

# 基于CFD果园风送式喷雾机雾滴沉积特性研究

李杰 赵纯清 李善军 陈红 丁淑芳

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

**摘要** 自制应用于柑橘园施药的风送式喷雾机,并基于CFD建立喷雾机雾滴运动轨迹及沉积模型,考察该喷雾机雾滴沉积特性及送风方向对雾滴沉积的影响。根据喷雾机尺寸参数,建立喷雾流场二维模型,并确定DPM模型参数,模拟获得距喷头不同距离的垂直截面上雾滴沉积量。试验结果显示:在距喷头1.0 m的范围内,雾滴沉积特性与试验结果相符,且在1.0 m范围内,送风角度的增加对雾滴飘移影响较小,随着与喷头距离的增大,送风角度对底部雾滴飘移损失的影响逐渐加剧;在距喷头1.0 m范围以外,雾滴沉积特性与实际试验结果偏差较大,但雾滴沉积量随与喷头距离的增大而逐渐减少的规律是一致的。

**关键词** 风送式喷雾机; CFD模拟; 雾滴沉积; 雾滴飘移; 送风角度

**中图分类号** S 432    **文献标识码** A    **文章编号** 1000-2421(2019)06-0171-07

果园风送式喷雾机雾滴运动特性受到压力、风速等施药参数以及气候等因素的影响。通过试验研究这些因素的具体作用效果,耗费时间长且指标测量难度较大。采用CFD模拟技术建立雾滴运动模型,在分析这些因素的具体作用效果方面,可大量节省时间<sup>[1]</sup>。目前,CFD技术广泛应用于风送式喷雾机的研究,且主要应用于结构较为简单的离心式雾化喷雾机<sup>[2~4]</sup>,而风扇出口处的气流参数对雾滴运动特性具有显著的影响<sup>[5~8]</sup>。祁力钧等<sup>[9]</sup>利用Fluent建立了Hardi LB-255型果园风送式喷雾机雾滴运动轨迹模型,结果显示当风速为20 m/s、喷嘴工作压力为0.7 MPa时,在距离风口1.4 m的区域内,模型能够准确描述雾滴沉积特性。Delete等<sup>[10~11]</sup>采用Fluent模拟了风帘型风送式喷雾机气流速度场分布,分析了风速对气流场分布和雾滴运动特性的影响。Baetens等<sup>[12]</sup>对风送式喷杆喷雾机雾滴漂移分布规律进行了模拟研究,结果显示喷杆高度、风速、风偏和雾滴喷射速度对雾滴飘移量均具有影响,其中喷杆高度对雾滴飘移量影响最大,其次是风速,而风偏和雾滴喷射速度影响较小。Tsay等<sup>[13]</sup>采用Fluent对单个喷嘴风送式喷雾机在不同条件下的

雾滴沉积分布和防飘移效果进行了模拟,结果表明,气动屏蔽具有降低雾滴飘移的作用。以上研究主要是针对离心式送风喷雾进行的,该送风方式存在雾滴飘移严重、雾滴有效利用率不足等问题<sup>[14]</sup>。因此,针对上述问题,本研究立足柑橘喷药,采用多风筒仿形送风方式,对自制的风送式喷雾机的气流速度场分布及颗粒运动轨迹进行相关研究,通过ICEM-CFD和Fluent建立相关模型并求解分析,最后通过标杆试验进行相应的验证分析,为喷雾机仿形设计及喷雾参数设置提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 几何模型建立

模型选用的喷雾机为华中农业大学工学院自主设计的果园风送式喷雾机,其结构如图1所示。左右两侧分别安装有格强公司生产的标准扇形喷头8个(工作压力为0.8 MPa时,流量为1.5 L/min),且风扇和喷头的安装位置具有对称性,因此,只需选取一侧区域进行模拟即可。具体工作过程:拖拉机输出轴经过万向传动装置连接至喷雾机输入轴,该输入轴为T型增速机输入轴,T型增速机一侧连接活

收稿日期: 2018-12-05

基金项目: 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS-26); 公益性行业(农业)科研专项(201040336); 中央高校基本科研业务费专项(26620015PY144); 国家重点研发计划(2017YFD0202001)

李杰,硕士研究生。研究方向: 水果生产机械化技术与装备。E-mail: 2351974565@qq.com

通信作者: 赵纯清,博士,副教授。研究方向: 水果生产机械化技术与装备。E-mail: zhaochunqing@mail.hzau.edu.cn

塞泵进行喷雾作业,另一侧连接L型增速机进行二级增速,L型增速机输出轴将动力传递至多轴头(一端输入、六端输出),多轴头输出部分通过6根软轴分别与6个轴流风机连接进行送风。根据柑橘树高约3.0 m、干高约0.6 m等基本尺寸参数,将底部风机和喷头(图1A处)距离地面高度设置为0.7 m,3个风机之间距离为1.0 m(预试验表明,3个风机风量恰好能覆盖整棵果树),由下至上对风机进行编号,依次为1~3。各喷头之间距离为0.3 m(预试验表明此距离为最佳间隔距离),依次向上布置8个喷头,喷杆支架总高度为3.0 m。

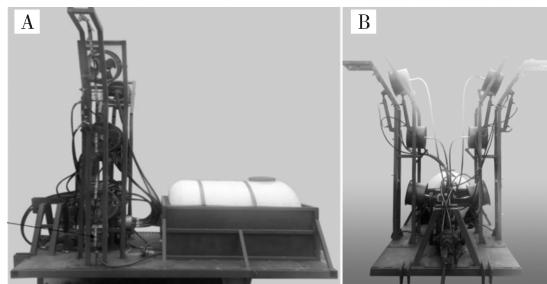


图1 果园风送式喷雾机

Fig.1 Orchard pneumatic sprayer

在ANSYS-WORKBENCH中建立几何模型,如图2所示。模拟计算区域依照喷雾机基本尺寸进行建模,高度取3.0 m,右边界距风扇中心分别取1.5、1.0 m(超出1.5 m,模拟结果偏差较大,在1.0 m时模拟结果与试验较为接近;受篇幅所限,在1.0~1.5 m时仅展示出了1.25 m处的对比结果);即在距离喷头1.0和1.5 m时分别进行仿真计算,用于检测不同距离的2个截面上雾滴沉积量。AB为1号风机进风口,BC为2号风机进风口,CD为3号风机进风口,其余尺寸根据喷雾机喷杆的结构和尺寸确定。沿模拟区域高度方向每隔20 cm划分1个药液采集单元,总计布置15个药液采集单元,分别为Ma、ab、bc、cd、de、ef、fg、gh、hi、ij、jk、lm、mn、nP,并由下至上依次编号01~15(图2)。

## 1.2 区域网格化

由于2个流场区域内的3个风扇布置相同,形状结构规整,因此,网格类型选用结构化网格,网格形状为四边形,边长均为3 cm,网格化后2个区域的网格总数分别为3 456(区域一)和2 344(区域二)(图3)。

## 1.3 仿真实验条件及假设

为保证模拟的可靠性以及与实际作业条件的一

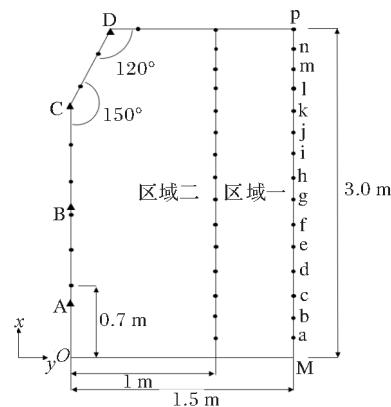
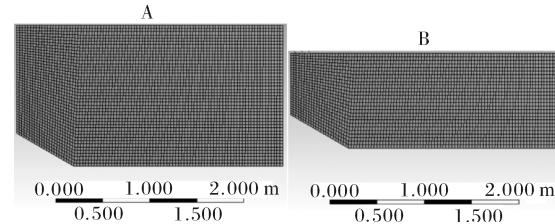


图2 雾滴沉积模拟区域

Fig.2 Simulation area of droplet deposition



A:区域一 Area 1; B:区域二 Area 2.

图3 模拟区域网格图

Fig.3 Grid diagram of simulated area

致性,同时兼顾数值模拟计算在迭代时间方面的可行性,根据相关文献对DPM模型作如下假设<sup>[15~20]</sup>:(1)假定离散相(颗粒相)非常稀薄(即颗粒的体积分数在12%以内),颗粒与颗粒之间的相互作用、颗粒的体积分数对连续相的影响均可忽略不计。(2)研究表明,在拖拉机前进速度较低且波动较小的情况下(即远小于雾滴的运动速度),该前进速度对雾滴沉积量、漂移率影响甚微<sup>[12]</sup>。因此,可以将整个风送式喷雾机外流场简化成一个二维场来进行研究。(3)根据祁力钧等<sup>[9]</sup>研究,雾滴服从Rosin-Rammler分布,雾滴运动终结方式只有沉积、漂移和蒸发3种形式。

## 1.4 仿真实验物理模型

根据祁力钧等<sup>[9]</sup>对Hardi LB-255型果园风送式喷雾机的研究,雾滴在运动过程既受到重力和空气阻力的作用,又伴随着质量和动量的交换。因此,对于连续相(空气),采用流体力学K- $\epsilon$ 标准两方程湍流模型;对于离散相(雾滴),主要运用拉格朗日法描述颗粒的运动轨迹。具体包括,容积比率方程、密度方程、动量方程和能量方程,表达式如下。

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v}_q \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{aq}}{\rho_q} \quad (1)$$

$$\rho = \alpha_q \rho_q + (1 - \alpha_q) \rho_q \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \\ & \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} [K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i}] - \\ & \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} + S_h \quad (4) \end{aligned}$$

式(1)~(4)中,  $\alpha_q$  为第  $q$  相流的容积比率;  $S_{aq}, S_h$  均为广义源项;  $\rho$  为平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_q$  为第  $q$  相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\vec{v}$  为速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\mu$  为湍流动力黏度,  $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$ ;  $\vec{F}$  为第  $i$  速度分量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $K_{\text{eff}}$  为有效热传导系数,  $K_{\text{eff}} = k + k_t$ ,  $k_t$  为湍流热传导系数;  $J_j$  为组分  $j$  的扩散流量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 其他参数可参考 Fluent 用户手册。

## 1.5 DPM 模型参数设置

模拟过程中无温度变化, 测得大气温度为  $27^\circ\text{C}$ , 雾滴温度为  $20^\circ\text{C}$  (与水的温度相同), 空气的相对湿度为  $40\%$ , 空气黏度为  $0.01839 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 水的黏度为  $1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 雾滴表面张力  $\vec{F}$  为  $0.072 \text{ N}/\text{m}$ , 扇形喷头质量流率为  $0.0039 \text{ kg}/\text{s}$ 。计算过程中, 雾滴粒径采用均匀分布 (uniform), 雾滴的粒径  $120\sim250 \mu\text{m}$ , 试验粗略测得雾滴粒径为  $200 \mu\text{m}$  左右。风机出口风速为  $11.78 \text{ m}/\text{s}$ , 1 号风机送风角度分别设置为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  (2 号风机保持水平侧向送风, 顶部 3 号风机水平向下倾斜  $30^\circ$ , 并保持不变以维持送风方向与柑橘树外形相符和法向垂直)。在压力为  $0.6 \text{ MPa}$  时, 喷头出口处雾滴速度为  $12.4 \text{ m}/\text{s}$ , 喷头锥角为  $65^\circ$ , 考察 1 号风机在不同的送风角度下雾滴运动轨迹的范围。

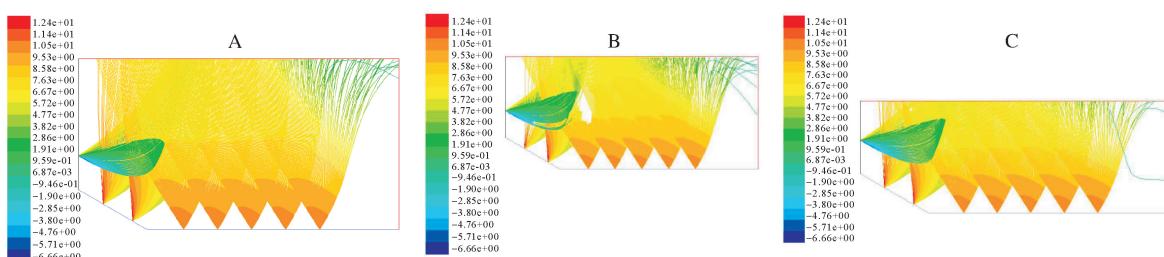
## 1.6 边界条件设置

连续相(空气)边界条件: AB 为 1 号风机送风口, 入口风速设为  $11.78 \text{ m}/\text{s}$ , 风送角度可调; BC 为 2 号风机送风口, 风速为  $11.78 \text{ m}/\text{s}$ , 送风角度固定, 即水平横向送风; CD 为 3 号风机送风口, 风速为  $11.78 \text{ m}/\text{s}$ , 送风角度为  $30^\circ$ , 即斜向下送风。离散相(颗粒)边界条件: OC、CD 为进风口和喷头布置区域, 离散相设为 escape; DP 为上边界, 雾滴漂移到空中, 离散相设为 escape; PM 为雾滴沉积边界, 离散相设为 trap; OM 为雾滴漂移下边界(地面), 离散相设为 escape。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟试验结果

对距离喷头中心不同距离的 3 个模拟区域分别进行模拟。首先, 对于连续相气体, 采用  $K-\epsilon$  标准两方程模型进行迭代计算; 之后, 对离散相进行射流源(喷头)相关参数(锥角、出口速度、粒径、颗粒数量等)的设置, 再次初始化后进行离散相的迭代求解, 得到雾滴运动轨迹模型。在每个送风角度条件下, 2 个模拟区域均进行 2 次重复模拟, 取平均值作为最终模拟结果。由于文章篇幅有限, 仅列出了在送风角度为  $45^\circ$  时 3 个模拟区域的雾滴运动轨迹云图, 如图 4 所示。对运算结果进行相应的处理, 可以得到各个采集单元的雾滴沉积量(颗粒数量以及质量流量)、地面沉积量以及空中飘移量。最终得出: (1) 在距离喷头中心右侧不同距离的垂直面上, 随着距离的增大, 各单元雾滴沉积量逐渐减少; 且在距离地面  $0\sim0.6 \text{ m}$  和  $2.4\sim2.8 \text{ m}$  的区域内, 雾滴分布较少; 此外, 雾滴在地面损失量、空中飘移量也随着距离的



A: 距离喷头  $1.5 \text{ m}$  Distance is  $1.5 \text{ m}$  from the nozzle; B: 距离喷头  $1.25 \text{ m}$  Distance is  $1.25 \text{ m}$  from the nozzle; C: 距离喷头  $1.0 \text{ m}$  Distance is  $1.0 \text{ m}$  from the nozzle.

图 4 CFD 模拟试验雾滴运动轨迹仿真图

Fig.4 Simulation diagram of droplet trajectory in CFD

增大而增大。(2)随着送风角度的增大(模拟试验选取了 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 等4种送风角度),距离喷头中心右侧1.5 m的垂直面上,雾滴飘移逐渐加剧,符合实际规律;而在距离为1.0 m处的垂直面上,雾滴飘移损失量较少,即在小于1.0 m的区域内,所建模型能较准确地描述雾滴沉积规律。

## 2.2 雾滴沉积分布试验验证

在与仿真模型研究相同的条件下,展开相应的标杆试验。杆架高3.0 m、宽1.6 m,并布置成1行9列的矩阵(支架可进行移动用以调节行距),距离在20~80 cm可调,列距为20 cm,整体大小与果树相仿,如图5所示。每根标杆上每20 cm作为1个药液采集单元,总计布置15个药液采集单元,每个单元内均匀布置3张直径为7.0 cm的滤纸组成该单元的药液采集样本,并用双面胶粘附于标杆上。以荧光素钠作为示踪剂,采用紫外分光光度计检测荧光强度,根据标准溶液浓度与光强度之间的线性关系,获得样品溶液浓度,进而计算出雾滴在某一采样点处的雾滴沉积量,药液质量浓度为0.5 g/L。风扇出口处的气流速度为11.78 m/s(实测),底部风机的送风角度分别为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ ,喷嘴工作压力为0.6 MPa。为了保证滤纸上沉积的荧光素钠能够被紫外分光光度计明显地检测到,将拖拉机前进速度设定为1.0 m/s。



图5 试验装置图

Fig.5 The diagram of experimental equipment

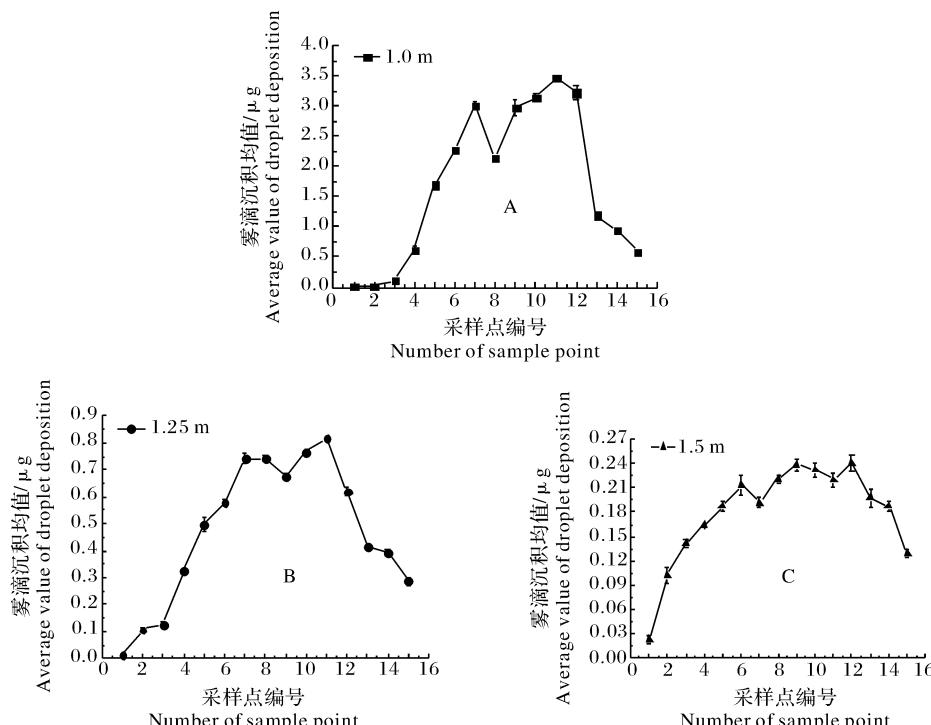


图6 距喷头不同距离处雾滴沉积量

Fig.6 Deposition of droplets at different distances from nozzles

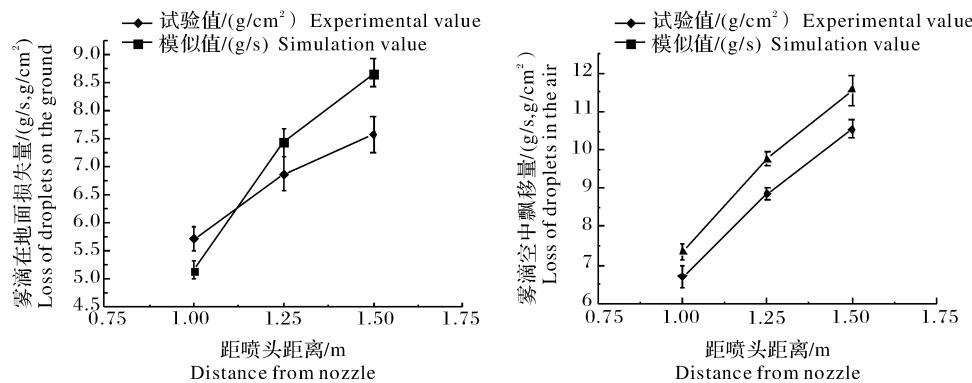


图 7 距喷头不同距离的雾滴损失量

Fig.7 The loss of droplets at different distances from nozzle

和 1.25 m(0~0.90  $\mu\text{g}$ , 图 6B)时的雾滴沉积量;且在 1.0 m 时,由图 7 可知,底部雾滴飘移损失量和空中飘移量均小于 1.25 m 和 1.50 m 时的雾滴损失量,这与模拟结果基本相符。

为了更加直观地显示模拟和试验所得各药液采集单元雾滴沉积量的相对差异性,试验将模拟所得各药液采集单元雾滴沉积质量流量(3 次模拟结果平均值)和试验所得单位面积雾滴沉积量(9 组数据平均值)进行单位统一化。即,使模拟和试验结果在同一计量单位下进行比较。表 1 为转换后结果,转换计算公式如下:

$$D_{\text{SD}} = 10^4 \times \frac{D_{\text{SD}} \cdot c}{h \cdot v \cdot d} \cdot R \quad (5)$$

式(5)中:  $D_{\text{SD}}$  为经转换后模拟所得单位面积荧光素钠的沉积量,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;  $D_{\text{SD}}$  为转换前模拟所得各药液采集单元雾滴沉积的质量流量,  $\text{g}/\text{cm}^2$ ;  $c$  为试验前药箱中所配置的荧光素钠溶液的质量浓度,  $\text{g}/\text{mL}$ ;  $h$  为各药液采集单元的高度, 本试验取 20 cm;  $v$  为拖拉机前进速度, 本试验取 1.0 m/s;  $d$  为荧光素钠溶液的密度,  $\text{g}/\text{mL}$ ;  $R$  为田间试验时荧光素钠的回收率, %。

试验过程中, 荧光素钠不可能完全回收, 因此, 转换过程中就必须考虑荧光素钠的回收率, 结合田间试验, 得到荧光素钠的回收率约为 85.06%。以标杆试验为基准值, 转换后的模拟结果与田间试验结果的相对误差值为:

$$E = \frac{|q_m - q_s|}{q_m} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中:  $q_m$  为试验所得单位面积药液沉积量,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;  $q_s$  为经转换后, 模拟所得单位面积药液沉积量,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

从表 1 可知, 在距离喷头 1.0 m 位置处, CFD 模拟结果与田间试验的相对误差值为 15%~46%, 相对误差的平均值为 32.8%; 在距离喷头 1.25 m 位置处, CFD 模拟结果与田间试验的相对误差值为 51%~167%, 相对误差的平均值为 108.3%; 在距离喷头 1.5 m 处, 相对误差值为 55%~436%, 相对误差的平均值为 278.5%, 此时该距离的 CFD 模型已不能准确模拟雾滴运动特性, 仍需进一步地改进。主要原因在于, 距离喷头中心较远处, 雾滴运行速度较小, 受自然风(小于 3.0 m/s)的影响, 雾滴发生严重的侧向飘移, 侧向风已经完全掩盖了风送系统气流场对雾滴运动特性的作用, 导致实际测量结果误差偏大。

由表 2 可知, 距离喷头越远, 相对误差均值越大, 模拟结果可靠性越低, 在距离为 1.75 m 时最高相对误差已超出了 400%; 送风角度的增大, 相对误差均值略微增加, 这是因为送风角度加大了底部(0~0.6 m)区域雾滴飘移损失; 但距离的增大所造成的雾滴损失量要远高于送风角度。由于送风角度有助于增加雾滴在叶片反面沉积量及有效缓解了顶部雾滴飘移, 且在 0~0.6 m 区域内雾滴飘移损失比较低, 因此, 送风角度的存在对于提高雾滴沉积效果具有促进作用。

### 3 讨 论

与传统的离心风机径向送风模式的风送喷雾方式相比, 本研究根据柑橘树树形进行了喷雾支架的仿形喷雾模拟, 有效缓解了果树顶部施药量不足、雾滴飘移等问题, 其优势主要体现在以下方面。一是在距喷头不同距离的竖直截面上, 雾滴沉积量随与喷头距离的增大而减少; 且雾滴在地面损失量和

表1 模拟和标杆试验雾滴沉积量的差异

Table 1 Difference of droplet deposition amount between simulation and experiment

编号 Number	距离喷头 1.50 m Distance is 1.50 m			距离喷头 1.25 m Distance is 1.25 m			距离喷头 1.00 m Distance is 1.00 m		
	模拟值/ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Simulation value	试验值/ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Experimental value	相对 误差/% Relative error	模拟值/ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Simulation value	试验值/ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Experimental value	相对 误差/% Relative error	模拟值/ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Simulation value	试验值/ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Experimental value	相对 误差/% Relative error
	Simulation value	Experimental value	Relative error	Simulation value	Experimental value	Relative error	Simulation value	Experimental value	Relative error
1	0.035 809	0.023	55.7	0.053 022	0.015	51.0	0.008 526	0.006	42.1
2	0.162 847	0.102	59.7	0.151 108	0.107	67.0	0.034 957	0.025	39.8
3	0.512 413	0.142	260.9	0.668 013	0.128	122.0	0.060 535	0.110	45.0
4	0.717 463	0.164	337.5	1.775 011	0.325	133.0	0.844 074	0.625	35.1
5	0.861 552	0.187	360.7	2.329 007	0.499	99.0	1.221 776	1.697	28.0
6	0.895 230	0.213	320.3	3.016 010	0.579	22.0	1.526 580	2.278	33.0
7	0.889 262	0.192	363.2	3.426 102	0.741	97.0	2.141 305	3.016	29.0
8	0.989 442	0.221	347.7	3.258 207	0.743	87.0	2.486 608	2.144	16.0
9	0.812 954	0.238	241.6	3.223 031	0.677	103.0	2.413 284	2.979	19.0
10	0.855 584	0.231	270.4	3.791 109	0.766	111.0	2.430 763	3.149	22.8
11	0.899 067	0.220	308.7	3.554 210	0.815	86.0	2.468 703	3.477	29.0
12	0.803 576	0.241	233.4	3.097 017	0.62	113.0	2.230 828	3.233	31.0
13	0.767 340	0.198	287.5	2.296 408	0.415	136.0	1.739 304	1.192	45.9
14	0.738 352	0.187	294.8	2.122 311	0.392	131.0	1.322 809	0.954	38.7
15	0.690 606	0.129	435.4	1.801 029	0.288	167.0	0.814 659	0.591	37.8

表2 不同的距离和送风角度时模拟雾滴沉积量的相对误差

Table 2 Relative error of droplet deposition amount between simulation and experiment at different distances and angles

%

送风角度/(°) Angle	距离喷头 1.00 m Distance is 1.00 m	距离喷头 1.25 m Distance is 1.25 m	距离喷头 1.50 m Distance is 1.50 m	距离喷头 1.75 m Distance is 1.75 m
0	25.3	58.4	133.4	330.2
15	28.2	82.6	189.5	378.6
30	31.1	97.3	246.7	403.7
45	32.8	108.3	278.5	409.1

空中飘移量均随与喷头距离的增大而增加,与模拟

的指导意义。

计算结果一致。这一规律与离心式送风喷雾方式研究结果相同,但本研究中雾滴损失量随距离的增大而增加的程度要远小于离心式。其次,本研究模拟结果与试验所得的雾滴沉积量的相对误差值也随距喷头距离的增加而增大,且在距喷头 1.0 m 的模拟区域内,误差较小,仅为 32%,各集单元内的雾滴沉积量及分布趋势与实际试验吻合。在距离相同的情况下,随着送风角度的增大,模拟与试验所得结果的相对误差略有增加,雾滴飘移增加缓慢。随着距离的增大,送风角度对于底部雾滴飘移量影响愈大。因此,在距离喷头 1.0 m 范围内,CFD 模型能够较为准确地模拟雾滴沉积特性。而离心式送风喷雾模型在距离为 1.0 m 范围内雾滴沉积量与实际结果相对误差超过 50%,主要原因在于离心式送风喷雾在果树顶部雾滴飘移严重,流场作用效果不再显著,且随着距离的增大该趋势更加明显。因此,本研究对于提高雾滴有效利用率、减少雾滴飘移量具有一定

为进一步提高雾滴有效沉积量、减少雾滴在非目标区域的覆盖率,后续将在仿形喷雾的基础上添加自动喷药等精准控制技术<sup>[20]</sup>,实现机械化与自动化的结合,以期达到以较少的施药量实现较好的病虫害防治效果。

## 参 考 文 献

- [1] 张海锋,许林云.果园喷雾机发展现状及展望[J].中国农机化学报,2014,35(3):112-118.
- [2] 丁天航,曹曙光,薛新宇,等.风送式果园喷雾机发展现状及趋势[J].中国农机化学报,2016,37(10):221-226.
- [3] 张晓辛,吕晓兰,丁素明,等.果园风送式喷雾机仿形喷雾试验研究[J].中国农机化,2011(3):68-72.
- [4] 贾晶霞,王飞.浅谈国内外几种典型的果园风送式喷雾机[J].新疆农机化,2015(2):18-20.
- [5] 何雄奎,曾爱军,何娟.果园喷雾机风速对雾滴的沉积分布影响研究[J].农业工程学报,2002,18(4):75-78.
- [6] 岳学军,洪添胜,李震,等.果树喷雾机防风罩对喷雾射程的影

- 响[J].农业工程学报,2007,23(4):94-98.
- [7] 傅泽田,王俊,祁力钧,等.果园风送式喷雾机气流速度场模拟及试验验证[J].农业工程学报,2009,25(1):69-74.
- [8] 崔志华,祁力钧,王俊,等.果园风送式喷雾机气体流场对飘移性的影响[J].现代农业科技,2007(14):64-66.
- [9] 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.
- [10] DELETE M A, JAEKEN P, DEBAER C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction[J]. Computer and electronics in agriculture, 2007, 55(5): 16-27.
- [11] DELEA M A, MOORA D E, SONCK B, et al. Modelling and validation of the air flow generated by across flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed[J]. Biosystems engineering, 2005, 92(2): 165-174.
- [12] BAESENS K, NUYTTENS D, VERBOVEN P, et al. Predicting drift from field spraying by means of 3D computational fluid dynamics model[J]. Computers and electronics in agriculture, 2007, 55(5): 16-27.
- [13] TSAY J, FOX R D, OAKAN E, et al. Evaluation of a pneumatic-shield spraying system by CFD simulation[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 47-54.
- [14] 胡红岩,任相亮,姜伟丽,等.植保无人机棉田喷洒农药沉积分布研究[J].华中农业大学学报,2018,37(5):59-64.
- [15] 王福军.计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [16] 吴子牛.计算流体力学基本原理[M].北京:科学出版社,2001.
- [17] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [18] 闫惠娟.果园风送式喷雾机流场数值模拟及试验研究[D].南京:南京农业大学,2011.
- [19] 吕晓兰,张美娜,常有宏,等.果园风送喷雾机导流板角度对气流场三维分布的影响[J].农业工程学报,2017,33(15):81-87.
- [20] 翟长远,赵春江, WANG N, 等.果园风送喷雾精准控制方法研究进展[J].农业工程学报,2018,34(10):1-15.

## Droplet deposition characteristics of CFD based orchard air-driven sprayer

LI Jie ZHAO Chunqing LI Shanjun CHEN Hong DING Shufang

College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

**Abstract** The CFD based droplet trajectory and deposition model were established to study the droplet deposition characteristics and the influence of air supply direction on droplet movement in the sprayer. The relevant parameters of the sprayer were measured. Two-dimensional spray flow model was established and the parameters of the model were determined. The droplet deposition on vertical section at different distances from sprinkler head was simulated. Validation test was conducted under the same conditions as the simulation. The results showed that the droplet deposition characteristics fitted well with the results tested. The increase of air supply angle had little effect on droplet drift within the range of 1.0 m from the sprinkler head. With the increase of the distance from the sprinkler head, the influence of air supply angle on the drift loss of fog droplets at the bottom increased gradually. The simulation results deviated greatly from the actual test results when the range of the sprinkler head exceeded the 1.0 m, but the rule of decreasing droplet deposition gradually with the increase of distance from sprinkler head was consistent.

**Keywords** air-driven sprayer; CFD simulation; droplet deposition; droplet drift; air-supply angle

(责任编辑:陆文昌)