

多气流协同式果园 V 形防飘喷雾装置设计与试验

樊桂菊^{1,2} 牛成强^{1,2} 张震明³ 王东伟⁴ 毛文华⁵ 姜红花³

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018; 4. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109;
5. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 为提高果园风送式喷雾靶标区域沉积量,减少果树行间雾滴飘移,在常规气流辅助喷雾基础上,设计了一种多气流协同式 V 形防飘喷雾装置,通过 CFD 仿真验证其防飘效果。以 V 形风场风速、横风风速、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,探析多气流 V 形风场对雾滴冠层沉积效果的影响规律。结果表明,当横风风速为 3 m/s 时,多气流协同作用的雾滴沉积密度、沉积量较单一气流分别提高了 28.7%、17.4%,飘移量降低了 21.8%;且 3 种因素对雾滴沉积特性都有显著影响,由大到小依次为:V 形风场风速、横风风速、喷雾压力。通过响应面建立了雾滴沉积量预测优化模型,当横风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.52 MPa、V 形风场风速为 21.8 m/s 时,雾滴沉积量最优值为 4.81 μL/cm²,田间试验结果为 4.72 μL/cm²,与雾滴沉积模型预测基本一致。

关键词: 果园; 多气流; 防飘喷雾; 雾滴沉积; 响应曲面

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0138-10 OSID: 

Design and Experiment of V-shaped Orchard Anti-drift Spray Device with Multi-airflow Cooperation

FAN Guiju^{1,2} NIU Chengqiang^{1,2} ZHANG Zhenming³ WANG Dongwei⁴ MAO Wenhua⁵ JIANG Honghua³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
3. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China
5. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the deposition in the target area of orchard wind-fed spray and reduce the drift of fog drops between rows, a V-shaped anti-drift spray device with multi-airflow cooperation was designed on the basis of conventional airflow assisted spray. CFD simulation was used to verify the anti-flapping effect. The simulation results showed that the droplet deposition area of multi-airflow was more concentrated than that of single air flow, and the droplet escape rate was reduced by 40.3%. The feasibility of anti-drift and droplet uniformity test under multi-airflow and single airflow were carried out. The results showed that the droplet drift rate, quality center distance and droplet deposition distribution coefficient of variation were reduced by 29.2%, 25.2% and 30.2% compared with single airflow, respectively. The wind speed in the V-shape wind field, the wind speed in the crosswind and the spray pressure were taken as factors. Single-factor and three-factor and three-level fog droplet drift deposition experiments were carried out in apple tree canopy. The influence law of multi-ariflow V-shaped wind field on fog drop canopy deposition was analyzed. The results showed that when the crosswind speed was 3 m/s, the deposition density and deposition amount of fog droplets under the synergistic action of multiple flows were increased by 28.7% and 17.4%, and the drift amount was decreased by 21.8%, respectively,

收稿日期: 2021-08-04 修回日期: 2021-10-09

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ001)、山东省园艺机械与装备重点实验室项目(YYJX-2019-07)和山东省自然科学基金项目(ZR2018MC017)

作者简介: 樊桂菊(1979—),女,副教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail: fanguiju2002@163.com

通信作者: 姜红花(1971—),女,教授,主要从事物联网与自动控制研究,E-mail: j_honghua@sda.u.edu.cn

compared with single ariflow. The three factors had significant influence on the droplet deposition characteristics. The influence degree from large to small was the wind speed in V-shaped wind field, the wind speed in crosswind, and spray pressure. The optimal model for predicting droplet deposition was established by response surface. When the crosswind speed was 2 m/s, the spray pressure was 0.52 MPa, the wind speed was 21.8 m/s in the V-shaped wind field, the optimal value of fog droplet deposition was $4.81\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$. The result of field experiment was $4.72\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$, which was consistent with the prediction of fog droplet deposition model.

Key words: orchard; multi-airflow; anti-drift spray; droplet deposition; response surface

0 引言

随着果园种植面积增大和农村劳动力转移,风送式喷雾机被广泛应用^[1-3],但大多喷雾机通过单一辅助气流将雾滴送向靶标,一定程度上提高了靶标内雾滴沉积量。然而相关研究表明,果树冠层尤其叶片背面雾滴覆盖率仍较低,农药飘移浪费严重^[4-7],减少雾滴靶标外飘移及非靶标区域无效沉积成为研究重点^[8-10]。风幕技术通过增加雾滴能量,可以提高作物不同层次位置的雾滴沉积^[11-13]。因此,研究多气流协同式果园喷雾装置及其雾滴沉积特性具有重要意义。

在风送式喷雾防飘装置与雾滴沉积特性方面,国内外学者开展了大量研究。张京等^[14-15]研制了挡板导流式罩盖喷雾系统,胡军等^[16]设计了一种锥形风场式防飘移装置,周良富等^[17-18]提出了双气流辅助与静电喷雾结合方法,皆有效减少了雾滴漂移。BAETENS 等^[19]通过改变喷杆高度、风速、风向偏差和雾滴喷射速度,探究了风幕式喷杆喷雾机的雾滴飘移规律;文献[20-23]分析了喷雾辅助气流参数对雾滴沉积飘移特性的作用规律;DIETER 等^[24]研究了辅助气流速度和喷雾角对雾滴沉积分布均匀性的影响规律。

综上所述,果园风送式喷雾防飘效果与其装置结构形式和作业参数等有关,本文在常规气流辅助喷雾基础上设计多气流协同式 V 形防飘喷雾装置,并开展雾滴飘移和果树冠层沉积性能试验,探究多气流协同下雾滴冠层沉积分布规律,以期为其结构设计和作业参数优化提供理论依据。

1 结构与工作原理

1.1 整体结构

多气流协同式果园 V 形防飘喷雾装置结构如图 1 所示,该装置主要由离心风机、分配器、主风筒、副风筒、机架和输送风管等组成,F-03-80 型扇形喷头安装在主风筒上,两副风筒水平方向上呈 V 形布置,沿高度方向开设密集细小的圆形出风口。主要技术参数如表 1 所示。

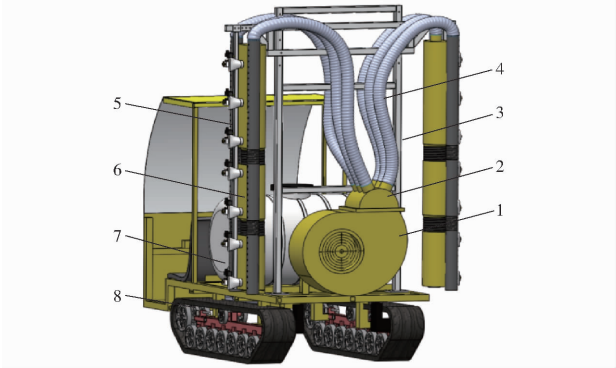


图 1 多气流协同式果园 V 形防飘喷雾装置结构图

Fig. 1 Structure of V-shaped anti-drift spray device for orchard with multi-airflow coordination

1. 离心风机 2. 分配器 3 机架 4. 输送风管 5. 副风筒 6. 主风筒 7. 药箱 8. 履带式底盘

表 1 喷雾装置主要技术参数

Tab. 1 Main technical indicators of spray device

参数	数值
适合种植行距/m	3.5 ~ 4.0
机架宽度/m	2.5 ~ 3.0
机架高度/m	2.9 ~ 3.4
喷头数量/个	14
离心风机转速/($r\cdot\text{min}^{-1}$)	0 ~ 1 500

1.2 防飘原理

该装置防飘原理如图 2 所示, X 、 Y 、 Z 分别表示机组行驶方向、喷雾方向和株高方向; φ 表示 V 形开度; Q_a 表示果树行间自然风。当机组逆风行驶时,主风筒产生喷雾气流 Q_1 ,将雾滴送向果树冠层;前副风筒生成挠动气流 Q_2 ,分为沿前进方向的气流 Q_{2x} 和沿喷雾方向的气流 Q_{2y} ,翻转枝叶使背面朝上并削弱自然风对雾滴的影响;后副风筒沿株高方向

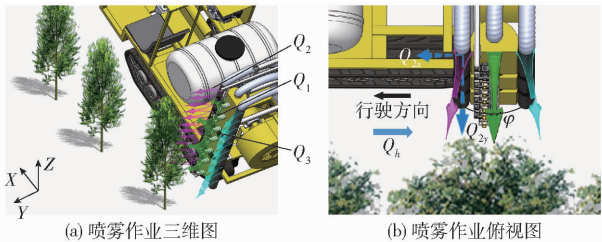


图 2 多气流协同式喷雾防飘原理图

Fig. 2 Anti-drift schematic of multi-airflow collaborative spray

形成风幕,即防飘气流 Q_3 ,减少雾滴非靶标区域飘移、提高果树冠层雾滴沉积量。当机组顺风行进时,两副风筒气流作用互换。

2 关键部件设计与仿真

2.1 风筒

(1) 风筒高度

如图 3 所示,以 4 年生纺锤型苹果树株高为设计参考^[25],风筒高度 H 计算式为

$$H = H_1 - (H_2 + 2L \tan \theta) \tag{1}$$

式中 H_1 ——株高,为 3.5 m
 H_2 ——果树第一分枝高度,为 0.7 m
 L ——喷头到冠层距离,为 0.3 m
 θ ——喷雾半角,为 40°

将各取值代入式(1),可得 $H = 2.3$ m。同时为适应不同果树行距和株高,机架开有宽度和高度调节孔。

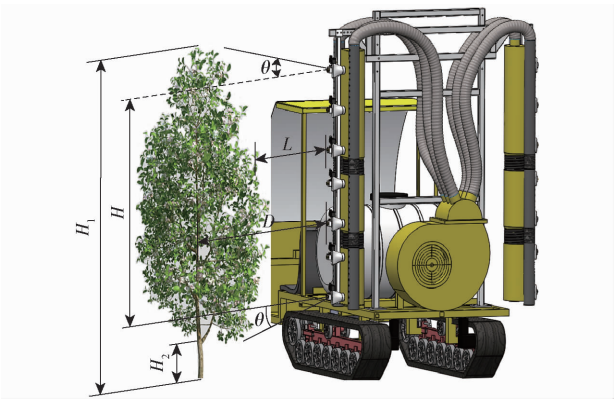


图 3 装置结构参数示意图
Fig. 3 Schematic of device structure parameters

(2) 副风筒 V 形开度

V 形开度指两副风筒之间的安装夹角,是影响雾滴防飘性能的重要参数,其大小与各气流速度密切相关。由图 2 可知 V 形开度 φ 满足

$$\varphi = 2 \arctan \frac{v_{Q_{2x}}}{v_{Q_{2y}}} \tag{2}$$

式中 $v_{Q_{2x}}$ ——扰动气流沿机组前进方向速度分量, m/s
 $v_{Q_{2y}}$ ——扰动气流沿喷雾方向速度分量, m/s

根据装置功能,扰动气流沿喷雾方向气流分量 Q_{2y} 与喷雾气流 Q_1 均绕树枝叶打开冠层,两者速度相同,依据末速度原则^[26]得 v_{Q_1} 为

$$v_{Q_1} = \frac{H_1 v_0 K}{H} \tag{3}$$

式中 v_0 ——气流到达树冠表层速度, m/s
 K ——沿程损失系数,取 1.2 ~ 1.6
因出风口距冠层较近, K 取 1.2; 针对苹果树 v_0

为 9 m/s^[26],代入式(3)得 $v_{Q_1} = 17$ m/s,即 $v_{Q_{2y}} = 17$ m/s;此外根据果园施药标准^[27],喷洒作业时自然风速应小于等于 3.5 m/s(3 级风),所以 $v_{Q_{2y}} \geq 3.5$ m/s,考虑自然风速峰值不定, $v_{Q_{2x}}$ 取 4 m/s;代入式(2)得 $\varphi = 27^\circ$ 。

2.2 风机风量和风压

依据风量置换原则^[27],随机组前进喷雾气流能够置换作业区域的全部空气,即喷雾所需风量为

$$Q \geq (H + H_1 - H_2)DKv \tag{4}$$

式中 Q ——离心风机风量, m^3/h
 D ——喷头到果树树干距离,为 0.7 m
 v ——机组行驶速度,为 0.5 ~ 1.0 m/s
取 $v = 1$ m/s,代入式(4)得 $Q \geq 2.1$ m^3/s 。

风机风压计算式^[28]为

$$p = p_d + p_m + p_j \tag{5}$$

其中 $p_d = \frac{\rho v_g^2}{2}$ $p_m = \frac{\eta \rho v_g^2 l}{2d}$ $p_j = \xi \frac{\rho v_g^2}{2}$

式中 p ——风机总压, Pa p_d ——动压损失, Pa
 p_m ——摩擦压力损失, Pa
 p_j ——局部压力损失, Pa
 ρ ——空气密度,取 1.22 kg/ m^3
 v_g ——风管气流速度,取 30 m/s
 η ——摩擦因数 l ——风管长度, m
 d ——输送风管直径,取 0.06 m
 ξ ——局部阻力系数

依据《通风设计手册》取 $\eta = 0.1$, $l = 6$ m, $\xi = 0.3$,代入式(5)得 $p = 1\ 630$ Pa。

2.3 分配器

依据风量分配需求设计半圆柱形分配器(图 4),其进风口与离心风机出风口匹配,直径为 0.24 m,出风口直径皆为 0.06 m。通过 Fluent 进行气流分配均匀性仿真,如图 5 所示。

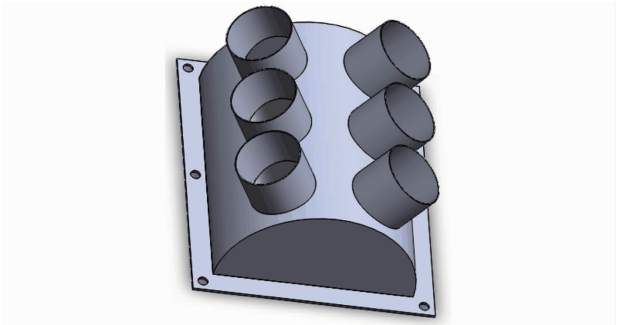


图 4 半圆柱形气流分配器
Fig. 4 Semi-cylindrical air distributor

由图 5 可知,分配器气流量分配较为平均,且出风口风速均匀,速度在 29.9 ~ 32.3 m/s 之间,满足气流分配需求。

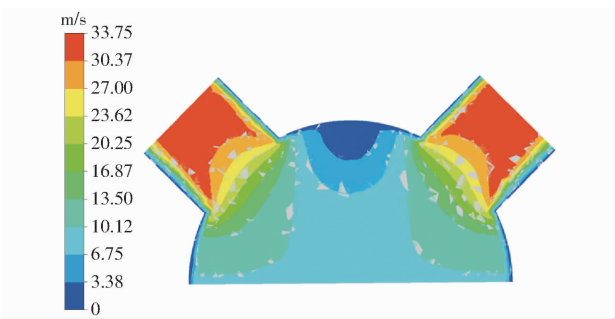


图 5 气流分配均匀性仿真结果
Fig. 5 Air distribution uniformity

2.4 防飘仿真验证

依据其结构设计与参数,在 SolidWorks 中绘制三维模型,将喷雾装置到果树冠层区域简化为长方体(500 mm×1 000 mm×3 000 mm),建立 CFD 数值模型,通过 ANSYS Mesh 划分网格如图 6 所示,利用 DPM 方法^[29]得单一气流(仅有喷雾气流)和多气流(喷雾气流、扰动气流和防飘气流)协同的雾滴群运动轨迹如图 7 所示,其中两侧面为雾滴逃逸面。

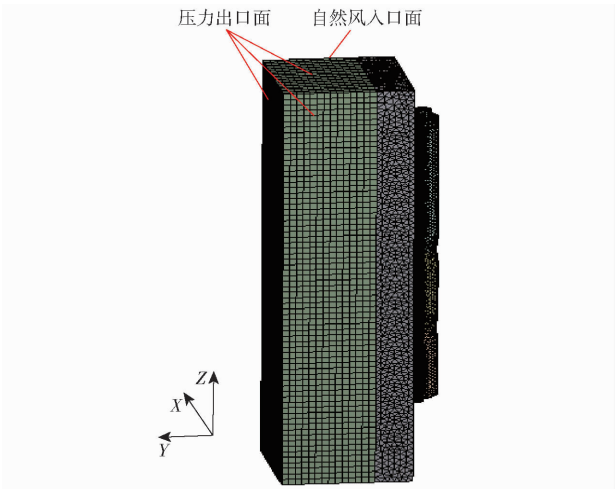


图 6 计算区域网格划分
Fig. 6 Computational area meshing

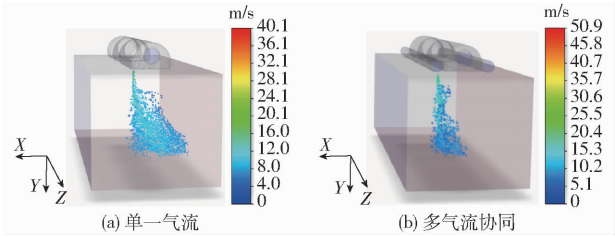


图 7 雾滴群轨迹

Fig. 7 Trajectory diagrams of fog drop group in two states

由图 7 及仿真结果可知,多气流协同较单一气流的雾滴沉积区域更为集中,雾滴逃逸率降低了 40.3%,表明该装置具有较明显的防飘效果。

3 试验

3.1 试验仪器

主要试验仪器有:FS-75 型工业风扇(风量

18 900 m³/h、转速 1 400 r/min)、HT9829 型热敏式风速仪(东莞市鑫泰仪器仪表有限公司)、ARTS904520 型垂直雾滴分布测试仪(意大利 AAMS 公司)、DCP-1618W 型扫描仪、723N 型可见分光光度计、自制集雾板(间距为 20 mm 的 66 个集雾槽粘合)、金属筛网、柠檬黄试剂、量筒、秒表等。

3.2 试验设计

3.2.1 防飘试验

在 FS-75 型工业风扇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,下文以横风描述),以纯净水为喷雾介质,开展装置防飘试验,如图 8 所示。试验条件为:横风风速 3 m/s、喷雾气流速度 15 m/s、V 形风场风速(扰动气流速度)分别为 0、20 m/s、喷雾压力为 0.5 MPa、喷雾距离 30 cm、喷雾时间 10 s,每组试验进行 3 次取平均值。

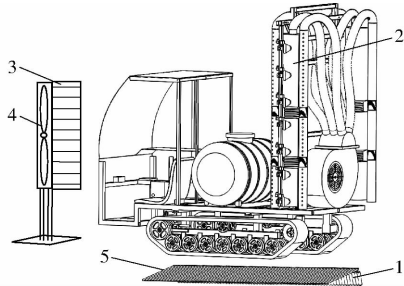


图 8 防飘试验装置示意图
Fig. 8 Anti-drift verification experiment

- 1. 试管 2. 多气流协同式 V 形防飘喷雾装置 3. 蜂窝整流装置
- 4. FS-75 型工业风扇 5. 集雾槽

3.2.2 雾滴垂直沉积均匀性试验

利用垂直雾滴分布测试仪对装置进行单一气流和多气流协同下雾滴垂直沉积均匀性试验,试验条件为:无风、喷雾气流速度 15 m/s、V 形风场风速分别为 0、20 m/s、喷雾压力 0.5 MPa,每组试验进行 3 次取平均值。

3.2.3 雾滴沉积特性综合试验

于 2021 年 5 月 23 日在山东农业大学园艺实验基地标准化种植果园内进行田间试验,试验对象为纺锤形苹果树,树高 3.5 m(修剪后),冠径 1.7 m,行距 4 m,株距 2 m。

(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 9 所示,即 5 个水平面(I、II、III、IV、V)、4 个垂面(1、2、3、4)和 3 个曲面(G₁、G₂、G₃),各截面间距分别为 0.7、0.6、0.35 m。每两截面交点为采样点,各放置水敏纸一张(规格 110 mm×35 mm)。

(2)雾滴果园空中飘移测试

距果树树干 0.3 m 处立一直杆(图 9,高 5 m),由下到上间隔 0.5 m 放置长方形金属筛网(2.5 cm×

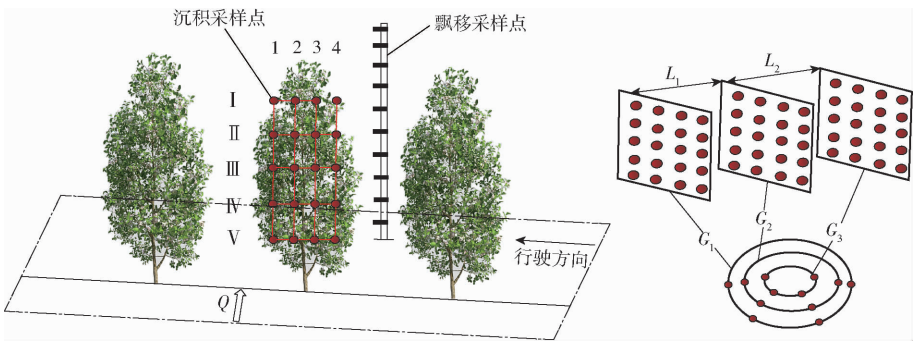


图9 采样点布置示意图
Fig.9 Schematic of sampling point layout

7.5 cm,400 目)收集飘移雾滴。以 2.5 g/L 柠檬黄溶液为示踪剂,洗脱处理后通过 723N 型可见分光光度计(设定波长 426 nm)测定其吸光度,相应冠层高度的单位面积雾滴飘移量计算式为^[8]

$$w=\frac{V_c}{S}\tag{6}$$

其中

$$V_c=10^3\frac{V_XA_X}{NA_B}$$

- 式中 V_c ——金属筛网飘移量, μL
 V_X ——洗脱液体积, mL
 A_X ——洗脱液吸光度
 A_B ——标定液吸光度
 N ——柠檬黄母液稀释倍数
 S ——金属筛网面积, cm^2
 w ——单位面积飘移量, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$

根据上述试验方法,分别进行 V 形风场风速和喷雾压力单因素试验(图 10)。试验条件为:机组行驶速度 1 m/s,横风风速 3 m/s,喷雾压力 0.5 MPa,V 形风场风速 0~25 m/s、间隔 2.5 m/s;V 形风场风速为 20 m/s,喷雾压力 0.4~0.6 MPa、间隔 0.02 MPa。每组试验进行 3 次取平均值。



图 10 雾滴沉积特性田间试验
Fig.10 Field test of droplet deposition characteristics

依据单因素试验结果,开展横风风速、V 形风场风速及喷雾压力多因素试验,分析各因素对冠层雾滴沉积分布的交互影响规律。

4 结果与分析

4.1 防飘分析

依据 3.2.1 节分别进行单一气流与多气流协同

的喷雾作业,收集各试管内液体体积,将数据导入 Origin 得雾滴沉积分布如图 11 所示。

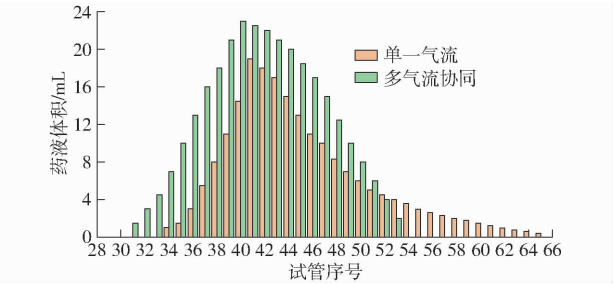


图 11 单一气流和多气流的雾滴沉积水平分布
Fig.11 Horizontal distribution of droplet deposition in two states

由图 11 可知,多气流协同时雾滴沉积较单一气流更为集中,主要分布于序号为 33~51 试管中,以雾滴飘移率与雾滴质量中心距^[30]衡量其防飘性能,计算式分别为

$$\alpha=\frac{V_{1Z}-\sum_{i=1}^nV_i}{V_{1Z}}\times100\%\tag{7}$$

$$D_c=\frac{\sum_{i=1}^nV_id_i}{\sum_{i=1}^nV_i}\tag{8}$$

- 式中 α ——雾滴飘移率,%
 D_c ——雾滴质量中心距,mm
 i ——集雾槽序号
 n ——集雾槽总数,个
 V_i ——第 i 个集雾槽中收集液体体积, mL
 V_{1Z} ——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

代入数据得多气流协同的雾滴飘移率、质量中心距分别为 13.6%、172 mm,较单一气流分别降低了 29.2% 和 25.2%,表明多气流协同能有效限定雾滴沉积范围,雾滴飘移潜力降低,该装置防飘效果较好。

4.2 雾滴垂直沉积均匀性分析

分别收集垂直雾滴分布测试仪两种喷雾作业下不同高度的雾滴,结果如图 12 所示。

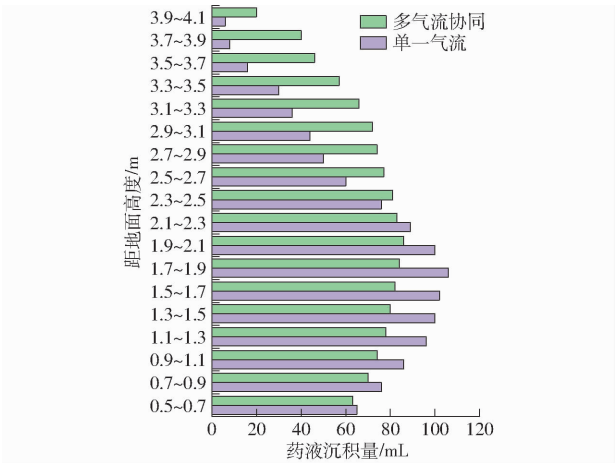


图 12 单一气流和多气流协同的雾滴垂直沉积分布
Fig. 12 Vertical deposition of droplet deposition in two states

由图 12 可知,多气流协同时,距离地面高度大于 2.3 m 区域雾滴沉积量明显增加。雾滴沉积量分布变异系数 c_v [30] 计算式为

$$c_v = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^m (V_{2t} - \bar{V}_{2x})^2}{m \bar{V}_{2x}^2}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 t ——集液板量筒序号
 m ——沉积分布量筒总数,个
 V_{2t} ——第 t 个量筒中收集的液体体积, mL
 $\bar{V}_{2x}$ ——各量筒液体体积平均值, mL

由此得多气流协同时雾滴沉积分布变异系数为 25.1%,较单一气流降低了 30.2%,表明雾滴垂直分布均匀性提高,有效减少,冠层高度方向漏喷、过喷问题。

4.3 单因素试验

4.3.1 V 形风场风速

利用 DCP-1618W 型扫描仪将收集的喷雾水敏纸依据采样点分类处理,通过重庆六六山下植保有限公司雾滴分析软件得不同冠层高度处的雾滴沉积密度和沉积量,结果分别如图 13、14 所示;根据空中飘移测试方法测得雾滴飘移量如图 15 所示。

由图 13~15 可知,雾滴沉积密度和沉积量随 V 形风场风速增大先缓慢增加后急剧减小,雾滴空中飘移量则呈先平缓下降后缓慢增加的趋势。横风风速为 3 m/s 时,多气流协同时雾滴沉积密度、沉积量较单一气流分别提高了 28.7%、17.4%,飘移量则降低了 21.8%;V 形风场风速为 20 m/s 时,果树冠层高度 2.0 m 处沉积量最大,为 4.93 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,3.5~5 m 区段的飘移量最小,为 0.11 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$;V 形风场

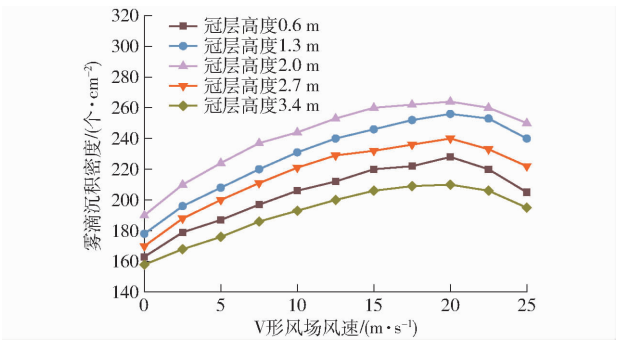


图 13 不同 V 形风场风速下雾滴沉积密度变化曲线
Fig. 13 Variation curves of droplet deposition density at different wind speeds of V-shaped wind field

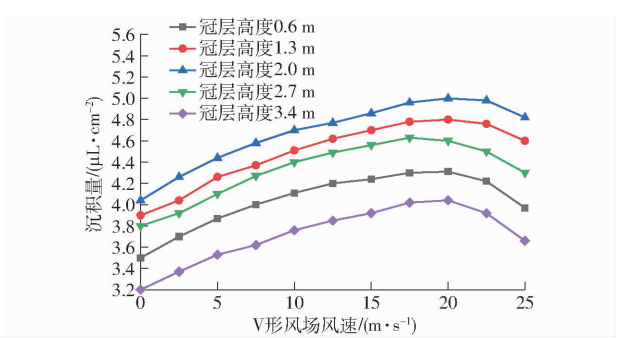


图 14 不同 V 形风场风速下雾滴沉积量变化曲线
Fig. 14 Variation curves of droplet deposition at different wind speeds of V-shaped wind field

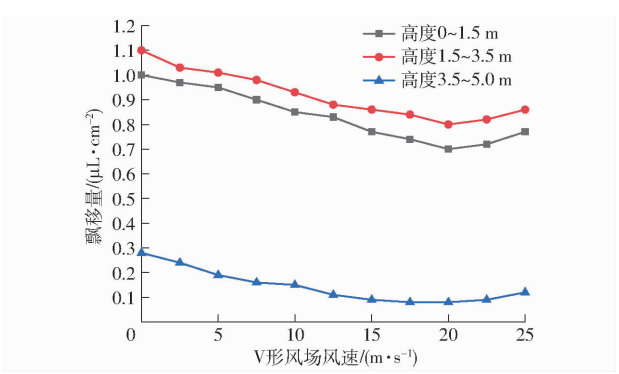


图 15 不同 V 形风场风速下飘移量变化曲线
Fig. 15 Variation curves of drift at different wind speed of V-shaped wind field

风速为 15~25 m/s 时,对雾滴沉积效果影响较大,因此以该区间为多因素试验时的 V 形风场风速取值。

4.3.2 喷雾压力

设定 V 形风场风速为 20 m/s,改变喷雾压力,不同冠层高度的雾滴沉积量如图 16 所示。

由图 16 可知,V 形风场风速不变,雾滴沉积量随喷雾压力增大而增加,当喷雾压力为 0.5 MPa 时,果树冠层高度为 2.0 m 处的雾滴沉积量最大值为 4.45 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$;喷雾压力继续增大,雾滴沉积量则减小。主要原因为:喷头雾化能力随喷雾压力增大而增强,使雾滴初速度变大,利于雾滴向冠层沉积;但喷雾压力过大,雾滴粒径减小导致雾滴飘移潜力增大。

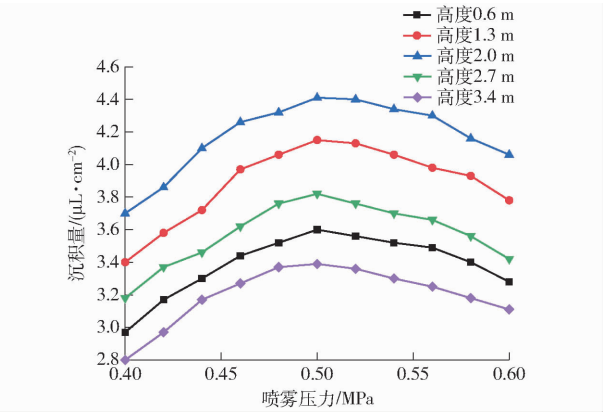


图 16 不同喷雾压力下雾滴沉积量变化曲线
Fig. 16 Variation curves of droplet deposition under different spray pressures

4.4 多因素试验

4.4.1 试验结果

以横风风速、喷雾压力及 V 形风场风速为雾滴沉积分布影响因素,根据 Box – Behnken 试验方案设计三因素三水平响应面分析试验,各水平编码如表 2 所示。试验方案与雾滴冠层沉积量如表 3 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 试验因素编码			
Tab. 2 Test factor and coding			
编码	因素		
	横风风速 x_1 /	喷雾压力 x_2 /	V 形风场风速 x_3 /
	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	MPa	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
-1	2	0.4	15
0	3	0.5	20
1	4	0.6	25

表 3 雾滴沉积试验方案与结果				
Tab. 3 Test scheme and results of droplet deposition				
序号	因素			沉积量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)
	X_1	X_2	X_3	
1	1	0	-1	2.51
2	0	1	1	4.45
3	0	0	0	3.96
4	-1	-1	0	4.40
5	0	0	0	4.02
6	1	0	1	4.18
7	-1	0	-1	3.76
8	1	-1	0	3.72
9	-1	1	0	4.70
10	0	0	0	3.97
11	1	1	0	4.20
12	0	-1	-1	2.92
13	0	0	0	4.10
14	-1	0	1	4.57
15	0	1	-1	3.60
16	0	-1	1	4.30
17	0	0	0	3.90

4.4.2 数学模型与显著性分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行回归处理分析,得到雾滴沉积量回归方程为

$$Y = 3.99 - 0.35X_1 + 0.20X_2 + 0.59X_3 + 0.045X_1X_2 + 0.21X_1X_3 - 0.13X_2X_3 + 0.10X_1^2 + 0.16X_2^2 - 0.34X_3^2 \quad (10)$$

依据该模型,通过 F 检验计算得到 P 值,进而分析各因素对雾滴沉积量的影响显著性,如表 4 所示。

表 4 方差分析					
Tab. 4 Equation analysis result					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4.96	9	0.55	67.66	<0.000 1 **
X_1	0.99	1	0.99	122.13	<0.000 1 **
X_2	0.32	1	0.32	39.81	0.000 4 **
X_3	2.77	1	2.77	340.69	<0.000 1 **
X_1X_2	8.1×10^{-3}	1	8.1×10^{-3}	1.00	0.351 7
X_1X_3	0.18	1	0.18	22.72	0.002 0 **
X_2X_3	0.07	1	0.07	8.63	0.021 8 *
X_1^2	0.04	1	0.04	5.30	0.054 8
X_2^2	0.11	1	0.11	13.87	0.007 4 **
X_3^2	0.48	1	0.48	58.49	0.000 1 **
残差	0.057	7	8.14×10^{-3}		
失拟项	0.035	3	0.012	2.06	0.248 5
纯误差	0.022	4	5.6×10^{-3}		
总和	5.01	16			

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

由表 4 可知,响应模型 $P < 0.001$,表明雾滴沉积量预测模型极显著;拟合统计 R^2 为 0.988 6,即模型拟合度高。因素 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 极显著, X_2X_3 显著,则雾滴沉积量预测模型简化为

$$Y = 3.99 - 0.35X_1 + 0.20X_2 + 0.59X_3 + 0.21X_1X_3 - 0.13X_2X_3 + 0.16X_2^2 - 0.34X_3^2 \quad (11)$$

相同喷雾条件下,雾滴沉积量预测值与试验值的相关性如图 17 所示。

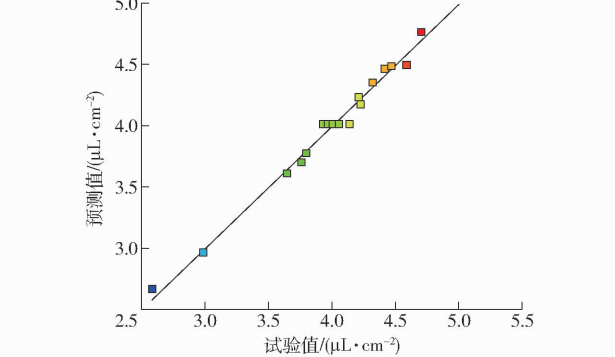


图 17 预测值与试验值相关性曲线
Fig. 17 Correlation curve of predicted value and test value

由图 17 可知,二者相关系数为 0.994 3,相关性较高,表明该预测模型可分析各因素对雾滴沉积分布的影响规律。

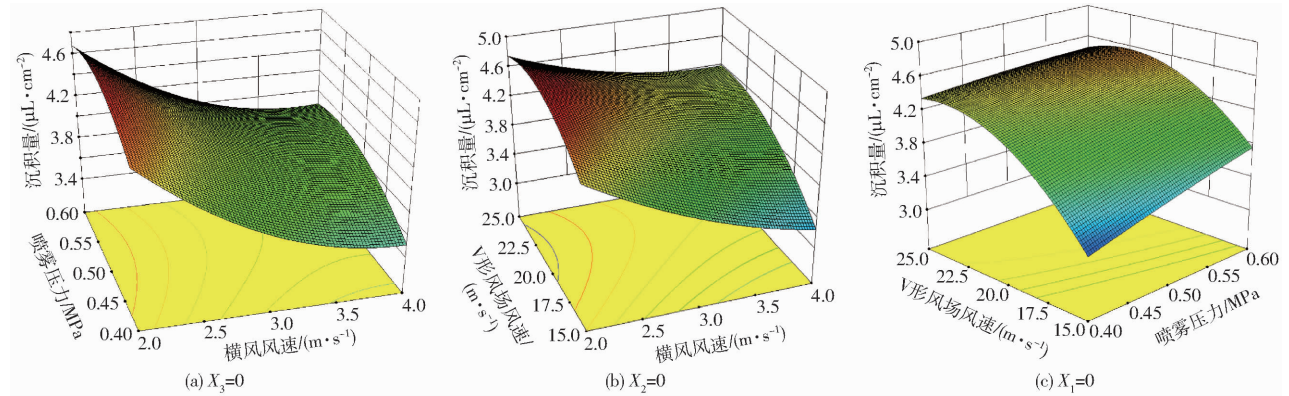


图 18 各因素交互作用的雾滴沉积量响应面

Fig. 18 Response surfaces of droplet deposition interacting with various factors

由图 18 可知,随横风风速增大,雾滴沿横风方向飘移增加,雾滴冠层沉积量减小;同一横风风速时,沉积量随喷雾压力增大而增加,V 形风场风速为 20 m/s、喷雾压力为 0.5 MPa、横风风速为 2 m/s 时,沉积量最大为 4.71 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,而后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,随 V 形风场风速增大,雾滴沉积量增加,喷雾压力为 0.5 MPa、V 形风场风速为 22.5 m/s、横风风速为 2 m/s 时,沉积量最大值为 4.64 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,但当 V 形风场风速继续增大时沉积量则减少,主要原因为 V 形风场风速持续增大时,部分雾滴穿透冠层,还有部分雾滴破碎加快使得飘移增加。

综上所述,3 种因素对雾滴沉积量的影响由大到小为 V 形风场风速、横风风速、喷雾压力,且适当增加喷雾压力和 V 形风场风速有利于提高雾滴沉

4.4.3 三因素交互作用

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 18 所示。

积量。

4.4.4 最优参数及试验验证

为确定喷雾压力、V 形风场风速及横风风速的最优参数,以雾滴沉积量最大为目标,以前述试验得到的 3 种因素作业范围为约束条件,建立雾滴沉积量预测优化模型为

$$\max Y = f(X_1, X_2, X_3) \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} X_1 \in [-1, 1] \\ X_2 \in [-1, 1] \\ X_3 \in [-1, 1] \end{cases}$$

优化求解得 3 种因素的交互影响曲面如图 19 所示。当横风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.52 MPa、V 形风场风速为 21.8 m/s 时,可得最大雾滴沉积量 4.81 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$;当横风风速大于 2 m/s 时,需适当增大 V 形风场风速与喷雾压力,以提高冠层雾滴沉积。

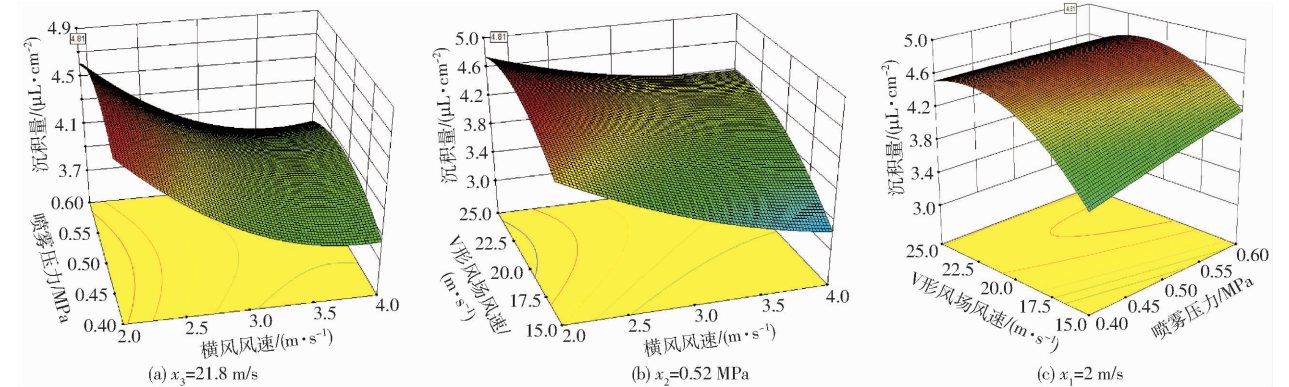


图 19 模型优化后各因素交互作用的雾滴沉积量响应面

Fig. 19 Response surfaces of droplet deposition of interaction of various factors after model optimization

依据最优作业参数组合,进行 5 次果园田间试验,雾滴沉积量取平均值为 4.72 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,与响应面优化结果差异率仅为 1.87%,表明优化模型可靠。

5 结论

(1) 针对现有风送式喷雾多采用单一辅助气流

存在非靶标区域飘移,设计了一种多气流协同式 V 形防飘喷雾装置,通过 CFD 仿真验证 V 形风场防飘效果,并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单一气流分别降低了 29.2%、25.2%、30.2%。

(2) 进行单因素和多因素果园喷雾性能试验,结果表明,当横风风速为 3 m/s 时,多气流协同作用的雾滴沉积密度、沉积量较单一气流分别提高了 28.7%、17.4%;对雾滴沉积特性有显著影响的因素

由大到小依次为:V 形风场风速、横风风速、喷雾压力。

(3) 通过响应面建立了雾滴沉积量预测模型并优化,当横风风速为 2 m/s、喷雾压力为 0.52 MPa、V 形风场风速为 21.8 m/s 时,雾滴沉积量最优值为 $4.81 \mu\text{L}/\text{cm}^2$;当横风风速大于 2 m/s 时,应适当增大 V 形风场风速与喷雾压力,以提高冠层雾滴沉积。以最优作业参数进行田间试验,雾滴沉积量为 $4.72 \mu\text{L}/\text{cm}^2$,与预测模型差异率仅为 1.87%,为其结构设计和作业参数进一步优化提供依据。

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. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1-16. (in Chinese)
- [2] 郑永军,陈炳太,吕昊墩,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)
- [3] 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)
- [4] 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 droplets 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)
- [5] 李昕昊,王鹏飞,李建平,等. 不同送风方式果园喷雾机施药效果比较[J]. 果树学报,2020,37(7): 1065-1072.
LI Xinhao, WANG Pengfei, LI Jianping, et al. A comparative study on the spraying effect of orchard wind sprayers under different air supply modes[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(7): 1065-1072. (in Chinese)
- [6] 孙诚达,柳长鼎. 风送喷雾雾滴冠层穿透模型构建及应用[J]. 农业工程学报,2019,35(15): 25-32.
SUN Chengda, LIU Changding. Construction and application of droplet canopy penetration model for air-assisted spraying pattern[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 25-32. (in Chinese)
- [7] NUYTTENS D, SCHAMPHELEIRE M D, BAETENS K, et al. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: results of a 5 year study[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 403-408.
- [8] 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)
- [9] 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 multi-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105-113. (in Chinese)
- [10] 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2015,46(3): 59-72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. (in Chinese)
- [11] 贾卫东,胡化超,陈龙,等. 风幕式静电喷杆喷雾喷头雾化与雾滴沉积性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(7): 53-59.
JIA Weidong, HU Huachao, CHEN Long, et al. Performance experiment on spray atomization and droplets deposition of wind-curtain electrostatic boom spray[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 53-59. (in Chinese)
- [12] 燕明德,贾卫东,毛罕平,等. 风幕式喷杆喷雾雾滴粒径与速度分布试验[J]. 农业机械学报,2014,45(11): 104-110.
YAN Mingde, JIA Weidong, MAO Hanping, et al. Experimental investigation of droplet diameter and velocity distributions in air-assist boom sprays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 104-110. (in Chinese)
- [13] TSAY J, FOX R D, OZKAN H E, et al. Evaluation of a pneumatic-shield spraying system by CFD simulation[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 47-54.
- [14] 张京,何雄奎,宋坚利,等. 挡板导流式罩盖喷雾机结构优化与性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(10): 101-104.
ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Structure optimization and performance research of guided baffle shield sprayer

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 101–104. (in Chinese)
- [15] 张京, 宋坚利, 何雄奎, 等. “II”型循环喷雾机防飘性能试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 37–39, 125.
ZHANG Jing, SONG Jianli, HE Xiongkui, et al. Anti-drift performance experiment of II-type recycling tunnel sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 37–39, 125. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 周良富, 张玲, 薛新宇, 等. 双风送静电喷雾中雾滴在果园空间沉积分布试验[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 242–246.
- [19] BAETENS K, NUYTTENS D, VERBOVEN P, et al. Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 161–173.
- [20] 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)
- [21] 李建平, 边永亮, 霍鹏, 等. 喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 79–88.
LI Jianping, BIAN Yongliang, HUO Peng, et al. Design and experimental optimization of spray device for air-fed annular nozzle of sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 79–88. (in Chinese)
- [22] 曲峰, 盛希宇, 李熙, 等. 3WZF-400A型果园风送喷雾机改进设计[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 15–21.
QU Feng, SHENG Xiyu, LI Xi, et al. Improved design of 3WZF-400A orchard air-assisted sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 15–21. (in Chinese)
- [23] 陈建泽, 宋淑然, 孙道宗, 等. 远射程风送式喷雾机气流场分布及喷雾特性试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 72–79.
CHEN Jianze, SONG Shuran, SUN Daozong, et al. Test on airflow field and spray characteristics for long-range air-blast sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 72–79. (in Chinese)
- [24] DIETER F, JAN G P, DAVID N. 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(13): 77–87.
- [25] 李丙智. 中国苹果矮砧栽培现状与栽培技术要求[J]. 落叶果树, 2020, 52(6): 1–3.
LI Bingzhi. Present situation and technical requirements of apple dwarf stock cultivation in China[J]. Deciduous Fruits, 2020, 52(6): 1–3. (in Chinese)
- [26] 戴奋奋. 风送喷雾机风量的选择与计算[J]. 植物保护, 2008(6): 124–127.
DAI Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers[J]. Plant Protection, 2008(6): 124–127. (in Chinese)
- [27] NY/T 2849—2015 风送式喷雾机施药技术规范[S]. 北京: 农业部农业机械化管理司, 2015.
- [28] 张晓辉, 姜宗月, 范国强, 等. 履带自走式果园定向风送喷雾机[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 117–122, 247.
ZHANG Xiaohui, JIANG Zongyue, FAN Guoqiang, et al. Self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 117–122, 247. (in Chinese)
- [29] 李雪, 陆岱鹏, 王士林, 等. 固定管道式常温烟雾系统雾滴沉积仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 261–267, 315.
LI Xue, LU Daipeng, WANG Shilin, et al. Simulation and test on droplet distribution and deposition of fixed-pipe cold fogging system in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 261–267, 315. (in Chinese)
- [30] 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)