

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.009

喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化

李建平¹ 边永亮¹ 霍 鹏² 王鹏飞¹ 薛春林¹ 杨 欣¹

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071000; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对喷雾机传统风送喷雾系统难以精准控制风量致使漂移现象严重、药液利用率低下的问题,设计了一种将轴流风机与环形喷头相配合的喷雾系统。通过对风机风场进行计算流体力学 CFD 流体仿真、对标试验、环形喷管内流场仿真确定了环形喷管尺寸参数与喷头安装位置。设计单因素与多因素正交试验来研究风机端口风速、扇形喷头型号与喷头安装倾角对喷雾效果的影响进而确定最佳喷雾参数组合。结果表明:环形喷管应设置在轴流风机出口端面中心位置,3个喷头呈 120° 均布在环形喷管上;在风机气力作用下,雾滴沉积量的峰值处于距风机端口 0.5 ~ 1.5 m 的范围,风送喷雾装置与靶标果树的作业距离不应超过 1.5 m;风机气力有助于细化雾滴,但出口风速不宜大于等于 8 m/s;喷雾总体性能与喷头倾角呈极显著相关 ($P < 0.01$),喷头安装倾角 60° 性能最优;雾滴沉积密度随扇形喷头型号的增大呈先增大后减小的趋势,雾滴的体积中值直径随扇形喷头型号的增大而增大;最优配置参数风机风速为 6 m/s、喷头型号为 02 型、喷头安装倾角为 60°。此参数组合下雾滴沉积量为 5.08 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,表明优化模型可靠。

关键词: 风送喷雾机; 轴流风机; 环形喷管; 喷雾系统; 正交试验

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0079-10 OSID: 

Design and Experimental Optimization of Spray Device for Air-fed Annular Nozzle of Sprayer

LI Jianping¹ BIAN Yongliang¹ HUO Peng² WANG Pengfei¹ XUE Chunlin¹ YANG Xin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems that the traditional air-fed spraying system of sprayer is difficult to accurately control the air volume, resulting in serious drift phenomenon and low utilization rate of liquid medicine, a spraying system with axial fan and annular nozzle was designed. The size parameters of annular nozzle and the installation position of nozzle were determined by CFD fluid simulation, benchmarking test and flow field simulation in annular nozzle. Single-factor and multi-factor orthogonal experiments were designed to study the effects of fan port wind speed, fan nozzle type and nozzle installation inclination angle on spray effect, and then the best spray parameter combination was determined. The results showed that the annular nozzle should be set in the center of the outlet end face of the axial fan, and the three nozzles were evenly distributed on the annular nozzle at an angle of 120°. Under the pneumatic action of the fan, the peak value of fog droplet deposition was in the range of 0.5 ~ 1.5 m from the fan port, and the working distance between the air spray device and the target fruit tree should not exceed 1.5 m. The air force of the fan was helpful to refine the fog drops, but the outlet wind speed should not be greater than or equal to 8 m/s. There was a significant correlation between the overall spray performance and the nozzle inclination ($P < 0.01$), and the performance of the nozzle with 60° installation inclination was the best. The deposition density of droplets was increased first and then decreased with the increase of fan nozzle type, and the volume median diameter of droplets was increased

收稿日期: 2021-05-19 修回日期: 2021-06-24
基金项目: 河北省农业科技成果转化资金专项(19827201D)、河北省现代农业产业技术体系水果创新团队项目(HBCT2018100205)、
财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27)和河北省教育厅在读研究生创新能力培育项目
(CXZZSS2021073)
作者简介: 李建平(1978—),男,副教授,主要从事现代农业装备及自动化研究,E-mail: ljpd327@126.com
通信作者: 杨欣(1974—),男,教授,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

with the increase of fan nozzle type. The optimal configuration parameters were fan speed of 6 m/s, nozzle type of 02, and nozzle installation angle of 60°. Under this parameters combination, the total amount of droplet deposition was 5.08 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$, which indicated that the optimized model was reliable.

Key words: air-fed orchard sprayer; axial fan; annular nozzle; spray system; orthogonal test

0 引言

在果园的生产管理中,病虫害防治工作十分重要,防治不当会造成重大的经济损失和严重的环境污染^[1-2]。种植者经常通过大量杀虫剂,确保充分控制害虫数量^[3]。此外,在有密集树冠或多行生产区的作物中,通过风送喷雾机施用大量喷雾溶液,以确保树冠内部有足够的喷雾沉积,造成喷雾机到果树冠层之间存在大量的雾滴流失^[4-5]。传统风送喷雾器通常以预设的风速、恒定的速度喷洒整个果园,而不考虑果树树形、冠层大小以及喷雾距离^[6],并且传统风送喷雾机已被证明由于非靶标喷洒而具有相当大的药液损失,作业范围窄、工作效率低,特别是针对低矮密植型果园,传统风送喷雾系统难以精准控制风量致使隔行飘移现象严重、药液利用率低下。为此,亟需研究果园风送式喷雾机根据作业环境按需精量送风、精准喷雾系统。

国内外专家学者对风送喷雾机的研究主要集中在两方面:将气流辅助技术与当前先进智能控制技术结合研发新型风送式喷雾机^[7-9];将气流辅助技术升级以研发新型喷雾机,通过改变风机数量与优化导流装置来精量送风,将雾滴精准输送到果树冠层,减少漂移损失^[10-12]。喷雾气流的空间分布是影响雾滴输运的主要因素之一,气流速度梯度是改变风送雾滴动力学特性的关键因子,然而,国内外的喷雾气流场大多应用轴向气流而没有对旋转气流加以研究应用^[13]。故本研究基于轴流风机的旋转射流原理^[14]设计一款风机与环形喷管配合作用的风送喷雾系统。通过研究风机风场规律,确定环形喷管设计尺寸与喷头安装位置,通过设计单因素与多因素试验来研究风机端口风速、扇形喷头型号与喷头安装倾角对喷雾效果的影响,进而确定最佳喷雾参数。

1 环形喷管设计原理

轴流风机是果园风送式喷雾机中最为常用的风机之一,具有风量大、效率高、气流出口直径较大,喷出的气流衰减慢、射程远、扩散均匀的特点^[15]。目前,我国风送式喷雾机主要采用直流送风,存在裹挟雾滴不够充分的问题,不能很好地翻动树叶,造成叶背的着药效果较差。轴流风机产生的空气流为旋转

射流,气流旋转的特点是存在径向和轴向的压力梯度,存在内回流区,可增强气力的雾滴携带能力。旋转射流在任一点的空间速度可分解成轴向速度 v_a 、径向速度 v_r 和切向速度 v_t 。一般情况下,旋转射流的径向速度 v_r 比 v_a 、 v_t 小些(见图1),对气流运动的影响也小些。旋转射流的扩展角一般比直流射流大,而且随着旋转强度的增大而增大。旋转强度 n 表示为

$$n = \frac{M}{KL}$$

(1)

式中 M ——气流的切向旋转动量矩, $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$
 K ——气流的轴向旋转动量, $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$
 L ——风机喷口直径, m

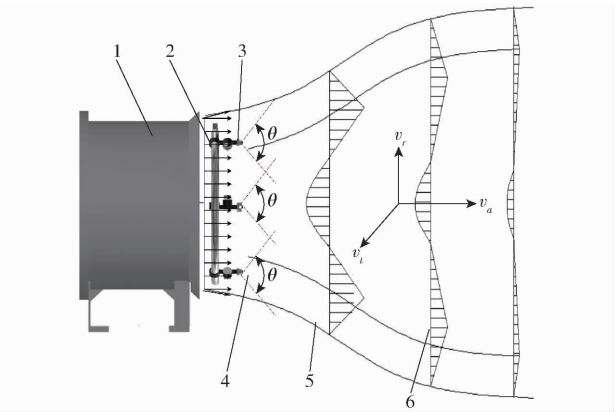


图1 气流携带雾滴的流动状态

Fig. 1 Flow state of mist droplets carried by air flow
1. 风机 2. 环形喷管 3. 喷头 4. 喷头扇形角 5. 流场 6. 速度分布

单风机自由射流情况下,风机旋转射流与直流射流相比,拥有更长的射流核心区,超过射流核心区域后,拥有更强的引流作用^[14]。

环形喷管是一种喷头呈圆形环绕均布在药管上的喷雾管道装置,其形状是为适合轴流风机的圆形出风口而设计,将环形喷管直接布置在轴流风机出风口,利用轴流风机的内回流卷吸与射流边界的卷吸能力,充分赋予雾滴流动的动能,便于药液与轴流风机产生的风场进行充分均匀混合,更好地达到药液二次雾化的目的,使雾滴更充分的被携带到果树上。通过对风机风场环形喷管内流场仿真确定环形喷管尺寸参数与出水口数量。设计单因素试验来研究风机端口风速、扇形喷头型号与喷头安装倾角对喷雾效果的影响,通过响应面参数优化试验来确定最佳喷雾参数组合。

2 环形喷管设计

2.1 环形喷管安装位置设计

为确定环形喷管在轴流风机上的布置位置,需探究轴流风机的风场规律。

2.1.1 风机风场 CFD 仿真分析

将 T35 型轴流风机在 SolidWorks 2016 软件中进行等比例建模,经 CFD 软件 SolidWorks flow simulation 2016 网格划分,物理模型选取湍流模型,目标监测选取静压、总压、动压、流体密度、速度和风力,设置计算域与仿真运算等步骤^[16]操作后,划分网格数量为 135 990,流体网格数为 119 142。风机参数如表 1 所示,网格划分情况如图 2 所示。依据矮砧密植苹果园机械作业的园艺要求:果树行距 4 m,株距 1.2~2.0 m,树高约为 3 m,果树最大幅宽约为 2 m,经田间调研,喷雾装置距离果树树干中心位置最远可为 2 m,故计算域设置为长 2 m、宽 2 m、高 3 m 的矩形空间,可基本拟合实际作业的空间。

表 1 T35 型轴流风机主要参数

Tab.1 Main parameters of T35 axial fan

参数	数值
机壳直径/mm	434
风口直径/mm	412
外筒长度/mm	300
动叶数	4
工作转速/(r·min ⁻¹)	1 450
风叶角度/(°)	25
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	4 263
全压/Pa	95

风机转速设置为 1 450 r/min 时,风机风场如图 3 所示。由图 3a、3b 可知,风机出口处截面由外而内的风速为从小到大、再从大到小的变化规律,在以轴流风机轴线为圆心,直径 300 mm 圆周处的风速最大,故环形喷管的圆环直径应控制在 300 mm 左右。由图 3c 可知,风机轴向截面速度呈不断衰减的趋势,靠近风机出口处的速度最大,故环形喷雾装

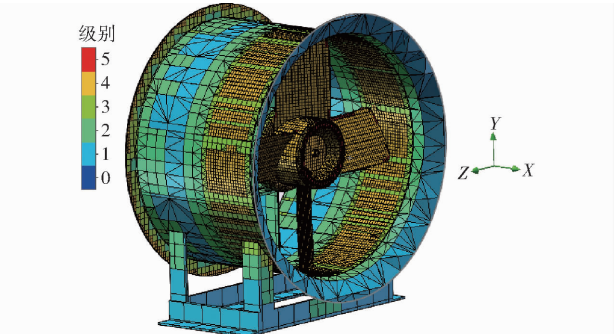


图 2 T35 型轴流风机网格划分情况
Fig.2 Grid division of T35 axial fan

置最好设置在风机出口附近。为验证仿真是否符合实际,后续进行风机出口端面的风速标定试验。

2.1.2 风机出口风速标定试验

风场测试试验中使用的仪器设备有:UT363S 数字式风速计,风速测量范围 0.4~30 m/s,分辨率为 0.01 m/s,准确度为 ±5%;美德时 JR912 多功能温湿度测试仪,测量环境温度和湿度;待测风机为 T35 型轴流通风机,风机转速调节到 1 450 r/min。测试方法采用风速仪器点对点测量法^[17],测量点取在以轴流风机轴线为圆心,以 0、100、200、300、400 mm 为直径的圆周上,每个圆周上分别取 6 个测量点,用风速仪进行测量。从每个圆周上的最右侧为每个测量点编号,顺时针编号为 T1~T6。试验方案与风速测量点如图 4 所示。试验结果如表 2 所示。

对试验测得的风机出口端面速度与仿真结果对比,误差小于 5%,说明仿真模型基本可以模拟轴流风机的运行规律,轴流风机的速度在直径 300 mm 的圆周处最大,为充分利用风机产生的气力动能,环形喷管上的喷头应设置在以风机旋转轴的轴线为圆心、直径为 300 mm 的圆周上。

2.2 环形喷管出水口设计与仿真

为使雾滴更好地喷洒到果树上,需要轴流风机提供足够大的风速和风量。风量与风速的关系公式为

$$Q = \bar{v}F \tag{2}$$

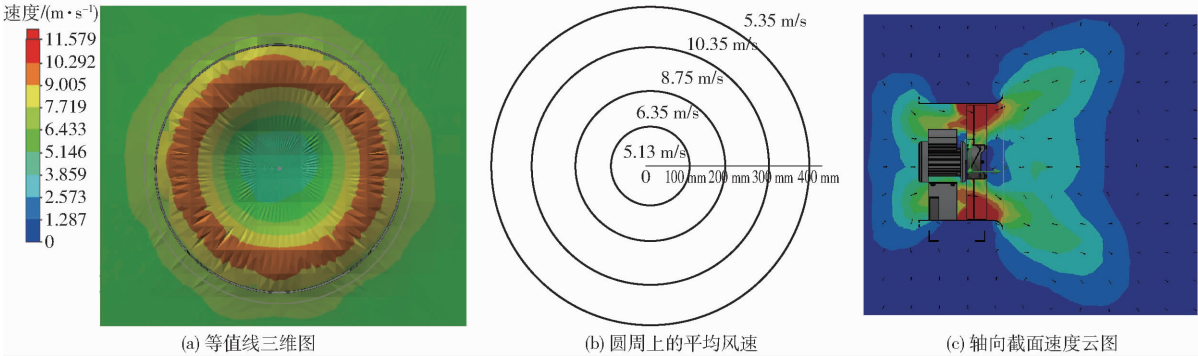


图 3 风机风场云图
Fig.3 Cloud pictures of wind field of fan

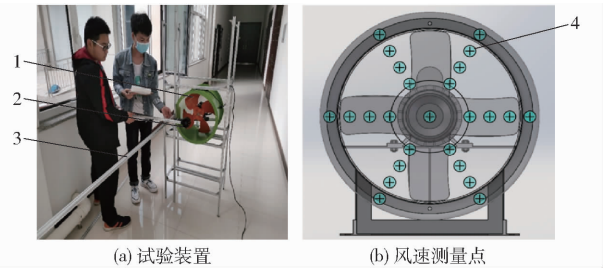


图 4 轴流风机出口端面风速测量图

Fig. 4 Wind speed measurement diagrams of outlet end face of axial fan

1. 轴流风机 2. 风速仪 3. 标尺 4. 测量点

表 2 轴流风机出风口测量点的实测风速

Tab. 2 Measured wind speed at measuring point of air outlet of axial flow fan

测点 编号	测量点所在位置/mm				
	0	100	200	300	400
T1	5. 21	6. 50	8. 71	9. 21	5. 54
T2	5. 11	6. 48	8. 72	9. 12	5. 48
T3	5. 15	6. 45	8. 65	9. 24	5. 56
T4	5. 24	6. 52	8. 51	9. 09	5. 38
T5	5. 09	6. 46	8. 73	9. 14	5. 45
T6	5. 36	6. 31	8. 45	8. 92	5. 14
标准差	0. 09	0. 07	0. 11	0. 10	0. 14

式中 Q ——风机输出风量, m^3/s
 $\bar{v}$ ——截面平均风速, m/s
 F ——风道截面面积, m^2

风道截面一定,该处风量与平均风速成正比。环形喷嘴需要设置在轴流风机出风口风速最大的位置,故环形喷嘴的圆周直径设计为 300 mm,截面直径为 20 mm。为探究环形喷嘴的出水口数量设计的合理方案,进行环形喷嘴的内流场 CFD 仿真,3 种环形喷嘴模型如图 5 所示。以入水口的轴线为对称轴,方案 1 有 3 个出水口,每个出口分别呈 120°的夹角均布在环形喷嘴上;方案 2 有 4 个出水口,每个出口分别呈 90°的夹角均布在环形喷嘴上;方案 3 有 5

个出水口,每个出口分别呈 72°的夹角均布在环形喷嘴管上。仿真设置环形喷嘴的入口质量流量为 0.2 kg/s。3 种设计方案的流体仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知,方案 1 的 3 个出水口(按顺时针方向)的液体流速均值为 1.594、1.761、1.602 m/s,标准差为 0.077 m/s;动压均值为 1 354.90、1 432.62、1 367.02 Pa,标准差为 34.141 Pa。方案 2 的 4 个出水口(按顺时针方向)的液体流速均值为 0.795、0.943、1.111、0.858 m/s,标准差为 0.119 m/s;动压的均值为 385.83、477.36、629.50、418.35 Pa,标准差为 93.549 Pa。方案 3 的 5 个出水口(按顺时针方向)的液体流速均值分别为 0.647、0.678、0.779、0.786、1.022 m/s,标准差为 0.132 m/s;动压均值为 303.03、319.29、398.02、404.01、584.19 Pa,标准差为 99.849 Pa。由上述数据可知,在同一入口质量流量的情况下,随着出水口的数量逐渐增多,每个出口的流速、动压逐渐分布不均;且出水口的数量越多,每个出口流速、动压的差异越大。方案 2、3 的各出水口的流速、动压的均匀性均不如方案 1。3 个出水口的流速与动压基本相同,可保证 3 个喷头出口的喷雾一致性,故方案 1 的 3 个出水口的设计合理。由上述分析可知,采用环形喷嘴的圆环直径为 300 mm、管径为 20 mm、3 个出水口呈 120°夹角均布在环形喷嘴管上的设计方案。

3 气力雾化性能试验

通过仿真与试验分析方法,确定了环形喷嘴的设计尺寸与喷头安装位置。但影响环形喷嘴喷雾装置作业效果的因素还有风机端口风速、扇形喷头型号与喷头安装倾角。通过设计单因素与正交试验来研究这 3 个因素对喷雾效果的影响并确定最佳喷雾参数。

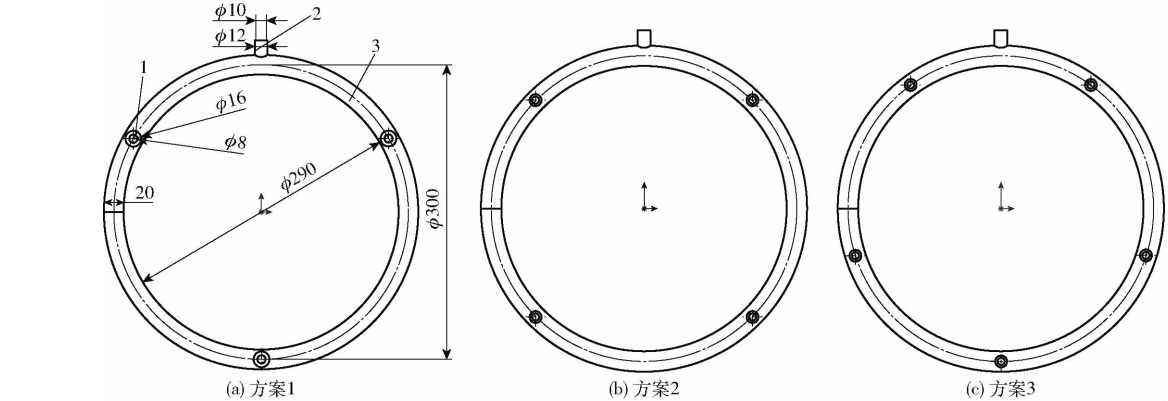


图 5 3 种环形喷嘴设计方案

Fig. 5 Three annular nozzle design schemes

1. 液体出口 2. 液体入口 3. 喷嘴

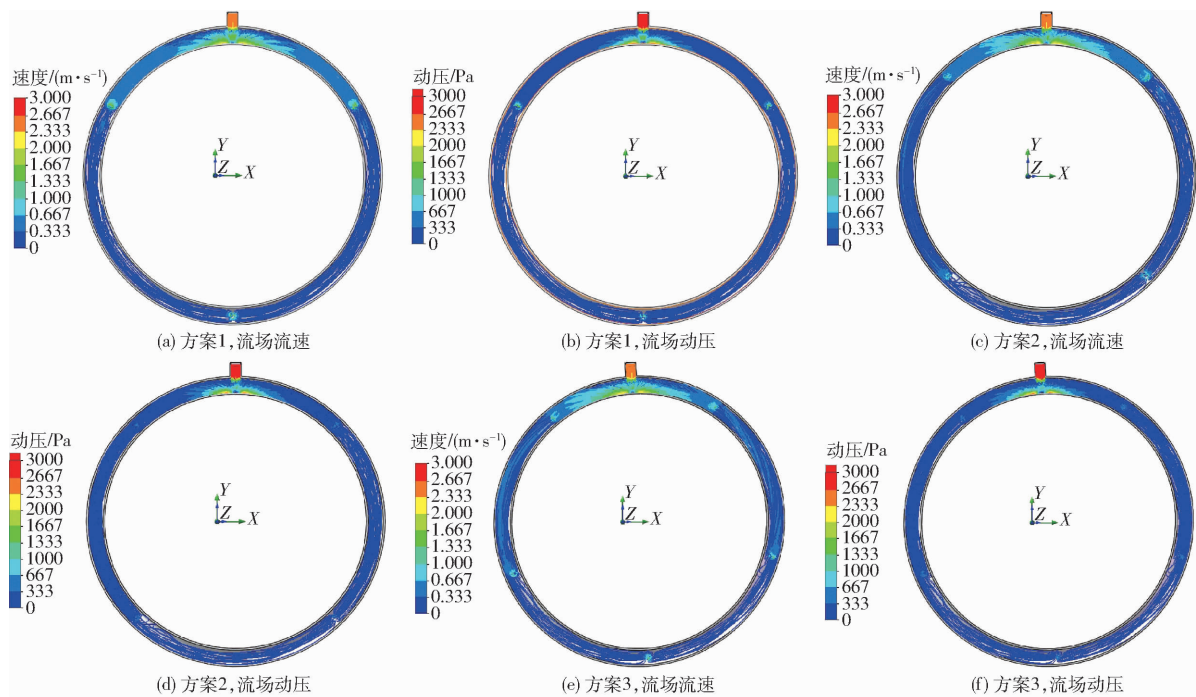


图 6 环形喷管流体仿真结果
Fig.6 Annular nozzle fluid simulation results

3.1 试验材料及过程

采用重庆六六山下植保科技有限公司生产的水敏纸；Epson perfection 1670 型激光扫描仪扫描处理水敏纸检测雾滴；UT373 型非接触式转速计测量风机转速；采用铝合型材搭建风机试验台；信利达双核动力高压隔膜泵提供喷雾动力，10 ~ 12 L/min，喷头采用 015、02、03、04、05 号 LICHENG 扇形喷头。驱动轴流风机的电机为 220 V 永磁变频交流电机。

试验于 2021 年 4 月 20 日在河北农业大学工程大楼院外空旷地面进行，自然风速 0.35 m/s，环境温度为 19℃，环境相对湿度为 37%。搭建风送喷雾试验台，风机轴线所在高度为 1 m，标尺长度依据果树行间距设置为 4 m。水敏纸每隔 20 cm 粘贴一张。水敏纸用于分析雾滴漂移距离与雾滴的雾化情况。将水敏纸的收集册按页扫描处理，经 Image - master 雾滴分析软件^[18]处理之后，得到每组试验的每个位置上的雾滴体积中值直径（VMD）、雾滴沉积量、雾滴沉积覆盖率与雾滴沉积密度等。VMD 可以较明显地反映雾滴群直径的分布情况^[19]，雾滴沉积量、雾滴沉积覆盖率与雾滴沉积密度衡量雾滴沉积情况^[20]，且 3 个量成正比关系，用任一量均可，依据上述指标来评价后续的试验效果。

3.2 单因素试验

3.2.1 风速

在探究风速对雾滴气力雾化的单因素试验中，固定喷头安装倾角为 60°，喷头为 015 型，试验风速分别为 0、2、4、6、8、10 m/s，在各风速组别下各进行

3 次试验。每次试验结束后，将水敏纸收集并粘贴到收集册上，防潮处理，更换标尺与重新粘贴水敏纸再进行下一次试验。试验方案与试验场景如图 7 所示。

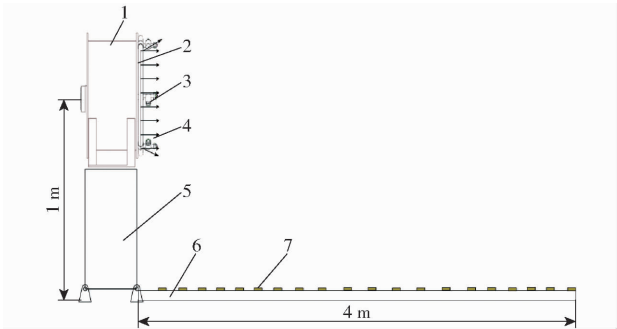


图 7 气力雾化试验台与试验场景
Fig.7 Pneumatic atomization test bench and test scene
1. 轴流风机 2. 环形喷管 3. 喷头 4. 风场 5. 支撑架 6. 标尺 7. 水敏纸

各试验组雾滴沉积量随喷雾距离的变化情况如图 8 所示。随着风机输出风速的增大，喷雾沉积量的峰值逐渐向前偏移。在风机气力作用下，雾滴沉积量的峰值主要处于 0.5 ~ 1.5 m。当风速在 4、6、8 m/s 时，喷雾距离在 1 m 时，效果较佳。风送喷雾装置与靶标果树的距离不应超过 1.5 m，否则会造成大量雾滴的损失。雾滴沉积量随着距离的增加呈现先增加后不断减少的趋势，气力可有效地增加雾滴的运动范围，且速度越高，输送范围越广。

各风速组别下雾滴体积中值直径分布如图 9 所示。在无风状态下，雾滴的体积中值直径主要分布

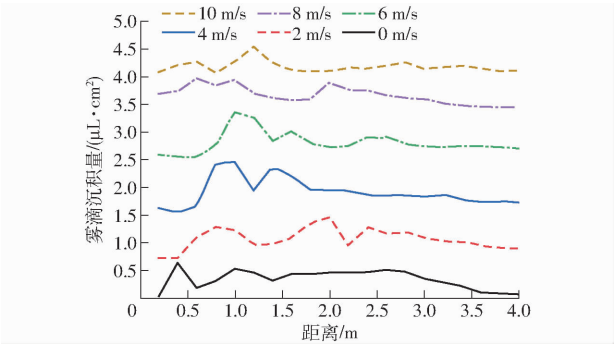


图 8 各试验组雾滴沉积量随距离的变化曲线

Fig.8 Variation curves of droplet deposition amount with distance in each test group

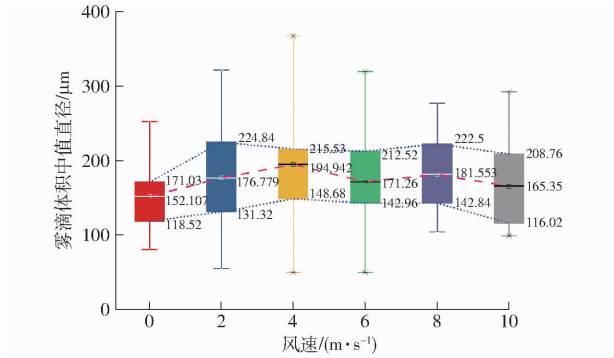


图 9 各风速组别下雾滴体积中值直径分布箱形图

Fig.9 Box plot of median diameter distribution of droplet volume under each wind speed group

在 100 ~ 200 μm 之间。有风速时,雾滴体积中值直径分布相对于无风状态有了较大变化,可见风速对雾滴二次雾化的作用显著。在有风状态下,直径小于 100 μm 的小雾滴数量大量增加,但当风速增加到大于或等于 8 m/s 时,由于风力的作用,将细小雾滴弥漫到空气中,只有较大雾滴可以落到 4 m 的标尺范围内,导致只检测到体积中值直径在 100 μm 以上的雾滴。可见,有无气力及气力大小对雾滴雾化的影响作用明显,但当风力太大时,会造成细小雾滴的弥散,造成喷雾的损失。当风速在 4、6、8 m/s 时,气力雾化的效果较好。

3.2.2 喷头安装倾角

喷头安装倾角为喷头所在轴线与环形喷管所在平面的夹角。为探究喷头安装倾角对气力雾化效果的影响,选择喷头为 015 型、试验风速为 4 m/s,取 30°、60°、90° 3 个水平进行水平喷雾试验,应用雾滴体积中值直径与雾滴沉积覆盖率两个量化指标来衡量气力雾化的效果。3 种喷雾装置如图 10 所示。更换环形喷管喷雾装置,进行气力雾化试验后,将 3 种环形喷管喷雾总成的雾滴沉积覆盖率^[21]随距离的变化情况绘制成图 11,3 种环形喷管喷雾总成喷雾的雾滴体积中值直径随距离的变化情况如表 3 所示。

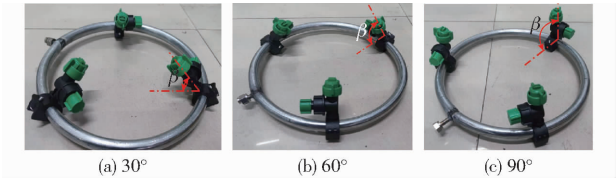


图 10 环形喷管喷雾总成

Fig.10 Spray assembly of annular nozzle

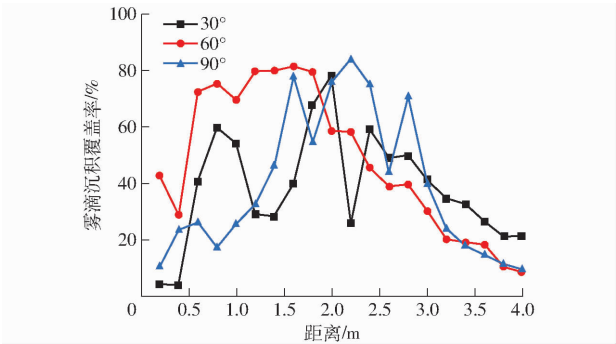


图 11 雾滴沉积覆盖率随距离的变化曲线

Fig.11 Variation curves of droplet deposition coverage with distance

表 3 不同距离环形喷管喷雾总成喷雾的雾滴体积中值直径

Tab.3 Median diameter of droplet volume sprayed by annular nozzle spray assembly with different distances

		μm					
距离/ m	喷头安装倾角/(°)			距离/ m	喷头安装倾角/(°)		
	30	60	90		30	60	90
0.2	55.26	37.78	286.36	2.2	142.96	123.98	281.16
0.4	60.32	57.00	206.84	2.4	152.64	121.24	260.96
0.6	204.90	90.28	257.16	2.6	167.06	144.90	241.30
0.8	321.66	225.68	192.48	2.8	160.08	128.48	249.12
1.0	315.06	232.94	196.76	3.0	157.16	117.16	215.26
1.2	256.50	221.44	147.06	3.2	134.16	117.78	169.72
1.4	203.90	201.90	108.00	3.4	128.48	120.40	162.92
1.6	224.00	208.44	280.62	3.6	141.26	122.46	162.92
1.8	225.68	199.10	262.84	3.8	128.48	109.08	142.96
2.0	236.06	198.54	264.68	4.0	120.36	90.87	121.34

由图 11 可知,3 种环形喷管喷雾总成喷雾的雾滴沉积覆盖率随着距离增加呈现先增加后减少的趋势。在相同风速下,安装喷头倾角为 60° 的环形喷管的喷雾总体性能较好,在 0 ~ 2 m 的喷雾距离内,其喷雾覆盖率显著优于 30° 与 90°,在 2 ~ 4 m 的范围内,其喷雾覆盖率小,喷雾机喷单侧果树,一般距离果树不超过 2 m,可见倾角 60° 的环形喷管喷雾损失较小。

对上述数据应用 Excel 2016 进行单因素方差分析,提出假设: H_0 :喷头安装倾角对雾滴气力雾化无影响, H_1 :喷头安装倾角对雾滴气力雾化影响显著。

$\alpha = 0.05$ (显著), $\alpha = 0.01$ (极显著)。分析汇总如表 4 所示, 方差分析如表 5 所示。

表 4 不同喷头安装倾角方差分析汇总

Tab. 4 Summary of variance analysis of installation inclination angles of different nozzles				
组别	观测数	求和/ μm	平均/ μm	方差/ μm^2
30°	20	3 535. 98	176. 799	5 151. 06
60°	20	2 869. 45	143. 473	3 339. 89
90°	20	4 210. 46	210. 523	3 278. 17

表 5 方差分析

Tab. 5 Analysis of variance					
差异源	平方和	自由度	均方	F	P
组间	44 958. 22	2	22 479. 11	5. 730 025	0. 005 401
组内	223 613. 2	57	3 923. 039		
总计	268 571. 4	59			

由表 5 可知, $P = 0.005\,401 < 0.01$, 故拒绝原假设 H_0 , 喷头安装倾角对雾滴气力雾化有极显著影响。在倾角为 60° 时, 气力雾化后的雾滴体积中值直径均值最小, 方差较小。为探究因素之间的交互影响, 多因素试验仍取 3 个水平进行试验。

3. 2. 3 喷头型号

目前, 国内外果园喷雾大多使用扇形雾化喷头^[22-23], 雾化喷头的扇形角度为 110° , 依据喷头的开口直径, 扇形喷头型号有 015、02、03、04、05, 型号越大流量越大。试验场景如图 12 所示。更换喷头, 在风速 4 m/s 、喷头安装倾角为 60° 状态下, 进行气力雾化试验, 采用按真实果树垂直方向 3:1 比例缩小的仿真树模拟真实果树的下层。仿真树通过实际测量矮砧密植果园果树冠层下层的枝条密度与叶面积指数的数据进行仿制, 可确保与田间果树喷雾实际情况基本一致。利用横向穿透性与雾滴体积中值直径来衡量 5 种喷头的性能。同样采用水敏纸进行雾滴分析处理, 每组喷头试验进行 3 次取平均值。



图 12 喷雾试验场景
Fig. 12 Spray test scene

以喷头的雾化性能及作业效果衡量喷头性能。雾化性能主要依据雾滴的体积中值直径和雾滴的沉积密度。试验结果如图 13、14 所示。

经 Image-master 雾滴分析软件处理得到 015、02、03 型扇形喷头冠层叶面雾滴沉积密度均值分别为 275. 69、308. 42、252. 27 滴/ cm^2 , 计算得 3 个

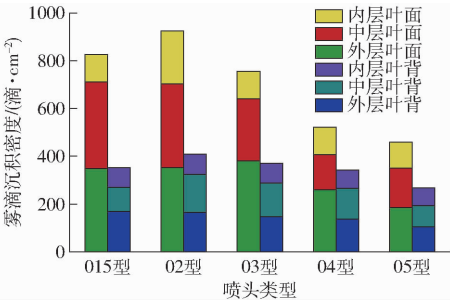


图 13 不同型号喷头在果树冠层的雾滴沉积密度
Fig. 13 Droplet deposition density of different nozzle types in canopy of fruit trees

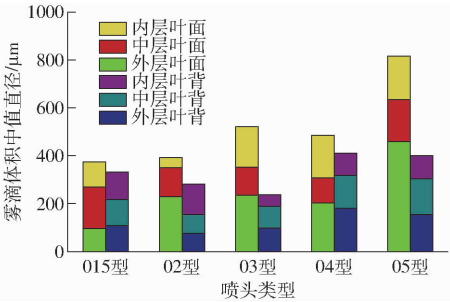


图 14 不同型号喷头在果树冠层的雾滴雾化情况
Fig. 14 Atomization of droplets of different nozzle types in canopy of fruit trees

喷头内、中、外 3 层的标准差分别为 10. 66、7. 79、10. 38 滴/ cm^2 , 3 种喷头叶背雾滴沉积密度均值为 117. 49、136. 30、123. 43 滴/ cm^2 , 标准差为 36. 66、36. 51、29. 12 滴/ cm^2 。04 与 05 型喷头的雾滴沉积密度均未超过 200 滴/ cm^2 , 雾滴覆盖情况较前 3 种喷头差。

由图 14 可知, 015、02、03、04、05 型喷头冠层叶面雾滴体积中值直径均值分别为 124. 69、131. 09、174. 02、162. 01、271. 41 μm , 标准差分别为 32. 85、76. 57、49. 81、42. 48、133. 01 μm ; 叶背雾滴体积中值直径均值分别为 110. 64、94. 03、79. 59、137. 16、133. 37 μm , 标准差分别为 2. 21、21. 60、21. 49、36. 34、27. 05 μm 。在相同风速状态下, 随着扇形喷头的型号增大, 雾滴沉积密度总体呈先增大后减小的趋势, 喷头型号越大, 雾滴的体积中值直径越大, 雾滴的雾化效果越差。外、中、内 3 层叶面、叶背的雾滴沉积密度呈现逐渐减小的规律。每层叶背与内层的雾滴体积中值直径均偏小, 可见, 内层与叶背附着的雾滴主要是由气力雾化并输送的雾滴。由此可知, 015、02、03 型喷头性能较佳。

3. 3 多因素试验

为分析风机风速、喷头型号、喷头安装倾角对药液在果树冠层雾滴沉积量的交互作用影响, 从而确定环形喷管总成的最佳设计参数组合, 选取雾滴沉积量为响应值 Y ^[24], 以 Design-Expert 12. 0 软件的

Box-Behnken Design 进行试验设计与分析^[25-26],根据单因素试验结果确定各因素取值范围。设置试验因素编码如表 6 所示,试验方案与结果如表 7 所示, *A*、*B*、*C* 为因素编码值。利用 Design-Expert 12.0 软件进行数据处理及分析,雾滴沉积量回归方程的显著性及方差分析见表 8。

表 6 试验因素编码

Tab.6 Factors coding

编码	因素		
	风机风速/(m·s ⁻¹)	喷头型号	喷头安装倾角/(°)
-1	4	015	30
0	6	02	60
1	8	03	90

表 7 雾滴沉积试验方案与结果

Tab.7 Test scheme and results of droplet deposition

试验 序号	因素			雾滴沉积量 <i>Y</i> / (μL·cm ⁻²)
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
1	-1	-1	0	1.21
2	1	-1	0	2.03
3	-1	1	0	2.37
4	-1	1	0	2.63
5	-1	0	-1	3.96
6	-1	0	-1	3.03
7	-1	0	1	1.24
8	1	0	1	3.24
9	0	-1	-1	1.76
10	0	1	-1	3.23
11	0	-1	1	1.59
12	0	1	1	2.21
13	0	0	0	5.00
14	0	0	0	5.20
15	0	0	0	5.00
16	0	0	0	5.20
17	0	0	0	5.00

由表 8 可知,模型显著性检验 $P<0.0001$,失拟项 $P=0.0521$,说明模型极显著,失拟不显著,拟合统计 $R^2=0.9918$,可见模型的拟合程度高;对雾滴

表 8 雾滴沉积量回归方程方差分析

Tab.8 Variance analysis of regression equation of droplet deposition

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	33.87	9	3.76	94.26	<0.0001**
<i>A</i>	0.58	1	0.58	14.48	0.0067**
<i>B</i>	1.85	1	1.85	46.42	0.0003**
<i>C</i>	1.71	1	1.71	42.87	0.0003**
<i>AB</i>	0.08	1	0.08	1.96	0.2038
<i>AC</i>	2.15	1	2.15	53.77	0.0002**
<i>BC</i>	0.18	1	0.18	4.52	0.071
<i>A</i> ²	5.81	1	5.81	145.63	<0.0001**
<i>B</i> ²	14.33	1	14.33	359.06	<0.0001**
<i>C</i> ²	4.53	1	4.53	113.54	<0.0001**
残差	0.28	7	0.04		
失拟项	0.23	3	0.08	6.43	0.0521
纯误差	0.05	4	0.01		
总和	34.14	16			

注：**表示差异极显著($P<0.01$)。

沉积量的影响, A^2 、 B^2 、 C^2 、*A*、*B*、*C*、*AC* 极显著,影响显著顺序为 A^2 、 B^2 、 C^2 、*AC*、*B*、*C*、*A*。雾滴沉积量的回归模型为

$$Y=5.08+0.27A+0.48B-0.46C-0.14AB+0.73AC+-0.21BC-1.17A^2-1.85B^2-1.04C^2$$

(3)

试验因素交互作用对雾滴沉积量影响的响应面如图 15 所示。由图 15a 可知,在风机风速不变时,随着喷头型号的增大,雾滴沉积量呈现先上升后下降趋势;在喷头型号一定时,雾滴沉积量随着风机风速的增大呈现先上升后下降的趋势;由图 15b 可知,在风机风速不变时,雾滴沉积量随着喷头倾角的增加呈现先上升后下降趋势;在喷头倾角一定的情况下,雾滴沉积量随着风机风速的增加呈现先增加后缓慢降低的趋势。由图 15c 可知,在喷头型号一定的情况下,雾滴沉积量随着喷

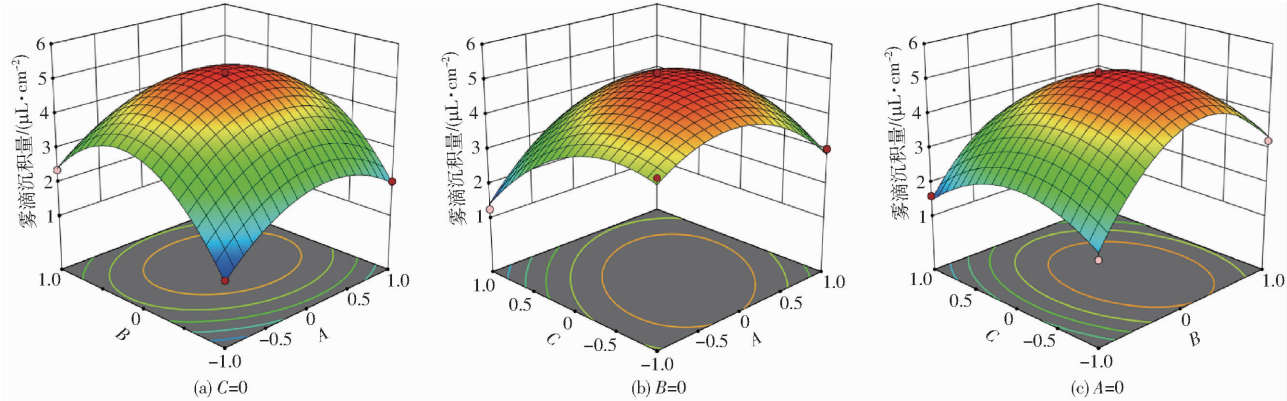


图 15 因素交互对雾滴沉积量影响的响应面

Fig.15 Response surfaces of interaction factors to droplet deposition

头倾角的增加呈现先增加后降低的趋势;在喷头倾角一定的情况下,随着喷头型号的增加,雾滴沉积量呈现先增加后下降趋势。根据以上试验结果,在Design-Expert软件中以提高雾滴沉积量为优化目标,对喷雾作业参数进行优化,得到喷雾系统机构的最优参数组合为 $A=0$ 、 $B=0$ 、 $C=0$,即风机风速为 6 m/s 、喷头型号为02型,喷头安装倾角为 60° 。在此参数组合下,雾滴沉积量为 $5.08\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。

4 结论

(1)基于风送喷雾机的气流雾化原理设计了安装于风机出风口端面的环形喷管,通过风机风场与环形喷管内流场仿真,确定了环形喷管应设置在轴流风机出口端面中心位置,3个喷头应呈 120° 角均布在环形喷管上。

(2)雾滴沉积量随着距离的增加呈现先增加后不断减小的趋势,风力可有效增加雾滴的运动范围,

速度越高,输送范围越广。在风速 4 m/s 下,雾滴沉积量的峰值主要处于 $0.5\sim 1.5\text{ m}$,风送喷雾装置与靶标果树的距离不应超过 1.5 m ;有无气力及气力大小对雾滴雾化的影响作用显著,但风速不宜大于等于 8 m/s 。

(3)在风速 4 m/s 下,倾角 60° 的环形喷管的喷雾总体性能较好,在 $0\sim 2\text{ m}$ 的有效喷雾距离内,其喷雾覆盖率较高,在无效喷雾距离的流失较少,且气力雾化后的雾滴情况较好,符合作业需求。扇形喷头的型号增大,雾滴沉积密度总体呈先增大后减小的趋势,喷头型号越大,雾滴的体积中值直径越大,雾滴的雾化效果越差。

(4)各因素对雾滴沉积总量影响的显著性由大到小为:风机风速与喷头安装倾角交互作用、喷头型号、喷头倾角、风机风速。最优参数组合为:风机风速为 6 m/s 、喷头型号为02型,喷头倾角为 60° 。此参数组合下雾滴沉积量为 $5.08\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$,表明优化模型可靠。

参 考 文 献

- [1] 郑加强,徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):1-16. ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210301&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.001. (in Chinese)
- [2] 翟长远,赵春江,WANG Ning,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. ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, WANG Ning, et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10):1-15. (in Chinese)
- [3] FESSLER L, FULCHER A, LOCKWOOD D, et al. Advancing sustainability in tree crop pest management: refining spray application rate with a laser-guided variable-rate sprayer in apple orchards[J]. HortScience, 2020, 55(9):1-9.
- [4] ZHU H, LIU H, SHEN Y, et al. Spray deposition inside multiple-row nursery trees with a laser-guided sprayer[J]. Journal of Environmental Horticulture, 2017, 35(1):13-23.
- [5] 赵可,王瑜,蒋彦龙. 农药液滴撞击移动液膜和非对称冠状水花形成机理分析[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(5):83-91. ZHAO Ke, WANG Yu, JIANG Yanlong. Mechanism analysis of pesticide droplets impacting moving liquid film and asymmetric crown behavior formation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5):83-91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210509&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.009. (in Chinese)
- [6] 牛成强,张文静,王泉,等. 果园风送喷雾风量调节研究现状与趋势[J]. 中国农机化学报,2020,41(12):48-54. NIU Chengqiang, ZHANG Wenjing, WANG Quan, et al. Current status and trends of research on adjusting air volume of orchard air spray[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12):48-54. (in Chinese)
- [7] 姜红花,牛成强,刘理民,等. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):298-307. JIANG Honghua, NIU Chengqiang, LIU Limin, et al. Design and experiment of air volume control system of orchard multi-pipe air sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):298-307. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2020s235&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.035. (in Chinese)
- [8] SALCEDO R, LLOP J, CAMPOS J, et al. Evaluation of leaf deposit quality between electrostatic and conventional multi-row sprayers in a trellised vineyard[J]. Crop Protection, 2020, 127:104964.
- [9] CELEN I H, DURGUT M R, AVCI G G, et al. Effect of air assistance on deposition distribution on spraying by tunnel-type electrostatic sprayer[J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(12):1392-1397.
- [10] 周良富,张玲,薛新宇,等. 3WQ-400型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(16):45-53. ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of 3WQ-400 double air-assisted electrostatic orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16):45-53. (in Chinese)
- [11] 徐奕蒙,李守藏,刘志杰,等. 风扇组对气流速度场影响的CFD仿真及验证[J]. 农机化研究,2019,41(10):7-14.

- XU Yimeng, LI Shouzang, LIU Zhijie, et al. Influence of combined fan on airflow velocity field of apple orchard based on CFD [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 7–14. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 周良富, 周立新, 薛新宇, 等. 风送喷雾气流衰减与扩展规律分析与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 201–204, 208. ZHOU Liangfu, ZHOU Lixin, XUE Xinyu, et al. Test and analysis on air attenuation & diffusion law of air-assisted spraying [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 201–204, 208. (in Chinese)
- [14] 杨清海, 沈恒根, 孙三祥. 并联双风机数值计算模型对隧道通风效果的影响[J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39(11): 33–39. YANG Qinghai, SHEN Henggen, SUN Sanxiang. Influence of jet models on the simulation of tunnel ventilation with fans in parallel[J]. Building Energy & Environment, 2020, 39(11): 33–39. (in Chinese)
- [15] 边永亮, 杜亚光, 李建平, 等. 风机及导流装置在果园植保中的应用与前景分析[J]. 现代农业装备, 2020, 41(6): 17–24. BIAN Yongliang, DU Yaguang, LI Jianping, et al. Application and prospect analysis of fan and diversion device in orchard air spray[J]. Modern Agricultural Equipments, 2020, 41(6): 17–24. (in Chinese)
- [16] 向浩, 兰兴欣, 于磊. 基于 Solidworks 软件的风扇自然风模拟仿真分析的研究[J]. 中国机械, 2014(17): 218. XIANG Hao, LAN Xingxin, YU Lei. Research on simulation analysis of fan natural wind based on Solidworks software[J]. China Machinery, 2014(17): 218. (in Chinese)
- [17] 商景泰. 通风机设计入门与精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [18] 边永亮, 李建平, 薛春林, 等. 单旋翼油动无人机与圆形果园风送喷雾机作业性能对比试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(12): 134–141. BIAN Yongliang, LI Jianping, XUE Chunlin, et al. A comparative study on the performance of single-rotor oil-propelled UAV and circular air-fed orchard sprayer[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(12): 134–141. (in Chinese)
- [19] 李超, 张晓辉, 姜建辉, 等. 葡萄园立管风送式喷雾机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 71–78. LI Chao, ZHANG Xiaohui, JIANG Jianhui, et al. Development and experiment of riser air-blowing sprayer in vineyard[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 71–78. (in Chinese)
- [20] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 56–63. LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 56–63. (in Chinese)
- [21] 曹军琳, 祁力钧, 杨知伦, 等. 基于图像处理的雾滴沉积分布试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 130–137. CAO Junlin, QI Lijun, YANG Zhilun, et al. Experimental study of droplet distribution based on image processing[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 130–137. (in Chinese)
- [22] 李君, 牛萌萌, 杨洲, 等. 果园喷雾机喷头类型与喷雾角度对雾滴沉积的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(24): 173–178. LI Jun, NIU Mengmeng, YANG Zhou, et al. Effects of nozzle type and spray angle of orchard sprayer on spray deposition[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(24): 173–178. (in Chinese)
- [23] 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. LÜ Xiaolan, ZHANG Meina, CHANG Youhong, et al. Influence of deflector angles for orchard air-assisted sprayer on 3D airflow distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 81–87. (in Chinese)
- [24] 程焱焱, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 22–29. CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Suppl.): 22–29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s004&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004. (in Chinese)
- [25] 杜哲, 胡永光, 仇树成, 等. 喷雾降温风机风筒优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 118–125, 151. DU Zhe, HU Yongguang, QIU Shucheng, et al. Design and experiment of air duct on spray cooling fan[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 118–125, 151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200813&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.013. (in Chinese)
- [26] 胡军, 刘昶希, 初鑫, 等. 锥形风场式防飘移装置雾滴沉积特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 142–149, 174. HU Jun, LIU Changxi, CHU Xin, et al. Droplet deposition characteristics of conical wind field anti-drift device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 142–149, 174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201215&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.015. (in Chinese)