的香蕉叶片正面沉积

表 4 方差分析结果显示，试验因素对叶片不同分区（近柄端、中端、远柄端）的正面沉积量具有显著差异，且分层特征明显。在冠层上层，飞行高度显著影响叶片中端和远柄端（$P \leqslant 0.004$），飞行速度显著影响近柄端和中端（$P \leqslant 0.011$），而雾滴粒径仅对远柄端产生显著效应（$P = 0.013$）；在冠层中层，雾滴粒径对叶片中端的影响最为突出（$F = 15.022$，$P < 0.001$），飞行高度对 3 个分区均有显著作用（$P \leqslant 0.04$），飞行速度仅影响近柄端（$P = 0.011$）；在冠层下层，飞行速度对 3 个分区均表现为极显著效应（$P \leqslant 0.001$），雾滴粒径对近柄端、中端极显著（$P < 0.001$），而飞行高度对所有分区无显著影响。总体来看，叶片中端对作业参数的响应普遍更敏感，说明其在气流扰动和雾滴沉积过程中处于核心受力区。而不同冠层层级的主导因素存在差异：上层沉积主要受飞行高度调控，中层沉积更依赖雾滴粒径，下层则主要受飞行速度与粒径共同作用。造成该分区差异的原因可能在于叶片形态与气流-雾滴作用方式：叶片中端在结构上展开充分，具有更大的迎风

表 4 基于叶片分区的香蕉叶片正面沉积方差分析结果

Tab. 4 ANOVA of adaxial banana leaf deposition by leaf partitioning

冠层位置	因素	自由度	近柄端		中端		远柄端	
			F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
冠层上层	飞行高度	2	3.048	0.052	5.767	0.004	6.202	0.003
	飞行速度	2	4.707	0.011	5.701	0.005	0.192	0.825
	雾滴粒径	2	0.670	0.514	1.598	0.208	4.541	0.013
冠层中层	飞行高度	2	4.600	0.012	7.316	0.001	3.322	0.040
	飞行速度	2	3.254	0.043	2.068	0.132	1.707	0.187
	雾滴粒径	2	4.714	0.011	15.022	<0.001	3.628	0.030
冠层下层	飞行高度	2	1.623	0.203	0.658	0.520	2.151	0.122
	飞行速度	2	9.244	<0.001	7.270	0.001	7.342	0.001
	雾滴粒径	2	11.998	<0.001	12.014	<0.001	2.233	0.113

面积，是喷雾气流作用的“最大暴露面”，与下洗气流方向更为垂直，因而沉积响应更显著；而叶片近柄端和远柄端则分别受到叶柄遮挡和叶缘涡流的干扰而沉积受限。

如图 6 所示，所有试验组冠层上层从叶片近柄端到远柄端的平均沉积量为 0.269、0.298、0.288 μL/cm^2，中层为 0.164、0.183、0.162 μL/cm^2，下层为 0.124、0.123、0.115 μL/cm^2。整体上，沉积量从大到小依次为上层、中层、下层，且叶片中端普遍略高于近柄端和远柄端。结合极差分析与事后比较结果可知，共性规律：1.5 m/s 飞行速度为全冠层全分区沉积的最佳水平（*R* 为 0.070 ~ 0.154），显著优于 3.5 m/s，仅少数分区可兼容 2.5 m/s；雾滴粒径对叶片中端影响最敏感（*R* 为 0.074 ~ 0.157），310 μm 雾滴粒径始终最优，160 μm 雾滴粒径显著劣于中、大雾滴粒径，且全分区无小粒径最优情况。分层差异上：飞行高度调控呈分层特异性，冠层中层全分区最优飞行高度为 2 m（显著优于 4 m），下层全分区飞行高度无显著影响；雾滴粒径需求存在分区差异，冠层中层近柄端和远柄端、下层近柄端和中端可兼容 230 μm 雾滴粒径，对于下层远柄端，雾滴粒径无显著作用；飞行速度适配有分区区别，上层远柄端、中层中端可接受 2.5 m/s 飞行速度，下层全分区需控制 1.5 m/s 低速度（显著优于 3.5 m/s）。

2.3 各因素不同水平下的香蕉叶片反面沉积结果

2.3.1 基于冠层分层的香蕉叶片反面沉积

表 5 方差分析结果显示，试验因素对叶片反面沉积量与叶片正面沉积的规律显著不同。在冠层上层，雾滴粒径影响极显著且强度最高（$F = 21.407$，$P < 0.001$），飞行高度（$F = 3.768$，$P = 0.024$）与飞行

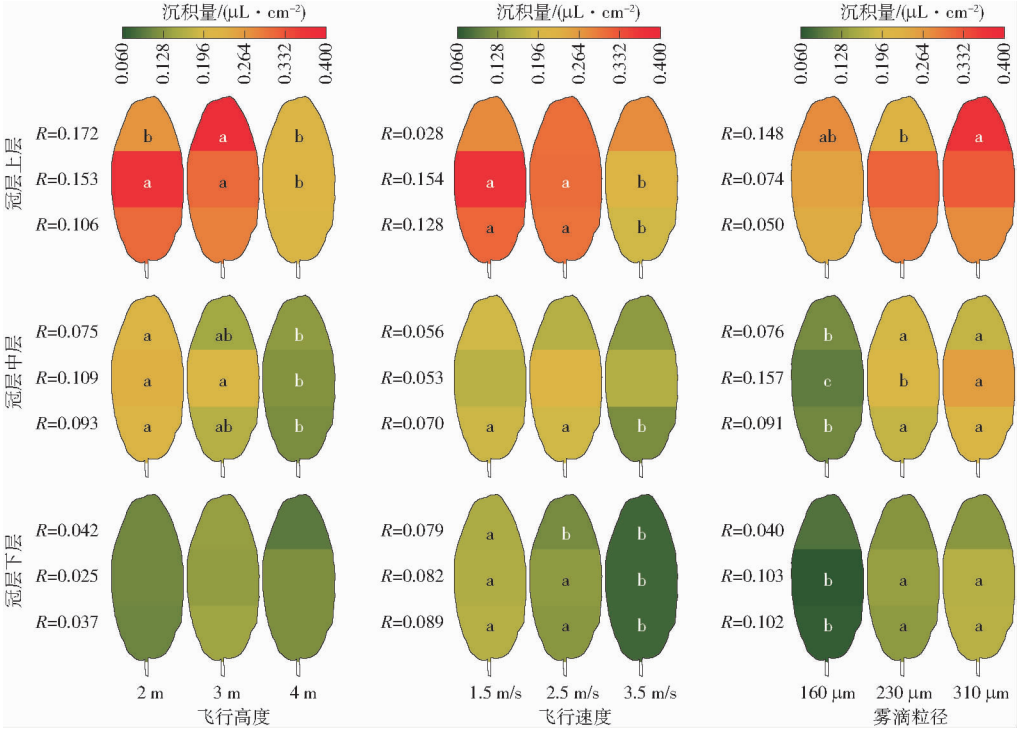

图 6 基于叶片分区的各因素不同水平下的香蕉叶片正面沉积量

Fig. 6 Leaf-partitioned adaxial banana leaf deposition by factor levels

速度($F=5.535$,$P=0.004$)也均有显著影响,三者共同构成上层反面沉积的关键调控因素,与正面沉积相比,上层反面更依赖于雾滴粒径,说明粒径决定了雾滴能否突破叶片正面屏障并在反面形成有效沉积;在冠层中层,各因素对反面沉积均无显著影响,表明飞行参数对中层反面的调控效应有限,这可能与中层叶片的空间位置和排列状态有关,一方面,气流经过上层衰减后到达冠层中层时扰动能量不足,另一方面,中层反面往往受上层叶片遮挡,导致雾滴难以直接到达,削弱了作业参数的差异化效应;在冠层下层,仅飞行速度对反面沉积存在极显著影响($F=24.620$,$P<0.001$),且作用强度远高于其他因素,飞行高度($P=0.714$)与雾滴粒径($P=0.734$)均无显著作用,这表明下层反面沉积主要取决于无人机下洗气流的动能,而非雾滴粒径或飞行高度。已有研究通过计算流体动力学模拟和试验测量证实,飞行速度显著改变下洗气流的速度分布,进而影响雾滴的穿透性能和沉积分布[22]。本研究结果与之相符,即下层反面沉积的核心在于气流强度而非喷雾参数。

表 5　基于冠层分层的香蕉叶片反面沉积方差分析结果

Tab. 5　ANOVA of abaxial banana leaf deposition by canopy stratification

因素	自由度	冠层上层		冠层中层		冠层下层	
		F	P	F	P	F	P
飞行高度	2	3.768	0.024	1.704	0.184	0.337	0.714
飞行速度	2	5.535	0.004	0.591	0.555	24.620	<0.001
雾滴粒径	2	21.407	<0.001	2.037	0.132	0.309	0.734

如图 7 所示,全分层叶片反面沉积对无人机作业参数的敏感性整体较低,各参数极差 R 值较小,最大为 0.011,且无全分层通用的最优参数,仅关键参数对特定分层有调控价值。对于研究结果,其中,冠层上层受三因素协同影响,雾滴粒径为绝对主导($R=0.011$),230 μm 为最优且显著优于其他粒径,其次是飞行速度($R=0.005$),3.5 m/s 的效果最优,冠层高度影响最弱($R=0.004$),3 m 为最佳;冠层中层各参数作用极弱($R\leqslant0.001$),且水平间无显著差异,受试验中飞行参数调控极小;下层仅速度有显著影响($R=0.005$),1.5 m/s 最优且显著优于更高速度。已有研究表明,农药液滴在喷洒叶片反面时容易反弹和飞溅,导致农药在叶片反面沉积效率较低[23-24]。在本研究中,尽管上层反面沉积可通过粒径与速度实现一定程度的优化,但中层和下层反面沉积受无人机作业参数影响有限,提示其改进可能需要依赖于喷雾助剂、双向喷头或气流增强等手段,而非仅靠飞行参数调整。

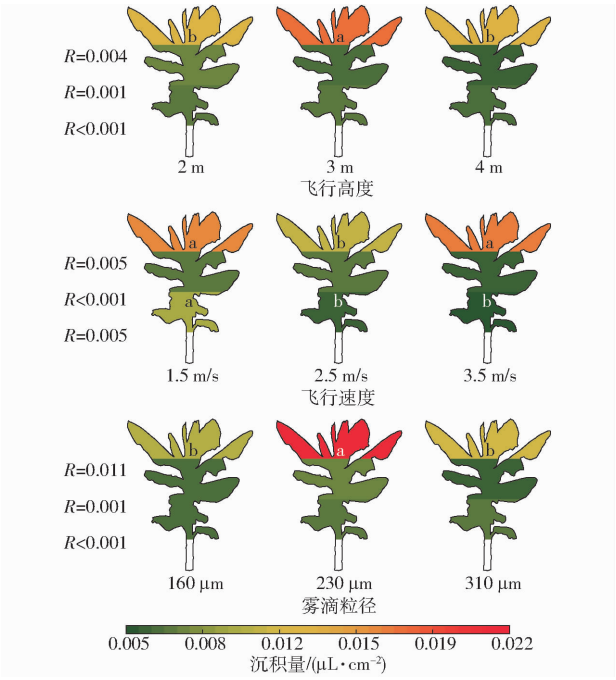

图 7　基于冠层分层的各因素不同水平下的香蕉叶片反面沉积量

Fig. 7　Canopy-stratified abaxial banana leaf deposition by factor levels

2.3.2　基于叶片分区的香蕉叶片反面沉积

表 6 方差分析结果进一步揭示了无人机作业参数对叶片反面不同分区沉积量的分层差异性。在冠层上层,雾滴粒径对全分区均表现为显著或极显著影响($P\leqslant0.015$),是该层反面沉积的核心控制因素,飞行速度仅对远柄端有显著影响($F=5.102$,$P=0.008$),而飞行高度对所有分区均无显著作用($P\geqslant0.164$);在冠层中层,飞行高度仅对中端存在显著影响($F=4.984$,$P=0.009$),飞行速度仅对近柄端存在极显著影响($F=6.178$,$P=0.003$),而雾滴粒径对全分区均无显著影响($P\geqslant0.137$);在冠层下层,飞行速度对全分区均极显著或显著影响($P\leqslant0.002$),是关键影响因素,飞行高度仅对中端存在显著影响($F=3.502$,$P=0.034$),雾滴粒径对该层所有分区均无显著作用($P\geqslant0.362$)。

图 8 展示了各因素不同水平下的叶片反面沉积,整体来看,同一冠层位置的近柄端、中端和远柄端的平均沉积量差异极小:冠层上层叶片由近柄端到远柄端的 3 个部位的平均沉积量分别为 0.014、0.015、0.014 μL/cm^2,冠层中层为 0.007、0.006、0.007 μL/cm^2,冠层下层为 0.008、0.006、0.007 μL/cm^2,这说明在宏观施药条件下,叶片反面沉积在同层不同分区间差异不显著,而其分布差异主要来源于作业参数的调控作用。

结合图 8 结果发现,除上层远柄端外,多数分区

表 6 基于叶片分区的香蕉叶片反面沉积方差分析结果

Tab. 6 ANOVA of abaxial banana leaf deposition by leaf partitioning

冠层位置	因素	自由度	近柄端		中端		远柄端	
			F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
冠层上层	飞行高度	2	1.840	0.164	1.326	0.270	0.503	0.606
	飞行速度	2	2.171	0.119	0.675	0.511	5.102	0.008
	雾滴粒径	2	7.450	<0.001	4.348	0.015	8.118	<0.001
冠层中层	飞行高度	2	0.955	0.388	4.984	0.009	0.071	0.932
	飞行速度	2	6.178	0.003	0.445	0.642	1.859	0.161
	雾滴粒径	2	0.948	0.391	2.032	0.137	1.600	0.207
冠层下层	飞行高度	2	3.008	0.054	3.502	0.034	1.192	0.308
	飞行速度	2	9.476	<0.001	9.141	<0.001	6.931	0.002
	雾滴粒径	2	0.783	0.460	0.427	0.654	1.026	0.362

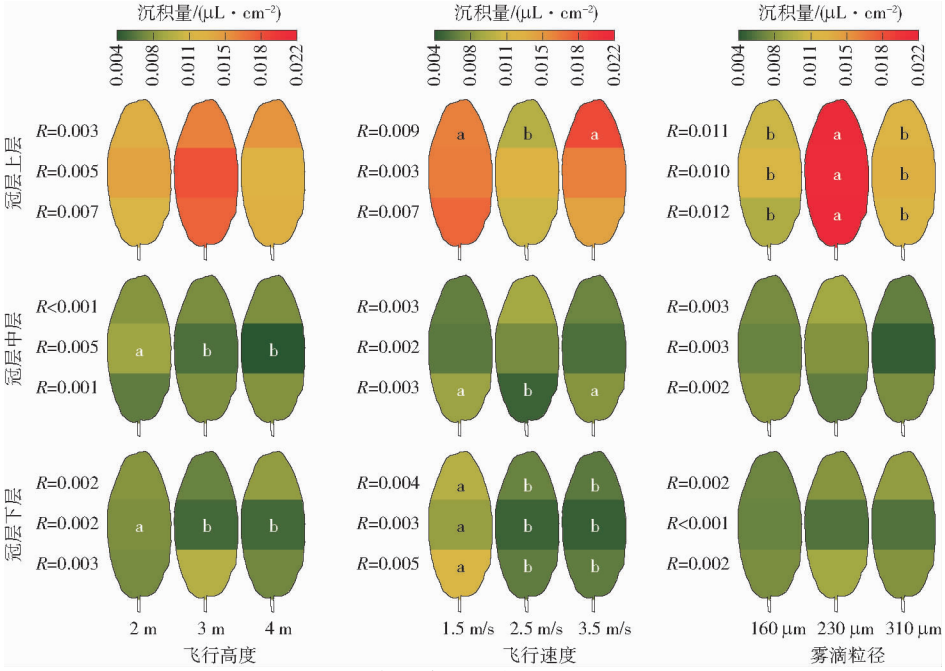

图 8 基于叶片分区的各因素不同水平下的香蕉叶片反面沉积量

Fig. 8 Leaf-partitioned abaxial banana leaf deposition by factor levels

最佳速度为 1.5 m/s,且 1.5 m/s 显著优于 2.5 m/s,说明低飞行速度是提高叶片反面沉积的基础条件。对于冠层上层,雾滴粒径为全分区核心影响因素(R 为 0.010 ~0.012),230 μm 显著优于其他粒径,飞行速度仅对远柄端有作用,3.5 m/s 为最优,飞行高度对本层影响不显著;对于冠层中层,飞行速度仅对于近柄端影响显著(1.5 m/s 为最优),飞行高度仅在中端影响显著(2 m 为最优),雾滴粒径无明显作用;冠层下层则以飞行速度为全分区关键因素,1.5 m/s 显著优于更高速度,飞行高度仅在近柄端和中端有一定作用,雾滴粒径全程无显著影响。这种显著的"分层-分区差异化规律"反映了叶片背面在雾滴输运、附着特性及雾滴-叶面互作上的复杂性,也解释了反面沉积普遍弱于正面的现象。

2.4 冠层沉积均匀性结果

如图 9 所示,整体来看,在各因素不同水平下,不同分层内叶片的变异系数总体不显著,说明无人机飞行参数对叶片沉积均匀性的调控作用整体较弱,尚未形成能显著改变沉积均匀性水平的主导因素,且无任何单一参数水平能实现全分层、全正反面的高均匀性,均存在优势与劣势位置,除部分为位置外,各飞行参数下叶片正面沉积均匀性变异系数均处于 45.6% ~65.7% 之间,叶片反面沉积均匀性变异系数均处于 50.3% ~75.5% 之间,整体上变异系数波动较小。此外,已有试验表明飞行高度和雾滴粒径对香蕉冠层叶片两侧雾滴沉积密度和覆盖均匀性无显著影响[20],说明均匀性可能主要受冠层的结构特性决定,飞行参数只能提供有限的调节作用。

2.5 地面流失率结果

表 7 方差分析结果显示,无人机飞行高度、飞行速度、雾滴粒径对地面流失率的影响均达到极显著水平(P <0.001),说明这 3 个因素均能有效改变地面流失率,图 10 进一步展现了不同参数组合下地面流失率分布。结合先前研究在相似生长期的结果对

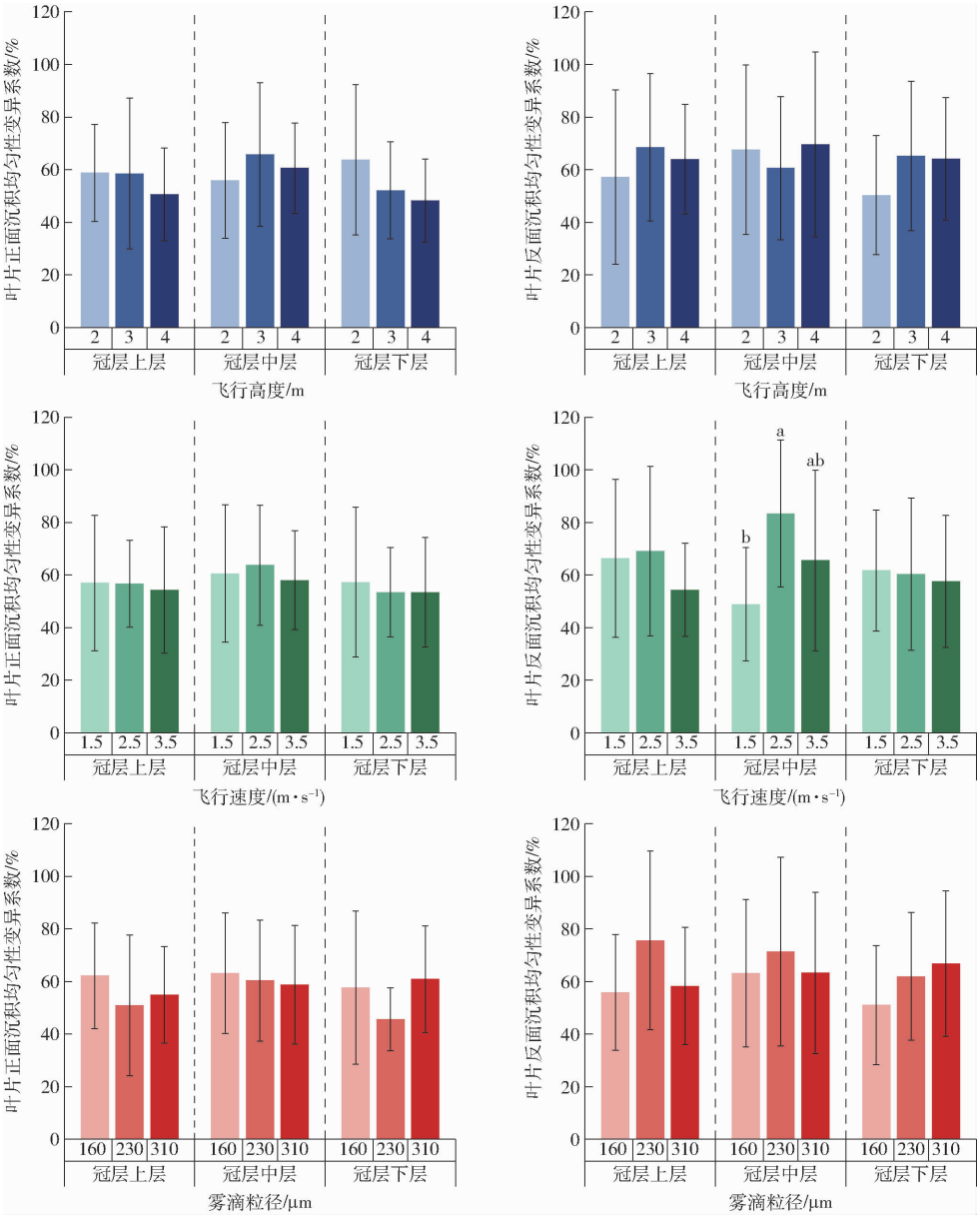

图 9　各因素不同水平下的叶片沉积均匀性

Fig. 9　Leaf deposition uniformity by factor levels

比，结果仅相差 1.4%[19]。验证了试验设计的合理性，并为已有结论提供了补充。

表 7　地面流失率方差分析

Tab. 7　ANOVA for ground loss ratio

因素	*F*	*P*
飞行高度	23.999	<0.001
飞行速度	20.429	<0.001
雾滴粒径	20.358	<0.001

当实际作业中要求将地面流失率控制在 30% ~45%，单一参数中仅冠层高度 2 m、飞行速度 2.5 m/s、雾滴粒径 230 μm 的组合能落入该范围，对应 T2 架次的流失率为 46.4%，略高于上限但仍具参考价值，结合事后比较结果替换为飞行速度 1.5 m/s 和雾滴粒径 310 μm，可在保证沉积效果的同时更接近预期区间。

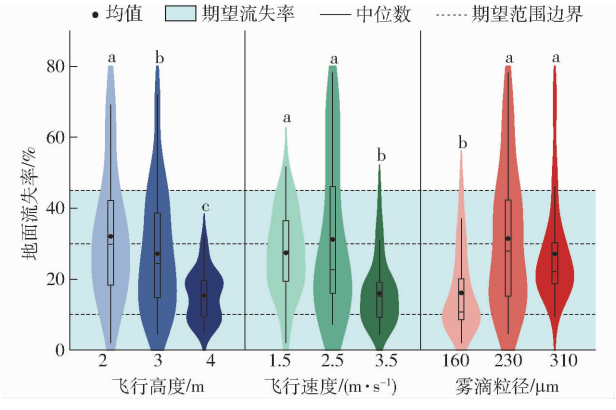

图 10　各因素不同水平下的叶片地面流失率

Fig. 10　Ground loss ratio by factor levels

当目标区间为 10% ~30% 时，较多参数组合能够满足要求。单因素水平中，3 m 和 4 m 飞行高度、

1.5 m/s 和 3.5 m/s 飞行速度、160 μm 和 310 μm 雾滴粒径均符合该区间,其中 4 m 飞行高度、3.5 m/s 飞行速度、160 μm 雾滴粒径为核心优选水平,单一流失率仅为 15% ~ 17%,在试验架次中,T6(11.0%)和 T7(21.6%)均处于该区间,验证了该组合参数的稳定性与可操作性。此外,从结果中发现单一条件下 2.5 m/s 和 230 μm 并不在可选择区间内,但根据事后比较结果发现,在某些特定场景内也可进行参数替换以提高施药效果,如在试验架次中,T8(12.2%)和 T9(12.4%)均处于该区间,进一步验证了在田间施药场景中试验参数的可操作性。

在当前试验设定的参数范围内,尚无组合可稳定实现小于 10% 的极低流失率。在试验架次中,仅有 T6 架次接近 10%。此外,从实际作业场景的复杂性来看,即使未来通过参数调整使实验室条件下的流失率达到小于 10%,也需考虑田间环境因素的干扰,有研究发现,随着无人机作业高度和风速的变化,喷幅内沉积区域的起始位置极端情况下变化了 4 m,总喷雾飘移百分比在 15.42% ~ 55.76% 之间[7]。这反而导致地面流失率波动;此外,香蕉冠层生长阶段的差异也会改变雾滴的拦截效率,使固定参数组合的流失率控制效果不稳定。因此,若需稳定实现小于 10% 的极低流失率目标,仅依靠飞行参数优化难以实现,需进一步探索非参数调控手段或多架次协同施药策略来提升雾滴的冠层附着效率和空间分布均匀性。

3 结论

(1)整体来看,基于该试验前提下,叶片正面的平均沉积量由上层到下层整体呈现逐层递减趋势,且叶片中端沉积普遍略高于近柄端和远柄端。相较之下,叶片反面的沉积量显著偏低,其中冠层上层沉积要高于中层和下层,且中下层的沉积差异不明显,与此同时,叶片反面沉积在同层不同分区间差异不显著。

(2)无人机飞行高度、飞行速度和雾滴粒径,对冠层上、中、下层的叶片正面沉积量均有显著影响,而对于叶片反面沉积量的影响呈现分层特异性,且若细化到叶片分区,不同因素对叶片正面沉积的显著影响效果也高于叶片反面沉积,这可能与冠层结构和无人机下洗气流的影响有关。整体而言,不同层次需匹配差异化参数组合。

(3)沉积均匀性受飞行参数调控有限,整体上无人机飞行参数对沉积均匀性的调控作用较弱,未形成显著差异。各因素水平在均匀性上存在互补关系,说明均匀性可能主要受冠层的结构特性决定,飞行参数只能提供有限调节。

(4)对于地面流失率而言,各因素影响均达到极显著的水平,若目标流失率为 30% ~45%:在当前试验设定的参数范围内,建议飞行高度 2 m、飞行速度 1.5 m/s 或 2.5 m/s,雾滴粒径 230 μm 或 310 μm;同时关注反面沉积时选 2 m、1.5 m/s 和 230 μm。若目标流失率为 10% ~30%:在当前试验设定的参数范围内,建议飞行高度 3 m 或 4 m;降低流失率优选 4 m、3.5 m/s、160 μm,兼顾沉积效果选 3 m、1.5 m/s 和 310 μm 组合参数,其它参数可根据场景灵活选择。

参 考 文 献

[1] 兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 等. 中国植保无人机发展形势及问题分析[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 217 - 225.
LAN Yubin, CHEN Shengde, DENG Jizhong, et al. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 217 - 225. (in Chinese)

[2] HUANG Y, TOMSON S J, HOFFMANN W C, et al. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(3): 1 - 10.

[3] WANG L, LAN Y, ZHANG Y, et al. Applications and prospects of agricultural unmanned aerial vehicle obstacle avoidance technology in China[J]. Sensors, 2019, 19(3): 642.

[4] CHEN S, LAN Y, LI J, et al. Effect of wind field below unmanned helicopter on droplet deposition distribution of aerial spraying[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 67 - 77.

[5] ZHAN Y, CHEN P, XU W, et al. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 32 - 45.

[6] LOU Z, XIN F, HAN X, et al. Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites[J]. Agronomy, 2018, 8(9): 187.

[7] WANG J, LAN Y, ZHANG H, et al. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 5 - 12.

[8] LAN X, WANG J, CHEN P, et al. Risk assessment of environmental and bystander exposure from agricultural unmanned aerial vehicle sprayers in golden coconut plantations: effects of droplet size and spray volume[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 282: 116675.

[9] LAN Y, CHEN S. Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2018, 1(1): 1 – 9.

[10] LIU F, HU P, ZHENG B, et al. A field-based high-throughput method for acquiring canopy architecture using unmanned aerial vehicle images[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 296: 108231.

[11] ZHU B, LIU F, XIE Z, et al. Quantification of light interception within image-based 3-D reconstruction of sole and intercropped canopies over the entire growth season[J]. Annals of Botany, 2020, 126(4): 701 – 712.

[12] 邹冬梅, 范琼. 世界香蕉生产, 贸易现状与产业展望[J]. 广东农业科学, 2022, 49(7): 131 – 140.
ZOU Dongmei, FAN Qiong. Present situation of globle banana production and trade and prospect for banana industry[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(7): 131 – 140. (in Chinese)

[13] 黄媛媛, 徐小俊. 全球香蕉产业现状与发展趋势[J]. 热带农业工程, 2021, 45(5): 34 – 38.
HUANG Yuanyuan, XU Xiaojun. Current situation and development trend of banana industry in global[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2021, 45(5): 34 – 38. (in Chinese)

[14] OLIVEIRA T Y K, SILVA T C, MOREIRA S I, et al. Evidence of resistance to QoI fungicides in contemporary populations of *Mycosphaerella fijiensis*, *M. musicola* and *M. thailandica* from banana plantations in southeastern Brazil[J]. Agronomy, 2022, 12(12): 2952.

[15] LOZANO-SORIA A, PICCIOTTI U, LOPEZ-MOYA F, et al. Volatile organic compounds from entomopathogenic and nematophagous fungi, repel banana black weevil (*Cosmopolites sordidus*)[J]. Insects, 2020, 11(8): 509.

[16] 韩浩定, 张燕, 闫二乐. 香蕉秸秆切片装置及其控制系统设计[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 106 – 108.
HAN Haoding, ZHANG Yan, YAN Erle. Design of banana pseudostem slicer device based on PLC and hydraulic drive[J]. Food and Machinery, 2014, 30(2): 106 – 108. (in Chinese)

[17] ZHANG W, LIU W, LI W, et al. Characteristics of throughfall kinetic energy under the banana (*Musa nana* Lour.) canopy: the role of leaf shapes[J]. Catena, 2021, 197: 104985.

[18] ZHANG W, ZHU X, CHEN C, et al. Large broad-leaved canopy of banana (*Musa nana* Lour.) induces dramatically high spatial-temporal variability of throughfall[J]. Hydrology Research, 2021, 52(6): 1223 – 1238.

[19] WANG J, GAO Z, WANG S, et al. Quantitative assessment of banana canopy porosity based on a three-dimensional canopy model and its impact on spray droplet penetration within the canopy from unmanned aerial vehicle spraying systems[J]. Crop Protection, 2025, 197: 107360.

[20] YU J, XU X, DUAN J, et al. Effect of operational parameters on droplet deposition characteristics using an unmanned aerial vehicle for banana canopy[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 15: 1491397.

[21] 王冰洁,潘波,杜长远,等. 植保无人飞机作业参数对雾滴在杧果冠层沉积分布的影响[J]. 热带作物学报,2024, 45(11):2398 – 2406.
WANG Bingjie, PAN Bo, DU Changyuan, et al. Effects of spraying parameters for plant protection unmanned aerial vehicle on deposition distribution of droplets in mango canopy[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(11): 2398 – 2406. (in Chinese)

[22] ZHU Y, GUO Q, TANG Y, et al. CFD simulation and measurement of the downwash airflow of a quadrotor plant protection UAV during operation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107286.

[23] 王沛, 祁力钧, 李慧, 等. 植物叶片表面结构对雾滴沉积的影响分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 75 – 79.
WANG Pei, QI Lijun, LI Hui, et al. Influence of plant leaf surface structures on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(10):75 – 79. (in Chinese)

[24] SONG M, HU D, ZHENG X, et al. Enhancing droplet deposition on wired and curved superhydrophobic leaves[J]. Acs Nano, 2019, 13(7): 7966 – 7974.