



杨风波,李志薇,王子龙,等.多旋翼植保无人机施药研究进展及展望[J].江西农业大学学报,2024,46(5):1341-1355.
YANG F B,LI Z W,WANG Z L,et al.Research progress and prospects of spraying of multi-rotor plant protection UAV[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(5):1341-1355.

多旋翼植保无人机施药研究进展及展望

杨风波,李志薇,王子龙,柳紫晨,崔木凡,王林涛,曹艳菲,周宏平

(南京林业大学 机械电子工程学院,江苏 南京 210037)

摘要:多旋翼植保无人机有良好的地形适应性及超低空喷雾能力,是高效植保装备的重要发展方向之一,但飞行作业条件下风场、雾滴、作物耦合机理尚不明晰,成为制约沉积分布品质提高的瓶颈。为剖析植保无人机施药作业各要素关联研究不足、沉积机理不够清晰等问题。以雾滴的发生、沉降、沉积及飘移全过程为主线,基于学者们的研究论述了喷嘴雾化药液、风场-雾滴交互作用以及风场-雾滴-冠层耦合作用的研究现状,分别从喷嘴雾化对施药效果的影响、旋翼植保无人机悬停和飞行条件下的风场分布规律、飞行施药条件下雾滴在冠层内沉积飘移分布规律几个方面展开分析。基于以上论述,梳理了国内外航空施药技术的应用背景、研究进展、经验模型。指出了当前多旋翼植保无人机施药过程中一些亟需解决的问题,针对喷嘴选型(液力式喷嘴、离心式喷嘴等)及工作参数(压力、转速、角度、流量等)、无人机飞行参数(飞行速度、旋翼转速等)、农药特性(密度、黏度、表面张力等)及药液雾滴群的初始参数(粒径分布、初始速度)等各因素之间的匹配对应关系尚不明晰的问题,提出了重点建立多旋翼植保无人机施药作业喷嘴选型决策专家系统的建议;针对飞行组合风场(旋翼下洗气流、迎风气流、自然横风),农药药液雾滴(雾化后的物性参数),作物冠层(作物典型生长周期的茎、枝、叶)、田间环境(温、湿度),作业参数(飞行速度、高度)等因素的耦合作用,提出基于施药沉积效果进行科学假设,建立组合风场-药液雾滴-作物冠层的三相耦合模型的建议。最后,对未来多旋翼植保无人机施药技术的发展进行了展望。

关键词:多旋翼植保无人机;精准施药;飞行风场;药液雾滴;作物冠层

中图分类号:S252+.3;S49 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)05-1341-15



Research progress and prospects of spraying of multi-rotor plant protection UAV

YANG Fengbo, LI Zhiwei, WANG Zilong, LIU Zichen, CUI Mufan,
WANG Lintao, CAO Yanfei, ZHOU Hongping

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Multi-rotor plant protection Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has good terrain adapt ability and efficient ultra-low altitude spraying capacity, which is one of the important development directions of

收稿日期:2024-04-25 修回日期:2024-06-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52275257)

Project supported by General Program of National Natural Science Foundation of China(52275257)

作者简介:杨风波,副教授,博士,主要从事农林植保技术与装备研究,orcid.org/0000-0003-1193-9016,yfb@njfu.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

efficient plant protection equipment. However, the interaction mechanisms of wind field, droplet and crop under flight operation are unclear, which has become the bottleneck restricting the improvement of the deposition distribution quality. This study aims to analyze the problems such as insufficient correlation studies and unclear deposition mechanism of various elements in the spray application of plant protection UAV. This study focuses on the whole process of generation, settlement, deposition and drift of pesticide droplet. And based on the previous research, this paper discussed the research status of spray pesticide liquid with nozzle, the interaction between the wind field and the droplet, as well as the coupling of the wind field, the droplet and the canopy. The effect of nozzle atomization on spray effect, the distribution law of wind field under hover and flight conditions of plant protection UAV, the distribution law of droplets deposition and drift in canopy under flight spray conditions were analyzed separately. Based on the above discussion, the application background, research progress and empirical models of aviation application technology at home and abroad were reviewed. Some problems that need to be solved in the spray application process of multi-rotor plant protection UAV were identified. The matching and relationships between nozzle selection (hydraulic nozzle, centrifugal nozzle, etc.) and working parameters (pressure, speed, Angle, flow, etc.), UAV flight parameters (flight speed, rotor rotation speed, etc.), pesticide characteristics (density, viscosity, surface tension, etc.) and initial parameters of liquid droplets (particle size distribution, initial velocity) are not clear, a suggestion was proposed to establish a nozzle selection decision-making expert system for multi-rotor plant protection UAV spray scene. In terms of the coupling effect of flight combination wind field (rotor downwash flow, upwind flow, natural cross wind), pesticide liquid droplets (physical property parameters after atomization), crop canopy (Stems, branches, leaves of a typical growth cycle of a crop), field environment (temperature, humidity) and operation parameters (flight speed and altitude), a proposal was put forward to establish a three-phase coupling model of combined wind field-pesticide liquid droplet-crop canopy based on scientific assumptions of deposition effects. Finally, the future development of application technology of Multi-rotor plant protection UAV was prospected.

Keywords: multi-rotor plant protection UAV; precision spraying; flight wind field; pesticide droplet; crop canopy

农业是立国之本。我国耕地面积广阔,第3次国土调查资料显示,全国现有耕地面积约12 786.2万 hm^2 ,约占国土面积的13.32%^[1];我国农作物品种丰富,病虫草害防治任务艰巨,据全国农作物病虫草害测报系统数据、专家分析病虫草害基数、种植模式和气象条件,预计2024年全国粮食、油料和蔬菜等主要作物中22种重大病虫草害呈加重发生态势,预计发生面积15 541万公顷次,比2023年和2018—2022年均值分别增加26.2%和18.4%,病虫草害潜在粮食产量损失超过1.5亿 t ^[2]。化学农药的使用仍是防治病虫草害最有效的手段之一;相比于传统的背负式喷雾器和自走式喷杆喷雾机,航空植保施药装备显著提高了农药利用率,该型装备的普及与应用是保障农作物持续高产的关键。随着强制气流辅助喷雾技术的发展与推广,地面喷雾机、大型固定翼飞机、大型直升飞机、多旋翼植保无人飞机等新型实用化机具正逐渐成为实现超低量施药、提高农药有效利用率的重要装备。在施药过程中,强制气流裹挟着液滴群到达冠层,同时使枝叶弯曲变形,改变冠层的孔隙率,提高穿透能力。目前多种气流辅助措施下的喷雾施药方式见表1。

考虑到我国地域辽阔、地形复杂多变、地块小而密集、作物品种多样的实际情况,多旋翼植保无人飞机施药技术在我国迅猛发展。多旋翼植保无人飞机体积小、携带方便,便于地块之间的快速转场;该机具飞行作业克服了地形(山地、丘陵、滩涂)和作物(高、低秸秆)的限制;当合理匹配飞行作业参数后,该机具的施药效果和效率将显著提高。鉴于此,2020年我国植保无人机的保有量突破7万多架,2021年全国植保无人机保有量超12万架、年作业0.7亿公顷次^[7],多旋翼植保无人飞机已经成为我国施药领域的重要装备之一。

雾滴沉积效果是评价多旋翼植保无人机作业质量的重要指标。国内外学者针对不同作物,通过改变作业参数对雾滴沉降规律和沉积效果做了大量研究。为进一步剖析多旋翼植保无人机作业时喷嘴雾化、雾滴与组合风场耦合、雾液-组合风场-作物冠层互作的动态机理,进而厘清飞行作业参数对施药效果的影响规律,笔者对前人学者的研究成果进行梳理,并进一步探讨多旋翼植保无人机作业参数与施药效果的关联性、分析多旋翼植保无人机施药技术的发展趋势。

表1 气流辅助施药装备对比

Tab.1 Comparison of airflow-assisted application appliances

施药用具 Application equipment	适用范围 Scope of application	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
自走式喷杆喷雾机 ^[3] Self-propelled rod sprayer	果树、马铃薯、甘蓝、大豆等	喷杆较长、作业幅宽大、施药量大且质量较好;作业效率高,适应性强	机身较大,受植株长势与地势的影响,严重时可能会造成喷杆损坏、陷车或压苗等现象
大型固定翼飞机 ^[4] Large fixed-wing aircraft	小麦、棉花等经济作物以及森林病虫害防治	拥有优异的高空巡航速度和动力,喷头数量多,药液装载量大,单位面积药液喷幅较广,呈现条状药带	机体体积大,需要预备足够的起飞和降落场地,依靠固定机翼提供升力,飞行机翼上表面要保证足够的空气流速才能稳定飞行
大型直升飞机 ^[5] Large helicopter	多用于林业植保方面	载药量大、施药面积广、响应速度快,不需要专用跑道,依靠自身旋翼产生升力,可以垂直起降,作业效率高、续航时间长	对驾驶员的主观依赖较大,航线精准性要求高,药液晃动影响机身稳定性,并可能存在燃油和农药的浪费现象,作业成本高等
多旋翼植保无人机 ^[6] Multi-rotor plant protection UAV	小麦、水稻、棉花、大豆、玉米等	作业效率较高、操作便捷、安全系数高,不受作物的生长高度和密度的限制,可适应丘陵、山区等地形复杂的施药作业区域	续航时间较短、载药量有限,受气象条件、风场环境等影响较大

1 多旋翼植保无人机喷嘴雾化对施药效果的影响

农药雾化是多旋翼植保无人机施药作业的前提,主要分为3个过程:一、具有一定压力的液体注入喷嘴内;二、药液从喷嘴孔处以一定的初速度被喷射出,形成细小的雾滴;三、雾滴与空气发生相对剧烈的运动,气动力增大,发生二次雾化,破裂成更加细小的雾滴^[8]。喷嘴作为多旋翼植保无人机的雾化关键部件,很大程度上影响着药液的粒径分布等初始参数、雾滴飘移和附着效果。多旋翼植保无人机施药过程中雾滴最终对病虫草害的防治效果是多因素综合影响的结果,包括雾滴粒径、喷施密度以及药液性质等。其中,雾滴粒径是衡量药液雾化程度和喷头雾化质量的重要指标^[9]。

1.1 最佳防治粒径理论

20世纪70年代,Uk^[10]提出了生物最佳粒径理论,喷施雾滴最佳直径和尺度必须根据病虫草害的化学特性、生活习性、物性特征来确定,因此,靶标不同,最佳防治粒径范围也有所差距。对于飞行状态的昆虫而言,生物最佳粒径为10~50 μm,对于栖息状态的昆虫,生物最佳粒径为40~100 μm,对于植物叶片表面病害,施药量为超低容量和低容量时的最佳粒径分别为50~100 μm和150~250 μm^[11]。

体积中值粒径(volume median diameter, VMD),即在一次喷雾中,将全部雾滴的体积从小到大顺序累加,当累加值等于全部雾滴体积的50%时所对应的雾滴粒径为体积中值粒径,简称体积中径^[12]。喷雾中大多用雾滴体积中值粒径来表达雾滴群的大小,并作为选用喷头的依据,联合国粮农组织(FAO)根据雾滴粒径对雾滴细度进行了明确的划分,雾滴累计体积与雾滴体积中值直径的关系^[9]。

1.2 喷嘴对雾滴粒径的影响

喷嘴作为重要的雾化部件,主要作用是将药液雾化成雾滴并喷射至靶标作物表面。根据喷嘴的结

构特点进行分类,分为通用喷嘴和特殊喷嘴,其中将通用喷嘴分为液力式喷嘴和离心式喷嘴;特殊喷嘴分为静电雾化喷嘴和超声波雾化喷嘴。几种喷嘴的原理机构及特点对比,见表 2。

表 2 常见喷嘴类型对比

Tab.2 Comparison of common nozzle types

基本类型		结构特点分类	优/缺点
Basic type		Classification of structural features	Advantages/Disadvantages
通用喷嘴 Universal nozzle	液力式 Hydraulic type	扇形喷嘴 ^[13]	雾滴分布均匀性较好,穿透能力高,应用广泛; 但需要更大的气体压力
		空心锥形喷嘴 ^[14]	雾化锥角较大,能短时间内提供流量,射程距离短; 但雾滴极易发生飘移
	离心式 Centrifugal type	实心锥形喷嘴 ^[14]	雾滴细小,喷幅密度高;但覆盖面积较小
特殊喷嘴 Special nozzle	离心式 Centrifugal type	转盘式离心喷嘴 ^[15]	结构复杂,恶劣环境下易发生故障,农药施药领域应用较少
		转笼式离心喷嘴 ^[16]	离心雾化,粒径分布均匀,沉积效果好;但雾滴穿透力较差, 易飘移,对压力调控要求较高
		静电雾化式喷嘴 ^[17]	利用高压静电力雾化液滴,粒径细微,分布均匀, 易二次雾化;耗电能高,有漏电、触电危险
		超声波雾化式喷嘴 ^[18]	利用高频振动产生的超声波雾化,雾滴极细,覆盖度好; 但技术难度高,成本大

良好的喷嘴性能可有效提高雾化作用效果,为精准施药提供可靠保障。郭依剑等^[19]探究了离心喷头变量喷施系统的静态喷雾特性,相同流量下,当喷头的转速较低时,药液的黏度和表面张力是影响雾化效果的主要因素,此时雾滴数量较少、粒径较大;喷头的转速变高时,雾滴破裂发生二次雾化,喷施半径逐渐增大,同一喷施半径的沉积量也会减少。邹雄等^[20]对植保无人飞机喷嘴处液滴质点运动进行了运动学分析,得出雾滴在喷嘴周围分布较密,初始速度角越大,飘移距离越大,并且呈散射状分布。王潇楠等^[21]分别采用 8 个平面扇形雾喷头(SX11001VS、SX110015VS、XR11002VS)搭配 DJI AGRAS T20 型植保无人飞机,研究不同喷嘴对作业质量和草地贪夜蛾田间防治效果,结果表明:当植保无人飞机飞行速度为 4 m/s,飞行高度为 2.5m,喷头型号为 SX110015VS 时,雾滴沉积量最大且施药后 3 d 和 7 d 的校正防效均在 85% 以上。

1.3 粒径对沉积飘移的影响

雾滴粒径是影响药液飘移、沉积的关键,Fritz 等^[22]利用风洞试验方法模拟了航空施药不同飞行速度对喷雾雾滴体积粒径的影响,结果表明雾滴粒径均随着气流速度的增加而增大。Chen 等^[23]测试了雾滴中径分别为 95.21, 121.43, 147.28, 185.09 μm 的喷嘴在水稻冠层中的飘移沉积规律,液滴在靶标区域的沉积分布和穿透性随着液滴尺寸的增加而增加,其中雾滴中径为 185.09 μm 的液滴的渗透效果最好,达到 38.13%。姚伟祥等^[24]对 7 种不同型号的扇形喷嘴进行了喷雾羽流雾滴粒径空间分布特性测定实验,横向轴粒径大致关于两侧对称分布,且雾滴粒径越小,喷雾越均匀,雾化前后差别越小,而粒径的纵向分布和尺寸取决于喷嘴类型。刘立超等^[25]实测了玉米冠层内液滴粒径沉积情况,冠层、中层、底层的雾滴粒径和密度变化趋势总体上均是先增大后减小,喷口前方 1~2 m 位置雾滴分布较为集中,存在雾滴重叠、黏连等现象。周晴晴等^[26]分级并验证了 Teejet 和 Lurmark 扇形喷雾系列喷嘴,并基于风速为 6.7 m/s 条件下建立了国产喷嘴雾滴粒径分级的参考图,总结了雾滴谱的分级方法,把雾滴粒径分为很细、细、中等、粗、很粗、极粗 6 个等级,对喷嘴型号及确定工作压力具有指导意义。此外,雾滴粒径大小还与喷雾样本的原存在状态有关,液态与粉末状生物农药的喷雾液滴尺寸具有较大差异,液态比粉末状雾滴的尺寸大^[27]。

从以上研究可以看出,学者们基于生物最佳粒径理论对喷嘴雾化机理进行研究,建立了不同喷嘴的雾化参数模型;深入分析了雾滴粒径对沉积分布、防治效果的影响;这为探究多旋翼植保无人飞机飞行条件下的喷嘴雾化机理、捕捉雾化后初始药液雾滴群的分布、运动、变化规律提供了理论基础;也为基于

沉积效果评价的多旋翼植保无人机、喷嘴的最佳适配提供了应用条件。

2 雾滴-风场互作关系研究

2.1 多旋翼植保无人机作业风场的流动特性研究

多旋翼植保无人机旋翼翼面的流动分离、涡流的产生关系到下洗风场的发展过程^[28]。旋翼高速转动使气流从旋翼上表面流到下表面,并在压强差的作用下形成下洗气流^[29]。

多旋翼植保无人机风场漩涡状态影响液滴的沉降、沉积、飘移过程,学者基于一种可视化装备对一型直升机下洗风场进行研究,发现下洗风场的“陡壁区”现象^[30]。Guo等^[31]建立了四旋翼植保无人机悬停下洗气流的计算流体力学模型,验证了气流下洗时的“收缩膨胀”现象,并结合“地面效应”对雾液沉积规律进行了分析。Wang等^[32]证实了随着无人机飞行速度和侧风的提高,相对气流在无人机下方的下洗风场中产生了涡旋,从而降低了下洗风场的稳定性。

另外,多旋翼植保无人机作业时在大气中飞行,而自然风并不是理想的形式出现,实际大气状态是随时间和地点变化而变化的,平均风、大气紊流和离散突风等大气现象形成的横风气流都会直接影响飞行器的风场分布规律^[33-34]。在工作中,为提高作业效率,使液滴有效且均匀沉积,多旋翼植保无人机一般飞行高度较低,比较容易受到横风气流的作用^[35];随机变化的横向风场使多旋翼植保无人机飞行风场处于振荡状态^[36]。

从以上研究来看,飞行施药作业过程中,多旋翼植保无人机的下洗气流与飞行迎风气流、自然横风等构成组合风场。

2.2 风场与雾滴互作过程研究进展

为精准捕捉多旋翼植保无人机风场的发展规律,国内外学者针对机体下方的下洗气流产生的“风送”喷雾效果进行了大量的理论研究、风洞实验及田间试验。

2.2.1 理论建模与分析

植保无人机结构比较复杂,通过参数实验无法详细获得旋翼气流的流动特性,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真技术在多数工程领域的广泛应用,不受环境条件、结构等的影响,有效节约时间和试验成本^[37]。因此,国内外学者多采用CFD的方法,研究风场流动的内部规律。CFD数值模拟主要包含了主控方程与湍流模型的选择、计算区域与边界条件的设定、初始条件的设置等过程^[38]。

(1)静态悬停下的雾流耦合机理研究进展。雾液运动初期,主要依靠旋翼转动产生的高速下洗气流迫使雾滴沉降到靶标区域,其旋翼风场极大地提高了雾滴沉降速度^[39]。为了明确下洗气流时空分布规律,学者从静态悬停下的雾液耦合效应为出发点,对旋翼风场作用下气流流场进行了一系列探究。为了能够准确地获取植保无人机旋翼下洗气流的空间分布,Tang等^[40]建立了下洗气流流场模型和气流-雾滴两相流模型,分析研究了下洗气流的时空分布和液滴运动规律。Chang等^[41]基于格子玻尔兹曼法(LBM)的自适应细化物理模型,研究了不同转速下四旋翼无人机下洗流场分布,随着旋翼转速增加,下洗风场逐渐增强,旋翼下方的液滴高速区明显收缩,气流速度和涡旋沿机身中心线对称分布。杨风波等^[42]利用CFD方法,研究了六旋翼植保无人机悬停下洗气流对雾滴运动及飘移规律,得出旋翼间的干扰对下洗风场湍流效应影响显著,横截面的旋翼间区域出现了气流“引入”及“导出”区。李雪等^[43]验证了八旋翼植保无人机旋翼下洗气流的强度伴随高度的下降而降低,且机体正下方的气流速度方向近似于竖直向下分布,并且呈现先增加后减小的趋势,无人机悬停时,竖直向下的旋翼气流对雾滴的沉降具有直接促进作用。植保无人机的机体布局也会对流场分布产生影响,有学者对旋翼与机体布局之间的气动干扰特性进行了探究。Wang等^[44]研究了机臂内倾角对多旋翼植保无人机下洗气流的影响。樊佳荣等^[45]通过改变四旋翼的轴距并引入离散相喷雾模型,研究了不同旋翼距径比下旋翼气流的聚合流动程度和雾滴沉积分布特性。

(2)飞行状态下的风场-雾滴耦合机理研究进展。Zhang等^[46]基于CFD建立了六旋翼植保无人机气-液两相流模型,对气流分离、气流覆盖等效面积和“陡峭”效应进行了研究,并预测了不同速度下湍流

尾流的液滴轨迹的影响。Zhu 等^[47]模拟了不同飞行速度(1~5 m/s)下下洗气流的流动特性和渗透性,飞机前飞时,旋翼下方的螺旋涡流逐渐演变为倾斜的马蹄形涡旋,飞行速度越快,涡旋倾角越大。张健等^[48]探析了环境风速对流场的分布,揭示了来流造成雾滴卷积,导致雾滴飘移严重,对预留喷施缓冲区以避免药液飘移所造成的危害提供指导。文晟等^[49]通过三维立体扫描仪建立无人机主旋翼和尾桨的物理模型,并基于格子玻尔兹曼方法研究了不同飞行速度下,无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响规律。

研究者对植保无人飞机在悬停和飞行作业状态下的旋翼风场结构进行分析,建立多旋翼植保无人飞机喷雾环境下耦合风场的数学模型、雾滴群的运动学及沉积分布模型,较为充分剖析了迎风气流及横风气流扰动下多旋翼下洗风场的发展演化规律,深入探讨了耦合风场与沉积分布的内在关联。

2.2.2 田间试验研究进展

为探究无人机旋翼风场对雾滴沉积分布的实际影响状况,研究人员开展了大量的田间试验。汪沛等^[50]采用风场无线传感器网络测量系统,对无人驾驶油动单旋翼直升机辅助授粉作业时的风场分布情况进行了模拟测量试验,探明了不同方向(平行于飞行方向、垂直于飞行方向、垂直于地面方向)的风速和风场宽度等参数对无人机受粉作业的影响。陈盛德等^[51]使用风速传感器无线测量节点的田间布置,参照汪沛等^[50]提出的3向线阵风场测量方法,分析了旋翼下方X、Y、Z等3个方向的风场对雾滴沉积分布的影响,揭示了多旋翼农用无人飞机航空喷施雾滴沉积机理。王昌陵等^[52]借助田间无线微气象传感器和智能控制系统,选用喷雾示踪剂方法,实测了不同参数下八旋翼植保无人飞机下洗气流流场的分布,并对结果进行可视化分析,揭示了不同方向下下洗卷扬气流与外界空气、地面效应和雾滴下降沉积结果的影响。

在施药作业过程中,应当结合不同的作物和施药机具的风场流动特点,科学制定工作参数。此外,通过大量的田间试验研究风场对雾滴运动和沉积分布特性,对提高农药雾滴对靶的附着量、改善雾滴分布均匀性和降低“农药暴露”风险具有重要的实际意义。

2.2.3 风洞试验研究进展

田间试验定位于真实的作业环境,数据结果最接近实际作业下组合风场流动对雾滴沉积规律的影响,但田间气象条件不稳定且不可控,喷雾试验结果有较强随机性^[53]。而风洞试验不仅能够模拟真实的飞行环境,准确控制风速、风向等参数^[54],还能测量液滴粒径及速度分布^[55],试验重复性较好,是研究喷雾系统飘移特性的重要补充手段。

美国农业部农业应用技术研究中心、德国联邦栽培作物研究中心采用的环形封闭式低速标准风洞在喷头的飘移沉积试验、产品的检测优化方面发挥着重要作用^[56]。由于多旋翼无人喷雾平台做直线运动时,封闭的风洞无法再现田间随机横向风场的效果。鉴于此,Zhang 等^[57]开发了支持多旋翼无人喷雾平台做横、纵向移动喷雾等功能的设备平台,运动喷雾试验验证了平台的实用性,为快速开展可控条件的飞行喷雾试验奠定硬件基础。Wang 等^[58]将多旋翼植保无人飞机固定在大型风洞内开展喷雾试验,研究了旋翼尺寸、升降高度、来流风速、喷嘴角度、雾滴大小等对沉积分布的影响,构建了旋翼风场风速的回归模型。

综上所述,学者们基于CFD理论模型与室内风洞实验、室外田间实验相结合的方法,构建了多旋翼植保无人飞机耦合风场与雾滴两相流交互模型,阐明了交互机理,以上成果为进一步探究作物冠层对雾滴穿透、沉积影响奠定了坚实的理论基础。

3 雾滴-风场-作物互作机理

3.1 基于固定翼飞机、大型直升机的施药沉积飘移模型

为研究风场作用下雾滴在作物冠层的沉积规律、进而指导固定翼飞机、大型直升机的作业效果、促进植保装备的优化升级,国际上陆续开发并发展了雾滴沉积、飘移模型^[59]。FSCBG模型(forest service cramer barry grim)是最早基于大型固定翼飞机施药过程而研发的雾滴沉积预测模型,主要研究了机身后方风场、冠层以及蒸发对雾滴沉积分布的影响,但该模型无法准确地表达复杂的近机身气流的分布情况^[60]。

1979年,美国宇航局使用拉格朗日方法对液滴轨迹模型进行初步开发,模拟了雾液在空中的飘移规律。此后,美国农业部林务局、美国宇航局和美国国防部等基于对飞机后方尾流涡旋物理原理开展研究,提出了农业分布AGDISP(agricultural dispersion)模型,以此来预测飞机旋翼流场和机身气流扰动影响下的雾滴沉积分布。然而,AGDISP模型仅适用于单旋翼飞机在一定高度和速度下流场分布情况,无法反映多旋翼无人机及近地面区域的下洗气流模型^[61]。为拓宽预测范围,更精准地反应在复杂气流裹挟下雾滴飘移、沉积效果,美国农业部林务局、宇航局及军方通过大量田间试验,结合拉格朗日方法开发了AgDRIFT(agricultural drift)模型。输入机型、喷嘴型号、气象条件和药液、助剂性质等因素,就可通过统计学的方法预测雾滴沉积、飘移规律^[62]。

以上所述模型的应用对象是欧美国家的有人驾驶大型固定翼飞机、大型直升机施药过程的分析预测,而多旋翼植保无人飞机的施药效果是耦合风场、雾滴和冠层相互作用的结果。国际上现有的沉积、飘移模型具有重要的借鉴意义,但不能直接、有效的适用于国内植保无人机施药技术,特别是超低空、低速飞行状态下的多旋翼植保无人机。因此构建适合我国的植保无人机施药技术的雾滴沉积、飘移模型,具有迫切的现实需求。

3.2 基于小型多旋翼植保无人飞机的施药沉积飘移研究现状

和固定翼飞机、大型直升机相比,小型多旋翼植保无人机下洗气流所引起的作物冠层扰动区域的沉积规律有显著差异^[63]。不同作物叶脉会提供足够不同的刚度使得叶片尽可能地铺展,为叶片生理功能的正常发挥提供足够力学性能^[64]。因此,充分认识靶标作物界面结构特性对农药对靶润湿沉积的影响规律^[65],厘清药液在叶片表面的留持量与叶片接触角、枝叶力学弹性之间的关系,是提高靶标表面药液有效持留,减少农药用量的关键。

目前,探测树形结构技术愈发成熟,国内外学者利用设备精准模拟树形,研究靶向施药。Zhan等^[66]建立了人工作物冠层,使用六旋翼植保无人机对含有荧光染料的除草剂进行喷雾实验,通过分析喷雾沉降、沉积、飘移和对作物损伤的影响,对雾滴飘移评估提供参考模型。Yu等^[67]通过田间试验,对果树表面沉积液滴变异系数和喷雾覆盖率变异系数进行分析,发现增加喷洒量有助于提高液滴的渗透率和均匀性。Hong等^[68]采用固定等效多孔介质模型来替代高郁度果树冠层,进而预测树冠内的峰值风速和气流压力,研究结果表明:随着冠层深度、树高和冠层密度的增加,冠层内的空气射流速度大多呈现减小的趋势,但喷雾射流的累积效应可以在冠层中均匀地保持甚至增强。Li等^[69]基于风速传感器阵列,针对单旋翼植保无人机,建立了风场覆盖区域涡旋结构的等效锥体模型,揭示了水稻冠层与风场的相互作用规律及冠层内风速的垂直衰减机理。刘兴华等^[70]采用双向流固耦合方法,通过测定分析棉花叶片的尺寸、弹性模量和含水率等,以叶柄和叶面挠度值为评价指标,构建了辅助气流作用下棉花叶片变形模型,得出影响叶片变形因素顺序依次为气流速度、弹性模量、叶倾角。

飘移是农药在使用过程中通过空气向非预定目标运动的现象^[71]。气流在冠层中的穿越、渗透作用是一个复杂的过程,辅助喷雾在冠层内的沉积行为主要受冠层内气流雾滴胁迫与冠层孔隙变化的耦合影响^[72]。喷雾飘移包含许多复杂的因素,比如受环境风速与气象条件、喷雾技术和模式、药液物性和作物等的影响^[73]。

Hou等^[74]对不同树形下的液滴分布密度参数进行了实验分析,与三角形树形相比,倒三角形树形对液滴密度的分布影响更为明显。Vieira等^[75]测试了在风洞环境下助剂药液混合物和预混合溶液的液滴飘移规律,建立了飘移参数模型,研究表明:与传统混合药液相比,添加合适的助剂有助于降低喷雾飘移的可能性。张豪等^[76]在六旋翼植保无人机悬停下的下洗风场模型中嵌入等效Porous多孔介质模型,结合滑移网格技术,量化表征了冠层枝叶疏密程度对强制气流的阻挡和衰减作用,得出风速衰减、冠层压力损失与枝叶疏密程度呈正相关的结论。李建平等^[77]探究了防飘移喷雾装置调节机构对伞形风场的影响,同时围绕喷口直径、侧风风速、喷雾压力等进行分析,认为影响液滴飘移的因素由大到小依次为侧风风速、喷雾压力、出口直径。

学者们的研究表明:针对作物建立流场在冠层间的衰减变化分布模型,分析冠层枝叶与强制气流交互影响下的农药雾滴沉积、飘失规律,这对提升沉积效果、制定科学有效的作业缓冲区宽度,降低“农药暴露”问题具有重要意义。

3.3 助剂对航空施药沉积飘移

喷雾助剂是指通过影响喷洒液或喷洒混和物的性质,如物理形态、黏度、溶解度、挥发性等,消除或减少喷洒过程的不利因素,促进药剂穿透表皮向靶标部位的移动,从而增加植物对药剂的吸收的药液^[78]。研究助剂的理化性质对雾滴飘移和沉积利用率的影响,将在一定程度上降低药液流失。

喷雾助剂对药液的表面张力、黏度、接触角和铺展系数等具有较好的改善作用。Oliveira等^[79]研究了2,4-D配方除草剂在2种不同的杂草表面的蒸发时间和润湿面积,并对不同尺寸的粒径进行了比较,结果显示:800 μm 和950 μm 的液滴能够显著提高农药在叶片表面的滞留量,此外,研究者还发现,针对不同性质的靶标作物,可以通过减小农药接触角来增加润湿叶片的面积。Sobiech等^[80]验证了植物油类助剂甲基化菜籽油可以改变喷雾液体pH值并降低水硬度,证明了通过降低液体喷雾液滴的接触角和表面张力来提高除草剂作用面积的有效性。Teng等^[81]通过研究不同助剂对丙环唑悬液表面张力和助药性的影响,证明了不同的助剂会不同程度上增加或降低农药对作物的潜在的毒性。何玲等^[82]研究了不同喷雾助剂及其添加量对蒸馏水溶液性质的影响,通过测定在水稻冠层各层沉积密度的分布情况,添加喷雾助剂可以显著地降低溶液的表面张力、增加溶液的黏度、提高雾滴的铺展系数。高荣等^[83]测定了不同浓度的非离子表面活性剂OP-10溶液在玉米叶面上的润湿性能,研究了在不同倾角下雾滴在玉米叶片上的铺展行为,且铺展面积随叶面倾角变化呈现出先上升后下降的趋势。

在旋翼植保无人飞机施药过程中,添加喷雾助剂还可以减少雾滴的蒸发与飘移,显著提高农药有效利用率及施药效果^[84]。冯超等^[85]分析了3种植物油类助剂(倍达通、迈飞和迈道)对烟田施药药液理化性质、雾滴沉积密度和覆盖率的影响,并使用不同型号的喷嘴,测定了助剂对雾滴粒径及其沉积性能的影响,为喷嘴选择及航空植保施药作业提供建议。陈晓等^[86]选用不同的喷雾参数及飞防助剂,对棉花生长中期进行了喷雾处理,得出助剂可以显著提高氟啶虫胺胍悬浮剂在棉花叶片的附着密度。胡红岩等^[87]基于MG-1P型电动多旋翼植保无人飞机研究了助剂对棉花上雾滴沉积分布、药液利用率及棉蚜防治效果的影响,使用助剂可有效提高雾滴密度、穿透力和沉积量。

靶标作物是雾滴最终作用对象。现有研究多集中于对雾滴飘移、沉积等空间模型的建立,并针对添加了助剂的农药药液进行喷施沉积效果评价,这对明晰助剂影响雾滴在冠层内的穿透能力与在植株表面的吸附效果具有指导性价值。

3.4 基于气-固-液三相互作模型的理论研究现状

在多旋翼下洗气流、迎风气流、自然横风所构成的组合风场胁迫下,药液雾滴被定向输运到作物区,作物发生横向大位移,冠层横向孔隙率明显增加,叶片背面的沉积量显著增加、作物纵向沉积均匀性得到改善(三相互作关系如图1所示);组合风场、药液雾滴、作物冠层相互耦合,对冠层沉积的交互影响复杂,各要素均不能忽略,应作为一个整体来进行理论研究。

在理论研究方面,地面植保机械施药领域已有较多成果。Holterman等^[88]在建立地面喷杆喷雾机喷雾的飘移沉积模型时,考虑了作业速度、喷雾参数和气象因素,单喷头田间喷雾试验结果显示,在离作物冠层小于0.7 m高时,理论模型与试验的相对误差在10%以内。Endalew等^[89]基于多孔介质模型,在动量方程中添加曳力、能量方程中添加能量耗散源项,建立了考虑果树冠层的果园风送喷雾机气流场CFD模型;Endalew等^[90]在此研究基础上,采用拉格朗日方法追踪雾滴离散项,雾滴沉积率的CFD预测、试验值分别为57.2%、69.6%。王景旭等^[91]采用拉格朗日离散相捕捉雾滴沉降轨迹,计算了不同喷雾角、喷雾速度下的叶面沉积率,模型预测值、试验结果的相对误差在15%以下。

从以上文献来看,果树茎、枝强度高,冠层姿态对沉积效果的影响可忽略;风场-雾滴-作物的互作模型在果园喷雾机施药领域有了初步研究成果,虽忽略了作物的变形,但为多旋翼植保无人飞机在粮食及部分经济作物中的施药三相耦合互作理论研究提供了富有启发性和借鉴意义的思考。

4 结论与展望

综上所述,多旋翼植保无人机作为一种新型农机装备,施药作业较传统装备有明显优势,已经成为我国防治病虫害的有效手段之一。国内外学者聚焦旋翼植保无人机施药作业过程,在关系到施药效果的各环节做了大量研究。笔者以雾滴运动过程为主线,论述了喷嘴的雾化、雾滴-组合风场互作、雾滴-风场-作物冠层互作等问题的研究现状,并进行了总结。

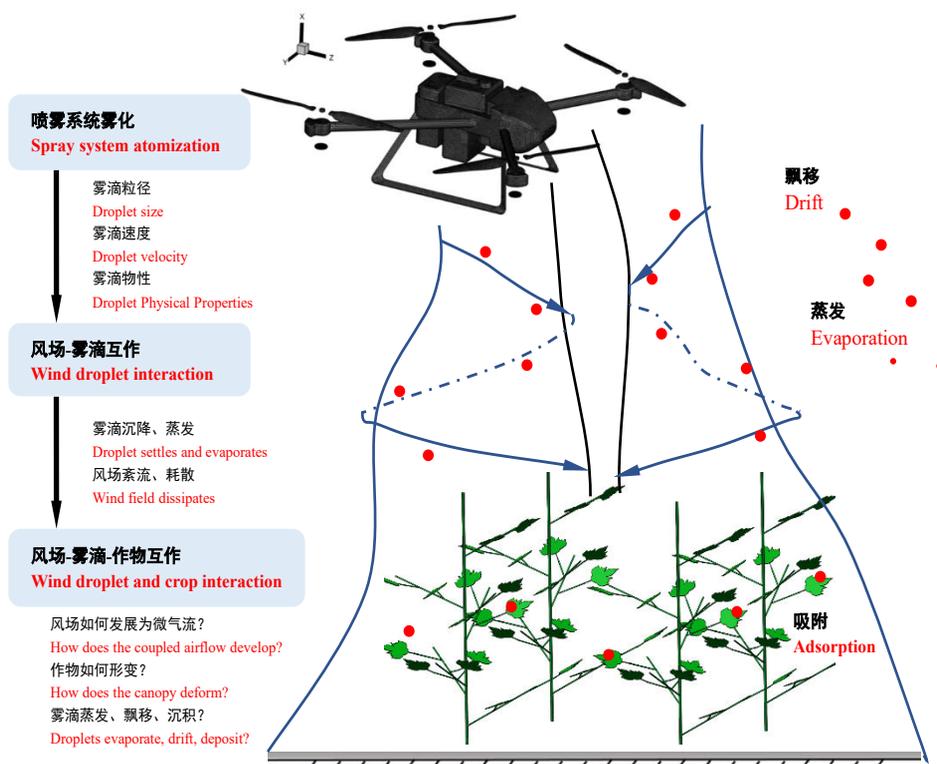


图1 多旋翼植保无人机飞行施药示意

Fig.1 Schematic diagram of multi rotor plant protection UAV flight pesticide application

然而,多旋翼植保无人机飞行喷雾作业涉及到药液雾滴、组合风场、作物冠层等要素,这使得施药效果的评价较复杂;田间环境瞬时多变,使得沉积试验不可重复,仅通过田间试验研究沉积效果存在明显不足;目前,施药各要素的决定参数与施药效果之间的关联性研究尚存不足,多旋翼植保无人机施药技术基础理论研究还存在以下亟待解决的问题:

1)越来越多的研究者对航空植保无人飞机的喷雾性能进行了深入研究,但喷嘴的选型(液力式喷嘴、离心式喷嘴等)、喷嘴工作参数(喷施压力、转速、角度、流量等)、飞行参数(飞行速度、旋翼转速等)、农药特性(密度、黏度、表面张力等)与药液雾滴群的初始参数(粒径分布规律、初始速度)的关系未完全建立,各因素之间的匹配对应关系需要进一步探索。

2)组合风场驱动药液雾滴运动、蒸发、沉降、飘移,同时风场气流发生紊乱、衰减;其次,组合风场迫使茎枝折弯、叶片翻转,冠层发生横向移动,同时风场气流受到冠层的涡耗散、进而发展为微气流。目前,将风场-雾滴-作物紧密关联,并考虑作业参数、田间气象条件的相关理论研究并不充分,飞行组合风场-农药药液雾滴-作物茎枝叶片的互作模型仍未完全建立。

针对现有问题,建议未来的研究可以从以下方面展开:

1)紧跟多旋翼植保无人机防治领域的相关进展,结合我国目前的飞行作业模式,全面分析多旋翼植保无人飞机的飞行参数、喷雾设备工作参数、种植地区的气象环境、农药和助剂物性特征以及各作物品种的物性参数;针对具体作物,厘清药液雾化效果(粒径分布规律、初始速度等)与沉积、飘移、运动的关系,建立完善的多旋翼植保无人机施药作业喷嘴选型决策专家系统,进一步提升沉积效果、降低飘移量。

2)充分考虑飞行组合风场(旋翼下洗气流、迎风气流、自然横风),农药药液雾滴(雾化、物性参数),作物茎枝叶片(作物典型生长周期)、田间环境(温、湿度),作业参数(飞行速度、高度)等因素,提出符合田间施药作业环境的科学假设,结合可控条件的室内风场、喷雾试验平台及部分田间喷雾试验验证,基于施药沉积效果,重点建立飞行组合风场-农药药液雾滴-作物茎枝叶片的三相耦合模型,该模型可为多旋翼植保无人飞机施药作业策略的形成提供有效技术途径,为相关施药标准制定、施药机构优化提供理论支撑。

致谢:高等学校大学生实践创新训练计划项目(江苏省重点项目:202410298024Z)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 三次全国国土调查主要数据成果发布[N].人民日报,2021-08-27(017).
Major data results of the three national land surveys released[N].People's Daily,2021-08-27(017).
- [2] 刘杰,曾娟,黄冲,等.2024年全国农作物重大病虫害发生趋势预报[J].中国植保导刊,2024,44(1):37-40.
LIU J,ZENG J,HUANG C,et al.Forecast of the occurrence trend of major crop pests and diseases in 2024[J].China plant protection,2024,44(1):37-40.
- [3] 李社潮.虫口夺粮,推荐10款自走式喷杆喷雾机[J].农业机械,2020(7):25-27.
LI S C.Ensure food harvest and recommend 10 Self-propelled boom sprayers[J].Farm machinery,2020(7):25-27.
- [4] 李宗飞.固定翼飞机喷雾流场模拟及雾滴分布规律研究[D].南京:南京林业大学,2019.
LI Z F.Simulation of spray flow field simulation and distribution of droplets in fixed-wing aircraft[D].Nanjing:Nanjing Forestry University,2019.
- [5] FANG S P,RU Y,LIU Y Y,et al.Route planning of helicopters spraying operations in multiple forest areas[J].Forests,2021,12(12):1658.
- [6] 薛新宇,孔伟.农用无人机为农业插上科技的翅膀[J].中国农村科技,2020(9):16-19.
XUE X Y,KONG W.Agricultural drones add technological wings to agriculture[J].China rural science & technology,2020(9):16-19.
- [7] 陈建光,桑茜,张元臣,等.豫北地区植保无人机防治玉米病虫害研究进展[J].智慧农业导刊,2023,3(19):1-5.
CHEN J G,SANG Q,ZHANG Y C,et al.Research progress of plant protection UAV in controlling corn diseases and pests in Northern Henan[J].Journal of smart agriculture,2023,3(19):1-5.
- [8] 张征,樊未军,杨茂林.双路离心式喷嘴雾化特性研究[J].工程热物理学报,2003,24(1):153-156.
ZHANG Z,FAN W J,YANG M L.Experimental study on spray characteristics of dual-orifice pressure-swirl atomizer[J].Journal of engineering thermophysics,2003,24(1):153-156.
- [9] 袁会珠,王国宾.雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J].植物保护,2015,41(6):9-16.
YUAN H Z,WANG G B.Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J].Plant protection,2015,41(6):9-16.
- [10] UK S.Tracing insecticide spray droplets by sizes on natural surfaces.The state of the art and its value[J].Pesticide science,1977,8(5):501-509.
- [11] 赵占周.农药喷雾技术[J].西北园艺(果树),2017(2):11-14.
ZHAO Z Z.Pesticide spraying technology[J].Northwest horticulture,2017(2):11-14.
- [12] 兰玉彬,彭瑾,金济.农药喷雾粒径的研究现状与发展[J].华南农业大学学报,2016,37(6):1-9.
LAN Y B,PENG J,JIN J.Research status and development of pesticide spraying droplet size[J].Journal of south China agricultural university,2016,37(6):1-9.
- [13] 董福龙,周宏平.国外植保喷头技术开发进展[J].江西农业大学学报,2018,40(4):866-874.
DONG F L,ZHOU H P.Development of foreign plant protection nozzles[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2018,40(4):866-874.
- [14] 杨晓凯.气液两相射流雾化特性试验研究[D].太原:中北大学,2023.
YANG X K.Experimental study on atomization and impact characteristics of gas-liquid two-phase jets[D].Taiyuan:North University of China,2023.
- [15] 周晴晴,薛新宇,钱生越,等.航空喷嘴的使用现状及研究方向[J].中国农机化学报,2016,37(10):234-237.

- ZHOU Q Q, XUE X Y, QIAN S Y, et al. Application status and research direction of nozzles in aviation spray [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(10): 234-237.
- [16] 曲荣佳. 航空转笼喷头喷施生物农药试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
- QU R J. Experimental research on aerial rotary nozzle spraying biological pesticide [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020.
- [17] 周艳, 代亚猛, 贾首星, 等. 不同材质的静电喷头雾滴荷电性能比较[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 361-363.
- ZHOU Y, DAI Y M, JIA S X, et al. Comparison of charging performance of droplet in different materials of electrostatic nozzle [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2013, 41(10): 361-363.
- [18] 张绍坤, 王景甫, 马重芳, 等. 流体动力式超声波喷嘴雾化特性的实验研究[J]. 石油机械, 2007, 35(6): 1-3.
- ZHANG S K, WANG J F, MA C F, et al. Experimental study of atomization characteristic of fluid dynamic ultrasonic nozzle [J]. China petroleum machinery, 2007, 35(6): 1-3.
- [19] 郭依剑, 朱兴业, 童林丹, 等. 离心喷头变量喷施系统静态喷雾特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 100-105.
- GUO Y J, ZHU X Y, TONG L D, et al. Analyzing static spray characteristics of variable spray system of centrifugal nozzle [J]. Journal of irrigation and drainage, 2023, 42(1): 100-105.
- [20] 邹雄, 徐让书, 李景春, 等. 植保无人机喷洒作业雾滴飘移的质点运动学分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(11): 1177-1181.
- ZOU X, XU R S, LI J C, et al. Particle kinematics analysis of droplet drift in plant protection UAV spraying operation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2021, 39(11): 1177-1181.
- [21] 王潇楠, 王思威, 雷春媚, 等. 植保无人机喷施氯虫苯甲酰胺在玉米冠层中沉积分布及对草地贪夜蛾的防治效果[J]. 应用昆虫学报, 2023, 60(4): 1244-1253.
- WANG X N, WANG S W, LEI C M, et al. The effect of flight parameters and nozzle type on the efficacy of spraying chlorantraniliprole from an unmanned aerial vehicle to control *Spodoptera frugiperda* [J]. Chinese journal of applied entomology, 2023, 60(4): 1244-1253.
- [22] FRITZ B K, HOFFMANN W C. Measuring spray droplet size from agricultural nozzles using laser diffraction [J]. Journal of visualized experiments, 2016(115): 54533.
- [23] CHEN S D, LAN Y B, ZHOU Z Y, et al. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV [J]. Agronomy, 2020, 10(2): 195.
- [24] 姚伟祥, 王明亮, 刘益含, 等. 基于激光测量的典型扇形航空喷头喷雾羽流雾滴粒径空间分布研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(3): 305-317.
- YAO W X, WANG M L, LIU Y H, et al. Study on spatial distribution of droplet size of a typical fan-shaped aerial nozzle spray plume based on laser measurements [J]. Journal of Shenyang agricultural university, 2023, 54(3): 305-317.
- [25] 刘立超, 孙可可, 张千伟, 等. 玉米植保无人机热雾喷施系统设计与雾滴分布特性试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 80-88.
- LIU L C, SUN K K, ZHANG Q W, et al. Thermal spray system design and droplet distribution characteristics test of maize plant protection UAV [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2022, 53(12): 80-88.
- [26] 周晴晴, 薛新宇, 周良富, 等. 施药喷嘴分级可行性及方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 66-72.
- ZHOU Q Q, XUE X Y, ZHOU L F, et al. Feasibility and method of classification of spraying nozzle [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(9): 66-72.
- [27] 肖丽萍, 刘木华, ZHU H P, 等. 喷嘴喷施不同生物农药雾滴特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 100-106.
- XIAO L P, LIU M H, ZHU H P, et al. Spray droplet size characteristics of different biological pesticides with different hydraulic nozzles [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2018, 49(2): 100-106.
- [28] WU J M, TAO W Q. Effect of longitudinal vortex generator on heat transfer in rectangular channels [J]. Applied thermal engineering, 2012, 37(1): 67-72.
- [29] 王涛, 文晟, 兰玉彬, 等. 基于PINNs的单旋翼植保无人机下洗流场预测模型[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 83-91.
- WANG T, WEN S, LAN Y B, et al. Prediction model for the downwash flow field of single-rotor plant protection UAV using PINNs [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2023, 39(6): 83-91.
- [30] FOUATIH O M, MEDALE M, IMINE O, et al. Design optimization of the aerodynamic passive flow control on NACA 4415 airfoil using vortex generators [J]. European journal of mechanics B/Fluids, 2016, 56: 82-96.

- [31] GUO Q W, ZHU Y Z, 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] WANG B, ZHANG Y, WANG C S, et al. Droplet deposition distribution prediction method for a six-rotor plant protection UAV based on inverse distance weighting[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7425.
- [33] 杨跃能, 郑伟, 吴杰. 变化风场中无人机的动力学建模及飞行特性分析[J]. *飞行力学*, 2011, 29(3): 8-11.
YANG Y N, ZHENG W, WU J. Dynamics modeling and analysis of an unmanned aerial vehicle with wind effects[J]. *Flight dynamics*, 2011, 29(3): 8-11.
- [34] 朱上翔. 大气扰动及其对飞行的影响[J]. *航空学报*, 1985, 6(2): 148-156.
ZHU S X. A review of progress in the study of atmospheric disturbance and its effect on flight[J]. *Acta aeronautica et astronautica Sinica*, 1985, 6(2): 148-156.
- [35] 何勇灵, 陈彦民, 周岷峰. 四旋翼飞行器在风场扰动下的建模与控制[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(5): 624-630.
HE Y L, CHEN Y M, ZHOU M F. Modeling and control of a quadrotor helicopter under impact of wind disturbance[J]. *Journal of Chinese inertial technology*, 2013, 21(5): 624-630.
- [36] 陈怿, 赵涛, 王建培. 无人机穿越变化风场起飞特性仿真研究[J]. *飞行力学*, 2002, 20(2): 22-26.
CHEN P, ZHAO T, WANG J P. Study of unmanned aircraft launch process simulation in the variable wind field[J]. *Flight dynamics*, 2002, 20(2): 22-26.
- [37] 马琛昭, 袁越锦, 徐英英, 等. 基于 CFD 的农业植保无人机场数值模拟与冷却特性分析[J]. *陕西科技大学学报*, 2021, 39(4): 136-141.
MA C Z, YUAN Y J, XU Y Y, et al. Numerical simulation on flow field and cooling characteristics of unmanned aerial vehicle (UAV) for agricultural plant protection based on CFD[J]. *Journal of Shaanxi university of science & technology*, 2021, 39(4): 136-141.
- [38] NI M, WANG H J, LIU X D, et al. Design of variable spray system for plant protection UAV based on CFD Simulation and regression analysis[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 638.
- [39] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 104-118.
LI J Y, LAN Y B, SHI Y Y. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2018, 34(12): 104-118.
- [40] TANG Y, FU Y Q, GUO Q W, et al. Numerical simulation of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow and spray field of a co-axial eight-rotor plant protection UAV in hover[J]. *Computers and electronics in agriculture*, 2023, 206: 107634.
- [41] CHANG K, CHEN S D, WANG M M, et al. Numerical simulation and verification of rotor downwash flow field of plant protection UAV at different rotor speeds[J]. *Frontiers in plant science*, 2023, 13: 1087636.
- [42] 杨风波, 薛新宇, 蔡晨, 等. 多旋翼植保无人机悬停下洗气流对雾滴运动规律的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 64-73.
YANG F B, XUE X Y, CAI C, et al. Effect of down wash airflow in hover on droplet motion law for multi-rotor unmanned plant protection machine[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2018, 34(2): 64-73.
- [43] 李雪, 徐陶, 王伟, 等. 八旋翼植保无人机下洗气流对雾滴运动与分布特性的影响[J]. *农药学学报*, 2023, 25(3): 689-699.
LI X, XU T, WANG W, et al. Effect of downwash airflow of 8-rotor unmanned aerial vehicle on droplet motion and spatial distribution[J]. *Chinese journal of pesticide science*, 2023, 25(3): 689-699.
- [44] WANG L, HOU Q H, WANG J P, et al. Influence of the inner tilt angle on downwash airflow field of multi-rotor UAV based on wireless wind speed acquisition system[J]. *International journal of agricultural and biological engineering*, 2021, 14(6): 19-26.
- [45] 樊佳荣, 冯亚楠, 李毅轩. 四旋翼轴距对喷雾雾滴沉积特性的影响[J]. *农机化研究*, 2020, 42(7): 30-37.
FAN J R, FENG Y N, LI Y X. The effect of Four-rotor wheelbase on spray droplet deposition characteristics[J]. *Journal of agricultural mechanization research*, 2020, 42(7): 30-37.
- [46] ZHANG H, QI L J, WU Y L, et al. Numerical simulation of airflow field from a six-rotor plant protection drone using lattice Boltzmann method[J]. *Biosystems engineering*, 2020, 197: 336-351.

- [47] ZHU Y Z, GUO Q W, YU T, 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.
- [48] 张健, 张超, 陈青, 等. 环境风速对六旋翼无人机下洗气流和雾滴沉积影响研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(8): 74-81.
- ZHANG J, ZHANG C, CHEN Q, et al. Effect of ambient wind speed on downwash airflow and droplet deposition for six-rotor UAV[J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2022, 53(8): 74-81.
- [49] 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]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 127-137.
- WEN S, HAN J, LAN Y B, et al. Influence of wing tip vortex on drift of single rotor plant protection unmanned aerial vehicle [J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2018, 49(8): 127-137.
- [50] 汪沛, 胡炼, 周志艳, 等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 54-61.
- WANG P, HU L, ZHOU Z Y, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2013, 29(3): 54-61.
- [51] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, 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]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 105-113.
- CHEN S D, LAN Y B, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2017, 48(8): 105-113.
- [52] 王昌陵, 何雄奎, BONDS J, 等. 不同飞行参数下八旋翼植保无人机下洗气流场对雾滴沉积分布特性的影响[J]. *智慧农业(中英文)*, 2020, 2(4): 124-136.
- WANG C L, HE X K, BONDS J, et al. Effect of downwash airflow field of 8-rotor unmanned aerial vehicle on spray deposition distribution characteristics under different flight parameters[J]. *Smart agriculture*, 2020, 2(4): 124-136.
- [53] WANG C L, ZENG A J, HE X K, et al. Spray drift characteristics test of unmanned aerial vehicle spray unit under wind tunnel conditions[J]. *International journal of agricultural and biological engineering*, 2020, 13(3): 13-21.
- [54] 孙毅刚, 刘永臻, 单泽众, 等. 风速对小型旋翼无人机螺旋桨的影响分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(29): 13096-13103.
- SUN Y G, LIU Y Z, SHAN Z Z, et al. Analysis on the influence of wind speed on propeller of small rotary-wing unmanned aerial vehicle[J]. *Science technology and engineering*, 2022, 22(29): 13096-13103.
- [55] 刘柏钦. LiDAR点云喷雾雾滴飘移测量技术与系统研发[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- LIU B Q. Spray drift measurement technology and system development based on LiDAR point cloud[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2023.
- [56] 刘洪山, 兰玉彬, 薛新宇, 等. 农业航空喷施风洞试验技术研究进展(英文)[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S2): 1-10.
- LIU H S, LAN Y B, XUE X Y, et al. Development of wind tunnel test technologies in agricultural aviation spraying[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2015, 31(S2): 1-10.
- [57] ZHANG Y C, LI Y J, HE Y, et al. Near ground platform development to simulate UAV aerial spraying and its spraying test under different conditions[J]. *Computers and electronics in agriculture*, 2018, 148: 8-18.
- [58] WANG L, CHEN D, YAO Z, et al. Research on the prediction model and its influencing factors of droplet deposition area in the wind tunnel environment based on UAV spraying[J]. *IFAC papers online*, 2018, 51(17): 274-279.
- [59] LAN Y B, CHEN S D, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. *International journal of agricultural and biological engineering*, 2017, 10(3): 1-17.
- [60] TESKE E M, THISTLE W H, SCHOU C W, et al. A review of computer models for pesticide deposition prediction[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(3): 789-801.
- [61] TESKE E M, WACHSPRESS A D, THISTLE W H. Prediction of aerial spray release from UAVs[J]. *Transactions of the ASABE*, 2018, 61(3): 909-918.
- [62] TESKE E M, BIRD L S, ESTERLY M D, et al. AgDRIFT: A model for estimating near-field spray drift from aerial applications[J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2002, 21(3): 659-671.
- [63] 田志伟, 薛新宇, 徐阳, 等. 植保无人机下洗气流对作物冠层作用规律研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(1): 40-48.
- TIAN Z W, XUE X Y, XU Y, et al. Effect of plant protection UAVs downwash on crop canopy[J]. *Transactions of the Chi-*

- nese society for agricultural machinery, 2021, 52(1):40-48.
- [64] 吴一苓,李芳兰,胡慧.叶脉结构与功能及其对叶片经济谱的影响[J].植物学报,2022,57(3):388-398.
WU Y L, LI F L, HU H. The structure and function of leaf veins and their influence on leaf economic spectrum [J]. Chinese bulletin of botany, 2022, 57(3):388-398.
- [65] HU X Z, GONG H N, LI Z Y, et al. What happens when pesticides are solubilized in nonionic surfactant micelles [J]. Journal of colloid and interface science, 2019, 541:175-182.
- [66] ZHAN H, WANG C L, LI Y F, et al. Field evaluation of spray drift and non-targeted soybean injury from unmanned aerial spraying system (UASS) herbicide application under acceptable operation conditions [J]. Pest management science, 2022, 79(3):1140-1153.
- [67] YU Y, LAN Y B, WANG G B, 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
- [68] HONG S W, ZHAO L Y, ZHU H P. CFD simulation of airflow inside tree canopies discharged from air-assisted sprayers [J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 149:121-132.
- [69] LI J Y, SHI Y Y, LAN Y B, 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.
- [70] 刘兴华,苑进,李扬,等.采用双向流固耦合方法构建辅助气流作用下棉花叶片变形模型[J].农业工程学报,2021,37(5):68-76.
LIU X H, YUAN J, LI Y, et al. Deformation modelling of cotton leaf under assisted airflow using bidirectional fluid-structure coupling method [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(5):68-76.
- [71] 刘秀娟,周宏平,郑加强.农药雾滴飘移控制技术研究进展[J].农业工程学报,2005,21(1):186-190.
LIU X J, ZHOU H P, ZHENG J Q. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide application [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2005, 21(1):186-190.
- [72] 刘雪美,宋来其,崔慧媛,等.气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对沉积性能影响解耦研究[J].农业机械学报,2021,52(8):117-126.
LIU X M, SONG L Q, CUI H Y, et al. Decoupling on influence of air droplets stress and canopy porosity change on deposition performance in air-assisted spray [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2021, 52(8):117-126.
- [73] 刘晓慧,袁亮亮,石鑫,等.植保施药机械喷雾雾滴飘移研究进展[J].农药学报,2022,24(2):232-247.
LIU X H, YUAN L L, SHI X, et al. Research progress on spray drift of droplets of plant protection machinery [J]. Chinese journal of pesticide science, 2022, 24(2):232-247.
- [74] HOU C J, TANG Y, LUO S M, et al. Optimization of control parameters of droplet density in citrus trees using UAVs and the Taguchi method [J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2019, 12(4):1-9.
- [75] VIEIRA B C, ALVES G S, VUKOGA B, et al. Spray drift potential of dicamba plus S-metolachlor formulations [J]. Pest management science, 2022, 78(4):1538-1546.
- [76] 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 H, QI L Y, WU Y L, et al. Distribution characteristics of rotor downwash airflow field under spraying on orchard using unmanned aerial vehicle [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(18):44-54.
- [77] 李建平,李绍波,于少猛,等.伞形风场式防飘喷雾装置沉积特性研究[J].农业机械学报,2023,54(10):80-91.
LI J P, LI S B, YU S M, et al. Deposition characteristics of umbrella wind field type anti-drift spray device [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2023, 54(10):80-91.
- [78] 王金信,鲁梅.除草剂助剂的研究进展[J].世界农药,2008,30(1):34-39.
WANG J X, LU M. Advance in researches of herbicide adjuvant [J]. World pesticide, 2008, 30(1):34-39.
- [79] OLIVEIRA D B R, PRECIPITO B M L, GANDOLFO A M, et al. Effect of droplet size and leaf surface on retention of 2,4-D formulations [J]. Crop protection, 2019, 119:97-101.
- [80] SOBIECH Ł, GRZANKA M, SKRZYPCZAK G, et al. Effect of adjuvants and pH adjuster on the efficacy of sulcotrione herbicide [J]. Agronomy, 2020, 10(4):530-530.
- [81] TENG L J, GAO T Q, GU A Y, et al. Evaluation of adjuvants for reducing the risk of phytotoxicity in low-volume spray of propiconazole [J]. Phytopathology research, 2023, 5(1):62.

- [82] 何玲,王国宾,胡韬,等.喷雾助剂及施液量对植保无人机喷雾雾滴在水稻冠层沉积分布的影响[J].植物保护学报,2017,44(6):1046-1052.
HE L, WANG G B, HU T, et al. Influences of spray adjuvants and spray volume on the droplet deposition distribution with unmanned aerial vehicle(UAV) spraying on rice[J]. Journal of plant protection, 2017, 44(6): 1046-1052.
- [83] 高荣,黄路生,文晟,等.农药液滴在玉米叶片表面铺展面积的影响因素[J].农业工程学报,2022,38(20):41-48.
GAO R, HUANG L S, WEN S, et al. Factors influencing the spreading areas of pesticide droplets on the surface of maize leaves[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2022, 38(20): 41-48.
- [84] 安小康,李富根,闫晓静,等.植保无人机施用农药应用研究进展及管理现状[J].农药学学报,2023,25(2):282-294.
AN X K, LI F G, YAN X J, et al. Research progress and management status of pesticide application by plant protection unmanned aerial vehicles[J]. Chinese journal of pesticide science, 2023, 25(2): 282-294.
- [85] 冯超,王国宾,郑成鹏,等.植保无人机喷雾助剂及喷头类型对烟田雾滴沉积分布的影响[J].烟草科技,2023,56(12):21-27.
FENG C, WANG G B, ZHENG C P, et al. Effects of spray additives and nozzle types of plant protection UAVs on droplet deposition distribution in tobacco fields[J]. Tobacco science & technology, 2023, 56(12): 21-27.
- [86] 陈晓,刘德江,王果,等.喷雾参数及助剂类型对植保无人机在棉花中期喷雾雾滴沉积分布的影响[J].农药学学报,2020,22(2):347-352.
CHEN X, LIU D J, WANG G, et al. Effect of spray parameters and adjuvant type on droplet deposition of plant protection unmanned aerial vehicle in mid-growth-cotton field [J]. Chinese journal of pesticide science, 2020, 22(2): 347-352.
- [87] 胡红岩,陈宇楠,宋贤鹏,等.喷雾量及助剂对棉花苗期植保无人机作业效果的影响[J].农药学学报,2022,24(4):825-833.
HU H Y, CHEN Y N, SONG X P, et al. Influence of the spray volumes and adjuvants on operational efficacy of plant protection unmanned aerial vehicle at the seedling stage of cotton[J]. Chinese journal of pesticide science, 2022, 24(4): 825-833.
- [88] HOLTERMAN H J, ZANDE J C V D, PORSKAMP H A J, et al. Modeling spray drift from boom sprayers[J]. Computers and electronics in agriculture, 1997, 19(1): 1-22
- [89] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. Computers and electronics in agriculture, 2010, 71(2): 128-136.
- [90] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach[J]. Agricultural and forest meteorology, 2010, 150(10): 1383-1392.
- [91] 王景旭,祁力钧,夏前锦.靶标周围流场对风送喷雾雾滴沉积影响的CFD模拟及验证[J].农业工程学报,2015,31(11):46-53.
WANG J X, QI L J, XIA Q J. CFD simulation and validation of trajectory and deposition behavior of droplets around target affected by air flow field in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(11): 46-53.