

李仁凤, 韩顺凯. 外界风速作用下六旋翼植保无人机施药雾滴分布研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(1): 108-116.

LI R F, HAN S K. Spray droplet distribution of hexacopter agricultural UAV for plant protection under external wind conditions[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(1): 108-116.

外界风速作用下六旋翼植保无人机施药雾滴分布研究

李仁凤, 韩顺凯

(郑州航空工业管理学院 航空发动机学院, 郑州 450046)

摘要: [目的]为探究旋翼植保无人机下洗流场及侧向风对施药雾滴沉积分布规律的影响。[方法]六旋翼植保无人机为研究对象基于拉格朗日多相流模型和SIMPLE算法,对六旋翼植保无人机下洗流场和有侧向风影响下的喷雾场进行数值计算。研究分析了植保无人机悬停工作条件时的下洗流场速度特性,以及受外界风速作用下喷雾场雾滴空间分布规律。[结果]无人机旋翼下洗气流呈现先聚拢后扩散现象,速度峰值在旋翼正下方,随着高度降低而逐渐降低;在侧向风作用下,来流与下洗流场产生漩涡,竖直分布的风场向后偏移,靠近迎风侧一边由于侧向风与下洗流场相互作用致使风场出现紊乱,近地风场消失,风场速度抬升并出现波动;当侧向风速小于 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,机身中心下方风场速度变化较小,靠近机身下方速度基本保持不变;当侧向风速大于 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,在距离机身中心正下方 $0.5\sim 1.5\text{ m}$ 的范围内,风场速度由于侧向风挤压峰值速度能达到 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上;当侧向风速大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,植保无人机下洗流场将不能保持稳定;侧向风速进一步增大达到 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,旋翼产生的风场在x轴方向的最大倾斜角达到 45° 以上。喷雾场雾滴空间分布与旋翼风场速度流线基本吻合且距离旋翼越远雾滴飘移越严重,雾滴颗粒直径主要分布在 $70\sim 160\text{ }\mu\text{m}$ 。[结论]为保证施药的均匀性及利用率,无人机在作业时应在无风或环境风小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的环境下作业。

关键词: 旋翼植保无人机; 流体仿真; 耦合风场; 下洗流场; 雾滴分布; 环境风速

中图分类号: S494; O359

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)01-0108-09

Spray Droplet Distribution of Hexacopter Agricultural UAV for Plant Protection under External Wind Conditions

LI Renfeng, HAN Shunkai

(School of Aero Engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: [Objective] To explore the influence of downwash flow field and lateral wind on the deposition distribution of spraying droplets of a rotary-wing agricultural drone. [Methods] This study takes a hexacopter agricultural drone as the research object and uses the Lagrangian multiphase flow model and SIMPLE algorithm to numerically calculate the downwash flow field of the hexacopter agricultural drone and the spray field under the influence of lateral wind. The velocity characteristics of the downwash flow field when the agricultural drone is hovering and the spatial distribution law of the spray field under the action of external wind speed is analyzed. [Results] The downwash airflow of the drone's propeller presents a phenomenon of gathering first and then diffusing, with the velocity peak directly below the propeller, which gradually decreases with the decrease in flying height; under the action of lateral wind, the incoming flow and the downwash flow field generate vortices, the vertical wind field shifts backward, and the wind field near the windward side is disturbed due to the interaction between the lateral wind and the downwash flow field, resulting in the disappearance of the near-ground wind field, the increase of wind field speed, and fluctuations; when the lateral wind speed is less than $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the wind field speed below the center of the fuselage changes little, and the speed near the bottom of the fuselage

收稿日期: 2024-08-09 修回日期: 2024-11-30

基金项目: 河南省科技攻关项目(242102110203, 222102320165, 242102241026); 河南省高等学校重点科研项目(25A480002)

第一作者: 李仁凤(1989-), 女, 博士, 副教授, 从事航空宇航科学与技术研究, E-mail: lrf443@zua.edu.cn

remains basically unchanged; when the lateral wind speed is greater than $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, within the range of 0.5–1.5 m from the center of the fuselage directly below, the wind field speed due to the lateral wind squeezing can reach more than $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; when the lateral wind speed is greater than $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the downwash flow field of the agricultural drone cannot maintain stable; when the lateral wind speed further increases to $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the maximum tilt angle of the wind field generated by the propeller in the x-axis direction reaches more than 45° . The spatial distribution of the spray field droplets is basically consistent with the streamline of the propeller wind field speed, and the further away from the propeller, the more serious the droplet drift; the diameter of the droplet particles is mainly distributed between 70–160 μm . [Conclusion] To ensure the uniformity and utilization rate of the application, the drone should operate as much as possible in a windless environment or an environment where the wind speed is less than $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ during operation.

Key words: rotor agricultural UAV; fluid simulation; coupled wind field; downwash flow field; droplet distribution; ambient wind speed

农作物病虫害是影响我国粮食安全及农产品品质的重要原因^[1], 针对农作物病虫害施药防治, 植保无人机因其具有低成本, 且相比较人工施药有工作效率高、不受地形因素的限制、施药均匀且穿透性好等优点被广泛应用于农业航空植保领域。而且其在施药过程中通过人机分离, 能够有效降低药剂对人的影响^[2-4], 其在我国丘陵、山地等复杂地区及东北新疆等劳动力较少的地区有广阔的应用场景^[5]。

植保无人机在作业过程中受下洗流场和环境风等多种因素作用, 容易发生雾滴飘移或复喷现象, 进而对农作物安全造成影响。因此降低雾滴飘移量, 提高农药使用率具有重要意义^[6-8], 针对植保无人机下洗流场及雾滴喷雾情况, 国内外进行了多方面研究。姜昆等^[9]以 n-10 无人机为研究对象分析了各飞行载荷作业下雾滴有效沉积率。胡淑芬等^[10]用实际作业测试的方式, 测试了不同飞行参数下无人机对油茶授粉效果的影响, 试验结果表明油茶坐果率与植保无人机喷施的雾滴沉积量之间呈正相关。COOMBES 等^[11]采用流场 RANS 模型和拉格朗日粒子跟踪的方法对喷雾进行了计算流体动力学仿真, 利用验证的计算流体力学方法对单旋翼和多旋翼两种工况的飞行条件进行了仿真。LIU 等^[12]模拟悬停和侧风条件下无人机的流场, 深入研究了旋翼下洗流场在不同高度的风速分布, 并验证了 CFD 模拟值与试验值基本吻合。杨风波等^[13-14]以六旋翼植保无人机为基础研究了无人机悬停时气流分布特性, 对机翼产生的风场进行测试试验; 并建立含雾滴离散型的两相流模型, 分析了在耦合风场下雾滴飘移沉积规律。王玲等^[15]采用基于格子波尔兹曼方法的数值模拟技术建立无人机旋翼风场仿真模型, 并结合田间试验和仿真模拟验证了旋翼风场的垂直分布规律。ZHU 等^[16]通过建立四旋翼植保无人机下洗气流的 CFD 模型, 并对植株冠层内气流速度分布进行测量, 分析了下洗气流在冠层内部的流动性和穿透性, 并给出了无人机最优操作参数。目前, 国内外研究者基于数值模拟技术与试验测试的方法, 探究了植保无人机在悬停和作业状态下的风场结构。

为深入探讨侧向风对植保无人机下洗流场及喷雾沉积分布的影响, 本研究以小型六旋翼植保无人机为例, 建立其悬停状态时 CFD 数值仿真模型, 对其下洗流场以及含有侧向风时的雾滴离散运动进行数值模拟, 为进一步改善多旋翼植保无人机低空施药品质提供理论支持。

1 工作原理及数值模拟模型建立

1.1 控制方程

为了模拟旋翼下洗气流场的运动状态, 以及受侧向风影响下整个风场气流流动规律, 采用 Navier–Stokes ($N-S$) 方程作为基本控制方程。三维 $N-S$ 方程是描述黏性流体 (包括气体) 动量守恒的基本偏微分方程, 将坐标系定义在惯性系上, 建立以绝对物理量为参数的守恒积分形式的 $N-S$ 方程作为气体连续相方程。三维 $N-S$ 方程的守恒形式为^[17-18]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F - F_v)}{\partial t} + \frac{\partial(G - G_v)}{\partial t} + \frac{\partial(H - H_v)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} U = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e]^T \\ F = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho uw, \rho u(e + V^2/2) + p/\rho]^T \\ G = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, \rho vw, \rho v(e + V^2/2 + p/\rho)]^T \\ H = [\rho w, \rho uw, \rho vw, \rho w^2 + p, \rho w(e + V^2/2 + p/\rho)]^T \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} F_v = [0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, k\partial T/\partial x + u\tau_{xx} + \nu\tau_{xy} + w\tau_{xz}]^T \\ G_v = [0, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{yz}, k\partial T/\partial y + u\tau_{yx} + \nu\tau_{yy} + w\tau_{yz}]^T \\ H_v = [0, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau_{zz}, k\partial T/\partial z + u\tau_{zx} + \nu\tau_{zy} + w\tau_{zz}]^T \end{cases} \quad (3)$$

式中： U 为流通向量； F 、 G 、 H 为通量矢量； F_v 、 G_v 、 H_v 为黏性通量矢量； k 为热传导系数； T 为气体温度； p 、 ρ 、 e 、 μ 、 V 分别为压强、密度、内能、黏性系数和速度； u 、 v 、 w 分别为速度在 X 、 Y 、 Z 方向上的分量， τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{zz} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 分别为不同方向的剪切力。

植保无人机喷雾过程，为气-液两相流问题，雾滴在风场中受重力、惯性力、环境风等多种作用力影响。本研究采用DPM离散相模型来模拟喷雾过程，雾滴运动方程采用欧拉-拉格朗日方法求解^[19]，公式为：

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D R_c}{24\rho_p d_p^2} (u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (4)$$

式中： u 为连续相速度； u_p 为颗粒的速度； ρ_p 为颗粒密度； d_p 为颗粒直径； g_x 为重力加速度； R_c 为相对雷诺数； C_D 为曳力系数。

Taylor比拟破碎模型常用于模拟空气雾化喷嘴等设备的雾化性能，以研究液滴的喷射、破碎过程以及气液两相间的耦合作用。控制方程为：

$$F - kx - d \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

式中： x 为实际的喷雾颗粒轨迹与球形颗粒轨迹时两者之间的位移数值，方程中系数来源于泰勒模型； m 为液滴质量； F 为液滴阻力。

六旋翼植保无人机旋翼在工作中产生的下洗风场处于湍流状态，SST $k-\omega$ 湍流模型结合了 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型的优点^[20-21]，适用于从边界层到自由涡流的广泛范围内的湍流流动，在航空航天工程中广泛应用。因此，本研究采用SST $k-\omega$ 模型，压力速度耦合采用SIMPLE的方案。

1.2 物理模型建立与计算域设置

本研究以SLK-5型无人机为研究对象，喷头数最多为6个，最大载药量为5 kg，最大巡航速度为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为了便于结构划分及减少不必要的计算，对无人机物理模型进行了结构优化。由于旋翼是产生下洗流场的关键所在，为保证仿真的真实性，对旋翼部分进行了独立建模，最终主要几何模型参数为：机身直径1 680 mm，旋翼半径385 mm(图1)。

考虑实际需求及模型尺寸因素，本研究计算域设置为 $7 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ 的长方体，其中由6个包含旋翼的圆柱体旋转区域和包含机体的静止区域组成，无人机位于坐标中心点，旋翼距离地面2.7 m。为提高数值模拟的精准性，在机体、旋翼附近设置了壁面边界层并进行网格加密。定义 Z 轴正方向为上升方向， X 轴正方向为迎风速度入口，其余方向为压力出口，旋翼转速 $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，具体网格模型与边界条件设定如图2。

离散相喷雾计算采用压力旋流雾化模型，6个喷嘴位于6个旋翼正下方300 mm处。材料为水，喷雾压力1.0 MPa，每个喷嘴喷射粒子数设置为50，颗粒为惰性粒子，初始喷射流量为 $0.005 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ，雾化半锥角为 30° ，地面离散相类型设置为wall-film，其余边界离散相类型设置为escape。

2 下洗流场与雾滴分布仿真分析

2.1 植保无人机下洗流场分析

下洗流场是植保无人机的显著特征之一，对施药品质有着重要影响。本研究通过数值仿真模拟，运用FLUENT软件对六旋翼植保无人机悬停工作条件时的下洗流场进行了仿真。图3为无人机 XOZ 截面下洗风场



图1 无人机简化模型

Figure 1 Simplified model of a drone

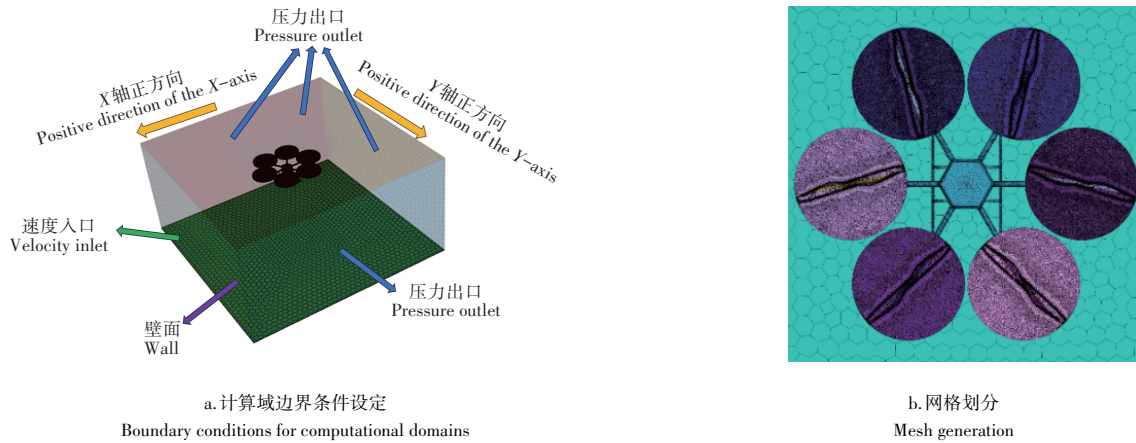


图2 计算域与边界设定及网格划分

Figure 2 Computational domain, boundary conditions, and grid partitioning

速度云图及距离地面不同高度的速度曲线,由图3可知,当悬停时下洗流场趋于稳定后,风场气流速度基于Z轴机身中心对称,且距离旋翼越远速度越小;最大气流风速为 $8.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 出现在旋翼正下方,由于此位置速度较大,因此该区域压强较小,在大气压的挤压下气流向内收缩;当高度进一步降低靠近地面,受地面效应影响,下洗气流向四周扩散形成近地风场。

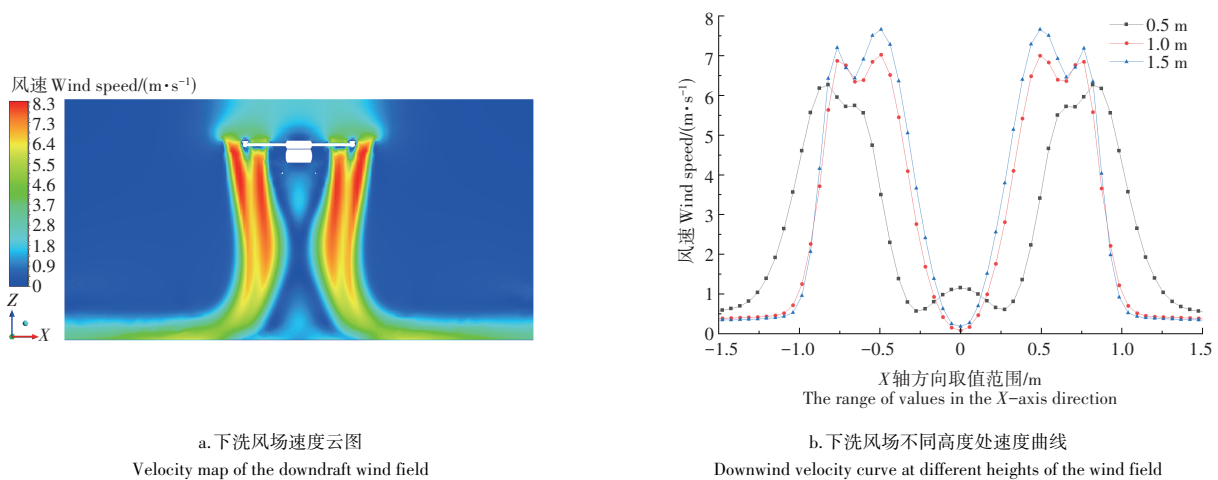


图3 植保无人机下洗流场速度分布规律

Figure 3 Distribution law of downwash velocity field for agricultural drone

为探究侧向风对下洗流场的影响,本研究在X轴正方向对风场施加 $0\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 不同侧向风,选取XOZ截面为特征截面。侧向风对旋翼风场垂直分布规律的影响如图4,随着侧向风的增大,竖直分布的风场沿侧向风方向倾斜,当风速达到 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,旋翼产生的风场在X轴方向最大倾斜角达到 45° 以上,导致迎风侧下洗气流与背风侧气流相重合;同时在迎风侧来流与下洗流场相互作用形成漩涡,漩涡随着风速增加逐渐向机身下方位置靠拢。由图4可知,侧向风速度在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,旋翼无人机风场有一定的抗干扰能力,当风速大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,其下洗流场将不能再保持稳定。

不同大小的侧向风速对下洗流场的各个点风速大小及方向都会造成影响。本研究选取机身正下方平行于X轴的3个不同离地高度测速线,同时提取机身中心下方空间速度点进行分析,速度变化如图5。由图5a、图5b和图5c可知,因靠近地面旋翼产生的气流减弱,高度越低侧向风对下洗流场影响越严重,随着侧向风增大,靠近迎风侧一边由于侧向风与下洗流场相互作用致使风场出现紊乱,近地风场消失,风场速度抬升并出现波动;结合图5d,侧向风小于 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 机身中心下方风场速度变化相对较小,靠近机身下方速度基本保持不变;当风速大于 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,在距离机身中心下方 $0.5\sim 1.5\text{ m}$ 的范围内,风场速度由于侧向风挤压峰值速度

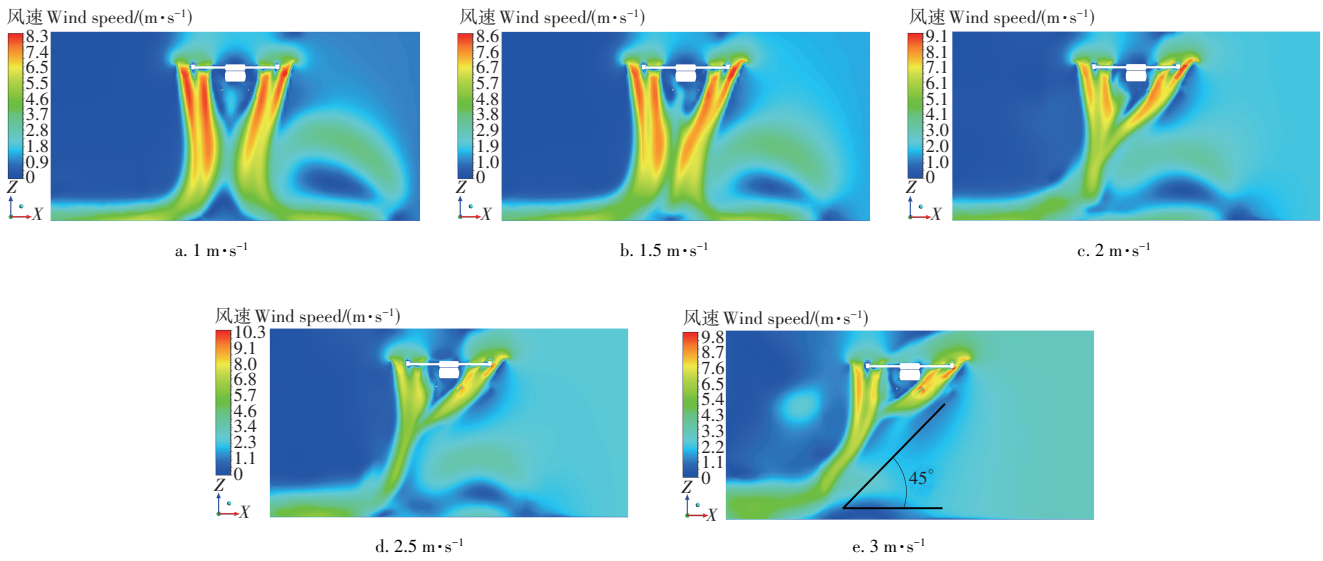


图4 不同侧向风速下速度云图

Figure 4 Velocity contour map at different lateral wind speeds

能达到 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,随着侧向风速进一步增加,峰值速度逐渐向机身下方靠拢。

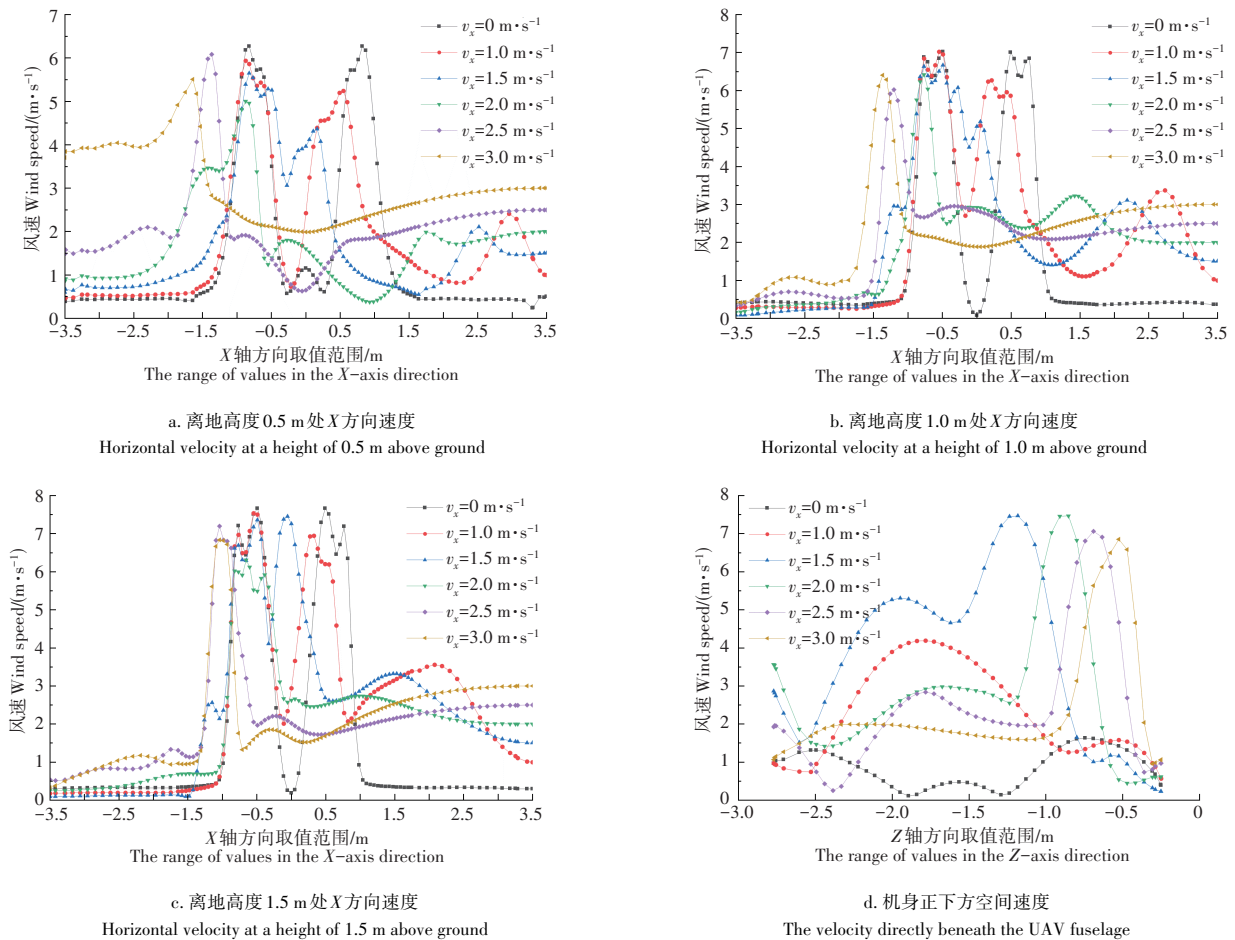


图5 不同截面处下洗流场空间速度变化曲线

Figure 5 Spatial velocity variation curves of downwash flow field at different cross-sections

2.2 环境风、下洗流场共同作用下喷雾场分析

本研究假定空气为理想气体,雾滴为球形粒子,在下洗流场稳定后,增加DPM模型,图6为不同迎风风速喷药雾滴颗粒分布,喷嘴统一工作时间1.5 s,由图6a与图7a可知,当无侧向风时,雾滴竖直分布与旋翼风场速度流线基本吻合,颗粒直径主要分布在70~160 μm ,雾滴沉积主要分布在机身下方中心区域;随着来流风速增加,雾滴沉积区域逐渐向后偏移,风速达到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,机身迎风侧一方将没有雾滴分布,同时迎风侧方向雾滴上扬并向两边扩散,造成与后方喷嘴作业的喷雾相重叠,致使农药分布不均匀,严重威胁农作物安全;当风速大于 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,机身正下方将不会出现沉积,雾滴向后飘移严重,大大降低了施药的作业效率。

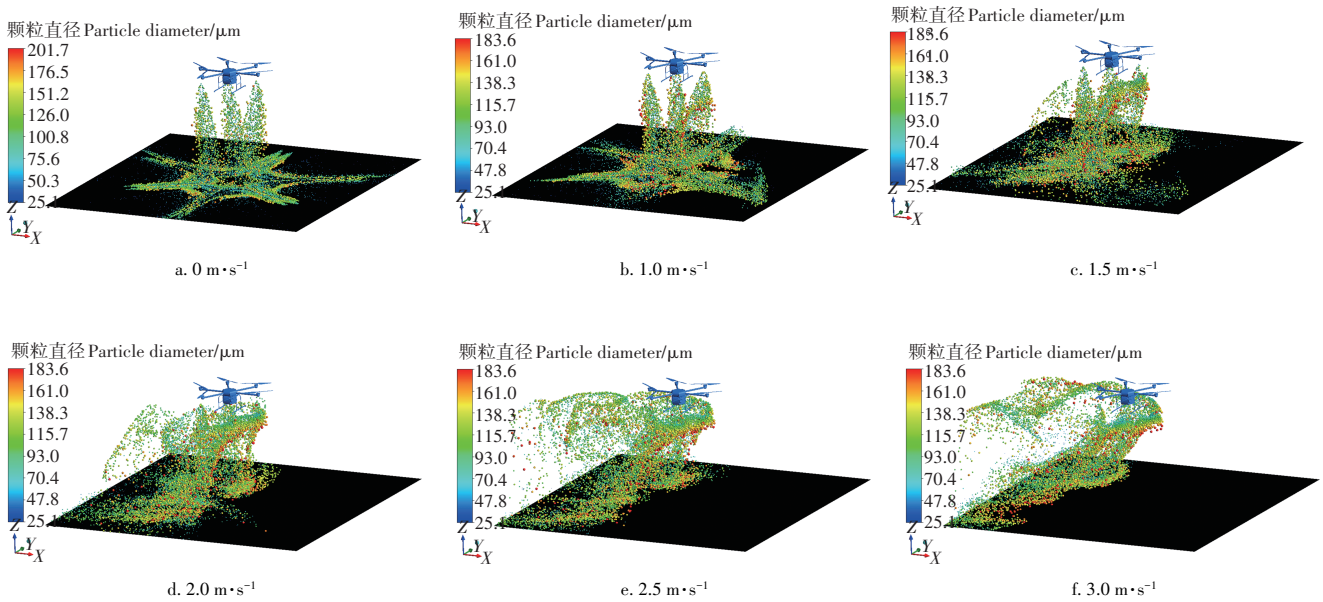


图6 不同迎风风速喷药雾滴颗粒分布

Figure 6 Particle distribution of spray droplets at different headwind speeds

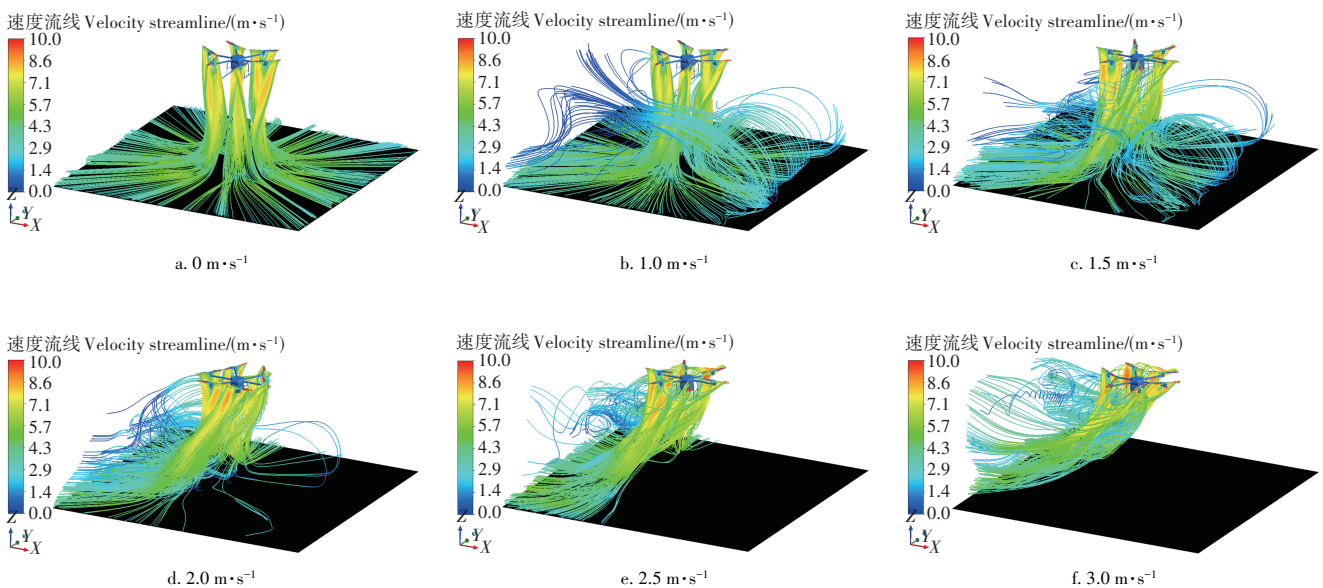


图7 不同迎风风速下旋翼风场速度流线

Figure 7 Streamlining of rotor wind field velocity at different windward wind speeds

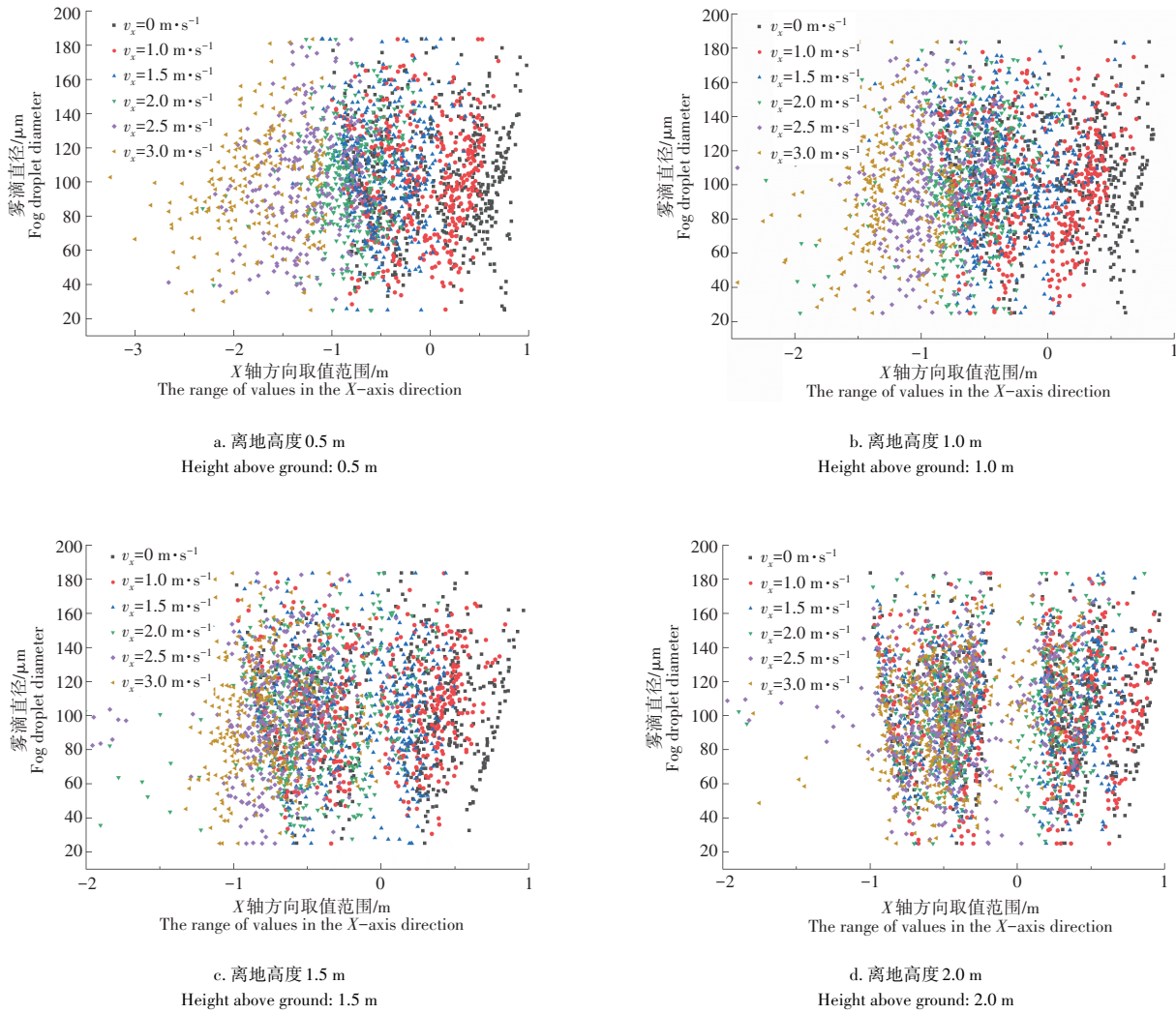


图8 不同离地高度雾滴分布情况

Figure 8 Distribution of droplets at different altitudes above ground

植物叶片是吸收药剂的主要部位^[22],不同高度的植株主要施药区域不尽相同,因此针对不同离地高度雾滴沉积进行了统计(图8)。由图8可知,当离地高度为2 m时,由于距离旋翼接近,旋翼下洗流场对雾滴作用更强,雾滴飘移不明显;当离地高度达到1.5 m处,风速大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,迎风侧与背风侧雾滴由于飘移出现重喷现象,最大飘移距离约为1 m;随着离地高度减小,雾滴飘移越严重;在离地高度0.5 m处,风速达到 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,相比较无侧向风最大飘移距离达到2 m以上。

3 讨论与结论

本研究对植保无人机悬停状态下受侧向风影响时的下洗流场以及喷雾场进行了数值模拟,重点探究了耦合风场作用下雾滴沉积分布规律。但无人机飞行高度、飞行速度以及喷幅等因素都对植保无人机施药品质产生影响,因此未来还需对不同参数作业时植保无人机喷雾规律进行研究。此外由于田间施药环境相对复杂多变,造成试验结果有一定的误差,而运用数值模拟仿真能避免环境变化的问题,但采用计算流体力学的方法存在计算周期长等缺点,因此下一步可根据仿真数据选择恰当的方法构建雾滴飘移预测模型。

本研究结果表明,无人机下洗流场速度沿z轴机身对称,最大气流速度出现在旋翼下方为 $8.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其峰值速度出现在旋翼正下方,随着高度降低而逐渐降低,并有向旋翼外侧偏移趋势;下洗气流呈现先聚拢后扩散现象。在有环境风作用下,来流与下洗流场相互作用使竖直分布的下洗气流向后倾斜,迎风侧近地风场消失气

流出现紊乱;当风速大于 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以后,迎风侧速度峰值消失,当风速达到 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,下洗气流在x轴方向最大倾斜角达到 45° 以上。喷雾场雾滴空间分布基本与旋翼风场速度流线基本相吻合,距离旋翼越远雾滴飘移越严重,当风速大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,植保无人机前方将不会出现雾滴分布,风速进一步增加重喷现象越严重;因此为提高植保无人机作业效率及保证农作物安全,其在作业时应尽量在无风或环境风小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的环境下作业。

参考文献:

- [1] 卞悦,姜玉英,曾娟.我国二类农作物病虫害的分类地位和分布特点[J].植物保护,2023,49(3):1-12,49.
BIAN Y,JIANG Y,ZENG J.Taxonomic status and distribution characteristics of the second-class crop pests in China[J].Plant Protection,2023,49(3):1-12,49.
- [2] 陈盛德,兰玉彬,李继宇,等.航空喷施与人工喷施方式对水稻施药效果比较[J].华南农业大学学报,2017,38(4):103-109.
CHEN S D,LAN Y B,LI J Y,et al.Comparison of the pesticide effects of aerial and artificial spray applications for rice[J].Journal of South China Agricultural University,2017,38(4):103-109.
- [3] 张海艳,兰玉彬,文晟,等.植保无人机旋翼风场模型与雾滴运动机理研究进展[J].农业工程学报,2020,36(22):1-12.
ZHANG H Y,LAN Y B,WEN S,et al.Research progress in rotor airflow model of plant protection UAV and droplet motion mechanism[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(22):1-12.
- [4] 兰玉彬,王林琳,张亚莉.农用无人机避障技术的应用现状及展望[J].农业工程学报,2018,34(9):104-113.
LAN Y B,WANG L L,ZHANG Y L.Application and prospect on obstacle avoidance technology for agricultural UAV[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(9):104-113.
- [5] 陈盛德,廖玲君,徐小杰,等.中国植保无人机及其施药关键技术的研究现状与趋势[J].沈阳农业大学学报,2023,54(4):502-512.
CHEN S D,LIAO L J,XU X J,et al.Research status and trends of plant protection UAV and its key technology of spraying in China[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2023,54(4):502-512.
- [6] 郭爽,兰玉彬,许童羽,等.寒地玉米植保无人机航空施药雾滴沉积效果研究[J].沈阳农业大学学报,2021,52(4):451-459,382.
GUO S,LAN Y B,XU T Y,et al.Droplet deposition effectiveness of plant protection uav aerial application on corn in cold region[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2021,52(4):451-459,382.
- [7] 张智泓,曾荣壕,赖庆辉,等.小型植保无人机下洗气流场影响雾滴运动特性规律研究[J].农业机械学报,2023,54(9):208-216,226.
ZHANG Z H,ZENG R H,LAI Q H,et al.Investigation of effects of downwash airflow field on droplet motion characteristics of small plant protection unmanned aerial vehicles[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):208-216,226.
- [8] 郑永军,陈炳太,吕昊曦,等.中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J].农业工程学报,2020,36(20):110-124.
ZHENG Y J,CHEN B T,LYU H T,et al.Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(20):110-124.
- [9] 姜昆,王永龙,樊嘉荣,等.多旋翼无人机飞行载荷对雾滴沉积规律的影响[J].农机化研究,2020,42(5):25-32.
JIANG K,WANG Y L,FAN J R,et al.Droplet deposition rules of multi rotor UAV flight loads impact[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(5):25-32.
- [10] 胡淑芬,曹昕奕,邓勇杰,等.植保无人机飞行参数对油茶授粉雾滴分布及坐果率的影响[J].农业工程学报,2023,39(20):92-100.
HU S F,CAO X Y,DENG Y J,et al.Effects of the flight parameters of plant protection drone on the distribution of pollination droplets and the fruit setting rate of camellia[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(20):92-100.
- [11] COOMBES M,NEWTON S,KNOWLES J,et al.The influence of rotor downwash on spray distribution under a quadrotor unmanned aerial system[J].Computers and Electronics in Agriculture,2022,196:106807.
- [12] LIU X,ZHANG W,FU H B,et al.Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection[J].International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2021,14(3):35-42.
- [13] 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.

- [14] YANG F B,XUE X Y,ZHANG L,et al.Numerical simulation and experimental verification on downwash air flow of six-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hover[J].International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2017,10(4):41-53.
- [15] 王 玲,张 旗,侯启航,等.六旋翼植保无人机风场竖直分布特性数值模拟与验证[J].农业机械学报,2022,53(增刊2):75-83.
WANG L,ZHANG Q,HOU Q H,et al.Vertical distribution law of six-rotor plant protection UAV based on multi-feature parameters[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(S2):75-83.
- [16] ZHU Y Z,GUO Q W,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.
- [17] ANDERSON J D.计算流体力学基础及其应用[M].北京:机械工业出版社,2007.
ANDERSON J D.Fundamentals and Applications of Computational Fluid Dynamics[M].Beijing:Machinery Industry Press,2007.
- [18] 王福军.计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
WANG F J.Computational Fluid Dynamics Analysis:Principles and Applications of CFD Software[M].Beijing:Tsinghua University Press,2004.
- [19] 黄先北,杨 硕,刘竹青,等.基于颗粒轨道模型的离心泵叶轮泥沙磨损数值预测[J].农业机械学报,2016,47(8):35-41.
HUANG X B,YANG S,LIU Z Q,et al.Numerical simulation of erosion prediction in centrifugal pump based on particle track model[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(8):35-41.
- [20] 任玉新,陈海昕.计算流体力学基础[M].北京:清华大学出版社,2006.
REN Y X,CHEN H X.Fundamentals of Computational Fluid Dynamics[M].Beijing:Tsinghua University Press,2006.
- [21] 林建忠.流体力学[M].北京:清华大学出版社,2005.
LIN J Z.Fluid Mechanics[M].Beijing:Tsinghua University Press,2005.
- [22] 刘婷婷,刘尚可,李北兴,等.农药在植物中的内吸和传导行为与施药技术研究进展[J].农药学报,2021,23(4):607-616.
LIU T T,LIU S K,LI B X,et al.Review on uptake and translocation behaviors of pesticides in plants and application technologies of pesticides[J].Chinese Journal of Pesticide Science,2021,23(4):607-616.