

鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机设计与试验

邱威¹, 张凯伦¹, 吕强², 黄玺蓉¹, 邓羽佳¹, 周良富³, 施语¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 西南大学柑桔研究所, 重庆 400712; 3. 南京工业职业技术大学, 南京 210023)

摘要: 苗圃种植呈现“密植、连片”的特点, 传统风送式喷雾机难以兼顾“气流射程远、雾滴沉积均匀”的双重要求, 导致药液附着率低、雾滴飘移等问题。针对上述问题, 该研究基于CFD仿真与自由淹没射流理论设计“鹅颈式三出口”分流结构并通过计算获得其关键参数, 研制出鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机, 并开展了气雾流场的分布规律试验与田间试验。试验结果表明, 风机转速大于等于2 200 r/min时, 3个出口风速满足射程为20.0 m的喷施要求, 轴向上气流能量衰减速度缓慢且均匀; 风机转速为2 400 r/min, 喷雾机行驶速度为1.0 m/s时, 雾滴沉积量随喷施距离增大呈现少-多-少的趋势, 雾滴沉积量较为均匀, 变异系数为28.87%; 田间试验冠层上部叶片正反面雾滴沉积覆盖率分别为51.93%、24.38%, 下部分别为42.99%、19.26%; 冠层上部叶片正反面平均雾滴沉积量分别为13.34和2.82 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$, 下部分别为5.44和2.63 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$, 满足植保喷雾作业需求。研究结果可为苗圃风送式远射程施药装备研发提供新思路。

关键词: 农药; 喷雾; 苗圃; 风送式; 鹅颈式出风; 远射程

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404124

中图分类号: S491

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0035-08

邱威, 张凯伦, 吕强, 等. 鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 35-42. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404124 <http://www.tcsae.org>

QIU Wei, ZHANG Kailun, LYU Qiang, et al. Design and test of goose-neck long-range air-assisted sprayer for nursery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 35-42. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404124 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农药喷施是病虫害防治必不可少的环节, 频繁的农药喷施可以有效抑制病虫害的发生, 但也带来了环境污染、农药残留等一系列问题^[1]。风送式施药技术借助高速气流将药液雾化成微细液滴, 显著提高了雾滴在冠层内部的穿透性与沉积效果, 因而被广泛应用^[2]。

为了适应不同作物的种植模式, 研究人员通过改变喷雾机的气流类型研制出各种类型的风送式喷雾机, 如塔式风送喷雾机^[3]、多通道风送喷雾机^[4]、环流式风送喷雾机^[5]、喷杆喷雾机^[6]等。万鹏龙等^[7]开展了丘陵山地荔枝园喷施作业试验, 证明了风送式喷雾减量增效的实际效果。丁在兴等^[8]设计了一种适用于林区苗圃的小型喷雾型喷药机, 通过测距传感器和控制器能实现自动喷药。张亮^[9]针对苗木生长的不同阶段提出了苗带对行喷雾、全面覆盖喷雾、垂挂喷杆喷雾3种喷雾方式, 并对适用的施药机械进行设计。崔瑾等^[10]通过调整果树苗圃喷雾机的喷头在喷杆上的分布间距以及喷头的离靶距离, 确保了药液能够精准地附着于苹果苗植株之上, 显著提升了施药的有效性。ZHU等^[11]设计了一种苗木对靶喷雾机, 将大喷口分成5个小喷口覆盖更宽的喷雾宽度, 提

高了对短密冠层的穿透力。GU等^[12]分析了喷雾风机转速、喷雾压力和喷雾距离对雾滴在垂直剖面分布的影响, 对喷雾机参数进行优化, 为风送式喷雾机在猕猴桃园的应用提供了参考。然而, 上述喷雾机喷幅宽均在5 m以内, 无法满足苗圃长垄密集的种植模式。

也有部分学者参考林木病虫害防治“机具不入林、风送侧喷”的方式, 研究大面积种植、枝叶密集场景下的农作物植保作业问题, 对远射程风送喷雾机风机转速^[13]、风筒结构^[14]、雾滴粒径分布^[15]等做了详细研究, 以期提高气雾流场分布均匀性。如, 陈建泽等^[16]以远射程风喷雾机为试验样机, 分别研究其风场的空间特性与喷雾特性, 发现射程10 m以后出现了垂直喷幅不对称现象; MIAO等^[17]为了解决玉米植保作业过程中, 远射程风送模式下近端区域雾滴沉积不够的问题, 增加专门用于近端喷雾的喷头, 一定程度提高了喷雾射程及其射程内雾滴沉积均匀性问题。但是, 该模式下雾滴主要沉积区域为0~12 m, 12 m以外的雾滴沉积变异系数较大, 尤其上下层之间雾滴沉积差异明显, 难以满足苗圃施药要求。

基于此, 本文结合苗圃特征与农药喷施的要求, 提出了一款喷施射程远且能均匀喷施的鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机, 以期解决苗圃施药雾滴沉积均匀性差和覆盖率低的难题, 进而推动苗圃植保作业的高效发展。

1 整机结构与工作原理

1.1 设计目标

目前果园苗圃多采用密集且连续种植模式, 苗箱长度一般15 m以上, 苗高为60~80 cm, 幼苗冠层枝叶多

收稿日期: 2024-04-18 修订日期: 2024-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805271); 江苏省农业自主创新基金项目(CX223103); 重庆市技术创新与应用发展专项项目(CSTC2019jscx-gksbX0095); 南京农业大学创新创业训练计划(SRT)(202310307069Z) 作者简介: 邱威, 教授, 研究方向为植保机械与施药技术。

Email: qiuwei@njau.edu.cn

分布在上层,且喷雾机可通过的空间比较狭窄。因此要求喷雾机射程远、雾滴穿透性能好,能够减少飘移,并且有高通过性以及稳定性。整机设计目标如下:①射程:机具射程 ≥ 20.0 m;②作业效果:射程内喷雾沉积覆盖率 $>33\%$,雾滴沉积均匀性变异系数 $<50\%$ [18];③高通过性:采用履带式底盘实现在小空间内 360° 旋转,确保在多种地形条件下平稳、高效地完成喷施作业。

1.2 整机结构

鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机主要由动力系统、履带底盘、风送系统、喷雾系统等组成。其中,动力系统主要由柴油发电机、电池组等组成;履带底盘主要由履带、行走电机与驱动器等组成;风送系统主要由离心风机、鹅颈三出风口分流装置、调风板、变频调节器等组成;喷雾系统主要由药箱、药泵、喷头等组成,整机结构如图1所示。

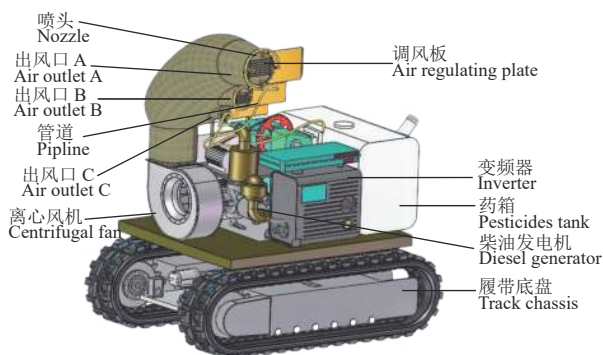


图1 鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机

Fig.1 Goose-neck long-range air-assisted sprayer for nursery

1.3 工作原理

鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机采用履带自走式遥控作业,通过遥控系统传递信号给驱动器控制履带轮的运动,可以实现低速(0.5 m/s)、中速(1.0 m/s)以及高速(1.5 m/s)3个挡位的调节,通过控制左右电机转速可以实现喷雾机原地 360° 旋转,从而可以在狭小空间内完成喷施作业。柴油发电机为风送系统以及喷雾系统供电,变频器调控风机转速从而控制风速及风量。离心风

机连接鹅颈式三出风口分流装置,将气流输送至3个出风口;药液经药箱、管路到分配阀,一部分经过管路、喷头喷出,其余回流到药箱起调压和搅拌作用。出风口送出的气流将药液雾化,并携带着药液均匀地喷洒到苗圃作物上,从而完成施药作业。整机技术参数如表1所示。

2 关键部件设计

2.1 鹅颈三出风口分流结构设计

气流在管道内部大角度转向时会有明显能量损耗,进而导致出口风速降低[19]。因此应尽量规避气流流动方向改变,确保风送系统内部气流的连续性和平滑性。为此,本文设计一种鹅颈式三出风口分流结构,如图2a。该结构包括A、B、C共3个出风口。出风口A采用圆弧形管,下端连接底座,上端为悬空的第一出风口,底座连接风机的风口,出风口B和出风口C为渐扩式圆弧形管,下端分别连接在出风口A、出风口B的下部的侧壁上,3个出风口相互贯通。

表1 鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of goose-neck long-range air-assisted sprayer for nursery

参数 Parameter	数值/型号 Value/Type
外形尺寸(长×宽×高) Overall dimensions (length×width×height)/mm	2 500×1 580×2 510
风机类型 Fan type	离心风机
最远射程 Longest range/m	25.0
液泵类型 Liquid pump type	柱塞泵
药箱容积 Pesticides tank volume/L	300
喷头型号 Nozzle model	QYJX
喷头个数 Number of nozzles	7
出风口 A Air outlet A	半径 Radius/m 0.2 喷射范围 Injection range/m 13.0~20.0 曲率半径 Radius of curvature/m 0.24
出风口 B Air outlet B	半径 Radius/m 0.125 喷射范围 Injection range/m 8.0~16.0 曲率半径 Radius of curvature/m 0.18
出风口 C Air outlet C	半径 Radius/m 0.075 喷射范围 Injection range/m 1.0~10.0 曲率半径 Radius of curvature/m 0.12

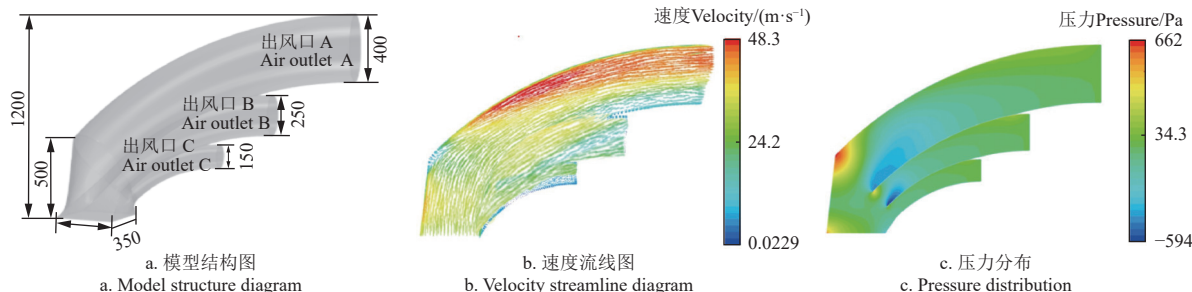


图2 模型结构及仿真结果

Fig.2 Model structure and simulation result

为了满足喷施远射程的要求,采用CFD仿真技术研究其气流分布状态及分流效果。参考前人工作[16]与预试验结果,设置分流结构进风口气流速度为30.00 m/s,流体为常温下的空气,采用标准壁面函数和稳态求解器进行求解。气流场速度及压力分布如图2b、图2c所示,

可知,分流结构出风口的中上部区域风速较高,相较于出风口A,出风口B和C的风速较低,且3个出风口的流量依次递减,出风口A为 $2.34 \text{ m}^3/\text{s}$,出风口B为 $0.82 \text{ m}^3/\text{s}$,出风口C为 $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ 。气流在出风口内部流速衰减均匀,分流结构拐角区域压力较大,可以进一步

通过增大曲率半径的方式减少气流局部阻力。综合来看, 鹅颈式三出风口分流结构有利于气流保持均匀且稳定的流动状态, 可以满足远射程喷雾作业的要求。

2.2 基于自由淹没射流运动的出风口参数确定

出口气流速度决定施药作业效果^[20]。从出风口射出的流体符合气体自由淹没射流理论, 如图 3 所示。根据气体自由淹没射流运动速度变化与射流截面上无因次速度分布^[21], 可得出风口气流平均速度为

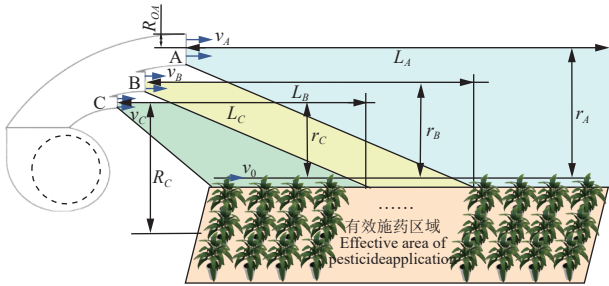
$$V_i = \frac{v_0}{\frac{0.966}{\alpha L_i / R_{oi} + 0.294} \times [1 - (r_i / R_i)^{1.5}]^2} \quad (1)$$

式中下标 i 表示出风口, $i=A, B, C$, V_i 为出风口平均气流速度, m/s; R_{oi} 为出风口半径, m; α 为试验系数。为了满足扰动冠层的需求^[22], 又因苗圃枝叶较脆弱, 无法承受较大的气流冲击, 取 $v_0=1.00$ m/s; $\alpha=0.066 \sim 0.080$ ^[22], 因为本设计出风口速度受扰动较大, 取 $\alpha=0.070$; $L_A=20.0$ m、 $L_B=13.0$ m、 $L_C=10.0$ m; $R_A=2.3$ m、 $R_B=1.8$ m、 $R_C=1.5$ m。将以上参数代入式 (1) 得到各出风口平均气流速度与出风口半径的关系为

$$V_A = 6.470 / R_{OA} + 1.359 \quad (2)$$

$$V_B = 2.744 / R_{OB} + 0.888 \quad (3)$$

$$V_C = 1.561 / R_{OC} + 0.656 \quad (4)$$



注: v_0 为到达冠层时的气流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_A 为出风口 A 平均气流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_B 为出风口 B 平均气流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_C 为出风口 C 平均气流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; L_A 为出风口 A 目标喷施距离, m; L_B 为出风口 B 目标喷施距离, m; L_C 为出风口 C 目标喷施距离, m; R_{OA} 为出风口 A 半径, m; R_C 为出风口 C 中心线到地面的距离, m; r_A 为出风口 A 中心高度到冠层上部的距离, m; r_B 为出风口 B 中心高度到冠层上部的距离, m; r_C 为出风口 C 中心高度到冠层上部的距离, m。

Note: v_0 is air velocity when reaching the canopy, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_A is average air velocity of outlet A, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_B is average air velocity at outlet B, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_C is average air velocity at outlet C, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; L_A is target spraying distance of air outlet A, m; L_B is target spraying distance of air outlet B, m; L_C is target spraying distance of air outlet C, m; R_{OA} is radius of air outlet A, m; R_C is distance between the center line of air outlet C and the ground, m; r_A is distance from the center height of air outlet A to the upper part of canopy, m; r_B is distance from the center height of air outlet B to the upper part of canopy, m; r_C is distance from the center height of air outlet C to the upper part of canopy, m.

图 3 自由淹没射流示意图

Fig.3 Schematic diagram of free submerged jet

采用较小的出口面积能够有效降低风送系统中的风量和风压损耗, 从而为气流的定向输送和精确调整创造有利条件, 提高气流的传输效率及气流利用率^[10]。根据分流结构内气流速度分布特征及整机结构综合考虑, 取 $R_{OA}=0.2$ m, $R_{OB}=0.125$ m, $R_{OC}=0.075$ m。 $V_A=33.71$ m/s, $V_B=22.84$ m/s, $V_C=21.47$ m/s。同时为减小风管局部损失

系数, 参考粗糙的匀滑圆管弯头局部损失系数表^[23], 当 $\gamma/d=6$ 时 (γ 为分流装置曲率半径, d 为出风口直径), 局部水头损失最小, 代入 3 个出风口数据计算得出风口的曲率半径分别为 $\gamma_A=2.4$ m, $\gamma_B=1.5$ m, $\gamma_C=0.9$ m。

2.3 风机参数确定

喷雾机风送系统常用的风机类型为离心式、轴流式、混流式和横流式。与其他类型相比, 离心式风机风压高、适用性强、运行平稳、适用于管道送风且坚固耐用, 在远射程喷雾机上有较大优势, 本文选用离心风机。根据农业机械设计手册, 风量、风压计算如下:

$$Q = 3\,600 \sum_i S_i V_i \quad (5)$$

$$P = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{\lambda}{2R} \cdot \frac{\rho v^2 L_f}{2} + \frac{\xi \rho v^2}{2} \quad (6)$$

式中 Q 为风量, m^3/h ; S_i 为出风口截面积, $i=A, B, C$, m^2 ; P 为风压, Pa; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为风管内风速, m/s; λ 为摩擦因素; R 为送风管半径, m; L_f 为风管长度, m; ξ 为局部阻力常数。

其中: $S_A=0.126$ m^2 , $S_B=0.049$ m^2 , $S_C=0.018$ m^2 , $\rho=1.205$ kg/m^3 , $v=40.00$ m/s, $\lambda=0.1$, $R=0.385$ m, $L_f=1.5$ m, $\xi=1.3$, 代入式 (5) ~ (6), 计算得到 $Q=20\,711.088$ m^3/h , $P=2\,405$ Pa。查阅风机的无因次特性曲线^[24], 确定离心风机驱动电机的功率为 15 kW。

2.4 喷雾系统

喷雾系统由药箱、药泵、调节阀、喷头以及管路等连接件组成。在柴油发动机驱动下, 药泵从药箱吸入药液, 并泵入管路中, 药液经管路由喷头细化成雾滴后喷出。为实现 20.0 m 范围内均匀喷施, 出风口 A 设置 4 个喷头且均匀布置于风口四周, 主要负责远距离喷施; 出风口 B 设置 2 个喷头且置于风口上方, 主要负责中距离喷施; 出风口 C 设置 1 个喷头且置于出风口正下方, 主要负责近距离喷施。喷雾系统组成如图 4 所示。

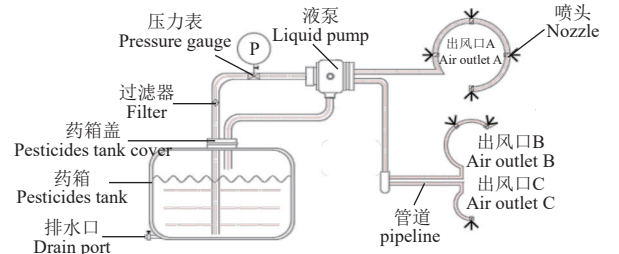


图 4 喷雾系统的组成

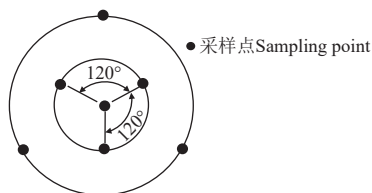
Fig.4 Composition of the spray system

3 性能试验

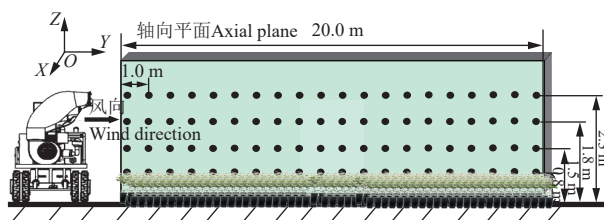
3.1 气流场分布测定

2023 年 1 月 14-20 日在南京市六合区祝玉三和家庭农场进行气流场分布试验, 自然风速小于 0.50 m/s, 环境温度为 3 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 36%。通过变频器调节风机转速改变出风口气流速度, 测量风机转速为 1 600、

1 800、2 000、2 200、2 400 r/min 时各出风口的平均风速, 测量点取在出风口圆周以及内圆 (其直径为出风口直径的一半), 每个圆周上取 3 个采样点, 出风口风速测量点如图 5a 所示; 利用 TSI 9565 风速仪 (TSI Inc., Minnesota, USA, 量程: 0.00~78.70 m/s, 精度: 读数 $\pm 2\%$, 分辨率: 0.01 m/s) 进行采样, 每隔 2 s 测量一次风速, 共测量 3 次, 取均值作为出风口的平均风速。



a. 出风口风速采样点分布
a. Distribution of sampling points of air outlet wind speed



b. 外流场气流速度采样点分布
b. Distribution of sampling points of airflow velocity in external flow field

图 5 采样点分布图

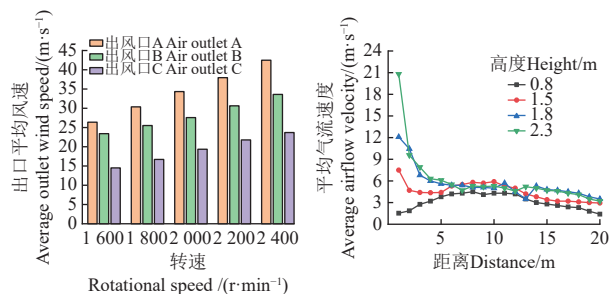
Fig.5 Sampling point distribution map

测量风机转速为 2 400 r/min 时喷雾机出风口轴线方向空间中的外流场气流速度分布情况, 设置 4 个采样层, 分别位于距离地面高度为 0.8、1.5、1.8、2.3 m 处。设 X 方向为机具行走方向, Y 方向为机具喷雾方向, Z 方向为竖直方向。用风速仪测量 YOZ 平面内 0.0~20.0 m 范围内的气流风速, 从距离喷雾机 1.0 m 处开始, 在 Y 方向上每隔 1.0 m 设置一个测试点, 测量 4 个高度上的风速, 每个采样点测量 3 次取平均值, 采样点分布如图 5b 所示。

不同转速下 3 个出风口气流平均速度测试结果如图 6a, 可知, 风机转速为 2 200 r/min 时, 出风口 A 平均风速为 37.95 m/s、出风口 B 平均风速为 30.63 m/s、出风口 C 平均风速为 21.77 m/s; 风机转速为 2 400 r/min 时, 出风口 A 平均风速为 42.48 m/s、出风口 B 平均风速为 33.60 m/s、出风口 C 平均风速为 23.70 m/s。当风机转速大于等于 2 200 r/min 时, 3 个出风口风速均满足 2.2 节基于自由淹没理论计算的 20.0 m 喷施条件。

图 6b 为轴向不同高度的风速变化, 在轴向不同高度上, 平均风速随采样点与喷头距离的增加而减小。表 2 为高度与距离对气流速度影响的方差分析结果, 表明二者对风速均有显著性影响 ($P < 0.05$)。距离出风口 0.0~6.0 m 处平均风速以较快速度衰减, 符合湍流动能衰减理论^[25]; 在 6.0~12.0 m 范围内风速趋于平稳, 且上下起伏不规则, 在 12.0~20.0 m 处风速呈现缓慢下降的趋势, 风速主要集中在 2.00~4.00 m/s 范围内。据此可以把远

射程风送式喷雾机鹅颈三出风口轴向风场分为快速衰减区 (0.0~6.0 m)、混合区 (6.0~12.0 m) 和平稳区 (12.0~20.0 m)。



a. 不同转速下 3 个出风口平均风速
a. Average wind speed of three tuyere under different speed
b. 轴向风速分布曲线
b. Distribution curve of axial wind speed

图 6 出风口风速与轴向平面风速分布

Fig.6 Distribution of wind speed at outlet and axial plane

表 2 气流速度方差分析结果

Table 2 Results of air velocity variance analysis

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean square	F	P
高度 Height	127.89	1.0	127.89	42.04	8.08×10^{-9}
距离 Distance	95.84	1.0	95.84	31.51	3.09×10^{-7}
高度×距离 Height×distance	47.05	1.0	47.05	15.47	1.83×10^{-4}

注: 显著性水平为 0.05。下同。Note: The significance level is 0.05. The same below.

气流均匀性对于雾滴沉积均匀性有很大影响, 采用变异系数 (CV) 来检测气流的均匀性, CV 值越接近 0 代表均匀性越好^[26]。喷雾机距离苗圃植株一般为 1.0~3.0 m, 选择 3.0~20.0 m 范围内气流平均速度计算其变异系数。表 3 为出风口轴向不同高度上风速的分布均匀性, 0.8 m 高度上平均风速为 2.33 m/s, 在 20.0 m 处风速为 1.74 m/s, 仍能起到扰动冠层的作用, 不同高度上的风速变异系数均小于 30%, 说明其能量衰减缓慢且均匀, 气流能以均匀的速度携带着雾滴向远处喷洒^[27]。

表 3 气流速度均匀性测试结果

Table 3 Airflow velocity uniformity test results

高度 Height/m	标准差 Standard deviation/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均风速 Average wind speed/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
2.3	1.03	4.22	24.41
1.8	1.09	4.30	25.35
1.5	1.17	4.25	27.53
0.8	0.69	2.33	29.61

3.2 雾滴沉积分布测定

雾滴沉积分布试验根据风场分布大致分为 3 个区域, 区域一为沿风送方向 0.0~6.0 m 的区域, 区域二为沿风送方向 6.0~12.0 m 的区域, 区域三为沿风送方向 12.0~20.0 m 的区域。沿 X 方向每 0.5 m、沿 Y 方向每 0.5 m 布置一个烧杯, 共五列, 雾场试验现场如图 7 所示。试验前, 将烧杯倒扣在地上, 在上面放置同等大小、质量的纸巾, 用砝码将纸巾固定在烧杯上方。鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机以 1.0 m/s 的速度匀速行驶进行喷雾, 风机转速 2 400 r/min, 喷雾结束后用精密电子计重秤

(五鑫衡器有限公司, 型号: ACS-6, 精度 0.01 g) 称得每个测试点的质量差, 得到该点的雾滴沉积量。

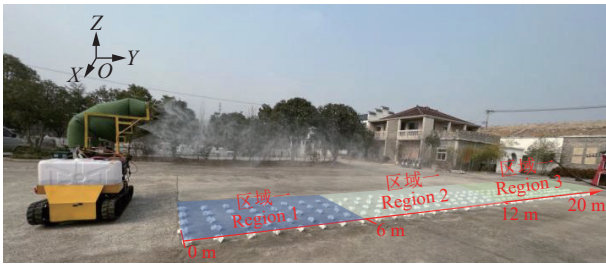


图 7 雾滴沉积试验

Fig.7 Droplet deposition test

试验结果如图 8 所示, 可知, 采样点平均雾滴沉积量为 3.31 g, 标准偏差为 0.995, 整体喷雾量较为均匀; 区域一和区域三的雾滴沉积量相对较少, 平均沉积量分别为 2.90 和 2.78 g, 而区域二作为 3 个出风口喷雾的重合区域, 沉积量较大, 平均沉积量为 4.42 g。在区域一内, 由于出风口处风速较大, 雾滴被携带着往前喷, 出口处雾滴沉积量由少逐渐增多。在区域三内, 由于喷施距离过长, 存在着雾滴蒸发因素, 沉积量呈现逐渐减少的情况。采用变异系数表示雾滴分布均匀性程度^[28], 计算 20.0 m 范围内的平均雾滴沉积量变异系数为 28.87%, 满足《NY/T 650-2013 喷雾机(器)作业质量》行业标准机动喷雾机在常规量喷雾方式下沉积量变异系数小于 50% 的要求。

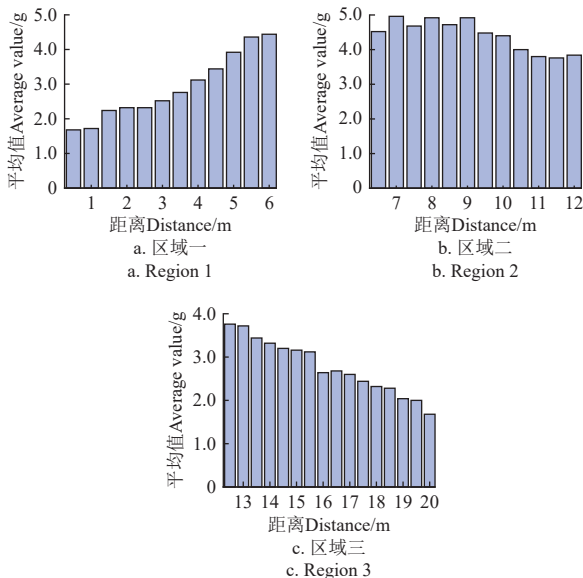


图 8 雾滴沉积量随喷施距离的变化柱状图

Fig.8 The change of droplet deposition from spraying distance histogram

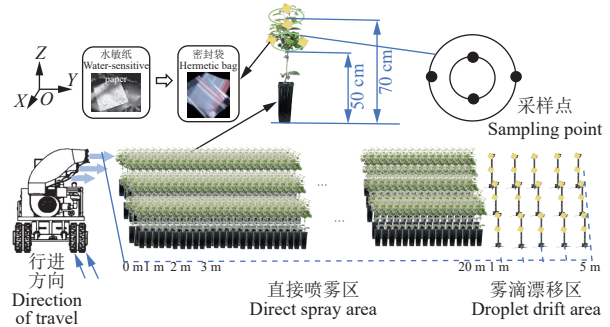
3.3 田间试验

为验证喷雾机的田间实际作业性能, 以平均苗高 80 cm 的柑橘幼苗为试验对象, 于 2024 年 3 月 4-9 日在重庆西南大学柑橘研究所苗圃内进行试验, 环境温度为 20 ℃, 相对湿度为 41%, 自然风速为 0.20 m/s, 试验现场如图 9a 所示。依据 GB/T17997-2008《农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定》^[29] 对远射程风送式

喷雾机进行试验, 测定不同距离雾滴沉积效果及飘移率。



a. 机器施药正视图
a. Front view of pesticide application using machine
b. 机器施药侧视图
b. Side view of pesticide application using machine



c. 采样点布置示意图

c. Schematic diagram of sampling point layout

图 9 田间试验

Fig.9 Field test

试验将雾滴采集范围划分为 0.0~20.0 m 的直接喷雾作业区和 20.0~25.0 m 的雾滴飘移区。每隔 1.0 m 设置采样植株, 在植株距离地面 50 和 70 cm 高处分层布样, 每一层以同心圆的方式进行布点, 每层取 2 个采样点, 在采样点处的叶片正反面用回形针固定水敏纸, 每棵植株布置 8 张水敏纸, 采样点布置如图 9b 所示。将风机转速固定至 2 400 r/min, 机具行驶速度为 1.0 m/s, 进行雾滴沉积试验, 试验重复 3 次。喷雾结束后将水敏纸晒干用塑封袋收集, 随后用扫描仪 (Epson Perfection V39, Indonesia) 按照规定设置相应参数逐一扫描。扫描后的图像通过图像处理软件 DepositScan(美国农业部)^[30] 进行分析, 得出雾滴沉积覆盖率、雾滴密度等数据。

利用 Microsoft Excel 和 Origin 软件对试验数据进行分析, 如图 10 所示。可知, 风机转速为 2 400 r/min, 行驶速度为 1.0 m/s 时, 冠层上部雾滴沉积覆盖率分布均匀, 叶片正反面分别为 51.93% 和 24.38%, 平均雾滴沉积量分别为 13.34 和 2.82 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; 冠层下部叶片正反面平均覆盖率为 42.99% 和 19.26%, 平均雾滴沉积量分别为 5.44 和 2.63 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。

应用 SPSS 对冠层位置、距离因素对覆盖率的影响进行方差分析, 如表 4 所示。可见, 距离对覆盖率的影响较为显著 ($P=3.34\text{e}^{-03}$), 随着喷施距离的增加, 受空气阻力的影响, 大部分雾滴速度减慢难以到达远端区域, 同时雾滴蒸发也导致远端区域覆盖率下降。冠层上下部的覆盖率也表现出较大差异 ($P=3.09\text{e}^{-03}$), 由于冠层下部位置较低或被上部叶片遮挡, 沉积到叶片上的雾滴量相对较少。总体呈现冠层上部雾滴沉积覆盖率大于冠层下部、叶片正面雾滴沉积覆盖率大于叶片背面的情况。冠层上部、下部叶片正面雾滴沉积覆盖率变异系数分别为 20.63% 和 20.78%, 喷雾均匀。在 20.0 m 处叶片正面

平均雾滴沉积覆盖率为 35.78%，满足病虫害防治要求。

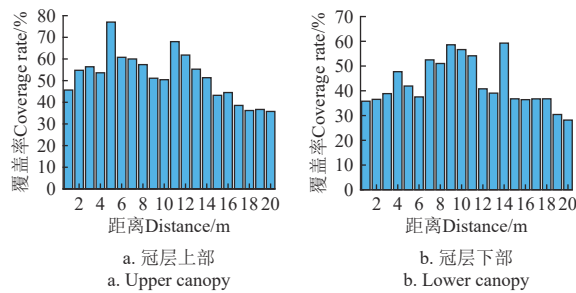


图 10 不同采样位置单位面积雾滴覆盖率
Fig.10 Droplet coverage per unit area at different sampling locations

表 4 单位面积覆盖率方差分析

Table 4 Variance analysis of coverage per unit area

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean Square	F	P
冠层位置 Canopy location	836.03	1.0	836.03	10.06	3.09e ⁻⁰³
距离 Distance	820.87	1.0	820.87	9.89	3.34e ⁻⁰³
冠层位置×距离 Canopy location×distance	177.75	1.0	177.75	2.14	1.52e ⁻⁰¹

雾滴飘移区测试结果如表 5 所示，可知，喷雾飘移区内的沉积量显著小于直接喷雾区。在喷雾飘移区，随着喷雾距离的增加，雾滴的整体飘移量及飘移率呈现下降趋势，在距离分界线 1.0 m 处，平均雾滴沉积量最大，为 0.067 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ ，平均雾滴沉积量为 0.043 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ 。

表 5 距分界线不同距离的雾滴飘移量

Table 5 Droplet drift of different distance from dividing line

							($\mu\text{l}\cdot\text{cm}^{-2}$)
前进距离	距分界线距离	Distance from dividing line/m				均值	合计
Forward distance/m	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	Average	Total
1.0	0.067	0.059	0.062	0.060	0.081	0.064	0.382
2.0	0.037	0.035	0.046	0.034	0.041	0.038	0.227
3.0	0.014	0.019	0.037	0.039	0.030	0.027	0.159

在苗圃育苗的过程中，喷药治虫必不可少，但是目前国内苗圃喷药机具中手动机械占比很大。近年来，部分学者针对苗圃种植特点开发了专用的喷雾机具，如李家操^[31]研制了一种跨行宽幅喷杆喷雾机，并开展了试验示范。与其相比，本文远射程风送喷雾机喷雾变异系数略高；但具有作业效率高、园艺通过性好等特点。

4 结 论

1) 本文根据低矮密集型苗圃施药作业远射程与均匀性好的双重要求，设计了一种鹅颈式远射程苗圃风送喷雾机。通过数值模拟得到鹅颈式三出口分流结构流场特征，并通过自由淹没理论确定了 3 个出口处的气流均速以及风机风量等参数。

2) 开展了喷雾机出口风场分布和雾滴沉积分布试验，试验结果表明，远射程风送式喷雾机三出口气流的时均风速与风机转速成线性关系，当风机转速大于等于 2 200 r/min 时，3 个出口风速均满足射程 20.0 m 的

喷施条件；风速在距出口 6.0 m 内有较大衰减，随后，等速面逐渐扩大形成扩散衰减，能量衰减速度缓慢且均匀，气流衰减主要集中在距出口 0.0~6.0 m 区域，20.0 m 处气流速度为 1.74 m/s；20.0 m 射程范围内，雾滴沉积量变异系数为 28.87%。

3) 经田间试验测试，喷雾机具有良好的射程性能以及雾滴沉积均匀性，满足苗圃复杂种植环境所需的农艺要求及风送式喷雾机行业标准。当风机转速为 2 400 r/min，行驶速度为 1.0 m/s 时，冠层上部叶片正反面雾滴覆盖率分别为 51.93% 和 24.38%，下部分别为 42.99% 和 19.26%；冠层上部叶片正反面平均雾滴沉积量分别为 13.34 和 2.82 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ ，下部分别为 5.44 和 2.63 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ ；随着喷施距离增加，飘移量逐渐减少，在喷雾飘移区 1.0 m 处，平均雾滴沉积量最大，为 0.067 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ 。

[参 考 文 献]

[1] 袁治理,叶文武,侯毅平,等.我国绿色农药研究现状及发展建议[J].中国科学:生命科学,2023,53(11):1643-1662.
YUAN Zhili, YE Wenwu, HOU Yiping, et al. Current situation and the development of green pesticides in China[J]. SCIENTIA SINICA Vitae, 2023,53(11): 1643-1662. (in Chinese with English abstract)

[2] 徐陶,吕晓兰,祁雁楠,等.我国果园风送式喷雾装备与技术研究进展[J].中国农机化学报,2023,44(7):69-77.
XU Tao, LV Xiaolan, QI Yannan, et al. Research status on equipment and technology of orchard air-assisted sprayer in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 69-77. (in Chinese with English abstract)

[3] 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,2021.19(01):7-10.
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. 19(01): 7-10.(in Chinese with English abstract)

[4] 邱威,缪佳佳,李小龙,等.果园多通道定向风送雾化装置设计与试验[J].南京农业大学学报,2020,43(03):547-555.
QIU Wei, MIAO Jiajia, LI Xiaolong, et al. Design and experiment of multi-channel directional atomizer for orchard sprayer[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(03): 547-555. (in Chinese with English abstract)

[5] 邱威,孙浩,孙玉慧,等.低矮果园环流式循环风送喷雾机设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(6):18-25.
QIU Wei, SUN Hao, SUN Yuhui, et al. Design and test of circulating air-assisted sprayer for dwarfed orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(6): 18-25. (in Chinese with English abstract)

[6] 邓文平,王斌斌,何林,等.一种智能遥控变轨式喷杆喷雾机的设计[J].南方农机,2024,55(3):6-9.

[7] 万鹏龙,彭刚,李建国,等.荔枝果园风送式喷雾机喷雾的思考[J].热带农业工程,2023,47(4):118-121.
WAN Penglong, PENG Gang, LI Jianguo, et al. Thoughts on spraying medicines by air sprayer in Litchi orchards[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2023, 47(4): 118-121. (in

- Chinese with English abstract)
- [8] 丁在兴, 闫家政, 胡哲铭, 等. 小型自动喷雾型林区苗圃喷药机的设计[J]. *现代农业科技*, 2020,51(19): 165-166. DING Zaixing, YAN Jiazheng, HU Zheming, et al. Design of small automatic spray type spraying machine for nursery in forest area[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020,51(19): 165-166. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张亮. 果树苗木施药技术与装备研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2017:14-36. ZHANG Liang. Study on Pesticide Application Technology and Equipment for Fruit Tree Seedlings [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2017:14-36. (in Chinese with English abstract)
- [10] 崔瑾, 杨欣, 刘俊峰, 等. 喷杆式果树苗圃打药机喷头间距设置与研究[J]. *农机化研究*, 2014, 36(5): 184-187. CUI Jin, YANG Xin, LIU Junfeng, et al. Setting and study on nozzle spacing of spray rod type of orchard and nursery spraying machine.[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(5): 184-187. (in Chinese with English abstract)
- [11] ZHU H, BRAZEE R D, DERKSEN R C, et al. A specially designed air-assisted sprayer to improve spray penetration and air jet velocity distribution inside dense nursery crops[J]. *Transactions of the ASAE*, 2006, 49(5): 1285-1294.
- [12] GU C, LIU Z, PAN G, et al. Optimization of working parameters for 3MGY-200 axial air-assisted sprayer in kiwifruit orchards[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(2): 81-91.
- [13] 宋淑然, 洪添胜, 孙道宗, 等. 风机电源频率对风送式喷雾机喷雾沉积的影响[J]. *农业工程学报*, 2011,27(01): 153-159. SONG Shuran, HONG Tiansheng, SUN Daozong, et al. Influence of fan power supply frequency on spray deposition of air-borne sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE)*, 2011,27(01): 153-159. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘秀娟, 郑加强, 周宏平. 喷筒结构对风送式喷雾机射流动力的影响[J]. *中国农机化*, 2012,56(02): 106-109. LIU Xiujuan, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping. Jet dynamics and spraying nozzle structure of air-assisted sprayer[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012,56(02): 106-109. (in Chinese with English abstract)
- [15] 宋淑然, 陈建泽, 洪添胜, 等. 远射程风送式喷雾机风场中雾滴粒径变化规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 59-66. SONG Shuran, CHEN Jianze, HONG Tiansheng, et al. Variation of droplet diameter in wind field for long-range air-assisted sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(6): 59-66. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(24): 72-79. (in Chinese with English abstract)
- [17] MIAO Youyi, CHEN Xiao, GONG Yan, et al. Design and test of powerful air-assisted sprayer for high stalk crops [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023,27(1): 141266791-1266791.
- [18] 中华人民共和国农业部. 喷雾机(器)作业质量:NY/T 650—2013 [S]. 北京:中国农业出版社, 2024:4-5.
- [19] 邱威, 丁为民, 傅锡敏, 等. 果园喷雾机圆环双流道风机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 13-17. QIU Wei, DING Weimin, FU Ximin, et al. Design and experiment of ring double-channel fan for spraying machine in orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(12): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李绍波, 张阔, 王佳, 等. 基于 CFD 的风送喷雾装置风筒参数优化[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(12): 93-102. LI Shaobo, ZHANG Kuo, WANG Jia, et al. Optimization of air duct parameters of air supply spray service based on CFD[J]. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 2023, 25(12): 93-102. (in Chinese with English abstract)
- [21] 邱威, 何家敏, 孙玉慧, 等. 多通道农药喷施角度对果树靶标仿形气、雾流场的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43(2): 379-386. QIU Wei, HE Jiamin, SUN Yuhui, et al. Effect of spray angles on profiling-flow field distribution from a multi-channel air-assistant sprayer in fruit tree application[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43(2): 379-386. (in Chinese with English abstract)
- [22] 戴奋奋. 风送喷雾机风量的选择与计算[J]. *植物保护*, 2008,46(6): 124-127. DAI Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers[J]. *Plant protection*, 2008,46(6): 124-127. (in Chinese with English abstract)
- [23] 沈方荣, 何正为, 侯英岢, 等. 局部损失系数数值仿真研究[J]. *南方农机*, 2022, 53(5): 111-113.
- [24] 孙玉波, 刘剑飞, 宋杰. 特性曲线在风机设计中的应用[J]. *河南科技*, 2021, 40(26): 41-43. SUN Yubo, LIU Jianfei, SONG Jie. Application of characteristic curve in fan design[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(26): 41-43. (in Chinese with English abstract)
- [25] SPALART P R, RUMSEY C L. Effective inflow conditions for turbulence models in aerodynamic calculations[J]. *AIAA journal*, 2007, 45(10): 2544-2553.
- [26] 尹润蓉, 党革荣, 翟梦群, 等. 风送式机动实时混药喷雾机的设计与试验[J]. *农机化研究*, 2020, 42(7): 111-118. YIN Runrong, DANG Gerong, ZHAI Mengqun, et al. Design and experiment of pneumatic mobile real-time mixing spray machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(7): 111-118. (in Chinese with English abstract)
- [27] 荀露. 果园多风筒风送喷雾系统关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019:12-14. XUN Lu. Research on Key Technology of Air-assisted Spraying System with Multi Air Ducts[D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2019:12-14. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李艳大, 叶春, 曹中盛, 等. 无人机与人工喷施雾滴在水稻冠层内沉积特征及效益比较[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(5): 513-518. LI Yanda, YE Chun, CAO Zhongsheng, et al. Comparison of

- droplet deposition characteristics in rice canopy and benefit between unmanned aerial vehicle spray and artificial spray[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021, 35(5): 513-518. (in Chinese with English abstract)
- [29] 中国国家标准化管理委员会, 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定:GB/T 17997—2008, [S].北京市: 国家质量监督检验检疫总局.2024:4-5.
- [30] 王潇楠, 王思威, 雷春媚, 等. 植保无人机喷施氯虫苯甲酰胺在玉米冠层中沉积分布及对草地贪夜蛾的防治效果[J]. 应用昆虫学报, 2023,60(4): 1244-1253.
- WANG Xiaonan, WANG Siwei, LEI Chunmei, et al. The effect of flight parameters and nozzle type on the efficacy of spraying chlorantraniliprole from an unmanned aerial vehicle to control *Spodoptera frugiperda*[J]. Journal of Applied Entomology, 2023,60(4): 1244-1253. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李家操. 柑橘冠层体积测算与苗圃智能对靶喷施技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023: 39-42.
- LI Jiacao. Study on Citrus Canopy Volume Calculation and Intelligent Target Spraying Technology in Nursery [D]. Chongqing:Southwest University, 2023:39-42.(in Chinese with English abstract)

Design and test of goose-neck long-range air-assisted sprayer for nursery

QIU Wei¹, ZHANG Kailun¹, LYU Qiang², HUANG Xirong¹, DENG Yujia¹, ZHOU Liangfu³, SHI Yu¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. Citrus Research Institute, Southwest University, Chongqing 400712, China; 3. Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract: Plant nursery presents the characteristics of close planting. It is difficult for the traditional air-assisted sprayer to take into account the dual requirements of "long spray range and uniform droplet deposition", which leads to the problems of low deposition and drift. A goose-neck long-range air-assisted sprayer for nursery was designed based on CFD simulation and free submerged jet theory. The three-outlet flow guide device, as the core component of the sprayer, has outlets A, B, and C. Air outlet A adopts a circular arc shape, while air outlet B and air outlet C are gradually expanding circular arc tubes. The three air outlets are interconnected and correspond to different areas, which can meet the requirements of far-range spray operation. The optimized curvature radius parameters are conducive to maintaining a uniform and stable flow state of airflow. Based on the free submergence jet theory, the air outlet and fan parameters were determined, and airflow field distribution measurement experiments were conducted. When the fan speed is no less than 2 200 r/min, the airflow speed can fit the spraying requirement as far as 20 m. The average airflow speed was 2.33 m/s at a height of 0.8 m; the airflow speed was 1.74 m/s at 20.0 m. The variation coefficient of airflow speed at different heights was less than 30%, indicating that the energy attenuation rate was slow and uniform, and the airflow could carry droplets to spray far away at a uniform speed. The droplet deposition test shows that the variation coefficient of the droplet deposition amount of the goose-neck long-range nursery air spray is 28.87%. To ensure the reliability of our findings, a comprehensive field test of the sprayer was conducted. Citrus seedlings, with an average height of 80 cm, were chosen as the test subjects, and the test was carried out in the nursery of the Citrus Research Institute of Chongqing Southwest University. Following the guidelines of GB/T17997-2008, the droplet deposition effect and drift rate at various distances were tested. The experimental results show that the fan speed of the sprayer is 2 400 r/min and the driving speed is 1 m/s; the droplet deposition tends to be less-more-less with the increase of distance. The droplet coverage rates of the upper and lower leaves of the canopy were 51.93% and 24.38%, respectively, and 42.99% and 19.26%, respectively. The average droplet deposition on the front and back leaves of the upper canopy was 13.34 and 2.82 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$, respectively, and that on the lower canopy was 5.44 and 2.63 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$, respectively, which met the requirements of plant protection spraying operation. It can be seen that the sprayer shows good spray range performance and droplet deposition uniformity, which can meet the agronomic requirements of the complex planting environment in the nursery and the industrial standards of the air-assisted sprayer. At present, in Chinese nurseries such as citrus, pear, and apple, etc, manual machinery accounts for a large proportion of spraying equipment, and the demand for specialized sprayers is becoming increasingly urgent. Due to the close planting mode of the nursery, it can be considered that the two modes of spray with high clearance spraying and long-range airflow-assisted spraying have application prospects. Compared with high-clearance spraying, long-range airflow-assisted spraying has the characteristics of high operating efficiency and good horticultural trafficability and is more suitable for small and medium-sized nurseries. However, improving the delivery distance of aerosol flow while ensuring good uniformity of droplet deposition is still a challenge. The results of this study can provide a new idea for developing a long-range air-assisted sprayer for nurseries.

Keywords: pesticides; spray; nursery; air-assisted application; goose-neck air outlet; long range