

陈盛德, 展义龙, 兰玉彬, 等. 侧向风对航空植保无人机平面扇形喷头雾滴飘移的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(4): 89-98.  
CHEN Shengde, ZHAN Yilong, LAN Yubin, et al. Influence of crosswind on droplet drift of flat-fan nozzle in aviation plant protection UAV[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(4): 89-98.

# 侧向风对航空植保无人机平面扇形 喷头雾滴飘移的影响

陈盛德, 展义龙, 兰玉彬, 燕颖斌, 钱士程, 陈威任, 陈乐君

(华南农业大学 电子工程学院/国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广东 广州 510642)

**摘要:**【目的】侧向风是影响植保无人机航空喷施雾滴飘移和作业效果的主要因素。探究航空植保喷施过程中侧向风对雾滴沉积和飘移的影响, 为植保无人机航空喷施作业参数的选择和作业关键部件的改进提供数据支持和理论指导。【方法】以常用平面扇形喷头 Lechler 系列的 LU 120-015 和 LU 120-03 标准压力喷头为研究对象, 基于计算流体力学离散相模型的粒子跟踪技术, 在适宜的边界条件下对喷施作业过程中风洞内雾滴流场和农药喷洒离散相进行模拟试验; 通过仿真模拟对平面扇形喷头喷施的雾滴沉积和飘移分布情况进行可视化分析, 探究雾滴粒子在不同侧风风速条件下的飘移特性; 在农业航空专用风洞中, 采用近似条件对雾滴的沉积飘移特性进行试验验证和分析。【结果】仿真模拟结果表明, 随着侧向风速的增加, 离散相雾滴粒子飘移程度越严重, 雾滴水水平飘移越明显。随着侧向风速的增加, 模拟离散相雾滴粒子的准确沉积率 ( $R_a$ ) 呈指数下降, 由 14.11% 下降到 0.66%; 水平飘移率 ( $R_h$ ) 呈线性增加, 由 14.25% 增加到 60.58%。风洞试验结果表明, 在侧风风速分别为 1、3 和 6 m/s 的条件下, 雾滴的  $R_h$  分别为 0.4%、48.1% 和 75.1%, 且雾滴在风洞内部会随着侧风风速的增加发生一定程度的卷扬现象。仿真模拟与风洞测试试验的  $R_h$  具有显著相关性 ( $R^2=0.963$ ,  $P<0.05$ )。【结论】仿真模拟对航空喷施条件下的雾滴飘移具有较好的预测效果; 采用仿真模拟辅助风洞试验测试的方法, 可以比较准确地得出航空植保无人机作业中常用平面扇形喷头的雾滴沉积与飘移情况。

**关键词:** 航空植保; 无人机; 扇形喷头; 仿真模拟; 风洞试验; 雾滴; 飘移

中图分类号: S25

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)04-0089-10

## Influence of crosswind on droplet drift of flat-fan nozzle in aviation plant protection UAV

CHEN Shengde, ZHAN Yilong, LAN Yubin, YAN Yingbin, QIAN Shicheng, CHEN Weiren, CHEN Lejun

(College of Electronic Engineering, South China Agricultural University / National Center for International Collaboration  
Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** 【Objective】Crosswind is the main factor affecting droplet drift and spraying effect of aerial spraying for plant protection unmanned aerial vehicle (UAV). To explore the influence of crosswind on droplet deposition and drift during aerial spraying, and provide data support and theoretical guidance for selection of operation parameters and improvement of key components of aerial spraying for plant protection UAV.

收稿日期: 2021-03-25 网络首发时间: 2021-05-26 18:23:21

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210526.1526.002.html>

作者简介: 陈盛德 (1989—), 男, 讲师, 博士, E-mail: [1163145190@qq.com](mailto:1163145190@qq.com); 通信作者: 兰玉彬 (1961—), 男, 教授, 博士,  
E-mail: [ylan@scau.edu.cn](mailto:ylan@scau.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金 (31901411); 广东省引进领军人才项目 (2016LJ06G689); 广东省科技计划 (2019B020208007)

【Method】Lechler series LU 120-015 and LU 120-03 standard fan-shaped pressure nozzles were taken as the research objects. Based on the particle tracking technology of computational fluid dynamics (CFD) discrete phase model, the simulation tests of droplet flow field and pesticide spraying discrete phase in the wind tunnel were carried out under suitable boundary conditions. Through the simulation, the deposition and drift distribution of droplets sprayed by fan nozzle were analyzed visually to explore the drift characteristics of droplets at different lateral wind speeds. The deposition and drift characteristics of droplets were tested and analyzed in the agricultural aviation special wind tunnel under the similar conditions. 【Result】The simulation results showed that the drift degree of discrete phase droplets was more serious and the horizontal drift of droplets was more obvious with the increase of lateral wind speed. With the increase of lateral wind speed, the accurate deposition rate ( $R_a$ ) decreased exponentially from 14.11% to 0.66%, and the horizontal drift rate ( $R_h$ ) increased linearly from 14.25% to 60.58%. The wind tunnel test results showed that the  $R_h$  values of droplets were 0.4%, 48.1% and 75.1% at the lateral wind speeds of 1, 3 and 6 m/s respectively, and the droplets appeared the winding phenomenon to a certain extent in the wind tunnel. The results of correlation analysis showed that there was a significant correlation between the horizontal drift rates of computer simulation and wind tunnel test, and the  $R^2$  was 0.963 ( $P<0.05$ ). 【Conclusion】The simulation test has a good prediction effect on droplet drift under aerial spraying condition. The simulation-assistanted wind tunnel test method can get a reasonable result of the droplet deposition and drift of the flat-fan nozzle commonly used in aviation plant protection operation.

**Key words:** aviation plant protection; unmanned aerial vehicle; fan-shaped nozzle; simulation; wind tunnel test; droplet; drift

农药喷施是减少病虫害、提高作物产量的关键手段<sup>[1]</sup>, 农药喷施过程受到诸如喷头型号、药液喷施量、液滴频谱、喷雾器上喷头姿态等的影响<sup>[2-3]</sup>, 不同的作业方式和作业环境往往导致不同的作业效果, 不适宜的作业环境与作业方式会使药液飘失并产生药害。作为减少农药用量、降低农药残留和污染的途径之一, 农业航空施药技术近几年在我国迅速发展, 并受到各个相关领域的广泛关注<sup>[4]</sup>。低容量或超低容量喷雾是农业航空施药技术的主要喷雾方式<sup>[5]</sup>, 由于喷施雾滴粒径小, 易产生飘移, 探明环境风速对喷施雾滴雾化特性及飘移的影响规律是施药技术的关键。野外实地试验<sup>[6-7]</sup>、风洞试验<sup>[8]</sup>、仿真模拟<sup>[9]</sup>是测量喷雾沉积飘移的常用手段。野外实地试验难以控制风速、可重复性差、成本高昂。相较于野外实地试验, 风洞试验和仿真模拟能够模拟真实风速、风向等气象环境, 准确控制相关参数, 试验重复性好、可靠性高, 已成为研究航空喷施雾滴雾化及飘移特性的主流方法<sup>[10-12]</sup>。风洞试验可以根据试验需求对风速、风向等参数进行精准控制, 从而模拟无人机作业时的真实飞行环境, 国内外许多学者利用风洞模拟自然风, 对不同参数下喷头喷施雾滴参数特性进行了相关试验。Teske 等<sup>[10]</sup>以旋转雾化器为研究对象, 利用澳大利亚昆士兰大学的开路

式风洞对雾滴雾化效果进行了研究, 并建立了相关数据模型。Kirk<sup>[13]</sup>通过改变不同管道压力、风速和喷头安装角度, 对 CP 系列喷头进行了雾滴粒径拟合, 预测不同参数下喷头雾滴粒径大小。Fritz 等<sup>[14]</sup>和 Hoffmann 等<sup>[15]</sup>基于美国农业部农业航空研究中心的航空施药风洞, 研究了高低速条件下的雾滴粒径分布规律; Martin 等<sup>[16]</sup>利用该风洞对静电喷雾在不同风速条件下的雾滴分布规律进行了研究。曾爱军等<sup>[17]</sup>针对常用扇形喷头雾化特性进行测试, 通过对飘移潜在指数的计算, 发现雾滴粒径和风速是影响雾滴飘移的主要因素。张慧春等<sup>[18]</sup>通过在昆士兰大学的风洞试验, 研究了风速、喷头结构型号、药剂和采样距离对雾滴飘失的影响, 建立了包含这 4 个因素的多元非线性雾滴飘移特性模型, 提供了判断喷头雾谱等级的量化标准。唐青等<sup>[19]</sup>基于北京农业智能装备技术研究中心自主设计制造的 IEA-I 型高速风洞, 采用马尔文 Spraytec 雾滴粒度仪对标准扇形喷头和空气诱导喷头在高速气流条件下的雾化特性进行了研究, 发现随着风速的增加, 雾滴体积中径逐渐减少; 管道压力的变化对标准扇形喷头的雾滴体积中径影响较大。

在仿真模拟方面, 随着流体力学的不断发展和计算机软硬件性能的提升, 相关学者基于仿真模拟

方法、针对喷施雾滴雾化和分布特性也开展了一系列的研究工作。Dekeyser 等<sup>[2]</sup>通过计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)模拟技术,对几种常用喷头的羽流分布和附带空气流进行研究,证明了液体分布与产生的空气流动直接相关。Duga 等<sup>[20]</sup>考虑树木结构、冠层风流和喷雾器的运动,通过建立三维 CFD 模型,评估计算果园喷雾器喷雾沉积和飘移,并对不同喷嘴布置的苹果园进行了试验验证。Hong 等<sup>[21]</sup>开发了一个综合 CFD 模型,预测了空气辅助喷雾器在树冠内部和周围的风速分布,并与实际测试结果对比,结果表明该模型可以合理预测空气辅助喷雾器排出的空气分布。孙国祥等<sup>[22]</sup>基于三维模拟离散相技术建立了不同喷雾高度和风速下的雾滴沉积量和沉积率预测模型。刘雪美等<sup>[23]</sup>利用三维流场模拟多相流模型研究了在自然风影响、辅助气幕胁迫和自身重力作用下,连续相和雾滴粒子群离散相耦合的交互作用对雾滴沉积的影响。风洞试验和仿真模拟是研究喷头雾化及雾滴沉积飘移特性的重要手段,鲜见有人将风洞试验与仿真模拟结合起来研究航空喷施作业药液雾滴雾化和沉积过程。本文以航空喷施作业常用的 Lechler 系列 LU 120-015 和 LU 120-03 标准扇形压力式喷头为研究对象,通过仿真模拟将喷头喷施雾滴分布特性可视化,探究雾滴的沉积和飘移分布特性,结合实际的风洞试验验证模拟结果的准确性,并对其喷施过程的雾滴飘移特性进行分析,以期对航空植保喷施实际作业过程中作业参数的选择和关键部件改进提供数据支撑和理论指导。

## 1 模型构建及模拟

### 1.1 几何模型建立及网格划分

如图 1 所示,在 Ansys15.0 Workbench 下集成三维建模软件 Geometry 中建立模拟计算域模型,模拟计算域设为长 20.0 m ( $x: -2.5 \sim 17.5$  m)、入口处宽 2.0 m ( $z: -1.0 \sim 1.0$  m)、出口处宽 2.2 m ( $z: -1.1 \sim 1.1$  m)、高 1.1 m ( $y: 0 \sim 1.1$  m)的箱体。为方便后期统计,在计算域底面以原点 (0, 0, 0) 为圆心建立一个狭长椭圆面  $A_{\text{face}}$ ,用于后期统计雾滴准确沉积,沉积面在距喷雾口高度为  $l$  的平行面上,  $A_{\text{face}}$  是以喷嘴轴心为圆心、 $a$  为半长轴、 $b$  为半短轴的椭圆。计算公式如下:

$$a = l \times \tan(\theta_1 + \theta_2), \quad (1)$$

$$b = l \times \tan\left(\arctan\frac{l_a}{l_b} + \theta_2\right), \quad (2)$$

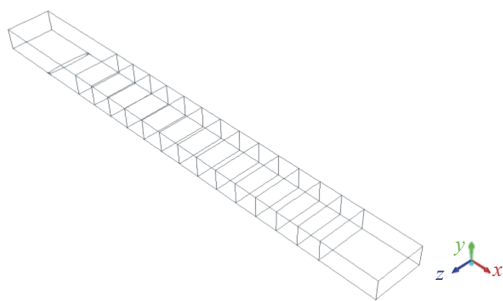


图 1 模拟流体域线框图

Fig. 1 Wireframe of simulated fluid domain

$$A_{\text{face}} = \pi ab, \quad (3)$$

式中,  $a$  为准确沉积区域的半长轴、 $b$  为准确沉积区域的半短轴,  $m$ ;  $A_{\text{face}}$  为雾滴准确沉积区域,  $m^2$ ;  $\theta_1$  为喷射半角, ( $^\circ$ );  $\theta_2$  为喷雾扩散角, ( $^\circ$ );  $l$  为沉积面高度, 此处为 0.6 m;  $l_a$  为喷口半短轴, 此处为 0.095 mm;  $l_b$  为虚拟原点到喷口距离, 此处为 1.200 mm。同时, 在计算域内  $x=2 \sim 15$  m 处以 1 m 等间距建立多个面, 用以切割上述雾滴沉积面, 用 Meshing 进行四面体网格划分, 为保证后期结果准确性, 划分过程优先考虑网格质量, 网络划分单元总数为 300 163 个。

### 1.2 数值计算模型

1.2.1 连续相模型选择 本文采用基于压力的瞬态模拟求解, 考虑重力作用。为精确模拟和捕捉空气流场细节, 根据喷雾气流特征, 连续相湍流模型采用 Launder 和 Spalding 提出的标准  $k-\varepsilon$  模型<sup>[24]</sup>, 该模型在保证雷诺应力求解计算精度的条件下具有较好的稳定性和经济性, 近壁面处理方法为标准壁面功能。

1.2.2 离散相模型选择 雾滴输送方程采用欧拉-拉格朗日方法<sup>[25]</sup>求解, 其离散相颗粒运动方程如下:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d} (\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{\rho d}{2\rho_p dt} (\vec{u} - \vec{u}_p), \quad (4)$$

式中,  $\vec{u}$  为连续相速度,  $m/s$ ;  $\vec{u}_p$  为颗粒速度,  $m/s$ ;  $\rho_p$  为颗粒密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho$  为空气密度,  $kg/m^3$ ;  $d$  为颗粒直径,  $m$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\mu$  为黏性系数;  $Re$  为相对雷诺数;  $C_D$  为曳力系数。

喷嘴模型采用平面扇形喷嘴模型 (Flat-fan atomizer model), 雾化破碎模型采用线性化不稳定液膜雾化模型。喷雾模拟考虑离散相雾滴碰撞和聚合, 判断雾滴合并和反弹主要根据 Rourke 等<sup>[26]</sup>得到的临界值, 临界值是碰撞韦伯数和集合雾滴管与小液滴半径的函数, 计算公式如下:



$$b_{crit} = (r_1 + r_2) \sqrt{\min\left(1.0, \frac{2.4f}{W}\right)}, \quad (5)$$

式中,  $b_{crit}$  为判断雾滴碰撞合并或反弹的临界值,  $m$ ;  $r_1$ 、 $r_2$  为小液滴半径,  $m$ ;  $f$  为  $r_1/r_2$  的函数;  $W$  为碰撞韦伯数, 雾滴碰撞二次破碎模型选用 Taylor 破碎模型 (TAB)。

1.2.3 模拟试验参数设置 1) 离散相喷射源参数: 离散相材料为水, 离散相释放位置坐标为  $(x, y, z)=(0, 0.6, 0)$ ; 喷嘴轴向矢量分量为  $(x, y, z)=(0, -1, 0)$ ; 雾滴质量流率为  $0.02\text{ kg/s}$ ; 喷射半角为  $60^\circ$ ; 喷雾扩散角为  $6^\circ$ 。启用非稳态粒子追踪, 采用离散随机游走模型, 粒子释放时间尺度常数为  $0.01\text{ s}$ 。

2) 边界条件参数: 对于流体边界条件 (Boundary condition): 箱体域  $x=-2.5\text{ m}$  平面为速度入口边界 (Velocity-inlet), 速度分别设置为  $0、1、2、3、4、5$  和  $6\text{ m/s}$ ;  $x=17.5\text{ m}$  平面为自由出流边界 (Outflow); 其他面均为壁面边界 (Wall)。对于离散相的边界条件类型 (DPM boundary condition type), 入口处和出口处为逃逸 (Escape), 地面为形成液膜 (Wall-film), 其余均为反弹 (Reflect), 计算区域内部材料为空气。

3) 求解方法及模拟参数: 压力-速度耦合方式为 SIMPLE, 瞬态公式为二阶隐式, 亚松弛因子保持默认设置。求解开始前对全局进行标准初始化, 求解时迭代时间步长为  $0.010\text{ s}$ 。当研究风速对雾滴粒径影响时, 模拟喷雾时长  $0.005\text{ s}$ , 喷雾开始前开启风场, 待模拟区域内流场稳定后开始喷雾, 喷雾结束后延迟  $0.010\text{ s}$  统计流场域中的全部粒子粒径分布, 目的是让喷雾的离散相粒子可以在空中充分碰撞或聚合, 此时离散相粒子距离喷头平均长度为  $0.35\text{ m}$ , 达到常规的雾滴统计位置; 当研究雾滴沉积飘移特性时, 模拟喷雾时长  $5\text{ s}$ , 同样, 喷雾开始前开启风场, 待模拟区域内流场稳定后开始喷雾, 喷雾结束后风场保持开启一段时间, 直到空间内雾滴被地面捕捉或离开计算域。

## 2 风洞试验

### 2.1 试验设备和材料

本试验所用风洞位于华南农业大学国家精准农业航空中心风洞实验室, 为符合 ISO 国际标准 (ISO 22856) 的高低速复合风洞。试验过程中为消除因壁面湍流和雾滴反弹造成的试验误差, 风洞底面铺设防飞溅人工草皮。风速测量设备为加野麦克斯公司生产的 Kanomax 6036-BG Anemomaster 带压力传感器式数字风速计。喷雾系统是由农业农村

部南京农业机械化研究所设计的喷雾控制系统, 该系统由延时继电器、储水箱、增压泵、卸压阀、压力表、喷施管道以及喷头 (德国 Lechler 系列 LU 120-015 和 LU 120-03 标准扇形压力喷头) 组成, 通过调节减压阀出口压力, 能够精确控制喷施压力, 通过调节继电器模式, 可以定时喷施。荧光度检测设备为天津港东科技发展有限公司生产的 F-380 荧光分光光度计及配套软件。

### 2.2 风洞试验设计

将喷头安装在风洞内距离风洞底面  $0.6\text{ m}$  的中心支架上, 调整喷嘴方向, 使喷嘴竖直朝下, 喷施扇面椭圆长轴方向和来风方向垂直。试验介质选用可溶性荧光示踪剂 (质量分数为  $0.5\%$  的罗丹明-B) 水溶液, 采用直径为  $1\text{ mm}$  的聚乙烯线进行雾滴收集。在下风向距离喷头平面  $2\text{ m}$  的位置, 由风洞地面向上  $0.1\sim 0.8\text{ m}$  放置  $8$  根间距为  $0.1\text{ m}$  的收集线, 用以检测穿过垂直平面空气的雾滴通量, 分别命名为  $V1\sim V8$ ; 其中, 设置距离地面为  $0.1\text{ m}$  收集线的目的是消除由于风的湍流和雾滴在地面的飞溅导致对收集线的污染。此外, 沿水平方向在距离地面  $0.1\text{ m}$  高的位置以  $1.0\text{ m}$  的间隔距离放置  $13$  根收集线, 以检测喷雾从  $2\sim 15\text{ m}$  范围内的水平飘失, 分别命名为  $H3\sim H15$ 。根据植保无人机的航空植保喷施作业规范, 环境侧风大于  $3$  级风时不能进行喷施作业, 选择  $1、3、6\text{ m/s}$  的风速进行风洞试验, 每次喷施时间为  $5\text{ s}$ , 喷雾结束后待附着在线上的雾滴充分晾干, 戴上一次性橡胶手套收集聚乙烯线并单独放置在编好号的自封袋中, 避光低温保存, 及时处理, 每组试验重复  $3$  次。风洞试验布置如图 2 所示。

### 2.3 评价指标及数据处理

通过 Fluent 自带离散相粒子统计功能对沉积高度为  $0.6\text{ m}$  的地面进行统计, 计算获得雾滴飘移特性。通过对沉积在底面上不同单位距离长方形块内的离散相质量统计, 可以获得不同侧风条件下离散相飘移情况。将收集的聚乙烯线用  $40\text{ mL}$  去离子水充分振荡洗涤, 取样通过荧光分光光度计测量得到示踪剂的质量浓度 ( $\mu\text{g/L}$ ), 质量浓度乘以洗脱液体积 ( $\text{L}$ ), 得到采集线上沉积的示踪剂质量 ( $\mu\text{g}$ ), 通过竖直排列布置的  $8$  根水平收集线上获得的数据, 可以拟合得到测试垂直面内雾滴飘移体积通量随高度分布的  $n$  次多项式曲线  $\dot{v}(y)$ , 同时得到飘移量分布的特征高度 ( $h, \text{m}$ )<sup>[27]</sup>, 其定义为:

$$h = \frac{\int_0^{h_N} \dot{v}(y) y dy}{\int_0^{h_N} \dot{v}(y) dy}, \quad (6)$$



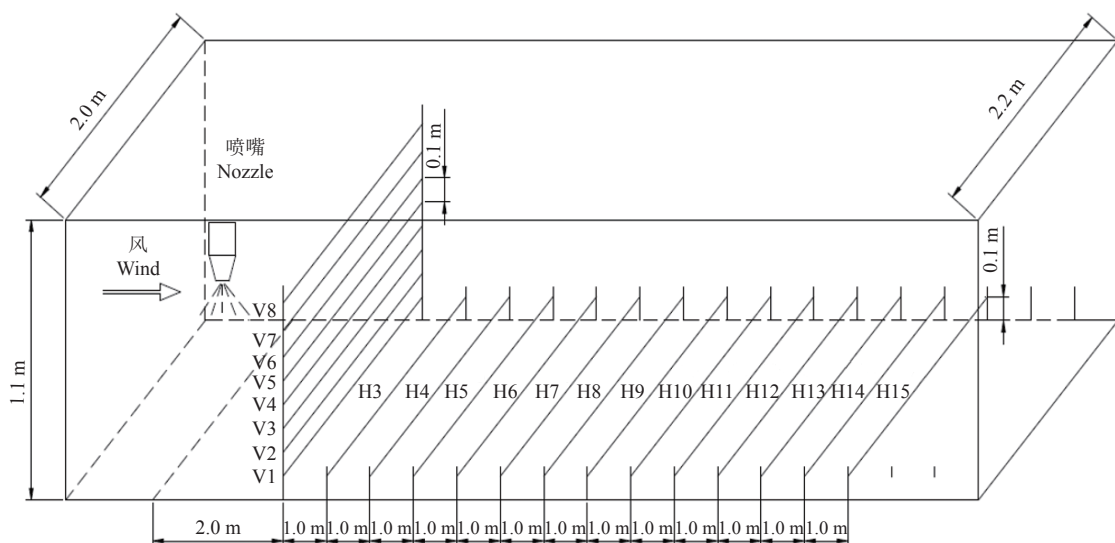


图 2 风洞试验布置图

**Fig. 2 The layout of wind tunnel test**

式中,  $\dot{v}(y)$  为通过测试截面内任意高度雾滴的体积  
 通量, L/s;  $y$  为测试垂直面的单个计算高度, m;  
 $h_N$  表示测试垂直面的累积计算高度, m; 拟合准确  
 度均超过 97%。

雾滴水平飘移率 ( $R_h$ ) 以距离地面 0.1 m 布置的 13 根聚乙烯线收集的雾滴沉积量占喷头喷施雾滴的百分比来表示, 计算公式如下:

$$R_h = \frac{A_d}{T_a} \times 100\%, \quad (7)$$

$$A_d = \sum_{i=1}^n d_i \left( \frac{s}{w} \right), \quad (8)$$

$$T_a = \nu c, \quad (9)$$

式中,  $A_d$  为喷雾过程中, 雾滴在收集线上的沉积总

量,  $\mu\text{g}$ ;  $n$  为收集线的数量;  $d_i$  为第  $i$  根收集线上示踪剂的沉积,  $\mu\text{g}$ ;  $s$  为收集线间的距离,  $\text{m}$ ;  $w$  为收集线的直径, 本试验中的  $w$  为  $0.001\text{ m}$ ;  $T_a$  为喷施示踪剂的质量,  $\mu\text{g}$ ;  $v$  为喷雾体积,  $\text{L}$ ;  $c$  为示踪剂质量浓度,  $\mu\text{g/L}$ 。

### 3 结果与分析

### 3.1 数值模拟结果

无侧向风条件下,喷头的雾滴在风洞内部的沉积分布模拟情况如图3所示。由图3可以看出,无侧向风时,喷嘴离散相雾滴以喷射半角为 $60^\circ$ 的扇形面分布,并以 $6^\circ$ 的扩散角向外扩散,除空间中的极少数无序离散相粒子外,绝大部分离散相粒子均在式(1)~(3)所求得的椭圆范围内。

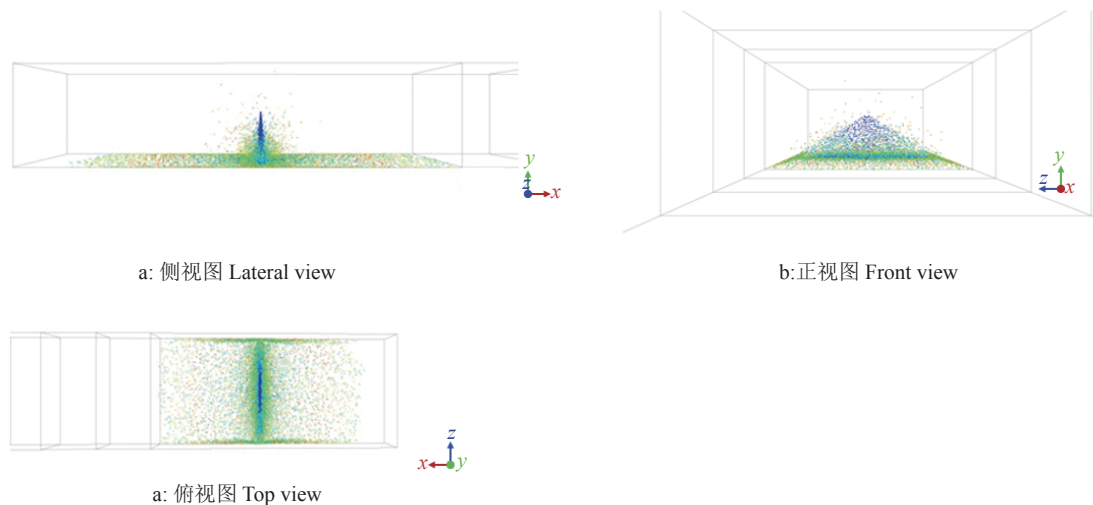


图3 无侧风影响下离散相在空间中的分布情况

**Fig. 3 Distribution of discrete phases in space without crosswind**

图 4 为无侧风条件下雾滴在椭圆面内准确沉积比例 ( $R_a$ ) 和水平飘移率 ( $R_h$ ) 的沉积分布, 不同颜色代表不同的离散相沉积质量浓度, 蓝色向红色渐变代表浓度逐渐加大。由图 4 可知, 在无侧向风时, 计算机模拟所得离散相雾滴在底面上的沉积质量浓度云图与通过式 (1)~(3) 计算所得区域基本一致, 均沉积在以喷嘴为中心的椭圆区域。由于喷嘴正下方中间区域直接喷射且喷口中间较宽, 所以离散相粒子能大量沉积; 底面中心向两侧

的沉积量逐渐下降, 主要是由于喷嘴喷口两侧较窄, 且喷施雾滴在  $z$  轴方向的运动势能随喷施时间的增加而减小, 因此, 雾滴粒子在喷施范围内雾量沿  $z$  方向总体上呈先增大后减小的正态分布。另外, 由沉积比例图可以看出, 风洞壁两侧处也出现较大浓度的雾滴沉积, 这主要是由于单喷头喷嘴幅两侧的部分雾滴在运动势能减小的情况下向两侧发生了扩散, 并与风洞侧壁碰撞反弹至底部从而产生一定的雾滴沉积。

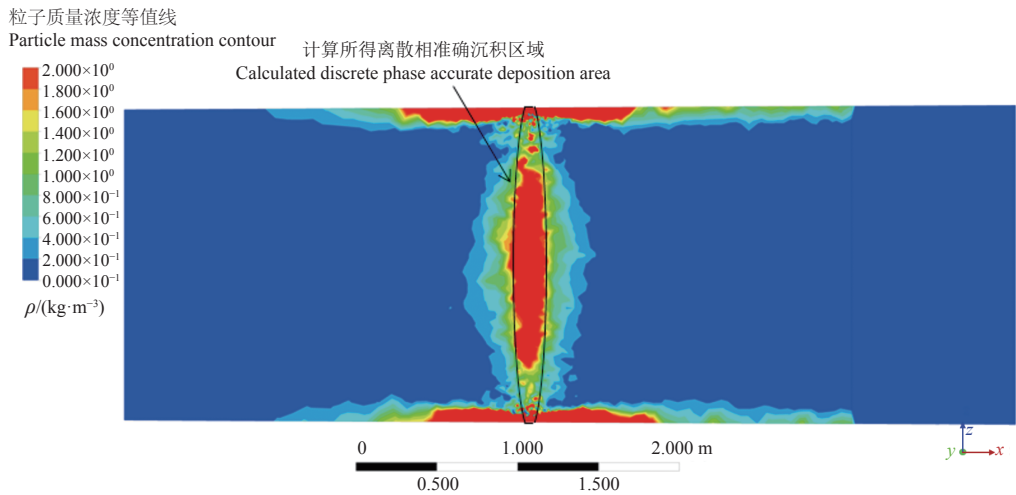


图 4 模拟离散相在底面上的沉积浓度云图

Fig. 4 The cloud map of discrete phase deposite concentration on the bottom surface

为更好地反映出不同侧风风速参数下的离散相雾滴分布特性, 选择适当的视角以反映离散相雾滴沉积质量浓度区间。图 5 为侧风风速为 0~6 m/s 时雾滴在计算区域内  $R_a$  和  $R_h$  的沉积分布图。由

图 5 可以看出, 随着侧风风速的增加, 雾滴水平飘移越来越明显, 高浓度沉积区域逐渐偏离喷雾中心轴线 ( $x=0$  m) 朝下风向偏移, 沉积质量浓度大于  $0.008\text{ kg/m}^3$  的  $x$  轴区域边界由 5 m 逐渐推移至 13 m。

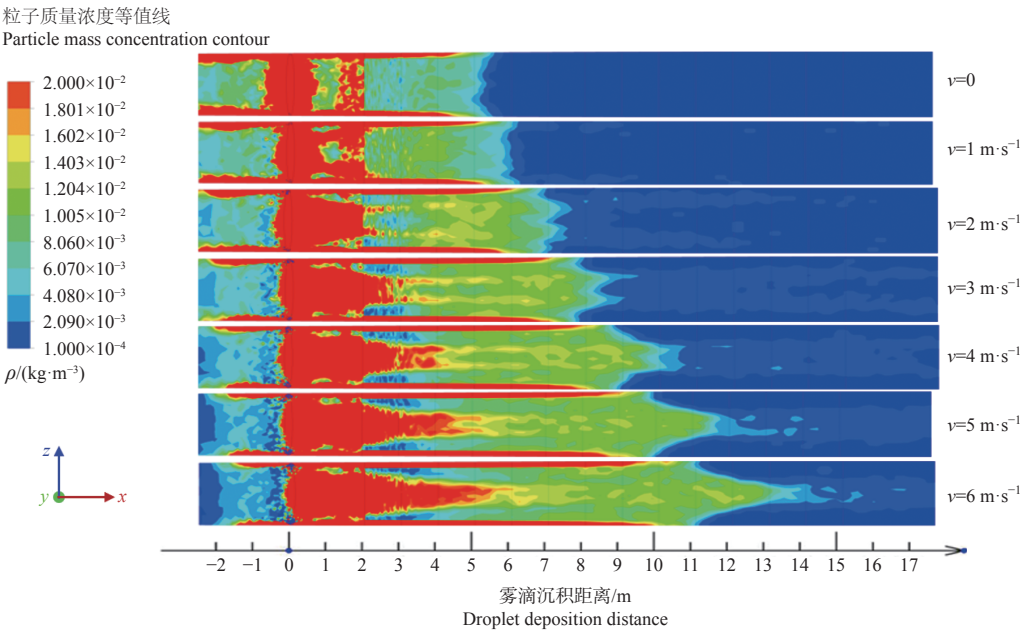


图 5 不同风速下的雾滴分布图

Fig. 5 Distribution of droplets at different wind speeds

对于沉积在底面上的雾滴,  $x$  轴向沉积质量浓度分布变化明显,  $z$  轴向雾滴沉积质量浓度分布接近对称, 从  $z$  轴中心轴线向两侧呈现出由低到高再到低的“M”型分布。对于下风向的离散相沉积质量浓度, 底面与两壁交接处有 2 段沉积质量浓度很高的窄条, 在距两侧壁面 0.1 m 处存在一块沉积质量浓度较低的区域, 且随着风速增大, 区域沿  $x$  轴方向逐渐拉长。

图 6 为在  $x=1$  m 平面内气流的  $z$  方向分速度云图和风洞内  $x$  轴方向的流线图。由图 6 的云图可见, 雾滴粒子由蓝向红运动的方向表示  $z$  方向分速度由负变为正; 雾滴粒子在  $x=1$  m 处的分速度近似对称分布, 表明离散相粒子在  $x=1$  平面及其附近空间内存在着涡旋运动。图 6 的流线图可以看出, 从

入口处进入的平行气流通过扇形喷雾面后形成 2 个关于  $xy$  平面对称的涡旋, 涡旋的影响范围超出喷雾的初始位置, 导致雾滴在一定空间范围内出现上扬; 在此处两侧下风向的小雾滴很容易被卷到喷施扇面后方, 导致小雾滴均沉积在靠近风洞中心平面处, 此时离散相呈现出非流体特性, 说明离散相雾滴和连续相空气相互耦合且彼此影响。

为进一步表明侧向风速对雾滴飘移的影响, 用狭长椭圆内雾滴沉积质量占总的离散相沉积质量的比例来表示某一风速下的  $R_a$ , 用下风向 2 m 后地面和出风口捕获雾滴沉积量占总的沉积质量的比例来表示某一风速下的  $R_b$ , 根据计算机模拟针对风洞内底面上不同区域的雾滴沉积质量的统计结果, 计算雾滴在不同风速下的  $R_a$  和  $R_b$ , 结果如图 7 所示。

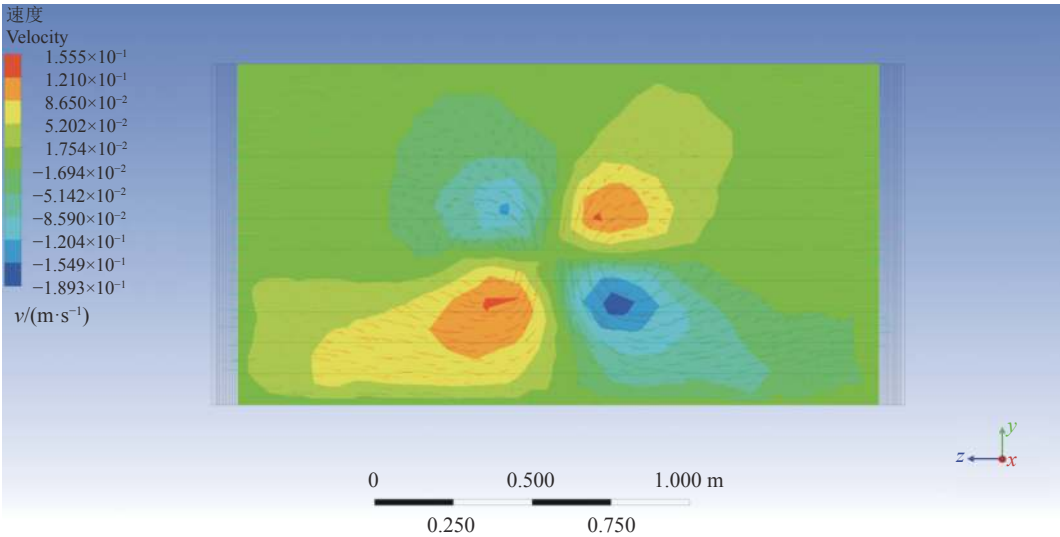


图 6 在  $x=1$  m 平面内离散相粒子  $z$  方向分速度矢量图

Fig. 6  $z$ -direction velocity of discrete phase particles in the plane with  $x=1$  m

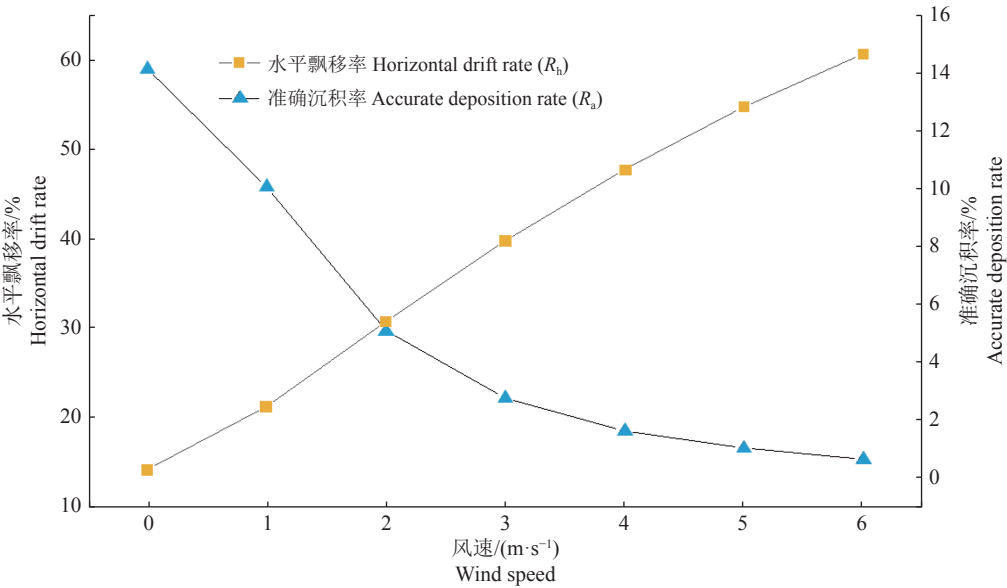


图 7 侧风影响下模拟离散相准确沉积率和水平飘移率

Fig. 7 Accurate deposition rate and horizontal drift rate of simulated discrete phases under crosswind



由图 7 可以看出,随着侧向风速的增加,模拟离散相的  $R_a$  呈指数下降,由 14.11% 降到 0.66%;  $R_h$  呈线性增加,由 14.25% 增加到 60.58%。可见,随着侧向风速的增大,离散相雾滴飘移程度越来越严重。为进一步分析沉积结果和侧向风速的相关性,对  $R_a$ 、 $R_h$  与风速 ( $v$ ) 分别进行回归分析,回归方程分别为:  $R_a=0.1476e^{-0.529v}$  ( $R^2=0.995$ ) 和  $R_h=0.0796v+0.1456$  ( $R^2=0.995$ ),对应的显著性水平  $P$  值分别为 0.0063 和 0.0036,均达极显著相关 ( $P<0.01$ ),表明随着侧向风速的增加,离散相  $R_a$  呈指数式降低、 $R_h$  呈线性增加;侧向风速的增加不利于喷施雾滴在目标区域内的准确沉积,容易造成飘移。

3.2 风洞试验结果及数据对比分析

对 LU 120-015 和 LU 120-03 喷头在不同风速下的雾滴飘移进行风洞试验,喷施压力为 0.3 MPa,侧向风速分别为 1、3 和 6 m/s,结果如图 8 所示。由图 8 可知,在侧风风速为 1 m/s 时,喷头在下风向 2 m 处的竖直平面内雾滴通量由下至上逐渐减小;在侧风风速为 3 和 6 m/s 时,雾滴通量先增大后减小。可见,当侧向风速较小时,在喷头压力作用下,雾滴上扬程度低,主要向底部运动;当侧向风速增加时,较大的侧向风速会导致喷出的雾滴上扬,此时雾滴在竖直平面内的分布呈先增加后减少的趋势。

对于下风向 2 m 及大于 2 m 的雾滴沉积飘移量,在不同侧风风速条件下,随着收集线离喷头水

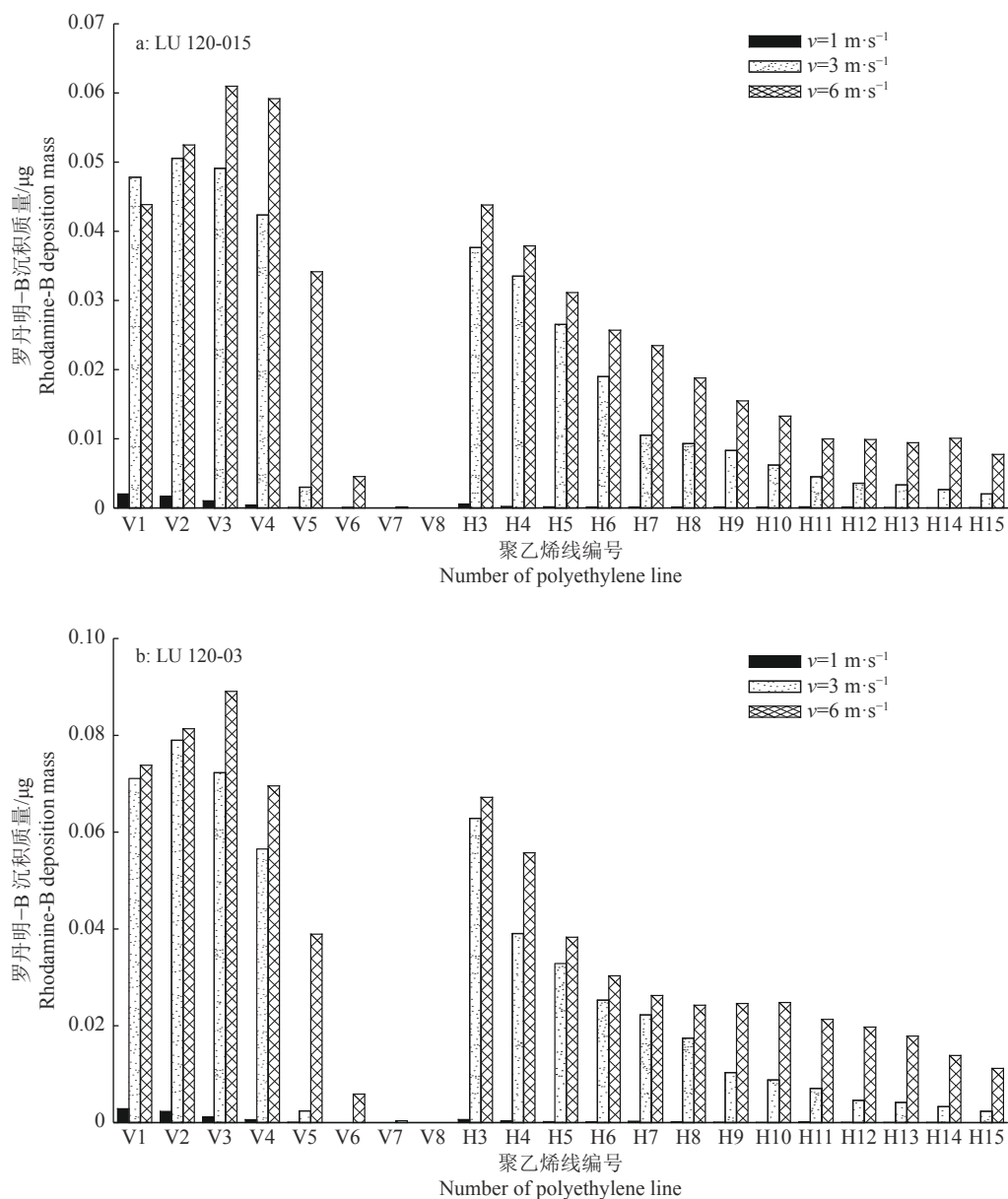


图 8 不同侧风风速下 LU 120-015 和 LU 120-03 喷头雾滴在采集线上的沉积分布

Fig. 8 The deposition and distribution of droplets of LU 120-015 and LU 120-03 nozzles on the sample line at different crosswind speeds

平距离的增加, 雾滴沉积量均呈现逐渐下降的趋势, 但下降速率有一定的差异。当侧向风速为 3 m/s 时, 随采样距离的增加, 雾滴沉积量下降速率大于侧向风速为 6 m/s 时。相对于大雾滴, 小雾滴沉降速度慢, 随着风速逐渐增加, 侧向风对雾滴水平飘移距离的影响也逐渐增大, 小雾滴更容易受到侧向风的影响, 且风速越大, 雾滴的飘移距离越远。当侧向风速为 3 m/s 时, 飘移的雾滴及数量非常小, 沉积量下降速率较快; 侧向风速为 6 m/s 时的沉积情况相反, 且同一位置采集到的雾滴沉积量大于 3 m/s 时的雾滴沉积量。可见, 侧向风速较大时雾滴飘移的数量及粒径增加, 从而导致在同一位置处采集到的雾滴沉积量较大。通过计算得到 3 种侧风风速下雾滴飘移量分布的特征高度 ( $h$ ) 分别为 0.175、0.200 和 0.245 m, 对应的水平飘移率分别为 0.4%、48.1% 和 75.1%, 这与雾滴飘移量随着风速的增大而逐渐增加的规律相吻合。

通过统计模拟结果中竖直单位距离内的离散相粒子沉积质量, 获得模拟结果的飘移量数据。将风洞内水平布置的 V1(H2)、H3~H15 聚乙烯线上的罗丹明-B 沉积质量与收集距离进行线性拟合, 反推得出在一定距离下的雾滴飘移量数据。通过 SPSS 软件进行相关性分析可知, 在 1、3 和 6 m/s 侧风风速下, 风洞实测与数值模拟的雾滴飘移量的相关系数分别为 0.905、0.995 和 0.978。对计算机模拟的雾滴水平飘移率 ( $R_{ht}$ ) 和风洞试验中雾滴水平飘移率 ( $R_{hs}$ ) 进行相关分析, 其表达式为  $R_{ht}=1.888R_{hs}-0.3533$  ( $R^2=0.963$ ), 对应的显著性水平  $P$  值为 0.038 ( $P<0.05$ ), 表明两者具有较强的相关性, 从而验证了模拟结果的准确性。

## 4 结论

本文以航空植保无人机平面扇形喷头为研究对象, 采用 CFD 离散相模型的粒子跟踪技术方法模拟雾滴在低风速条件下的沉积飘移特性, 并结合相近情况下的风洞试验对扇形喷头的雾滴沉积飘移特性进行了测试和验证。研究结果表明:

1) 通过对模型结果的统计和分析, 随着侧向风速的增加, 模拟离散相粒子的准确沉积率 ( $R_a$ ) 由 14.11% 呈指数下降到 0.66%, 水平飘移率 ( $R_h$ ) 由 14.25% 呈线性增加到 60.58%, 可见, 随着侧向风速的增大, 离散相雾滴飘移程度越严重, 雾滴水平飘移越明显。

2) 在不同的侧向风速下, 雾滴在竖直平面内的分布有差异。计算得出 1、3 和 6 m/s 风速下雾滴的

飘移量分布的特征高度 ( $h$ ) 分别为 0.175、0.200 和 0.245 m, 水平飘移率分别为 0.4%、48.1% 和 75.1%, 可见, 随侧向风速的增加, 雾滴飘移程度急剧增加。

3) 通过对比计算机模拟与风洞测试结果可知, 设置合适的喷施参数, 计算机模拟可以获得与风洞测试试验有一定相关性的雾滴飘移结果; 对比计算机模拟及风洞测试试验的水平飘移率发现, 两者具有显著的相关性 ( $R^2=0.963$ ,  $P<0.05$ ), 说明数值模拟和风洞测试试验结合对于雾滴飘移具有较好的预测效果。

### 参考文献:

[1] 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]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 53-59.

[2] DEKEYSER D, DUGA A T, VERBOVEN P, et al. Assessment of orchard sprayers using laboratory experiments and computational fluid dynamics modelling[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(2): 157-169.

[3] CROSS J V, WALKLATE P J, MURRAY R A, et al. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 3: Effects of air volumetric flow rate[J]. *Crop Protection*, 2003(22): 381-394.

[4] 周志艳, 明锐, 臧禹, 等. 中国农业航空发展现状及对策建议[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 1-13.

[5] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(12): 94-96.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 张京, 宋坚利, 何雄奎, 等. 扇形雾喷头雾化过程中雾滴运动特性[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4): 66-69.

[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.

[10] TESKE M E, THISTLE H W, HEWITT A J, et al. Rotary atomizer drop size distribution database[J]. *Transactions of the ASABE*, 2005, 48(3): 917-921.

[11] 张慧春, 周宏平, 郑加强, 等. 农药助剂对空中和地面防控林业有害生物的雾滴粒径影响[J]. *林业科学*, 2020, 56(5): 121-132.

[12] 丁素明, 薛新宇, 董祥, 等. 喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 315-322.

[13] KIRK I W. Measurement and prediction of atomization

- parameters from fixed-wing aircraft spray nozzles[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 693-703.
- [14] FRITZ B K, HOFFMANN W C, LAN Y. Evaluation of the EPA drift reduction technology (DRT) low-speed wind tunnel protocol[J]. *Journal of ASTM International*, 2009, 6(4): 183-191.
- [15] HOFFMANN W C, FRITZ B K, LAN Y. Evaluation of a proposed drift reduction technology high-speed wind tunnel testing protocol[J]. *Journal of ASTM International*, 2009, 6(4): 212-223.
- [16] MARTIN D E, CARLTON J B. Airspeed and orifice size affect spray droplet spectrum from an aerial electrostatic nozzle for fixed-wing applications[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(1): 5-10.
- [17] 曾爱军, 何雄奎, 陈青云, 等. 典型液力喷头在风洞环境中的飘移特性试验与评价[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 78-81.
- [18] 张慧春, DORR G, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(6): 53-57.
- [19] 唐青, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 高速气流条件下标准扇形喷头和空气诱导喷头雾化特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 121-128.
- [20] 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*, 2016, 154: 62-75.
- [21] HONG S W, ZHAO L, ZHU H. CFD simulation of air-flow inside tree canopies discharged from air-assisted sprayers[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 149: 121-132.
- [22] 孙国祥, 汪小昆, 丁为民, 等. 基于 CFD 离散相模型雾滴沉积特性的模拟分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 13-19.
- [23] 刘雪美, 苑进, 张晓辉, 等. 气流辅助式喷雾工况参数对雾滴飘移特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(S1): 67-72.
- [24] 郑力铭. ANSYS FLUENT15.0 流体计算从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 156-181.
- [25] CROWE C T, SMOOT L D. Multicomponent conservation equations[C]//SMOOT L D, PRATT D T. *Pulverized-coal combustion and gasification*. Boston: Springer, 1979: 15-54.
- [26] ROURKE T D, HALL W J. Seismic behavior and vulnerability of pipelines[J]. *ASCE*, 1991, 11: 73-79.
- [27] 张慧春, DORR G, 郑加强, 等. 喷雾飘移的风洞试验和回归模型[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 94-100.

【责任编辑 周志红】