doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.003

面向差异化果园精准防治的多旋翼植保无人机喷施模式优化研究

闫　瑜[1,2]　李新龙[1,2]　王会征[1,2]　张　伟[3]　王宝聚[1,2]　兰玉彬[1,2]

(1.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255000;2.山东理工大学生态无人农场研究院,淄博 255000;
3.山东中以现代智慧农业有限公司,淄博 256100)

摘要:针对复杂地形与树冠结构差异导致果园病虫害防治中植保无人机喷施模式适配性不足、冠层药液沉积不均和地面流失风险增加等问题,本文开展了面向果园病虫害精准防治的植保无人机喷施模式决策与参数优化研究。以平原高纺锤形果园和山地开心形果园为典型应用场景,综合考虑地形类型、树冠结构、作业模式、雾滴覆盖度、雾滴密度、沉积均匀性和地面沉积等作业信息,构建了面向喷施执行层的作业模式评价与决策方法,系统分析行内、行间和盘旋等飞行模式对冠层药液沉积分布及地面流失的影响。结果表明:在平原高纺锤形果园中,行间飞行模式能够增强雾滴向冠层内部的穿透作用,各冠层位置平均雾滴密度达到 32.52 个/cm^2,雾滴密度变异系数为 14.64%,优于行内和盘旋模式。在山地开心形果园中,盘旋模式沉积水平更高、覆盖能力更强,叶片正、反面雾滴密度分别达到 56.42~88.18 个/cm^2 和 25.29~67.38 个/cm^2,更有利于开放式冠层内部靶标区域的药液覆盖。行间和盘旋模式在提高冠层沉积水平的同时,也可能增加地面药液沉积,因此实际作业中需结合防治对象、冠层靶标位置和环境条件等进行协同调控。研究结果可为果园病虫害智能化管控平台施药决策提供理论参考与技术支持。

关键词:植保无人机;冠层结构;飞行模式;沉积均匀性;冠层穿透性;果园防治

中图分类号:S252　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)18-0028-09　　**OSID**:

Spraying Mode Optimization of Multi-rotor Plant Protection UAV for Precision Prevention and Control in Differentiated Orchards

Yan Yu[1,2]　Li Xinlong[1,2]　Wang Huizheng[1,2]　Zhang Wei[3]　Wang Baoju[1,2]　Lan Yubin[1,2]

(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*
2. *Academy of Ecological Unmanned Farm, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*
3. *Shandong Sino-Israeli Modern Smart Agriculture Co., Ltd., Zibo* 256100, *China*)

Abstract: Aiming to address the poor adaptability of plant protection UAV spraying modes, uneven canopy deposition, and increased ground loss risk caused by complex terrain and heterogeneous canopy structures in orchard pest and disease control, spraying mode decision-making and parameter optimization for precision orchard plant protection were investigated. Plain high-spindle orchards and mountainous open-center orchards were selected as typical application scenarios. Multi-source information, including terrain type, canopy structure, flight mode, droplet coverage, droplet density, deposition uniformity, and ground deposition, was integrated to establish an operation-mode evaluation and decision-making method for the spraying execution layer. The effects of intra-row, inter-row, and spiral flight modes on canopy droplet deposition and ground loss were systematically analyzed. The results showed that in plain high-spindle orchards, the inter-row flight mode enhanced droplet penetration into the canopy, with an average droplet density of 32.52 droplets/cm^2 and a coefficient of variation of 14.64%, outperforming the intra-row and spiral modes. Therefore, it was recommended as the preferred spraying mode for pest and disease control in dense plain orchards. In mountainous open-center orchards, the spiral flight pattern achieved higher droplet deposition and superior coverage performance. The droplet density on the adaxial and

收稿日期:2026-05-07　修回日期:2026-06-11

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BCF01051、2024BBF01013)和国家重点研发计划项目(2024YFD2301100)

作者简介:闫瑜(1997—),女,博士生,主要从事精准农业航空技术与装备研究,E-mail:24603010025@stumail.sdut.edu.cn

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应用技术研究,E-mail:ylan@sdut.edu.cn

abaxial leaf surfaces ranged from 56.42 droplets/cm^2 to 88.18 droplets/cm^2 and 25.29 droplets/cm^2 to 67.38 droplets/cm^2, making it more suitable for improving pesticide coverage in open-center structures. Although the inter-row and spiral modes improved canopy deposition, they also increased ground deposition to some extent. The research findings can provide theoretical guidance and technical support for pesticide application decisions on the intelligent pest and disease management platform for orchards.

Key words: plant protection UAV; canopy structure; flight mode; deposition uniformity; canopy penetration; orchard prevention and control

0　引言

中国是全球最大的水果生产国之一，栽培面积和产量均位于世界前列[1]。果树管理是确保高产的关键，其中病虫害防治工作约占果树管理的30%。有效的病虫害防治措施能遏制病虫害蔓延，减少约10%经济损失[2]。传统果园施药主要依赖人工喷雾和地面机械喷雾。其中人工施药劳动强度大、作业效率低，地面机械在山地、丘陵及密植果园中易受地形和行间通行条件限制[3-5]。因此，发展适应复杂果园环境的高效精准施药技术，对提高果园病虫害防治效率和农药利用率具有重要意义。

近年来，随着无人机技术快速发展，植保无人机作为一种精准高效的喷洒工具，在农业中得到了广泛应用[6]。特别在果树种植领域，作业优势日益凸显。植保无人机不仅能够在复杂地形和环境中灵活作业，还实现了人药分离，降低了对人体和环境的危害[7-8]。已有研究表明，相比传统作业，植保无人机喷施不仅能够节省生产成本，还提高了工作效率。例如，岳婉婉[9]发现，植保无人机能够减少用水量并提高作业效率，适合用于果园大面积喷洒作业；Sánchez-Fernández 等[10]研究表明，植保无人机飘移量低于传统喷雾设备。王明等[11]研究也发现，植保无人机在苹果园中的农药利用率高于传统喷雾设备。这些研究表明，植保无人机在果园中喷施效果显著优于传统设备。尽管植保无人机在果园植保作业中展现出较高的应用潜力，但现有施药技术研究体系尚不完善，仍与果园规模化应用的现实需求存在明显差距。无人机喷施效果受多重因素共同制约[12-15]，其中作业参数设定直接关系到雾滴在果树冠层中的沉积特性[16-17]。若飞行关键参数配置不当，可能导致雾滴沉积密度不足或空间分布均匀性降低，进而影响整体的施药精准度与农药有效利用率[18-19]。

目前，为优化植保无人机在果园作业中喷施质量，国内外已围绕关键参数展开大量研究。Li 等[20]开展了多旋翼植保无人机在杏树果园内施药试验，结果表明喷液量 93.5 L/hm^2 比 46.8 L/hm^2 能显著提升雾滴覆盖度。Meng 等[21]指出，在桃树的 Y 形与 CL 形树冠下，雾滴覆盖度随飞行速度增加而下降。Shan 等[22]、张盼等[23]分别在苹果园和柑橘园试验中证实，适当调整植保无人机喷雾量、飞行高度及速度，可以改善液滴密度和覆盖度。Tang 等[24]在柑橘树上研究表明，高度 1.2 m 与速度 3.5 m/s 组合可使冠层雾滴密度和覆盖度最优。Wang 等[25]的喷嘴对比试验显示，空气喷射式平板风扇喷嘴能提升雾滴沉积均匀性。Zhang 等[26]在甘蔗果园中确定了较优参数组合（喷液量 15 L/hm^2、高度 3 m、速度 4 m/s），并强调下洗气流受风速影响，当风速大于 3 m/s 时，作业效果变差。尽管上述成果为无人机作业提供了参考，但仍缺乏对异质化果园环境系统适配的探究[27]。事实上，果园地形与树冠结构的耦合作用对雾滴沉积分布具有扰动效应。在平原果园，高纺锤形果树冠层密集，对雾滴纵向穿透性提出了极高要求；而在山地果园，地形起伏叠加开心形果树的开放式结构，易导致雾滴的横向飘移与沉积不均匀[28-29]。因此，不同果园类型对植保无人机喷施模式的需求并不相同。亟须建立面向差异化果园病虫害防治飞行模式适配与评价方法。

鉴于此，本文以平原高纺锤形果园和山地开心形果园为典型应用场景，开展面向果园病虫害精准防治的植保无人机喷施模式决策与参数优化研究。通过比较行内、行间和盘旋等不同作业模式下雾滴覆盖度、雾滴密度、沉积均匀性和地面沉积特征，揭示地形类型与树冠结构对药液沉积分布的影响规律，提出适用于不同果园病虫害防治场景的植保无人机作业模式优化方案。以期为果园病虫害智能管控提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地点

田间试验分别在平原与山地 2 类果园开展，如图 1 所示。平原试验点设在山东省淄博市沂源县中以智慧果园。试验于 2023 年 8 月进行，此时苹果正值果实膨大期，供试树种为纺锤形，树体高度（4.5 ± 0.5）m，冠幅（2.3 ± 0.3）m。山地试验点位于山东省烟台市，时间为 2023 年 9 月，此时苹果同样处于果实膨大期，树形为开心形，树高（2.5 ± 0.3）m，冠

幅(3.7 ±0.2)m。2 次试验期间气象条件稳定,各项指标均满足喷施作业要求。

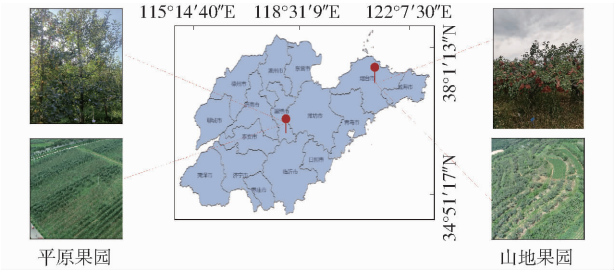

图 1 试验场地

Fig. 1 Test site

1.2 试验设备

试验喷施平台为 DJI T30 型植保无人机(大疆创新科技有限公司),配备容量为 30 L 药箱,采用水平对置六缸双柱塞泵结构,并搭载双通道电磁流量计,测量误差控制在 ±2% 以内。同时装备球形雷达系统,可实现对周围环境全方位感知与智能避障功能。试验过程中,环境温度、相对湿度及风速风向数据通过 Kestrel 5000 LiNK 型气象站(北京金仕特仪器仪表有限公司)进行实时采集,采样间隔设定为 2 s/次。雾滴样本收集借助测试架、固定夹及卡罗米特纸卡完成,随后使用扫描仪对纸卡上雾滴沉积特征进行分析。此外,试验耗材还包括用于样品保存的自封袋以及作为喷雾示踪剂的诱惑红等。

1.3 试验设计

平原果园试验设置行内、行间、盘旋 3 种飞行路线,由于山地果园地形起伏较大,不适合采用行间飞行模式,因此设置行内和盘旋 2 种飞行模式,以探究植保无人机喷施效果。试验中飞行高度设置为相对作物高度 2 m,飞行速度设置为 1.5 m/s,喷液量设置为 60 L/hm^2。

为确保采样数据精确性与可靠性,在布置采样卡前,需预先准备相关试验材料,并详细记录无人机喷雾系统工作参数。喷雾流量是影响雾滴沉积特征的关键因素之一,故试验前需对喷施设备进行流量标定。每个处理组选取 3 株苹果树作为重复样本。依据垂直高度,将每株果树冠层划分为上、中、下、地面 4 层。喷雾作业开始前,在各冠层内布置雾滴采集卡,用于评估雾滴沉积密度与覆盖度。每层冠层进一步设置内外 2 个同心圆采样区域。在每个采样区域内,分别于东、西、南、北 4 个水平方向布置采样点,每层共计 8 个采样点。采样时用回形针将卡罗米特纸卡固定于取样叶片正反两面,以全面采集雾滴沉积样本。采样点具体布置方式见图 2。

为评估雾滴在不同冠层的分布特征,每次试验随机选取 3 株长势一致的果树作为样本。喷施介质

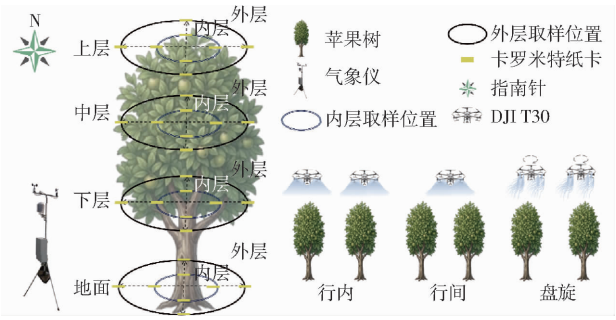

图 2 采样点设计与飞行路径示意图

Fig. 2 Sampling point design and schematic of flight path

采用纯净水,试验前按质量浓度 5 g/L 加入诱惑红作为示踪剂。每个处理组均设置 3 次有效重复。喷洒完成后,待采样卡表面雾滴自然风干,操作人员佩戴一次性手套,依照布样顺序逐一回收卡罗米特纸卡。将同一处理组纸卡装入预先编号密封袋中,并放入干燥剂以避免样本受潮影响后续分析,随后置于阴凉处暂存,统一带回实验室处理。试验现场如图 3 所示。



图 3 试验现场雾滴采样卡沉积效果

Fig. 3 Deposition effect of experimental site sampled card

1.4 数据处理

每次试验结束后,待雾滴采样卡晾干,并放在已标记的自封袋中,然后带回实验室用扫描仪扫描。扫描后图像通过图像处理软件 DepositScan 进行分析,以获取雾滴覆盖度和雾滴密度等数据。使用 SPSS 通过 Duncan 检验,在 95% 显著性水平下进行方差分析。采用变异系数(CV)衡量试验中植保无人机喷施区域内各采集点间雾滴沉积均匀性。其中,变异系数越小表示雾滴沉积分布越均匀。

1.5 喷施效果综合评价思路

为使植保无人机喷施参数优化结果更好地服务于果园病虫害精准防治需求,在雾滴沉积试验基础上,构建了面向喷施执行层的作业模式评价方法。以地形类型、树冠结构、作业模式和雾滴沉积指标为主要信息源,综合评价不同飞行模式在不同果园场

景下适用性，重点关注冠层靶标区域药液穿透性、沉积分布均匀性以及地面流失风险，为作业模式选择提供依据。

在多源信息构成方面，地形类型主要包括平原果园和山地果园，反映作业空间约束和气流扰动差异；树冠结构包括高纺锤形和开心形，表征冠层密度、垂直分层和内部通透性差异；作业模式包括行内、行间和盘旋飞行，代表不同喷施路径和气流作用方式；沉积质量指标包括雾滴覆盖度、雾滴密度、雾滴密度变异系数和地面沉积水平，用于量化药液到达靶标区域的能力及其空间分布特征。

冠层内部沉积能力作为核心评价指标，地面沉积水平作为流失风险参考。综合上述指标，将飞行模式划分为优先推荐、条件推荐和不推荐 3 类：在冠层沉积效果良好且地面流失可控情况下判定为优先推荐；冠层沉积较好但地面流失风险较高或仅部分冠层效果良好时为条件推荐；冠层沉积不足或分布不均时为不推荐。该方法可将雾滴沉积试验结果转换为面向病虫害防治的作业模式决策建议，为果园智能施药系统提供基础。

2　试验结果与分析

2.1　平原果园飞行模式对雾滴沉积特性的影响

2.1.1　平原果园飞行模式对雾滴覆盖度的影响

图 4 为不同飞行模式下植保无人机在果树冠层的雾滴沉积分布特征。对于上层冠层，3 种飞行模式叶片正面雾滴覆盖度为 6.80% ~17.12%，背面为 1.45% ~6.63%，整体表现为叶片正面覆盖度高于背面。其中，行间飞行模式在上层展现出明显的喷施效率优势，叶片正面雾滴覆盖度达到 17.12%，分别为盘旋模式（13.50%）和行内模式（6.80%）的 1.27 倍和 2.52 倍。此外，3 种模式在上层内侧区域雾滴覆盖度差异较小（2.60% ~5.28%），表明飞行方式对树冠上部内侧的影响相对有限。

中层冠层数据显示，盘旋飞行模式在叶片正面雾滴覆盖度达到 20.23%，明显高于在上层正面的 13.50%，未呈现常规的自上而下垂直递减规律。行间飞行模式在中层内侧区域正面（11.50%）与反面（3.45%）均维持了较好的雾滴附着，表明该模式能够有效适应高纺锤形树冠结构，实现雾滴向树冠中层内部的有效渗透。

下层冠层分析结果表明，随着冠层深度增加，各模式雾滴覆盖度均有所衰减。在树冠下层，盘旋飞行模式表现出更强的综合沉积能力，在下层外侧和内侧区域雾滴覆盖度均达到 7.38%；而行间飞行模式在下层各检测位点覆盖度均稳定在 4.17%，虽然

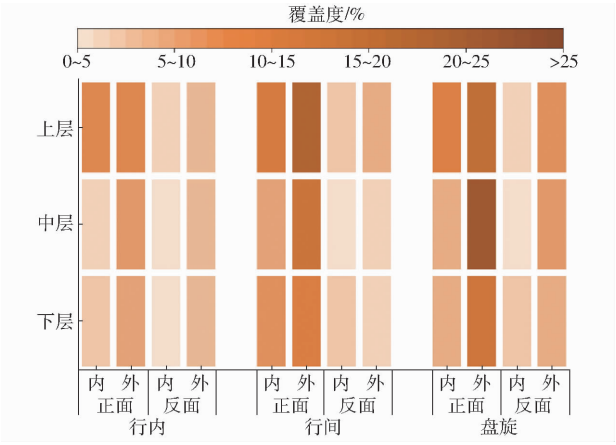

图 4　不同飞行模式下采样点雾滴覆盖度

Fig. 4　Distribution of spray coverage by sampling points at different flight modes

能保持一定的作业下限，但在绝对覆盖度上低于盘旋模式。

综合对比 3 种模式，行内飞行模式在各冠层呈明显的自上而下递减趋势，整体喷施与穿透效果欠佳。相比之下，行间飞行模式在整个冠层中上部具有优异的穿透与沉积性能。究其原因，高纺锤形树冠呈底部宽、顶部窄的锥形结构，而行间飞行模式所产生的下洗气流呈现向下及四周扩散的旋转流场，这种风场特性与该树形结构的中上部外廓高度适配，从而提升了雾滴在垂直方向上的早期沉降与中上部冠层内部的覆盖效果。

2.1.2　平原果园飞行模式对雾滴密度的影响

图 5（图中不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$），下同）为不同飞行模式下冠层内侧的雾滴密度分布特征。由图 5 可知，行内飞行模式下冠层内侧雾滴密度为 11.55 ~27.14 个/cm^2；盘旋飞行模式下提升至 17.00 ~47.13 个/cm^2。而行间飞行

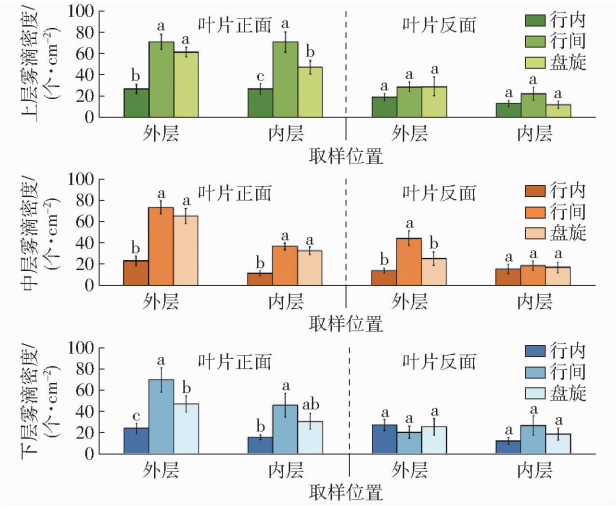

图 5　不同飞行模式下采样点雾滴密度

Fig. 5　Distribution of number of droplets by sampling location at different flight modes

模式表现最优,达到 18.65 ~ 71.30 个/cm^2。进一步分析表明,行间飞行优势主要表现在上部冠层叶片正面雾滴密度提升,而对下部冠层叶片反面的影响相对有限。该模式下雾滴密度整体均值达 32.52 个/cm^2,行间飞行的突出优势主要集中在果树中上部冠层(尤其是叶片正面)的雾滴密度提升,展现出极强的初期沉降和靶向附着能力。

具体针对行间飞行模式的沉积结构进行空间多维分析:在叶片取向维度上,行间模式下叶片正反面沉积效果对比显示,正面平均密度为 43.33 个/cm^2,反面为 21.71 个/cm^2,正面约为反面的 2 倍,这一差异主要归因于叶片反面不直接面向喷雾源。在水平分布维度上,树冠外侧平均雾滴密度为 34.16 个/cm^2,内侧为 30.88 个/cm^2,外侧略高于内侧,但整体差异较小。

综合而言,行间飞行模式在空间分布上展现出更强的靶向性特征,不仅在维持全树冠内部雾滴沉积的水平均匀性上表现优异,更在中上部核心叶片上实现了远超其他模式的高密度附着。

2.1.3 平原果园飞行模式对地面沉积的影响

图 6 为不同飞行模式对地面雾滴沉积与流失特征的影响。在植保无人机果树作业中,地面沉积量通常作为评价药液流失及生态环境污染风险的重要指标。由图 6 可知,3 种飞行模式在地面覆盖度与雾滴密度上呈现显著差异:行间飞行模式地面沉积量最高,盘旋飞行模式次之,行内飞行模式最低。

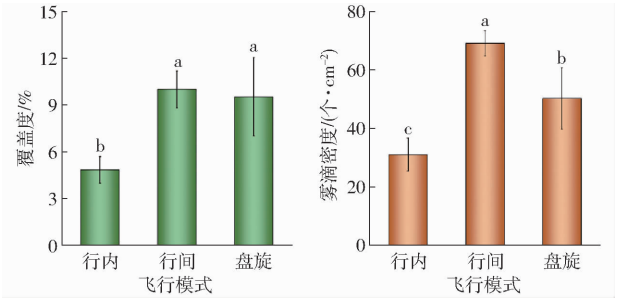

图 6 不同飞行模式下地面沉积分布

Fig. 6 Ground deposition distribution in different flight modes

具体而言,行内飞行模式地面覆盖度仅为 4.85%,雾滴密度为 31.15 个/cm^2,2 项指标均处于最低水平,表明该模式在多角度沉降过程能将更多药液截留在冠层,具有较好的降低地面沉积风险作用。盘旋飞行模式地面覆盖度为 9.16%,雾滴密度为 45.67 个/cm^2,介于行内、行间飞行模式之间。相比之下,行间飞行模式地面沉积最为严重,地面覆盖度达 10.00%,雾滴密度高达 69.17 个/cm^2。主要归因于高纺锤形果树行间区域缺乏冠层枝叶遮挡,下洗气流裹挟的雾滴无阻碍地直接沉降于地面,导致农药非靶标流失增加。

综上所述,行间飞行模式虽然在中上部冠层具有局部高密度沉积优势,但地面流失量相应大幅增加,在果园实际作业中可能会削弱冠层的有效药量并带来土壤污染隐患。因此,从生态减损与精准施药角度出发,若采用行间飞行模式作业,建议在经过无树冠行间空隙时采取精准断喷或动态调节喷液量的控制策略,以平衡冠层沉积效果与地面流失之间的关系,切实提高农药利用率。

2.1.4 平原果园飞行模式对植保无人机喷雾均匀性的影响

基于雾滴密度,计算了各试验组在冠层内的喷雾均匀性。雾滴在果树冠层的沉积均匀程度通常以密度变异系数衡量。由表 1 可知,3 种飞行模式下冠层各层次雾滴密度变异系数为 10.60% ~ 20.28%,整体均匀性良好。

表 1 不同飞行模式下雾滴密度变异系数

Tab. 1 Coefficient of variation of number of droplets in different flight modes %

飞行模式	冠层取样位置	雾滴密度变异系数	平均值
行内	上层	17.21	17.39
	中层	18.30	
	下层	16.65	
行间	上层	11.66	14.64
	中层	11.97	
	下层	20.28	
盘旋	上层	10.60	16.11
	中层	17.86	
	下层	19.86	

从不同飞行模式层次分布来看,行间飞行模式在果树中上层表现最为均匀,上层变异系数低至 11.66%,中层为 11.97%,均处于各模式同层最优水平;下层则以行内飞行模式均匀性最佳,变异系数为 16.65%。表明行间飞行模式有助于提升中上层冠层的雾滴分布一致性,而行内飞行模式在下层冠层的雾滴分布更具优势。

总体而言,不同飞行模式在各冠层均能维持较为理想的雾滴沉积均匀性。在果园实际精准施药决策中,若针对中上层郁闭度高且病虫害易发区域,采用行间飞行模式能获得更优的整体均匀度。而行内飞行模式虽在中上层存在一定的沉积波动,但在下层的稳定沉降和低变异系数特征,使其在针对树冠中下部防治时具备独特的应用优势。

2.2 山地果园飞行模式对雾滴沉积特性的影响

2.2.1 山地果园飞行模式对雾滴覆盖度的影响

根据图 7,盘旋飞行模式整体上表现出更高的冠层雾滴覆盖水平,且在叶片正、反面均优于行内飞

行模式。尤其在上部冠层，盘旋飞行模式叶片正、反面平均覆盖度为 11.02%，明显高于行内飞行模式（7.15%）。说明在冠层顶部区域，盘旋飞行更有利于雾滴附着与沉积。

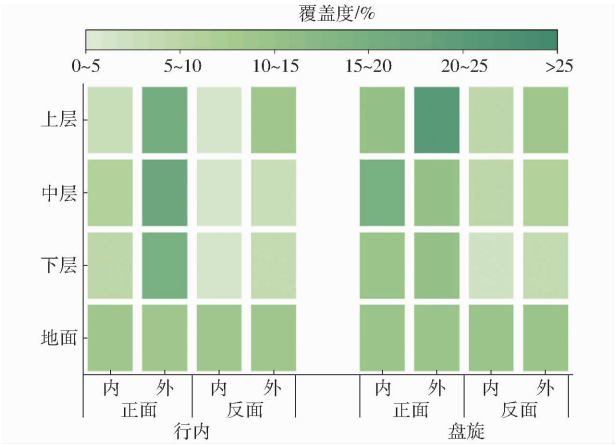

图 7　山地果园不同飞行模式下采样点雾滴覆盖度

Fig. 7　Distribution of spray coverage of sampling points in different flight modes in mountainous orchard

从冠层不同位置来看，2 种飞行模式存在一定差异。行内飞行模式在中层和下层外侧叶片上覆盖表现相对较好，外侧叶片覆盖度分别达到 16.13% 和 10.28%；而在内侧叶片区域，盘旋飞行模式更具优势，平均覆盖度为 7.80%。结果表明盘旋飞行模式在促进雾滴向冠层内部穿透方面更具潜力，能够在一定程度上减弱外层叶片遮挡的影响，从而提升冠层内部的覆盖水平和穿透效果。

2.2.2　山地果园飞行模式对雾滴密度的影响

根据图 8，不同飞行模式下冠层雾滴密度变化趋势与覆盖度结果并不完全一致，整体差异相对较小。行内飞行模式下叶片正、反面平均雾滴密度为 42.05 个/cm^2，盘旋飞行模式为 57.86 个/cm^2，仅提高 15.81 个/cm^2，表明在本试验条件下，2 类指标对飞行模式变化的响应并不完全一致。

从盘旋飞行模式分布特征来看，叶片正面雾滴密度为 56.42 ~ 88.18 个/cm^2，叶片反面为 25.29 ~ 67.38 个/cm^2，各位置均保持较高沉积水平，但空间离散性仍较大。结合各采样点结果可知，虽然 2 种飞行模式在雾滴密度上差距有限，但盘旋飞行模式在冠层不同部位均保持了相对较高的沉积分布，因此总体喷雾效果仍优于行内飞行模式。

2.2.3　山地果园飞行模式对地面沉积的影响

山地果园试验结果表明，2 种飞行模式对地面沉积的总体影响接近，但在具体指标上仍存在一定差异。结合图 7 和图 8 可知，行内飞行模式下地面雾滴覆盖度为 8.58%，盘旋飞行模式为 9.30%，说明不同飞行轨迹对地面覆盖水平的影响相对有限。

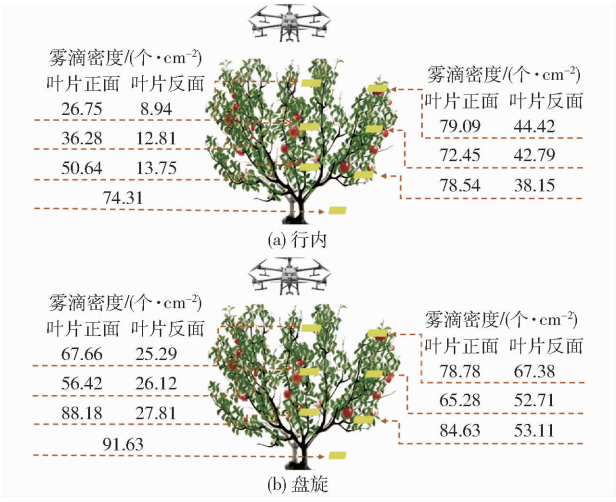

图 8　山地果园不同飞行模式下采样点雾滴密度

Fig. 8　Distribution of number of droplets by sampling location at different flight modes in mountainous orchard

相比之下，地面雾滴密度差异更为明显。行内飞行模式下地面雾滴密度为 74.31 个/cm^2，而盘旋飞行模式达到 91.63 个/cm^2，高 17.32 个/cm^2。表明虽然 2 种模式在地面覆盖度上差别不大，但盘旋飞行模式能够在单位面积内形成更多雾滴沉积。

总体来看，盘旋飞行模式在地面层雾滴覆盖度和雾滴密度均略高于或明显高于行内飞行模式，变化趋势与冠层内部沉积结果基本一致，即盘旋飞行模式地面沉积水平也相应提高，提示在增强冠层沉积的同时需关注地面流失风险。

2.2.4　山地果园飞行模式对喷雾均匀性的影响

图 9 为 2 种飞行模式下冠层不同层位雾滴密度变异系数，用以表征喷雾沉积离散程度和空间均匀性。由图 9 可知，行内飞行模式下变异系数为 54.94% ~ 87.16%，盘旋飞行模式下为 88.13% ~ 122.40%。分层比较可见，行内飞行模式下中层变异系数最高，下层相对较低。盘旋飞行模式同样在中层达到最大值，且各层变异系数整体高于行内飞行模式。表明在复杂冠层结构和山地环境共同作用下，雾滴在不同空间位置的分布易产生较大差异，喷雾稳定性受到一定限制。

总体而言，盘旋模式沉积量较高、覆盖能力较强，但 2 种模式的喷雾均匀性均有提升空间。后续仍需结合山地地形特征、冠层结构差异及气流扰动规律，对飞行参数和作业路径进行针对性优化，以改善雾滴沉积分布一致性和冠层有效覆盖水平。

2.3　地形-树冠多源信息融合的喷施模式决策

基于平原高纺锤形果园和山地开心形果园雾滴沉积试验结果，进一步从病虫害精准防治角度对不同喷施模式进行综合评价。果园病虫害防治的关键不仅在于提高总体喷雾量，更在于保证药液能够有

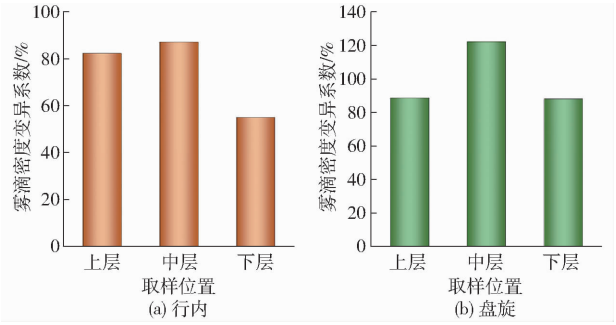

图 9 山地果园不同飞行模式下雾滴密度变异系数

Fig. 9 Coefficient of variation of number of droplets under different flight modes in mountainous orchard

效到达叶片正反面、冠层内部等病虫害易发生区域。因此,喷施模式决策应综合考虑冠层沉积能力、内部穿透效果、沉积均匀性和地面流失风险。

从冠层沉积能力、沉积均匀性和地面流失风险等指标,对不同喷施模式进行综合评价,以形成作业模式推荐。平原高纺锤形果园中,行间飞行模式表现最佳,平均雾滴密度 32.52 个/cm^2,变异系数 14.64%,兼顾穿透性和均匀性,可作为优先推荐模式。行内模式内部沉积不足,盘旋模式局部有效,可作为补充。山地开心形果园中,盘旋飞行模式更适合,多方向作业改善冠层内外及叶片正反面沉积,叶片正面雾滴密度 56.42 ~ 88.18 个/cm^2,反面 25.29 ~ 67.38 个/cm^2,满足立体覆盖需求。行内模式沉积较低,适合作为条件推荐模式。

需要注意的是,冠层沉积水平提高往往伴随一定的地面沉积增加。平原果园中,行间飞行模式地面覆盖度和雾滴密度均高于其他模式;山地果园中,盘旋模式地面雾滴密度也高于行内模式。说明推荐模式不应直接等同于固定作业参数,而应根据防治对象位置、病虫害发生程度和冠层靶标特征进行调控。当防治对象主要分布于冠层内部或叶片背面时,可优先提高穿透性和立体覆盖效果;当靶标主要位于外层叶片或病虫害发生程度较轻时,应适当降低喷液量或提高飞行速度,以减少地面流失和农药浪费。综合来看,平原高纺锤形果园宜采用“行间飞行为主、喷液量适度调控”作业策略;山地开心形果园宜采用“盘旋飞行为主、多方位覆盖优先”作业策略。

3 讨论

本研究以平原高纺锤形果园和山地开心形果园为对象,比较了不同飞行模式下植保无人机雾滴沉积、沉积均匀性和地面流失特征,并进一步从病虫害精准防治需求出发,构建了基于地形、树冠结构和沉积质量指标的喷施模式决策逻辑。结果表明,地形条件和树冠结构对植保无人机喷施效果具有明显影响,不同果园类型下优选作业模式存在明显差异。说明果园病虫害防治中的无人机喷施作业不能简单采用统一参数,而应根据果园空间结构和靶标分布特征进行场景化决策。

3.1 差异化场景下喷施模式沉积特征与适配机理

在平原果园中,高纺锤形果树树冠形态是决定喷施效果的重要因素。高纺锤形果树冠层顶部较窄、底部较宽,且树冠密度较高,传统行内飞行模式和盘旋飞行模式难以有效将雾滴沉积到中下层内侧叶片上。而行间飞行模式在树行间作业,可能通过多旋翼下洗气流及其向两侧扩散作用,增强雾滴向冠层内部的穿透能力,从而提高中上层及冠层内部雾滴的沉积效果与分布一致性[30]。在试验中,行间飞行模式下雾滴沉积效果最好,表现出优异的喷雾均匀性。因此,行间飞行模式更适合用于平原密植果园中提高冠层内部药液到达能力。

在山地果园中,开心形果树树冠较为开放,内部枝叶稀疏,高度较低。由于开心形果树树冠阻挡较少,雾滴较易沉积于冠层内部,因此行内飞行模式与盘旋飞行模式在冠层外侧的雾滴密度差异不大。然而,在盘旋飞行模式下,由于无人机围绕树冠多方向作业,产生了多向气流与涡流效应,进一步促进了雾滴的横向穿透能力,从而使雾滴在冠层内侧的沉积效果优于行内飞行模式[31]。此外,植保无人机在悬停作业过程产生的下洗气流有助于增加液滴对果树冠层的渗透,增强喷雾效果。这种下洗气流模式与多旋翼无人机的喷洒特性密切相关,在提升喷雾效果方面成为当前研究的热点[32]。本研究中,盘旋飞行模式在山地开心形果园中整体沉积水平较高,尤其有利于改善冠层内外及叶片正反面的药液覆盖。但需注意的是,山地果园中雾滴密度变异系数整体较高,说明复杂地形和气流扰动仍会造成沉积分布波动,后续仍需进一步优化飞行路径和作业参数,以提高喷雾稳定性。

3.2 适用性与局限性

本研究结果可为果园病虫害精准防治中的施药执行环节提供参考。当防治对象主要分布于密植果园冠层内部或中下层叶片时,可优先考虑行间飞行模式,以增强药液穿透和内部沉积;当防治对象分布于山地开心形果园不同方位或开放式冠层内部时,可优先考虑盘旋飞行模式,以提高多角度覆盖能力。但在实际作业中,喷施模式选择还应结合行距、株距、冠幅、树高、冠层通透性和无人机有效喷幅等因素综合确定[33-34]。例如,行距较宽且树行通道明确的果园更适合行间飞行,而单株空间相对独立、树冠较开放的果园更适合盘旋作业。同时,喷施模式适

用性不仅与地形条件和树冠结构有关，也与植保无人机机型密切相关。对于单旋翼无人机、不同载荷等级无人机或喷嘴布置差异较大的机型，仍需进一步验证。

值得注意的是，本研究主要针对 2 种典型地形与树冠结构果园进行试验，虽然已初步验证了不同飞行模式效果，但在更复杂地形与多种果树类型条件下，喷施效果可能存在其他不确定性。此外，由于山地果园风速变化频繁、地形复杂，喷施过程可能产生局部区域喷雾不足或药液流失问题[35-36]。未来将会结合无人机实时环境感知与动态调控技术进一步提升作业效果。其次，本文主要基于雾滴沉积效果评价喷施模式，并未同步开展具体病虫害发生程度和防治效果调查。因此，喷施决策与实际病虫害防效间的关系仍需进一步验证。

综上，本研究从果园病虫害精准防治施药执行需求出发，验证了地形和树冠结构对植保无人机喷施模式选择的影响，并提出了基于地形类型、树冠结构、作业模式和沉积响应指标等多源作业信息的综合评价思路。研究结果可为复杂果园场景下植保无人机精准施药提供参数依据，也可为果园病虫害智能管控技术体系中喷施执行模块构建提供参考。

4　结论

（1）平原高纺锤形果园中，行间飞行模式对冠层雾滴沉积的提升效果最为明显。该模式下冠层各位置平均雾滴密度达到 32.52 个/cm^2，雾滴密度变异系数为 14.64%，表现出较好的冠层穿透能力和沉积均匀性。与行内和盘旋模式相比，行间飞行模式更有利于改善密植树冠中上层和内部区域的药液到达能力，适合作为平原高纺锤形果园病虫害防治的优先作业模式。

（2）山地开心形果园中，盘旋飞行模式更有利于提升开放式树冠的立体覆盖效果。该模式下叶片正面雾滴密度为 56.42～88.18 个/cm^2，叶片反面为 25.29～67.38 个/cm^2，能够在冠层内外和叶片正反面形成较高沉积水平。与行内飞行模式相比，盘旋模式通过多方向作业改善了冠层内部和不同方位的雾滴分布，更适合用于山地开心形果园病虫害精准防治。

（3）提高冠层沉积能力的同时可能伴随地面药液沉积增加。平原果园中的行间模式和山地果园中的盘旋模式均表现出较高冠层沉积水平，但也存在一定地面流失风险。因此，在实际病虫害防治作业中，应根据防治对象位置、病虫害发生程度和冠层靶标特征，对喷液量、飞行速度和作业路径进行协同优化，以兼顾防治效果和农药利用率。

（4）综合地形-树冠结构-沉积响应的多源信息分析表明，植保无人机喷施模式应根据果园地形、树冠通透性、冠层沉积能力及地面流失风险进行适配选择。平原高纺锤形果园宜优先采用行间飞行模式，以增强冠层穿透和内部沉积；山地开心形果园宜优先采用盘旋飞行模式，以改善冠层多方位覆盖和叶片正反面沉积。该结果可将雾滴沉积试验结果转换为面向病虫害精准防治的喷施模式决策规则，为果园病虫害智能管控系统施药决策提供参数依据。

参　考　文　献

[1] Peter K J, Merete H O. Spray mass balance in pesticide application: a review[J]. Crop Protection, 2014, 61: 23-31.

[2] FAO. Minimum requirements for agricultural pesticide application equipment[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.

[3] 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.

[4] Berk P, Belšak A, Stajnko D, et al. Intelligent automated system based on a fuzzy logic system for plant protection product control in orchards[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3): 92-102.

[5] Yan Y, Lan Y, Wang G, et al. Evaluation of the deposition and distribution of spray droplets in citrus orchards by plant protection drones[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1303669.

[6] 赵德楠，兰玉彬. 植保无人机静电喷雾技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报，2025，41(12)：15-28.
Zhao Denan, Lan Yubin. Review and prospects of electrostatic spraying technology for plant protection UAVs[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(12): 15-28. (in Chinese)

[7] Xu X, Chen S, Li Z, et al. Distribution characteristics of rotor airflow and droplet deposition of plant protection UAVs under varying rotor-nozzle distances[J]. Agriculture, 2025, 15(19): 1995.

[8] 孔令标，兰玉彬，宋灿灿，等. 植保无人机喷施雾滴飘移预测模型构建及飘移预测分析[J]. 农业工程学报，2026，42(6)：24-34.
Kong Lingbiao, Lan Yubin, Song Cancan, et al. Predictive model for spray drift behavior from plant protection UAVs[J]. Transactions of the CSAE, 2026, 42(6): 24-34. (in Chinese)

[9] 岳婉婉. 枣园无人机与传统农机喷施模式效应比较评价研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2021.
Yue Wanwan. Comparative evaluation of the effect of UAV and traditional agricultural machinery spraying on jujube garden[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[10] Sánchez-Fernández L, Barrera M, Martínez-Guanter J, et al. Drift reduction in orchards through the use of an autonomous UAV system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107981.

[11] 王明,苏小记,周晓欣,等.不同栽培模式苹果园喷雾的农药利用率及对蚜虫的防治效果探究[C]//中国植物保护学会.绿色植保与乡村振兴——中国植物保护学会 2018 年学术年会论文集.北京:中国农业科学技术出版社,2018:302.
[12] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 109 – 119.
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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 109 – 119. (in Chinese)
[13] Yan Y, Wang G, Wang B, et al. Evaluation of droplet deposition distribution in apple orchards using a ground-air combined unmanned spraying model[J]. Smart Agricultural Technology, 2026, 14: 102057.
[14] Wen S, Han J, Ning Z, et al. Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad-rotor drone wake at different flight speeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105036.
[15] Li J, Shi Y, Lan Y, et al. Vertical distribution and vortex structure of rotor wind field under the influence of rice canopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 159: 140 – 146.
[16] Ahmad F, Qiu B, Dong X, et al. Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105350.
[17] Wang G, Lan Y, Qi H, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat[J]. Pest Management Science, 2019, 75(6): 1546 – 1555.
[18] 廖娟, 臧英, 周志艳, 等. 作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 38 – 46.
Liao Juan, Zang Ying, Zhou Zhiyan, et al. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(S2): 38 – 46. (in Chinese)
[19] He Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133 – 146.
[20] Li X, Giles D K, Niederholzer F J, et al. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection[J]. Pest Management Science, 2021, 77(1): 527 – 537.
[21] Meng Y, Su J, Song J, et al. Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: effects of operational parameters on droplet distribution[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105282.
[22] Shan C, Xue C, Zhang L, et al. Effects of different spray parameters of plant protection UAV on the deposition characteristics of droplets in apple trees[J]. Crop Protection, 2024, 184: 106835.
[23] 张盼, 吕强, 易时来, 等. 小型无人机对柑橘园的喷雾效果研究[J]. 果树学报, 2016, 33(1): 34 – 42.
Zhang Pan, Lü Qiang, Yi Shilai, et al. Evaluation of spraying effect using small unmanned aerial vehicle(UAV) in citrus orchard[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(1): 34 – 42. (in Chinese)
[24] 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 and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 1 – 7.
[25] Wang C, Herbst A, Zeng A, et al. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard[J]. Science of the Total Environment, 2021, 777: 146181.
[26] Zhang X Q, Song X P, Liang Y J, et al. Effects of spray parameters of drone on the droplet deposition in sugarcane canopy [J]. Sugar Tech, 2020, 22: 583 – 588.
[27] 张豪,祁力钧,吴亚垒,等.无人机果树施药旋翼下洗气流场分布特征研究[J].农业工程学报,2019,35(18):44 – 54.
Zhang Hao, Qi Lijun, Wu Yalei, et al. Distribution characteristics of rotor downwash airflow field under spraying on orchard using unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 44 – 54. (in Chinese)
[28] 樊建斌, 范仁俊, 赵劲宇, 等. 不同飞行模式下无人机施药沉积分布及对苹果黄蚜的防效[J]. 中国植保导刊, 2020, 40(11): 77 – 79.
Fan Jianbin, Fan Renjun, Zhao Jinyu, et al. Study on deposition distribution and the control effects of plant protection UAV on *Aphis spiraecola* under different flight modes[J]. China Plant Protection, 2020, 40(11): 77 – 79. (in Chinese)
[29] Guo S, Yao W, Xu T, et al. Assessing the application of spot spray in Nanguo pear orchards: effect of nozzle type, spray volume rate and adjuvant[J]. Pest Management Science, 2022, 78(8): 3564 – 3575.
[30] Calderone G, Catania P, Comparetti A, et al. Spray deposition efficiency of unmanned aerial spraying systems in hillside vineyards with variable slope[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 172: 101386.
[31] Guo Q, Zhu Y, Tang Y, et al. CFD simulation and experimental verification of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow of a quad-rotor agricultural UAV in hover[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105343.
[32] Qing T, Ruirui Z, Liping C, et al. Droplets movement and deposition of an eight-rotor agricultural UAV in downwash flow field [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 47 – 56.
[33] 王娟,高振,王树昌,等.香蕉冠层结构特征下无人机施药雾滴沉积规律研究[J].农业机械学报,2026,57(3):153 – 163.
Wang Juan, Gao Zhen, Wang Shuchang, et al. Deposition law of UAV spraying droplets under canopy structural characteristics of banana[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3): 153 – 163. (in Chinese)
[34] 展义龙,张晚霞,张伊鹏,等.大载荷农用无人机关键技术与应用综述[J].农业机械学报,2026,57(3):1 – 15,37.
Zhan Yilong, Zhang Wanxia, Zhang Yipeng, et al. Review on key technologies and applications of heavy-load agricultural UAVs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3): 1 – 15, 37. (in Chinese)
[35] Hu N H, Zhou W X, Zhu L, et al. Most appropriate nozzle of six-rotor UAV for prescribed spraying liquid in tea plantation under effects of downwash flow structure in hover[J]. Crop Protection, 2024, 184: 106819.
[36] Wang J, Ma C, Chen P, et al. Evaluation of aerial spraying application of multi-rotor unmanned aerial vehicle for *Areca catechu* protection[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1093912.