

基于 Porous 模型的多旋翼植保无人机下洗气流分布研究

张 豪 祁力钧 吴亚垒 刘娟娟 程焱焱 MUSIU E

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 植保无人机进行果树施药时,果树冠层周围及内部的下洗气流时空分布对雾滴的附着和分布有重大影响,为明确无人机下洗气流时空分布规律,针对六旋翼植保无人机,结合 RANS 方程、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型、Porous 模型、滑移网格技术及 SIMPLE 算法,建立了六旋翼植保无人机悬停施药下洗气流时空分布的三维 CFD 模型。数值模拟结果表明:无果树时,旋翼下洗气流近似呈“圆柱形”向下发展,到达地面后形成地面铺展,在旋翼正下方 0.6 ~ 1.7 m 区域内出现速度范围为 3.0 ~ 4.0 m/s 的“Z 方向(竖直向下)速度稳定区”;有果树时,冠层对旋翼下洗气流有明显的阻挡作用,不再出现“Z 方向速度稳定区”。以本文模拟的 3 棵果树为例,Ⅰ号果树冠层周围气流从冠层上半部区域开始呈“圆锥形”向下发展,以一倾斜角发展到地面形成小范围地面铺展,地面铺展末端出现近地面卷扬,Ⅱ、Ⅲ号果树冠层周围气流卷扬严重,在计算区域内无明显地面铺展;旋翼中心正下方 Z 方向速度最大接近 8 m/s,随着冠层压力损失系数的增大,旋翼中心正下方 Z 方向速度衰减加快,同时旋翼气流向四周产生扩散;计算冠层内部 Z 方向最大速度衰减比发现,除Ⅲ号果树冠层下半部,无果树和Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号果树冠层内部 Z 方向最大速度衰减比依次增大。试验表明,无果树时旋翼正下方 0.3、0.8、1.3、1.8 m 处和近地面 2.3 m 处试验值与模拟值的相对误差分别在 10% 以内和不大于 25%,总体拟合优度 0.984 6,数值模拟准确;试验果树与模拟果树冠层内部的气流速度分布规律具有很好的一致性。

关键词: Porous 模型; 植保无人机; 数值模拟; 下洗气流; 时空分布

中图分类号: S49; S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0112-11

Spatio-temporal Distribution of Down-wash Airflow for Multi-rotor Plant Protection UAV Based on Porous Model

ZHANG Hao QI Lijun WU Yalei LIU Wanwan CHENG Zhenzhen MUSIU E

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: When the plant protection UAV is used to spray pesticides on orchard, the spatio-temporal distribution of down-wash airflow inside and around the canopy has a major impact on the adhesion and distribution of the droplets. In order to clarify the spatio-temporal distribution of down-wash airflow inside and around the canopy of trees when applying multi-rotor plant protection UAV to spraying, combining RANS equation, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, porous model, sliding mesh technology and SIMPLE algorithm, a three-dimensional CFD model for the spatio-temporal distribution of the down-wash airflow of six-rotor plant protection UAV in hover was established. The results of numerical simulation showed that when without tree, the down-wash airflow of the rotor developed downward was approximately in a “cylindrical” shape, and formed the ground spreading after reached the ground, and the “Z-direction (vertically downward) speed stable region” appeared in the region of 0.6 ~ 1.7 m below the rotor, where the speed range was from 3.0 m/s to 4.0 m/s. When tree existed, the canopy had an obvious effect on blocking the down-wash airflow of the rotor, and it would not appear “Z-direction speed stable zone”. Taking the three trees simulated as an example, the airflow around the canopy of No. I tree began to develop downward from the upper part of the canopy in a “conical” shape, and developed to the ground at an inclined angle to form a small area of ground spread. There was a near-ground hoisting at the end of

收稿日期: 2018-08-22 修回日期: 2018-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701400、2016YFD0200700)

作者简介: 张豪(1992—),男,博士生,主要从事植保机械研究,E-mail: zhanghao08@cau.edu.cn

通信作者: 祁力钧(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械研究,E-mail: qilijun@cau.edu.cn

the ground spread. The airflow around the canopy of No. Ⅱ and No. Ⅲ trees was heavily hoisted, and it did not have obvious ground spread in the calculation area; the maximum speed in Z direction was close to 8 m/s directly below the rotor center. With the increase of canopy pressure loss coefficient, the speed attenuation in Z direction was accelerated, while the rotor airflow was spreaded around. Calculating the maximum speed decay ratio in Z direction inside the canopy, it was found that the maximum speed decay ratio in Z direction in the canopy of No. Ⅰ, No. Ⅱ and No. Ⅲ trees was increased successively except the No. Ⅲ lower part of the canopy. The relative errors between the test values and the simulated values at 0.3 m, 0.8 m, 1.3 m and 1.8 m below the rotor and 2.3 m near the ground were less than 10% and not more than 25%, respectively. The overall goodness of fit was 0.984 6, and the numerical simulation was accurate. The test results of down-wash airflow speed of trees showed that the airflow speed distribution inside canopy of the experimental tree was in good agreement with that of the simulated tree.

Key words: porous model; plant protection UAV; numerical simulation; down-wash airflow; spatial-temporal distribution

0 引言

农业航空植保具有安全、高效和应急防治能力强等诸多优势^[1-2],可有效保障生态与粮食安全^[3],近年来得到了大力发展^[4]。已有研究表明,采用植保无人机施药时,旋翼下洗气流是影响雾滴运动的关键因素,且对雾滴在作物冠层内部的穿透性有显著影响^[5-6]。目前,果树冠层内部及周围旋翼下洗气流的时空分布尚不明确,有必要针对采用多旋翼植保无人机进行果树施药作业时旋翼下洗气流的时空分布展开研究。

围绕植保无人机授粉和施药技术,已有较多田间试验^[7-8]和数值模拟^[9-11]研究。ZHENG 等^[12]、王昌陵等^[13]研究了植保无人机不同操作参数下雾滴的沉积分布规律,许童羽等^[14]研究发现雾滴的沉积分布规律不仅与无人机作业参数有关,还受旋翼下洗气流和外界风场的影响。田间试验无法全面获取旋翼下洗气流的三维数据,结合计算流体力学方法,薛新宇团队对单旋翼^[15]、六旋翼^[16]植保无人机悬停状态的下洗气流进行了数值模拟与试验研究,但在数值模拟过程中都未考虑作物冠层对下洗气流的影响。另外,祁力钧等^[17]、DELELE 等^[18]利用计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)技术,针对果园风送式喷雾机无果树冠层的雾滴分布特性进行了研究。HONG 等^[19-20]、DUGA 等^[21-22]、SALCEDO 等^[23]则在数值模拟过程中引入 Porous 模型处理果树冠层,开展果园风送式喷雾机气流和雾滴分布规律数值模拟与试验验证研究,这些研究充分表明利用 Porous 模型处理果树冠层进行数值模拟研究的有效性。运用 CFD 技术,基于 Porous 模型的多旋翼植保无人机悬停施药果树冠层周围及内部下洗气流时空分布方面的研究未见报道。

为明确多旋翼植保无人机悬停施药时果树冠层

周围及内部下洗气流时空分布规律,本文基于商用软件 ANSYS Fluent 16.0,采用数值模拟与试验验证相结合的方法,针对六旋翼植保无人机,结合 RANS 方程、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型、Porous 模型、滑移网格技术及 SIMPLE 算法,建立六旋翼植保无人机悬停施药下洗气流时空分布的三维 CFD 模型,并搭建数值模拟试验平台进行旋翼下洗气流速度测试试验。

1 材料与方法

1.1 数值模拟试验平台

试验平台(中国农业大学植保机械实验室)如图 1 所示。该试验平台包括可移动支架、悬挂装置和六旋翼植保无人机。所用六旋翼植保无人机定制于深圳市金铭睿电子有限公司,基本参数为:无人机轴距 0.8 m,电机型号 X4114 KV370,旋翼型号 1555,最大载药量为 5 kg。植保无人机主要包括机臂、中间盘、旋翼、动力系统和无线遥控器,加装有 RC41 智能测速仪,反馈旋翼转速。本文考虑载药量以及室内试验的安全性,旋翼转速取 2 500 r/min,载药量可达 2.5 kg。

1.2 多旋翼植保无人机气动布局

多旋翼植保无人机下洗气流时空分布与其旋翼



图 1 多旋翼植保无人机数值模拟试验平台

Fig.1 Multi-rotor plant protection UAV numerical simulation experimental platform

1. 可移动支架 2. 六旋翼植保无人机及悬挂装置 3. 试验果树

系统的气动布局密切相关,本文研究对象六旋翼系统气动布局如图 2 所示,相邻旋翼夹角为 60° 。 $O_i X_i Y_i Z_i$ 为固连在第 i 个旋翼上的旋转坐标系($i = 1, 2, \dots, 6$), $O_b X_b Y_b Z_b$ 为植保无人机悬停状态下绝对坐标系。悬停状态下 6 个旋翼转速相同,相邻旋翼转向相反。

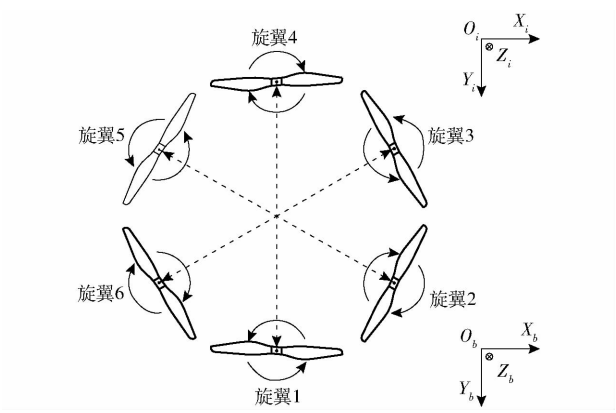


图 2 六旋翼系统气动布局

Fig. 2 Aerodynamic layout of six-rotor system

1.3 数值模拟方法

1.3.1 基本控制方程

六旋翼植保无人机旋翼悬停流场采用 RANS 方程作为基本控制方程。对于单个旋翼,将旋转坐标系的坐标轴固连在旋翼上,其守恒积分控制方程具体可表示为^[24-25]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \mathbf{W} dV + \iint_S \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = \iint_S \mathbf{F}_v \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_V \mathbf{R} dV$$
 (1)

其中

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho(\mathbf{q} - \mathbf{q}_w) \\ \rho u(\mathbf{q} - \mathbf{q}_w) + p\mathbf{i}_x \\ \rho v(\mathbf{q} - \mathbf{q}_w) + p\mathbf{i}_y \\ \rho w(\mathbf{q} - \mathbf{q}_w) + p\mathbf{i}_z \\ \rho H_r(\mathbf{q} - \mathbf{q}_w) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx}\mathbf{i}_x + \tau_{xy}\mathbf{i}_y + \tau_{xz}\mathbf{i}_z \\ \tau_{yx}\mathbf{i}_x + \tau_{yy}\mathbf{i}_y + \tau_{yz}\mathbf{i}_z \\ \tau_{zx}\mathbf{i}_x + \tau_{zy}\mathbf{i}_y + \tau_{zz}\mathbf{i}_z \\ \varphi_x\mathbf{i}_x + \varphi_y\mathbf{i}_y + \varphi_z\mathbf{i}_z \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\rho w\boldsymbol{\Omega} \\ 0 \\ \rho u\boldsymbol{\Omega} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q} = [u \quad v \quad w]^T \quad \mathbf{q}_w = [u_w \quad v_w \quad w_w]^T$$

- 式中 S ——控制体表面积
 $\mathbf{n}$ ——控制体外法矢量
 V ——控制体体积
 $\mathbf{W}$ ——守恒变量
 $\mathbf{F}$ ——无粘通量
 $\mathbf{F}_v$ ——粘性通量
 $\mathbf{R}$ ——旋转通量

- $\mathbf{q}$ ——绝对速度
 $\mathbf{q}_w$ ——牵连速度
 E_r ——流体总内能
 H_r ——流体总焓
 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ——粘性通量 $\mathbf{F}_v$ 中粘性应力 τ 各分量
 $\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y, \mathbf{i}_z$ ——控制体外法矢量 $\mathbf{n}$ 的分量
 $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ ——粘性项
 p ——流体压强, Pa
 ρ ——流体密度, kg/m^3
 t ——时间, s
 $\boldsymbol{\Omega}$ ——旋翼旋转角速度矢量

果树冠层的阻力作用,会造成旋翼下洗气流的动量损失,本文在总结前人研究成果^[26-30]后选择 Porous 模型处理果树冠层,用 Porous 域代替果树冠层区域。该模型通过在流体基本动量方程中增加动量损失源项来模拟 Porous 域对气流的阻力作用,冠层所造成的气流动量损失和湍流量变化可描述为^[19]

$$\Delta p = -C_{ir} \frac{1}{2} \rho |v| v \Delta m$$
 (2)

$$S_k = C_d L_{AD} \beta_p |v|^3 - C_d L_{AD} \beta_d |v| k$$
 (3)

$$S_\omega = C_d L_{AD} (\alpha_p - 1) \beta_p \frac{\omega}{k} |v|^3 - C_d L_{AD} (\alpha_d - 1) \beta_d \frac{\omega}{k} |v| k$$
 (4)

式中 Δp ——冠层压力损失, $\text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{m})$

- C_{ir} ——压力损失系数, m^{-1}
 v ——风速, m/s
 Δm ——多孔介质厚度, m
 k ——湍流动能, J
 ω ——比耗散率, %
 S_k ——湍流动能 k 的源项, m^2/s^2
 S_ω ——比耗散率 ω 的源项, s^{-1}
 C_d ——冠层阻力系数, 取 0.25
 L_{AD} ——叶面积密度, m^{-1}
 β_p ——平均流体动能由于作物阻力转化为湍流动能损失的比例系数, 取 1
 β_d ——与作物相互作用的能量损失系数, 取 4
 α_p, α_d ——模型常数, 取 1.5、1.5

1.3.2 旋翼模型与模拟果树结构

旋翼是植保无人机关键旋转部件,所用三维模型对数值模拟结果有较大影响,本文依托逆向工程技术,利用 MCS 五/四轴全自动三维扫描系统分别获取正、反旋翼表面点云数据,而后用 Geomagic Studio 软件对点云数据进行后处理,实现旋翼模型

的逆向重建,得到精确的旋翼三维模型(图 3),用于数值模拟。

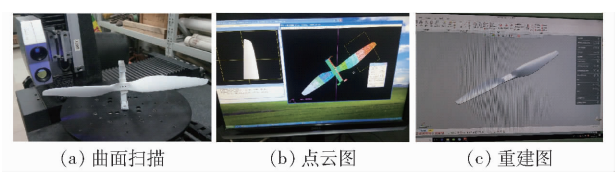


图 3 旋翼逆向建模
Fig. 3 Rotor reverse modeling

本文数值模拟时参考文献[20]对试验果树进行简化处理,将模拟果树用球形冠层与圆柱树干的组合来代替;冠层压力损失系数与冠层叶面积密度关系式为 $C_{ir} = 2C_dL_{AD}$,可用冠层压力损失系数表征冠层叶面积密度;一般叶面积密度冠层和高叶面积密度冠层的压力损失系数分别为 0.8 ~ 6.9 和 1.2 ~ 13.4。综上,设置 I、II、III 共 3 棵模拟果树,特征参数包括结构参数和压力损失系数,其中结构参数为:球形冠层直径 1.2 m,圆柱树干直径 0.15 m、高度 0.7 m;I、II、III 号果树压力损失系数分别为 2.0、6.0、10.0,依次表征冠层的稀疏、较密和稠密。结构参数由测量实际试验果树尺寸得到。

1.3.3 计算区域与边界条件

总计算区域为直径 4.5 m、高 3.6 m 的圆柱体(图 4),植保无人机、总计算区域上边界和下边界中心坐标分别为(0,0,0)、(0,0,-1.2)、(0,0,2.4),模拟果树垂直中轴线与 Z 轴重合。

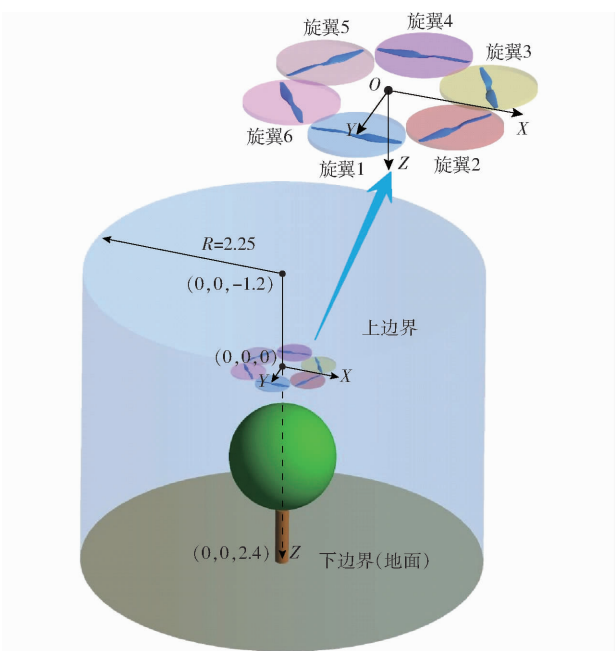


图 4 数值模拟计算区域示意图

Fig. 4 Schematic of numerical simulation calculation domain

为保证数值模拟的求解精度,将总计算区域划分为 6 个旋转域(设置转速为 2 500 r/min)、冠层

Porous 域、树干固体域及空气外域,共 9 个计算区域,其中旋转域、冠层 Porous 域与空气外域之间的界面采用 Interface 连接。进行无果树模拟时不包含冠层 Porous 域和树干固体域。无果树和有果树模拟总网格数分别为 5 897 064 和 7 342 928;网格质量评价参数 Skewness 最大值分别为 0.849 63 和 0.841 66,平均值分别为 0.230 24 和 0.229 69,符合网格质量要求^[31]。由于下洗气流场求解为瞬态计算,旋转域采用滑移网格技术处理,空气外域下边界为地面,采用无滑移壁面,其余边界为自由出口。

1.3.4 计算方法

植保无人机旋翼高速旋转形成下洗气流场,湍流模型选择适合于复杂剪切流动的 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[32],使用有限体积法将控制方程离散化。数值模拟时动量和压力为所关注变量,选择基于压力求解器的 SIMPLE 压力-速度耦合算法对控制方程进行数值求解。

1.4 旋翼下洗气流速度测试

为验证数值模拟旋翼下洗气流场的准确性,进行无果树下洗气流速度测试试验,另外为说明模拟果树与试验果树冠层内部气流速度分布规律的一致性,进行有果树下洗气流速度测试试验,旋翼转速稳定在 $(2\,500 \pm 10)$ r/min(图 5)。各测试点气流速度用固定于三角支架上的 Kestrel 4500 型风速仪依次进行测量,无自然风。风速仪设置每 2.0 s 保存一个数据,下洗气流稳定后开始测试,每个测试点的单点测试时间约 20 s,导出数据,取所记录速度的平均值为该测试点气流速度。



图 5 下洗气流速度测试试验

Fig. 5 Down-wash airflow speed test

无果树下洗气流速度测试点布置在各旋翼中心的正下方,分别位于旋翼正下方 0.3、0.8、1.3、1.8、2.3 m 处,共 30 个测试点,依次进行 Z 方向速度测试;图 6 给出了冠层内部气流速度测试点空间位置,将冠层分为上、中、下 3 层,距地面高度分别为 1.6、

1.3、1.0 m,共 15 个测试点,同样依次进行 Z 方向速度测试。

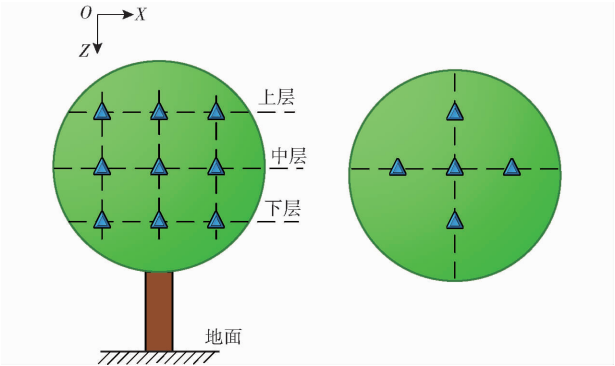


图 6 冠层内部气流速度测试点示意图
Fig.6 Schematic of measuring points for airflow speed distribution inside tree canopy

2 结果与讨论

2.1 数值模拟结果与分析

2.1.1 旋翼下洗气流时变特征

CFD 数值模拟的优势之一在于三维结果的可视化,图 7 分别给出了无果树和有果树时,不同时刻旋翼下洗气流总速度的分布。

无果树时,1.0 s 已有速度较小的旋翼下洗气流接触地面但尚未沿地面向四周形成铺展;2.0 s 时地面铺展已经形成,但与 3.0 s 和 3.5 s 比较,其铺展面积和速度都偏小,表明此时刻旋翼下洗气流已经发展至地面,且沿地面向四周的铺展正处在发展过程中;3.0 s 和 3.5 s 旋翼下洗气流总速度分布情况基本一致,气流在计算区域内的地面铺展得到了充

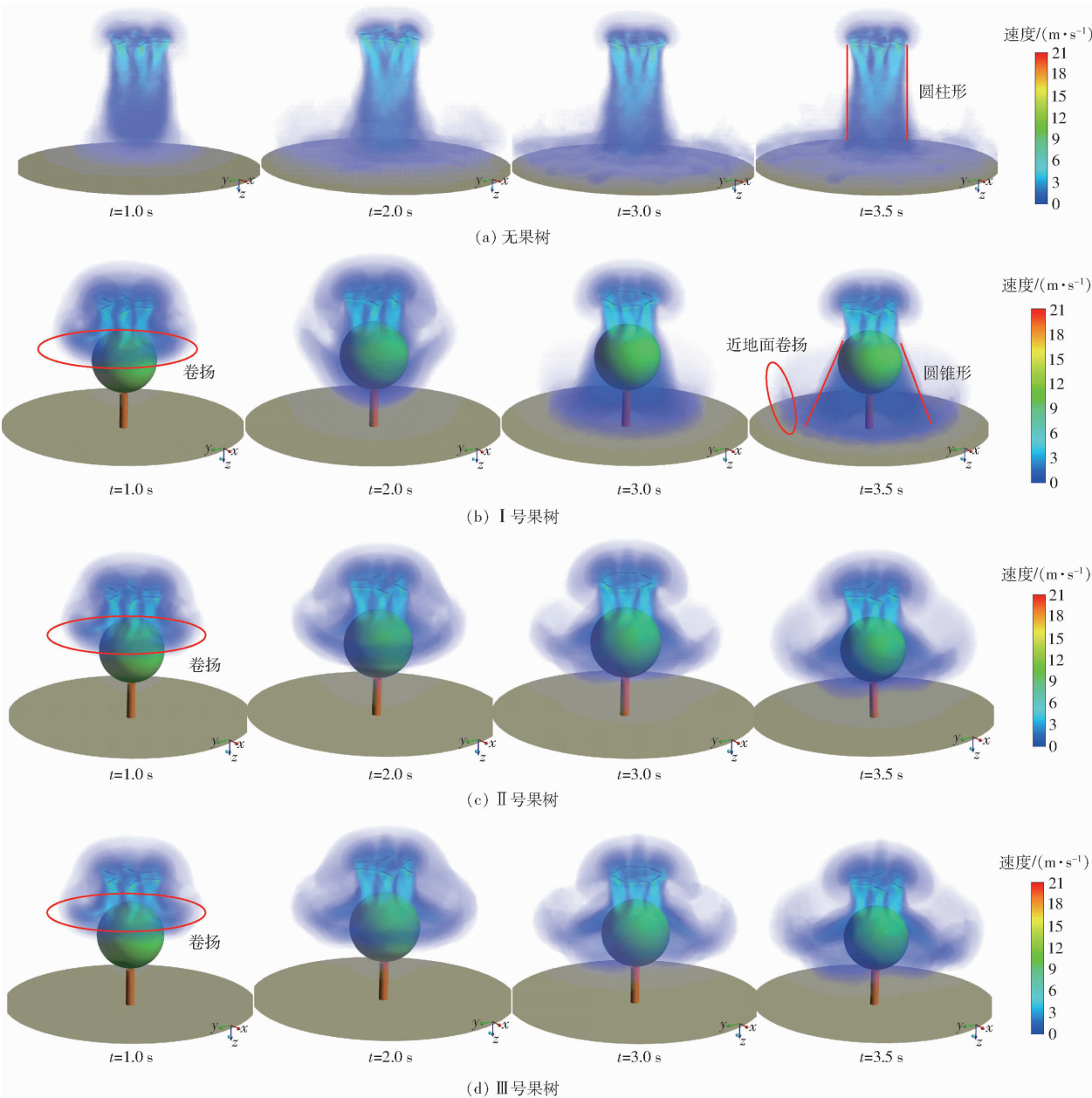


图 7 无果树和有果树不同时刻旋翼下洗气流总速度分布

Fig.7 Down-wash airflow total speed distributions of rotor with and without tree at different times

分发展,表明 3.0 s 时旋翼下洗气流场已趋于稳定。整个过程旋翼下洗气流近似呈“圆柱形”向下发展,到达地面后形成地面铺展,且与文献[16]研究结果一致, Z 方向气流速度在旋翼下洗气流速度中占主体。

当存在果树时,旋翼下洗气流场与无果树时不同,果树冠层对旋翼下洗气流有明显的阻挡作用,气流发展至地面所需时间更长,地面铺展在计算区域内表现不明显,且随着冠层压力损失系数的增加该现象更为突出。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号果树旋翼下洗气流在 1.0 s 时发展至冠层上半部,总速度分布情况基本相同,由于冠层的阻挡作用,此时刻在冠层上半部区域的周围均出现气流卷扬,且该卷扬在Ⅰ号果树中随气流的向下发展在冠层周围不再明显,逐渐发展成为近地面卷扬,在Ⅱ、Ⅲ号果树中随气流的向下发展该卷扬有增强趋势。2.0 s 时旋翼下洗气流已穿透

Ⅰ号果树冠层向地面发展,Ⅱ、Ⅲ号果树气流穿透深度较Ⅰ号果树小,这是由于冠层压力损失系数的增加造成的。3.0 s 和 3.5 s 时,Ⅰ号果树旋翼下洗气流已发展至地面,冠层周围气流从冠层上半部区域开始呈“圆锥形”向下发展,以一倾斜角发展到地面形成小范围地面铺展,地面铺展末端出现近地面卷扬。由于Ⅱ、Ⅲ号果树的压力损失系数均较大,3.0 s 和 3.5 s 时旋翼下洗气流总速度分布相似,冠层周围气流卷扬严重,这将增大雾滴的飘移,对果树施药不利,且计算区域内无明显地面铺展。

2.1.2 旋翼下洗气流速度空间变化规律

为明确无果树和有果树时旋翼下洗气流速度的空间变化规律,选择 3.5 s 稳定流场模拟结果进行分析。图 8 分别给出了无果树和有果树时,3.5 s 时刻各旋翼中心正下方的下洗气流 Z 方向速度沿 Z 轴的变化情况。

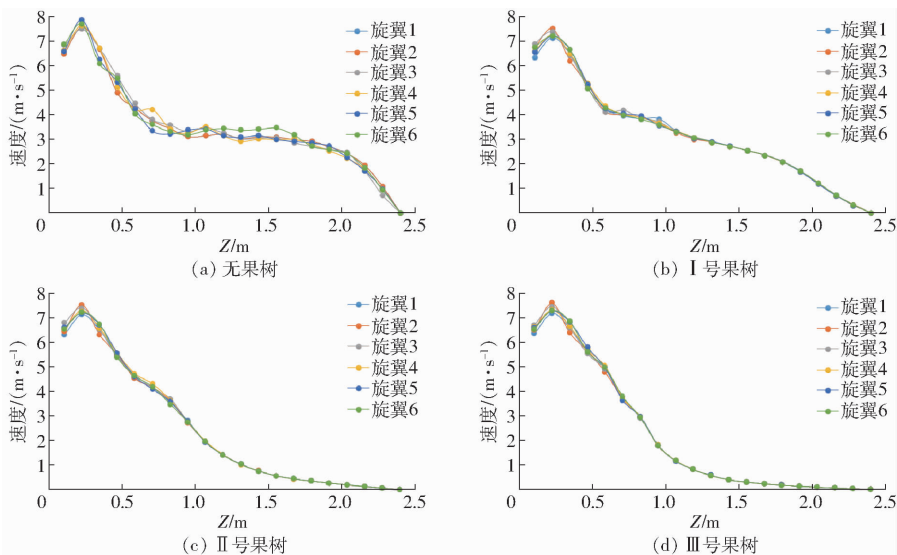


图 8 各旋翼中心正下方下洗气流 Z 方向速度

Fig. 8 Down-wash airflow speed in Z -direction below center of each rotor

无果树时,旋翼中心正下方的下洗气流 Z 方向速度在 0.2 m 处最大,接近 8.0 m/s,这是因为对于单个旋翼在近旋翼中心正下方存在一个小的“低速区”,旋翼中心外围下洗气流速度较大且气流有一个加速过程,随着外围气流的交汇叠加,“低速区”结束,在旋翼中心正下方 0.2 m 处气流速度达到最大。由于空气阻力作用,0.2 ~ 0.6 m 区域内 Z 方向速度迅速由近 8.0 m/s 衰减至 4.0 m/s,而后在 0.6 ~ 1.7 m 区域内出现一个“ Z 方向速度稳定区”,速度处在 3.0 ~ 4.0 m/s 范围内,速度衰减较小,表明该区域下洗气流呈稳定发展。1.7 ~ 2.4 m 区域内由于下洗气流发展至地面,地面的阻挡作用造成 Z 方向速度逐渐衰减至 0 m/s。

当存在果树时,在 0 ~ 0.6 m 区域内,下洗气流尚未受到冠层的影响,其 Z 方向速度变化规律与无

果树时基本一致。在 0.6 ~ 1.7 m 区域内,由于存在冠层的阻挡作用,造成下洗气流的动量损失,不再出现“ Z 方向速度稳定区”,随着冠层压力损失系数的增加,旋翼下洗气流 Z 方向速度衰减加快。另外,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号果树的冠层压力损失系数依次增大,其造成的旋翼下洗气流速度衰减同样依次增大,表现为Ⅰ号果树冠层下方 Z 方向速度大部分处在 1 ~ 2 m/s 范围内,而Ⅱ、Ⅲ号果树冠层下方 Z 方向速度较Ⅰ号果树小,均接近 0 m/s,说明下洗气流在Ⅱ、Ⅲ号果树冠层中穿透性较Ⅰ号果树差。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号果树各旋翼中心正下方 Z 方向速度曲线出现重合,这可能是由于 Porous 模型被假设为各向同性,且各旋翼在冠层下半部和冠层下方的 Z 方向速度较小造成的。

冠层的存在造成 Z 方向速度衰减加快,同时旋翼气流向四周产生扩散,图 9 给出了距地面高度

1.6、1.3、1.0 m 下,有 I、II、III 号果树时,下洗气流 X 、 Y 方向速度分别沿 X 、 Y 轴的变化情况,其中速度值的正负分别表示该速度方向指向坐标轴的正方向和负方向。从图中可以看出, X 、 Y 方向速度绝对值均呈对称分布;I、II、III 号果树冠层周围 X 方向和 Y 方向速度基本呈依次增大趋势,说明随着冠层压力损失系数的增大,冠层对旋翼气流的扩散作用增强,这将增加雾滴的横向飘移;同一果树、同一高度下, X 方向速度较 Y 方向速度大,这可能是因为 X 轴

处在文献[16]中描述的气流“引入”、“导出”区,受气流叠加的影响,而 Y 轴处在旋翼正下方不存在气流的叠加,但距地面越近, X 、 Y 方向速度差异受气流“引入”、“导出”区气流叠加的影响越小;另外,距地面 1.6 m 处 X 、 Y 方向速度变化较快,气流向四周的扩散范围小,距地面 1.3 m 和 1.0 m 处 X 、 Y 方向速度变化相对缓慢,气流向四周的扩散范围增大,符合 2.1.1 节中冠层周围气流从冠层上半部区域开始呈“圆锥形”向下发展的特点。

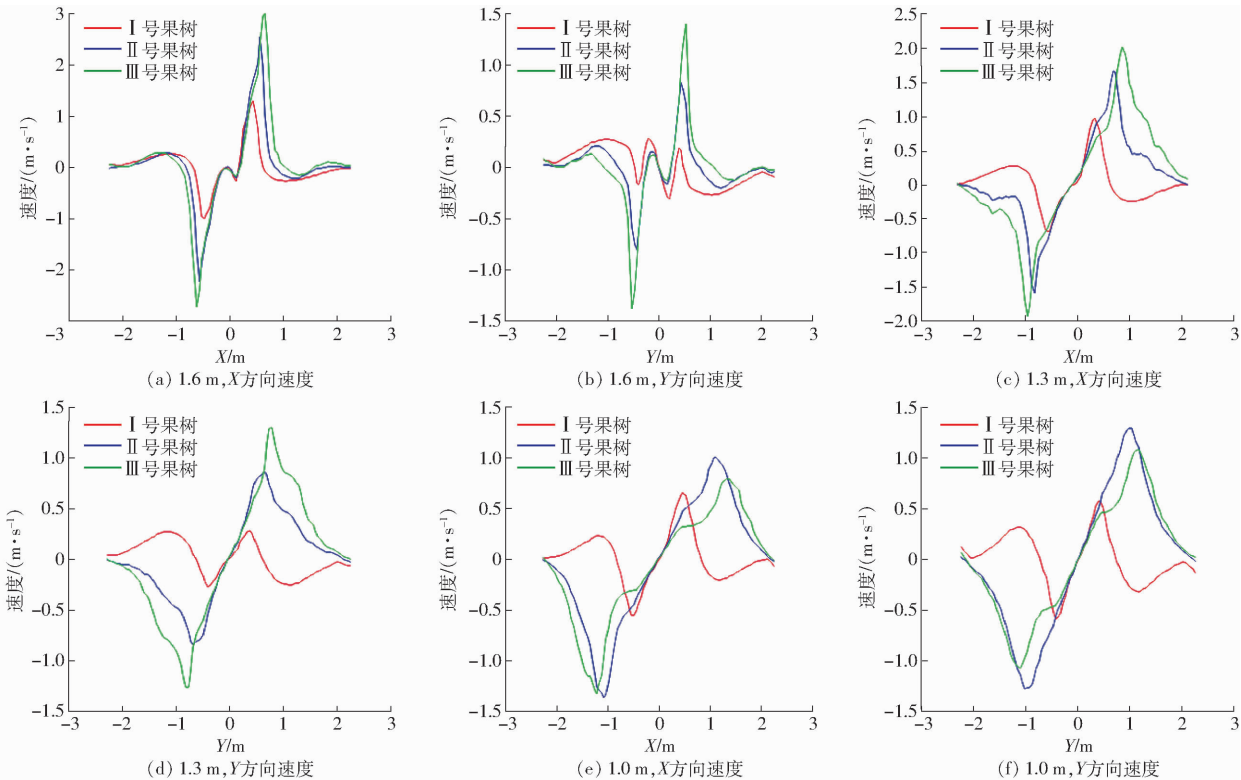


图9 有果树不同高度下洗气流 X 和 Y 方向速度

Fig.9 Down-wash airflow speed in X and Y directions at different heights with tree

2.1.3 冠层内部下洗气流速度分布

按照有果树下洗气流速度测试试验,同样以距地面高度分别为 1.6、1.3、1.0 m 将模拟果树分为上、中、下 3 层,分别获取冠层内部各层下洗气流 Z 方向最大速度。

表 3 给出了无果树和有 I、II、III 号果树时,不同时刻冠层内部上、中、下各层下洗气流 Z 方向最大速度,并给出了 3.5 s 时刻 Z 方向最大速度的衰减比,该指标用于衡量旋翼下洗气流 Z 方向速度沿 Z 轴正方向的衰减幅度,若衰减比等于 1 说明速度无变化,大于 1 说明速度出现衰减,衰减比越大速度衰减幅度越大。其计算公式为

$$N_i = \frac{v_1}{v_2} \quad (i = 1, 2)$$

(5)

式中 N_i —— Z 方向最大速度衰减比
 v_1 ——冠层内部上层或中层下洗气流 Z 方向

最大速度, m/s

v_2 ——冠层内部下层下洗气流 Z 方向最大速度, m/s

有果树时 N_1 、 N_2 分别指冠层上半部和下半部的 Z 方向最大速度衰减比;无果树时 N_1 、 N_2 分别指与有果树时冠层相同部位的 Z 方向最大速度衰减比。

从表 3 可以看出,各时刻均呈现出“上层-无果树” Z 方向最大速度最大,“下层-III 号果树” Z 方向最大速度最小的变化规律,表明随着冠层深度及冠层压力损失系数的增加,冠层内部 Z 方向最大速度均呈减小趋势。在同一层上,无果树、I、II、III 号果树 Z 方向最大速度随时间逐渐增大,但“3.5 s-中层-I 号果树” Z 方向最大速度较“3.0 s-中层-I 号果树”的 Z 方向最大速度小,这可能是冠层内部气流受湍流的影响造成。3.0 s 和 3.5 s 时刻, I、II、III 号果树中层和下层 Z 方向最大速度差距较小,可以

表 3 冠层内部 Z 方向最大速度

Tab.3 Maximum speed in Z-direction inside canopy

时间/s	位置	Z 方向最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			
		无果树	I 号果树	II 号果树	III 号果树
1.0	上层	5.15	2.51	2.00	1.68
	中层	4.34	1.5	1.08	0.89
	下层	3.53	0.82	0.61	0.48
2.0	上层	5.38	4.83	4.49	3.48
	中层	5.07	3.92	1.73	1.18
	下层	4.84	2.25	0.99	0.71
3.0	上层	5.41	5.05	4.01	2.98
	中层	4.96	4.08	1.81	1.20
	下层	4.87	2.96	0.98	0.67
3.5	上层	5.50	5.21	4.44	3.41
	中层	5.16	4.01	1.84	1.22
	下层	4.90	2.94	0.97	0.66
$N_1(3.5\text{ s})$		1.07	1.30	2.41	2.80
$N_2(3.5\text{ s})$		1.05	1.36	1.90	1.85

说明 3.5 s 时刻下洗气流在冠层内部已得到充分发展。

计算 Z 方向最大速度衰减比发现,无果树和 I、II、III 号果树 Z 方向最大速度衰减比依次增大(除 III 号果树冠层下半部),表明 Z 方向最大速度衰减幅度依次增大,出现 III 号果树冠层下半部衰减比较 II 号果树的小,说明冠层下半部 Z 方向最大速度衰减比与冠层压力损失系数之间无线性关系。无果树时冠层上半部和下半部衰减比分别为 1.07 和 1.05,该区域处在“Z 方向速度稳定区”。I 号果树冠层上半部、下半部衰减比分别为 1.30 和 1.36,冠层下半部 Z 方向速度衰减幅度比冠层上半部的衰

减幅度大。II 号果树和 III 号果树冠层上半部 Z 方向最大速度衰减比分别为 2.41 和 2.80,下半部分别为 1.90 和 1.85,冠层上半部衰减比都比下半部的大,表明 II、III 号果树冠层上半部 Z 方向最大速度衰减幅度更大。

2.2 试验结果与分析

为保证旋翼下洗气流在冠层内部已充分发展,选择 3.5 s 时刻的数值模拟结果与实际试验结果进行对比分析。

2.2.1 旋翼下洗气流场准确性验证与分析

无果树下洗气流速度测试试验结果和模拟结果见表 4。沿 Z 轴正方向,下洗气流 Z 方向速度试验值与模拟值有相同变化趋势,试验结果表明,在旋翼正下方 0.8、1.3、1.8 m 处各测试点 Z 方向速度相差较小,衰减幅度小,同样存在“Z 方向速度稳定区”。0.3、0.8、1.3、1.8 m 处各测试点模拟值和试验值相对误差均在 10% 以内,2.3 m 处各测试点模拟值和试验值相对误差不大于 25%,造成此差异的原因可能是 2.3 m 处下洗气流已接近地面且向四周形成铺展,这增加了实际测量过程中误差增大的可能性。另外,2.3 m 处各测试点 Z 方向速度试验值都比模拟值要小,主要原因是试验过程中的动量损失比模拟过程中的大,这对距旋翼较远处的下洗气流 Z 方向速度影响最大。虽然在近地面 2.3 m 处模拟值和试验值的相对误差较大,但考虑到果树冠层距此区域较远,冠层所在区域气流场模拟值和试验值相对误差较小,在 10% 以内,与文献[16]结果相比误差有所降低。其次,对试验值和模拟值进行线

表 4 无果树下洗气流 Z 方向速度模拟值与试验值对比

Tab.4 Comparison of test and simulation values of down-wash airflow speed in Z-direction without tree

旋翼	Z/m	模拟值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	试验值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差/ %	旋翼	Z/m	模拟值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	试验值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
旋翼 1	0.3	6.90	6.50	6.2	旋翼 4	0.3	7.06	7.35	3.9
	0.8	3.20	3.52	9.1		0.8	3.61	3.38	6.8
	1.3	3.20	3.42	6.4		1.3	2.90	3.16	8.2
	1.8	3.06	2.86	7.0		1.8	2.78	2.98	6.7
	2.3	0.66	0.54	22.2		2.3	0.82	0.67	22.4
旋翼 2	0.3	7.12	7.30	2.5	旋翼 5	0.3	7.09	6.57	7.9
	0.8	3.50	3.30	5.7		0.8	3.10	3.36	7.7
	1.3	3.05	2.96	3.0		1.3	3.08	3.32	7.2
	1.8	2.91	2.65	9.8		1.8	2.85	3.12	8.7
	2.3	0.90	0.72	25.0		2.3	0.80	0.69	15.9
旋翼 3	0.3	7.08	6.83	3.7	旋翼 6	0.3	7.11	6.56	8.4
	0.8	3.78	3.55	6.5		0.8	3.36	3.60	6.7
	1.3	3.02	3.21	5.9		1.3	3.37	3.08	9.4
	1.8	2.72	2.97	8.4		1.8	2.72	2.56	6.3
	2.3	0.57	0.49	16.3		2.3	0.78	0.64	21.9

性回归分析(图 10),回归拟合方程为 $y = 1.010\ 2x + 0.006\ 3$,总体拟合优度 R^2 为 0.984 6,试验值和模拟值显著相关。综上说明旋翼下洗气流场数值模拟结果准确。

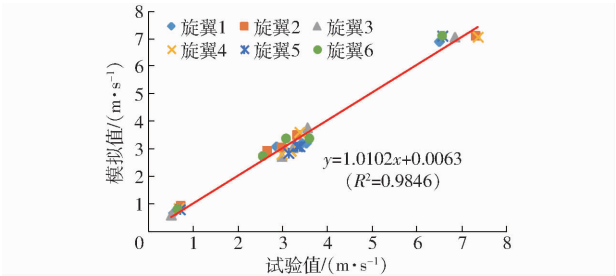


图 10 无果树下洗气流 Z 方向速度试验值与模拟值回归分析

Fig. 10 Regression analysis of Z-direction down-wash airflow speed test values and simulation values without tree

2.2.2 冠层内部气流速度分布规律一致性验证与分析

将有果树下洗气流速度测试试验的 15 个测试点数据和对应数值模拟数据按照测试位置上、中、下层分为 3 组,获取冠层内部各层 Z 方向气流速度范围,并计算各层速度分布变异系数,该指标用于衡量各层 Z 方向速度分布的均匀性,计算公式为^[33]

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{V}} \times 100\% \tag{6}$$

其中
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n - 1}} \tag{7}$$

式中 C_v ——Z 方向速度分布变异系数,%
 σ ——各层 Z 方向速度标准差,m/s
 V_i ——各测试点 Z 方向速度测量值,m/s
 $\bar{V}$ ——各层 Z 方向速度平均值,m/s
 n ——各层 Z 方向速度测试点个数,取 5

图 11 给出了 I、II、III 号果树和试验果树冠层内部各层 Z 方向气流速度范围及速度分布变异系数。对比分析可以发现,试验果树与模拟果树冠层内部气流速度分布规律具有很好的一致性。

从速度范围看,各果树上、中、下层 Z 方向速度范围依次减小。试验果树与 III 号果树上、中、下层最大速度及上层最小速度较为接近,但中层和下层的最小速度二者存在较大差异,这可能是因为在有果树下洗气流速度测试试验过程中由于树叶扰动,风速仪被瞬间遮挡,造成风速仪在该时刻所记录的数值较小,使得测试点平均速度值偏低,而果树上层的气流速度较大,树叶扰动对上层测量结果影响较小。从速度分布变异系数来看,各果树上、中、下层 Z 方向速度分布变异系数依次减小,说明随着冠层深度

的增加,Z 方向速度分布趋于均匀。另外,综合速度范围和速度分布变异系数,试验果树与 III 号果树情况更为接近,可以估计试验果树压力损失系数在 10 左右。

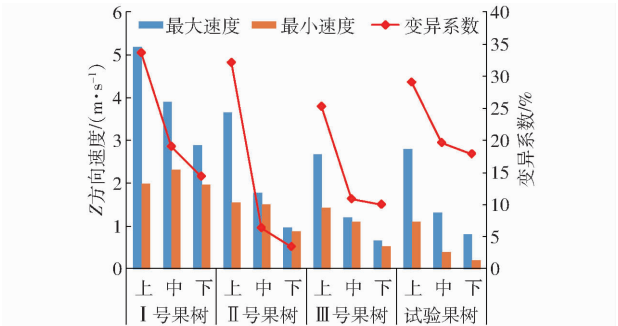


图 11 模拟果树和试验果树各层气流速度范围及变异系数

Fig. 11 Airflow speed range and coefficient of variation for each layer of simulated tree and experimental tree

3 结论

(1)建立了轴距 0.8 m、旋翼转速 2 500 r/min 的六旋翼植保无人机无果树和有果树的旋翼下洗气流时空分布三维 CFD 模型,对比分析了无果树和 I、II、III 号果树旋翼下洗气流的时变特征。无果树时,旋翼下洗气流近似呈“圆柱形”向下发展,2.0 s 时已到达地面且形成地面铺展;有果树时,冠层周围气流从冠层上半部区域开始呈“圆锥形”向下发展,以一倾斜角发展到地面形成小范围地面铺展;II、III 号果树冠层周围气流卷扬严重。

(2)研究了 3.5 s 时无果树和有果树时旋翼下洗气流速度空间变化规律。无果树时,在旋翼正下方 0.6~1.7 m 区域内出现速度范围为 3.0~4.0 m/s 的“Z 方向速度稳定区”;有果树时,冠层对旋翼下洗气流有明显的阻挡作用,不再出现“Z 方向速度稳定区”;旋翼中心正下方 Z 方向速度最大接近 8 m/s,随着冠层压力损失系数的增大,Z 方向速度衰减加快,冠层对旋翼气流的扩散作用增强。

(3)讨论了冠层内部下洗气流速度分布。3.5 s 时冠层内部气流已发展充分;不同时刻冠层内部 Z 方向最大速度,随着冠层深度及冠层压力损失系数的增加而减小;除 III 号果树冠层下半部,无果树和 I、II、III 号果树冠层内部 Z 方向最大速度衰减幅度依次增大;冠层下半部 Z 方向最大速度衰减比与冠层压力损失系数之间无线性关系。

(4)开展了无果树和有果树的下洗气流 Z 方向速度测试试验;旋翼正下方 0.3、0.8、1.3、1.8 m 处和近地面 2.3 m 处试验值与模拟值相对误差分别在 10% 以内和不大于 25%,总体拟合优度为 0.984 6,

验证了旋翼下洗气流场数值模拟结果的准确性;试验果树冠层内部 Z 方向速度随着冠层深度的增加逐渐减小,且速度分布趋于均匀,与模拟果树冠层内部气流速度分布规律具有很好的一致性。

参 考 文 献

- [1] 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):194-201.
XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation application in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):194-201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130534&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034. (in Chinese)
- [2] HE X K, BONDS J, HERBST A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 18-30.
- [3] 周志艳,臧英,罗锡文,等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报,2013,29(24):1-10.
ZHOU Zhiyan, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24):1-10. (in Chinese)
- [4] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):53-59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current atatus and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(10):53-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141009&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)
- [5] TANG Q, ZHANG R R, CHEN L P, 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.
- [6] WANG S L, SONG J L, HE X K, et al. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 22-31.
- [7] 李继宇,周志艳,兰玉彬,等. 旋翼式无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. 农业工程学报,2015,31(3):77-86.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, LAN Yubin, et al. Distribution of canopy wind field produced by rotor unmanned aerial vehicle pollination operation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):77-86. (in Chinese)
- [8] LI J Y, LAN Y B, WANG J W, et al. Distribution law of rice pollen in the wind field of small UAV[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 32-40.
- [9] 张宋超,薛新宇,秦维彩,等. N-3 型农用无人直升机航空施药飘移模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3): 87-93.
ZHANG Songchao, XUE Xinyu, QIN Weicai, et al. Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N-3 unmanned spraying helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 87-93. (in Chinese)
- [10] 杨风波,薛新宇,蔡晨,等. 多旋翼植保无人飞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 Fengbo, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Effect of down wash airflow in hover on droplet motion law for multi-rotor unmanned plant protection machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 64-73. (in Chinese)
- [11] 王军锋,徐文彬,闻建龙,等. 大载荷植保无人直升机喷雾气液两相流动数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9): 62-69.
WANG Junfeng, XU Wenbin, WEN Jianlong, et al. Numerical simulation on gas-liquid phase flow of large-scale plant protection unmanned aerial vehicle spraying[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 62-69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170908&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.008. (in Chinese)
- [12] ZHENG Y J, YANG S H, ZHAO C J, et al. Modelling operation parameters of UAV on spray effects at different growth stages of corns[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 57-66.
- [13] 王昌陵,宋坚利,何雄奎,等. 植保无人机飞行参数对施药雾滴沉积分布特性的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(23): 109-116.
WANG Changling, SONG Jianli, HE Xiongkui, et al. Effect of flight parameters on distribution characteristics of pesticide spraying droplets deposition of plant-protection unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 109-116. (in Chinese)
- [14] 许童羽,于丰华,曹英丽,等. 粳稻多旋翼植保无人机雾滴沉积垂直分布研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):101-107.
XU Tongyu, YU Fenghua, CAO Yingli, et al. Vertical distribution of spray droplet deposition of plant protection multi rotor for japonica rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 101-107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171012&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.012. (in Chinese)
- [15] ZHANG S C, XUE X Y, SUN Z, et al. Downwash distribution of single-rotor unmanned agricultural helicopter on hovering state[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(5): 14-24.
- [16] 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.
- [17] 祁力钧,赵亚青,王俊,等.基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J].农业机械学报,2010,41(2):62–67.
QI Lijun, ZHAO Yaqing, WANG Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 62–67. (in Chinese)
- [18] DELELE M A, JAEKEN P, DEBAER C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1):16–27.
- [19] HONG S W, ZHAO L, ZHU H. CFD simulation of airflow inside tree canopies discharged from air-assisted sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149:121–132.
- [20] HONG S W, ZHAO L, ZHU H. CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: tree deposition and off-target losses[J]. Atmospheric Environment, 2018, 175:109–119.
- [21] DUGA A T, DELELE M A, RUYSEN K, et al. Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154(2):62–75.
- [22] DUGA A T, DEKEYSER D, RUYSEN K, et al. Numerical analysis of the effects of wind and sprayer type on spray distribution in different orchard training systems[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 157(3):1–19.
- [23] SALCEDO R, VALLET A, GRANELL R, et al. Eulerian – Lagrangian model of the behaviour of droplets produced by an air-assisted sprayer in a citrus orchard[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154(2):76–91.
- [24] ROBERT T W, MURMAN E M. Solution method for a hovering helicopter rotor using the euler equations[R]. AIAA, 85–0436, 1985.
- [25] AGARWAL R K, DEESE J E. Euler calculations for flowfield of a helicopter rotor in hover[J]. Journal of Aircraft, 1987, 24(4):231–238.
- [26] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. 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.
- [27] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying-Part II: validation for different sprayer types[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2):137–147.
- [28] 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.
- [29] ENDALEW A M, HERTOOG M, DELELE M A, et al. CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(2):356–368.
- [30] ENDALEW A M, HERTOOG M, GEBREHIWOT M G, et al. Modelling airflow within model plant canopies using an integrated approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(1):9–24.
- [31] 张国祥,刘星星,张领先,等.基于 CFD 的日光温室温度与卷帘开度关系研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(9):279–286.
ZHANG Guoxiang, LIU Xingxing, ZHANG Lingxian, et al. Relationship between indoor temperature and rolling shutter opening of solar greenhouse based on CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):279–286. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170935&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.035. (in Chinese)
- [32] 李鹏飞,许敏仪,王飞飞.精通 CFD 工程仿真与案例实战:FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot[M].北京:人民邮电出版社,2011:186–192.
- [33] 程演演,祁力钧,吴亚垒,等.矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL].农业机械学报,2017,48(增刊):22–29.
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 22–29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s004&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004. (in Chinese)