

塔形喷雾机风送系统优化设计与试验

王鹏飞¹ 徐 硕¹ 杨 欣¹ 李世可²

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001; 2. 河北农圣科技有限公司, 石家庄 050051)

摘要: 针对传统风送式喷雾机风场分布不合理、药液飘失较大的问题,设计一种塔形喷雾机风送系统并对其结构参数进行优化。应用 ANSYS 软件对喷雾机的风送系统进行有限元仿真分析,通过对比不同结构参数下两侧出风口风速差和上层出风口风速确定整流板结构、导流台锥度和两侧导流板的最优参数。验证试验结果表明:整流板结构参数对喷雾机两侧风场对称性的影响显著性由大到小为导叶倾角、导叶数量、导叶长度;导流台对风场对称性具有较大提升;导流板长度与角度对上层出风口风速具有较大影响;当整流板导叶数量为 12、长度为 200 mm、倾角为 0°、导流台锥度为 60°、风道 1 收缩角度为 2°时,喷雾机两侧风场对称性以及垂直分布均匀性达到最优。按最优参数组建喷雾机风送系统并进行风速试验,结果表明出口风速仿真值与试验值的相对误差小于 10%,模拟仿真结果可靠。通过田间试验得到喷雾机两侧雾滴沉积密度偏差小于 9%,即左右两侧雾滴沉积均匀;果树冠层内膛雾滴沉积密度均值为 75.69 粒/cm²,表明优化后塔形喷雾机作业时雾滴穿透性良好;雾滴在垂直方向上的分布总体呈现下层最大、中层次之、上层最小的规律,契合高纺锤形果树冠层分布。优化后塔形喷雾机两侧风场和雾滴沉积特性对称性较高。

关键词: 果园; 塔形喷雾机; 整流板; 导流台; 风送装置; 轴流风机

中图分类号: S224.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)11-0342-10

OSID:



Optimization Design and Test of Air Delivery System for Tower Sprayer

WANG Pengfei¹ XU Shuo¹ YANG Xin¹ LI Shike²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. Hebei Nongyao Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Aiming at the problems of unreasonable distribution of wind field and large loss of liquid, an air delivery system of tower sprayer was designed and its structural parameters were optimized. ANSYS software was used to simulate the air delivery system of sprayer, and the optimal parameters of the rectifier plate structure, deflector taper and deflector on both sides were determined by comparing the wind speed difference of the two sides outlet and the wind speed of the upper outlet under different structural parameters. The experimental results showed that the influence of the structure parameters of the rectifier on the symmetry of wind field on both sides of the sprayer from large to small was as follows: guide vane angle, guide vane number and guide vane length. The diversion table greatly improved the symmetry of wind field. The length and angle of the baffle had great influence on the wind speed of the upper outlet. When the number of guide blades of the rectifier plate was 12, the length was 200 mm, the angle was 0°, and the taper of the guide table was 60°, when the contraction angle of air duct 1 was 2°, the symmetry of wind field and vertical distribution uniformity on both sides of the sprayer were optimized. According to the optimal parameters, the sprayer air delivery system was set up and the wind speed test was carried out. The results showed that the relative error between the simulated wind speed and the test value was less than 10%, and the simulation results were reliable. Field experiments showed that the difference of droplet deposition density on both sides of the sprayer was less than 9%, that was, the droplet deposition on both sides was uniform. The average density of droplets deposited in the canopy of fruit trees was 75.69 particles/cm², which indicated that the optimized tower sprayer had good droplet

收稿日期: 2024-01-05 修回日期: 2024-02-10

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-27)和河北省现代农业产业技术体系苹果创新团队项目(HBCT2024150202)

作者简介: 王鹏飞(1986—),男,副教授,主要从事果园机械装备研究,E-mail: wpf5769@126.com

通信作者: 杨欣(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与地面机器系统人机安全研究,E-mail: yangxin@hebau.edu.cn

penetration. The vertical distribution of fog droplets in the lower layer was the largest, followed by the middle layer and the smallest in the upper layer, which was consistent with the distribution of high spindle tree canopy. The symmetry of the wind field and droplet deposition characteristics on both sides of the optimized tower sprayer was high, and the research results can provide reference for the optimization of the air delivery system of tower sprayer.

Key words: orchard; tower sprayer; duct guide vane; diversion table; air conveyor; axial fan

0 引言

病虫害防治是果园生产管理中的重要环节^[1], 风送式喷雾机在果园病虫害防治过程中起到重要作用^[2-3]。风机高速旋转所产生的气流不仅能够将雾化后的药液进一步破碎形成粒径更小的雾滴, 还能够扰动果树冠层, 使雾滴沉积到冠层内部, 增强雾滴沉积的均匀性^[4-6]。传统风送式喷雾机因其风送系统结构的限制, 导致喷雾机气流场分布与果树冠层不匹配^[7]。因此, 果园风送式喷雾机作业性能的提 升, 关键在于对其风送系统结构的优化设计。

风送系统是果园风送式喷雾机的重要组成部分, 合理的风送系统能够减少高速气流碰撞机体所损耗的能量^[8-9]。风送系统主要由风机和导流装置组成, 所以对喷雾机气流场的优化主要集中于对风机的数量和导流装置的结构进行改进^[10]。为优化喷雾机风场, 李建平等^[11]设计一种果园多风机风送喷雾机, 通过增加风机数量改变喷雾机风场, 与单风机相比, 喷雾机在竖直方向上具有更高、均匀性更好的空气流速。GARCÍA-RAMOS 等^[12-13]评估了配备两个反向旋转风扇的风送式喷雾机, 通过试验得出两个风扇同时启动时, 气流穿透性增强, 沉积量增加。臧帅^[14]通过设计轴向导叶、导流板和风道结构, 对风机所产生的旋转气流进行整流, 提高了传统喷雾机两侧风场的对称性。周杰等^[15]通过在传统喷雾机的挡风板上添加导流锥来降低气流碰撞所产生的能量损耗, 通过试验证明导流锥能够明显改善风机输出效率, 提高出风口风速以及均匀性。塔形喷雾机的药液附着率和冠层内部沉积量明显高于传统风送式喷雾机^[16]。丁航天等^[17-18]研发出一种前后双风机对称分布塔形风送试验台, 结果表明双风机相较于单风机左右两侧风场对称性增强, 但该风送系统结构复杂且缺少雾滴沉积研究。屠俊^[19]通过对风机选型和变量喷雾系统的设计, 研发出一种能够实时调节喷雾量的塔形变量喷雾试验台, 但其重点研究变量喷雾系统, 缺少对导流装置的结构分析。宋雷洁等^[20-21]通过改变塔形喷雾机双侧导流板的长度和角度来调节各个出风口的风速, 但在仿真分析过程中未能考虑到轴流风机旋转对气流的影响。

为提高轴流式果园风送喷雾机的作业质量, 本文设计优化一种塔形喷雾机, 根据喷雾所需的风量和风压完成风送系统的设计。考虑轴流风机旋转对气流产生的影响, 采用模拟仿真和试验验证相结合的方式研究整流板、导流台和双侧导流板对各个出风口风速的影响, 进而确定塔形喷雾机导流装置的优化方案, 开展喷雾机田间试验, 以验证其满足果园病虫害防治的要求。

1 塔形喷雾机工作原理与技术问题

1.1 风送系统设计与工作原理

1.1.1 整机结构与原理

设计的塔形风送式喷雾机高为 1 870 mm, 宽度为 1 050 mm, 左右两侧各 8 个出风口, 前挡风板和后挡风板间距为 100 mm。风送系统主要由轴流风机、风筒、塔形导流装置、水箱等工作部件组成, 如图 1 所示。塔形喷雾机工作时由拖拉机后输出轴为轴流风机提供动力, 轴流风机旋转产生高速气流, 气流经过风筒吹向后挡板, 在后挡板的作用下向四周发散并通过出风口流出风送系统。

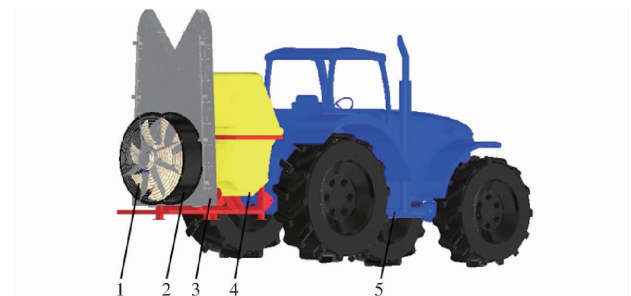


图 1 塔形喷雾机整机结构图

Fig. 1 Structure of tower sprayer

1. 轴流风机 2. 风筒 3. 塔形导流装置 4. 水箱 5. 拖拉机

1.1.2 轴流风机参数确定

在风送系统的设计中, 除导流装置结构设计外, 风机选型最为重要, 风机性能直接影响到果园喷雾机的喷雾效果。风送式喷雾机要求出口气流具备一定的动能以达到果树冠层内部, 也要求风机出风携带有雾滴的气流能够驱逐且置换喷雾机两侧与果树之间的空气。果园风送式喷雾机风量的确定通常采用置换原则和末速度原则^[10,22], 如图 2 所示。

根据置换原则, 风机产生的风量需完全置换出风口至果树间的空气, 风量计算公式为^[10,22]

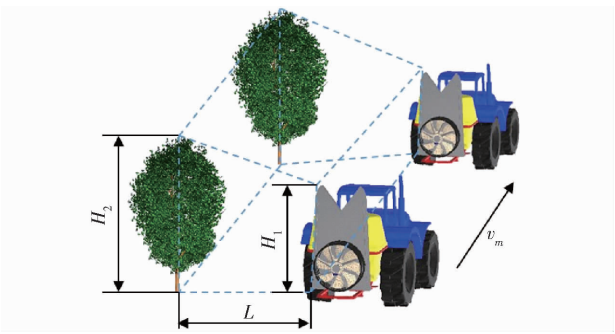


图 2 喷雾机风量置换示意图

Fig. 2 Air displacement diagram of sprayer

$$Q_d = \frac{v_m L K_1}{2} (H_1 + H_2) \tag{1}$$

式中 Q_d ——喷雾机单侧出风口风量, m^3/s
 H_1 ——喷雾机喷幅高度, m
 H_2 ——树高, m
 L ——出风口与树干之间距离, m
 v_m ——喷雾机行走速度, m/s
 K_1 ——考虑到气流的衰减和沿途损失而确定的系数, 取 1.3 ~ 1.6

根据末速度原则, 通过截面的风量相等, 得到喷雾机出风口气流速度为^[10, 22]

$$v_1 = \frac{H_2 v_2}{H_1 K_2} \tag{2}$$

式中 v_1 ——喷雾机出风口气流速度, m/s
 v_2 ——气流到达果树树干的速度, m/s
 K_2 ——气流损失系数, 与气象条件、作物品种、枝叶的茂密程度等因素有关, 取 1.3 ~ 1.8

本文所设计的塔形风送式喷雾机主要用于高纺锤形苹果树施药, 气流到达果树的末速度 v_2 为 9 ~ 10 m/s , 其他参数: H_1 为 1.5 m , H_2 为 3.5 ~ 4.0 m , L 为 1.5 m , v_m 为 0.5 ~ 1.0 m/s , 代入式 (1)、(2) 可得出 v_1 为 11.67 ~ 20.51 m/s , Q_d 为 2.48 ~ 6.6 m^3/s 。为确保风量满足较大植株, 拟定 v_1 为 20 m/s , Q_d 为 5 m^3/s , 即 18 000 m^3/h , 由于喷雾机作业时左右两侧均有气流输送, 所以风机总流量 Q 为 36 000 m^3/h 。

果园风送式喷雾机风机为喷雾机出风口提供动压, 计算式为^[10]

$$p = \frac{\rho v_1^2}{2} \tag{3}$$

式中 p ——喷雾机出风口风压, Pa
 ρ ——空气密度, kg/m^3
参数取值为: $\rho = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, $v_1 = 20 \text{ m}/\text{s}$, 代入式 (3) 可得 $p = 240 \text{ Pa}$ 。

根据喷雾机风量 Q 为 36 000 m^3/h , 动压 p 为 240 Pa , 选用 Multi-Wing 810/8-8 型轴流风机, 风

机的主要参数如表 1 所示。

表 1 轴流风机参数
Tab. 1 Axial fan parameters

参数	数值
风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	37 200
风机动压/ Pa	243
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 264
叶轮直径/ mm	810
叶片数	8
叶片倾角/($^\circ$)	32.5

1.2 风送系统技术与优化

由于轴流风机自身顺时针旋转, 其产生的气流也具有顺时针旋转的特点, 导致喷雾机两侧风场对称性较差, 如图 3 所示。此外, 轴流风机安装在塔形导流装置的下侧, 致使喷雾机两侧上方出风口风速较小。这些问题严重影响喷雾机作业时雾滴分布的均匀性。本文应用 ANSYS 软件对风送系统进行有限元分析, 通过添加整流板和导流台改善喷雾机两侧风场使其对称, 并通过改变左右两侧导流板的长度与角度, 提高上方出风口风速, 如图 4a 所示。左侧出风口自上而下依次编号为出风口 1 至出风口 8, 右侧出风口自上而下依次编号为出风口①至出风口⑧, 出风口 1 至出风口 8 分别对应风道 1 至风道 8, 如图 4b 所示。

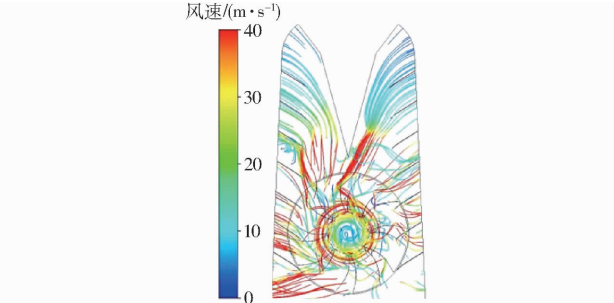


图 3 塔形喷雾机风送系统风速流线图

Fig. 3 Wind velocity flow diagram of tower sprayer air delivery system

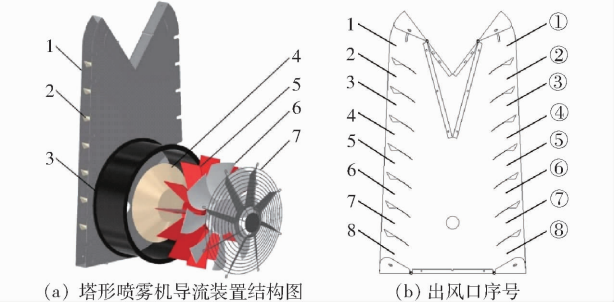


图 4 塔形喷雾机风送系统

Fig. 4 Tower sprayer diversion device

1. 后挡风板 2. 导流板 3. 风筒 4. 导流台 5. 整流板
6. 轴流风机 7. 网罩

2 送风装置参数优化

2.1 整流板布置参数优化

风筒连接轴流风机与塔形导流装置,是风送系统的关键部件。本文在风筒中添加整流板,以减弱因轴流风机旋转所引起的气流旋转,降低气流在风筒中的不稳定性,使气流垂直吹向塔形导流装置的后挡风板^[23]。为了探究整流板不同参数对两侧出风口风速差的影响,对整流板的导叶数量、导叶长度和导叶倾角进行优化与仿真分析。

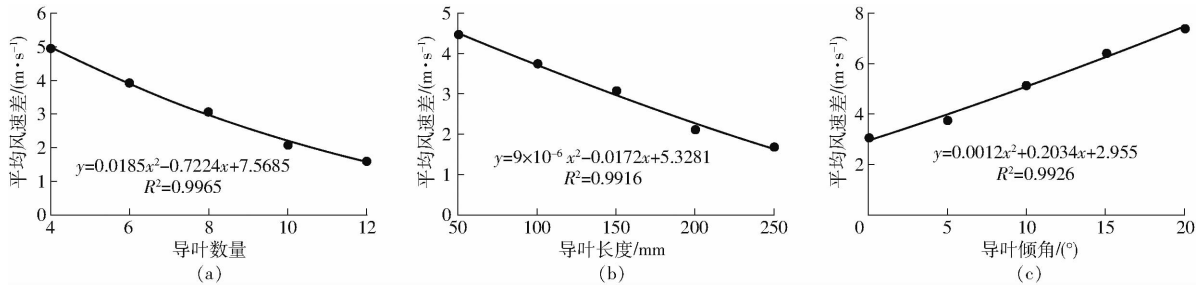


图5 不同因素对两侧出风口平均风速差的影响

Fig. 5 Influence of different factors on difference of average wind speed of both sides of outlet

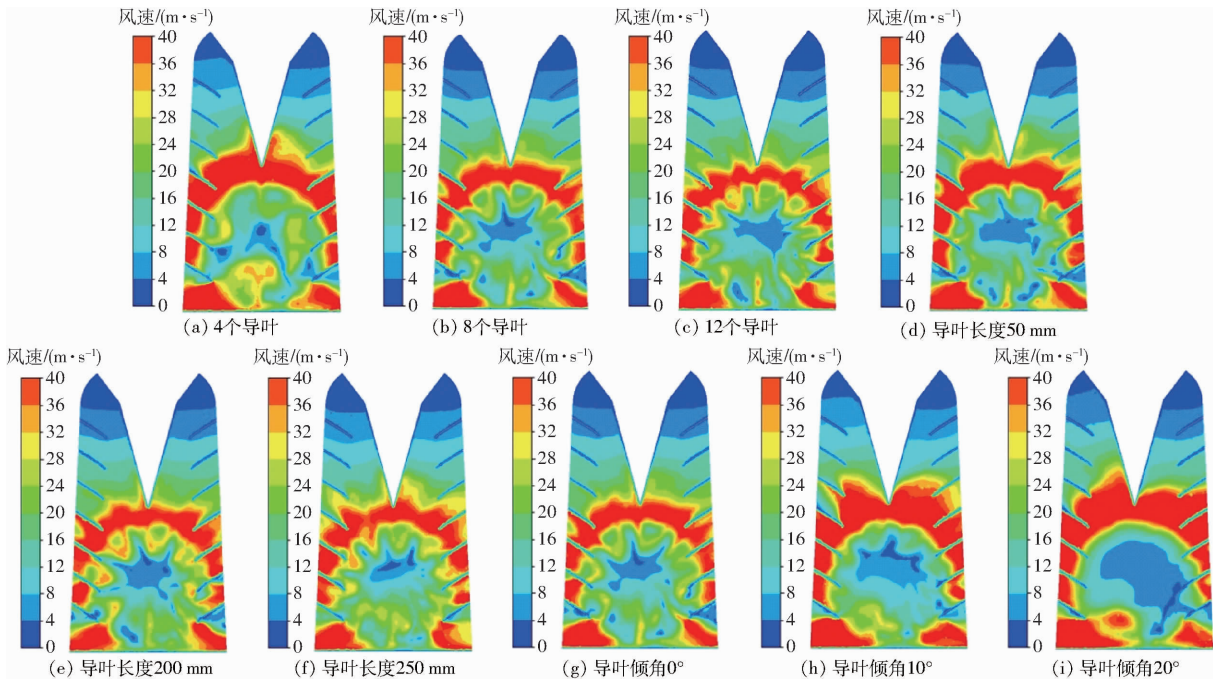


图6 单因素试验部分仿真结果

Fig. 6 Simulation results of single factor test

量的增加,喷雾机两侧出风口平均风速差呈逐渐减小的趋势,回归方程为 $y = 0.0185x^2 - 0.7224x + 7.5685$ 。为缩小多因素试验范围,导叶数量选取8、10、12作为多因素试验的试验水平值。

(2) 导叶长度

进行整流板导叶长度的单因素试验时,随着导叶长度的增加,其对平均风速差的影响逐渐减小,故将导叶长度的最大值确定为250 mm。整流板导叶倾角为0°,数量为8,导叶长度分别为50、100、150、

2.1.1 单因素试验

(1) 导叶数量

进行整流板导叶数量的单因素试验时,导叶数量过少整流效果较差,导叶数量过多将导致喷雾机风量不足,故将导叶数量确定为4~12;为保持喷雾机两侧风场的对称性,将导叶数量确定为偶数个。整流板导叶的倾角为0°,长度为150 mm,导叶数量分别为4、6、8、10、12,提取并计算喷雾机两侧出风口相同高度出风口的风速差,结果如图5a所示,部分仿真结果如图6a~6c所示。随着整流板导叶数

200、250 mm。整流板导叶长度对喷雾机两侧出风口平均风速差的影响如图5b所示,部分仿真结果如图6d~6f所示。随着导叶长度的增加,平均风速差呈逐渐减小趋势,回归方程为 $y = 9 \times 10^{-6}x^2 - 0.0172x + 5.3281$ 。因此选取150、200、250 mm作为多因素试验的试验水平值。

(3) 导叶倾角

进行整流板导叶倾角的单因素仿真时,整流板导叶数量为8,导叶长度为150 mm,导叶倾角分别为

0°、5°、10°、15°、20°。整流板导叶倾角对喷雾机两侧出风口的平均风速差的影响如图 5c 所示,部分仿真结果如图 6g ~ 6i 所示。随着导叶倾角的增加,平均风速差呈逐渐增大的趋势,回归方程为 $y = 0.001\ 2x^2 + 0.203\ 4x + 2.955$ 。因此选取 0°、5°、10°作为多因素试验的试验水平值。

2.1.2 多因素试验

对整流板的导叶数量、导叶长度和导叶倾角进行三因素三水平响应面试验,探究 3 种因素之间的交互作用影响,从而确定最佳参数组合。选取喷雾机两侧出风口平均风速差为响应值 Y ,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 整流板参数优化试验因素编码

Tab.2 Test factors codes of parameter optimization of rectifier plate			
编码	因素		
	导叶数量	导叶长度/mm	导叶倾角/(°)
-1	8	150	0
0	10	200	5
1	12	250	10

在单因素仿真的基础上,利用 Design-Expert 12 软件进行响应面试验分析,方案及结果如表 3 所示,方差分析如表 4 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。对整流板导叶数量、导叶长度和导叶倾角进行回归拟合,得到喷雾机两侧出风口平均风速差 Y 的二次多项式回归拟合模型为

表 3 整流板参数优化试验设计与结果

Tab.3 Test design and results of parameter optimization of rectifier plate				
序号	因素			Y/ (m·s ⁻¹)
	X_1	X_2	X_3	
1	0	0	0	3.69
2	0	-1	-1	2.45
3	1	-1	0	3.17
4	-1	-1	0	3.78
5	0	0	0	3.79
6	-1	0	-1	2.05
7	0	1	-1	1.83
8	0	0	0	3.72
9	0	1	1	4.48
10	1	0	-1	1.47
11	0	0	0	3.72
12	0	0	0	3.69
13	-1	1	0	3.28
14	0	-1	1	4.66
15	1	1	0	3.12
16	1	0	1	4.26
17	-1	0	1	4.47

表 4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	14.34	9	1.59	373.50	<0.000 1
X_1	0.30	1	0.30	71.32	<0.000 1
X_2	0.23	1	0.23	53.41	0.000 2
X_3	12.68	1	12.68	2 972.01	<0.000 1
X_1X_2	0.05	1	0.05	11.87	0.010 8
X_1X_3	0.03	1	0.03	8.02	0.025 3
X_2X_3	0.05	1	0.05	11.35	0.011 9
X_1^2	0.48	1	0.48	113.12	<0.000 1
X_2^2	0.01	1	0.01	2.09	0.191 6
X_3^2	0.43	1	0.43	101.72	<0.000 1
失拟项	0.02	3	0.01	4.63	0.086 5
纯误差	0.01	4	0.001 7		
总和	14.37	16			

$$Y = 3.72 - 0.195X_1 - 0.168\ 7X_2 + 1.26X_3 + 0.112\ 5X_1X_2 + 0.092\ 5X_1X_3 + 0.11X_2X_3 - 0.338\ 5X_1^2 - 0.046X_2^2 - 0.321X_3^2 \quad (4)$$

由表 4 可知,模型 $P < 0.000\ 1$,回归方程极显著,能够描述各因素与响应值之间的关系;失拟项 $P > 0.05$,失拟项不显著,说明无失拟因素存在,误差较小;拟合统计 $R^2 = 0.997\ 9$,校正系数 $R^2_{adj} = 0.995\ 3$,两者接近,说明模型拟合程度较高,通用性较好; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 对平均风速差影响极显著, X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 对平均风速差的影响显著。整流板的各个因素对喷雾机两侧出风口平均风速差影响的主次顺序为:导叶倾角、导叶数量、导叶长度。

当整流板导叶倾角为 5°时,随着导叶长度的增加,喷雾机两侧出风口平均风速差逐渐减小,导叶数量为 12 时,平均风速差最小(图 7a)。当整流板的导叶长度为 200 mm 时,随着导叶倾角的减小喷雾机两侧出风口平均风速差逐渐减小,导叶数量为 12 时,平均风速差最小(图 7b)。当整流板导叶数量为 10 时,随着导叶倾角的减小,喷雾机两侧出风口平均风速差逐渐减小,导叶长度为 250 mm 时,平均风速差最小(图 7c)。

为获取整流板最优参数组合,利用 Design-Expert 12 软件进行优化,当导叶数量为 12、导叶长度为 200 mm、导叶倾角为 0°时,喷雾机两侧出风口平均风速差为 1.51 m/s。按照上述最优参数组合建立仿真模型并进行仿真试验,仿真试验塔形导流装置截面速度云图见图 8,喷雾机两侧出风口平均风速差为 1.47 m/s,与优化结果的相对误差为 2.6%。

2.2 导流台参数优化

为进一步优化塔形喷雾机左右两侧风场分布的对称性,针对导流台对风送系统内部流场分布的影

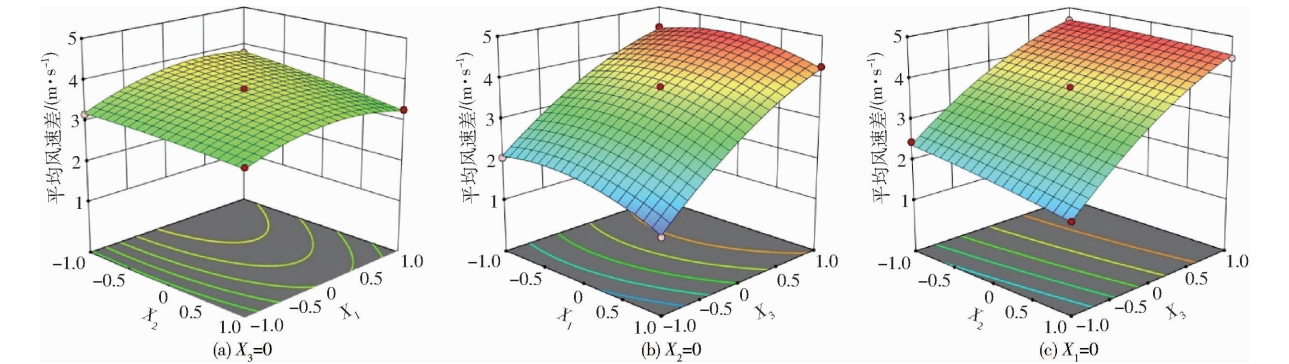


图 7 各因素交互作用对喷雾机两侧出风口平均风速差影响响应面

Fig. 7 Influence of interaction of various factors on average wind speed difference of outlet on both sides of sprayer

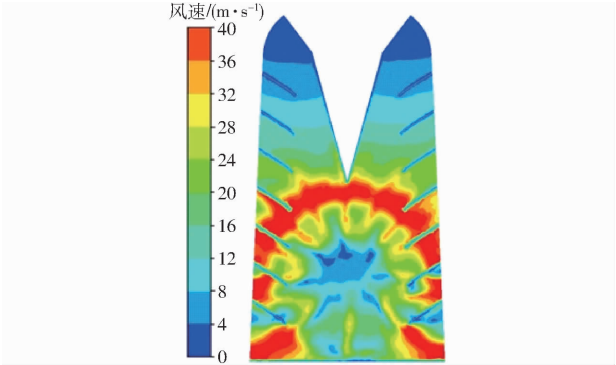


图 8 塔形导流装置截面速度云图

Fig. 8 Velocity cloud image of section of tower diversion device

响进行仿真研究。导流台高度为 100 mm,安装于塔形喷雾机后挡风板上,不仅能引导空气流动,有效调节左右风场分布的均匀性,还可以减小气流撞击后挡风板引起的能量损耗^[24-25]。通过改变导流台的锥度来研究其特征参数对左右两侧风场对称性的影响。若导流台锥度过大,其安装位置将会与导流板位置冲突;若导流台锥度过小,将起不到优化风场对称性的作用,所以将导流板锥度确定为 30°~70°。

由图 8 可知,添加整流板后,塔形导流装置内风场以轴流风机为中心呈环形辐射状分布。为提高上层出风口风速,通过调整两侧导流板长度和角度,使导流板末端延长或缩短至环形高风速区域,调整后导流板参数如表 5 所示。

表 5 调整后导流板参数

参数	导流板编号						
	1	2	3	4	5	6	7
长度/mm	683	490	318	160	130	100	100
夹角/(°)	62	62	62	55	50	45	45

注:夹角为导流板与水平线的角度,导流板由上至下依次编号为 1~7。

将 5 种锥度导流台分别连接于塔形导流装置内,与整流板进行模拟仿真。轴流风机转速设置为

2 264 r/min,得到左右两侧出风口风速差如表 6 所示。

表 6 不同锥度导流台左右两侧风速差

Tab. 6 Wind speed difference between left and right sides of different taper guides						m/s
出风口 序号	导流台锥度/(°)					
	30	40	50	60	70	
1	0.03	-0.18	0.03	0.01	-0.06	
2	-0.49	-0.07	0.07	0.15	-0.43	
3	1.08	0.50	0.95	0.51	1.41	
4	-0.85	0.64	-1.49	-0.26	-1.10	
5	-0.62	-1.10	0.02	0.28	-0.24	
6	3.69	3.18	3.86	3.79	3.03	
7	2.21	3.14	1.73	2.39	2.23	
8	1.32	0.65	1.04	0.46	0.86	
平均值	1.29	1.18	1.15	0.98	1.17	

注:正数表示左侧出风口风速大于右侧出风口风速,负数则相反。

由表 6 可知,添加导流台后各组仿真得到的平均风速差均小于无导流台时的 1.47 m/s,证明导流台能够提高喷雾机两侧风场的对称性。随着导流台锥度逐渐增大,喷雾机两侧出风口平均风速差呈现先减小后增加的趋势。当导流台锥度为 60°时,平均风速差为 0.98 m/s,与无导流台时相比降低 33.3%。因此,整流板导叶数量 12、长度 200 mm、倾角 0°与 60°导流台的组合时优化效果最好,两侧出风口风速对称性最强,气流效果最优,模拟仿真塔形导流装置截面速度云图如图 9 所示。

2.3 导流板参数优化

在整流板及导流台对左右两侧风速对称性的模拟仿真过程中,得到的最终结果为整流板导叶数量 12、长度 200 mm、倾角 0°和 60°导流台。由图 9 可知,左右两侧上方出风口风速较低,为 9 m/s 左右,原因是风道 1 和风道①为扩张型风道。气流由较小的进风口进入风道,在风道内经过扩张,从较大的出风口流出风道,空气动能下降严重。因此可通过调

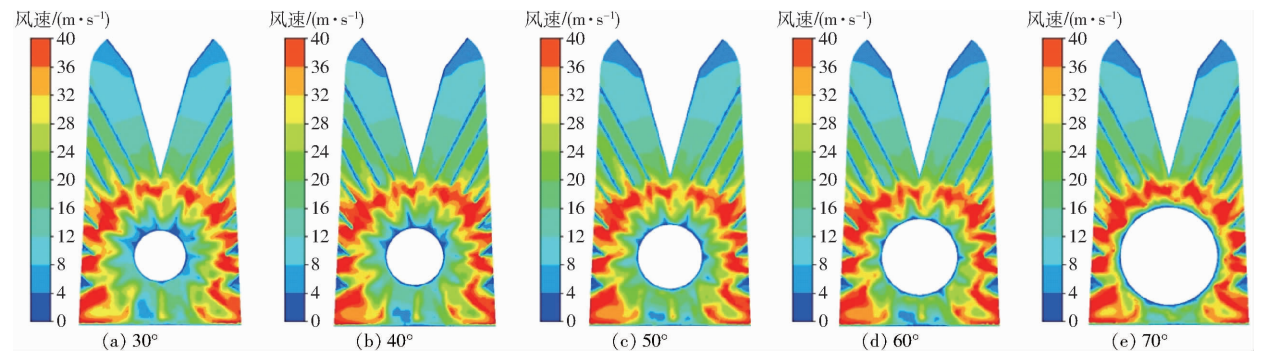


图 9 不同锥度导流台下塔形导流装置速度云图

Fig. 9 Velocity cloud images of tower-shaped deflectors under different taper deflectors

整风道的两个导流板的角度使风道变为收缩型,来提高上层出风口风速^[26-28]。分别探究当风道 1 的收缩角度为 1°、2°、3°时各出风口风速,3 种方案各风道角度如表 7 所示。图 10 为风道不同收缩角度时两侧出风口风速,图 11 为两侧同一高度出风口风速差,图 12 为不同收缩角度时塔形导流装置截面速度云图。

表 7 不同优化方案下各风道收缩或扩张角度

Tab.7 Contraction or expansion angles of each air duct under different optimization schemes (°)								
优化方案	风道序号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	-1	5	10	5	0	45
2	-2	-1	-1	4	12	5	0	45
3	-3	-1	-1	4	13	5	0	45

注:正数表示扩张型风道,负数表示收缩型风道。

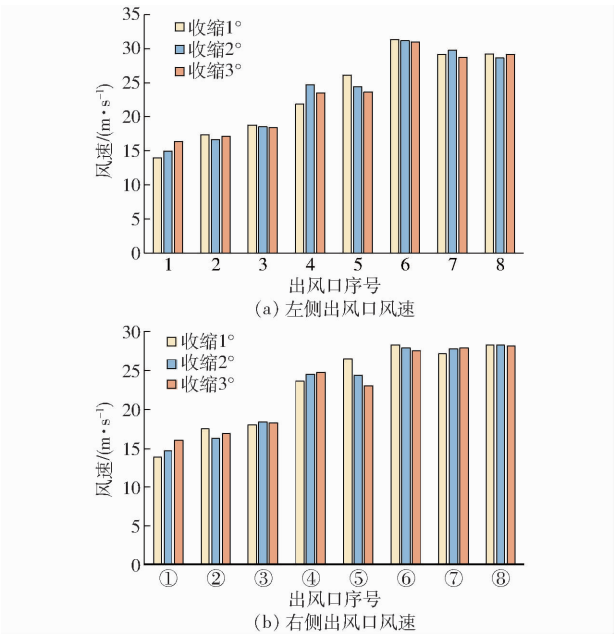


图 10 3 种收缩角度对应各出风口风速

Fig. 10 Wind speed of each outlet with three contraction angles

由图 10 可知,在 3 种风道收缩角度下,喷雾机

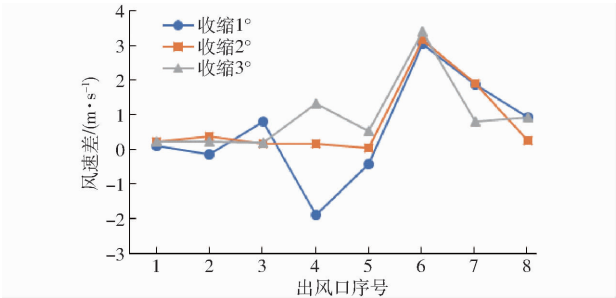


图 11 两侧同一高度出风口风速差变化曲线

Fig. 11 Air speed difference curves of outlet at the same height on both sides

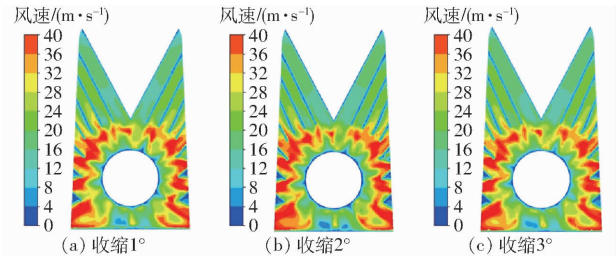


图 12 风道不同收缩角度塔形导流装置速度云图

Fig. 12 Velocity cloud images of tower diversion device with different contraction angles of air duct

两侧出风口风速由上到下的变化趋势均为先增大后减小,符合高纺锤形果树树冠轮廓的变化规律。其中,当收缩角度为 2°时,左右两侧最上方出风口的风速可分别达到 14.95 m/s 和 14.74 m/s;当收缩角度为 3°时,左右两侧最上方出风口的风速可分别达到 16.34 m/s 和 16.11 m/s,当收缩角度为 2°或 3°时对上方出风口风速提升效果较好。由图 11 可知,当收缩角度为 2°时,出风口 1 至出风口 5 的风速差均在 0.4 m/s 以内,最大风速差在出风口 6,为 3.17 m/s,两侧出风口平均风速差为 0.79 m/s。当收缩角度为 1°和 3°时,两侧出风口平均风速差分别为 1.14 m/s 和 0.95 m/s,均大于收缩角度为 2°时出风口平均风速差,风场分布对称性较差。由此可知,当风道 1 收缩角度为 2°时,塔形喷雾机各个出风口风速效果以及两侧出风口对称性最优。

综上所述,采用导叶数量 12、长度 200 mm、倾角

0°整流板、导流台锥度为 60°、风道 1 的收缩角度为 2°进行塔形喷雾机导流装置的优化设计,该组合为导流装置的最优组合。

3 试验

3.1 试验材料与设备

为了验证模拟仿真得到的最优风送装置结构的可靠性,基于模拟仿真得到的参数,完成塔形喷雾机及风送系统的加工试制。采用东方红 ME604 型拖拉机作为动力,UT363S 型数字式风速计测量气流速度,水敏纸采集雾滴沉积数据,Epson perfection 1670 型激光扫描仪和 Image master 雾滴分析软件进行数据读取和分析,开展喷雾机外部流场试验和田间试验。

3.2 风送装置两侧风场均匀性试验

3.2.1 风送系统模型验证试验

为验证风送系统模拟仿真结果的准确性和优化后的实际效果,测量塔形喷雾机 16 个出风口风速。试验时设置轴流风机转速为 2 264 r/min,每个出风口停留 10 s,读取最大值作为结果,每组试验重复 3 次,以保证数据的准确性。

以塔形喷雾机各个出风口风速的模拟仿真值与试验值的相对误差为评价指标,对模拟仿真结果和试验结果进行评估。表 8 为仿真最优方案各出风口风速值与试验测得结果对比。左右两侧出风口风速模拟值与试验值相对误差均在 10% 以内,可见模拟仿真的可靠性较高,能够真实反映优化后的风送系统在实际作业过程中气流场的分布特性。

表 8 试验与模拟结果对比

Tab. 8 Comparison of experimental and simulated results			
出风口序号	模拟值/(m·s ⁻¹)	试验值/(m·s ⁻¹)	相对误差/%
1	14.95	15.83	5.88
2	16.66	17.48	4.91
3	18.53	18.94	2.21
4	24.70	26.74	8.27
5	24.42	27.78	9.27
6	31.16	33.84	8.59
7	29.75	30.74	3.34
8	28.63	29.83	4.20
①	14.74	16.73	9.80
②	16.27	17.36	6.68
③	18.38	19.43	5.69
④	24.53	25.83	5.30
⑤	24.58	26.95	9.62
⑥	27.99	28.92	3.30
⑦	27.83	29.39	5.62
⑧	28.38	28.04	1.19

3.2.2 喷雾机外部流场试验

为了进一步研究塔形喷雾机外部气流场的分布规律以及喷雾机外部流场气流速度衰减规律,分别在喷雾机两侧设置风速测量点,轴流风机转速设置为 2 264 r/min,喷雾机外流场风速测量点分布图如图 13 所示。喷雾机左右两侧共计 60 个监测点,在平面上呈网状分布。本试验于 2023 年 11 月 15 日在石家庄果树研究所进行,环境风速为 0.28 m/s,温度为 13.7℃。

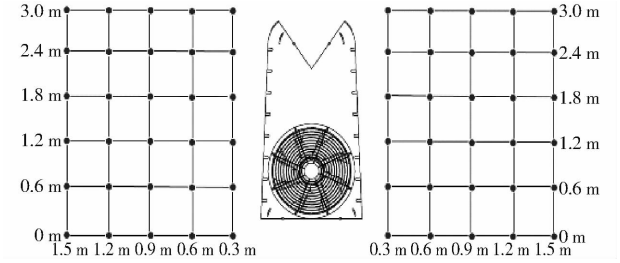


图 13 风速测量点分布图

Fig. 13 Distribution map of wind speed measuring points

塔形喷雾机两侧外流场风速与横向距离、纵向高度关系如图 14 所示。由图 14 可以看出,塔形喷雾机左右两侧风场随着水平距离的增加,衰减规律大致相同,证明左右两侧外流场分布具有较高的对称性。从图中可以看出,在垂直高度为 1.2 m 时风速最高,原因是 1.2 m 对应风速较高的出风口 6 和出风口⑥;在水平距离 0.3 ~ 1.2 m 范围内,各个高度风速大幅下降,原因是空气对高速气流的阻碍作用;在 1.2 ~ 1.5 m 范围内气流速度下降缓慢,原因是气流速度降低,致使空气阻力减小。已有研究表明,当风速小于 1.5 m/s 时,气流对果树冠层的穿透性不足^[10]。由图 14 可知,各个高度在水平距离 1.5 m 处风速均大于 1.5 m/s,表明该喷雾机左右风场具有良好的穿透性。

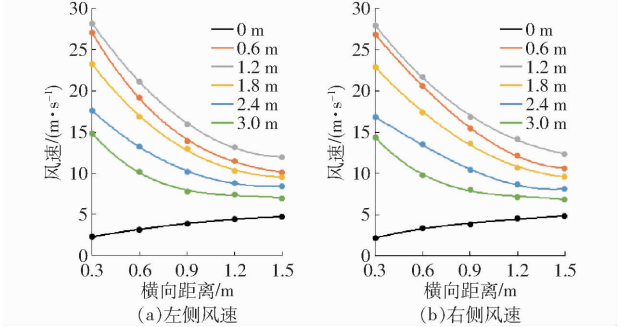


图 14 外流场风速对比

Fig. 14 Comparison of wind speed in outflow field

3.3 雾滴沉积均匀性试验

为验证风送装置优化后的塔形喷雾机的喷雾效果,于 2023 年 11 月 16 日在石家庄果树研究所进行田间试验,试验对象为 7 年生富士苹果树,树高 3.5 m,

冠幅 2 m,株行距为 2 m × 4 m。在园区一行间左右两侧选取 4 棵枝叶茂盛的典型果树,依次记为 S1、S2、S3、S4,共做 3 组平行试验。喷雾机共装备 16 个强宇 QY65 型双喷嘴喷头,喷雾作业压力为 1 MPa,流量为 1.43 L/min,拖拉机的作业速度为 1 m/s,满足 NY/T 650—2013《喷雾机(器)作业质量》要求。水敏纸布置如图 15a 所示,试验现场如图 15b 所示。试验完成后,将水敏纸收集并处理。

3.3.1 左右两侧雾滴沉积

为探究优化后喷雾机左右两侧雾滴沉积分布情况,对喷雾机左右两侧果树的雾滴沉积情况进行对比分析,如图 16 所示。S1、S3 为喷雾机作业时左侧果树,S2、S4 为喷雾机作业时右侧果树。果树 S1、S3 与果树 S2、S4 的内、中、外雾滴沉积密度相对偏差均在 8% 以内,上、中、下 3 层雾滴沉积密度相对偏差

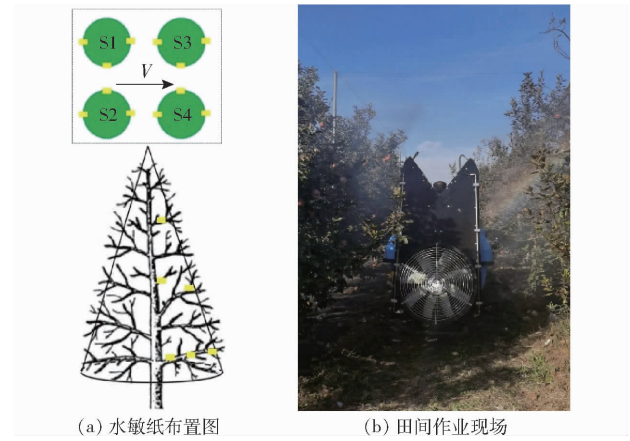
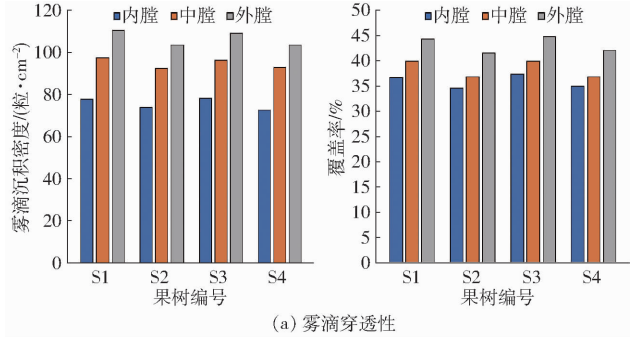


图 15 田间试验过程
Fig. 15 Field trial process

均在 9% 以内,证明优化后喷雾机在作业时两侧雾滴沉积密度具有良好的对称性。

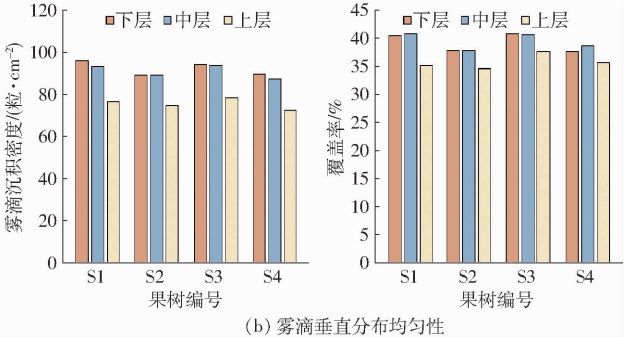


图 16 雾滴沉积对比图
Fig. 16 Comparison of droplet deposition

3.3.2 雾滴穿透性

为探究优化后塔形喷雾机作业时雾滴穿透性能,对果树冠层内、中、外的雾滴沉积量及雾滴覆盖率进行对比分析,如图 16a 所示。由图可知,果树冠层内、中、外雾滴沉积密度和雾滴覆盖率总体呈现外膛最大、中膛次之、内膛最小的趋势。果树 S1、S3 整体雾滴沉积密度和覆盖率均高于果树 S2、S4,原因是优化后喷雾机左侧出风口风速略高于右侧出风口风速。内膛雾滴沉积密度均值为 75.69 粒/cm²,大于果园喷雾机作业标准 70 粒/cm²;内膛雾滴覆盖率均值为 35.77%,大于果园喷雾机作业标准 33%。表明改良后的塔形喷雾机作业时雾滴穿透性良好,能够满足作业要求。

3.3.3 雾滴垂直分布均匀性

为探究果树冠层垂直方向上雾滴沉积规律,对比果树冠层上、中、下 3 层雾滴沉积密度以及雾滴沉积覆盖率,如图 16b 所示。由图可知,雾滴在垂直方向上的分布总体呈现下层最大、中层次之、上层最小的规律,满足高纺锤形果树树形特征。上、中、下层雾滴沉积密度均值分别为 75.68、91.09、92.47 粒/cm²,

均大于果园施药作业标准。果树冠层上、中、下 3 层雾滴覆盖率均值分别为 35.71%、39.41%、39.06%,满足果园施药标准。

4 结论

- (1)对塔形果园喷雾机风送系统关键部件进行了选型和结构优化。通过 ANSYS 仿真分析,确定了整流板的导叶参数对风送系统两侧对称性影响由大到小为:导叶倾角、导叶数量、导叶长度。确定了喷雾机风送装置的最佳组合:整流板导叶数量为 12、导叶长度为 200 mm、导叶倾角为 0°、导流台锥度为 60°、风道 1 收缩角度为 2°。
- (2)塔形喷雾机风送系统风速测试试验结果表明,两侧出风口风速仿真值与试验值分布规律基本一致,且出风口处风速相对误差均小于 10%,证明仿真数据真实可靠。外流场风速试验结果表明喷雾机两侧风场对称性较高,证明风送系统结构合理。
- (3)田间雾滴沉积试验结果表明,优化后塔形风送式喷雾机作业时两侧果树的雾滴沉积密度偏差

小于 9%,左右两侧雾滴沉积相对均匀;喷雾机具有良好的穿透性,能够使雾滴穿透果树冠层沉积在内膛;雾滴沉积垂直分布由大到小为下层、中层、上层,满足高纺锤形果树作业要求。

参 考 文 献

[1] 郑永军,陈炳太,吕昊曦,等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 110 – 124.
ZHENG Yongjun, CHEN Bingtai, LÜ Haotun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 110 – 124. (in Chinese)

[2] 王震涛,牛浩,唐玉荣,等. 果园喷雾机械及技术的 research 现状[J]. 塔里木大学学报, 2019, 31(3): 83 – 91.
WANG Zhentao, NIU Hao, TANG Yurong, et al. Research status of orchard spray machinery and technology[J]. Journal of Tarim University, 2019, 31(3): 83 – 91. (in Chinese)

[3] EDWARD J K, RICHARD A F, GWEN A H, et al. Spray drift from a conventional axial fan airblast sprayer in a modern orchard work environment[J]. Annals of Work Exposures and Health, 2018, 62(9): 1134 – 1146.

[4] 王杰,陶振洋,茹煜,等. 风机在农林植保机械中的应用研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2016, 37(9): 67 – 74.
WANG Jie, TAO Zhenyang, RU Yu, et al. Research progress and outlook on application of fan in plant protection machinery of agriculture and forestry[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(9): 67 – 74. (in Chinese)

[5] ADE G, MOLARI G, RONDELLI V. Recycling tunnel sprayer for poesticide dose adjustment to the crop environment[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(2): 409 – 413.

[6] SALCEDO R, VALLET A, GRANELL R. Eulerian – Lagrangian model of the behaviour of droplets produced by an air-assisted sprayer in a citrus orchard[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 76 – 91.

[7] 张俊雄,朱祥森,刘景云,等. 风送式果园喷雾机气流场优化及试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 406 – 413.
ZHANG Junxiong, ZHU Xiangsen, LIU Jingyun, et al. Optimization design and test of airflow field for orchard air-blast sprayer[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2021, 42(4): 406 – 413. (in Chinese)

[8] 杨欣,刘玉肖,王阳,等. 果园多风管喷雾机风送系统 CFD 仿真与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(4):1 – 9.
YANG Xin, LIU Yuxiao, WANG Yang, et al. CFD simulation and test of wind delivery system of multi-duct sprayer in orchard[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(4): 1 – 9. (in Chinese)

[9] 徐奕蒙,朱晓文,刘志杰,等. 基于计算流体动力学的风送式喷雾机风送系统流场模拟及结构优化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 451 – 458.
XU Yimeng, ZHU Xiaowen, LIU Zhijie, et al. Field simulation and structure optimization of the air conveying system in air assisted sprayer based on computer fluid dynamics[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2018, 44(4): 451 – 458. (in Chinese)

[10] 茹煜,陈旭阳,刘彬,等. 轴流式果园喷雾机风送系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 147 – 157.
RU Yu, CHEN Xuyang, LIU Bin, et al. Optimized design and performance test of axial flow orchard sprayer air delivery system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 147 – 157. (in Chinese)

[11] 李建平,边永亮,杨欣,等. 果园多风机风送喷雾机作业参数优化与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(10): 2474 – 2485.
LI Jianping, BIAN Yongliang, YANG Xin, et al. Operational parameter optimization and testing of an air-assisted multi-fan orchard sprayer[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(10): 2474 – 2485. (in Chinese)

[12] GARCÍA-RAMOS F, VIDAL M, BONÉ A, et al. Analysis of the air flow generated by an air-assisted sprayer equipped with two axial fans using a 3D Sonic anemometer[J]. Sensors, 2012, 12(6): 7598 – 7613.

[13] GARCÍA-RAMOS F, VIDAL M, BONÉ A. Field evaluation of an air-assisted sprayer equipped with two reversed rotation fans[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(4): 481 – 494.

[14] 臧帅. 果园喷雾机风送喷雾系统设计仿真与试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2021.
ZANG Shuai. Design simulation and experimental study of an air-assisted spraying system of orchard sprayer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[15] 周杰,许林云,周宏平,等. 出口导流分割对轴流式果园喷雾机流场的影响[J]. 林业工程学报, 2018, 3(6): 128 – 134.
ZHOU Jie, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Effect of air outlet stream diversion segmentation on flow field of axial-flow orchard sprayer[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(6): 128 – 134. (in Chinese)

[16] 曹龙龙. 三种典型果园风送式喷雾机雾滴沉积特性与风送系统的优化试验研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2014.
CAO Longlong. Droplet deposition of three typical orchard air-assisted sprayer and air-assisted parametric optimization and experiment[D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[17] 丁天航,曹曙明,薛新宇,等. 果园喷雾机单双风机风道气流场仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 62 – 68,315.
DING Tianhang, CAO Shuming, XUE Xinyu, et al. Simulation and experiment on single-channel and double-channel airflow field of orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 62 – 68,315. (in Chinese)

[18] 丁天航. 双风机双流道果园喷雾机气流场特性研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
Ding Tianhang. Research on double fans double channel orchard sprayer airflow field characteristic[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)

[19] 屠俊. 塔式风送喷雾系统设计及关键作业参数优化试验研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2021.
TU Jun. Experimental research on design of tower-type air spray system and optimization of key operating parameters[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)

counties in west of Hubei[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 272 – 279. (in Chinese)

[32] 卢新海,唐一峰,易家林,等. 基于空间计量模型的耕地利用转型对农业经济增长影响研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(6): 53 – 61.
LU Xinhai, TANG Yifeng, YI Jialin, et al. Study on the impact of cultivated land use transition on agricultural economic growth based on spatial econometric model[J]. China Land Science, 2019, 33(6): 53 – 61. (in Chinese)

[33] 付慧,刘艳军,孙宏日,等. 京津冀地区耕地利用转型时空分异及驱动机制[J]. 地理科学进展, 2020, 39(12): 1985 – 1998.
FU Hui, LIU Yanjun, SUN Hongri, et al. Spatiotemporal characteristics and dynamic mechanism of cultivated land use transition in the Beijing – Tianjin – Hebei region[J]. Progress in Geography, 2020, 39(12): 1985 – 1998. (in Chinese)

[34] 蒋梦凡,李智国,李杰,等. 耕地利用转型突变点检测及其时空特征——以昆明市东川区为例[J]. 中国土地科学, 2022, 36(3): 86 – 95.
JIANG Mengfan, LI Zhiguo, LI Jie, et al. Mutation point detection of cultivated land use transition and its spatial-temporal characteristics: taking Dongchuan District of Kunming City as an example[J]. China Land Science, 2022, 36(3): 86 – 95. (in Chinese)

[35] 徐云飞,程琦,魏祥平,等. 变异系数法结合优化神经网络的无人机冬小麦长势监测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 71 – 80.
XU Yunfei, CHENG Qi, WEI Xiangping, et al. Monitoring of winter wheat growth under UAV using variation coefficient method and optimized neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 71 – 80. (in Chinese)

[36] 施园园,赵华甫,郦文聚,等. 北京市耕地多功能空间分异及其社会经济协调模式解释[J]. 资源科学, 2015, 37(2): 247 – 257.
SHI Yuanyuan, ZHAO Huaifu, YUN Wenju, et al. Analysis on spatial differentiation of arable land multifunction and socio-economic coordination model in Beijing[J]. Resources Science, 2015, 37(2): 247 – 257. (in Chinese)



(上接第 351 页)

[20] 宋雷洁,李建平,杨欣,等. 塔形风送式果园喷雾机风场参数优化设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 12 – 17.
SONG Leijie, LI Jianping, YANG Xin, et al. Optimization design of wind field parameters of tower type wind-driven orchard sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 12 – 17. (in Chinese)

[21] 宋雷洁,李建平,杨欣,等. 塔形风送式喷雾机导流结构参数优化[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 34 – 39.
SONG Leijie, LI Jianping, YANG Xin, et al. Parameter optimization of diversion structure of tower type air-assisted sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 34 – 39. (in Chinese)

[22] 戴奋奋. 风送喷雾机风量的选择与计算[J]. 植物保护, 2008, 9(6): 124 – 127.
DAI Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers[J]. Plant Protection, 2008, 9(6): 124 – 127. (in Chinese)

[23] 宋淑然,夏侯炳,卢玉华,等. 风送式喷雾机导流器结构优化及试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 7 – 12.
SONG Shuran, XIA Houbing, LU Yuhua, et al. Structural optimization and experiment on fluid director of air-assisted sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 7 – 12. (in Chinese)

[24] 朱博韬,张亚新,王硕. 径向流反应器导流锥结构优化及流场特性数值模拟[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 444 – 452.
ZHU Botao, ZHANG Yaxin, WANG Shuo. Optimization of guide cone structure and numerical simulation of flow field in radial flow reactor[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2023, 40(4): 444 – 452. (in Chinese)

[25] 程洪杰,赵谢,赵媛,等. 导流锥结构参数对燃气弹射筒内压力冲击平滑效果影响研究[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2444 – 2453.
CHENG Hongjie, ZHAO Xie, ZHAO Yuan, et al. Influence of structural parameters of diversion cone on smooth effect of gas ejection bottom pressure impact[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11): 2444 – 2453. (in Chinese)

[26] 边永亮,李建平,杨欣,等. 果园多风机风送喷雾机聚风筒聚风特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 39 – 50.
BIAN Yongliang, LI Jianping, YANG Xin, et al. Experimental research on the characteristics of wind converging duct of an air-assisted sprayer in orchard[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 39 – 50. (in Chinese)

[27] 张佳喜,陈发,赵志艳. 风筒结构对风送式喷雾机喷幅的影响[J]. 农机化研究, 2007, 28(1): 176 – 177.
ZHANG Jiayi, CHEN Fa, ZHAO Zhiyan. Influence of wing shape on air-blast sprayer of spray span [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 28(1): 176 – 177. (in Chinese)

[28] 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 modification on the spray drift emitted by an air-assisted sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 111 – 115. (in Chinese)