



王帅,陈云富,王朝西,等.果园风送喷雾雾量垂直分布信息检测系统设计与试验[J].南京农业大学学报,2026,49(4):955-962.

Wang S, Chen Y F, Wang C X, et al. Vertical distribution information detection system for orchard airborne spray volume design and testing[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(4): 955-962.

果园风送喷雾雾量垂直分布信息检测系统设计与试验

王帅,陈云富,王朝西,李宗正,李绍波,邱威*

(南京农业大学工学院,江苏 南京 211800)

摘要:[目的]果园风送喷雾机的雾量空间分布特征是影响喷施质量的重要因素之一。目前国内的雾量垂直分布检测设备难以在田间真实环境中进行检测,导致田间原位数据获取困难,果园风送喷雾机喷雾性能的精准评估与优化工作面临挑战。本文设计了一种果园风送喷雾雾量垂直分布信息检测系统,实现收集单元的模块化和测量系统的集成化,提高设备田间快速部署能力。[方法]检测系统通过16个收集单元截取0.7~4.4 m高度内的雾量,并基于称重传感器实现数据自动化检测、存储,同时开展收集单元、系统性能试验,探明检测系统的检测适用距离。[结果]检测系统的各个收集单元之间收集的数据分布较为集中,变异系数小于8%,但当收集量小于10 g时,变异系数会增至12%~20%。无风送作业条件下,圆盘式和塔式风送喷雾机的检测适用距离分别为1.5~3.5 m和2.5~3.5 m;风送条件下,2种喷雾机的检测适用距离均为1.5~4.0 m。[结论]本检测系统可以准确、快速地获得喷雾机的雾量垂直分布信息,检测过程实现自动化并具备一定便携性。

关键词:雾量分布;植保喷雾机;检测系统;果园施药

中图分类号:S491

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)04-0955-08

Vertical distribution information detection system for orchard airborne spray volume design and testing

WANG Shuai, CHEN Yunfu, WANG Chaoxi, LI Zongzheng, LI Shaobo, QIU Wei*

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract:[Objectives] The spatial distribution characteristics of the spray volume of the orchard air sprayer is one of the important factors affecting the spraying quality. Currently, domestic spray volume vertical distribution detection equipment is difficult to operate in the real field environment, resulting in difficulties in acquiring in situ data in the field, and the precise assessment and optimisation of the spraying performance of orchard airborne sprayers are facing challenges. This paper presents the design of a vertical distribution information detection system for orchard airborne spraying, which realises the modularity of the collection unit and the integration of the measurement system, and improves the ability of the equipment to be rapidly deployed in the field. [Methods] The detection system intercepted the spray volume in the height range of 0.7-4.4 m through 16 spray collection units, and realised automated data detection and storage based on load cells. Performance tests of the collection units and the system were carried out to find out the detection distance of the detection system. [Results] The distribution of data collected between the various collection units of this detection system was more concentrated, and the coefficient of variation was less than 8%, but the coefficient of variation increased to 12%-20% when the collection volume was less than 10 g. In the case of operation without wind-feeding conditions, the applicable detection distances for disc-type and tower-type wind-feeding sprayers were 1.5-3.5 m and 2.5-3.5 m, respectively; in the case of wind-feeding conditions, the applicable detection distances for both types of sprayers were 1.5-4.0 m. [Conclusions] The detection system could accurately and quickly obtain the vertical distribution information of the mist volume of the sprayer, and the detection process was automated and had a certain degree of portability.

Keywords: spray distribution; plant protection sprayers; detection systems; orchard application

喷施质量是影响施药效果和农药利用率的关键指标^[1],主要包括雾滴粒径均匀性、雾滴沉积均匀性和雾量分布均匀性等^[2-3]。当前研究主要集中于雾滴粒径均匀性^[4-7]与雾滴沉积均匀性^[8-10]的调控,对于雾量分布均匀性^[11]的关注相对不足。果园风送式喷雾机作业多采用水平或倾斜的喷施模式,且果树冠层往往高度不规则,使得该场景下的药液在穿透和沉积的过程中极易发生分布不均,导致局部区域过量沉积引发药害或浪费,其他区域沉积过少导致防治失效。因此,为了优化施药效果、保障施药安全和提高农药

收稿日期:2025-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(32171905);南京市现代农机装备与技术创新示范项目(NJ[2024]07)

作者简介:王帅,硕士研究生。*通信作者:邱威,教授,博导,主要从事植保机械与施药技术研究,E-mail: qiuwei@njau.edu.cn。

资源利用率,对果园风送喷雾机的雾量垂直分布进行高精度、高效率检测与评估至关重要。

雾量垂直分布测量仪采用特殊百叶窗结构,实现“气过雾留”,最大限度地减少了测量装置对气雾流运动的影响,是常用的雾量分布均匀性检测设备^[12]。针对此设备,相关学者开展了相关研究,如 Khot 等^[13]对收集室结构进行优化设计,将传统的百叶窗和单层筛网组合改进为四层筛网,实现了雾液高效率拦截与收集。董祥等^[14]开发了一种果园喷雾机喷雾量垂直分布测试系统,具备数据自动测量与自动排液功能,并采用倾斜放置的集液槽,以促进药液快速流入量筒内,从而大幅提高了数据采集的速度和精度。上述雾量垂直分布测试仪凭借其高喷雾收集率、数据准确性和宽测试范围等优点,被广泛用于实验室条件下喷雾机雾量垂直分布信息的测定,但是基于固定式的结构设计限制了其场景迁移能力,难以在田间真实环境中进行原位检测,导致田间数据获取困难。为此, Gil 等^[15-16]设计了一种便携式雾量垂直分布测量仪,采用漏斗型收集单元与轻质塑料框架相结合,测量高度 1.75~2.85 m。此测量仪虽然通过降低检测高度、采用轻便材料等方法使其初步满足田间原位检测的需求,但仍存在测量过程自动化程度低、数据采集速度慢等不足。

针对上述问题,本文以模块化和集成化的理念设计了一种果园风送喷雾雾量垂直分布信息检测系统。该系统通过 16 个收集单元拦截雾量,基于称重传感器实现数据自动化测量、存储,并在此基础上进行收集单元、系统性能试验,选取 2 种果园常用喷雾机探明其检测适用距离,为果园施药技术研究提供支撑。

1 系统设计

检测系统由雾量收集系统、雾量分布测量系统和数据采集系统组成。系统测量范围为 0.7~4.4 m(以地面为基准),如图 1 所示。雾量收集系统由收集单元、导流管和支架组成,雾量分布测量系统主要由量筒、称重传感器和箱子组成,数据采集系统由数据变送器、LoRa 无线传输模块和上位机组成。上位机软件通过 LABVIEW 进行设计,包括功能实现和检测界面设计。检测系统底部与导轨连接,通过直流电动机带刹车装置和齿轮齿条,实现检测系统在导轨上的运动。

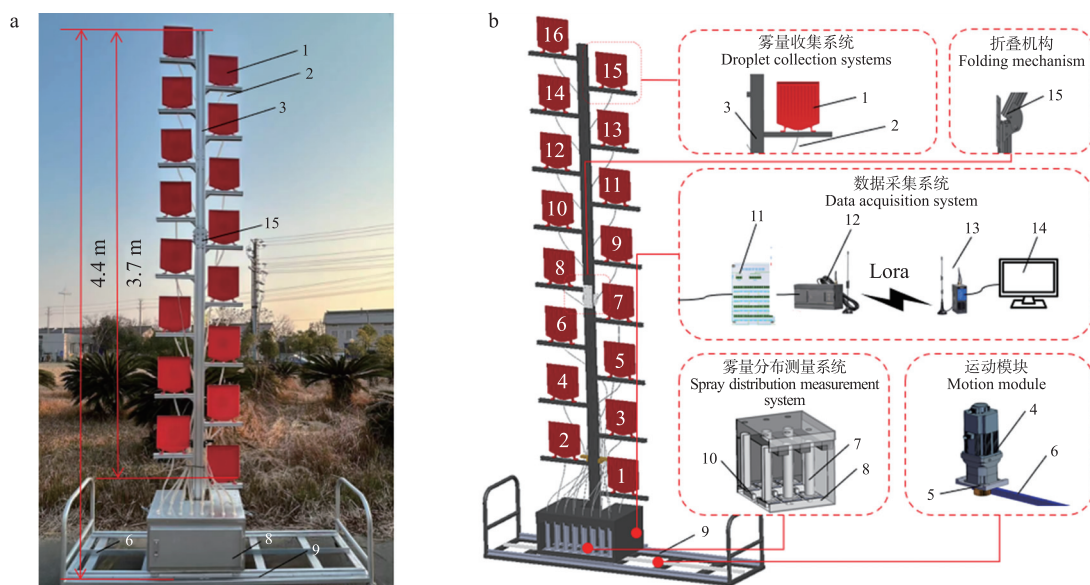


图 1 检测系统实物图(a)和设计方案示意图(b)

Fig. 1 Schematic diagram of the physical diagram(a) and design scheme(b) of the detection system

1.收集单元 Collection unit; 2.导流管 Spoiler; 3.支架 Brackets; 4.直流电机 DC motor; 5.齿轮 Pinion; 6.齿条 Rack; 7.量筒 Volumetric cylinder; 8.箱子 Box; 9.导轨 Slideway; 10.称重传感器 Weighing sensors; 11.数据采集器 Data collector; 12.Lora 无线发射模块 Lora wireless transmitter module; 13.Lora 无线接收模块 Lora wireless receiver module; 14.PC 端 PC-based; 15.折叠机构 Folding mechanism.

检测前,将喷雾机置于试验地点并将出风口正对检测系统导轨中心,调整好喷雾参数后开始喷雾并打开上位机进行实时检测。检测系统从导轨一端向另一端运动,雾滴被吹送至收集单元上,收集单元将收集到的雾液通过下方导流口输送至对应的量筒中,到达另一端后喷雾机停止喷雾。待收集到的雾液全部流入量筒中后,通过称重传感器测量出各个高度收集单元收集到的喷雾量。测量结果通过 Lora 无线传输的方式将数据传入上位机并显示在检测界面上,每次检测开始前检查量筒中的水是否排尽。

1.1 雾量收集系统

雾量收集系统主要由收集单元、导流管和支架组成。雾量收集系统整体尺寸(长×宽×高)为2 m×0.4 m×4.4 m。收集单元尺寸根据植物保护机械风送式喷雾机试验方法标准^[17]进行设计,为了有效拦截雾滴,设置方形收集单元,其拦截面尺寸为0.24 m×0.23 m,下方开有导流口,便于连接导管使收集到的雾滴输送至对应的量筒中,如图2所示。16个收集单元在支架上呈两列交错排布,每个收集单元的测量上边缘与另一侧相邻收集单元的测量下边缘重合,确保准确收集喷雾机各个高度的喷雾量。考虑高度和便携性问题,在支架中间位置设置折叠机构,如图1所示,折叠之后系统整体高度降为2.5 m,对国内仓储设施主流门框具有良好通过性。

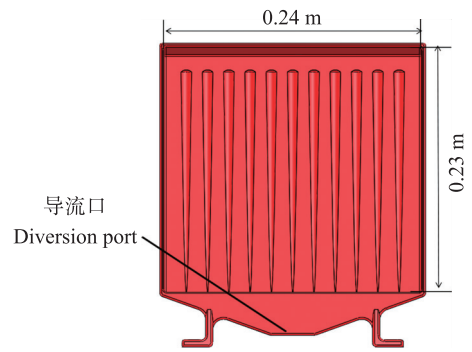


图2 收集单元

Fig. 2 Collection unit

1.2 雾量分布测量系统

雾量分布测量系统主要由称重传感器、量筒和箱子组成,如图1所示。量筒选择100 mL的塑料量筒,通过导管与对应的收集单元连接。为了保证精度和稳定性,根据量筒重和容积选用应变片式称重传感器,量程为0~300 g,精度为±0.03%。同时,设计箱子将测量系统与外界隔离开,保证电路元器件正常工作和测量结果的准确性。

1.3 数据采集系统

数据采集系统包括数据采集器、Lora无线通信模块和PC上位机。其中,数据采集器选用DY-098多路数据采集器,与称重传感器配合使用可同时采集16路传感器数据并将其转化为数字信号,再通过Lora无线通信模块传输至上位机中。采集系统的数据灵敏度为0.1 g,数据测量响应速率小于100 ms,实现从喷雾启动至检测完成全流程的分钟级测量能力,传输原理如图3所示。

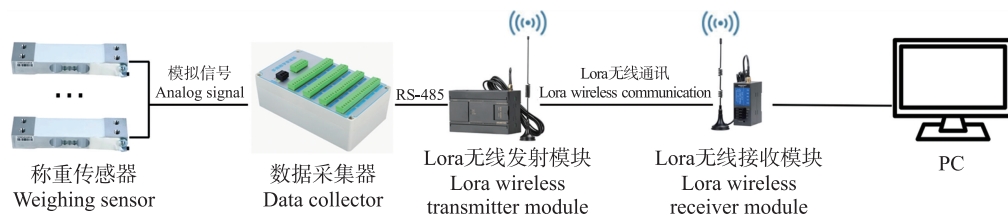


图3 数据采集与处理系统

Fig. 3 Data acquisition and processing system

上位机软件基于LABVIEW 2018 虚拟仪器软件的VISA 串口模块设计,其软件流程图如图4所示。通过VISA 串口模块实现上位机与下位机的实时通信及数据传输,软件界面如图5所示。串口选择完成后运行软件,称重传感器采集到的数据将实时显示在柱状图中,可以使用户清晰直观地观察不同收集单元收集雾量的情况,通过清零、校准按钮实现传感器的参数调整,通过保存按钮对数据进行保存操作,方便用户后续分析。

2 系统性能试验

2.1 收集单元性能评估试验

为了评估本检测系统收集单元的收集性能,分别使用单喷头喷雾平台和风机性能试验平台对检测系统进行喷洒。如图6所示,单喷头平台使用可伸缩喷杆,伸缩范围0.6~3.6 m,可以对每个收集单元进行定量喷洒,喷雾器喷雾压力0.4 MPa。风机性能试验平台采用15 kW电

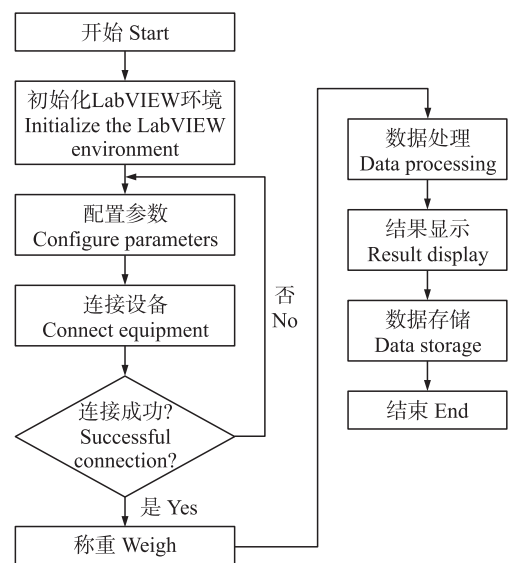


图4 程序流程图

Fig. 4 Procedure flow chart

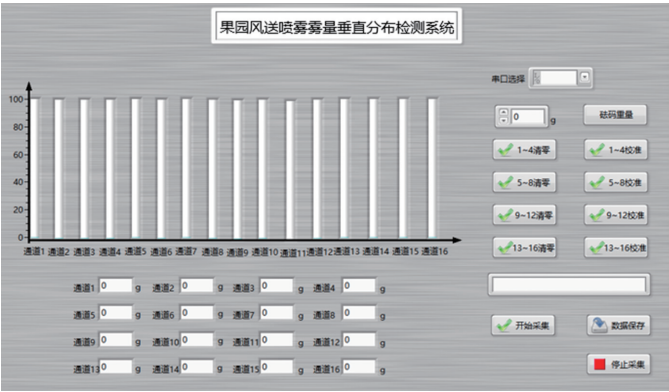


图 5 检测系统界面

Fig. 5 Detection system interface

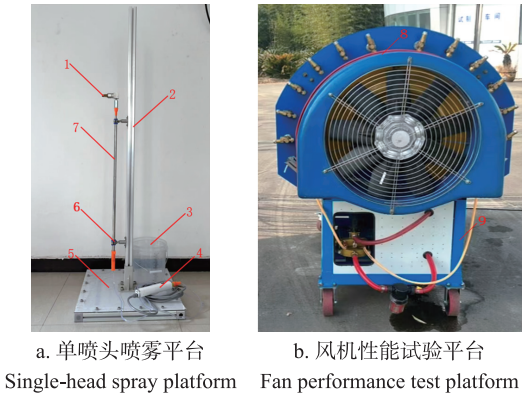


图 6 2 种喷雾平台

Fig. 6 Two spray platforms

1.喷头 Nozzles; 2.支架 Brackets; 3.水箱 Radiator; 4.喷雾器 Sprayer; 5.底板 Base plate; 6.固定卡扣 Retaining buckle; 7.可伸缩喷杆 Retractable spray boom; 8.风机 Ventilator; 9.风机性能试验台 Fan performance test bench.

机驱动,喷雾压力调节范围为 0~5 MPa,风机转速调节范围为 0~3 000 r·min⁻¹,用此平台驱动圆盘式风送喷雾机进行喷雾,喷雾压力调节为 0.8 MPa。2 种平台的喷头型号均为 CZ012#陶瓷子弹可调喷头,喷头孔径 1.5 mm。使用单喷头喷雾平台检测时,将喷头调整至每个收集单元中心,喷雾距离调整为 0.3 m,喷洒 100 mL 自来水;使用风机性能试验平台检测时,调整风机出风口正对导轨中心,喷雾距离为 2 m,当检测系统从导轨一端运动至另一端后停止喷雾。每次试验重复 5 次,等待上位机界面示数不再变动时记录数据,对比分析 5 次检测结果。每次检测完后排尽量筒中的水。

以变异系数(CV)代表该收集单元的测量结果稳定性,CV 值越小,表明该结果的稳定性越好。以下列公式计算每个收集单元的变异系数。

$$S = \sqrt{\frac{\sum (m_n - \bar{m})^2}{n - 1}}; \bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_n}{n} = \frac{\sum m_n}{n}; CV = \frac{S}{\bar{m}} \times 100\%。$$

式中: $m_1, m_2, \cdots, m_n$ 表示各高度雾量收集量(g); S 为标准差(g); n 为试验次数; $\bar{m}$ 为喷雾收集量平均值(g); CV 为变异系数(%)。

单喷头喷雾平台下的收集性能试验结果如图 7 所示:各收集单元的雾量值集中分布在 23~25 g,数据中位线与均值点接近,箱体高度与长度差异较小,说明各收集单元的数据分布较为平均,收集性能相近;各收集单元雾量值的变异系数为 2%~4%,多次测量的重复性较好。

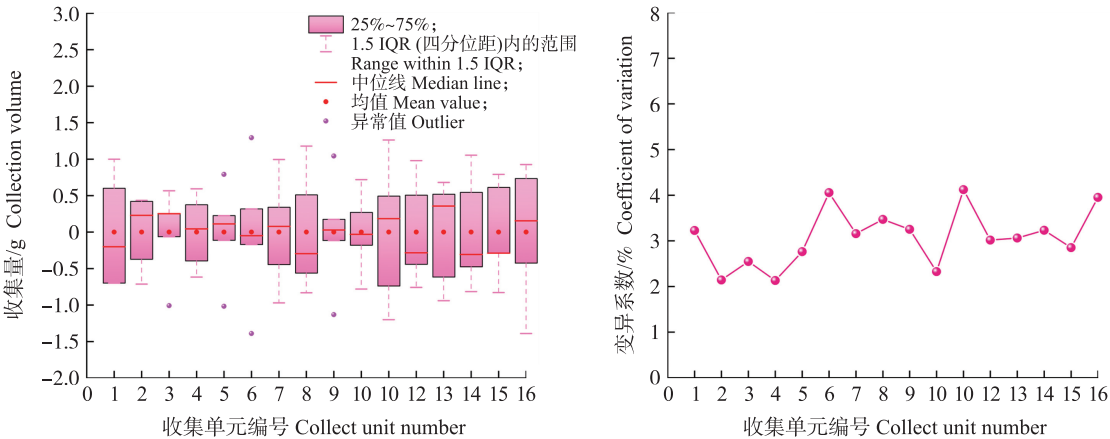


图 7 单喷头喷雾平台下的收集性能试验结果

Fig. 7 Collection performance test results under a single nozzle spray platform

风机性能试验平台下的收集性能试验结果如图 8 所示:受喷雾机喷雾高度影响,喷雾集中分布在 2~12 号收集单元之间,16 号收集单元未收集到有效数据,收集量呈现该喷雾机喷雾雾量垂直分布情况,箱体

长度较小,这说明各收集单元收集到的数据稳定性较高;多数收集单元的变异系数为2%~8%,而1、12、13、14、15号收集单元的变异系数较大,分布在12%~20%,这主要是因为这几个收集单元的收集量在10 g以下,环境因素及测量误差对于测量结果的影响较大,导致多次重复检测的数据稳定性和可靠性降低。

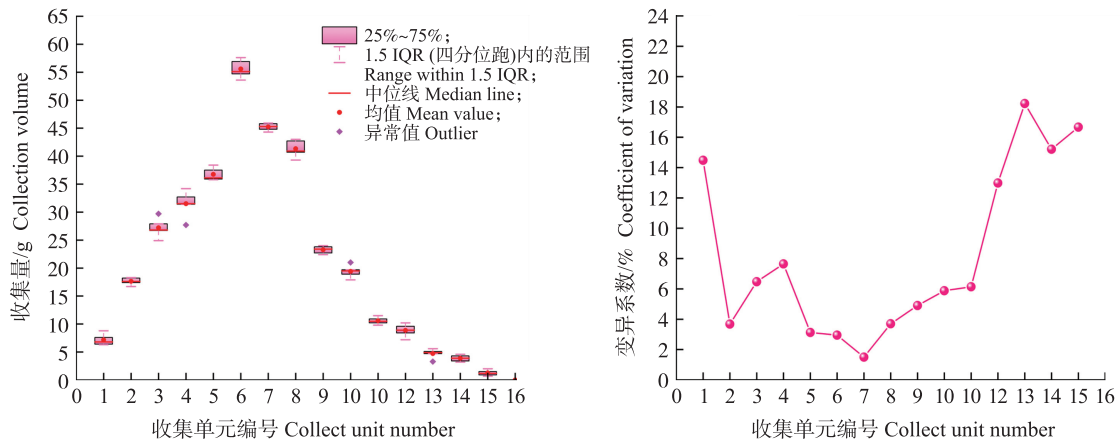


图8 风送喷雾平台下的收集性能试验结果

Fig. 8 Collection performance test results under the fan performance test platform

综上所述,本检测系统进行了多次试验,各收集单元所测雾量值分布较为集中,变异系数主要分布在2%~8%,体现出了良好的收集性能。由于本检测系统的量程较小,当收集单元的雾量值在10 g以下时,变异系数为12%~20%,明显降低了测量稳定性。

2.2 对比试验

为了进一步评估检测系统的收集性能,与目前主流的大型垂直雾量分布测试仪进行对比试验。该垂直雾量分布测试仪的测量高度为0.3~4.8 m,宽度2 m,具有18个收集单元,收集量程2 000 mL,喷雾收集率可达90%以上,对于喷雾机的雾量垂直分布的检测准确性及可靠性较高。试验场景如图9所示,调整风机转速为 $1\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,喷雾压力为0.8 MPa,喷雾时间为30 s,喷雾距离设为1.5和2.0 m,分别使用2种检测装置进行检测。由于2种检测装置的量程不一致,因此将各个高度的测量结果转化为百分比进行分析,为了减小误差,每组试验重复3次,取平均值。

通过相关系数(r)来对比分析本系统与大型垂直雾量分布测试仪获取的喷雾机雾量分布曲线的差异。 r 越大说明本系统的检测结果与大型垂直雾量分布测试仪的检测结果越接近, r 的计算公式如下。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

式中: X_i 、 Y_i 为2个变量的第 i 个观测值; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 为变量 X 和 Y 的均值; n 为样本数量。

图10为采用检测系统与大型垂直雾量分布测试仪试验时雾量垂直分布。当喷雾距离为1.5 m时,2种系统的收集量相近,喷雾距离为2.0 m时,检测系统在1.5 m以下的收集量大于垂直雾量分布仪,高度在1.5 m以上时相反,但测量结果差距均在3%以内。且2种喷雾距离下,由检测系统与垂直雾量分布仪测量而获得的雾量分布曲线的相关系数(r)分别为0.984 09和0.919 35,相似度均较高。因此,检测系统可以以较低的喷雾收集率获得相对准确的雾量垂直分布曲线,在试验研究或实际使用中替代大型垂直雾量分布仪。

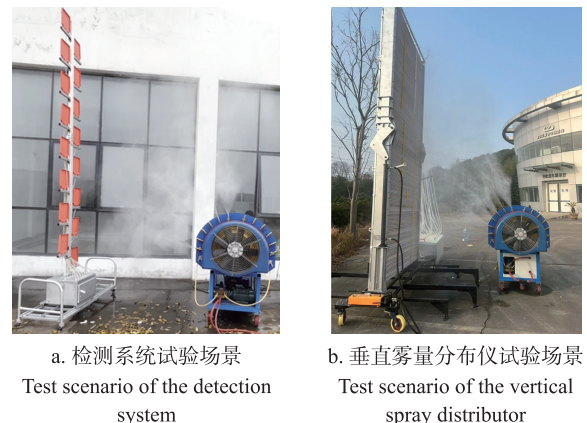


图9 检测系统和雾量垂直分布仪对比试验场景

Fig. 9 Comparison test scenario of detection system and fog vertical distributor

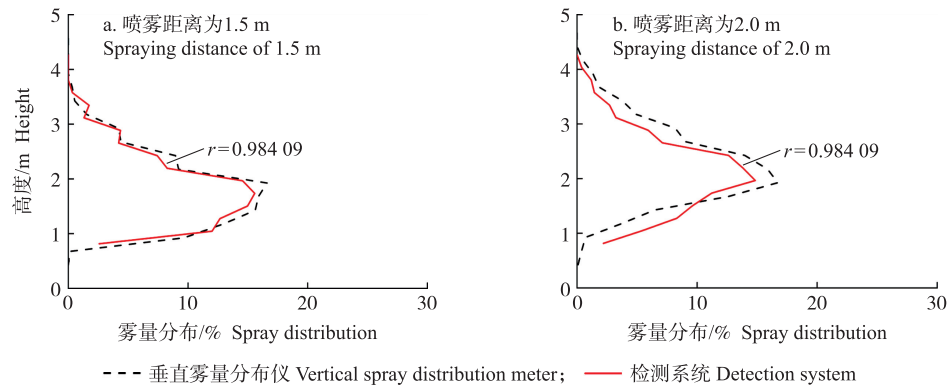


图 10 2 种距离下检测系统和雾量垂直分布仪的雾量垂直分布曲线对比

Fig. 10 Comparison of the vertical distribution curves of fog volume between the detection system and the vertical distribution meter at two distances

2.3 2 种果园喷雾机检测适用距离探究试验

选取 2 种果园常见的喷雾机:圆盘式和塔式风送喷雾机,设置喷雾压力为 0.8 MPa,使用本检测系统进行检测试验,探究在该喷雾压力下,检测系统对 2 种喷雾机的适用距离。以风机开关状态模拟风送和无风送喷雾作业场景,以检测距离为试验变量,试验方案参考《GB/T 24683—2009 植物保护机械 灌木和乔木作物用风送式喷雾机试验方法》,根据检测结果探究检测系统对 2 种喷雾机的检测适用距离。所有试验均无在无风或微风的条件下进行,以减少环境风对检测结果的影响。2 种喷雾机参数如表 1 所示。

表 1 2 种试验喷雾机主要参数

Table 1 The main parameters of the two test sprayers

参数 Parameters	圆盘式风送喷雾机 Disk type air supply spray	塔式风送喷雾机 Tower air spray
出风口宽度/cm Width of air outlet	20	20
喷头数量 Number of nozzles	12	14
叶轮直径/cm Impeller diameter	50	50
喷嘴孔径/mm Nozzle aperture	1.5	0.5
叶轮数量 Number of impellers	9	10
喷幅/m Spray spoke	7.4	6.8

为了更准确地控制风机转速,2 种风机均使用风机性能试验平台驱动,试验场景如图 11 所示,统一开启右侧喷头,喷雾压力设置为 0.8 MPa,检测距离分别设置为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 m,风机开启后转速设置为 1 500 r·min⁻¹。每个距离重复试验 3 次,取平均值。

图 12 分别为圆盘式风送喷雾机在风送和无风送作业场景下的试验结果,可以看出其雾量分布均呈中层多与上、下层少的“钟形分布”。无风送条件下,各个检测距离下的雾量峰值随着距离的增加而减小,且集中分布在 1.5~2.0 m 的高度范围内(图 12-a)。风送条件下,雾量整体上移,且峰值降低(图 12-b),这是因为开启风机后,在气流和压力的双重作用下,雾滴斜向上运动的距离增加,使得雾量整体上移,且风机产生的气流会使雾滴进行更广泛的扩散和稀释。

图 13 分别为塔式风送喷雾机在风送和无风送作业场景下的试验结果。无风送条件下,雾量分布呈中层多与上、下层少的“钟形分布”(图 13-a)。在检测距离为 1.5 和 2.0 m 时,其雾量峰值均大于 100 g,出现水溢出量筒的现象。该现象会导致该部分数据溢出,对喷雾机整体的雾量分布曲线检测准确性造成一定影响,降低检测结果的可靠性。此外,水溢出会对电路安全造成影响,使设备发生短路等问题。因此,该距离不适用于该喷雾机的检测。风送条件下,喷雾机的雾量分布由“钟形分布”变为“梯形分布”(图 13-b),雾



图 11 2 种风机检测场景

Fig. 11 Two types of wind turbine detection scenarios

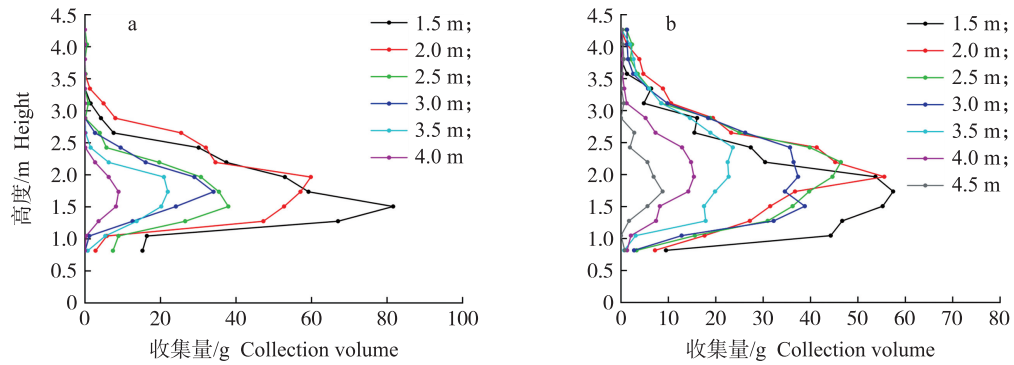


图12 圆盘式风送喷雾机无风送(a)和风送(b)时的雾量垂直分布

Fig. 12 The vertical distribution of the amount of fog when the disc air-assisted sprayer has no air supply (a) and air supply (b)

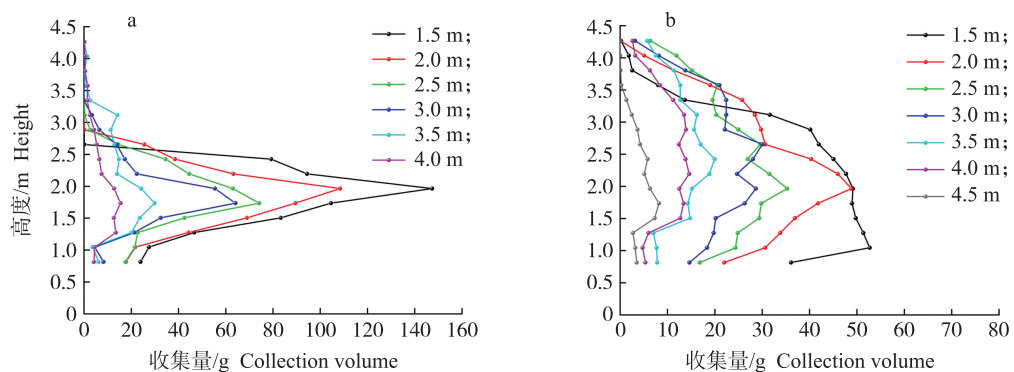


图13 塔式风送式喷雾机无风送(a)和风送(b)时的雾量垂直分布

Fig. 13 The vertical distribution of fog volume when the tower air-assisted sprayer has no air supply (a) and air supply (b)

量分布均匀性得到提高,这主要归功于塔式喷雾机独特的塔形结构设计,使得雾液在气流的驱动下实现了更均匀的垂直分布。此外,在无风送条件下、检测距离为4.0 m及风送条件下、检测距离为4.5 m时,2种喷雾机的雾量均分布在10 g以下,位于受数据波动影响较大的范围内,同样不适用于喷雾机的检测。综上,在无风送作业条件下,检测系统对2种喷雾机的检测适用距离分别为1.5~3.5 m和2.5~3.5 m;在风送作业条件下,2种喷雾机的检测适用距离均为1.5~4.0 m。

3 结论

检测喷雾机的雾量垂直分布对于提高果园风送喷雾机的喷施质量和农药利用率等有重要意义,本文基于模块化收集单元和集成化测量系统设计了一种果园风送喷雾雾量垂直分布信息检测系统,并通过LabVIEW软件设计检测系统,提高了检测系统的场景迁移能力和测量自动化程度。本研究得出以下结论:

1) 设计出一种果园风送喷雾雾量垂直分布信息检测系统,检测范围为垂直地面向上0.7~4.4 m。检测系统使用铝型材和塑料等轻型材料减轻了设备的质量,各部件之间以螺栓连接为主,方便拆卸和运输,并通过称重传感器进行数据测量,极大地提高了数据获取的速度及准确性。

2) 检测系统各个收集单元的收集一致性及稳定性较好,且变异系数为2%~8%,可以在实验室研究或田间检测时代替大型雾量垂直分布仪使用。

3) 喷雾压力为0.8 MPa时,在无风送的条件下,检测系统对圆盘式和塔式风送喷雾机的检测适用距离分别为1.5~3.5 m和2.5~3.5 m;在风送条件下,对2种喷雾机的检测适用距离均为1.5~4.0 m。

参考文献 References:

- [1] 蒋焕煜,张利君,刘光远,等. 基于PWM变量喷雾的单喷头动态雾量分布均匀性实验[J]. 农业机械学报,2017,48(4):41-46.

- Jiang H Y, Zhang L J, Liu G Y, et al. Experiment on dynamic spray deposition uniformity for PWM variable spray of single nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 41–46 (in Chinese with English abstract).
- [2] Pergher G. Field evaluation of a calibration method for air-assisted sprayers involving the use of a vertical patternator [J]. Crop Protection, 2004, 23(5): 437–446.
- [3] 邱威, 邱伊浩, 周慧能, 等. 温室风幕式施药装置设计与试验 [J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(2): 405–415.
Qiu W, Wu Y H, Zhou H N, et al. Design and test of greenhouse air curtain spraying device [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(2): 405–415 (in Chinese with English abstract).
- [4] 董福龙, 周宏平, 茹煜, 等. 对冲喷头喷雾场液滴分布特性试验 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 116–121, 128.
Dong F L, Zhou H P, Ru Y, et al. Experiment on droplet distribution characteristics in spray field of impinging nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 116–121, 128 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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(3): 547–555.
Qiu W, Miao J J, Li X L, et al. Design and experiment of multi-channel directional atomizer for orchard sprayer [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(3): 547–555 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李建平, 李绍波, 于少猛, 等. 伞形风场式防飘喷雾装置沉积特性研究 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 80–91, 151.
Li J P, Li S B, Yu S M, et al. Deposition characteristics of umbrella wind field type anti-drift spray device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 80–91, 151 (in Chinese with English abstract).
- [7] Viřackı V V, Sedlar A D, Gil E, et al. Effects of sprayer boom height and operating pressure on the spray uniformity and distribution model development [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32(3): 341–346.
- [8] Cao Y B, Wang C X, An Y Z, et al. Droplet deposition behavior on the surface of wheat leaves with wind-induced vibration [J]. Crop Protection, 2024, 181: 106699.
- [9] Zheng H, Sun H, Cao Y B, et al. Computational fluid dynamics simulation analysis of the effect of curved rice leaves on the deposition behaviour of droplets [J]. Plant Methods, 2023, 19: 116.
- [10] 张毅杰, 黄国亮, 宋泽祺, 等. 静电喷雾下雾滴沉积与飘移关键影响因素仿真与试验优化 [J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(2): 110–120.
Zhang Y J, Huang G L, Song Z Q, et al. Simulation and experimental optimization of the key factors affecting droplet deposition and drift in electrostatic spraying [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(2): 110–120 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陈志刚, 吴春笃, 杨学军. 喷杆喷雾雾量的分布均匀性 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2008, 29(6): 465–468.
Chen Z G, Wu C D, Yang X J. Spray distribution uniformity of boom spraying [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2008, 29(6): 465–468 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张晓辛, 吕晓兰, 丁素明, 等. 果园风送式喷雾机仿形喷雾试验研究 [J]. 中国农机化, 2011, 32(3): 68–72.
Zhang X X, Lü X L, Ding S M, et al. Experimental research on profiling spray of air-assisted orchard sprayer [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(3): 68–72 (in Chinese with English abstract).
- [13] Khot L R, Ehsani R, Albrigo G, et al. Technical note: spray pattern investigation of an axial-fan airblast precision sprayer using a modified vertical patternator [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 28(5): 647–654.
- [14] 董祥, 杨学军, 严荷荣. 果园喷雾机喷雾量垂直分布测试系统 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 59–63.
Dong X, Yang X J, Yan H R. Test system of vertical spray distribution on orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- [15] Gil E, Badiola J. Design and verification of a portable vertical patternator for vineyard sprayer calibration [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(1): 35–42.
- [16] Gil E, Landers A, Gallart M, et al. Development of two portable patternators to improve drift control and operator training in the operation of vineyard sprayers [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2013, 11(3): 615–625.
- [17] GB/T 24683—2009 植物保护机械 灌木和乔木作物用风送式喷雾机 试验方法 [S].
GB/T 24683—2009 Equipment for crop protection test methods for air-assisted sprayers for bush and tree crops [S] (in Chinese).

责任编辑: 刘怡辰