doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.10.007

伞形风场式防飘喷雾装置沉积特性研究

李建平[1,2]　李绍波[1]　于少猛[1]　王鹏飞[1,2]　杨　欣[1,2]　刘洪杰[1,2]
(1.河北农业大学机电工程学院,保定 071001;2.河北省智慧农业装备技术创新中心,保定 071001)

摘要:为提高风送式喷雾机对果树冠层区域的雾滴沉积量,减少果树行间雾滴飘移,解决环境风速气流导致冠层雾滴沉积量不均匀问题,设计了一种伞形风场式防飘喷雾装置,采用仿真试验与物理试验相结合的方式探究防飘喷雾装置调节机构对防飘喷雾装置伞形风场的影响。以防飘喷雾装置出口直径、侧风风速、喷雾压力为因素,分别进行单因素和三因素三水平的苹果树冠层雾滴飘移沉积试验,探析伞形风场对雾滴冠层沉积效果的影响规律。结果表明:雾滴飘移率、质量中心距、雾滴沉积分布变异系数较普通气流分别降低 27.5%、16.2% 和 7%。3 种因素对雾滴沉积特性均有较为显著的影响,其影响由大到小依次为:侧风风速、喷雾压力、出口直径。利用多岛遗传算法优化获得沉积量最高的施药参数,当侧风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.4 MPa、出口直径为 70 mm 时,雾滴沉积量最优值为 6.34 μL/cm^2,最优组合情况下的实际验证值为 5.96 μL/cm^2,差异率仅为 5.9%,试验验证结果与模型预测基本吻合。

关键词:果园喷雾机;防飘装置;伞形风场;雾滴沉积;响应曲面;多岛遗传算法
中图分类号:S224.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)10-0080-12　　**OSID**:

Deposition Characteristics of Umbrella Wind Field Type Anti-drift Spray Device

LI Jianping[1,2]　LI Shaobo[1]　YU Shaomeng[1]　WANG Pengfei[1,2]　YANG Xin[1,2]　LIU Hongjie[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*
2. *Hebei Intelligent Agricultural Equipment Technology Innovation Center*, *Baoding* 071001, *China*)

Abstract: In order to improve the wind sprayer on the fruit tree canopy area droplet deposition, reduce the fruit tree rows of droplet drift, solve the environmental wind speed airflow caused by the nonuniform canopy droplet deposition, a kind of umbrella wind field anti-drift spraying device was designed, anti-drift spraying device regulating mechanism on the anti-drift spraying device umbrella wind field by using a combination of simulation tests and physical tests was used to explore the impact of wind field. With the anti-drift spray device outlet diameter, side wind speed, spray pressure as factors, respectively, single-factor and three-factor three levels of apple canopy droplet drift deposition test was done to analyze the influence of umbrella wind field on the effect of droplet canopy deposition law. The results showed that the droplet drift rate, center-of-mass distance, and coefficient of variation of droplet deposition distribution were reduced by 27.5%, 16.2%, and 7%, respectively, compared with that of the normal airflow. The three factors have more significant effects on the droplet deposition characteristics, and their influences in descending order were side wind speed, spray pressure, and outlet diameter. The multi-island genetic algorithm was used to optimize the application parameters with the highest deposition, and the results showed that the optimal value of droplet deposition was 6.34 μL/cm^2 when the side wind speed was 2 m/s, the spray pressure was 0.4 MPa, and the outlet diameter was 70 mm, and the actual validation value with the optimal combination of the factors was 5.96 μL/cm^2, with a discrepancy rate of 5.9%, and the experimental validation results were basically in agreement with the model prediction. The experimental validation results were basically consistent with the model prediction.

Key words: orchard sprayer; anti-drift device; umbrella wind field; droplet deposition; response surface; multi-island genetic algorithm

收稿日期:2023-06-18　修回日期:2023-07-20
基金项目:河北省现代农业产业技术体系苹果创新团队项目(HBCT2018100205)和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)
作者简介:李建平(1978—),男,教授,主要从事现代农业装备及自动化研究,E-mail:ljpnd327@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

0　引言

随着果园种植面积增加和农村劳动力减少，风送式喷雾机被广泛应用[1-2]，但目前风送式喷雾机大多是通过单一辅助气流将雾滴运送至靶标，一定程度上提高了雾滴穿透性及沉积量。雾滴飘移量和沉积量是影响喷雾机作业效果的重要因素[3-4]，减少雾滴在非靶标区域的无效沉积与靶标外飘移一直是植保领域研究热点[5-6]。雾滴飘移是指在施药过程中，从喷嘴喷射出的雾滴群受空间气流的影响而改变运动方向、沉积位置的一种运动过程[7-8]。雾滴飘移的影响因素有很多，主要包括：空间的气流分布，如流速大小、方向等[9]，施药平台移动速度和采样方式等[10-12]；雾滴自身因素，如雾滴粒径和雾滴物理属性等[13-14]；施药参数，如喷雾压力、距离、角度等[15-16]。降低雾滴飘移量的技术有很多，如静电喷雾、气流辅助喷雾和隧道式喷雾等。气流辅助喷雾技术不仅能降低雾滴飘量，还能胁迫雾滴向靶标运动，也能使果树冠层孔隙率变大，增加叶背及内膛雾滴沉积量[17-18]。

在风送式喷雾防飘装置与雾滴沉积特性方面，国内外研究人员开展大量研究。FOQUÉ 等[19]研究了辅助气流和喷雾角度对雾滴沉积量的影响，发现加大辅助气流速度能够有效减少雾滴飘移。PASCUZZI 等[20]建立了一个由二阶微分方程组组成的数学模型，模拟不同粒径的雾滴在辅助气流方向上的运动，预测雾滴的飘移情况。BAHROUNI 等[21]研究施药参数和风速对雾滴沉积量和雾滴飘失率的影响，利用多个回归模型预测雾滴沉积量和飘失率，发现对雾滴沉积量影响最大的因素是雾滴粒径和辅助气流大小。樊桂菊等[22]设计了多气流协同式果园 V 形防飘喷雾装置，探究 V 形风场对雾滴冠层沉积效果的影响，减少雾滴在果树行间飘移。胡军团队[23-24]设计了锥形风场式防飘喷雾装置，通过喷雾试验明晰锥形风场对雾滴沉积效果的影响规律，利用锥形风场减少环境风速对雾滴运动的影响，降低雾滴飘移量，分析防飘装置的防飘原理，改善防飘喷雾作业效果，并对其装置进行优化设计。

综上所述，果园风送式喷雾的防飘效果与其装置结构形式和作业参数等有关，本文在单一气流的基础上设计伞形风场式防飘喷雾装置，并开展雾滴防飘验证试验和果树冠层沉积试验，明晰伞形风场影响雾滴沉积的规律，以期为该防飘装置在不同环境风速下最佳作业参数的选择提供依据。

1　结构与原理

1.1　结构设计

设计的伞形风场式防飘移装置结构如图 1 所示。该装置可产生锥形风场和柱形风场，其主要由双层锥形气流罩和调节机构两部分组成，实物图如图 2 所示。调节机构主要由 8 个调节滑板组合形成，多个调节滑板呈环状布置，滑动安装在安装间隙内且中部对应环形板的内孔形成大小可调的通气口，其可以调整装置内侧出风口的直径（以下简称出口直径），可以改变锥形风场与柱形风场的分布。双层锥形气流罩由两层锥形面和气流分流结构构成，最主要参数为锥形风道长度、锥形风道宽度和开口夹角，目前常用扇形喷头雾锥角最大为 110°，所以将开口夹角设计为 110°。

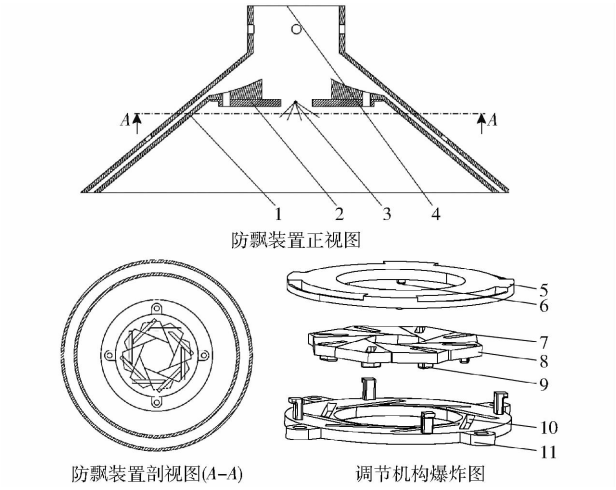

图 1　伞形风场式防飘移装置结构图

Fig. 1　Structure diagrams of umbrella wind field type anti-drift device

1. 双层锥形气流罩　2. 调节机构　3. 扇形喷头　4. 进风口　5. 调节机构上底板　6. 旋转叶片上限位柱　7. 旋转叶片上限位槽　8. 旋转叶片　9. 旋转叶片下限位柱　10. 旋转叶片下限位槽　11. 调节机构下底板

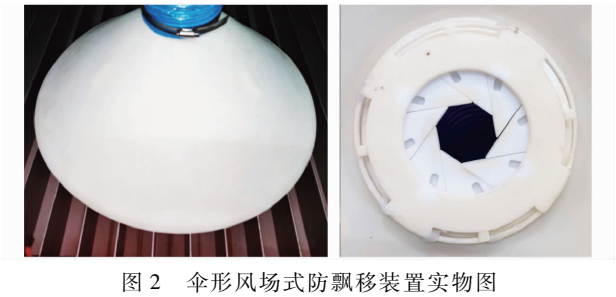

图 2　伞形风场式防飘移装置实物图

Fig. 2　Physical picture of umbrella wind field type anti-drift device

液体在雾化时，会形成空心液膜，根据张京等[25]研究发现雾滴在液膜附近区域容易飘失，过短的锥形风道和环境气流会对空心液膜造成不良的影

响,而过长的锥形风道会影响风机的效率,且会增加能量损失。锥形风道长度计算式为

$$l=\frac{w}{\cos(0.5\beta)} \tag{1}$$

式中 l——锥形风道长度,mm

w——液膜宽度,mm

β——喷头雾锥角,(°)

由于空心液膜长度为 100 mm,结合式(1)将锥形风道长度最短设为 175 mm。在保证风机风量的前提下,缩短风道宽度以提高锥形风场气流速度,本研究设计锥形风道宽度为 10 mm。供风装置为 CZ-LD370 型中压离心式风机,风管与进风口直径均设计为 100 mm[26]。

1.2 防飘机理分析

扇形喷头在喷雾作业过程中,自然风风向变化不规则,导致部分农药雾滴被自然风携带向非靶标区域,造成农药用量增加,增大环境污染。在雾滴形成的过程中,随着雾滴与喷头距离增大,扇面逐渐散开,雾滴运动速度和夹带气流速度衰减。在液膜末端,此区域雾滴受自然风的影响最大,雾滴飘失最严重[27]。本文设计的伞形风场工作原理如图 3 所示:锥形风场可与自然风形成合力,削弱自然风对雾滴运动的影响,引导扇面边界上逃逸的雾滴运动到靶标区域;柱形风场能够提升雾滴穿透性,在减少雾滴在非靶标区域沉积的基础上保持其原有的穿透性。

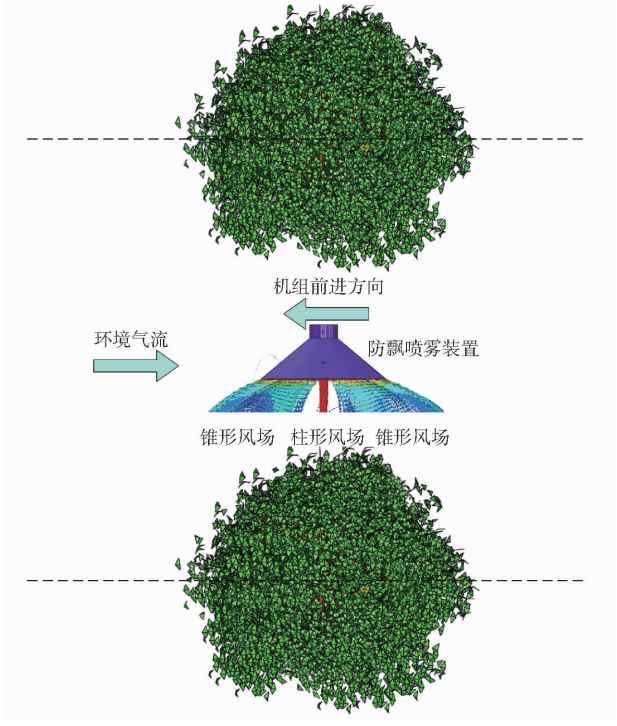

图 3 伞形风场防飘原理图

Fig. 3 Schematic of anti-drift principle of umbrella wind field

侧向气流、柱形气流和锥形气流在雾滴从喷嘴喷出的瞬间形成雾滴可移动的空气介质,由于液滴的质量和尺寸很小,液滴周围的流动可以忽略,因此,不考虑雾滴间内力。为进一步明晰组合风场的防飘机理,利用笛卡尔坐标系建立单个雾滴在组合风场作用下的受力分析图,如图 4 所示,分析单个雾滴受力情况与运动趋势。V_T为防飘装置锥形风场的风速;V_C为防飘装置柱形风场的风速;V_S为侧风的风速;F_0为雾滴运动时空气对雾滴的用力;G 为雾滴所受的重力。为了简化模型,V_C的方向垂直于竖直面,U 为雾滴在受到环境气流前的速度,F_0的方向与 U 速度方向相反。

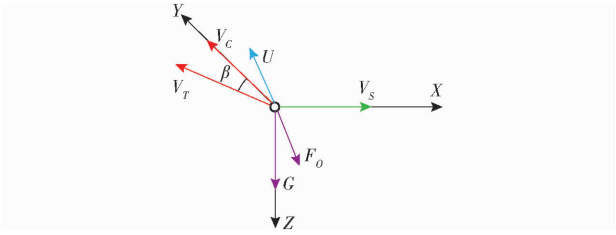

图 4 雾滴在组合风场下受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram of droplet in combined wind field

基于质点运动学基本定律,分析雾滴在空间的速度,在笛卡尔坐标系进行投影,其中 V_{Tx}、V_{Ty}、V_{Tz}分别为 V_T在 X、Y、Z 方向的分速度,得到雾滴在空气中 X、Y、Z 方向的速度为

$$\begin{cases} V_x = V_S - V_{Tx} + U_x \\ V_y = V_C + V_{Ty} + U_y \\ V_z = V_{Tz} + U_z \end{cases} \tag{2}$$

基于质点动力学基本定律,分析雾滴在空间内所受力的情况,得出雾滴在空气中的运动方程为

$$m\boldsymbol{a}=\boldsymbol{F}_0+G\Rightarrow m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{F}_0+mg \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{a}$——空气中雾滴的运动加速度,m/s^2

m——雾滴质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

$\boldsymbol{V}$——雾滴速度,m/s

雾滴在空气介质中运动会产生阻力 F_0,F_0与雾滴的运动速度具有二次关系,即

$$\boldsymbol{F}_0=\frac{m\boldsymbol{g}}{V_{so}^2}\boldsymbol{V}^2 \tag{4}$$

式中 V_{so}——雾滴上升速率的平均值,m/s

结合式(3)、(4)得

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}}{\mathrm{d}t}=-\frac{\boldsymbol{g}}{V_{so}^2}\boldsymbol{V}^2\frac{\boldsymbol{V}}{|\boldsymbol{V}|}+g \tag{5}$$

结合式(2)~(5)得到简化后的单个雾滴运动微分方程组为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = -\dfrac{g}{V_{so}^2}|\boldsymbol{V}|(\boldsymbol{V}_S + \boldsymbol{U}_x - \boldsymbol{V}_{Tx}) \\ \dfrac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = -\dfrac{g}{V_{so}^2}|\boldsymbol{V}|(\boldsymbol{V}_C + \boldsymbol{V}_{Ty} + \boldsymbol{U}_y) \\ \dfrac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2} = -\dfrac{g}{V_{so}^2}|\boldsymbol{V}|(\boldsymbol{U}_z - \boldsymbol{V}_{Tz}) + g \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可得，伞形风场式防飘移装置形成的锥形风场可以削弱环境气流对雾滴运动所产生的影响，能够进一步约束雾滴在竖直方向上的运动，提高雾滴的防飘性和穿透性。

1.3　防飘仿真验证

依据伞形风场式防飘移装置结构设计与参数，在 SolidWorks 中绘制三维模型，将装置到果树冠层全区域简化成长方体(3 000 mm × 3 000 mm × 5 000 mm)，建立 CFD(计算机流体力学)数值模型，通过 ANSYS Mesh 划分网格如图 5 所示，网格数量为 865 525 个。利用质子动力学模型[28]得到普通气流(仅有柱形气流)和伞形风场式气流(柱形气流、锥形气流)的雾滴群运动轨迹如图 6 所示。

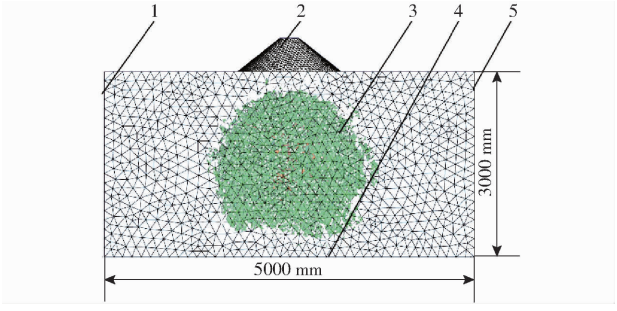

图 5　计算域网格划分

Fig. 5　Computational domain meshing

1. 侧风入口　2. 防飘装置　3. 果树　4. 气流出口 1　5. 气流出口 2

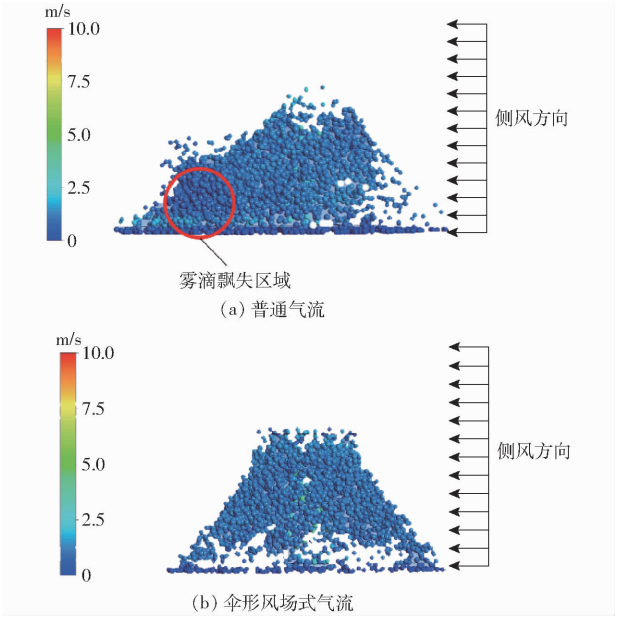

图 6　雾滴群轨迹

Fig. 6　Droplet cluster trajectory

由图 6 可知，伞形风场式气流较普通气流的雾滴沉积区域更为集中，雾滴飘失率降低 32.5%，表明该装置具有较强的防飘移效果。

2　试验材料与方法

2.1　试验仪器

试验采用气流辅助喷雾沉积量检测系统。该系统包括喷雾性能综合试验台、T35 型可调速轴流通风机(模拟喷嘴到果树冠层间的环境风速，风速范围 0 ~ 4 m/s、风量 4 263 m^3/h、转速 1 450 r/min)；UT363S 型数字式风速计，风送测量范围为 0.4 ~ 30 m/s，分辨率 0.01 m/s，准确度 ±5%；CZ - LD370 型中压离心式风机(提供防飘装置风速范围 0 ~ 40 m/s)；水敏纸，重庆六六山下植保科技有限公司生产；Epson perfection 1670 型激光扫描仪；Image master 雾滴分析软件；丰诺 110 - 02 型扇形喷头；60 型柱塞泵等。

2.2　试验设计

2.2.1　防飘喷雾装置气流场仿真与对标试验

在防飘移验证试验开始前，采用仿真试验与物理试验相结合的方式探究调节机构对防飘喷雾装置伞形风场的影响，确定调节机构出口直径的调节范围，并验证仿真试验是否符合实际情况。

仿真试验时，出口直径调整范围 20 ~ 100 mm，间隔 10 mm。利用 Flow Simulation 模拟防飘喷雾装置外流场，建立防飘装置底部的横向速度切面图(图 7)，在其圆周上均匀取 6 个测速点，取平均值作为锥形气流风速。中心轴线风速作为柱形气流风速。

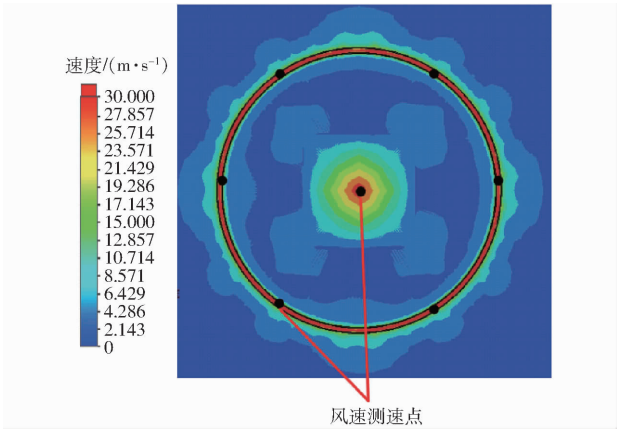

图 7　速度切面图

Fig. 7　Velocity section diagram

试验过程：开启离心风机，防飘喷雾装置入口风速调节至 30 m/s。采用风速仪测量 7 个取样点的风速，每组试验重复 3 次取平均值。为保证风场测试不受外界自然风干扰，试验在河北农业大学农业机

械实验室进行(图 8)。

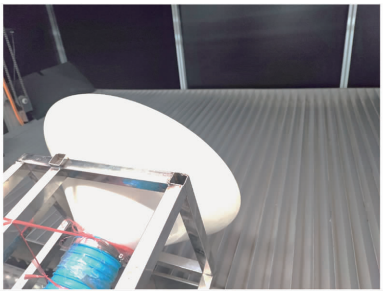

图 8 风速测试现场

Fig. 8 Wind speed test site

2.2.2 防飘移验证试验

为更直观地展示防飘喷雾装置的防飘性能,以纯净水为介质,利用喷雾性能综合试验台对防飘装置进行防飘移验证试验(图 9),在 T35 型可调速轴流通风机上加装蜂窝整流装置模拟果园行间自然风(与喷雾方向垂直,下文以侧风描述)。根据风速仪显示的数值合理调节风机转速,使其在装置进口处以风速 30 m/s 稳定供风。试验条件为:侧风风速 2 m/s、调节机构直径 50 mm、喷雾压力 0.3 MPa、喷雾距离 500 mm、格强 3/8-03 型扇形喷头、喷雾时间 30 s,每组试验重复 3 次取平均值。

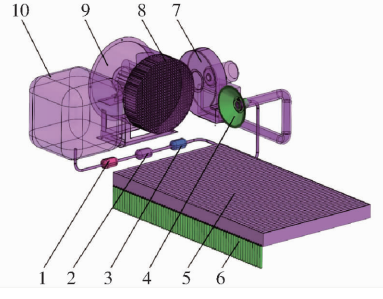

图 9 防飘移验证试验示意图

Fig. 9 Schematic of anti-drift principle verification test

1. 控制阀 2. 流量计 3. 压力表 4. 伞形风场式防飘移装置 5. 集雾槽 6. 量筒 7. 离心风机 8. 蜂窝整流装置 9. 轴流风机 10. 水箱

2.2.3 雾滴沉积均匀性试验

为探究伞形风场对喷头喷雾作业的影响,开展雾滴沉积特性综合试验前,利用垂直雾滴分布测试仪对安装伞形风场式防飘移装置前、后的雾滴垂直沉积均匀性进行试验(图 10)。试验条件为:防飘装置进风口风速 30 m/s、喷雾压力 0.3 MPa、喷雾距离 500 mm、格强 3/8-03 型扇形喷头、喷雾时间 30 s,每组试验重复 3 次取平均值。

2.2.4 雾滴沉积特性综合试验

于 2023 年 6 月 4 日在国家苹果产业体系保定综合试验站(顺平县蒲上镇西于家庄村)矮砧密植苹果园内进行田间试验,试验对象为 3 年生富士苹

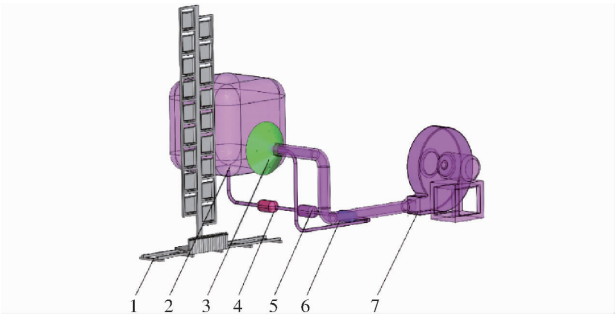

图 10 雾滴沉积均匀性试验

Fig. 10 Droplet deposition uniformity test

1. 垂直雾滴分布测试仪 2. 水箱 3. 伞形风场式防飘移装置 4. 控制阀 5. 流量计 6. 压力表 7. 离心风机

果,果园株距 1.0~1.2 m、行距 4.0 m,树高 2.5~3.0 m,纺锤形树冠,矮砧密植,南北走向,果园采用水肥一体化灌溉;环境温度 15℃,环境相对湿度 45%,环境风速 1~2 级。

(1)果树冠层雾滴沉积测试

将果树冠层自上而下、由内而外进行分区,如图 11 所示,即 3 个水平面(a、b、c)间距 300 mm,5 个垂面(1、2、3、4、5)和 3 个环形(C1、C2、C3)间距 300 mm。每两个截面的焦点为采样点,各采样点布置水敏纸一张(规格 35 mm×35 mm)。将水敏纸的收集册按页扫描处理,经 Image master 雾滴分析软件[29-30]处理之后,得到每组试验的每个位置上的雾滴沉积量,依据上述指标来评价后续的试验效果[31]。

由于喷雾机施药区域内果树冠外层部分叶片的水敏雾滴纸上雾滴较大或较多,导致汇聚成一片,导致雾滴覆盖率大于 30%,超过了 Image master 雾滴分析软件能够计算的雾滴沉积量阈值。对于这种情况的水敏纸,根据雾滴喷施在水敏雾滴测试卡上接触角的变化规律[32],基于水敏雾滴测试卡上所有变色面积都为半饱和吸收的假设,理论最小沉积量 V_d 计算式为

$$V_d = \frac{CH}{2} \times 100\% \tag{7}$$

式中 C——雾滴分析软件提取到的覆盖率,%

H——单张标准水敏雾滴测试卡厚度,mm

(2)果树冠层空气中飘移测试

在果树冠层右侧 0.1 m 处立一直杆(图 11,高 2 m),由上往下间隔 0.3 m 布置水敏纸(35 mm×35 mm)收集雾滴。

为了分析侧风风速、出口直径以及喷雾压力等因素对雾滴沉积分布情况的影响,根据上述试验方法,首先进行出口直径单因素试验,在喷雾压力 0.3 MPa、出口直径 30~70 mm、间隔 10 mm 的情况

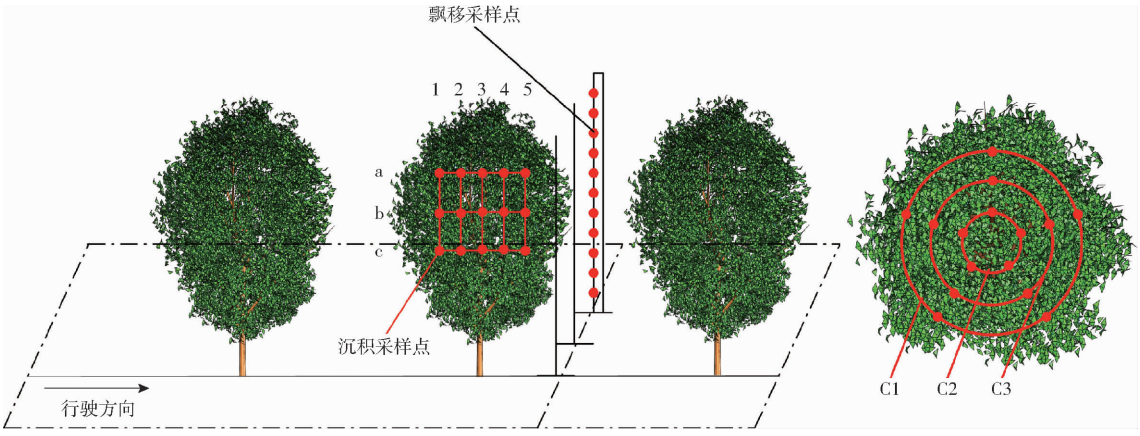

图 11　采样点布置示意图

Fig. 11　Sampling point arrangement

下分析雾滴沉积量、雾滴飘移量的变化(图 12)。其次进行喷雾压力的单因素试验,将出口直径设定为 50 mm,调节喷雾压力为 0.3 ~ 0.8 MPa,每组试验较前一组增加 0.1 MPa,共计 6 组试验用于分析喷雾压力对雾滴沉积量和雾滴飘移量的影响。并通过 Scan 软件对水敏纸进行区域提取、比重设置、阈值调整以及碎片化等处理,将处理结果导入 Origin 进行整理分析。



图 12　试验现场

Fig. 12　Testing site

通过分析出口直径和喷雾压力单因素试验结果,确定多因素试验的取值范围。为分析不同出口直径、喷雾压力以及测风风速共同作用下的雾滴沉积效果,建立响应曲面模型,分析了这 3 个因素对雾滴沉积量影响的主次程度。对所得的模型进行优化并进行试验验证,得到最优的施药参数。

3　试验结果与影响因素分析

3.1　装置气流场仿真与对标试验结果

由图 13 可知,两种气流物理与仿真试验的出口风速随出口直径变化的趋势基本一致;物理试验的出口风速均小于仿真试验,原因是 3D 打印的模型与仿真模型结构尺寸有一定误差,装置内部连接部分导致较小的气流损失,但误差均小于 10%,仿真模型可基本模拟伞形风场式防飘喷雾装置风场的运行规律。

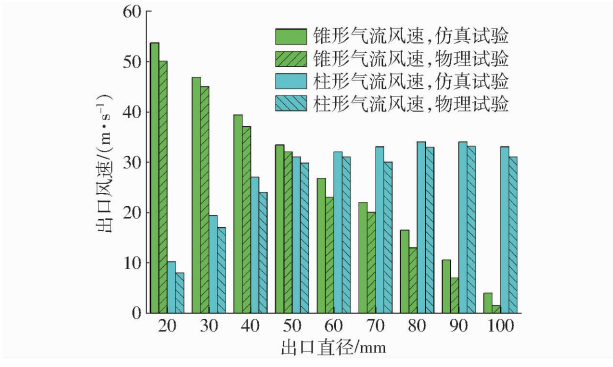

图 13　不同出口直径下气流风速柱形图

Fig. 13　Histogram of air velocity at different outlet diameters

锥形气流出口风速随着出口直径的减小而增大,原因是出口直径减小会导致更多的气流运动至锥形风道,进而提升锥形气流风速;在出口直径为 100 mm 时,出口风速达到最小。柱形气流出口风速随着出口直径增大而增大,当出口直径大于 50 mm 时,出口风速增长趋势减缓;出口直径为 30 ~ 70 mm 时,锥形气流与柱形气流风速较大,因此确定机构调整范围为 30 ~ 70 mm。

3.2　防飘移验证试验

为探究安装伞形风场式防飘移装置前后环境气流对雾滴飘移量的影响,根据 2.2.1 节分别进行两组试验,收集各试管内液体的体积,将数据导入 Origin,雾滴沉积分布如图 14 所示。

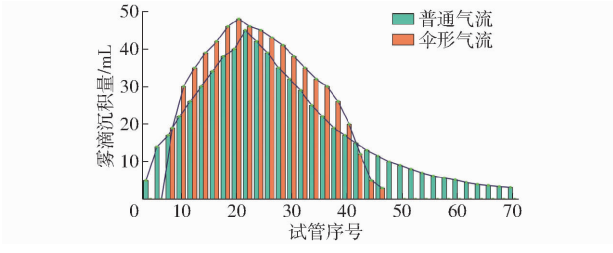

图 14　普通气流和伞形风场式气流的雾滴水平沉积分布

Fig. 14　Horizontal droplet deposition distribution of ordinary air flow and umbrella-shaped air flow

如图 14 所示，由于侧风的影响，安装防飘装置前雾滴沉积量的主要分布区域发生了少量偏移和扩大，但其区域内的沉积量远大于其他区域，体现了雾滴飘移分布中的沉积量集中性。沉积分布后方区域出现明显的“尾巴”，质量分布不再呈现对称分布，即为飘移分布的沉积特性，具有重尾性[33]。安装防飘装置后的雾滴沉积区域较为集中，主要分布于试管 10～40 之间，以雾滴飘移率和雾滴质量中心距来衡量装置的防飘性能，计算公式为

$$S_d = \frac{V_t - \sum_{i=1}^{n} V_i}{V_t} \times 100\% \tag{8}$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i d_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i} \tag{9}$$

式中 S_d——雾滴飘移率，%

D——雾滴质量中心距，mm

n——集雾槽总数，个

V_i——第 i 个集雾槽中液体体积，mL

V_t——实际喷雾总体积，mL

d_i——第 i 个集雾槽中心到集雾板中线距离，mm

代入数据得安装伞形风场式防飘装置后的雾滴飘移率、质量中心距分别为 11.3%、308 mm，较安装前分别降低 27.5% 和 16.2%，表明伞形风场式气流能有效限定雾滴沉积范围，降低雾滴飘移率。

3.3 雾滴垂直沉积均匀性分析

分别收集垂直雾滴分布测试仪在两种喷雾作业下不同高度的雾滴沉积量，结果如图 15 所示。

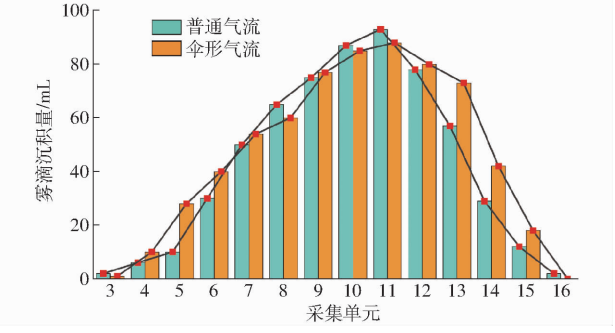

图 15 普通气流和伞形风场式气流的雾滴垂直沉积分布

Fig. 15 Vertical deposition distribution of droplet in ordinary air flow and umbrella-shaped air flow

由图 15 可知，安装伞形风场式防飘装置后的雾滴沉积量变异系数为 43.4%，较普通气流降低 7%，表明防飘喷雾装置能使雾滴垂直分布均匀性提高，装置能够减弱重力对雾滴运动的影响，并有效减少雾滴在垂直方向上漏喷、过喷问题。

3.4 雾滴沉积特性单因素试验

3.4.1 出口直径

当侧风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.4 MPa、出口直径为 30～70 mm 时，不同出口直径下果树冠层叶片雾滴沉积分布如图 16 所示。图 16 左侧是雾滴在侧风影响下雾滴在飘移测量面的沉积分布图，可直观地显示雾滴的飘移分布；右侧是雾滴在侧风影响下雾滴在冠层 a、b、c 的沉积分布图，可直观地显示雾滴在冠层内部及冠层上、中、下的沉积分布。从图中可以看出，随着出口直径的增大，雾滴的飘移量呈先增大后减小的趋势，在出口直径为 50 mm 时，雾滴飘移量达到最大。在出口直径为 30 mm 时，雾滴飘移量最小。随着出口直径的增大，雾滴飘移分布逐渐向内侧扩散。出口直径大于 50 mm 时，雾滴飘移量增长趋势改变，雾滴飘移分布集中于飘移测量面的下半部分。由图 16 右侧可知，雾滴在上层和中层的沉积量较大，随着出口直径的增大，雾滴沉积较为集中的区域距冠层中轴的距离呈先增大后减小的趋势；雾滴沉积分布均匀性呈先增加后减小的趋势，且在出口直径为 60 mm 时雾滴沉积均匀性最好。由图 17 可知，随着出口直径的增大，雾滴在上层、中层、下层的沉积量逐渐向平均沉积量靠近，证明增加出口直径有助于提高雾滴的沉积均匀性。综上所述，出口直径增大有助于提高雾滴的穿透性，同时雾滴飘移量会随之增大，原因是出口直径增大，柱形风场强度增大，导致雾滴穿透性增强；然而锥形风场强度降低，防飘效果减弱，导致雾滴飘移量增大。最终选择 50、60、70 mm 为多因素试验时的出口直径水平取值。

3.4.2 喷雾压力

当侧风风速为 2 m/s、出口半径为 50 mm、喷雾压力为 0.3～0.8 MPa 时，雾滴沉积量和飘移量变化趋势如图 18 所示。由图 18 可知，随着喷雾压力的增大，雾滴的飘移量逐渐增大，在喷雾压力为 0.8 MPa 时雾滴飘移量达到最大；雾滴沉积量呈先增加后减小的趋势，在喷雾压力为 0.5 MPa 时雾滴沉积量达到最大。由图 19 左侧可知，雾滴飘移集中区域主要在雾滴飘移测量面的左侧与底部，随着喷雾压力的增大，雾滴飘移沉积区域向内侧扩散。由图 19 右侧可知，雾滴在上层和中层的沉积量较大；随着喷雾压力的增大，雾滴沉积较为集中的区域与冠层中轴的距离逐渐增大；雾滴沉积均匀性在喷雾压力为 0.6 MPa 达到最好；综上所述，增加喷雾压力有助于提高雾滴的穿透性，但同时也会增加雾滴的飘移量，原因是喷头雾化能力随喷雾压力增大而增强，使雾滴初速度变大，利于雾滴向冠层内膛运

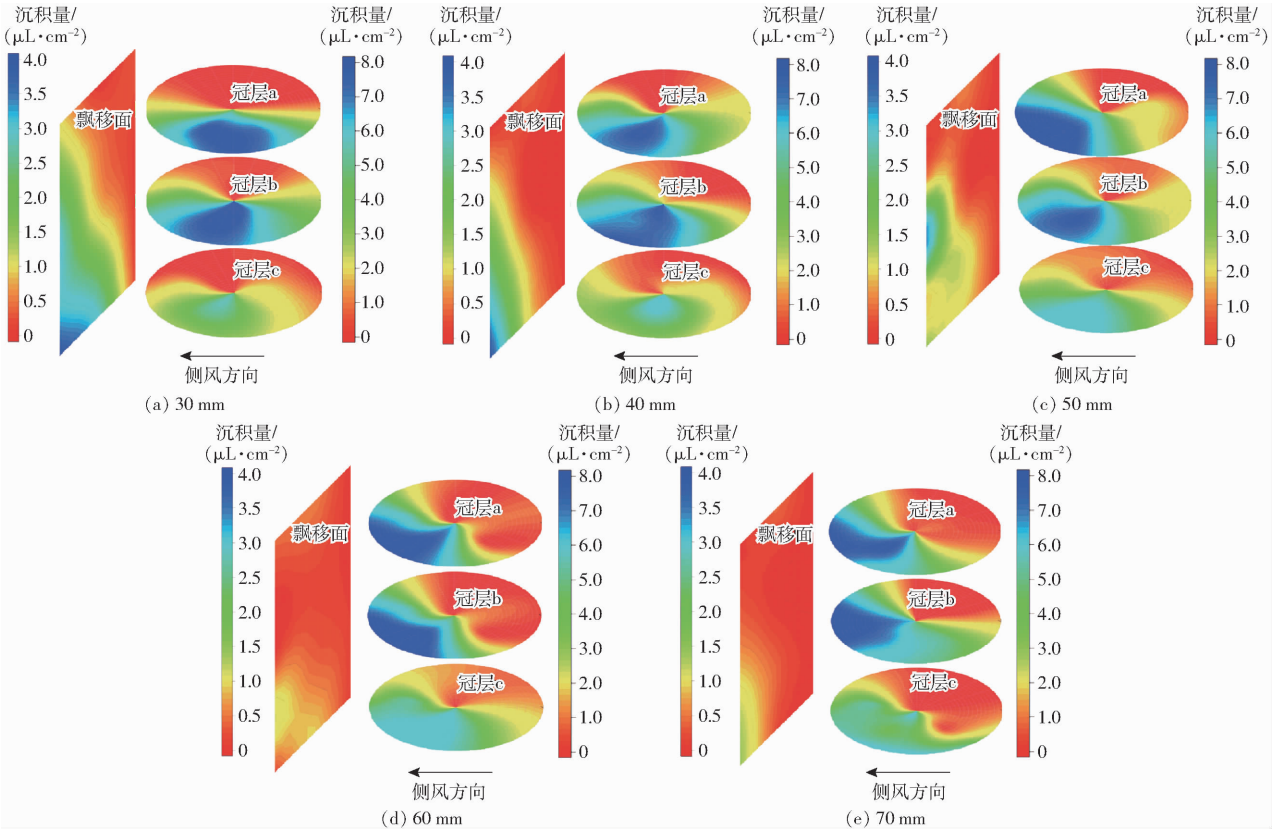

图 16　不同出口直径下果树冠层叶片雾滴沉积分布示意图

Fig. 16　Distribution diagrams of leaf droplet deposition in fruit tree canopy at different outlet diameters

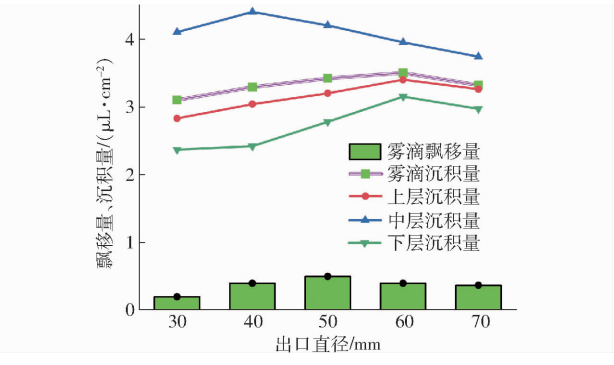

图 17　不同出口直径下雾滴沉积量和飘移量

Fig. 17　Droplet deposition and drift for different outlet diameters

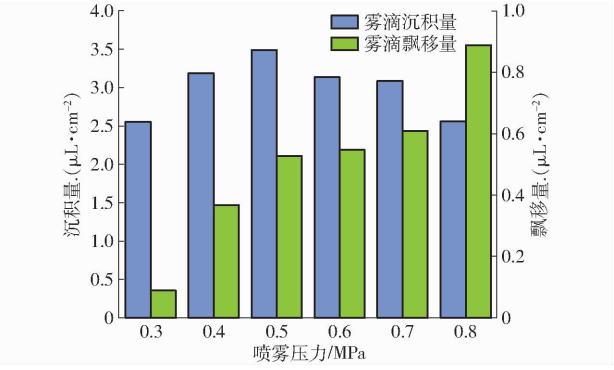

图 18　不同喷雾压力下雾滴沉积量和飘移量

Fig. 18　Droplet deposition and drift at different spray pressures

动；但喷雾压力过大，雾滴粒径减小导致雾滴飘移潜力增大。最终选择 0.4、0.5、0.6 MPa 为多因素试验时的喷雾压力水平取值。

3.5　雾滴沉积特性多因素试验

3.5.1　试验方案与结果

以出口直径、喷雾压力及侧风风速为雾滴的沉积分布影响因素，根据 Box－Behnken 试验方案设计三因素三水平响应面试验，各因素编码如表 1 所示。试验方案以及雾滴冠层沉积量试验结果如表 2 所示，其中 X_1、X_2、X_3为因素编码值。

3.5.2　数学模型与方差分析

利用 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行回归处理分析，得到侧风风速、出口直径和喷雾压力对雾滴沉积量回归方程为

$$Y_1 = 2.42 - 1.5X_1 - 0.43X_2 + 0.23X_3 + 0.56X_1X_2 - 0.35X_1X_3 - 0.21X_2X_3 + 0.64X_1^2 + 0.13X_2^2 + 0.18X_3^2 \quad (10)$$

依据该模型，通过 F 检验得到 P 值以确定各个因素对响应值的影响显著性，结果如表 3 所示。

由表 3 可知，响应模型 $P < 0.01$，表明雾滴沉积量预测模型极显著；拟合统计 R^2 为 0.99，即模型拟合度高。因素 X_1、X_2、X_3、X_1X_2、X_1X_3、X_1^2 极显著，X_2X_3显著，则雾滴沉积量预测模型简化为

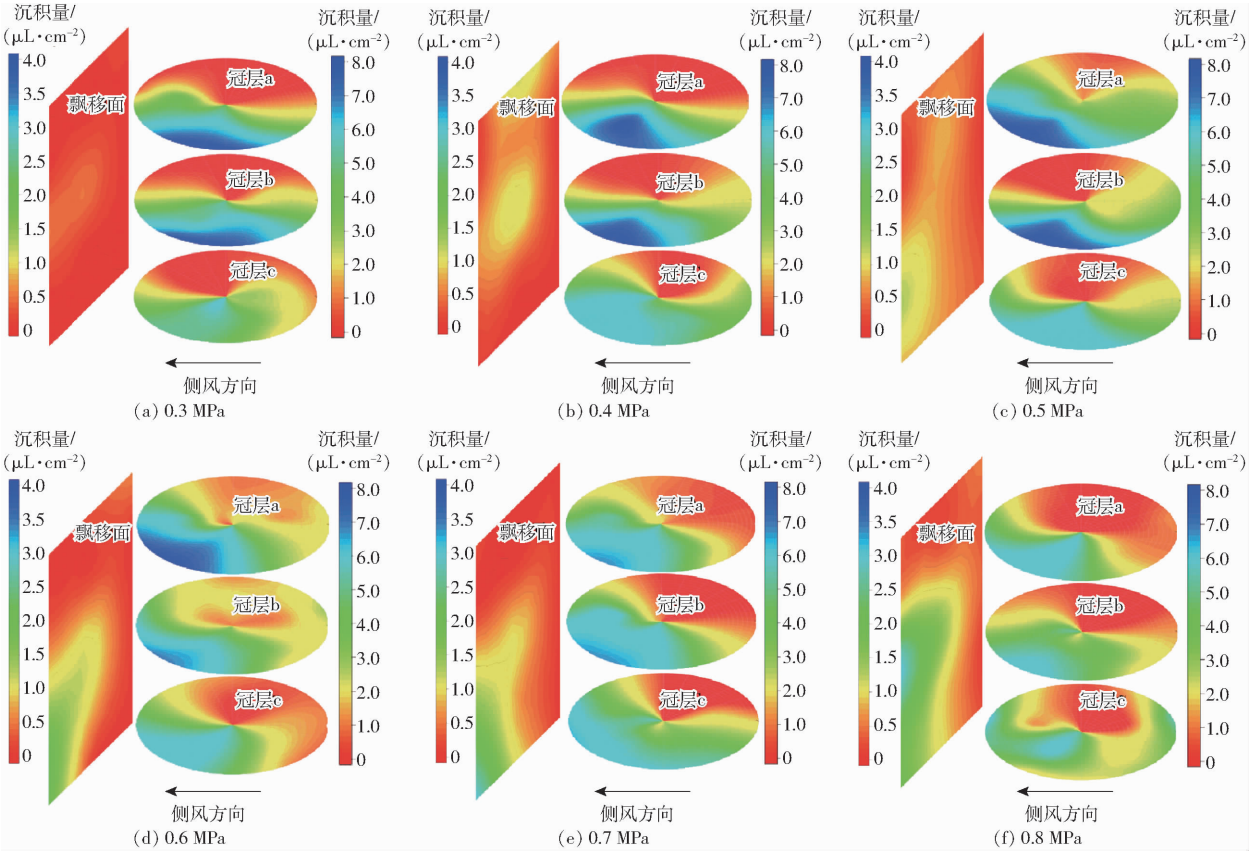

图 19 不同喷雾压力下果树冠层叶片雾滴沉积分布示意图

Fig. 19 Distribution diagrams of droplet deposition in canopy leaves of fruit trees under different spray pressures

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Test factors and codings

编码	因素		
	侧风风速/(m·s⁻¹)	喷雾压力/MPa	出口直径/mm
-1	2	0.4	50
0	3	0.5	60
1	4	0.6	70

表 2 雾滴沉积试验方案与结果

Tab. 2 Test scheme and results of droplet deposition

序号	因素			沉积量/(μL·cm⁻²)
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	0	-1	4.21
2	0	-1	1	3.62
3	-1	1	0	3.67
4	0	0	0	2.44
5	0	0	0	2.37
6	0	0	0	2.71
7	0	1	1	2.52
8	1	0	-1	2.01
9	1	1	0	1.71
10	1	0	1	1.62
11	0	-1	-1	2.55
12	0	0	0	2.33
13	0	1	-1	2.32
14	1	-1	0	1.65
15	-1	-1	0	5.84
16	0	0	0	2.39
17	-1	0	1	5.24

表 3 方差分析

Tab. 3 Equation analysis result

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	23.92	9	23.92	81.52	<0.000 1 **
X_1	18.00	1	18.00	552.14	<0.000 1 **
X_2	1.45	1	1.45	44.59	0.000 3 **
X_3	0.46	1	0.46	13.99	0.007 3 **
X_1X_2	1.28	1	1.28	39.17	0.000 4 **
X_1X_3	0.50	1	0.50	15.46	0.005 7 **
X_2X_3	0.19	1	0.19	5.80	0.046 8 *
X_1^2	1.72	1	1.72	52.86	0.000 2 **
X_2^2	0.06	1	0.06	1.93	0.207 3
X_3^2	0.14	1	0.14	4.29	0.077 1
残差	0.23	7	0.03		
失拟项	0.14	3	0.05	1.97	0.260 5
纯误差	0.09	4	0.02		
总和	24.15	16			

注：** 表示差异极显著($P<0.01$)；* 表示差异显著($0.01<P<0.05$)。

$$Y_1 = 2.42 - 1.5X_1 - 0.43X_2 + 0.23X_3 + 0.56X_1X_2 - 0.35X_1X_3 - 0.21X_2X_3 + 0.64X_1^2 \quad (11)$$

相同喷雾条件下，雾滴沉积量预测值与试验值二者相关系数为 0.97，相关性较高，表明该预测模型可分析各因素对雾滴沉积的影响规律。

3.5.3　交互作用

根据雾滴沉积量预测模型绘制三因素交互作用的雾滴沉积量响应面，如图 20 所示。随侧风风速增大，雾滴沿侧风方向飘移增加，雾滴冠层沉积量减小；同一侧风风速时，沉积量随喷雾压力增大而减少，侧风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.5 MPa、出口直径为 70 mm 时，雾滴沉积量最大，为 5.24 μL/cm^2，由于喷雾压力继续增加使得雾滴粒径减小，导致雾滴自身飘移潜力增大而沉积量减小。同一喷雾压力时，沉积量随出口直径呈先减小后增大的趋势。原因是减小出口直径能够提高锥形气流风速，提高雾滴防飘性；增加出口直径能够提高柱形气流风速，提高雾滴穿透性。侧风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.6 MPa、出口直径为 60 mm 时，雾滴沉积量最大，为 3.67 μL/cm^2，由于出口直径减小使得雾滴穿透性减弱，导致雾滴沉积量减小。

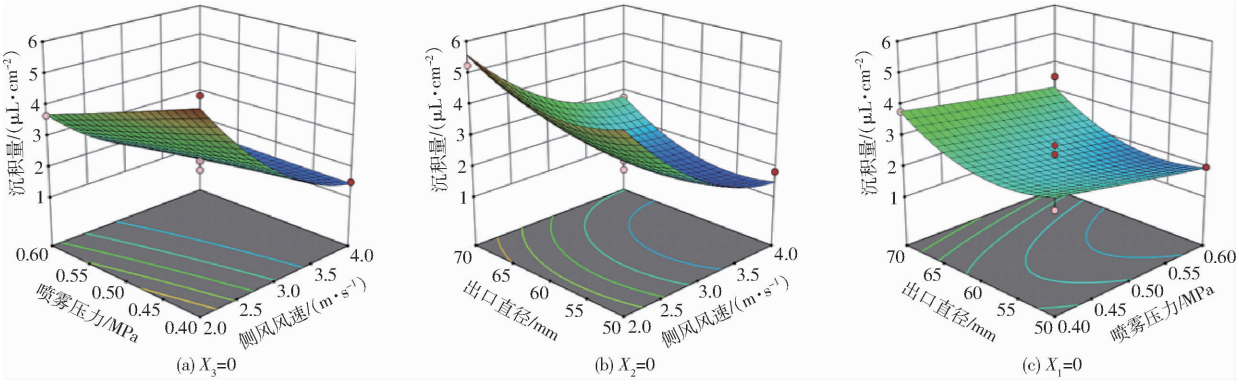

图 20　各因素交互作用的雾滴沉积量响应面

Fig. 20　Droplet deposition response surfaces of interaction of various factors

综上所述，3 种因素对雾滴沉积量的影响由大到小为侧风风速、喷雾压力、出口直径，适当增加出口直径和喷雾压力有助于提高雾滴沉积量。

3.6　基于 Isight 的参数优化与试验验证

3.6.1　参数优化

多岛遗传算法（Multi-island genetic algorithm，IGA）是一种基于遗传算法的分布式优化技术。它将传统的遗传算法拓展到多个“岛”（Island）的框架，通过“移民”（Migration）的概念来模拟种群的迁移和交流，使得每个岛的种群可以不断地接受新的基因信息，从而获得更好的搜索性能。IGA 的优点在于可以有效地提高传统遗传算法的搜索效率，更好地支持分布式优化，更有效地避免局部最优解，并且可以更好地支持多目标优化。

进行防飘装置结构参数优化时，可在 Isight 基础平台下将响应面试验获得的回归方程集成到 Calculator 计算模块，优化模型如图 21 所示。通过图 20 曲面的分析，并结合防飘装置实际作业要求确定优化数学模型，定义约束条件为

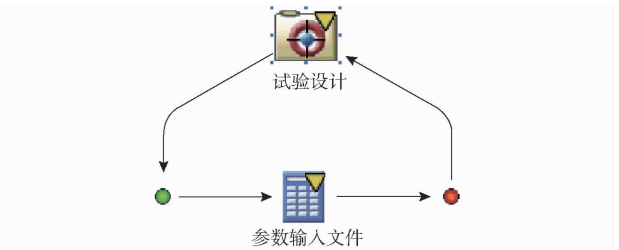

图 21　Isight 优化流程

Fig. 21　Isight optimization process

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{12}$$

首先，将回归方程输入到 Isight 优化模型；其次，根据 Optimization 模块设置的约束条件以及多岛遗传优化算法，多岛遗传算法各控制参数如表 4 所示；最后，在 Calculator 模块中计算雾滴沉积量 Y_1，并将其输出值作为优化的目标函数值，如此循环往复，直至优化算法收敛或者优化次数达到最大值，在 Isight 软件中利用多岛遗传算法进行 100 000 次的迭代计算，得到最优目标值。利用多岛遗传算法优化雾滴沉积量，得到寻优路径图如图 22 所示。

表 4　多岛遗传算法控制参数

Tab. 4　Multi-island genetic algorithm control parameters

参数	数值
子种群体规模	10
子种群岛数量	100
进化代数	100
杂交概率	1.00
变异概率	0.01
迁移率	0.01
迁移间隔	5.00

对目标函数进行求解，从最优集中得到，当 $X_1 = -1$、$X_2 = -1$、$X_3 = 1$，即侧风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.4 MPa、出口直径为 70 mm 时，雾滴沉积

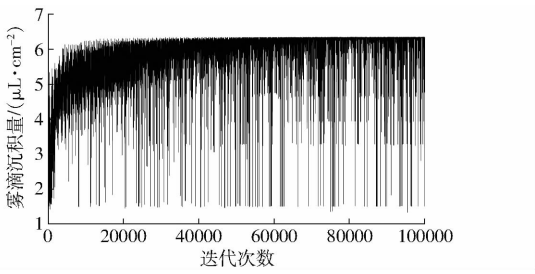

图 22 多岛遗传算法寻优路径

Fig. 22 Multi-island genetic algorithm to find optimal path

量最大,为 6.34 μL/cm²。当侧风风速大于 2 m/s 时,应该减小出口直径与喷雾压力,以提高冠层雾滴沉积。

3.6.2 最优参数验证

为验证优化后的防飘装置实地施药作业效果,于 2023 年 6 月 9 日在国家苹果产业体系保定综合试验站(顺平县蒲上镇西于家庄村)矮砧密植苹果园内进行田间试验,试验条件和环境与 2.2.3 节相同。在园内选取同一行的 5 棵枝繁叶茂的典型果树,按照风送喷雾机国家标准方法[34]进行。水敏纸布置图如图 11 所示,装置以作业速度 1.0 m/s 前进。雾滴沉积量取平均值为 5.96 μL/cm²,与响应面优化结果差异率仅为 5.9%,试验验证所得结果与模型预测结果基本吻合。

4 结论

(1)设计了一种伞形风场式防飘喷雾装置,通过 CFD 仿真验证伞形风场防飘效果,采用仿真与物理试验相结合的方式探究调节机构对风场的影响,开展防飘可行性和雾滴均匀性试验,结果表明雾滴飘移率、质量中心距、雾滴沉积分布变异系数较普通气流分别降低 27.5%、16.2%、7%。解决了传统风送式喷雾机采用普通辅助气流存在的非靶标区域雾滴飘移的问题。

(2)进行单因素和多因素果园喷雾性能试验,以侧风风速、出口直径、喷雾压力为因素建立了二次回归模型,并绘制了响应曲面。结果表明 3 种因素对雾滴的沉积特性均有较为显著的影响,影响由大到小依次为侧风风速、喷雾压力、出口直径。

(3)当侧风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.4 MPa、出口直径为 70 mm 时,雾滴沉积量最大,为 6.34 μL/cm²;侧风风速大于 2 m/s 时,应该适当减小出口直径和喷雾压力有助于提高雾滴沉积量。以最优作业参数进行田间试验,雾滴沉积量为 5.96 μL/cm²,与响应面优化结果差异率仅为 5.9%,试验验证所得结果与模型预测结果基本吻合。

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]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 1 – 16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Research progress and prospect of environment-friendly pesticide spraying machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1 – 16. (in Chinese)

[2] 郑永军,陈炳太,吕昊暾,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 Haodun, et al. Research progress of plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 110 – 124. (in Chinese)

[3] 李雪, 徐陶, 王伟, 等. 八旋翼植保无人机下洗气流对雾滴运动与分布特性的影响[J]. 农药学学报, 2023, 25(3): 689 – 699.
LI Xue, XU Tao, WANG Wei, et al. Effect of downwash airflow on droplet movement and distribution characteristics of eight-rotor plant protection UAV[J]. Journal of Pesticide Science, 2023, 25(3): 689 – 699. (in Chinese)

[4] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105 – 113.
CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using mult-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105 – 113. (in Chinese)

[5] 冯玉茹, 王香, 徐少卿, 等. 防飘喷头在植保无人飞机水稻病害防治应用研究[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(9): 195 – 203.
FENG Yuru, WANG Xiang, XU Shaoqing, et al. Research on the application of anti-drift sprinkler in rice disease control by unmanned aircraft for plant protection[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(9): 195 – 203. (in Chinese)

[6] 王潇楠, 齐鹏, 于聪伟, 等. 农药雾滴雾化沉积飘失研究进展[J]. 农药学学报, 2022, 24(5): 1065 – 1079.
WANG Xiaonan, QI Peng, YU Congwei, et al. Research progress on aerosol deposition loss of pesticide droplets[J]. Journal of Pesticide Science, 2022, 24(5): 1065 – 1079. (in Chinese)

[7] 康峰, 吴潇逸, 王亚雄, 等. 农药雾滴沉积特性研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 1 – 14.
KANG Feng, WU Xiaoyi, WANG Yaxiong, et al. Research progress and prospect of pesticide droplet deposition characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 1 – 14. (in Chinese)

[8] 丁素明，薛新宇，董祥，等. 喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 2)：308－315.
DING Suming，XUE Xingyu，DONG Xiang，et al. Effect of spray parameters on droplet deposition performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp. 2)：308－315.（in Chinese）

[9] 李杰，赵纯清，李善军，等. 基于 CFD 果园风送式喷雾机雾滴沉积特性研究[J]. 华中农业大学学报，2019，38(6)：171－177.
LI Jie，ZHAO Chunqing，LI Shanjun，et al. Study on droplet deposition characteristics of orchard air-driven sprayer based on CFD[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2019，38(6)：171－177.（in Chinese）

[10] 石鑫，陈奕璇，杜亚辉，等. 环境风速及飞行参数对多旋翼植保无人机雾滴飘移特性的影响[J]. 植物保护学报，2021，48(3)：546－553.
SHI Xin，CHEN Yixuan，DU Yahui，et al. Effects of ambient wind speed and flight parameters on droplet drift characteristics of multi-rotor plant protection UAV[J]. Journal of Plant Protection，2021，48(3)：546－553.（in Chinese）

[11] 李继宇，兰玉彬，施叶茵，等. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报，2018，34(12)：104－118.
LI Jiyu，LAN Yubin，SHI Yeyin，et al. Research progress on air flow characteristics and field application of rotary-wing UAV[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(12)：104－118.（in Chinese）

[12] 文晟，韩杰，兰玉彬，等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J]. 农业机械学报，2018，49(8)：127－137，160.
WEN Sheng，HAN Jie，LAN Yubin，et al. Effect of wing tip vortex on droplet drift of single rotor plant protection unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(8)：127－137，160.（in Chinese）

[13] 王志翀，何雄奎，李天，等. 基于激光成像技术的农药雾滴飘移评价方法研究[J]. 农业工程学报，2019，35(9)：73－79.
WANG Zhichong，HE Xiongkui，LI Tian，et al. Evaluation method of pesticide droplet drift based on laser imaging technology[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(9)：73－79.（in Chinese）

[14] 赵峻逸，薛士东，宋小沫，等. 农药药液物理性质对雾滴空间运行规律的影响模拟研究[J]. 农药学学报，2020，22(2)：306－314.
ZHAO Junyi，XUE Shidong，SONG Xiaomo，et al. Simulation study on the effect of physical properties of pesticide liquid on the spatial movement of droplets[J]. Journal of Pesticide Science，2020，22(2)：306－314.（in Chinese）

[15] 王冰洁，潘波，姜蕾，等. 植保无人机作业参数对雾滴在火龙果树冠层沉积分布的影响[J]. 中国农业科技导报，2020，22(10)：101－109.
WANG Bingjie，PAN Bo，JIANG Lei，et al. Effect of spraying parameters of plant protection UAV on deposition distribution of droplets in Pitaya canopy[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2020，22(10)：101－109.（in Chinese）

[16] 孙涛，张宋超，薛新宇，等. 小麦不同生育期单旋翼植保无人机施药作业参数优化[J]. 植物保护学报，2021，48(3)：501－509.
SUN Tao，ZHANG Songchao，XUE Xinyu，et al. Optimization of application parameters of single rotor plant protection UAV in different growth stages of wheat[J]. Journal of Plant Protection，2021，48(3)：501－509.（in Chinese）

[17] DORR G J，HEWITT A J，ASKINS S W，et al. A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles[J]. Crop Protection，2013，53：109－117.

[18] 刘雪美，宋来其，崔慧媛，等. 气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对沉积性能影响解耦研究[J]. 农业机械学报，2021，52(8)：117－126，137.
LIU Xuemei，SONG Laiqi，CUI Huiyuan，et al. Decoupling on influence of air droplet stress and canopy porosity change on deposition performance in air-assisted spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(8)：117－126，137.（in Chinese）

[19] FOQUÉ D，PIETERS J G，NUYTTENS D. Spray deposition and distribution in a bay laurel crop as affected by nozzle type，air assistance and spray direction when using vertical spray booms[J]. Crop Protection，2012，41：77－87.

[20] PASCUZZI S，BULGAKOV V，SANTORO F，et al. A study on the drift of spray droplets dipped in airflows with different directions[J]. Sustainability，2020，12(11)：4644.

[21] BAHROUNI H，CHAABANE H，MARZOUGUI N，et al. Effect of sprayer parameters and wind speed on spray retention and soil deposits of pesticides：case of artichoke cultivar[J]. Plant Protection Science，2021，57(4)：333－343.

[22] 樊桂菊，牛成强，张震明，等. 多气流协同式果园 V 形防飘喷雾装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(3)：138－147.
FAN Guiju，NIU Chengqiang，ZHANG Zhenming，et al. Design and test of V-shaped anti-drift spray device for orchard with multi-airflow coordination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(3)：138－147.（in Chinese）

[23] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(12)：142－149，174.（in Chinese）

（下转第 151 页）