

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.014

# 气流辅助式喷雾工况参数对雾滴飘移特性的影响\*

刘雪美<sup>1,2</sup> 苑进<sup>1,2</sup> 张晓辉<sup>1,2</sup> 左文龙<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺与装备重点实验室, 泰安 271018)

**【摘要】** 采用三维流场的多相流计算流体力学模型, 研究雾滴在自然风影响、辅助气流胁迫和自身重力作用下在连续相和雾滴粒子群离散相耦合的交互作用, 并分析了不同工况参数对雾滴漂移特性的影响。结果表明: 增大风筒气流出口速度, 可以胁迫雾滴向靶标运动, 减少雾滴飘失率。当喷嘴流量较小时, 雾滴飘失率变小的趋势最为明显。然而喷嘴流量过大时, 雾滴整体抗飘失能力显著下降。辅助气流的喷雾角对减少雾滴飘失相对于自然风速、辅助气流风速没有显著的影响。

**关键词:** 喷杆喷雾 气流辅助喷雾 减飘 CFD 工况参数

**中图分类号:** S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0067-06

## Effect of Air-assisted Spraying Condition Parameters on Boom Spray Drift Characteristics

Liu Xuemei<sup>1,2</sup> Yuan Jin<sup>1,2</sup> Zhang Xiaohui<sup>1,2</sup> Zuo Wenlong<sup>1</sup>

(1. Mechanical and Electronic Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

### Abstract

A 3-D multiphase computational fluid dynamics model was used to study the coupling interaction of the natural wind, the air curtain and discrete droplets in the boom sprayer application and analyze the characteristics of air-assisted spray condition parameters on the boom spraying drift. The analytic results showed that increased outlet velocity of the air-assisted flow stressed droplet movement to target and then decreased the droplet deposition rate. Small nozzle flow rate implicated obvious loss trend of droplet drift. However, when the nozzle flow was excessive, the anti-drift loss of capacity of droplets decreased significantly. Air-assisted blowing angle had no significant impact on the drift reduction.

**Key words** Boom sprayer, Air-assisted spraying, Drift reducing, Computational fluid dynamics, Working condition parameters

### 引言

气流辅助式喷雾机作业时风筒形成的风幕制止了雾滴的飘失, 强迫雾滴向作物冠层沉积, 不仅增大了雾滴的沉积和穿透, 而且在有风的天气(4级风)也能正常工作<sup>[1]</sup>, 可节省施药量40%~70%,

从而提高农药利用率、减少农药施用量和施药安全性<sup>[2]</sup>。然而, 自然风是影响雾滴飘失的重要因素, 自然风速越大, 能携带的雾滴尺寸也越大, 农药的飘失率也增加。农药喷洒过程中受外界自然风的影响会偏离其原始喷洒方向, 向下风向偏移<sup>[3]</sup>。一般来说, 自然风速大则方向性相对稳定, 农药向下风向飘

收稿日期: 2012-07-03 修回日期: 2012-08-02

\* 国家自然科学基金资助项目(31101461)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2011CQ021)、山东省高等学校科技计划资助项目(J11LC27)和国家农业智能装备工程技术研究中心开放课题资助项目(KFZN2012W09-009)

作者简介: 刘雪美, 副教授, 博士, 主要从事农业机械设计及理论研究, E-mail: lxmywj@126.com

通讯作者: 张晓辉, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械设计及理论研究, E-mail: zhangxh@sdau.edu.cn

移的方向性强;反之,自然风胁迫雾滴方向性差,农药飘移也不定向。为了充分利用风幕式气助喷雾的优点,国内外学者在相关领域从不同角度对雾滴的飘移过程及影响因素展开了大量试验研究,试图全面深入地认识雾滴飘移的机理,并通过调整气助式喷杆喷雾机气流及出口参数、喷嘴工作参数等方法减少农药的飘移损失<sup>[4-13]</sup>,改进药液空间分布特性。

由于自然风速不可控,采用传统风洞试验方法研究有很大困难,本文采用三维流场的多相流计算流体力学(computational fluid dynamics, 简称 CFD)模型,研究雾滴在自然风影响、辅助气流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,并分析不同工况参数下气流辅助喷雾下雾滴漂移特性。

## 1 气流辅助喷雾 CFD 模型

### 1.1 几何建模

喷杆喷雾机工作幅宽 8 m,喷杆离地高度 0.3 ~ 1.0 m 可调,喷头间隔 0.5 m。为使仿真试验与实际条件相符,降低出口边界条件对流场仿真结果的影响,在建立幅宽 8 m 的三维风筒仿真模型的基础上,将风助风筒出风口外离地面高度 1 m 内的自由流动区加入计算区域。为减少计算负荷,将几何模型简化为物理模型的 1/2(图 1)。

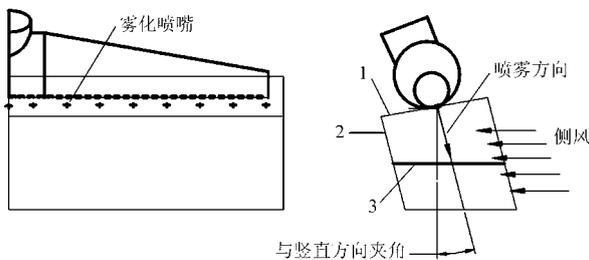


图 1 离散相仿真几何模型

Fig. 1 Geometric model of discrete-phase simulation

1、2. 下风向的压力出口 3. 距离风助风筒出口 0.5 m 处的手面

根据喷嘴实际安装位置,在连续相流场分析的几何模型基础<sup>[14]</sup>上,离散相仿真模型只需再加入粒子喷射源即可对连续相下离散相的流动参数进行计算。喷嘴出口为一细长狭缝,与平板扇形雾化模型的雾化机理相同,因此模拟离散相粒子的产生时采用平板扇形雾化模型<sup>[15]</sup>,根据参数设置(表 1)按照 R-R 分布随机产生一些粒子,然后根据液滴运动方程计算其运动轨迹,根据液滴碰撞和破碎模型对液滴之间的相互作用进行计算<sup>[16]</sup>。

本文仅限于研究与喷杆垂直的自然风对雾滴群的影响,忽略喷杆方向自然风分量,因此只选取喷杆

中 17 个喷嘴中的 1 个作为分析对象,以节省计算时间。离散相边界条件分为反射模型、捕捉模型和逃逸模型<sup>[17]</sup>。其中捕捉模型假定离散相粒子与壁面碰撞时粒子被壁面捕捉,逃逸模型假定喷散相粒子在与界面碰撞后即离开流场,不再返回。这种模型通常用于流场的入口和出口处。

根据实际情况看,液滴是喷洒到作物表面上的,为了简化模型只研究液滴在作物上方的分布情况,因此未考虑作物对流场造成的影响。当侧风较小时,液滴可能到达地面,在此情况下处理粒子与地面碰撞、粒子的反弹是一个比较难的问题,由于粒子较小,与地面反弹后对作物上方的流场基本没有影响,因此将地面上的边界条件处理为捕捉边界,即粒子到达此面上后被地面捕捉,不反弹。在下风向等压力出口处液滴的计算按逃逸模型计算。

表 1 平板扇形雾化模型参数设计

Tab. 1 Design of flat fan spray model parameters

| 参数           | 数值       |
|--------------|----------|
| 模型选择         | 平板扇形雾化模型 |
| 粒子包数量        | 20       |
| 粒子类型         | 惯性颗粒     |
| 材料           | 水        |
| 雾化半角/(°)     | 55       |
| 出口宽度/m       | 0.002 8  |
| 液体薄膜扩散角度/(°) | 6        |

### 1.2 喷嘴雾化及离散相仿真模型及其边界条件

仿真的风助喷杆喷雾机采用带有防滴漏装置的低量扇形雾喷头,因此喷嘴模型采用平板扇形雾化喷嘴将液体雾化为液体颗粒,其雾化原理如图 2 所示。喷嘴出口为一狭长的缝隙,喷嘴从狭缝喷出后形成非常薄的液体薄膜,受到周围气体、液体粘度以及表面张力的影响<sup>[17]</sup>。当液体薄膜两面产生最大扰动时,液膜处于最不稳定的状态,最容易碎裂成液线或雾化颗粒。

连续气流解决了使用雷诺平均运动方程。雾滴的位置(离散相)在连续空气流被跟踪使用拉格朗日粒子跟踪多相流模型。模型详述见文献[17]。连续相边界条件为:风筒进口和侧风采用速度进口边界条件,出口采用压力出口边界条件;离散相同仿真边界只有在压力出口和地面存在相互作用,其中在压力出口采用逃逸边界条件,在地面采用捕捉边界条件。

## 2 雾滴飘失的评价指标

在自然风和辅助风幕的共同影响下,从总体趋势上看,直径较小、速度较低的液滴更容易向下风向运动,导致部分液滴尚未到达作物表面就已经飘失

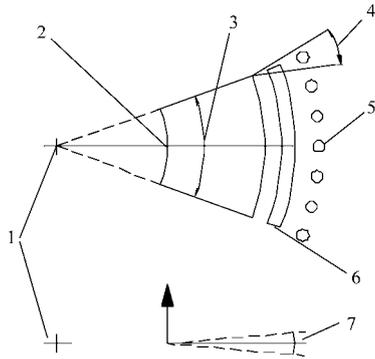


图2 平板扇形雾化喷嘴雾化原理图

Fig. 2 Schema of flat fan spray nozzle

1. 虚拟原点 2. 出口平面液膜形成 3. 雾化角度 4. 扩散角度  
5. 形成液滴 6. 形成线状液膜 7. 喷雾面切向

了,雾滴飘失率为

$$\eta = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\%$$

$$\text{其中 } m_1 = \sum_{i=1}^{N_1} \frac{4}{3} \rho \pi r_i^3 n_i \quad m_2 = \sum_{i=1}^{N_2} \frac{4}{3} \rho \pi r_i^3 n_i$$

表2 多工况 CFD 仿真均匀设计  $U_{12}(12^4)$  方案与仿真结果

Tab. 2 Uniform design of CFD simulation of multi-state data set

| 仿真号 | 自然风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 喷雾流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ | 喷雾角度/ $(^\circ)$ | 进口风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 飘失率/% | 0.5 m 处垂直速度分量/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|-----|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------------------|-------|---|
| 1   | 4.5                                  | 0.024 1                               | 0                | 8                                    | 100   | 0   |
| 2   | 4.5                                  | 0.021 3                               | 20               | 6                                    | 73.07 | 1.10  |
| 3   | 3.5                                  | 0.024 1                               | 0                | 10                                   | 29.63 | 1.37  |
| 4   | 3.5                                  | 0.027 4                               | 20               | 6                                    | 74.93 | 0.74  |
| 5   | 4.5                                  | 0.027 4                               | 10               | 8                                    | 69.13 | 1.09  |
| 6   | 3.5                                  | 0.027 4                               | 0                | 6                                    | 100   | 0   |
| 7   | 3.5                                  | 0.024 1                               | 20               | 8                                    | 12.68 | 1.12  |
| 8   | 3.5                                  | 0.021 3                               | 10               | 8                                    | 5.99  | 1.25  |
| 9   | 3.5                                  | 0.021 3                               | 10               | 10                                   | 0     | 2.08  |
| 10  | 4.5                                  | 0.027 4                               | 10               | 10                                   | 17.01 | 1.69  |
| 11  | 4.5                                  | 0.021 3                               | 0                | 6                                    | 100   | 0   |
| 12  | 4.5                                  | 0.024 1                               | 20               | 10                                   | 3.01  | 1.69  |

### 3.2 典型工况喷雾流场仿真

在无自然风干扰的情况下,雾滴运动方向和喷出方向一致,不存在雾滴飘失的情况,然而在考虑自然风的扰动时,较小的雾滴飘失严重,一方面必须提高液滴的动能,另一方面,需要调整喷嘴的方向,使雾滴的部分动能和自然风的能量相抵消,起到防飘的效果。

原喷嘴的雾化半角为  $55^\circ$ ,但从雾滴正向分布图(图 3a)来看,喷嘴的雾化半角远小于  $55^\circ$ 。这是由于在喷嘴出口处气体速度较高,被高速气流夹带着的雾滴难以沿径向方向扩散。侧面雾滴分布图(图 3b)表明,即使风助风筒进口速度为  $10 \text{ m/s}$ ,雾

式中  $m_1$ ——飘失的粒子质量

$m_2$ ——未飘失的粒子质量

$N_1$ ——通过图 1 中平面 1、2 飘失的粒子包数

$\rho$ ——液滴密度

$n_i$ ——第  $i$  个粒子包中粒子个数

$r_i$ ——第  $i$  个粒子包中的粒子半径

$N_2$ ——通过图 1 中平面 3 的粒子包个数

可见,飘失率越小农药利用效率越高。

## 3 工况参数对雾滴飘移影响

### 3.1 仿真设计

以影响较为显著的 4 个因素:自然风速、喷雾流量、喷雾角和风筒进口风速作为仿真的影响因素,根据需要设计参数范围为:自然风速  $3.5 \sim 4.5 \text{ m/s}$ 、流量  $0.0213 \sim 0.0274 \text{ kg/s}$ 、喷雾角度  $0^\circ \sim 20^\circ$  和进口风速  $0 \sim 10 \text{ m/s}$ ,其中将自然风速取 2 个水平,其余参数取 3 个水平,因此采用多因素混合水平均匀设计表  $U_{12}(12^4)$  作为 CFD 分析试验方案(表 2)。

滴偏移乃至飘失仍然较为严重。如果进一步提高辅助风速,在流场内雾滴的偏移和飘失可能会得到改善,但是这不仅增加了功率损耗,由于雾滴在作物表面上的反弹还会造成二次飘失,因此盲目增加辅助气流出口风速并不可行,喷嘴的防飘技术需要考虑多方面的因素<sup>[18-19]</sup>。

考虑离散相雾滴和连续相相互作用以及自然风的影响(表 2 中的试验 3), $z=0$  和  $x=2 \text{ m}$  平面上的速度分布云图如图 4 和图 5 所示。由于风筒吹出的辅助气流离开出口后向四周扩散,但在向自然风上风向扩散的过程中受到来自自然风的阻力,两者相互抵消,从而减少雾滴飘失。在  $z=0$  对称面上,气

流从风筒喷出后受气流阻力的影响其速度迅速降低,并在整个流场内形成一长条形的低速流动区,其速度接近于零。可以看出,在低速流动区域正左边

从风筒喷出的气流受自然风影响所造成的偏斜较小,随着气流脱离低速流动区的屏障后迅速向下风向偏斜,较小的雾滴随之飘失。

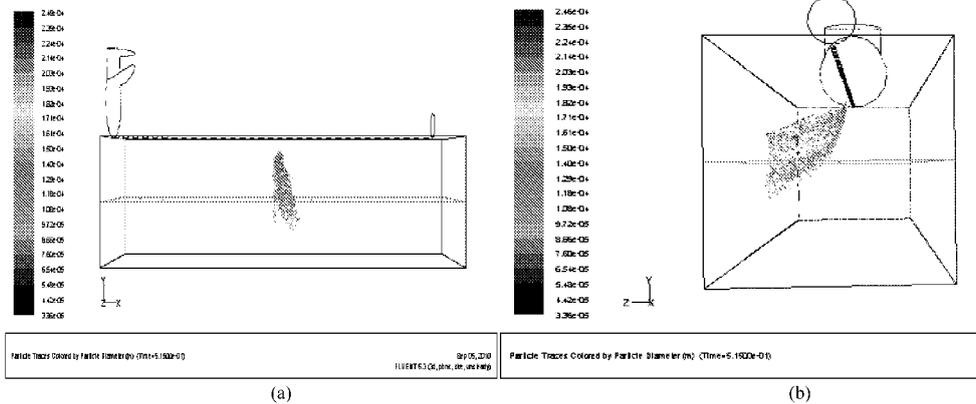


图3 雾滴分布图

Fig. 3 Droplet distribution

(a) 正面 (b) 侧面

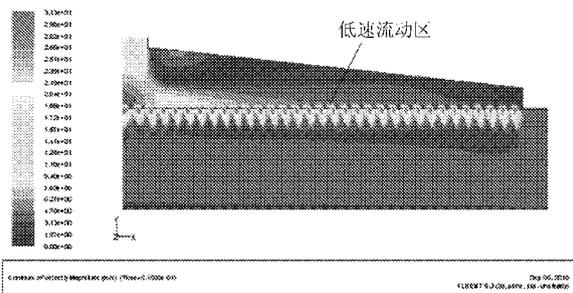


图4 加入离散相和自然风后  $z=0$  平面流场云图

Fig. 4 Contours of velocity field in the  $z=0$  plane with discrete phase and natural wind

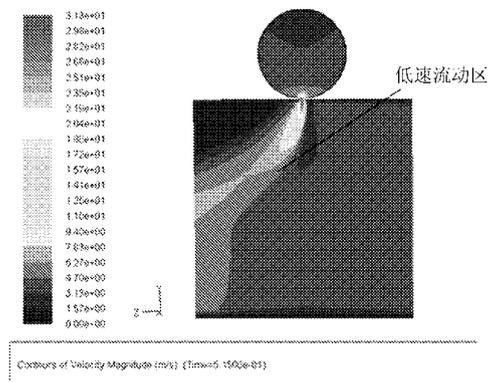


图5 加入离散相和自然风后  $x=2$  m 平面流场云图

Fig. 5 Contours of velocity field in the  $x=2$  m plane added discrete phase and natural wind

### 3.3 雾滴飘移特性分析

首先,考虑自然风速对飘失率的影响,如图6所示,受其他因素的影响,在2种风速下都出现了完全飘失的情况,但在4.5 m/s的风速下有2个方案的飘失率为100%。从飘失率较小的方案数量来看,在3.5 m/s时的雾滴飘失率也较小。自然干扰风速越小飘失率越小,与试验数据相符。

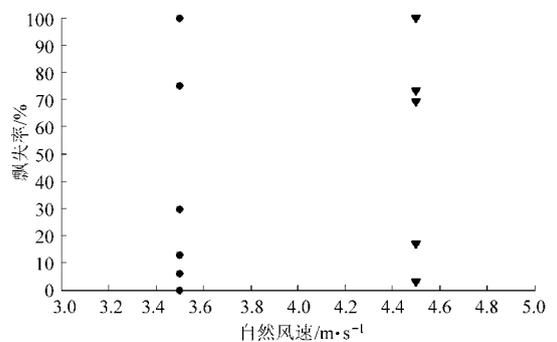


图6 2种自然风速下的雾滴飘失率比较

Fig. 6 Comparison of droplet drifting loss under two natural wind speeds

对于喷杆喷雾中,结构固定的喷嘴来说,喷嘴雾化的雾滴尺寸取决于喷嘴工作压力。根据喷嘴雾化理论,喷嘴压力越大,流量随之增加,流速变快,从喷嘴喷出的液体薄膜所受空气的扰动越强烈,将形成直径较小的雾滴。比较不同流量下的雾滴飘失率即比较不同直径雾滴的飘失。从12个方案的分析结果看,任何一种流量下都有完全飘失的情况(图7),然而,当流量较小时,雾滴飘失率变小的趋势最为明显。当流量为0.024 1 kg/s时,雾滴的尺寸也呈现出较好的抵抗飘失的能力,从飘失率看,也能降低到3%。然而,流量进一步增加,喷嘴喷出的雾滴呈现出了整体抵抗飘失能力显著下降的特点。

由分析可以看到,风筒出口气流的扩散使在风筒出口附近上风向产生一个低速流动区,当自然风较为强烈时,使气流的扩散受阻,低速流动区对雾滴飘失的屏蔽作用减弱。当辅助风筒和喷嘴喷雾方向向自然风的上风向倾斜一个角度时,辅助气流和雾滴在与自然风平行的方向上产生一个与自然风反方

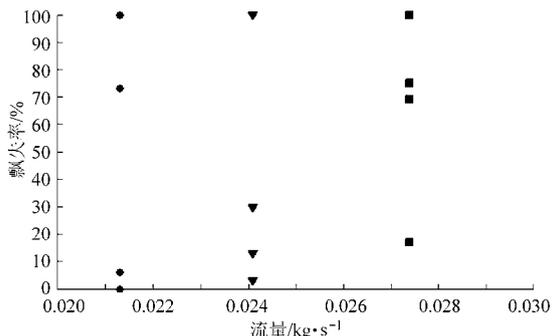


图7 3种流量水平下的雾滴飘失率比较

Fig. 7 Comparison of droplet drifting flow loss under three volumes of flow

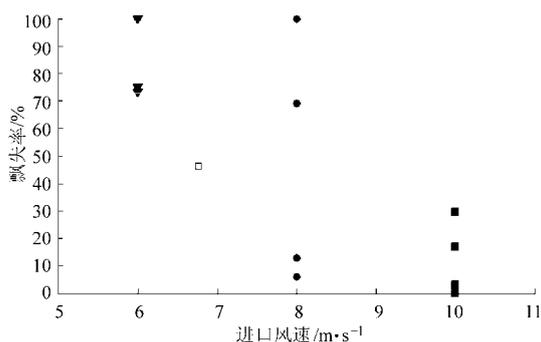


图9 风筒进口风速对雾滴飘失率的影响

Fig. 9 Effects of droplet spray drifting loss at different inlet air-flow speeds

向的流动分量,可使低速流动区增大,屏蔽作用更好。结合表2和图8中不同喷雾角度下的飘失率来看,当喷雾角度为 $0^\circ$ 时,75%的试验中雾滴完全飘失,即使在方案3中 $10\text{ m/s}$ 的风筒进口辅助风速和低自然风的作用下飘失率仍然高达29.63%。喷雾角度为 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ 时,雾滴飘失均有较好的表现,但总体来看,喷雾角度为 $10^\circ$ 时,雾滴飘失率更小,说明在喷雾角度过大时并不能起到更好的防飘效果。

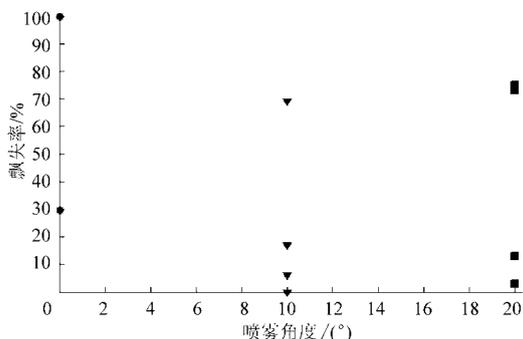


图8 不同喷雾角度时的雾滴飘失率比较

Fig. 8 Comparison of droplet spray drifting loss at different outlet air-flow angles

风筒起着雾滴加速和抵抗自然风的作用。风筒进口风速对雾滴飘失起着非常重要的影响,从3个水平的仿真结果来看,当进口风速为 $6\text{ m/s}$ 时,所有方案中飘失率均高达60%以上,当进口风速增加到 $8\text{ m/s}$ 时,50%方案的飘失率在60%以上,风筒风速进一步增加至 $10\text{ m/s}$ 后,所有方案飘失率均小于30%,且有2个方案的飘失率小于5%,起到了非常好的防飘效果。

总体来看,12个仿真中有3次仿真的飘失率为100%,这3个仿真的辅助风助风筒进口风速有2个为 $6\text{ m/s}$ ,一个为 $8\text{ m/s}$ ,均偏小,其喷雾角度均为 $0^\circ$ ,3个流量的试验均有出现,结合前面的分析可知,流量在防飘中起到的作用有限。

在仿真2、4、5中,雾滴飘失率在70%左右,同前述仿真相比,风助风筒的进口风速没有变化,仍然

为2个 $6\text{ m/s}$ 和1个 $8\text{ m/s}$ 的方案,喷雾角度有所增加,同时自然风速总体上减小,这些都有利于减小雾滴的飘失率,但流量的增加减小了雾滴本身的防飘能力。喷雾角度和自然风速的对雾滴飘失的减小作用大于流量对飘失率的增大作用。

仿真3中,虽然喷雾角度为 $0^\circ$ ,但是在较大的进口风速和较小的自然风速的作用下,其飘失率锐减至29.63%,进一步表明了自然风速和进口风速在防飘中的重要作用。

根据飘失率减小的规律,7号和10号仿真的达到了20%以下的水平,这两次仿真所有参数均不相同,其中7号仿真具有低自然风速、低流量的优点,但根据雾化角度对飘失率的影响来看,其具有偏大的喷雾角度和减小的辅助风筒风速。7号仿真的飘失率稍低于10号仿真,自然风速在这2个方案中起到了重要的作用。

仿真8、9和12将飘失率降低到了生产中基本可以接受的水平,其共同特点是辅助风筒进口风速较大,装置有一定的喷雾角度,且雾化颗粒直径较大。同另外两个仿真相比,9号仿真完全克服了雾滴的飘失,同8号仿真相比,其辅助风筒进口风速较大,同12号相比,具有较小的自然风速和流量。

综上所述,可以得出多参数对飘失率的影响重要性从大到小为:风筒进口风速、自然风速、喷雾流量和喷雾角度。其中,在不考虑液滴反弹的前提下,辅助风助风筒进口风速越大越好,自然风速越小越好,流量越小越有利于其抵抗飘失,喷雾角度对飘失的影响,需要进一步的分析。

#### 4 结论

(1) 工况参数对飘失率影响的重要性从大到小为:风筒进口风速、自然风速、喷雾流量和喷雾角度。

(2) 增大风筒气出口速度,可以胁迫雾滴向靶标运动,减少雾滴飘失率。

(3) 当喷嘴流量较小时,雾滴飘失率变小的趋

势最为明显。然而喷嘴流量过大时,雾滴整体抗飘失能力显著下降。

(4) 辅助气流的喷雾角度对减少雾滴飘失相对于自然风速和辅助气流风速没有显著的影响。

#### 参 考 文 献

- 1 Hislop E C, Western N M, Cooke B K, et al. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions[J]. *Crop Protection*, 1993,12(3):193~200.
- 2 刘秀娟,周宏平,郑加强. 农药雾滴飘移控制技术研究进展[J]. *农业工程学报*,2005,21(1):186~190.  
Liu Xiujian, Zhou Hongping, Zheng Jiaqi. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide application [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005,21(1):186~190. (in Chinese)
- 3 Howard K D, Mulrooney J E, Gaultney L D. Penetration and deposition of air-assisted sprayers[C]. ASAE Paper 941024, 1994.
- 4 Derksen R C, Zhu H, Ozkan E, et al. Determining the influence of spray quality, nozzle type, spray volume, and air-assisted application strategies on deposition of pesticides in soybean canopy[J]. *Transactions of the ASABE*,2008,51(5):1529~1537.
- 5 崔志华,傅泽田,祁力钧,等. 风送式喷雾机风筒结构对飘移性能的影响[J]. *农业工程学报*,2008,24(2):111~115.  
Cui Zhihua, Fu Zetian, Qi Lijun, et al. Effect of the air duct medication on the spray drift emitted by an air-assisted sprayer [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008,24(2):111~115. (in Chinese)
- 6 Cooke B K, Hislop E C, Herrington P J, et al. Air-assisted spraying of arable crops, in relation to deposition, drift and pesticide performance[J]. *Crop Protection*,1990,9(4):303~311.
- 7 Bukovac M J, Cooper J A, Whitmoyer R E. et al. Spray application plays a determining role in performance of systemic compounds applied to the foliage of fruit plants[J]. *Acta Horticulturae*,2002,594:65~75.
- 8 Rocamora M C, Val L, Perez M. Modelling the performance of air-assisted spraying on artichoke [J]. *Biosystems Engineering*, 2002,81(4):385~393.
- 9 Nuytens D, Baetens K, De Schampheleire M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics [J]. *Biosystems Engineering*, 2007,97(3):333~345.
- 10 Nuytens D, De Schampheleire M, Verboven P, et al. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays[J]. *Transactions of the ASABE*, 2002,52(5):1471~1480.
- 11 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):75~77.  
He Xiongkui, Zeng Aijun, He Juan. Effect of wind velocity from orchard sprayer on droplet deposit and distribution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002,18(4):75~77. (in Chinese)
- 12 洪添胜,王贵恩,陈羽白,等. 果树施药仿形喷雾关键参数的模拟试验研究[J]. *农业工程学报*,2004,20(7):104~107.  
Hong Tiansheng, Wang Guien, Chen Yubai, et al. Profile modeling of spray parameters of chemical solution application to fruit tree[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004,20(7):104~107. (in Chinese)
- 13 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):51~54.  
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):51~54. (in Chinese)
- 14 刘雪美,张晓辉,刘丰乐,等. 喷杆喷雾机风助风筒流场分析及其结构优化[J]. *农业机械学报*,2011,42(4):80~85.  
Liu Xuemei, Zhang Xiaohui, Liu Fengle, et al. Air flow simulation and flow field optimization for air duct of air-assisted boom sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(4):80~85. (in Chinese)
- 15 Delelea M A, Jaekenb 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.
- 16 杨建辉,樊未军,杨茂林,等. 离心式喷嘴雾化参数的计算[J]. *航空动力学报*,2003,18(6):799~802.  
Yang Jianhui, Fan Weijun, Yang Maolin, et al. A calculation of spray parameters of pressure-swirl atomizer[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003,18(6):799~802. (in Chinese)
- 17 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,2004:113~142.
- 18 Endalew A M, Debaer C, Rutten, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying—part I: model development and effect of wind speed and direction[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2010,71(2):128~136.
- 19 Endalew A M, Debaer C, Rutten, 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.