

智慧植保精准喷雾系统测试试验平台发展应用综述

余忠义^{1,2} 何雄奎^{1,2*} 李尚军³ 高 杭¹ 周克坤¹ 王芯蕊¹
陈启新⁴ 万永祺¹ 古松源⁵

(1. 中国农业大学理学院,北京 100193; 2. 中国农业大学药械与施药技术研究中心,北京 100193;
3. 陕西省佳县农机服务中心,榆林 719299; 4. 中国农业大学食品科学与营养工程学院,北京 100083;
5. 中国农业大学动物科学技术学院,北京 100193)

摘要: 精准喷雾系统作为农业新质生产力在智慧植保施药领域的核心应用载体,其性能显著影响着果园、大田和设施大棚等多元农林业场景的植保作业效率、质量、推广应用水平与生态效益。而测试试验平台是精准喷雾系统从实验室研发迈向田间实际应用的关键桥梁,承担着喷雾系统的使用性能测试、参数优化、故障诊断、标准制定与优化迭代的核心功能,成为智慧植保技术体系中不可或缺的支撑环节。该文介绍了国内外典型喷雾试验平台案例与发展现状,对比了其优缺点与适用场景,系统分析了多维度喷雾参数测量、复杂环境模拟测试、多系统协同测试和喷雾效果智能分析等关键技术的原理特点、研究现状与发展趋势。但仍面临着标准化不足、场景模拟受限、协同测试能力弱和研发成本高等挑战。该文结合当前研究结果和文献调研,提出了“大物移云智”人工智能驱动技术实现智能化升级、物理-数字孪生多元融合、智慧植保精准喷雾全产业链标准化建设、国产化、低成本化和便携化智能芯片研发、多源传感系统协同测试平台构建等发展方向,以期推动智慧植保精准喷雾系统测试平台技术的持续发展,助力我国农业向绿色、精准、高效方向转型升级。
关键词: 智慧植保精准喷雾系统测试试验平台; 喷雾参数检测; 环境模拟; 多系统协同; 数字孪生

Development and application of test-beds for precision spraying systems in smart plant protection: a review

Yu Zhongyi^{1,2} He Xiongkui^{1,2*} Li Shangjun³ Gao Hang¹ Zhou Kekun¹ Wang Xinrui¹
Chen Qixin⁴ Wan Yongqi¹ Gu Songyuan⁵

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Research Center for Pharmaceutical Equipment and Application Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Jia County Agricultural Machinery Service Center, Yulin 719299, Shaanxi Province, China; 4. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 5. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: As the core application carrier of new agricultural productivity in the field of intelligent plant protection and pesticide application, the performance of precision spray system significantly affects the efficiency, quality, popularization and application and ecological benefits of plant protection in diversified agricultural and forestry scenarios such as orchards, fields and facilities. Test-beds serve as the critical bridge for precision spraying systems to transition from laboratory development to practical field application. They fulfill core functions including performance evaluation, parameter optimization, diag-

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-28), 中国农业大学2115人才培养发展支持计划项目(2115-89052), 国家重点研发计划项目(2025YFE0208900), 陕西省榆林市战略合作协议项目(2024YLCAU006), 国家自然科学基金项目(31761133019)

* 通信作者(Author for correspondence), E-mail: xiongkui@cau.edu.cn

收稿日期: 2025-12-15

nostic testing, standard formulation, and iterative refinement, making them an indispensable component within the smart plant protection technology ecosystem. This article analyzes and expounds the cases and development status of typical spray test platforms in China and abroad, and compares their advantages, disadvantages and application scenarios, and systematically analyzes the original characteristics, research status and development trend of key technologies such as multi-dimensional spray parameter measurement, complex environment simulation testing, multi system collaborative testing, and intelligent analysis of spray effects. However, it still faces challenges such as insufficient standardization, limited scenario simulation, weak collaborative testing capabilities, and high research and development costs. Based on the existing research results and literature review, we propose the breakthrough directions for the development of artificial intelligence (AI)-driven technology integrating big data, the Internet of Things (IoT), mobile networks, cloud computing, and AI. These directions aim to achieve intelligent upgrading, physical-digital twin multi-integration, standardization construction of precision spraying for intelligent plant protection across the entire industrial chain, localization and development of low-cost, portable smart chips, and construction of a collaborative test platform for multi-source sensor systems, to promote the sustainable development of test platform technology for intelligent plant protection precision spraying systems and support China's agricultural transformation and upgrading towards green, precise and efficient development.

Key words: intelligent plant protection precision spray system test platform; spray parameter monitoring; environmental simulation; multi-system coordination; digital twin

随着全球人口增长与粮食安全需求提升,农业生产对植保技术的精准性、高效性与环保性要求逐步提高(Yu et al., 2024)。传统植保作业采用粗放的施药方式,导致农药利用率低的同时还引发了土壤和环境污染以及食品安全等一系列问题(余忠义等, 2025a)。智慧植保融合了智慧农业、大数据、物联网、移动通信、云计算、人工智能(artificial intelligence, AI)和具身智能机器人等新一代信息技术,可以实现农作物病虫害防治作业中的精准识别、变量施药、靶向喷雾与智慧云管控,是解决传统作物植保作业中农药滥用浪费、有效利用率低和环境污染等核心问题的关键路径(余忠义等, 2025b)。然而,植保喷雾机搭载的核心部件——精准喷雾系统,其性能受喷雾压力、雾滴大小、行进速度、环境风速和温湿度等诸多因素影响,其研发与应用也亟需专业测试试验平台进行前期的预试验、性能验证、故障诊断与优化迭代。随着智慧植保精准变量可持续发展战略的推进,近年来精准喷雾系统向“更智能、更精准、更绿色”的方向发展(陈晓平和夏冰, 2025),这对植保喷雾测试试验平台提出了更高要求:不仅需要实现喷雾参数的高精度测量,还应能够模拟田间多作物条件下的复杂作业环境,从而为植保喷雾系统从关键部件研发到整机性能验证提供全流程模拟测试支撑。

目前,针对精准喷雾系统的测试和性能提升主要是借助试验平台这一核心基础设施开展,国内外已研制出一批应用于室内外的静动态测试平台,在标准化程度、场景模拟真实性、多系统协同测试等方面取得了很大的进步,但是也存在一些不足,制约了精准喷雾技术的快速普及应用(曹冰雪等, 2024)。现有的植保精准喷雾系统测试试验平台主要用于部件性能测试(喷头雾化特性、传感器响应准确性)、算法模型验证(病虫害识别、变量施药控制)与系统集成测试应用(何雄奎, 2020)。然而,近年来精准喷雾系统逐步向“多场景适配、多系统协同和多元化发展”的智能化升级,针对现有喷雾技术装备的雾化测试试验平台发展面临诸多挑战(图1):一是参数测量维度不足,难以满足雾滴运动轨迹、药滴在靶标作物冠层沉积与飘失等深层次机理研究需求;二是模拟环境真实性受限,难以复现田间复杂的环境、作业工况以及农药-土壤-作物-大气系统互作情形;三是缺乏标准化测试体系,试验平台制造存在差异,其测试方法与评价指标差异较大,导致测试数据缺乏可比性和普及性;四是多系统协同测试能力薄弱,现有的试验平台难以完成喷雾系统与导航、监测、识别和控制等技术系统的集成验证(何雄奎, 2019)。因此,系统梳理智慧植保精准喷雾系统测试试验平台的发展现状与技术瓶颈,对于推动智慧植保技术的

应用推广与装备产业升级,进而实现行业高质量发展,具有重要的理论价值与实践意义(何雄奎,2022)。本文介绍了国内外喷雾测试试验平台典型案例与发展现状,对比了不同喷雾测试试验平台的优缺点与适用场景,通过构建需求-分类-技术-应用的研究框架,系统分析了精准喷雾系统测试试验平台的技术演进与发展规律,丰富了智慧植保装备测试领域的理论体系,以期为科研机构开展精准喷雾系统研发提供测试方法参考,为植保企业产品性能优化提供技术支撑,为试验平台的创新设计提供指引方向,同时为政府部门制定植保测试标准及其相关政策提供决策依据,加速智慧植保精准喷雾技术的产业化应用推广。

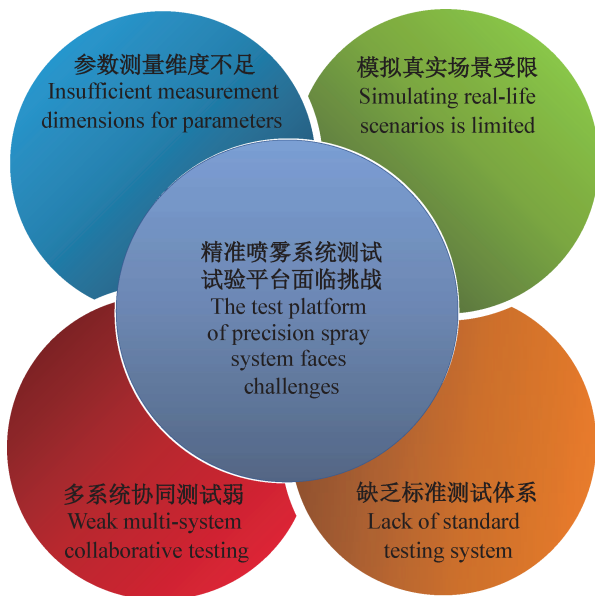


图1 精准喷雾系统测试试验平台面临的挑战
Fig. 1 The test platform of precision spray system faces challenges

1 智慧植保精准喷雾系统发展应用

国外对精准喷雾系统测试试验平台的研究起步较早,形成了较为完善的技术体系与应用格局(Restrepo-Arias et al., 2024)。美国在该领域处于领先地位,先后建立了多个专业化测试平台,包括农业喷雾漂移测试的大型风洞,配备激光粒径仪与高速相机可以模拟测试不同环境风速条件,实现雾滴粒径、速度与运动轨迹的同步测量;以及田间精准喷雾测试站,整合了光谱技术、遥感应用、环境监测系统等,实现了大规模田间喷雾测试效果评价(Huynh & Nguyen, 2024)。欧洲在精准喷雾系统测试试验平

台的标准化与智能化方面取得了显著进展,集成了虚拟农作物模型与高效控制器,开发的植保喷雾硬件精准测试平台可模拟不同作物类型与环境条件下的喷雾过程,较传统田间测试极大缩短了测试周期(Herbst et al., 2018);东南亚国家针对精准喷雾系统测试试验平台的研发主要集中在小型化与便携化方面,开发了一些手持式喷雾参数测试仪,集成激光粒径仪与压力传感器,实现了在真实场景下雾滴粒径与喷雾流量的测量,适用于大田、果园和温室等复杂场景下的快速测试(Sathya Priya et al., 2025)。我国对精准喷雾系统测试试验平台的研究虽然滞后,但近年来在国家、省部级农业科技项目的资助下实现了高速发展,先后研发了多代测试试验平台:包括可实现雾滴粒径与沉积量的同步测量室内静态测试平台;通过融合数字孪生技术集成模拟环境(温度、湿度与风速)控制单元,构建了物理平台与虚拟模型的多元喷雾系统测试平台(蔡晓华等,2013)。同时在田间测试试验平台研发方面也取得了一些突破性进展。

根据测试环境与功能定位的不同,智慧植保精准喷雾系统测试试验平台主要分为室内和田间两类测试平台(曾新洲,2020),其在技术特点与应用场景上各具优势,形成互补的测试体系。室内静态测试平台主要用于精准喷雾系统部件性能测试与喷雾参数的基础测量,具有环境可控、测量精度高、效率高的特点,是精准喷雾系统研发的基础测试平台(杨风波等,2019)。室内静态测试平台通常由喷雾测试系统、环境操控模块、作物模拟装置三部分组成。喷雾测试系统一般包括激光粒径仪、雾滴沉积测量装置、喷雾流量计和压力传感器等;环境操控模块通过空调、风机、加湿器和干燥器等实现模拟环境的温度、湿度和风速的调节;作物模拟装置则是采用人工制作的虚假作物冠层模型或真实作物样本来模拟不同作物形态(Yu et al., 2025a)。室内静态测试平台具有环境参数可控、测试重复性好、测量精度高、效率高、操作简便和适合大批量部件测试的优点,但也存在场景模拟度有限、无法模拟真实动态作业过程等不足(王洪宇等,2025)。田间动态测试平台是在真实田间环境中对精准喷雾系统进行整机性能测试,直接反映精准喷雾系统的实际作业效果,是精准喷雾系统实现产业化推广应用的关键验证环节(肖珂等,2022)。田间动态测试平台通常由测试载体(如植保无人机、自走式喷雾机)、便携式测量设备、智能操控系统和数据采集终端等组成(Precipito et al.,

2023)。便携式测量设备包括手持式激光粒径仪、雾滴沉积覆盖采样器、GNSS(global navigation satellite system)定位模块和环境测试仪等;智能操控系统通过调控不同测试参数来模拟田间作业环境,数据采集终端用于记录喷雾参数、环境参数与作业轨迹(赵军明,2025)。部分田间高端测试平台还配备无人机遥感监测系统,实现喷雾覆盖率的大范围监测(翟长远等,2018)。田间动态测试平台具有场景真实性高、测试结果可直接反映实际作业性能、满足测试系统在复杂多变环境下的适应性,以及可实现作业效率、农药有效利用率、病虫害防治效果等多指标同步测试的优点,但也存在测试受天气影响大、数据重复性较差等缺点。

2 智能精准喷雾系统测试平台关键技术

2.1 喷雾参数检测

喷雾参数是评价智能精准喷雾系统性能的核心指标,其检测参数包括喷雾流量、喷雾压力、喷雾角和喷雾均匀性等(冯耀宁等,2021),智慧植保精准喷雾系统测试试验平台的性能依赖于喷雾参数控制检测技术、环境模拟技术、数据采集与分析技术等核心技术,喷雾均匀性直接影响施药效果的一致性,其创新发展推动了试验平台向精准化、高效化和智能化方向发展(余忠义等,2025c)。精准喷雾系统的控制性能直接决定施药精度,其测试需求包括控制算法精度、响应速度、稳定性等方面。喷雾参数检测技术是测试平台的核心,用于获取雾滴粒径、沉积量、覆盖率和飘失等关键指标,近年来在测量精度与自动化程度上取得显著进步。张峰菱等(2025)为解决喷雾均匀性问题,设计了一种基于幅宽调控与流量调整相结合的离散型变量喷雾控制系统,搭建变量喷雾台架试验台(图2-A),通过摄像头采集目标图像信息获取喷洒区域半径和位置信息,进而控制喷雾泵电机的电压来调整喷雾压力,并调节喷头高度实现喷雾幅宽调整,最终实现喷洒区域内雾量均匀性的调节,台架和田间试验验证了该系统在一定范围内可通过改变直流电机占空比、调整喷雾压力来提高喷雾分布均匀性。陈海林等(2023)针对哈尔滨奥深科技公司研制的WFS-II型喷雾性能综合试验台(图2-B)进行各项性能的综合检测分析,借助计算机辅助控制,应用仪器设备和先进检测手段对液泵性能及雾液量分布、喷雾角度、雾滴粒径分布等进行测试,解决了喷雾机在作业现场无法精准检测的困扰。该试验台实现了喷雾性能的便捷、准确和高效

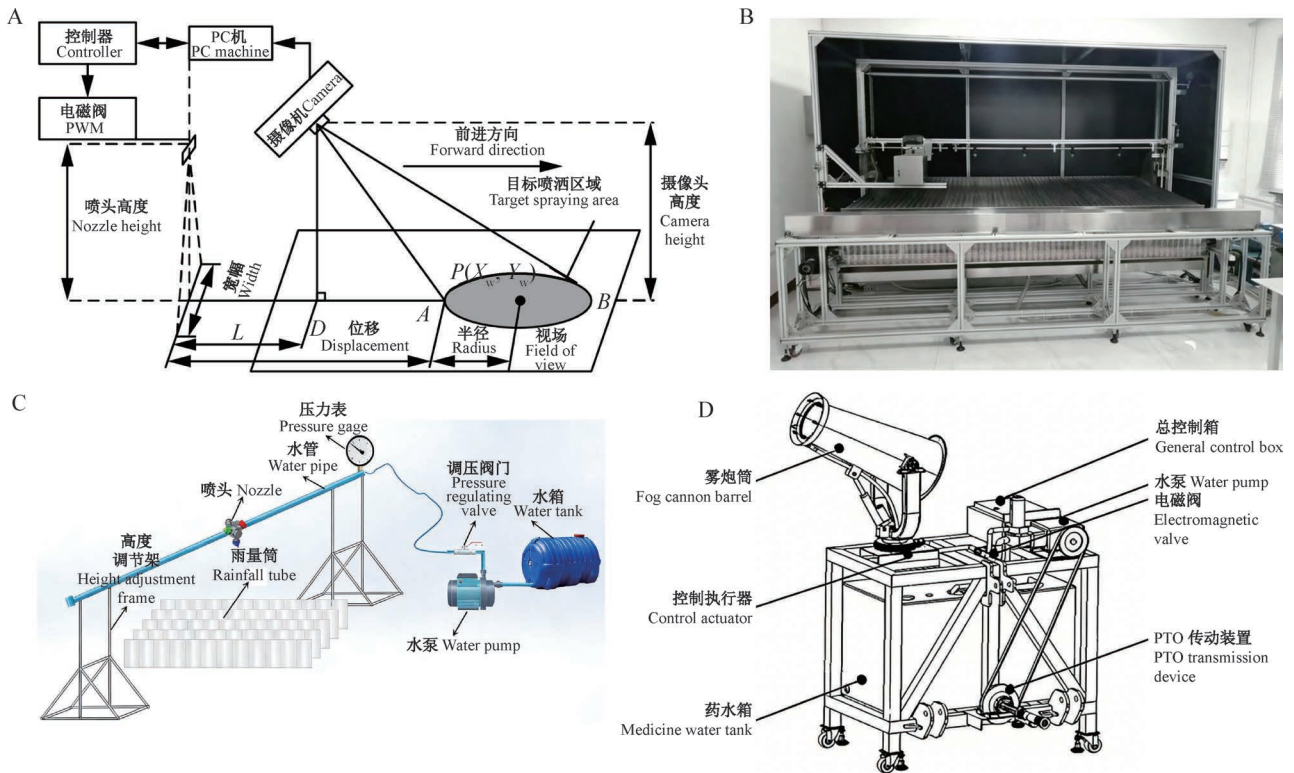
检测,为农药精准、定量喷施提供了技术保障,进而提高了农药的有效利用率(吴小伟,2011)。但喷量一致性测试还需要人工手动操作,试验台喷头接口单一,能测试的喷头类型有限,影响设备的推广应用。高飞等(2022)为探究Teejet雾化喷头工作参数对单喷头及组合喷头喷洒水力性能的影响,搭建了单喷头喷洒量分布测试试验平台(图2-C),采用主成分分析法确定雾化喷头最优配置方案,通过试验分析、理论计算和综合评价相结合的方法,探究等效直径、安装高度和工作压力对雾化喷头水力性能的影响规律,定量分析得到安装高度、工作压力、等效直径、组合间距与组合均匀性系数之间的关系。刘昊源等(2025)为研究不同工况下的雾滴分布特征,搭建了针对南方丘陵果园的喷雾试验平台(图2-D),设计多因素试验分析了喷雾角度、喷雾流量和目标距离对雾滴分布特征的影响机制,为机具优化提供了理论基础。

2.2 环境模拟测试

环境模拟测试技术主要是用于构建与真实田间相似的测试环境,包括风速、温度、湿度模拟与作物冠层构建模拟,近年来在模拟精度与场景多样性上取得突破性进展(Yu et al.,2025b)。喷雾飘失是造成农药浪费与环境污染的重要因素,其测量技术分为风洞试验法与田间试验法。气象环境模拟技术主要通过风机、空调、加湿器和干燥器等设备实现环境风速、温度、湿度的模拟调节(余忠义等,2024)。风速模拟采用轴流风机与风洞组合,可实现0~20 m/s的连续可调风速;温度与湿度模拟采用变频空调与超声波加湿器、干燥器组合,温度控制范围为0~40℃,相对湿度控制范围为20%~90%。作物冠层构建模拟技术主要包括物理模型法与虚拟模型法。物理模型法采用人工制作的果园、大田农作物模型,具有形态触感真实的优点,但制作成本和难度高;虚拟模型法基于计算机图形学构建作物冠层三维模型,可模拟作物生长过程中的形态变化,具有灵活性高的优点。气象环境对精准喷雾系统的性能影响显著,作物与地形环境的多样性要求田间测试平台一般需具备多维度的气象环境模拟能力和灵活的场景适配能力,气象环境模拟技术需实现风速、温度、湿度和降水等参数的精准控制与动态调节,以复现不同地域、不同季节的田间气象条件。肖珂等(2022)设计了基于冠层体积估算的果园自动变距精准施药系统试验平台(图3-A),喷施臂可在水平和垂直方向调整喷雾距离及高度,利用红外测距传感器组成

传感器阵列探测作物冠层并构建冠层体积估算模型,选用仿真桃树进行定距和变距两组自动对靶喷施试验,自动变距对靶喷施的农药附着率提高了18.66%,节约了30.25%的药液。李琪等(2024)为实现果园喷雾的风力和药量精确控制,基于轴流风机设计了风机转速、进风口面积和出风口导流板倾斜

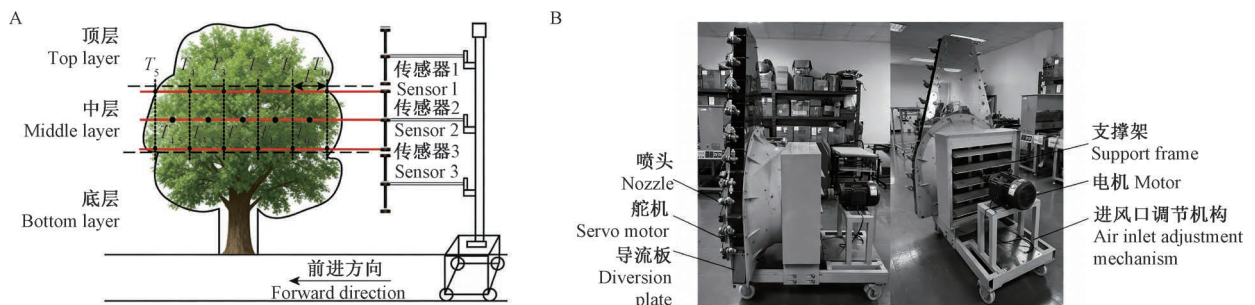
角度均可独立调控的果园风送喷雾风力调控试验平台(图3-B),并开展了风机转速、进风口面积和出风口导流板倾斜角度独立调控风力试验,为实现根据果树冠层体积和枝叶稠密度变化进行风力在线调控提供了一种新方法,对加快果园精准喷雾技术应用具有重要意义。



A: 变量喷雾试验台结构图(张峰菱等, 2025); B: WFS-II型喷雾性能综合试验台(陈海林等, 2023); C: 单喷头喷洒量分布测试试验平台(高飞等, 2022); D: 针对南方丘陵果园的喷雾试验平台(刘昊源等, 2025)。A: Structure of variable spray test-bed (Zhang et al., 2025); B: WFS-II spray performance comprehensive test-bed (Chen et al., 2023); C: single nozzle spray distribution test-bed (Gao et al., 2022); D: spray test-bed for hilly orchard in southern China (Liu et al., 2025).

图2 智能精准喷雾参数检测技术试验平台

Fig. 2 Intelligent precision spray parameter detection technology test-bed



A: 自动变距精准施药系统试验平台示意图(肖珂等, 2022); B: 果园风送喷雾风力调控试验平台(李琪等, 2024)。A: Schematic diagram of the automatic variable distance precision pesticide application system test-bed (Xiao et al., 2022); B: orchard airflow adjustment test bench (Li et al., 2024).

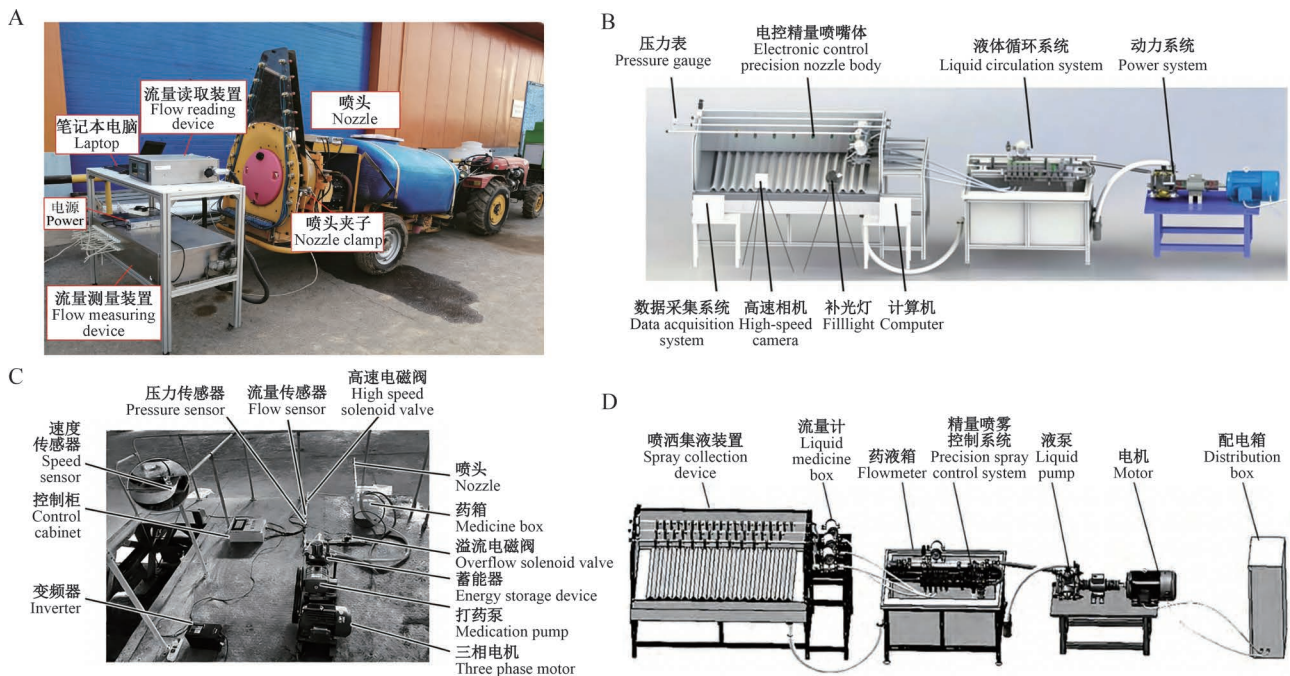
图3 智能精准环境模拟测试技术试验平台

Fig. 3 Intelligent and precise environment simulation testing technology test-bed

2.3 多系统协同测试

多传感器融合测试技术通过集成激光雷达、视觉传感器、GNSS、IMU (inertial measurement unit) 等多种传感器,将喷雾系统实物硬件(如喷雾控制器、传感器、执行单元)与测试环境实时交互(余忠义等, 2025b),实现作物冠层信息、喷雾状态和位置姿态等多维度数据的同步采集与融合分析,进而验证精准喷雾系统的动态性能测试与控制算法,大幅缩短研发周期的同时降低了测试成本,为精准喷雾系统的感知与控制性能测试提供全面支撑(张佳琛和邓巍, 2021)。窦汉杰等(2022)基于前期获得的果树冠层网格化体积计算方法建立了单喷头流量脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制模型,融合对靶喷药控制方法研发了果园激光对靶变量喷药控制系统试验平台(图4-A),可以根据果树冠层位置和冠层体积变化实现对靶变量喷药,可节约62.25%的药量,这进一步推动了果园精准喷药技术的快速发展和应用。印祥等(2022)针对现有农田施药系统变

量喷雾精准化程度低、喷头不能独立控制等问题,设计了具备流量调节功能的电控精量喷嘴体,构建了由PWM信号控制的多系统喷雾试验平台(图4-B),实现了喷头流量的实时调节,证实电控精量喷嘴体具备良好的控制稳定性和准确性,能够满足精量喷雾的基本要求。牛顿和马少辉(2025)为减少农药资源浪费,采用单片机作为核心控制器,通过速度传感器反馈的信息设计了基于PWM的变量喷雾控制系统试验台(图4-C),可模拟大田喷雾作业过程,实现喷药流量的实时变量控制,满足田间实际作业需求。杜娟等(2023)针对大田植保施药技术要求和喷杆喷雾机性能参数,通过设计药液循环和喷雾测试系统搭建了精量喷雾测试试验台(图4-D),完成了药液流量的精准控制和压力的实时感知及控制,喷杆区段独立控制、作业速度与药液流量的在线模拟与匹配,为喷杆喷雾机智能变量作业的研究及其精量喷雾系统的设计和优化提供了理论依据与技术支持。



A: 基于LiDAR的果园对靶变量喷药控制系统试验平台(窦汉杰等, 2022); B: 电控精量喷嘴体多系统喷雾试验平台(印祥等, 2022); C: 变量喷雾控制系统试验台(牛顿和马少辉, 2025); D: 精量喷雾测试试验台示意图(杜娟等, 2023)。A: Experimental platform for orchard target variable spraying control testing system based on LiDAR (Dou et al., 2022); B: multi system spray test-bed for electronically controlled precision nozzle body (Yin et al., 2022); C: test-bed of variable spray control system (Niu & Ma, 2025); D: diagram of precision spraying test-bed (Du et al., 2023).

图4 智能精准多系统协同测试技术试验平台

Fig. 4 Intelligent and precise multi system collaborative testing technology test-bed

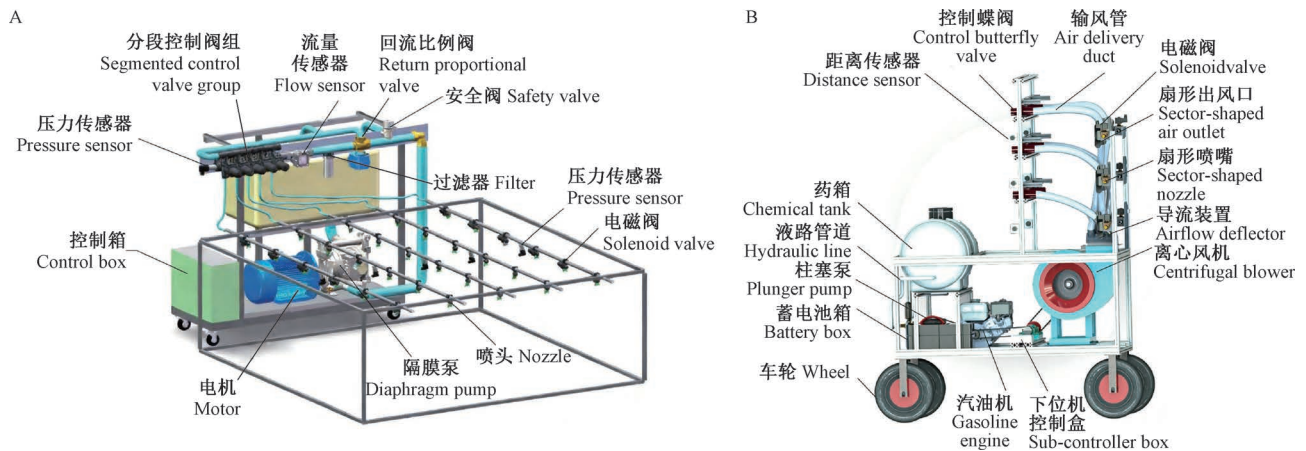
2.4 喷雾效果智能分析

喷雾效果智能分析技术通过机器学习、深度学

习等方法,实现了喷雾测试数据的智能解读、性能预测与参数优化,为精准喷雾系统的研发与应用提供

决策支持(王定康等,2022)。数据采集分析采用分布式采集架构,通过传感器、数据采集卡和工业计算机等设备实现多参数同步采集,可以实现测试数据的实时采集、存储与处理,为精准喷雾系统的性能评估提供数据支撑,近年来结合数字孪生技术向大数据与AI融合方向发展。张春风等(2025)针对PWM变量喷雾系统电磁阀同步启闭造成管路压力波动严重的问题,提出了一种基于C37控制器开发的错相位驱动压力波动抑制的PWM变量喷雾系统试验平台(图5-A),开展PWM变量喷雾系统压力波动特性试验、雾化特性试验及雾滴沉积试验,相比同相位驱动方式雾滴覆盖率变异系数降低了31.75%,有效改善了PWM变量喷雾系统低频控制条件下药液沉积均匀性,为精准变量施药装置的进一步优化提供了技术支撑。数据处理分析采用机器学习、深度学习与大数据分析技术,可实现喷雾参数(粒径、速度、沉

积量)、环境参数(风速、温度、湿度)以及传感器数据(图像、点云、位置)等测试数据的自动化处理与性能评估。刘理民等(2019)针对稀疏纺锤形果园设计了多喷头组合的多态自动对靶风送式喷雾试验台(图5-B),通过超声波传感器、编码器等传感器探测果树冠层宽度以实现多态自动对靶喷雾多状态组合决策,雾滴沉积量比普通风送式喷雾提高了34.07%,变异系数降低了25.60%,综合评估可节省20%以上的药量,在提高农药利用率的同时降低了农药残留量。预测分析算法结合作物冠层信息与病虫害分布,可实现不同区域的喷雾参数自适应优化,适用于喷雾系统的病虫害识别、设备故障诊断,以及系统性指标预测,完成喷雾参数的智能优化;可视化分析可以直观展示和交互分析测试数据,帮助测试人员快速识别雾滴-靶标互作沉积区域和飘失区域,优化喷雾测试作业参数。



A: PWM 变量喷雾系统试验平台(张春风等,2025);B:多态自动对靶风送式喷雾试验台整体结构(刘理民等,2019)。A: Schematic diagram of PWM variable spray system test platform (Zhang et al, 2025); B: overall structure of polymorphic automatic targeting air-assisted spraying test-bed (Liu et al., 2019).

图5 智能精准喷雾效果分析测试技术试验平台

Fig. 5 Intelligent precision spray effect analysis test technology test-bed

3 总结与展望

目前,智慧植保精准喷雾系统测试试验平台已深度融入果园、大田、设施农业和林业等多个植保领域的技术研发与产业应用,通过性能验证、参数优化与标准制定,正推动着精准喷雾技术从实验室走向田间,实现了经济、社会与生态效益的协同提升。本文系统综述了智慧植保精准喷雾系统测试试验平台的发展应用现状,针对其多维度喷雾参数测量、复杂环境模拟测试、多系统协同测试以及喷雾效果智能分析等关键技术,梳理了近年来取得的一系列研究

技术成果,主要包括适合部件性能与基础参数测试的室内平台,适合整机性能与实际作业效果测试的田间平台,在精准喷雾系统测试试验平台研发中发挥着不可替代的作用。尽管智慧植保精准喷雾系统测试试验平台取得显著进展,但在实际应用中仍面临诸多挑战,制约了其在精准植保技术研发与推广中的作用。当前植保喷雾测试试验平台面临着标准化不足、场景模拟度受限、多系统协同测试能力弱、研发测试成本高等挑战。

首先是精准喷雾测试标准化程度不足。目前,我国植保精准喷雾测试缺乏全产业链覆盖的标准化

体系,包括测试方法、性能指标和数据分析等标准,国内外制定的一些测试标准覆盖范围有限,未涉及精准喷雾系统的研发阶段测试、多系统协同测试等内容,导致测试数据缺乏可比性,制约了行业的规范化发展。其次是精准喷雾测试场景模拟受限。室内测试平台的场景模拟难以完全还原真实田间多因素耦合环境,如作物生长形态变化模拟和环境模拟(风速、温度等参数时空分布差异大),难以同时精准控制多个变量。第三是多系统协同测试能力薄弱。智慧植保精准喷雾系统常与导航系统、病虫害监测系统 and 物联网云平台等多系统协同工作,但当前测试试验平台多聚焦于喷雾系统本身的性能测试和分析,侧重于单一雾滴测量和流场测试,而在多传感器融合、数字孪生建模等高端算法方面的原创性不足,缺乏多系统协同测试能力。最后是喷雾性能测试成本高、难度大。智慧植保精准喷雾系统测试试验平台的建设与运行成本高昂,核心设备(如激光粒径仪、PIV(particle image velocimetry)粒子测量系统)价格昂贵,对应的田间动态测试应用需要耗费大量的人力、物力与时间,成本效益问题突出,影响了测试工作的普及开展。

针对当前面临的挑战,基于智慧植保技术的发展需求及当前相关研究进展,作者团队通过文献调研,提出了智慧植保精准喷雾系统测试试验平台未来的发展方向:一是建立智慧植保精准喷雾系统测试平台的多源系统协同测试共享数据库与模型库。将AI技术融入测试平台,通过AI算法模拟调整喷雾参数与环境条件实现自主测试与智能性优化,实现试验平台多源系统协同测试与数据云端共享,聚焦特色农作物与作业环境测试,整合多方测试数据构建共享数据库与模型库,借助区块链技术完成测试数据的存证与溯源应用推广。二是构建“大物移云智”多维度融合喷雾系统数字孪生协同测试一体化平台。未来测试平台将向多系统协同测试方向发展,将数字孪生技术、AI技术融入喷雾系统测试平台,借助大数据、物联网、移动通信、云计算和AI等技术构建“物理平台-数字模型”双向映射的孪生模型,建立集精准喷雾系统、导航系统、监测系统和物联网云平台于一体的“大物移云智”一体化测试平台,实现测试过程的自主决策、智能性优化与预测性维护。数字孪生模型通过虚拟仿真提前预测喷雾测试结果,物理平台则验证虚拟仿真的准确性,通过数据反馈修正数字孪生模型,模拟不同季节、不同天气条件下的喷雾作业,以此实现测试过程的可视化、精

准化与高效化,大幅提升喷雾性能测试效率与场景模拟真实性,为系统研发提供全生命周期的测试支撑。三是建立完善智慧植保精准喷雾系统测试平台全产业链标准化体系。政府部门、农林高校、植保企业与行业协会等联合牵头制定智慧植保精准喷雾系统测试试验平台的标准体系,包括测试方法、性能指标和测试规范等方面的标准,确保测试数据的可比性,以加快构建覆盖精准喷雾系统全产业链的产业标准化体系。在国际层面,将依托国际标准化组织积极主动组织制定智慧精准喷雾系统及其测试平台的测试标准和规范,重点围绕AI应用、多传感器融合精度、数字孪生测试方法等内容。在国内层面,将完善喷雾系统测试试验平台从研发、生产到应用的全流程标准,统一测试方法与评价指标,提升我国精准喷雾技术的国际竞争力。四是开发轻量化、便携化和低成本的普及化测试平台核心部件和芯片系统。通过国产化、轻量化芯片的研发设计,降低测试平台的建设与运行成本,推动植保测试行业普及应用,推动智能精准喷雾技术的普及应用与高速发展。未来可在“大物移云智”AI驱动技术实现智能化升级、物理-数字孪生多元融合、智慧植保精准喷雾全产业链标准化建设、国产化、低成本化和便携化智能芯片研发、多源传感系统协同测试平台构建等方面加大研究力度,推动智慧植保精准喷雾系统测试平台技术的持续发展。相信随着后续新质生产力、AI技术的高速驱动发展,智慧植保精准喷雾系统测试平台将成为精准喷雾系统研发与产业化的核心支撑,为农业新质生产力在植保领域的落地提供有力保障,助力我国农业向绿色、精准、高效方向转型升级。

参 考 文 献 (References)

- Cai XH, Yang CZ, Wu ZQ. 2013. The research and design of sprayer performance experimental platform. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 35(5): 147-150 (in Chinese) [蔡晓华, 杨存志, 吴泽全. 2013. 喷雾性能试验台的设计与研究. *农机化研究*, 35(5): 147-150]
- Cao BX, Li HF, Zhao CJ, Li J. 2024. The path of smart agricultural technology innovation leading development of agricultural new quality productivity. *Smart Agriculture*, 6(4): 116-127 (in Chinese) [曹冰雪, 李鸿飞, 赵春江, 李瑾. 2024. 智慧农业科技创新引领农业新质生产力发展路径. *智慧农业*, 6(4): 116-127]
- Chen HL, Sun W, Liu CS, Wang XY. 2023. Analysis and application of WFS-II spray performance comprehensive test bench. *Agricultural Engineering*, 13(7): 11-16 (in Chinese) [陈海林, 孙文, 刘春生, 王小阳. 2023. WFS-II型喷雾性能综合试验台分析与应用.

- 农业工程, 13(7): 11–16]
- Chen XP, Xia B. 2025. Research on the development of smart plant protection technology in the context of low-altitude economy. *Journal of Smart Agriculture*, 5(2): 5–8 (in Chinese) [陈晓平, 夏冰. 2025. 低空经济背景下智慧植保技术发展探究. *智慧农业导刊*, 5(2): 5–8]
- Dou HJ, Zhai CY, Wang X, Zou W, Li Q, Chen LP. 2022. Design and experiment of the orchard target variable spraying control system based on LiDAR. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(3): 11–21 (in Chinese) [窦汉杰, 翟长远, 王秀, 邹伟, 李琪, 陈立平. 2022. 基于LiDAR的果园对靶变量喷雾控制系统设计与试验. *农业工程学报*, 38(3): 11–21]
- Du J, An GS, Yan TR, Zhou J, Li M, Yin X. 2023. Development of precision spraying test platform for boom sprayer. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 45(5): 122–127 (in Chinese) [杜娟, 安广顺, 颜廷瑞, 周进, 李敏, 印祥. 2023. 喷杆喷雾机精度喷雾测试实验台研制. *农机化研究*, 45(5): 122–127]
- Feng YN, Pei L, Li Y, Chen XB, Miao YY, Chen B. 2021. Design of variable spray control and test bench for boom sprayer. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 42(11): 43–49 (in Chinese) [冯耀宁, 裴亮, 李晔, 陈小兵, 缪友谊, 陈彬. 2021. 喷杆喷雾机变量喷雾控制与测试试验台设计. *中国农机化学报*, 42(11): 43–49]
- Gao F, Zhang R, Zhu DL, Zheng CJ, Liu YC, Zhang XM, Zhao H. 2022. Hydraulic performance tests and optimized working parameters of Teejet atomizing nozzles. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(22): 280–286 (in Chinese) [高飞, 张锐, 朱德兰, 郑长娟, 刘一川, 张晓敏, 赵航. 2022. Teejet雾化喷头的水力性能试验及工作参数优选. *农业工程学报*, 38(22): 280–286]
- He XK. 2019. Research and development of crop protection machinery and chemical application technology in China. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 21(5): 921–930 (in Chinese) [何雄奎. 2019. 中国植保机械与施药技术研究进展. *农药学学报*, 21(5): 921–930]
- He XK. 2020. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China. *Smart Agriculture*, 2(1): 133–146 (in Chinese) [何雄奎. 2020. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议. *智慧农业*, 2(1): 133–146]
- He XK. 2022. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: a review. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 389–397 (in Chinese) [何雄奎. 2022. 高效植保机械与精准施药技术进展. *植物保护学报*, 49(1): 389–397]
- Herbst A, Osteroth HJ, Stendel H. 2018. A novel method for testing automatic systems for controlling the spray boom height. *Biosystems Engineering*, 174: 115–125
- Huynh N, Nguyen KD. 2024. Real-time droplet detection for agricultural spraying systems: a deep learning approach. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 6(1): 259–282
- Li Q, Dou HJ, Zhai CY, Gao YY, Yang S, Zhao CJ. 2024. Design and test of the airflow adjustment test bench for orchard air-assisted spraying. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 46(2): 132–138 (in Chinese) [李琪, 窦汉杰, 翟长远, 高原源, 杨硕, 赵春江. 2024. 果园风送喷雾风力调控试验台设计及试验. *农机化研究*, 46(2): 132–138]
- Liu HY, Li YC, Sun CR, Tan SH, Deng J. 2025. Study on the influence of the flow rate of the orchard circular sprayer and the nozzle angle on the droplet deposition. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, (5): 24–29 (in Chinese) [刘昊源, 李玉成, 孙超然, 谭绍辉, 邓佳. 2025. 果园环形喷雾机流量与喷头角度对雾滴沉积影响的研究. *农业装备与车辆工程*, (5): 24–29]
- Liu LM, Zhang XH, Shi GZ, Jiang HH, Bai P, Li J. 2019. Design and test of polymorphic automatic target air-blast spray test-bed. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 47(13): 260–263 (in Chinese) [刘理民, 张晓辉, 石光智, 姜红花, 白鹏, 李军. 2019. 多态自动对靶风送式喷雾试验台的设计与试验. *江苏农业科学*, 47(13): 260–263]
- Niu D, Ma SH. 2025. Design and bench test of uniform variable spray system based on PWM control. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 46(12): 146–153 (in Chinese) [牛顿, 马少辉. 2025. 基于PWM控制的均匀变量喷雾系统设计与台架试验. *中国农机化学报*, 46(12): 146–153]
- Precipito LMB, Ferreira LAI, Paduan NA, de Lima JS, de Oliveira RB. 2023. Use of the test bench for spray drift assessment under subtropical climate conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 27(3): 223–229
- Restrepo-Arias JF, Branch-Bedoya JW, Awad G. 2024. Image classification on smart agriculture platforms: systematic literature review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 13: 1–17
- Sathya Priya R, Jagathjothi N, Yuvaraj M, Suganthi N, Sharmila R, Saranya M, Karthiba L, Murali Arthanari P, Bharathi C, Senthil Kumar G, et al. 2025. Remote sensing application in plant protection and its usage in smart agriculture to hasten decision making of the farmers. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 132(2): 84
- Wang DK, Yu FH, Xu TY, Chen CL, Yao WX. 2022. Research on precision control method of variable spray system based on single neuron PID. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 43(1): 61–66 (in Chinese) [王定康, 于丰华, 许童羽, 陈春玲, 姚伟祥. 2022. 基于单神经元PID的变量喷雾系统精准控制方法研究. *中国农机化学报*, 43(1): 61–66]
- Wang HY, Yu ZY, Zhao L, Wang YY, Li JY, Sun H, He XK. 2025. Development status and prospects of facility vegetable plant protection machinery of China. *China Vegetables*, (9): 42–53 (in Chinese) [王洪宇, 余忠义, 赵磊, 王媛媛, 李佳怡, 孙海, 何雄奎. 2025. 我国设施蔬菜植保机械发展现状与展望. *中国蔬菜*, (9): 42–53]
- Wu XW. 2011. Research on spray nozzle comprehensive performance test system. Master thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University (in Chinese) [吴小伟. 2011. 雾化喷头试验台综合性能测试系统设计研究. 硕士学位论文. 南京: 南京林业大学]
- Xiao K, Hao Y, Gao GD. 2022. Design and experiment of automatic variable-distance precision spraying system in orchard. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 53(10):

- 137-145 (in Chinese) [肖珂,郝毅,高冠东. 2022. 果园自动变距精准施药系统设计与试验. 农业机械学报, 53(10): 137-145]
- Yang FB, Xue XY, Cai C, Zhou QQ, Sun Z. 2019. Atomization performance test and influence factors of aviation special centrifugal nozzle. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 50(9): 96-104 (in Chinese) [杨风波,薛新宇,蔡晨,周晴晴,孙竹. 2019. 航空专用离心喷头雾化性能试验与影响因子研究. 农业机械学报, 50(9): 96-104]
- Yin X, Wang YL, Du J, An GS, Jin CQ, Wang YX. 2022. Design and performance test of electronic control precision nozzle body based on PWM. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 38(Suppl.1): 18-26 (in Chinese) [印祥,王亚林,杜娟,安广顺,金诚谦,王艳鑫. 2022. 基于PWM的电控精量喷嘴体设计与试验. 农业工程学报, 38(增刊1): 18-26]
- Yu ZY, Geng MT, Zhao KY, Meng XS, Zhang HT, He XK. 2025b. Design and experimental operation of a swing-arm orchard sprayer. Agronomy, 15(7): 1706
- Yu ZY, He XK, Qi P, Wang ZC, Liu LM, Han L, Huang Z, Wang CL. 2024. A static laser weeding device and system based on fiber laser: development, experimentation, and evaluation. Agronomy, 14(7): 1426
- Yu ZY, He XK, Su LY, Zeng WD, Wang GF, Li YF, Song JL, Wang CL, Liu YJ, Zeng AJ. 2025c. Research progress on key technologies and equipment for air-assisted to target variable pesticide application in domestic orchards. Chinese Journal of Pesticide Science, 27(5): 799-812 (in Chinese) [余忠义,何雄奎,苏立阳,曾文定,王光夫,李扬帆,宋坚利,王昌陵,刘亚佳,曾爱军. 2025c. 果园风送对靶变量施药关键技术及装备研究进展. 农药学报, 27(5): 799-812]
- Yu ZY, Quan CX, Fang Z, He XK, Liu YJ, Gao WS, Chen YQ, Yan HJ, Zeng AJ, Song JL, et al. 2024. Key technology, equipment and prospect of digital and intelligent farmland construction. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 40(23): 1-14 (in Chinese) [余忠义,全春夏,方舟,何雄奎,刘亚佳,高旺盛,陈源泉,严海军,曾爱军,宋坚利,等. 2024. 数智农田构建关键技术装备及展望. 农业工程学报, 40(23): 1-14]
- Yu ZY, Wang GF, Zhang HT, Zhao KY, Meng XS, Guo JS, Geng MT, Luo TZ, Zhou KK, He XK. 2025a. Evaluation of spray performance of swing-arm sprayer on droplet deposition on greenhouse tomatoes. Agronomy, 15(9): 2220
- Yu ZY, Wang HY, He XK, Zhao L, Wang YY, Sun H. 2025a. Key technologies and prospects of laser weeding robots. Smart Agriculture, 7(2): 132-145 (in Chinese) [余忠义,王洪宇,何雄奎,赵磊,王媛媛,孙海. 2025a. 激光除草机器人关键技术与展望. 智慧农业, 7(2): 132-145]
- Yu ZY, Wang HY, Zhao L, Wang YY, He XK, Sun H. 2025b. Research progress on key technologies of greenhouse intelligent pesticide application robot. Chinese Journal of Pesticide Science, 27(6): 973-988 (in Chinese) [余忠义,王洪宇,赵磊,王媛媛,何雄奎,孙海. 2025b. 温室智能施药机器人关键技术研究进展. 农药学报, 27(6): 973-988]
- Zeng XZ. 2020. Quantitative analysis of pesticide spraying on pesticide application platform based on large data. Journal of Agricultural Mechanization Research, 42(9): 243-247 (in Chinese) [曾新洲. 2020. 基于大数据的施药平台农药喷洒定量分析研究. 农机化研究, 42(9): 243-247]
- Zhai CY, Zhao CJ, Wang N, Long J, Wang X, Weckler P, Zhang HH. 2018. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 34(10): 1-15 (in Chinese) [翟长远,赵春江, Wang N, Long J, 王秀, Weckler P, 张海辉. 2018. 果园风送喷雾精准控制方法研究进展. 农业工程学报, 34(10): 1-15]
- Zhang CF, Zhang M, Zou W, Zhai CY, Zhang C, Zhao CJ. 2025. Design and experiment of staggered-phase driven PWM variable-rate spray system. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 41(16): 25-34 (in Chinese) [张春风,张萌,邹伟,翟长远,张弛,赵春江. 2025. 错相位驱动PWM变量喷雾系统设计与试验. 农业工程学报, 41(16): 25-34]
- Zhang FL, Ma Y, Chen XZ, Ke C, Wang P, Liu J. 2025. Design and testing of mist volume adjustment for variable spray uniformity. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 46(5): 169-176 (in Chinese) [张峰菱,马杨,陈行政,柯超,王鹏,刘军. 2025. 变量喷雾均匀性的雾量调节设计与试验. 中国农机化学报, 46(5): 169-176]
- Zhang JC, Deng W. 2021. Experimental study on variable-rate spray based on the variable flow under constant pressure control. Journal of Agricultural Mechanization Research, 43(4): 191-195, 207 (in Chinese) [张佳琛,邓巍. 2021. 基于恒压变流控制的变量喷雾试验研究. 农机化研究, 43(4): 191-195, 207]
- Zhao JM. 2025. Design of an intelligent identification system for UAV precision pesticide application based on GPS technology. Modern Agricultural Science and Technology, (12): 157-159 (in Chinese) [赵军明. 2025. 基于GPS技术的无人机精准施药智能识别系统设计. 现代农业科技, (12): 157-159]

(责任编辑:李美娟)