

丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机设计与试验

李文伟¹ 江世界¹ 徐平凡¹ 马恒涛¹ 杨圣慧¹ 郑永军^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备与设施教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 针对丘陵果园传统大型施药装备入园难、施药劳动强度大、作业效率低及药液浪费严重等问题, 根据丘陵果园农艺特点和病虫害防治需求, 设计一种丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机, 可配合植保无人机作业, 提升果树冠层药液覆盖效果。喷雾机上集成靶标探测追踪系统与自主导航系统, 靶标跟随喷雾机构采用双喷头联动式设计, 喷雾角度与高度的调节范围根据雾滴运动规律进行确定, 实现了果园植保自主作业。果园试验结果表明, 对靶喷雾时果树冠层不同高度叶片正面的平均雾滴沉积个数变异系数为 34.22%, 同一高度不同采样点叶片正面的平均雾滴沉积个数变异系数为 34.56%, 相比于非对靶喷雾, 喷施用水量、地面流失量与冠后飘移流失量分别降低 26.70%、84.93% 和 53.50%, 在减少药液浪费的同时, 有效提高了果树冠层中下部叶片正面的雾滴分布均匀性。

关键词: 喷雾机; 丘陵果园; 精准施药; 靶标跟随; 植保无人机

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)09-0188-10 OSID: 

Design and Experiment of Self-propelled Small Target Following Sprayer for Hilly Orchard

LI Wenwei¹ JIANG Shijie¹ XU Pingfan¹ MA Hengtao¹ YANG Shenghui¹ ZHENG Yongjun^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Engineering Research Center of Agricultural Equipment and Facilities, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: Conventional large-scale ground sprayers may hardly be deployed in hilly orchards due to the restriction of geo-characteristics, so that manual spray has to be a general approach for plant protection, which results in high labour intensity, low operational efficiency and severe chemical waste. A small self-propelled target-following sprayer for hilly orchards was proposed, which can work together with plant protection UAV. Two coupled nozzles were adopted for the target-following spray mechanism, and the ranges of their spray angle and height were calculated based on the developed physical motion model of droplets. Meanwhile, the method of target detection and tracking and the method of autonomous navigation were integrated into the proposed sprayer to realise autonomous operation. The verification experiment was performed in the apple orchard of Fuyu Forest Fruit Company in Hebei Province, and the results showed that the average coefficient of variation of droplet number deposited on the frontal surfaces of the leaves at different heights of canopies was 34.22%, while that at different sampling points at the same height was 34.56%. Compared with non-target spraying, the target-following spraying could effectively improve the uniformity of droplet distribution on the frontal surfaces of leaves both at different heights and at different internal and external positions of canopies. Besides, water consumption, ground loss and post-canopy drift loss could be reduced by 26.70%, 84.93% and 53.50%, respectively, which indicated that the proposed method can be a technical reference for the development and improvement of hilly orchard sprayers.

Key words: sprayer; hilly orchard; precision pesticide application; target following; plant protection UAV

收稿日期: 2022-12-12 修回日期: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32171901)、烟台市校地融合发展项目(2021XDRHXMPT29)和国家重点研发计划项目(2018YFD0700603)

作者简介: 李文伟(1998—),男,博士生,主要从事果园精准植保技术与装备研究,E-mail: lw@cau.edu.cn

通信作者: 郑永军(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业智能技术与装备研究,E-mail: zyj@cau.edu.cn

0 引言

果园病虫害防治是果园管护的重要环节之一。我国果园主要分布在以两广地区、陕甘地区为代表的丘陵地带,约占果园总面积的65%^[1-2],受地形和种植模式制约,大型施药装备行间行走困难,病虫害防治仍以人工施药为主,劳动强度大、作业效率低、药液浪费严重,且作业人员农药中毒事故频发^[3]。

为改善雾滴沉积性能、提高果园施药效率、降低劳动强度,近年来国内外学者开展了果园喷雾机精准施药研究,主要涉及风送喷雾系统的改进及靶标探测技术的优化。王杰等^[4]根据Y型棚架式果树的需风特性,设计一款新式的风送喷雾机,并通过试验确定最优机具作业参数。邱威等^[5]为解决施药风场难以穿透果树冠层、内膛与叶片背面药液沉积难等问题,设计一种适应于低矮果园的环流循环风送喷雾机,冠层总体叶片背面雾滴平均覆盖率提高33.7%。茹煜等^[6]通过优化轴流风机风筒导叶特征及锥形多出口装置,有效解决了传统风送喷雾机风送距离短与药液浪费的问题。此外,国内学者还分别设计了果园多风机风送喷雾机^[7]、3WPZ-4型风送式葡萄喷雾机^[8]、多气流协同式喷雾装置^[9]等,一定程度上改善了喷雾机雾滴沉积效果,为果园喷雾机的设计提供了参考。上述研究从果园实际作业条件出发,通过改进风送喷雾系统,从而改善喷雾效果,但由于装备尺寸限制,喷雾机对复杂地形的适应性仍需要进一步提高。

靶标探测技术是精准施药技术的前提,其目的是实时探测果树冠层信息,为喷头的靶标跟随提供输入条件,目前靶标探测喷雾主要采用机器视觉法^[10-11]、红外传感法^[12-13]、超声波传感法^[14-15]及激光传感法^[16-17]等。廖启明^[18]为提高果园施药作业效率和着药量,采用图像边缘检测方法识别果树果实和树叶的位置信息,以此为反馈控制施药平台进行对靶喷雾作业。肖珂等^[19]利用红外测距传感器设计一种果园自动变距精准施药系统,可以根据果树特征实现喷雾距离与喷雾高度的调整。南玉龙等^[20]利用超声波传感器搭建了一套植物冠层密度检测系统,实测密度与模型测量密度的最小相对误差为3.959%,为喷雾机仿形喷雾提供了输入。相比于上述3种方法,激光传感器具有检测精度高、响应速度快、稳定性好的优点,因此被广泛用于探测果树冠层高度^[21]、体积^[22]及密度^[23]等特征。

针对传统植保无人机或地面装备施药存在果树受药不均匀、药液浪费严重,且大型地面施药装备入

园难等问题,本团队提出一种地空融合立体植保作业模式^[24],结合植保无人机与地面施药装备各自的优势,采用植保无人机对果树冠层上部进行施药,小型喷雾机对果树冠层中下部进行施药,提升果树全冠层的施药效果。基于地空融合立体植保作业模式与团队前期成果^[25-26],设计一种丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机,优化靶标跟随风送喷雾系统,集成靶标探测追踪系统与自主导航系统,实现喷雾机的自主作业,并进行果园试验,验证喷雾机的对靶喷雾性能。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

研究团队通过实地调研发现,丘陵地区果园一般呈阶梯状分布,果园片区之间存在一定的**高度差,部分片区之间的转场空间较小,同时获得树龄在4年以上苹果园的实际参数:果树行间距为3.0~5.0 m,株间距为2.5~3.0 m,株高为3.5~4.0 m,主干高为0.7~0.9 m,冠径为2.0~3.0 m。

根据丘陵山区果园农艺特点和病虫害防治需求,确定丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机主要由行走系统、靶标跟随风送喷雾系统、自主导航系统组成,整机结构如图1所示:选用转向半径小、通过能力强的电动履带底盘作为喷雾机移动底盘,同时为底盘供电系统配备千里增程器(GG170-1型),以提高喷雾机的续航性能;靶标跟随风送喷雾系统由轴流风机、风箱、三缸柱塞泵、药箱、双喷头联动对靶机构、立柱升降机构、靶标探测激光雷达(RPLIDAR-S1型,纵向安装,安装高度475 mm)、仰角姿态传感器(SINDT型)等组成,可根据激光雷达探测的靶标位置实时调整喷雾角度、切换单双侧喷雾模式;自主导航系统包括自主导航激光雷达

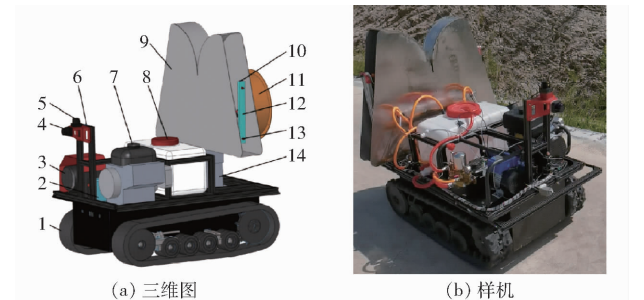


图1 丘陵果园自走式靶标跟随喷雾机

Fig.1 Self-propelled target following sprayer for hilly orchard

1. 电动履带底盘 2. 逆变器 3. 三缸柱塞泵 4. 靶标探测激光雷达 5. 自主导航激光雷达 6. 车身姿态传感器 7. 增程器 8. 药箱 9. 风箱 10. 仰角姿态传感器 11. 轴流风机 12. 双喷头联动对靶机构 13. 扇形喷头 14. 立柱升降机构

(RPLIDAR-S1 型, 横向安装, 安装高度 500 mm)、车身姿态传感器(SINDT 型)等, 可在遥控模式与自主导航模式之间切换。喷雾机具体工作参数见表 1。

表 1 丘陵果园自走式靶标跟随喷雾机主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of self-propelled target following sprayer for hilly orchard

参数	数值	备注
尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	1 575×1 190×1 465	高度可调
整机质量/kg	450	满载状态
最小转弯半径/m	0	
作业速度/(m·s ⁻¹)	0~1	
作业幅宽/m	≥3	
驱动电机额定功率/kW	1.5	
最大爬坡角度/(°)	35	
供电电压/V	48	铅蓄电池 组+增程器
续航时间/h	5	
药箱容量/L	45	
风机风量/(m ³ ·h ⁻¹)	14 900	
药泵流量/(L·min ⁻¹)	0~22	流量可调
药泵压力/MPa	0~4.0	压力可调

1.2 工作原理

为实现喷雾机果园自主作业, 将本团队提出的自主导航方法^[26]与靶标探测追踪方法^[27]进行系统集成。图 2 为喷雾机果园作业示意图与控制系统框图, 图 2a 中蓝色部分为激光雷达果园行间扫描范围, 黑色圆圈为支持向量, L1、L2 为支持向量机(Support vector machine, SVM)分类边际线, L3 为两条边际线中心线即喷雾机导航线, 黑色五角星为靶点位置, 红色部分为喷雾机喷雾范围。

果园喷雾作业过程中, 遥控控制喷雾机驶入果树行间, 切换为自主作业模式; 工控机通过串口接收来自靶点检测单元与车身姿态检测单元的传感器数据, 利用车身姿态传感器数据修正自主导航激光雷达获取的点云数据, 采用最小二乘法(Least squares method, LSM)对果园行间点云数据进行分析、拟合, 并通过支持向量机确定一条与两侧树行间隔最大化的最优分类线, 以此分类线作为喷雾机行间导航路径, 得到行间导航控制指令; 同时对靶标探测激光雷达数据进行处理, 分析果树冠层靶点位置信息, 分割、滤波得到目标靶点极径、极角等信息, 计算得到喷头目标仰角, 并判断两侧树行有无果树靶标, 得到靶标喷雾控制指令; 通过 CAN 总线将行间导航控制指令与靶标喷雾控制指令发送至 STM32 单片机; 单片机接收数据后, 根据行间导航控制指令, 输出 PWM 信号至底盘电机驱动器, 驱动底盘直流无刷电

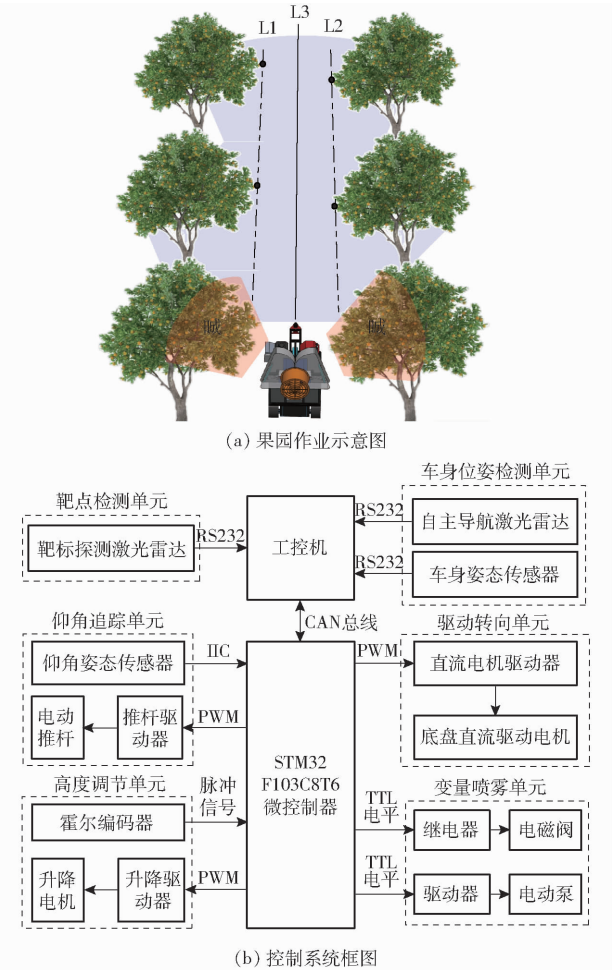


图 2 自走式小型靶标跟随喷雾机工作原理图
Fig. 2 Working principle diagram of self-propelled small target following sprayer

机工作, 实现喷雾机的行间自主导航; 同时根据靶标喷雾控制指令, 将 PWM 控制信号发送至电动推杆电机驱动器, 驱动电动推杆实时调整喷头仰角, 并利用 TTL 电平控制电磁阀开合与电动泵启停, 实现喷雾机自主导航状态下的靶标跟随施药。

2 靶标跟随风送喷雾系统设计

为实现喷雾机靶标跟随喷雾功能, 满足果树冠层中下部施药需求, 设计如图 3 所示的靶标跟随风送喷雾系统, 主要包括对靶喷雾机构与风送系统两部分。对靶喷雾机构采用双喷头联动式设计, 左右两侧各安装两个喷头, 整体尺寸较小, 结构稳定, 控制简单, 可通过电动推杆改变喷雾支杆与支撑横梁的夹角, 从而改变喷头喷雾角度, 同时可根据果树冠层高度, 利用立柱升降机构调节喷雾高度。喷头选用雾化性能与防飘移能力较好的扇形喷头, 以扩大喷雾范围、防止出现漏喷现象, 喷头喷雾角度为 65°, 等效喷孔直径 1.1 mm, 额定流量 0.68 L/min。风送系统主要由轴流风机、风箱、导流板组成, 为保证风机拥有足够的风量和风压, 依据风速的末速度

原则及风量的置换原则^[27],本风送系统选用稳固可靠、风量大的轴流风机,其具体参数见表 1,靶标跟随喷雾作业流程见图 4。

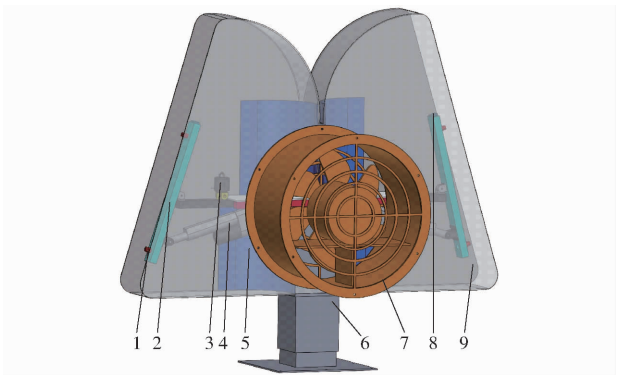


图 3 靶标跟随风送喷雾系统

Fig. 3 Target following air-assisted spray system

1. 扇形喷头 2. 喷雾支板 3. 电磁阀 4. 电动推杆 5. 导流板
6. 立柱升降机构 7. 轴流风机 8. 仰角姿态传感器 9. 风箱外壳

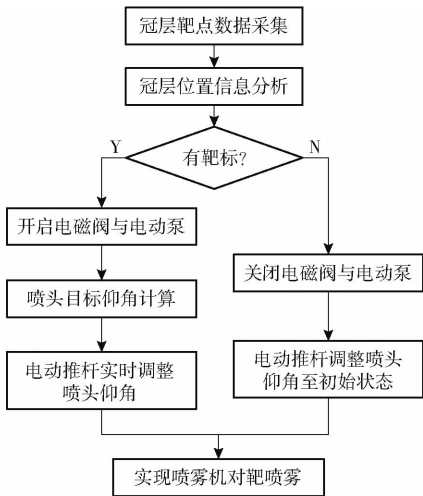


图 4 靶标跟随喷雾作业流程图

Fig. 4 Flow chart of target following spraying operation

图 5 为双喷头联动对靶机构示意图, α 为喷头喷雾角度, θ_1 为喷雾支杆与支撑横梁的夹角。初始状态下,喷雾支杆与支撑横梁垂直,即 $\theta_1 = 90^\circ$,此时喷头仰角 $\beta_1 = 90^\circ - \theta_1 = 0^\circ$,电动推杆完全收缩,长度为 L_1 ;当电动推杆伸长至长度为 L_2 时,推杆行程 $\Delta L = L_2 - L_1$,喷头仰角 $\beta_2 = 90^\circ - \theta_2$ 。本研究选择的电动推杆完全收缩时,长度 $L_1 = 205\text{ mm}$,最大行程为 100 mm ,考虑到电动推杆在受力状态下伸出至最大行程可能会卡死,故取 $L_2 \leq 300\text{ mm}$ 。在前期研究基础上^[26],结合余弦定理与刚体运动规律,可知喷雾仰角 β_2 与推杆行程 ΔL 满足

$$\beta_2 = \arccos \left(1.12 - \frac{(L_1 + \Delta L)^2}{2 \times 213.05 \times 130.38} \right) - 70.5^\circ \quad (1)$$

当推杆行程 ΔL 为 95 mm 时,喷雾仰角 β_2 最大,约为 49.5° 。

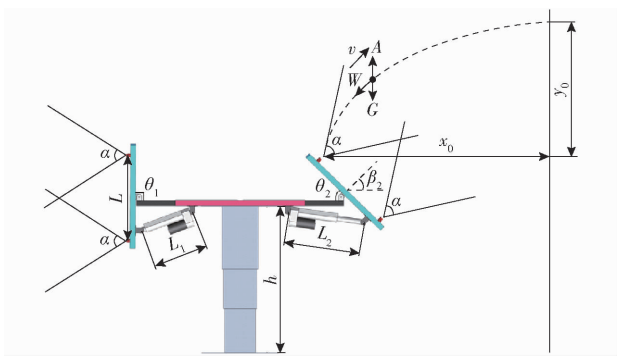


图 5 双喷头联动对靶机构

Fig. 5 Double nozzle linkage target mechanism

为保证在极限条件下,对靶机构喷雾范围能够覆盖果树冠层中下部,本研究在理想条件下分析雾滴的运动规律,假设雾滴在运动过程中不破碎、不变形、不蒸发,且不考虑外界风速的影响及轴流风机风场对雾滴运动的胁迫作用,雾滴只在药泵作用下获得初始速度 v_0 。当喷头在额定流量下工作时,雾滴喷出时的初始速度 v_0 满足

$$v_0 = \frac{200q}{3\pi D^2} \quad (2)$$

式中 q ——喷雾流量, L/min

D ——喷头等效孔径, mm

如图 5,假设当喷头仰角为 β_2 时,黑点所示雾滴的喷雾高度最高,此时雾滴主要受阻力 W 、重力 G 和浮力 A 的作用,受力情况满足

$$W = C_w \frac{\rho_g}{2} S v^2 \quad (3)$$

$$G = mg \quad (4)$$

$$A = \rho_g g \pi \frac{d_d^3}{6} \quad (5)$$

式中 C_w ——空气阻力系数

ρ_g ——空气密度, kg/m^3

d_d ——雾滴直径, m

S ——雾滴表面积, m^2

v ——雾滴速度, m/s

m ——雾滴质量, kg

g ——重力加速度, m/s^2

根据牛顿第二定律,雾滴在 x 方向与 y 方向的运动满足

$$-C_w \frac{\rho_g}{2} S v_x^2 = m \frac{dv_x}{dt} \quad (6)$$

$$-mg - C_w \frac{\rho_g}{2} S v_y^2 + \rho_g g \pi \frac{d_d^3}{6} = m \frac{dv_y}{dt} \quad (7)$$

式中 v_x ——雾滴速度 v 在 x 方向的分量, m/s

v_y ——雾滴速度 v 在 y 方向的分量, m/s

以雾滴喷出时的状态为初始条件,此时 $t = 0$,雾滴运动满足初始条件

$$v_{x0} = v_0 \cos(\alpha/2 + \beta_2) \tag{8}$$

$$v_{y0} = v_0 \sin(\alpha/2 + \beta_2) \tag{9}$$

$$x' = y' = 0 \tag{10}$$

式中 v_{x0} ——雾滴初始速度 v_0 在 x 方向的分量, m/s
 v_{y0} ——雾滴初始速度 v_0 在 y 方向的分量, m/s
 x' 、 y' ——初始位移在 x 和 y 方向的分量, m

在上述初始条件的基础上,对公式(6)、(7)进行积分运算,得到雾滴在 x 方向与 y 方向的位移分别为

$$x = \frac{2m}{C_w \rho_g S} \ln \left(\frac{C_w \rho_g S v_0 \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta_2 \right) t + 2m}{2m} \right) \tag{11}$$

$$y = \frac{2m}{C_w \rho_g S} \ln \left(\left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{C_w \rho_g S k}}{2k} v_0 \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \beta_2 \right) \right) e^{\frac{\sqrt{C_w \rho_g S k}}{m}} + \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{C_w \rho_g S k}}{2k} v_0 \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \beta_2 \right) \right) - \frac{\sqrt{C_w \rho_g S k}}{C_w \rho_g S} t \tag{12}$$

其中 $k = \rho_g g \pi d_0^3 / 3 - 2mg$

假设雾滴运动到最高位置时水平位移为 x_0 , 距离喷头的高度为 y_0 , 此时雾滴相对于地面的高度 H 为

$$H = h_0 + h + \frac{L}{2} \cos(90^\circ - \beta_2) + y_0 \tag{13}$$

式中 h_0 ——喷雾机底盘高度, m
 h ——升降机构高度, m
 L ——喷头安装间距, m

结合丘陵果园农艺参数,当果树株高为 4 m, 主干高为 1 m, 行距为 4 m 时,果树冠层与喷头的距离 x_0 约为 1.0 m。为满足果树冠层中下部施药空间需求,雾滴运动到最高位置时距离地面的高度 H 应大于 3 m。综合上述公式,可以确定喷头安装间距 $L = 0.4$ m, 升降机构最大上升高度 $h = 0.55$ m, 行程为 0.3 m。

3 果园试验

3.1 试验方案

为了验证样机靶标跟随喷雾(简称对靶喷雾)性能,开展对比试验,采用果园自走式小型靶标跟随喷雾机对果树冠层中下部进行喷雾作业,分别测试对靶喷雾与非对靶喷雾两种作业模式下样机的喷雾效果。试验于 2022 年 9 月在河北省保定市阜平县阜裕林果基地苹果园开展(图 6),试验苹果树品种为“天红二号”,果树呈纺锤形,行距约为 4.0 m, 株距约 2.0 m, 株高约 3.5 m, 自然风速低于 0.5 m/s, 试验在环境相对干燥的时间段进行。



图 6 自走式小型靶标跟随喷雾机果园试验

Fig. 6 Self-propelled small target following sprayer experiment in orchard

单侧喷雾试验方案如图 7 所示,对果树冠层中下部的雾滴沉积分布特性、地面流失量及冠后飘移流失量进行测试。选取 3 棵具有代表性的非连续果树作为测试对象,在每棵果树冠层中下部,分上、中、下 3 层布置水敏试纸,用于测试果树冠层雾滴沉积分布特性。如图 7a 所示,布样高度分别为 1.8、1.2、0.6 m,每一层均分为外侧(A、B、C、D)、内侧(a、b、c、d)和主干(o)3 部分,共 9 个布点位置,每个布点位置放置正反 2 张水敏试纸,水敏试纸用回形针固定在叶片上。如图 7b,在果树冠层正下方地面等间隔布置 9 张水敏试纸(G1 ~ G9),果树冠层后下方地面布置 6 张水敏试纸(B1 ~ B6),分别用于测试地面流失量与冠后飘移流失量,水敏试纸通过燕尾夹固定在标志杆上。冠层内部采样点 A 靠近喷雾侧,喷雾机从方向 D 驶向方向 B,地面流失与冠后飘移采样点 G1 ~ G3 靠近喷雾侧,喷雾机从方向 G1 驶向方向 G3。喷雾机分别以对靶喷雾模式、非对靶喷雾模式进行喷雾试验,对靶喷雾模式下喷头仰角根据靶点信息实时调整,非对靶喷雾模式下喷头仰角固定

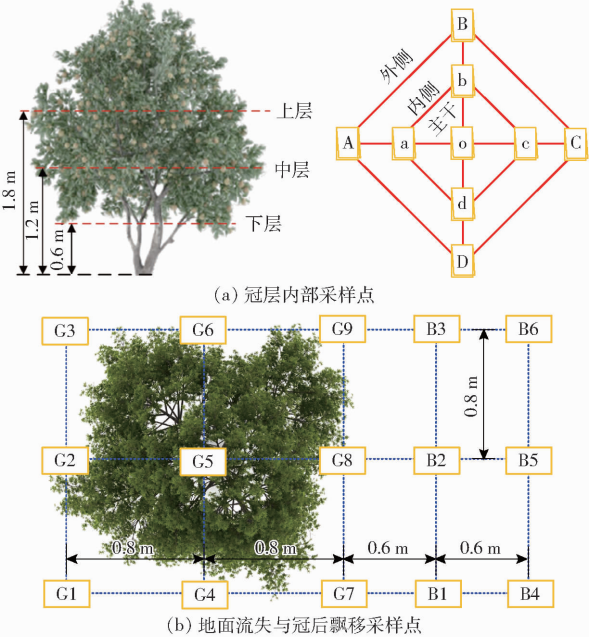


图 7 采样点布置示意图

Fig. 7 Sketch maps of sample arrange

为 15°。设置喷雾机行间行驶速度为 0.5 m/s,喷雾压力为 0.2 MPa,试验介质为清水。

单侧喷雾试验结束后,选取 1 棵果树开展双侧喷雾试验,对比分析喷雾机对靶喷雾与非对靶喷雾的双侧喷雾效果,进一步验证喷雾机的对靶喷雾性能。双侧喷雾试验中,需移除冠后飘移采样点(B1~B6),喷雾机对果树两侧进行喷雾作业,其他条件与单侧喷雾试验一致。

3.2 数据处理

采用 Deposit scan 雾滴扫描软件对水敏试纸进行扫描,获取各采样点单位面积雾滴沉积量($\mu\text{L}/\text{cm}^2$)与单位面积沉积个数($\text{个}/\text{cm}^2$),数据处理时,对单侧喷雾所选取的 3 棵果树相同采样点水敏纸数据取平均值,并通过沉积量、沉积个数及对应的变异系数描述喷雾机作业雾滴分布均匀性。

3.3 结果与讨论

3.3.1 冠层沉积分布特性分析

单位面积雾滴沉积个数能够直观反映果树叶片受药效果,因此利用叶片雾滴沉积个数对冠层雾滴沉积分布特性进行分析。分别对两种作业模式下果树冠层不同高度(0.6、1.2、1.8 m)叶片正反面采样点的雾滴沉积个数($\text{个}/\text{cm}^2$)取平均值,得到两种作业模式在果树冠层不同高度叶片正反面的喷雾效果,结果见图 8。对靶喷雾时,果树不同高度叶片正面的平均雾滴沉积个数为 46.20 $\text{个}/\text{cm}^2$,叶片背面的平均雾滴沉积个数为 27.86 $\text{个}/\text{cm}^2$;非对靶喷雾时,叶片正面的平均雾滴沉积个数为 54.02 $\text{个}/\text{cm}^2$,叶片背面的平均雾滴沉积个数为 30.91 $\text{个}/\text{cm}^2$ 。

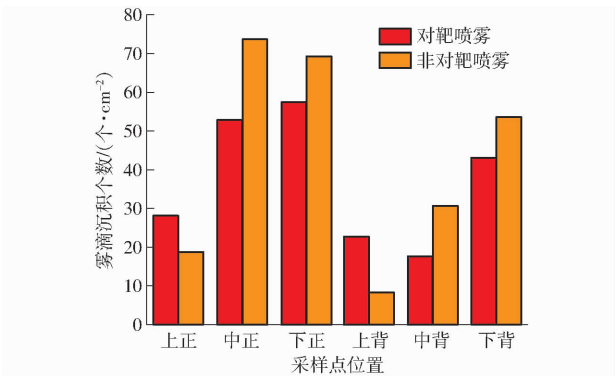


图 8 两种作业模式在果树冠层不同高度叶片正反面喷雾效果

Fig. 8 Effect of spraying on both sides of leaves at different heights in canopy of fruit trees under two operation modes

根据图 8 可知,对靶喷雾与非对靶喷雾时叶片正反面平均雾滴沉积个数均大于 25 $\text{个}/\text{cm}^2$,满足果树冠层叶片正反面受药需求。但非对靶喷雾时,采样点上层叶片正反面的喷雾效果较差,叶片正反面

平均雾滴沉积个数分别为 18.81、8.27 $\text{个}/\text{cm}^2$,未满足叶片受药需求,且果树上、中、下 3 层叶片正面的雾滴沉积个数变异系数为 56.59%,叶片背面的变异系数为 73.46%,雾滴分布均匀性较差。相比于非对靶喷雾,对靶喷雾在果树冠层不同高度的雾滴分布均匀性有所提高,果树上、中、下 3 层叶片正面的雾滴沉积个数变异系数为 34.22%,叶片背面的变异系数为 48.59%,但果树叶片正面与叶片背面的施药效果仍具有一定的差异,叶片正面的平均雾滴沉积个数为叶片背面的 1.66 倍,叶片背面施药效果较差,存在叶片正反面受药不均匀的问题。

图 9 为对靶喷雾与非对靶喷雾在果树冠层不同高度采样点叶片正面雾滴沉积分布图。图 9a~9c 为非对靶喷雾时果树冠层不同高度叶片正面的雾滴沉积分布图,从图中可以看出,中层与下层的雾滴沉积个数明显高于上层,冠层不同高度的雾滴沉积个数变异系数达 56.59%,果树冠层不同高度的雾滴分布均匀性较差;除靠近喷雾侧的点 A 外,果树上层其他采样点的雾滴沉积个数均小于 25 $\text{个}/\text{cm}^2$,不满足叶片受药需求,且各采样点雾滴沉积个数变异系数达 84.27%,雾滴分布均匀性较差;除远离喷雾侧的采样点 C 外,果树中层与下层其他位置雾滴沉积个数均满足叶片受药需求,但中层各采样点雾滴沉积分布差异性较大,变异系数达 49.33%,部分点位存在过量施药的现象,比如点 a 与点 D 附近雾滴沉积个数超过 120 $\text{个}/\text{cm}^2$;相比之下,下层的雾滴沉积分布较为均匀,变异系数为 30.22%,各采样点雾滴沉积个数位于 45~90 $\text{个}/\text{cm}^2$ 之间。通过对非对靶喷雾下的冠层雾滴沉积效果分析可知:喷雾机在非对靶喷雾模式下,喷雾角度恒定不变,喷雾范围无法根据果树冠层高度实时变化,雾滴不能完全覆盖目标冠层区域,从而导致果树冠层不同高度叶片正面雾滴沉积分布不均;此外,由于喷雾时输送至果树上层与中层的雾滴数量较少,且其中大部分雾滴直接附着在果树冠层外侧叶片上,因此存在果树上层雾滴沉积个数较少、中层雾滴沉积分布局部不均的现象。

图 9d~9f 为对靶喷雾时果树冠层不同高度叶片正面的雾滴沉积分布图,从图中可以看出,相比于非对靶喷雾,对靶喷雾时上、中、下 3 层的雾滴沉积分布相对均匀,变异系数为 34.22%,且未有采样点雾滴沉积个数超过 100 $\text{个}/\text{cm}^2$,不存在施药过量的情况。对靶喷雾时,除远离喷雾一侧的点 C 附近雾滴沉积个数较少以外,果树中下层其他部位叶片正面的雾滴沉积个数均在 60~90 $\text{个}/\text{cm}^2$ 之间,中层各采样点的雾滴沉积个数变异系数为 27.28%,下层

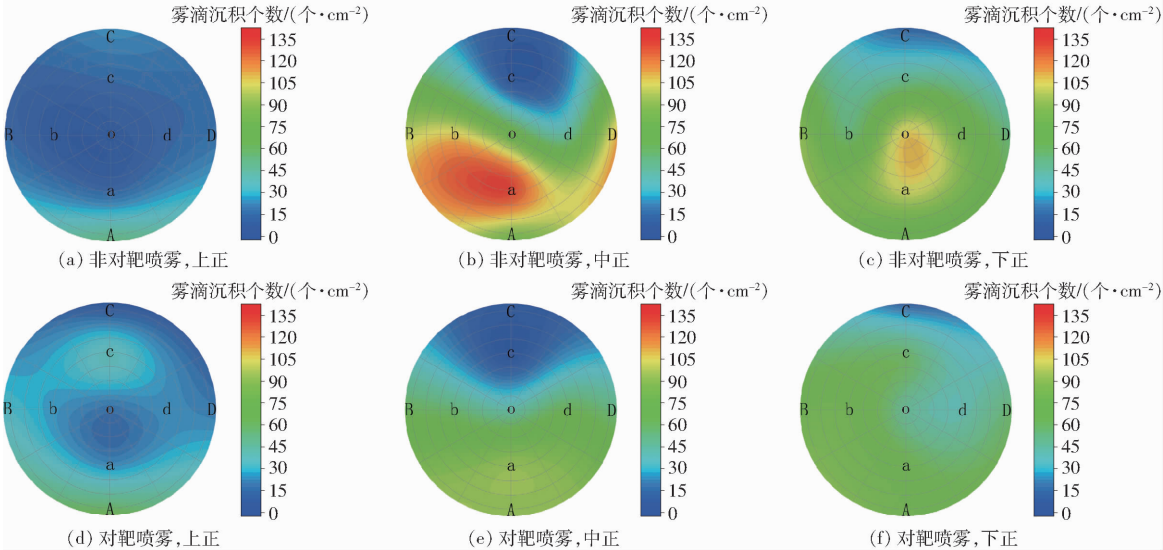


图 9 果树冠层不同高度叶片正面雾滴沉积分布图

Fig. 9 Distribution diagrams of droplet deposition on front side of leaves at different heights of fruit canopy

变异系数为 21.43%，表明果树中下部冠层内外雾滴沉积分布较为均匀，雾滴在果树中下层冠层内部的穿透性较好；相比于中下层，对靶喷雾时上层叶片正面的雾滴沉积个数有所减少，变异系数达 54.98%，雾滴分布均匀性有所降低，但除点 C 外，其他部位的雾滴沉积分布个数均满足 25 个/cm²，满足果树叶片受药需求，相比于非对靶喷雾时果树上层高达 84.27% 的变异系数，雾滴沉积分布均匀性有所提高。

图 10 为果树冠层不同高度叶片背面的雾滴沉积分布图。相比于叶片正面，非对靶喷雾时果树不同高度叶片背面的雾滴沉积个数明显减少，从图 10a ~ 10c 中可以看出，果树上层的雾滴沉积效果最差，各采样点的雾滴沉积个数均小于 10 个/cm²，未满足叶片背面受药需求；除 A、B、C 等采样点满足

叶片背面受药需求外，果树中层其他部位的雾滴沉积个数均小于 15 个/cm²，各采样点雾滴沉积个数变异系数达 88.23%，果树下层各采样点雾滴沉积个数变异系数达 78.63%，中层和下层的雾滴沉积分布均匀性较差。如图 10d ~ 10f，与非对靶喷雾类似，对靶喷雾时叶片正面与叶片背面的施药效果存在一定差异；冠层不同高度叶片背面的变异系数为 48.59%，尤其是果树上层与中层，只有外侧的 3 个采样点 (A、B、D) 满足果树施药需求，其他部位雾滴沉积个数较少，上、中、下 3 层各采样点雾滴沉积个数变异系数分别为 91.57%、95.30%、43.17%，雾滴分布均匀性较差。

分析对靶喷雾与非对靶喷雾下果树冠层叶片背面雾滴沉积效果，可知：喷雾角度的实时调整，无法显著提高果树冠层叶片背面的施药效果；两种作业

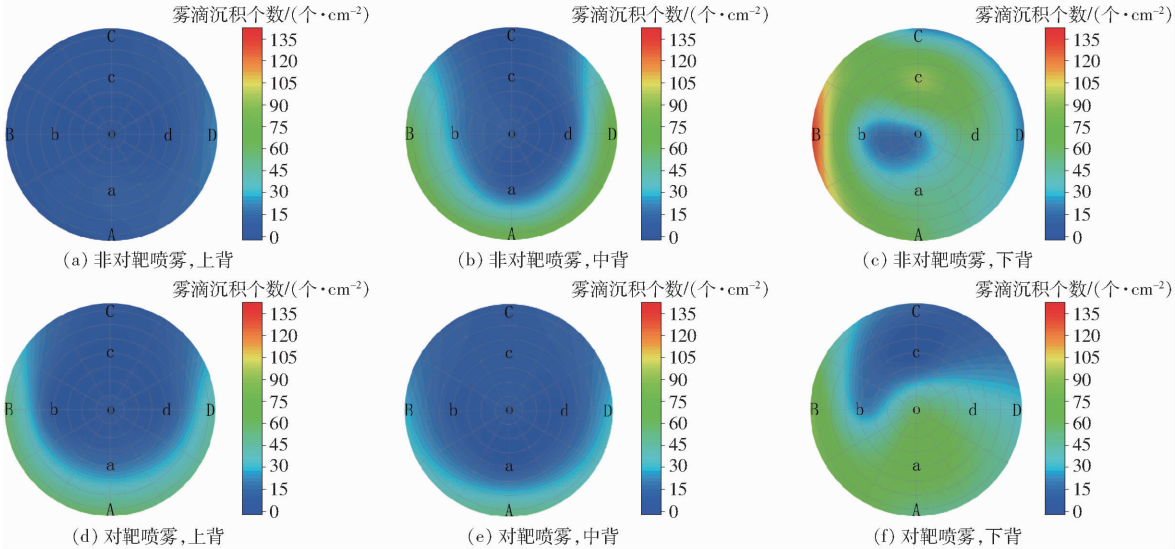


图 10 果树冠层不同高度叶片背面雾滴沉积分布图

Fig. 10 Distribution diagrams of droplet deposition on back side of leaves at different heights of fruit canopy

模式下,果树冠层叶片背面的雾滴沉积效果均较差,推测是在作业过程中,风机风场并未对果树冠层叶片完成有效的扰动与翻转,这可能与风机送风参数恒定不变有关。

3.3.2 用水量分析

按照单侧喷雾试验的喷雾工作参数,使用喷雾机分别以对靶喷雾模式与非对靶喷雾模式进行20 m 喷雾作业,作业面积约 160 m²,每种模式重复3 次。测得对靶喷雾模式下的平均用水量为 4.4 L,非对靶喷雾模式下的平均用水量为 6.0 L,表明相同作业面积下,相比于非对靶喷雾,对靶喷雾可有效节省 26.70% 的用水量。

3.3.3 流失量分析

喷雾机作业时,部分雾滴会由于未沉积在果树冠层叶片上而流失到地面或飘移至冠层后面,造成药液浪费与土壤污染,因此地面流失量与冠后飘移流失量是检测喷雾机性能的重要因素。

喷雾机两种作业模式下各采样点的地面流失量分布如图 11,分析可知:对靶喷雾时各采样点的平均地面流失量为 4.34 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,远低于非对靶喷雾时的 28.88 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,减少约 84.93%;相比于对靶喷雾,非对靶喷雾时采样点 G1 ~ G6 的地面流失较为严重,流失量约为对靶喷雾的 7.3 倍,采样点 G7 ~ G9 的地面流失量与对靶喷雾基本一致,其原因可能是:非对靶喷雾作业时喷雾角度恒定,许多雾滴未透过果树冠层,直接沉积在地面上,造成靠近喷雾侧地面流失量较大,而由于喷雾距离的限制,远离喷雾侧的采样点地面流失量较小。

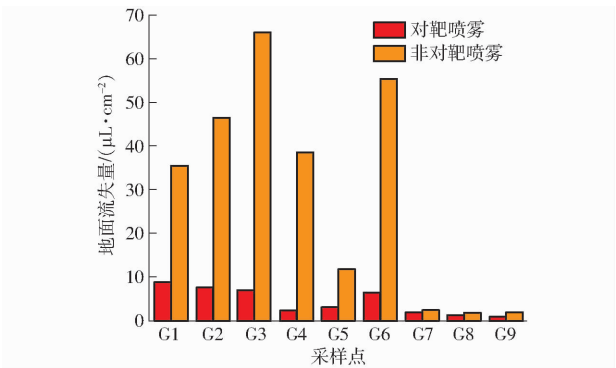


图 11 两种作业模式地面流失量分布

Fig. 11 Ground losses distribution of two operating modes

图 12 为各采样点冠后飘移流失量分布图。分析可知:对靶喷雾时各采样点的平均飘移量为 0.47 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,非对靶喷雾时各采样点的平均飘移量为 1.01 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$;相比于非对靶喷雾,对靶喷雾减少约 53.5% 的冠后飘移流失量,表明对靶喷雾对减少雾滴的冠后飘移具有一定效果。除采样点 B3 与采样点 B6 外,其他采样点对靶喷雾时的飘移量均小

于非对靶喷雾时的飘移量,考虑到点 B3 与 B6 位于同一水平线上,推测可能是由于对应水平线处靶标冠层较为稀疏,雾滴在风场气流胁迫下直接穿过冠层飘移至采样点,从而造成较为严重的雾滴流失。

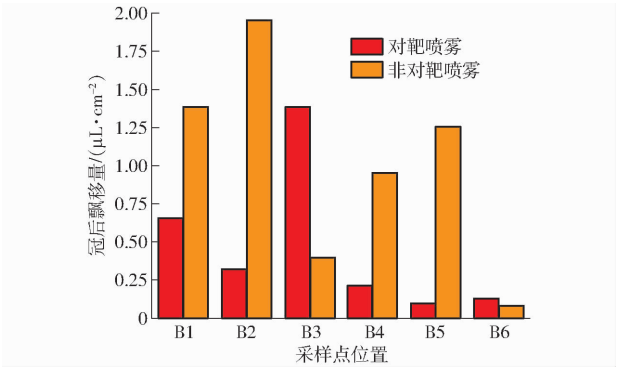


图 12 两种作业模式冠后飘移量分布

Fig. 12 Post-crown drift distribution of two operating modes

3.3.4 双侧喷雾效果分析

图 13 为双侧喷雾时对靶喷雾与非对靶喷雾地面流失量分布,结合图 11 所示的单侧喷雾流失量分布,分析可知:对靶喷雾时的平均地面流失量为 65.37 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,非对靶喷雾时的平均地面流失量为 80.99 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,约为对靶喷雾的 1.24 倍,表明对靶喷雾可有效减少雾滴地面流失;相比于单侧喷雾,双侧喷雾时对靶喷雾的地面流失量增加 2 倍以上,其原因可能是选取的果树冠层下部离地面相对较近,调整靶标后部分雾滴直接沉积在地面,造成一定的地面流失。

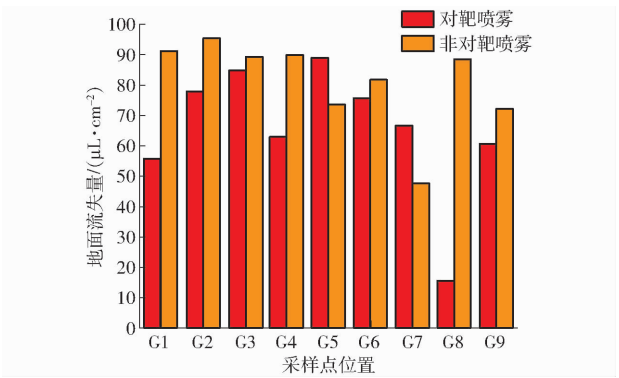


图 13 双侧喷雾时两种作业模式地面流失量分布

Fig. 13 Ground losses distribution in two operating modes during bilateral spray

图 14 为双侧喷雾时两种作业模式在果树冠层不同高度叶片正反面的施药效果,对靶喷雾时果树冠层不同高度叶片正面的平均雾滴沉积个数为 77.84 个/ cm^2 ,叶片背面为 66.16 个/ cm^2 ;不对靶喷雾时果树冠层不同高度叶片正面的平均雾滴沉积个数为 74.13 个/ cm^2 ,叶片背面为 78.47 个/ cm^2 。结合图 8,可分析得到:对靶喷雾时叶片正面平均雾滴

沉积个数是单侧喷雾的 1.68 倍,叶片背面平均雾滴沉积个数是单侧喷雾的 2.37 倍;非对靶喷雾时叶片正面平均雾滴沉积个数是单侧喷雾的 1.37 倍,叶片背面平均雾滴沉积个数是单侧喷雾的 2.54 倍;相比于单侧喷雾,双侧喷雾时对靶喷雾与非对靶喷雾在果树冠层不同高度叶片正反面的平均雾滴沉积个数均有所增加,且均达到了叶片的施药需求,其中叶片背面的平均雾滴沉积个数增加较为明显,均为单侧喷雾的 2 倍以上,其原因可能是双侧喷雾时,雾滴可透过冠层沉积在冠层远离喷雾侧的叶片背面,提高果树叶片背面的施药效果。

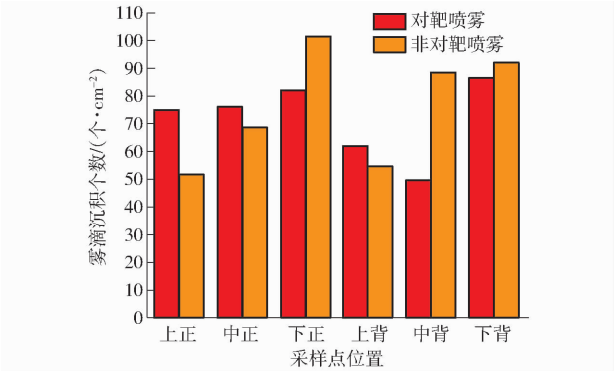


图 14 双侧喷雾时两种作业模式在果树冠层不同高度叶片正反面施药效果

Fig. 14 Effect of spraying on both sides of leaves at different heights in canopy of fruit trees under two operation modes during bilateral spray

由图 14 可知,双侧喷雾时对靶喷雾上、中、下 3 层叶片正面的雾滴沉积个数变异系数为 4.83%,叶片背面为 28.52%;非对靶喷雾上、中、下 3 层叶片正面的雾滴沉积个数变异系数为 34.23%,叶片背面为 26.50%。分析可知:相比于非对靶喷雾,对靶

喷雾可显著提高果树冠层不同高度叶片正面的雾滴沉积分布均匀性,但叶片背面的雾滴沉积分布效果与非对靶喷雾类似,果树不同高度的雾滴分布均匀性较差,此结果与单侧喷雾一致,表明喷雾角度的实时调整,无法显著提高果树冠层叶片背面的施药效果。

4 结论

(1)根据雾滴运动规律及丘陵果园农艺特点,设计双喷头联动式靶标跟随风送喷雾系统,完成小型靶标跟随喷雾机的样机试制,并在样机上集成自主导航系统及靶标探测追踪系统,实现了喷雾机的果园自主作业。

(2)果园单侧喷雾试验表明,对靶喷雾时果树冠层不同高度叶片正面的雾滴沉积个数变异系数为 34.22%,果树上、中、下 3 层各采样点叶片正面的雾滴沉积个数变异系数分别为 21.43%、27.28%、54.98%,平均变异系数为 34.56%,相比于非对靶喷雾,可有效提高冠层不同高度及冠层内外叶片正面的雾滴分布均匀性;相同作业面积时,对靶喷雾可节省 26.70% 的用水量,减少 84.93% 的地面流失量以及 53.50% 的冠后飘移流失量,有效减少了药液的浪费。

(3)果园双侧喷雾试验显示,果树冠层不同高度叶片正面的雾滴沉积个数变异系数为 4.83%,叶片背面变异系数为 28.52%,叶片正反面平均变异系数为 16.68%,表明相比于非对靶喷雾,对靶喷雾可有效提高果树冠层不同高度叶片正反面的雾滴分布均匀性,满足果树冠层中下部叶片正面受药需求,验证了丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机的性能。

参 考 文 献

[1] 郑永军,江世界,陈炳太,等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1-20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1-20. (in Chinese)

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

[3] 王士林,范道全,李雪,等. 果园喷雾机具对施药人员体表污染的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(12): 1612-1618.
WANG Shilin, FAN Daoquan, LI Xue, et al. Effect of orchard sprayers on dermal exposure of operators[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(12): 1612-1618. (in Chinese)

[4] 王杰,邱威,丁为民,等. Y 型棚架式果园的 3WZ-300 风送喷雾机设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 60-70.
WANG Jie, QIU Wei, DING Weimin, et al. Design and experiment of 3WZ-300 type air-assisted sprayer for orchard with Y-typed trellis[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 60-70. (in Chinese)

[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 CSAE, 2021, 37(6): 18-25. (in Chinese)

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

- [7] 李建平,边永亮,杨欣,等. 果园多风机风送喷雾机作业参数优化与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(10): 2474–2485.
LI Jianping, BIAN Yongliang, YANG Xin, et al. Operational parameter optimization and testing of an air-assisted multi-fan orchard sprayer[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(10): 2474–2485. (in Chinese)
- [8] 董祥,张铁,燕明德,等. 3WPZ-4型风送式葡萄喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 205–213.
DONG Xiang, ZHANG Tie, YAN Mingde, et al. Design and experiment of 3WPZ-4 type air-assisted grape sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 205–213. (in Chinese)
- [9] 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 experiment of V-shaped orchard anti-drift spray device with multi-airflow cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 138–147. (in Chinese)
- [10] ASAEI H, JAFARI A, LOGHAVI M. Site-specific orchard sprayer equipped with machine vision for chemical usage management[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 431–439.
- [11] 肖珂,梁聪哲,夏伟光. 基于改进YOLACT的果树叶端区域实时检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 276–284.
XIAO Ke, LIANG Congzhe, XIA Weiguang. Real-time detection method of fruit leaf wall area based on improved YOLACT[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 276–284. (in Chinese)
- [12] HE B, SONG J, LIU Y, et al. Precision spraying techniques using an automatic infrared system to detect the target in a Chinese orchard[C]//SuproFruit 2015-13th Workshop on Spray Application in Fruit Growing, 2015: 72–73.
- [13] 李丽,李恒,何雄奎,等. 红外靶标自动探测器的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 159–163.
LI Li, LI Heng, HE Xiongkui, et al. Development and experiment of automatic detection device for infrared target[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 159–163. (in Chinese)
- [14] MAGHSOUDI H, MINAEI S, GHOBADIAN B, et al. Ultrasonic sensing of pistachio canopy for low-volume precision spraying[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 149–160.
- [15] COLACO A F, MOLIN J P, ROSELL-POLO J R, et al. Application of light detection and ranging and ultrasonic sensors to high-throughput phenotyping and precision horticulture: current status and challenges[J]. Horticulture Research, 2018, 5: 35.
- [16] 谷趁趁,翟长远,陈立平,等. 基于激光雷达的树形靶标冠层叶面积探测模型研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 278–286.
GU Chenchen, ZHAI Changyuan, CHEN Liping, et al. Detection model of tree canopy leaf area based on LiDAR technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 278–286. (in Chinese)
- [17] CHAKRABORTY M, KHOT L R, SANKARAN S, et al. Evaluation of mobile 3D light detection and ranging based canopy mapping system for tree fruit crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 284–293.
- [18] 廖启明. 自动对靶精准施药机研究——基于图像边缘检测和目标识别[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 219–223.
LIAO Qiming. Research on automatic target precision spraying machine based on image edge detection and object recognition[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 219–223. (in Chinese)
- [19] 肖珂,郝毅,高冠东. 果园自动变距精准施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 137–145.
XIAO Ke, HAO Yi, GAO Guandong. Design and experiment of automatic variable-distance precision spraying system in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 137–145. (in Chinese)
- [20] 南玉龙,张慧春,郑加强,等. 基于圆柱面模型的仿形喷雾植物冠层密度超声量化测试[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 209–216.
NAN Yulong, ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, et al. Ultrasonic quantification test of plant canopy density based on cylindrical surface model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 209–216. (in Chinese)
- [21] GENE-MOLA J, GREGORIO E, CHEEIN F A, et al. Fruit detection, yield prediction and canopy geometric characterization using LiDAR with forced air flow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105–121.
- [22] 窦汉杰,翟长远,王秀,等. 基于LiDAR的果园对靶变量喷药控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 11–21.
DOU Hanjie, ZHAI Changyuan, WANG Xiu, et al. Design and experiment of the orchard target variable spraying control system based on LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(3): 11–21. (in Chinese)
- [23] 张美娜,吕晓兰,邱威,等. 基于三维激光点云的靶标叶面积密度计算方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 172–178.
ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, QIU Wei, et al. Calculation method of leaf area density based on three-dimensional laser point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 172–178. (in Chinese)
- [24] JIANG S, CHEN B, LI W, et al. Stereoscopic plant-protection system integrating UAVs and autonomous ground sprayers for orchards[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1040808.
- [25] 刘星星,张超,张浩,等. 最小二乘法与SVM组合的林果行间自主导航方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 157–164.
LIU Xingxing, ZHANG Chao, ZHANG Hao, et al. Inter-row automatic navigation method by combining least square and SVM in forestry[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 157–164. (in Chinese)
- [26] 江世界,马恒涛,杨圣慧,等. 果园喷雾机器人靶标探测与追踪系统[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 31–39.
JIANG Shijie, MA Hengtao, YANG Shenghui, et al. Target detection and tracking system for orchard spraying robots[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 31–39. (in Chinese)
- [27] 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)