

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.014

# 温室风送式弥雾机气流速度场与雾滴沉积特性分析\*

袁雪<sup>1</sup> 祁力钧<sup>1</sup> 冀荣华<sup>2</sup> 张建华<sup>1</sup> 王虎<sup>1</sup> 黄世凯<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 基于CFD模拟技术建立了温室风送式弥雾机气流速度场分布模型和雾滴沉积模型。根据实测的弥雾机相关参数,确定了边界条件及模型参数,得到了不同风送气流速度和不同喷头体倾角条件下的弥雾机气流速度场分布特性和雾滴沉积规律。设计与模拟条件相同的验证实验,对模拟结果进行了验证分析。研究表明,模拟结果能够较准确地反映雾滴沉积规律,喷头体安装倾角为 $5^{\circ}$ ~ $10^{\circ}$ 时,弥雾机气流速度场分布有利于药液获得较好的沉积效果。

**关键词:** 风送式弥雾机 温室 气流速度场 雾滴沉积

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)08-0071-07

## Analysis on Features of Air-velocity Distribution and Droplets Deposition Pattern for Greenhouse Air-assisted Mist Sprayer

Yuan Xue<sup>1</sup> Qi Lijun<sup>1</sup> Ji Ronghua<sup>2</sup> Zhang Jianhua<sup>1</sup> Wang Hu<sup>1</sup> Huang Shikai<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

### Abstract

Simulating models of air-velocity distribution and droplets deposition were developed based on CFD technology. The simulation boundary conditions and model variables were defined according to the working parameters measured from the mist-sprayer. Based on these models, air-velocity distribution characteristic and droplets deposition pattern were obtained on various simulation condition such as different air-assisted velocities and nozzle installation angles. The relative errors of simulated results were confirmed through corresponding experiments on the same condition. The result showed that air-velocity distribution of the mist-sprayer was more advantageous to obtain better effect of droplet deposition when the nozzle installation angle was in the range of  $5^{\circ}$  to  $10^{\circ}$ .

**Key words** Air-assisted mist sprayer, Greenhouse, Air-velocity distribution, Droplets deposit

### 引言

作为检验弥雾机性能重要指标之一的雾滴沉积分布特性,在实验中因受到多种因素的影响而呈现较大差异<sup>[1-2]</sup>。为了探究各因素对喷雾雾滴沉积的影响规律,研究人员进行了大量的实验<sup>[3-5]</sup>。传统喷雾实验具有不可控因素多、实验复杂、成本高和操

作难度大等特点,在一定程度上限制了化学农药施用技术的发展。计算机模拟软件通过模拟计算,可以快捷有效地进行各种仿真。近年来,针对风送式喷雾机的CFD模拟研究已逐渐展开<sup>[6-8]</sup>。Baetens等利用CFD软件建立了Hardi Commander型喷杆风送式喷雾机雾滴飘移的三维模型,模拟了喷雾机飘移分布及各因素对雾滴沉积分布的影响<sup>[9]</sup>。Delele

收稿日期: 2011-08-21 修回日期: 2011-10-11

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110008110010)和中国农业大学研究生科研创新专项资助项目(KYCX2011072)

作者简介: 袁雪, 博士生, 主要从事植物保护机械及农药喷施技术研究, E-mail: yuan12062001@yahoo.com.cn

通讯作者: 祁力钧, 教授, 博士生导师, 主要从事植物保护机械及农药喷施技术研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

等利用 CFD 软件建立了风帘型风送式喷雾机气流速度分布模型,模拟了喷雾机气流速度场分布、雾滴沉积分布和影响因素<sup>[10-11]</sup>。祁力钧等利用 CFD 技术建立了 Hardi LB-255 型果园风送式喷雾机雾滴沉积分布模型,通过定性和定量实验,分析了喷雾机雾滴沉积特性<sup>[12]</sup>。目前,研究人员对风送式喷雾机的模拟研究大多是以果园或大田喷雾机为主,而专门针对温室风送式弥雾机的模拟研究则未见报道。基于此,本文以温室风送式弥雾机为研究对象,喷头体安装角度对弥雾机气流速度场分布特性和雾滴沉积规律的影响为研究内容,利用 CFD 软件建立温室风送式弥雾机气流速度场分布模型和雾滴沉积模型,通过模拟研究和实验验证相结合的方法,探究喷头体合理的安装参数,从而达到提高喷雾雾滴分布均匀性的目的。

## 1 温室风送式弥雾机

温室风送式弥雾机集成了喷雾机构、摆动机构、行走机构和自动加药装置,如图 1 所示。其中,喷雾机构选用旋切风雾化喷头体,可在  $0^\circ \sim 75^\circ$  范围内调整喷头体倾角(垂直向下与喷头体轴线的夹角)。内置起涡器将风机产生的气流转换成高速旋切气流,雾化药液并输送雾滴至作物。经 MSS 激光粒度仪(Malvern Instruments Limited)测量,90%的雾滴直径在  $45 \sim 50 \mu\text{m}$  之间。喷雾机构上的 U 型支架组成摆动机构,可在  $\pm 75^\circ$  内左右摇摆,以其支架上的接近开关作为中间定位点,实现喷雾机构左、右摆动角度及方向的控制调节。喷雾机行走机构设置在机架前端,包括步进电动机和 2 个驱动轮,具有前进、后退和自动返回 3 种选择模式且速度可调。自动加药装置通过遥控器上的按键完成加药和排药过程。

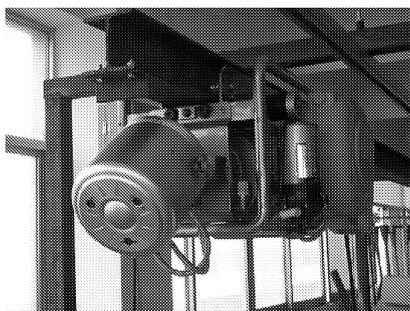


图 1 温室风送式弥雾机

Fig. 1 Greenhouse air-assisted mist sprayer

为缩短 CFD 模拟运算时间及减少实验次数,选择合理的喷头体倾角范围至关重要。实验表明,弥雾机喷头体倾角大于  $45^\circ$  时雾滴沉积距离更远,但分布均匀性变差。实验在  $75^\circ$  范围内选择  $5^\circ$  喷头体倾角间隔进行模拟与实验分析。受篇幅所限,文中

重点列出了喷头体倾角为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  的弥雾机气流速度场分布特性和雾滴沉积规律。

## 2 CFD 模拟

### 2.1 气流速度场模拟

风送式弥雾机雾滴沉积分布特性因受到雾滴出口处风送气流场的影响而呈现较大差异。向地面方向的气流运动加速喷雾雾滴的沉积,向上的气流运动导致雾滴飘移或蒸发。在实际操作中,一般通过将喷头体倾斜一定角度来调整风送气流场的方向,进而加速雾滴沉积、减少漂移和蒸发。本文模拟不同风送气流速度下,喷头体倾角变化对弥雾机气流速度场的影响规律,从而确定最佳喷头体倾斜角度,以获得最好的雾滴沉积效果。

#### (1) 模拟区域与网格化

以喷头体中心为模拟区域的起始位置,雾滴出口处为喷雾机构风送气流速度入口区域,选取距地面高 130 cm、长 250 cm、宽 200 cm 的区域为模拟区域,如图 2 所示。其中近喷头体处网格化选用三角形四面体非结构网格,远离喷头体处网格化选用三角柱体网格。

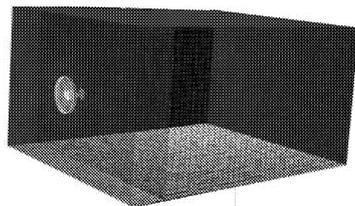


图 2 三维模拟区域

Fig. 2 3-D simulation region

#### (2) 模型条件假设

为使模拟模型接近于实际实验情况,对模型条件作出如下假设:① Lagrangian 模型为离散项。② 壁面为无滑移。③ 气流源垂直于药液出口表面。④ 风送系统的气流源稳定。⑤ 雾滴终结方式为沉积、蒸发或漂移。⑥ 气流为湍流流态。

#### (3) 实验物理模型

气流场的模拟主要基于质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律和组分守恒定律(气液二相)。在此基础上,应用  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型对气流场进行迭代求解,模型公式为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中  $C_{1\varepsilon}、C_{2\varepsilon}、C_{3\varepsilon}$ ——常数  $\rho、t$ ——流体属性  
 $\mu_t$ ——湍流粘度  $k$ ——湍流动能  
 $\varepsilon$ ——流体的湍流扩散率  
 $\sigma_k、\sigma_\varepsilon$ ——湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的普朗特数  
 $G_k$ ——由速度梯度引起的应力源项  
 $G_b$ ——由浮力引起的湍动能  $k$  的产生项  
 $Y_M$ ——可压缩流中脉动扩张项

(4) 离散相与连续相边界条件

在图 2 的模拟区域中,左边界圆形区域为喷雾机构风送气流速度出口,同时也是模拟区域速度入口,边界条件设置为速度入口;上边界及左、右边界为大气压面,边界条件设置为自由出口;下边界为作物顶端,边界条件设置为壁面;电动机和转轴、喷头体等部分,边界条件设置为壁面。模拟连续相和离散相的物性参数设置如表 1 所示。

表 1 模拟连续相和离散相各物性参数

Tab.1 Physical parameters of continuous phase and discrete phase of simulation test

连续相(空气)		离散相(水雾滴)	
参数	数值	参数	数值
温度/K	300	温度/K	300
密度/kg·m <sup>-3</sup>	1.225	密度/kg·m <sup>-3</sup>	998.2
发光强度/cd	1 006.43	发光强度/cd	4 182
热传导率/W·(m·K) <sup>-1</sup>	0.024 2	热传导率/W·(m·K) <sup>-1</sup>	0.6
粘度/Pa·s	1.87 × 10 <sup>-5</sup>	粘度/Pa·s	7.602 × 10 <sup>-4</sup>
摩尔质量/g·mol <sup>-1</sup>	28.966	摩尔质量/g·mol <sup>-1</sup>	18.015 2
湍流强度/%	15	挥发点/K	273
流速/m·s <sup>-1</sup>	0 ~ 25	沸腾点/K	373
相对湿度/%	15	表面张力/N·m <sup>-1</sup>	0.071 940 4

(5) 模拟结果

不同风送气流速度时的气流速度场分布模型大体一致。图 3 中列出  $v = 5 \text{ m/s}$  时,喷头体倾角为 0°、5°、10°和 15°,距喷头体中心不同距离,距地面不同高度时的气流速度场分布图。

喷头体倾角为 0°时,风送气流垂直于雾滴出口处平面沿  $x$  向运动,只有很小一部分气流沿  $x$  向运动(图 3a)。喷头体倾角为 5°时,风送气流仍是大部分沿  $x$  向运动,与喷头体倾角为 0°时相比,气流运动沿  $x$  向的水平距离明显延长,且有部分气流沿  $y$

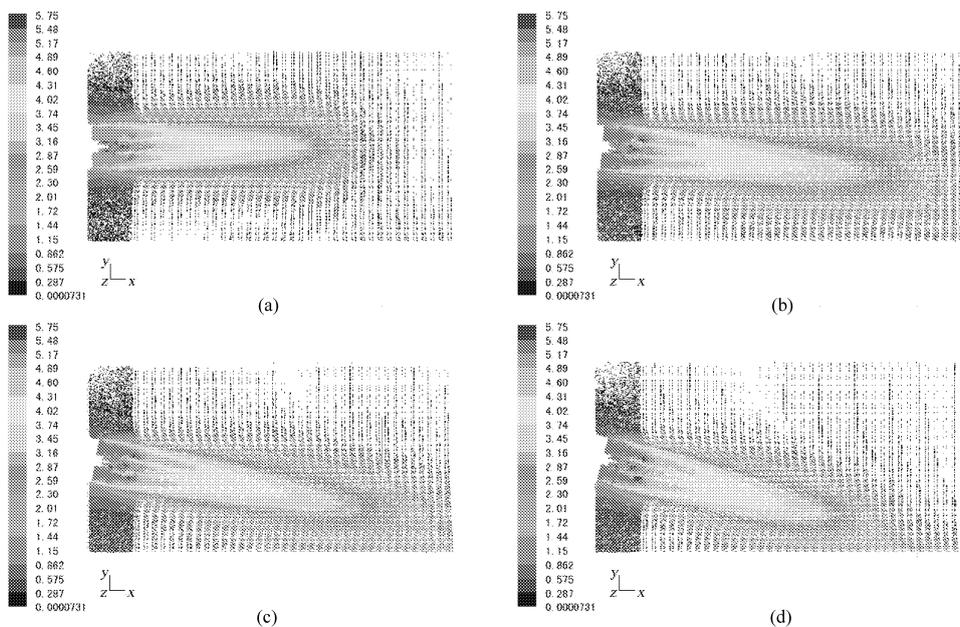


图 3  $v = 5 \text{ m/s}$  条件下喷头体不同倾角时气流速度场分布

Fig.3 Air-velocity field at velocity of 5 m/s of different nozzle installation angles

(a) 0° (b) 5° (c) 10° (d) 15°

向运动(图 3b)。喷头体倾角为  $10^\circ$  时,风送的部分气流沿  $x$  向运动,与喷头体倾角  $0^\circ$  时相比,气流运动沿  $x$  向的水平距离也明显延长, $y$  向运动的气流占总气流体积的比率有较大的提高(图 3c)。喷头体倾角为  $15^\circ$  时,沿  $y$  向运动的气流体积分数大于  $x$  向气流体积分数,导致沉积雾滴的数量减少,漂移雾滴的数量增加(图 3d)。由此得出,综合考虑气流水平方向( $x$  向)和垂直方向( $y$  向)运动,喷头体倾角合理范围在  $5^\circ \sim 10^\circ$  之间。

## 2.2 雾滴沉积模拟

喷头体倾角不仅影响弥雾机气流速度场的分布特性,也会对雾滴沉积效果产生影响。为探究温室风送式弥雾机喷头体倾角变化对雾滴沉积分布的影响规律,选取弥雾机风送气流速度为  $5 \text{ m/s}$  和  $10 \text{ m/s}$ ,喷头体倾角为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  时,进行弥雾机雾滴沉积分布的模拟。

### (1) 模拟区域划分

根据弥雾机结构尺寸,风送气流速度和模拟靶标的高度,本文选取喷头体下风向区域为雾滴沉积模拟区域,如图 4 所示。模拟区域沿喷头体中心水平方向划分为 10 个药液采集单元,各单元水平距离均为  $25 \text{ cm}$ ,依次编号为 1 ~ 10。由于模拟区域喷头体结构的形状不规则,网格类型选用非结构网格,网格元素为三角形,网格间距设为  $20 \text{ mm}$ ,网格化后模拟区域的单元总数为 13 053。

### (2) 离散相与连续相边界条件

经测量,雾滴温度  $27^\circ\text{C}$ 、空气相对湿度  $45\%$  时,

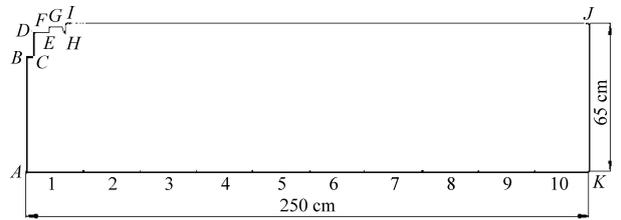


图 4 雾滴沉积模拟区域

Fig. 4 Simulation region of droplets deposition

空气粘度为  $1.880 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,水的粘度为  $7.602 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。模拟的边界条件设置如下: $JJ$  段是整个喷雾机喷头体结构的对称中心; $AK$  段是沉积区域,离散相设为 trap; $CD$  段是模拟区域的气流速度入口,离散相设为 escape; $AB$  段和  $JK$  段是雾滴漂移区域,离散相设为 escape;其余边界条件都设置为壁面。

### (3) 模拟结果

不同风送气流速度的雾滴分布模拟情况大体相同。图 5 为  $v = 5 \text{ m/s}$ ,喷头体倾角  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时雾滴沉积分布情况。

由图 5 可知,由于自身重力原因,大雾滴受风送作用影响较小,多在近喷头处沉积;小雾滴受风送作用影响较大,因此风速将决定雾滴的喷雾距离。喷头体倾角为  $0^\circ$  时,模拟区域内喷雾雾滴分布均匀,但有效喷雾距离较短(图 5a)。喷头体倾角为  $5^\circ \sim 10^\circ$  时,雾滴分布均匀性略有降低,但有效喷雾距离增加(图 5b、5c)。喷头体倾角为  $15^\circ$  时,有效喷雾距离仍保持增加,但雾滴分布不均匀的特性显现(图 5d)。综上所述,对比喷头体倾角不同的雾滴沉

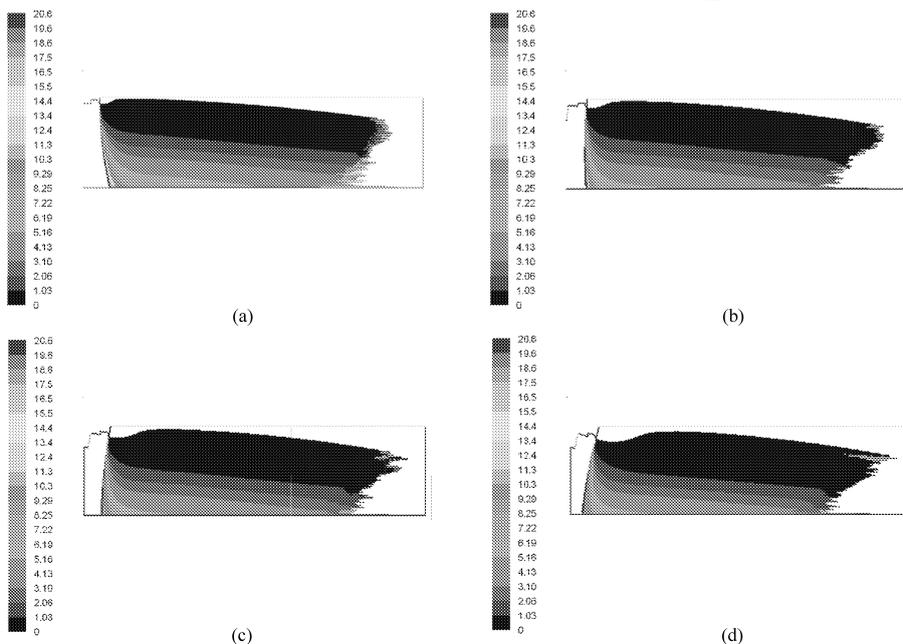


图 5  $v = 5 \text{ m/s}$  条件下喷头体倾角不同时雾滴沉积分布模拟结果

Fig. 5 Droplets deposition distribution at velocity of  $5 \text{ m/s}$  of different nozzle installation angles

(a)  $0^\circ$  (b)  $5^\circ$  (c)  $10^\circ$  (d)  $15^\circ$

积分分布模拟结果, 倾角为  $5^\circ \sim 10^\circ$  较适合作为温室弥雾机优化的工作参数。

### 3 实验验证与分析

#### 3.1 气流速度场实验

##### (1) 实验方案

为确定气流速度场模拟的精度, 采用模拟和实验验证相结合的方法, 测量了实验区域内不同点的风送气流速度。其中 CFD 模拟条件设置为区域长 2.5 m、宽 0.65 m, 距喷头体中心的水平距离分别为 0、0.4、1.0、1.5、2.0 和 2.5 m, 距地面高度分别为 0.25、0.45 和 0.65 m, 共设置 18 个测量点。实验条件与模拟条件设置相同。

实验时, 风送气流速度为 5 m/s 和 10 m/s, 喷头体倾角为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$ , 使用 KANOMAX 531 型气象测量仪对实验各点风送气流速度进行测量, 每个测量点进行 3 次实验, 取平均值作为结果。

表 2  $v = 5$  m/s、喷头体倾角  $0^\circ$  时气流速度场分布测量结果和模拟结果对比

Tab. 2 Comparison of simulated and experimental results of nozzle installation angle  $0^\circ$  at velocity of 5 m/s

水平 距离/m	距地面高度 0.25 m			距地面高度 0.45 m			距地面高度 0.65 m		
	$v_m/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$E/\%$	$v_m/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$E/\%$	$v_m/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$E/\%$
0	0.367	0.271	26.16	1.169	0.898	23.18	0.163	0.113	30.67
0.4	0.309	0.277	10.36	1.424	1.286	9.69	3.277	2.905	11.35
1.0	0.469	0.430	8.32	0.409	0.389	4.89	4.261	3.842	9.83
1.5	0.620	0.574	7.42	0.062	0.059	4.84	3.167	2.778	12.28
2.0	0.207	0.175	15.46	0.031	0.025	19.35	0.390	0.296	24.10
2.5	0.223	0.159	28.70	0.023	0.016	30.43	0.174	0.114	34.48

#### 3.2 雾滴沉积实验

##### 3.2.1 实验方案

实验时使用直径 7 cm 的滤纸作为沉积载体, 共划分为 10 个药液采集单元, 每个药液采集单元水平长度为 25 cm, 高为 65 cm, 与模拟条件相同。滤纸均匀分布在药液采集单元内, 其中竖直高度方向放置 5 片, 水平长度方向放置 3 片, 各单元共计 15 片滤纸。以黑色素溶液检测各采集样本上的药液沉积量, 配制药液质量浓度为 0.5 g/L。喷头体高度为 65 cm, 风送气流速度为  $(5 \pm 0.2)$  m/s 和  $(10 \pm 0.2)$  m/s, 弥雾机行走速度为 6 cm/s。各药液采集单元单位时间内的雾滴沉积质量为 15 片滤纸沉积量的平均值, 不同气流速度的实验进行 3 次, 取 3 次平均值计入结果。实验完成后, 为统计方便, 需将 Tribgy 分光光度仪测得的各个药液采集单元单位时间内的雾滴沉积量转换成单位面积上的沉积量。转换的计算公式为

##### (2) 评价指标及验证结果

本文利用相对误差来衡量各测量点模拟结果精度, 相对误差计算公式为

$$E = \frac{1}{N} \sum \frac{|v_m - v_s|}{v_m} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $N$ ——每个测量点测量的次数

$v_m$ ——实验测量的各点气流速度, m/s

$v_s$ ——模拟得到的各点风送气流速度, m/s

结果表明: 不同风送气流速度下, 不同喷头体倾角时模拟结果的精度相近。表 2 列出了  $v = 5$  m/s, 喷头体倾角为  $0^\circ$  时的气流速度场的模拟结果和实际测量值。

由表 2 可知, 18 次实验的相对误差均小于 35%, 误差大于 25% 的实验条件多处于模拟气流速度场的上、下边界区域。分析其原因为实验区域上、下边界处的风送气流速度小, 抗自然环境干扰的能力弱, 易导致产生较大的实验误差。

$$D_s = \frac{D_n c}{v_a d h} \times 10^4 \quad (4)$$

式中  $D_s$ ——单位面积黑色素溶液沉积量,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

$D_n$ ——雾滴在各药液采集单元内沉积流量, g/s

$v_a$ ——弥雾机行走速度, m/s

$c$ ——实验时药箱中黑色素溶液的质量浓度, g/L

$d$ ——药箱中所配置药液的密度, g/L

$h$ ——各药液采集单元的高度, cm

##### 3.2.2 实验结果

图 6 为喷头体不同倾角时雾滴沉积分布变异系数。表 3 为  $v_a = 5$  m/s 条件下喷头体不同倾角时各药液采集单元黑色素溶液沉积量模拟与实验结果的对比情况。

喷雾雾滴在目标上均匀分布的程度一般用变异系数表示, 变异系数越小, 雾滴分布均匀性越好<sup>[13]</sup>。

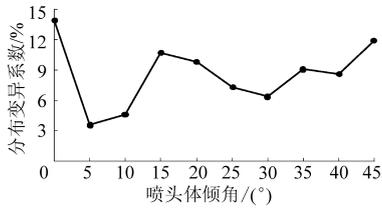


图6 喷头体不同倾角时雾滴沉积分布变异系数

Fig.6 Droplet deposition distribution variation coefficient in different nozzle installation angles

表3 各药液采集单元黑色素溶液沉积量模拟与实验结果的对比

Tab.3 Comparison of CFD simulation results and experiment results

单元 编号	喷头体倾角 0°			喷头体倾角 5°			喷头体倾角 10°			喷头体倾角 15°		
	实验值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	模拟值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	<i>E</i> /%									
1	0.131	0.047	11.45	0.251	0.101	59.76	0.239	0.118	50.75	0.306	0.271	12.94
2	1.013	0.862	16.61	1.126	0.851	24.44	0.803	0.711	11.41	0.731	0.610	19.92
3	0.894	0.812	22.21	0.543	0.593	9.21	0.493	0.532	7.96	0.657	0.511	28.56
4	0.725	0.744	33.32	0.478	0.407	14.95	0.465	0.413	11.18	0.376	0.501	25.00
5	0.639	0.671	27.19	0.459	0.413	10.13	0.498	0.409	17.95	0.324	0.412	21.38
6	0.437	0.581	25.30	0.402	0.350	12.96	0.371	0.391	5.34	0.248	0.311	20.19
7	0.275	0.365	6.59	0.329	0.305	7.20	0.324	0.290	10.56	0.201	0.214	6.18
8	0.167	0.195	20.00	0.311	0.294	5.63	0.098	0.110	12.24	0.093	0.112	16.67
9	0.079	0.102	33.33	0.014	0.007	49.29	0.003	0.005	75.00	0.003	0.002	50.00
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

区域(药液采集单元右边界)由于风送气流速度的衰减,雾滴易受到外界环境的干扰,使实际测量结果也产生较大的误差,甚至可能完全掩盖了气流速度场对雾滴沉积分布的作用。综上所述,当弥雾机固定在导轨上某一位置、喷头体倾角为 $5^\circ$ 或 $10^\circ$ 时,在距喷头体中心距离 $75\sim 200\text{ cm}$ 的药液采集单元内,风送雾滴的沉积量分布均匀。但若针对作物种植面积大、分布广的大型温室时,喷头体固定位置则不能满足施药的需要,操作人员可选择弥雾机设置的自动行走功能和喷头体摇摆功能,从而保证其工作性能稳定。

## 4 结论

(1)所建立气流速度场模型能够较准确地计算

由图6可知,喷头体倾角为 $5^\circ$ 或 $10^\circ$ 时,施药药液在整个药液采集单元的分布均匀性最佳。

由表3可知,在实验条件下,整个药液采集单元左、右边界处模拟与实验结果的相对误差大于35%,其余采集单元的误差小于20%。分析其原因为雾滴出口区域(药液采集单元左边界)由于风送气流速度小,不利于雾滴的沉降,药液沉积量少,在一定程度上对实验结果产生影响;远离雾滴出口

温室风送式弥雾机实验区域内不同点的气流速度。

(2)喷头体安装参数对弥雾机气流速度场分布特性及雾滴沉积规律影响显著,为使温室风送式弥雾机达到最佳施药效果,建议喷头体倾斜角度为 $5^\circ\sim 10^\circ$ 。

(3)弥雾机气流速度场模拟和验证实验的误差来源于外界环境因素的干扰,在模拟区域的上、下边界及左、右边界,风送气流速度较小,影响了实验结果的准确性。

(4)雾滴沉积实验表明,喷头体倾角为 $5^\circ$ 和 $10^\circ$ 时,距喷头体中心距离 $75\sim 200\text{ cm}$ 的药液采集单元的雾滴沉积量分布趋于均匀;喷头体倾角为 $0^\circ$ 和 $15^\circ$ 时,整个药液采集单元的雾滴沉积量分布接近于线性分布。

## 参 考 文 献

- 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.  
He Xiongkui, Zeng Aijun, He Juan. Effect of wind velocity from orchard sprayer on droplet deposit and distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2002, 18(4): 75~78. (in Chinese)
- 岳学军,洪添胜,李霞,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.  
Yue Xuejun, Hong Tiansheng, Li Xia, et al. Effects of orchard sprayer shield on spray range[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 94~98. (in Chinese)
- Tsay J, Fox R D, Ozkan H E, et al. Evaluation of a pneumatic-shield spraying system by CFD simulation[J]. Transactions of

- the ASAE, 2002, 45(1): 47 ~ 54.
- 4 Tsay J R, Liang L S, Lu L H. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(6): 1 887 ~ 1 897.
- 5 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实验验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 69 ~ 74.  
Fu Zetian, Wang Jun, Qi Lijun, et al. CFD simulation and experimental verification of air velocity distribution of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 69 ~ 74. (in Chinese)
- 6 Sidahmed M M, Brown R B. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry airblast sprayer-part II: droplet trajectory model[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 5 ~ 17.
- 7 Gorokhovski M, Chtab-Desportes A, Voloshina I, et al. Stochastic simulation of the spray for mation assisted by a high pressure[C]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1207: 66 ~ 73.
- 8 陈发元, 汪小昆, 丁为民, 等. 果树喷雾用圆盘风扇三维气流速度场数值模拟与验证[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 51 ~ 55.  
Chen Fayuan, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Numerical simulation and experimental verification of 3-D air-velocity field of disk fan used in orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 51 ~ 55. (in Chinese)
- 9 Baetens 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, 56(2): 161 ~ 173.
- 10 Delele M A, De Moor A, Sonck B, et al. Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 165 ~ 174.
- 11 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.
- 12 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): 72 ~ 76.  
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): 72 ~ 76. (in Chinese)
- 13 傅泽田, 祁力钧, 王秀, 等. 农药喷施技术的优化[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 109 ~ 111.
- 14 袁雪, 祁力钧, 王虎, 等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 45 ~ 50, 54.  
Yuan Xue, Qi Lijun, Wang Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 45 ~ 50, 54. (in Chinese)
- 15 祁力钧, 王沛, 张建华, 等. 杂草叶片表面结构对雾滴铺展和蒸发的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3): 335 ~ 340.  
Qi Lijun, Wang Pei, Zhang Jianhua, et al. Influence of weed leaves surface structures on droplet spread and evaporation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3): 335 ~ 340. (in Chinese)

(上接第 49 页)

- 9 李永磊, 宋建农, 王继承, 等. SGTN-180 型旋耕埋草施肥联合作业机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 143 ~ 147.  
Li Yonglei, Song Jiannong, Wang Jicheng, et al. Design and experiment of a SGTN-180 type rotary tillage-straw returning-fertilization combined machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(2): 143 ~ 147. (in Chinese)
- 10 丁为民, 王耀华, 彭高植, 等. 正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(1): 113 ~ 117.  
Ding Weimin, Wang Yaohua, Peng Songzhi, et al. Comparison experiment and property analysis of up-cut and down-cut rotary blades[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24(1): 113 ~ 117. (in Chinese)
- 11 陈日曜. 金属切削原理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- 12 阿克. 铣刀齿数的确定[J]. 机械工人(冷加工), 1981(5): 45.
- 13 乐兑谦. 金属切削刀具[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- 14 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2007.