

精准变量喷药技术发展现状与展望

胡 军^{1,2*} 鲍德瑞¹ 石 航¹ 刘昶希^{1,2} 李宇飞^{1,2} 付晓明^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 黑龙江 大庆 163319;

2. 农业农村部大豆机械化生产重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 精准农业是促进农业可持续发展的有效途径, 变量喷药技术作为精准农业领域的重要分支, 通过集成智能感知、决策控制、喷药质量优化技术、硬件通信技术实现农药施用的精准化、高效化, 逐渐成为解决农业生产难题的关键工具。该文从变量喷药技术的决策生成与执行、喷药方式、关键技术方面综述变量喷药系统的研究现状, 针对现阶段精准变量喷药面临的挑战, 提出多传感器融合、多目标作业、多系统集成、多策略优化、多平台应用将是未来变量喷药技术的主流发展方向, 以期为推进变量喷药技术的研究提供参考, 为智能农业装备的研发提供思路。

关键词: 变量喷药; 决策生成; 决策执行; 机器视觉; 处方图

Current status and prospect of precision variable spraying technology

Hu Jun^{1,2*} Bao Derui¹ Shi Hang¹ Liu Changxi^{1,2} Li Yufei^{1,2} Fu Xiaoming^{1,2}

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang Province, China;

2. Key Laboratory of Soybean Mechanized Production, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Daqing 163319, Heilongjiang Province, China)

Abstract: Precision agriculture serves as an effective pathway for promoting sustainable agricultural development. As a vital branch within this field, variable rate spraying technology integrates intelligent sensing, decision-making control, spray quality optimization techniques, and hardware communication technologies to achieve precise and efficient pesticide application. It is increasingly becoming a key tool for addressing challenges in agricultural production. This review outlines the current state of variable rate spraying systems, focusing on decision generation and execution, spraying methods, and key technologies. Addressing the challenges facing precision variable rate spraying today, we propose that multi-sensor fusion, multi-objective operations, multi-system integration, multi-strategy optimization, and multi-platform applications will be the mainstream development directions for future variable rate spraying technology. This research provides a reference for advancing variable rate spraying technology and insights into the development of intelligent agricultural equipment.

Key words: variable spray; decision generation; decision execution; machine vision; prescription diagram

农药作为农业生产中的重要生产资料, 被广泛用于防控农业、林业、卫生等领域的有害生物, 在保

障粮食安全、农产品质量安全及生态环境安全方面发挥着重要作用(戴小枫, 2003; 王果等, 2023)。传

基金项目: 黑龙江省重点研发计划重大项目(2023ZX01A06), 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023E106), 黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG2023-045), 中国高校产学研创新基金资助课题(2023RY059), 黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动基金项目(XYB202504)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: gcxykj@126.com

收稿日期: 2025-09-23

统均匀施药模式存在农药用量大、利用率低、植保机械作业效率低、农民劳动强度大、农产品农药残留超标等问题(何雄奎,2020;2022)。为此,自21世纪初以来,国内学者逐渐将目光投向精准施药技术领域,变量喷药技术因其在降低农药用量、提升施药精度与效率方面的潜力,受到广泛关注(赵茂程和郑加强,2003;邱白晶等,2004;傅泽田等,2007)。

在物联网感知技术、人工智能算法与工业机器人控制技术融合驱动下,作为智慧农业的核心突破口,变量喷药技术正经历着从机械化向数字化、智能化的跨越式发展,即其核心在于通过集成实时传感或处方信息,综合考虑农田环境、作物生长状态及病虫害程度等多维因素,对喷药决策进行动态调整,以实现按需、变量施药(余昭南等,2019)。本文从变量

喷药技术的决策生成与执行、喷药方式、关键技术方面综述变量喷药系统的研究现状,针对现阶段精准变量喷药技术面临的挑战,提出多传感器融合、多目标作业、多系统集成、多策略优化、多平台应用将是未来变量喷药技术的主流发展方向,以期为推进变量喷药技术的研究提供参考,为智能农业装备的研发提供思路。

1 变量喷药技术的决策生成与执行

完整的变量喷药系统包含决策生成与执行两个阶段,主要涉及脉宽调制(pulse width modulation, PWM)间歇喷雾、变浓度、变压力3种变量调节方式及识别定位、决策控制、喷药质量优化(贾卫东等,2013)、硬件通信4项关键技术(图1)。

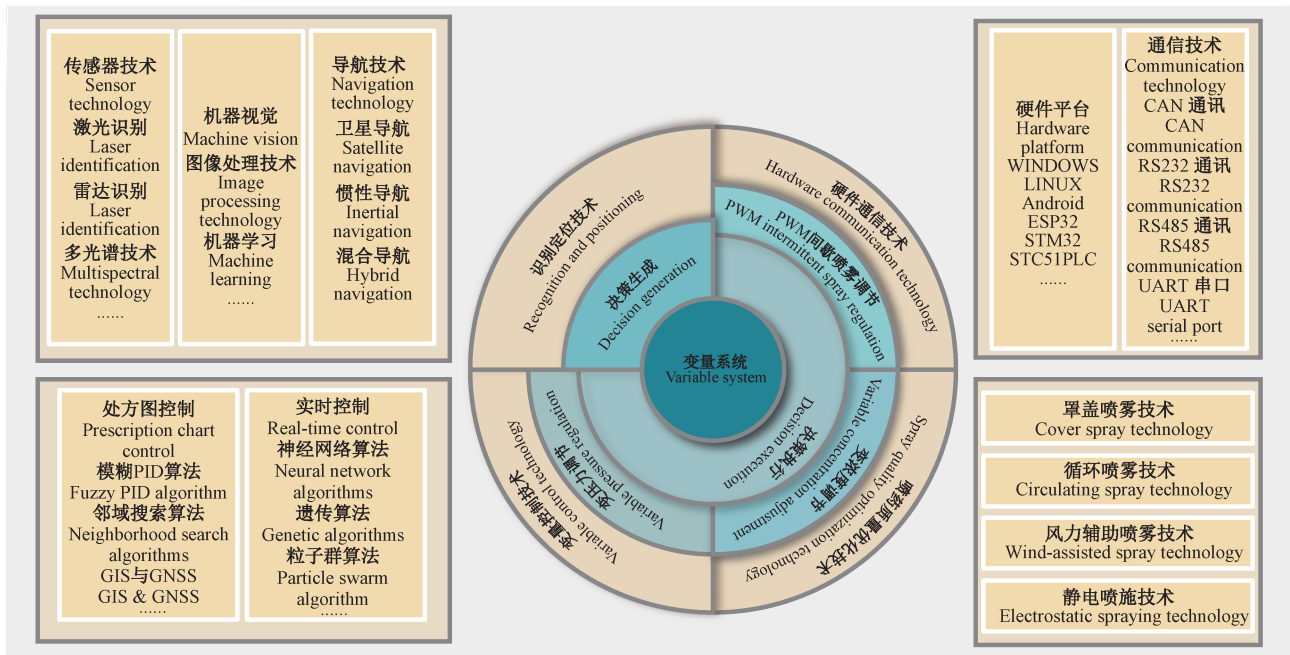


图1 完整的变量喷药系统

Fig. 1 Complete variable rate spray system

1.1 变量喷药技术的决策生成

在变量喷药技术中,决策生成直接影响实际喷药量与理论喷药量的匹配度。作业地块信息、作物长势、病虫害等关键信息既是决策指令生成的首要影响因素,也是控制系统进行差异化施药作业的重要依据。决策生成可细分为实时变量喷药控制系统和处方图变量喷药控制系统(王利霞等,2010)。目前变量喷药技术的决策生成阶段无系统的评价指标,但利用喷药过程溯源分析为其评估提供了新方向。例如,翟长远等(2024)和张焱龙(2024)搭建了精准喷药试验平台,该平台由智能控制系统、远程监

测系统和喷杆喷药机精准监控系统构成,田间试验证实该平台能全面满足大田精准作业需求;基于该平台获取的作业数据与施药效果数据建立两者的溯源关联,进而形成了从数据采集到质量评估的闭环评价体系,显著提升了变量决策生成环节的质量控制维度。

1.2 变量喷药技术的决策执行

变量喷药系统的执行阶段是整个精准施药过程的核心环节,即根据预设的处方图或实时环境感知数据,动态调整喷药参数(如流量、压力、喷幅等)并向靶标(如作物、杂草)施药。喷药设备是实现变量

喷雾系统执行阶段各项功能的物理载体和关键技术基础。国外变量喷雾设备已走向商业化进程,如约翰迪尔的变量喷雾机(Avent et al., 2024)、凯斯爱国者系列喷雾机等(李洋等, 2024)。相对于国外,国内使用无人机进行变量喷雾及远程监测技术相对成熟,中国农业无人机产业已凭借其庞大的装备规模与应用广度位居世界首位,截至2024年,全国保有量超过25万架,年作业面积累计达1.77亿公顷次,其中大疆T系列无人机、极飞P系列无人机凭借其智能性、可靠性被广泛用于植保领域(卢继成, 2024),展现出强劲的技术应用与推广能力。此外,变量喷雾技术的执行阶段也向多平台应用方向发展,即将变量喷雾系统灵活部署于地面喷杆机、无人机等不同作业载体上,从而精准适应山地、丘陵等复杂地形及多类作物的差异化施药需求,进而显著提升作业灵活性与场景适应性。因此,多平台应用不仅是执行方式的革新,更是未来智能农业装备的主要发展方向。

2 变量喷雾方式

变量喷雾决策生成后,将决策信息转发给喷雾执行机构,通过PWM间歇喷雾调节、变浓度调节和变压力调节3种方式实现变量喷雾。PWM间歇喷雾调节方式通过对电磁阀进行变频率调节达到变量喷雾的目的(邓巍等, 2009; 翟长远等, 2012),该调节方式精度较高,灵活性较强,能实时变量喷雾控制,适用于频繁变化和精准控制的场景,但设备和控制系统相对复杂,对电子控制技术要求较高(史万苹等, 2007)。变浓度调节方式则将药和水分开储存,直接注入装置或射流混药装置根据实际所需农药喷洒量进行在线混药,流速不变,通过改变混药配比达到预设喷雾量,可实现比较精细的喷洒控制,因为需要实时准确地调节浓度,所以对设备和控制系统的要求较高(乔天柱等, 2023; 陈宇翔, 2025)。变压力调节方式通过调整喷雾系统的压力来控制流量,操作简单,成本较低,易于实施,适用于一些传统的农业喷洒系统,但精细化调控能力相对较弱,难以实现复杂的变量喷雾(张佳琛等, 2015)。

2.1 PWM间歇喷雾调节

针对变量喷雾精准化程度低、喷头不能独立控制及多喷头启闭导致的管路压力波动等问题,国内外专家从多方面进行深入研究。针对在实际作业中速度变化导致的单位时间喷雾量不匹配的问题,牛顿和马少辉(2025)设计一种基于PWM控制的变量

喷雾系统,该系统通过控制试验台行驶速度模拟大田喷雾作业过程,实现了PWM间歇喷雾技术在变速情景下的喷雾流量实时变量控制。为突破传统喷头调节响应慢的瓶颈,印祥等(2022)设计了具有流量调节功能的基于PWM的电控精量喷嘴体,在不同PWM信号频率、占空比、水泵压力下该电控精量喷嘴体均能精量喷雾。针对喷头不能独立控制等问题,王亚林等(2023)设计一种基于PWM的电控精量喷雾控制系统,该系统根据接收的施药量计算出对应喷头的PWM占空比,通过实时调节各个喷头单位时间的通断时间从而实现对喷头的独立控制; Silva et al. (2018)通过对多喷头系统在不同PWM占空比下的协同控制系统研究了喷头协同工作时的总流量变化规律,并建立了以占空比为关键变量的系统总流量回归方程,为多喷头并行作业下的精准流量预测与控制提供了定量依据。为扩大流量调节范围,杨光玉等(2023)设计了一种3层智能离心式变量喷头,该喷头能进行4级流量调节。为改善雾滴的雾化效果,郭一鸣等(2019)采用3种喷头研究了PWM变量控制喷头雾化特性,发现通过提高占空比或频率可以有效提升喷头的雾化程度,使雾滴更细。为解决多喷头启闭导致的管路压力波动问题,袁常健等(2024)设计了一种相邻电磁阀异步启闭的PWM喷雾系统,该系统通过延时控制实现对电磁阀的异步启闭,有效减少了PWM间歇喷雾过程中由于电磁阀快速启闭在管路内形成的压力脉冲;张春风等(2022)设计了对靶喷雾压力波动试验平台,利用该试验平台得到了不同靶标占比下最适的回流比例区间,从而为稳定系统压力、优化对靶喷雾装置提供了关键参数依据。以上研究结果表明PWM间歇喷雾调节技术在提升喷雾作业的精度与稳定性方面成效显著,其在变量喷雾技术中应用潜力巨大。尽管当前基于该技术的变量喷雾系统成本相对较高,且多数研究仍处于实验室阶段,但这些研究充分验证了其在不同工况下的可靠性能。

将PWM间歇喷雾控制系统集成于无人机、地面装备等多样化作业平台,并对其性能进行验证,是推动PWM技术走向成熟应用的必要途径。为提升无人机变量喷雾的精准性与可控性,王玲等(2016)构建了基于无人机的PWM变量喷雾系统,该系统可对喷雾参数进行远程调控与实时监测,并通过试验明确了占空比与喷头转速对雾滴粒径的影响规律以及风速、雾滴粒径对沉积飘移的作用机制,为无人机变量施药技术的优化与精准作业提供依据。

2.2 变浓度调节

混药执行机构与系统设计是在线混药技术的物理基础。针对混药的效率与精度的问题,汪福杰(2020)设计了在线混药系统,该系统将蠕动泵作为精准取药单元,并根据实际作业需求调节药水比例,从而实现精确配比,减少了农药残留。针对单极射流混药装置存在的问题,Chen & Wang(2022)研发了一款双极混药装置,该装置提升了混药的精准性;Chen et al.(2013)构建了混合比反馈的农药混拌器,该混拌器采用PWM控制农药射流装置,基本实现了农药的快速高精度混合。控制算法的优化是实现在线混药系统高精度与快响应的核心。针对混药过程中时间滞后、非线性等控制难题,王鹏程(2021)及毛伟(2022)分别设计了改进的比例-积分-微分控制器(proportion integration differentiation, PID)算法,该算法有效提高了混药比的控制精度和混药均匀性,降低了控制系统响应时间。为优化喷药系统参数,杨亚飞等(2023)搭建了喷杆式喷雾机在线混药系统,利用该系统研究了实际喷雾作业时射流混药器对喷雾系统的影响,发现当混药系统的工作参数与射流混药装置匹配不当时,系统的药液管路会出现药液回流现象,确定了混药喷雾系统中射流混药装置的最小工作流量参数(即其在吸药与回流状态间切换的临界值);Vondricka et al.(2009)设计了直接注入式变量喷雾系统,建立了基于变浓度喷药的喷嘴快速反应模型,并利用该模型评估了中断载液流动对注射过程的影响,即中断载液流动对浓度的影响较注射对连续载流的影响小。

与PWM间歇喷雾调节方式相比,变浓度调节方式的改装成本较低,且降低了操作人员接触农药的风险,但直接注入装置成本相对较高,响应较差,射流混药装置响应较快但稳定性较差。如果通过持续优化混合装置与控制系统,提升混合精度与均匀性,该技术不仅能保障精准施药效果,还将显著降低农药残留水平。

2.3 变压力调节

关于变压力调节的变量喷药系统研究较早。例如,邱白晶等(2010)构建了以电动调节阀为变流器件的变量喷雾系统,并利用该系统试验验证调压变量系统是非线性系统。常相铖(2014)以压力式变量喷雾技术为基础,采用电动控制阀作为主要控制部件设计了压力式变量喷雾控制系统,利用该系统进行了喷雾均匀性及雾滴粒径等试验,试验结果表明流量调节范围越大,喷头迟滞性越明显,喷雾系统的

喷量由小到大调节时延迟较小,由大到小调节时延迟较大。但关于变压力调节的变量喷药系统后续研究较少。因其鲁棒性较差,逐渐被基于变浓度及PWM间歇喷雾的变量喷药系统所替代。例如,孔辉(2020)和孔辉等(2021)将变浓度及PWM间歇喷雾结合研发了基于PWM的变浓度喷施控制系统,该系统通过蠕动泵控制药液的在线混拌,利用电磁阀对离心喷头进行控制;该系统虽然初期改装成本高,但能动态适配作物需求,精准控药,实现了多种策略优化,体现了灵活、实时、精准智能化优势,有较好的应用前景。

3 变量喷药关键技术

变量喷药系统主要涉及的关键技术包括识别定位技术、决策控制技术、喷药质量优化技术和硬件通信技术。识别定位技术是变量喷药系统的“眼”,其利用光谱、红外、氢离子浓度指数、土壤温湿度等传感器获取作物生长状态与土壤环境参数,从而精准还原田间实际条件,为变量喷药提供智能决策依据,实现喷药过程的动态优化与精准调控;决策控制技术是变量喷药系统的“大脑”,根据识别定位技术获取的信息,制订精确的喷药方案,利用智能优化算法监测喷药状态,实时调整喷药状态,确保喷药准确性与一致性。喷药质量优化技术相当于变量喷药系统的“手”,负责将决策指令转化为最终动作,通过对喷头、压力、流场的优化来确保雾滴沉积均匀性好、飘移率低、冠层穿透性强等高质量的喷药效果。硬件通信技术相当于变量喷药系统的“血管”,负责将识别定位技术、决策控制技术和喷药质量优化技术各个环节连接起来,实现信息的实时传输和指令的准确执行(刘成良等,2022;刘理民等,2023)。

3.1 识别定位技术

3.1.1 3S技术

3S技术是遥感(remote sensing, RS)技术、地理信息系统(geographic information system, GIS)和全球定位系统(global positioning system, GPS)的统称,综合运用了空间信息、传感器技术、卫星定位与导航以及计算机等多学科技术,为精准农业提供了强大支持。3S技术用GPS精确定位地面位置,用GIS对地面信息进行存储、分析和辅助决策,用RS技术进行宏观控制(李锁刚,2021),从而根据不同地块的特点实施个性化的农业生产措施,最大程度地提高农作物产量和经济效益。

融合3S技术的农田信息处理系统可明显提升

处方图的解析效率与作业精度。例如, Du et al. (2018)研发了基于北斗定位的车载农田信息处理系统,该系统的网格判别误差小于0.75 m,解读变量农药喷洒处方图时间小于1 s,单位速度检测误差约为0.1 km/h。此外,利用卫星及无人机平台获取多光谱和高光谱数据,对这些数据进行反演,将其与神经网络算法结合能有效识别水稻等作物的病虫害特征。例如,孙盈蕊(2019)借助天宫二号宽波段成像仪采集了可见近红外影像、哨兵2A影像,利用无人机机载的高光谱非成像监测仪和高清成像仪采集了水稻冠层光谱数据和高清图像,将采集的这些光谱数据进行反演,再结合神经网络算法能有效识别水稻病虫害,从而对水稻病虫害进行实时监测。

3.1.2 多光谱传感器与LiDAR技术

多光谱传感器获取可见光、红外、紫外等光谱信息,利用传感器内部的转换器件将其转为信号输出。在农业中可利用多光谱传感器捕捉植物不同光谱波段的反射特性,通过反演可获得其生理生化参数。健康植物的反射光谱具有特征模式,当作物遭遇养分胁迫、水分亏缺或病虫害侵染时,其内部结构及色素含量会发生改变,导致其在关键波段的反射特征发生规律性偏移。通过分析这些光谱特征的变异即可实现对作物生长状态与病虫害发生的非接触、量化诊断与评估。通过量化传感器所获取的红光与近红外这两个波段反射率的标准化差异,经计算得到归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),通过有效反演可获得作物的叶面积指数、生物量及冠层健康状况(Basso et al., 2001; Huang et al., 2010)。光谱数据能用于监测由病虫害引起的植物生理胁迫,进而间接评估病虫害的严重程度。例如,雷定湘(2022)通过分析棉花冠层不同波段的光谱反射特征,并提取NDVI等多种植被指数,建立了预测棉蚜*Aphis gossypii*为害程度的多元线性回归模型。在实际应用中,多光谱传感器或经过滤光改进的相机常被搭载于无人机、卫星等遥感平台,从而实现对大范围田块的快速成像(孙刚等, 2018)。例如,郭伟等(2021)基于高光谱图像与植被指数构建了棉花冠层叶绿素相对含量(soil and plant analyzer development, SPAD)遥感估测模型,实现了对棉叶螨为害等级的快速、无损监测,其中SPAD-红边归一化植被指数模型估测精度最高,为田间虫情实时识别与防控提供了可靠方法。Sankaran et al. (2015)利用无人机遥感平台分别搭载普通RGB相机和改进的四通道多光谱相机获

得图像和光谱数据,通过对比分析图像与光谱数据可有效监测冬小麦出苗状况与耐寒性,体现了多光谱遥感在作物生长评估中的实际价值。

除了利用光谱信息分析作物生理状态,使用作物三维结构的精确感知同样也可以进行精准施药。在此方面,激光雷达(light laser detection and ranging, LiDAR)作为一种主动遥感技术,通过计算激光脉冲从发射到被目标反射返回的时间,能直接获取目标的精确距离与三维信息。该技术能快速生成高精度的植物三维模型,且不受光照条件影响,为实现基于冠层结构的对靶变量喷药技术提供了关键数据支持(Debnath et al., 2023)。针对果树冠层密度实时探测与建模问题及喷雾控制的难题,蔡吉晨(2018)设计了基于二维LiDAR的果树对靶变量系统,利用该系统对发芽期以及茂盛期的海棠树树冠密度进行探测试验,提出了变量喷药模型以及基于PWM控制的施药数据计算方法,并分析了不同扫描间距下喷药网格宽度对雾滴沉积特性的影响。窦汉杰等(2022)基于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的控制模型,该模型采用控制器局域网(controller area network, CAN)总线通讯协议,使用LiDAR传感器生成冠层信息模型,该模型可节约62.25%的药量。杨征鹤(2021)设计了一种基于LiDAR的温室对靶喷药机器人,该机器人可对靶喷药,并且能减少喷药量。Qiao et al. (2024)设计了一款基于3D LiDAR扫描和PWM控制的变量喷药系统,其中LiDAR对植物高度的预测误差在10%以内,PWM根据植物高度的变化实时调整喷雾量,该变量喷药系统有较高的可靠性。

3.2 变量喷药控制技术

变量喷药控制技术主要包括实时控制与处方图控制两类技术路径。实时控制技术模式依赖于在线传感器对作业目标的即时探测,在行进过程中动态获取作物冠层的结构、密度或体积等信息,并实时转化为控制信号,直接调节喷头的启闭、流量或喷雾压力,实现对植株的按需、对靶施药。该模式响应迅速,无需预先规划,尤其适合于冠层结构复杂、空间变异显著的果园环境,能有效应对单株形状、大小的不规则变化(陈泽鸿等, 2022; Gu et al., 2022; Luo et al., 2024)。处方图控制技术则基于多源信息的事前分析与决策,其核心原理是,在作业前整合田间历史数据、遥感影像、土壤及作物长势图等信息,通过地理信息系统与农艺模型生成包含不同区域施药量或配方的数字化处方图;作业时农机通过定位系统获

取实时位置,并与处方图进行匹配,从而调用预设的喷药指令,同时结合车速动态调整施药量,主要适用于地形相对规整、面积广阔的大田作物,能系统性地落实分区变量喷施策略。

3.2.1 处方图变量控制技术

不同研究团队构建的变量处方决策模型的技术路径不尽相同,其差异主要集中在空间尺度划分原则、特征参数权重分配及机器学习算法选择等关键决策环节。例如,闫春雨等(2022)对采集的图像进行二值化、栅格化、重采样等处理后可提取作物冠层覆盖度、空间分布等关键信息,从而生成用于指导变量喷药作业的处方图;尹东富等(2011)利用软件将机器视觉技术获得的杂草质心坐标及面积大小分级,并根据分级生成三维数组的喷施处方图;冉根龙(2022)将测量得到的苹果树体积作为真实数据,运用PIX4D拼图、Context Capture 三维建模、Arc GIS地统计分析等技术手段对苹果树冠层进行克里金插值分析并生成立体喷药处方图;Corbari et al.(2024)基于作物-能源-水平衡模型及卫星遥感获取的植被数据与地表温度数据生成了高动态的灌溉处方图;Wei et al.(2022)利用无人机采集成熟水稻图像,用构建的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)模型对图像中水稻穗进行识别,并生成水稻密度处方图,结果表明CNN模型在计数等能力上明显优于基于颜色和形态特征的传统算法。Chen et al.(2022)在复杂种植环境中采用基于帧的高光谱设备收集数据,利用此数据对病害处方图的生成流程进行优化。此外,在处方图控制算法上,马付远(2022)设计了基于处方图的变量施药控制系统,并于田间测定了该系统的性能;赵浣旻等(2024)通过优化控制算法对双路处方图变量喷药系统进行分区管理,致使喷药量较常规方式降低了23%。

3.2.2 实时识别变量控制技术

根据农业信息获取的领域差异,实时变量喷药的控制技术主要分为作物表型解析、冠层监测、病虫害分析与靶标识别等方向。在作物表型与冠层信息获取方面,目前主要借助可见光、高光谱、多光谱、近红外、红外热、荧光、三维、LiDAR、核磁共振和CT等成像技术获取(黄语燕等,2024)。近年来,基于表型与冠层信息的实时感知与精准作业技术发展迅速,已逐步用于实际农业场景。例如,周加超(2023)通过改进Mask R-CNN提出MSEUR-CNN实例分割模型,进而建立基于深度相机的树冠体积视觉探测方法,并融合PWM变量控制技术研制出喷药机器

人样机,该系统可实现按冠层体积精准施药,验证了深度相机实时PWM间歇喷雾作业的可行性;台少瑜(2024)设计了基于激光雷达的树冠感知系统,通过输出的点云文件对果树冠层信息进行检测,试验效果良好。

在实时变量喷药技术的控制策略上,主要分为针对作物与针对杂草的识别两类,二者在控制逻辑上有所不同。作物识别通常通过对不同时期的作物图像进行深度学习,实现精准定位,既可用于对靶喷药,也可通过识别作物间接确定杂草区域,适用于行播作物中的行间杂草防除。目前,这两类识别算法均以CNN为主流,其中YOLO(you only look once)算法因其将目标检测转化为回归问题的设计思路而在农业领域应用广泛(Reddy et al., 2024; Zheng et al., 2025)。例如,Shi et al.(2025)采用改良版YOLO11-CGB算法检测白菜幼苗,该算法的假阴性和假阳性较YOLO11n显著减少;刘金涛等(2023)提出了一种基于改进YOLOv5s的咖啡叶病虫害识别方法,该方法较原始YOLOv5s算法的平均精度提升2.9个百分点,召回率和精准度也有一定提升;姜红花等(2020)构建了基于Mask R-CNN的杂草检测模型,实现了复杂背景下作物与杂草的分割;蔺瑶等(2024)则提出EBP-YOLOv8模型,该模型在病斑识别能力和轻量化方面均优于原YOLOv8模型。Tewari et al.(2020)进一步将图像处理与喷药控制结合,设计了能根据病虫害程度调节施药量的实时变量系统,该系统的农药用量减少约33.88%。此外,实时识别为卫星信号受限区域无法精确获取车速提供了一种有效补充手段。例如, Sanchez & Zhang(2023)使用机器视觉对车速进行检测,其检测值与实际值平均绝对误差在0.036 m/s内,在RTK-GPS卫星及基站受限的区域可以精准计算车速,并使用此项技术成功进行了喷药测试。

3.3 喷药质量优化技术

变量控制技术解决了“喷多少”的问题,喷药质量优化技术主要解决“喷得好”的问题。喷药质量优化技术主要有罩盖喷雾技术(张京等,2008;魏锡攀,2021)、循环喷雾技术(殷慧子等,2021)、风力辅助喷雾技术(贾卫东等,2018)和静电喷施技术(Zhao et al., 2008; 2024)等,除了以上主要技术,喷头作为喷雾技术的核心执行部件,其类型与性能也会直接影响喷雾作业的实际效果(刘昶希,2024;刘雪美等,2025)。这些技术不是动态改变施药量,而是优化雾滴粒径与均匀度等物理特性,从而提高药液的沉积

率,减少脱靶损失。

3.3.1 罩盖喷雾技术

罩盖喷雾技术能显著提高雾滴在作物冠层中的沉积量、穿透性与分布均匀性(张宝川等,2024),其分为气力式罩盖喷雾与机械式罩盖喷雾。气力式罩盖喷雾通过风力生成装置产生辅助气流,辅助气流迫使雾滴改变原有的运动轨迹向靶作物运动,从而提高雾滴沉积量。而机械式罩盖喷雾则是在喷头外围加装物理罩盖,其通过改变局部流场来抑制雾滴飘移,从而增加靶标沉积量。

3.3.2 循环喷雾技术

在常规喷雾机具喷洒部件的相对一侧加装药物回流装置,该装置将未在植株表面沉积的残余药液回收至药液箱,实现循环利用。该技术被广泛用于葡萄等果园喷药作业中(Jamar et al.,2010;张镇涛,2020)。

3.3.3 风力辅助喷雾技术

作为提升喷雾效果与效率的重要辅助技术,风力辅助喷雾技术在现代精准施药中的应用也日益广泛,即通过利用特制风送装置产生的定向、可控气流裹挟喷头雾化后的雾滴粒子群共同形成气-雾两相流。该技术通过精确控制风场速度与方向有效增强

雾滴在靶标冠层的穿透力与沉积均匀性,同时利用气流的包裹与引导作用,显著抑制雾滴在自然气流场中的飘移损失(刘昶希等,2021)。该技术尤其适用于需要雾滴深入茂密冠层内部的果园施药,以及在有风环境下要求减少药液飘移的各类作业场景,是提高农药利用率、降低环境污染风险的有效手段。

3.3.4 静电喷雾技术

静电喷雾技术最早用于工业,其利用静电力增强液滴与目标表面的附着力,能大幅提升液滴在目标表面,尤其是叶片背面等难以触及区域的附着力和覆盖率,被广泛用于农业、工业涂装和消毒等多个领域(Zhang et al.,2023;Bueno et al.,2024)。

3.4 硬件通信技术

变量喷药控制系统是集成感知、决策与执行功能于一体的软硬件综合体,包括嵌入式系统、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、单片机等硬件平台,系统通过集成相应的通讯协议栈,借助各类通讯协议来实现系统内部与外部设备之间的可靠数据通信。该系统通常采用上下位机协同架构(图2)。

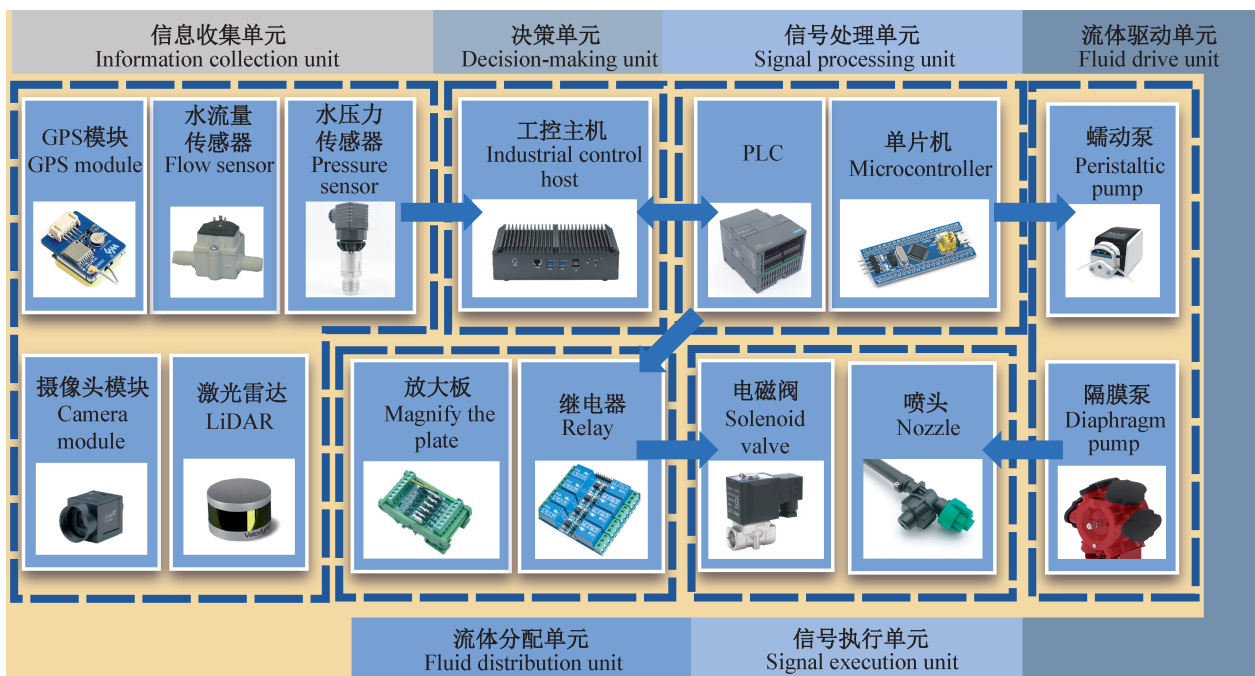


图2 变量喷药系统的关键部件

Fig. 2 Key components of the variable spraying system

3.4.1 变量喷药控制系统的设计层面

根据控制核心的不同可分为三类技术路线。一是采用以 STM32 等嵌入式控制器为核心的方案。

徐宁等(2024)设计了一种以 STM32 单片机为控制核心的分控变量喷雾控制系统,该系统根据人预设给定理论压力值与传感器反馈的实际压力值对比结

果生成控制信号,从而驱动电动调节阀,进而实现压力的闭环控制。王新东(2020)同样基于STM32设计了变量喷药系统,该系统使用无线通讯将决策喷药量以指令123的形式传输至喷药控制器,从而控制喷药。二是采用PLC控制系统。齐亚聪等(2024)设计了一种基于PLC的变量喷雾系统,该系统由PLC、触摸屏、电磁阀、药水泵、压力表及电源模块等组成,通过触摸屏发送指令,RS232通讯将指令转换为变量信号并发送给PLC,PLC接收到信号后调节电磁阀的开度,从而达到变量喷雾的目的。吕世雄等(2021)以PLC为核心设计了精准弥雾系统,该系统包括人机界面、靶弥雾子系统和电动阀开度调整子系统。三是采用上下位机协同架构。黄克飞(2023)和邹伟等(2021)通过设计上位机、下位机等硬件系统和引入Android嵌入式技术作为终端交互优化了果园喷药控制系统。殷文豪(2021)设计了以嵌入式控制器为核心的喷药控制系统,该系统完成了调试和现场试验。张奇等(2020)设计了基于数字信号处理器(digital signal processor, DSP)和单片机的杂草实时变量喷药系统,在田间复杂情况下该系统的喷药精度可达到91.4%。

3.4.2 变量喷药控制系统的通讯

CAN总线技术已成为实现精准控制的关键支撑。例如,Yuki et al.(2013)研制了基于CAN总线的喷杆喷雾机,该喷雾机通过CAN总线将实时检测的车速信号传递至主控制器,据此协同控制总体流量并调节喷雾压力,实现了调节喷雾压力与前进速度的精准匹配。Motalab & Al-Mallahi(2024)设计了一套采用CAN总线通讯的对靶喷药系统,该系统通过机器视觉方式识别靶标并获取喷药参数,可利用CAN总线通讯对喷头独立控制。

当前,农业机械中多硬件平台与操作系统间的通讯协议不统一,导致系统集成存在技术瓶颈。CAN总线技术凭借其高速数据传输与多设备协同的优势已被广泛用于农业机械的设计,然而随着节点增加,总线负载加重,这会引发传输延迟,在多传感器并发高频数据的场景下,其标准速率上限也面临挑战。未来仍需继续改进优化拓扑结构,提升带宽,以增强系统在复杂工况下的实时性与可靠性。

4 展望

虽然现阶段变量喷药技术发展迅速,但仍存在初期投资大、精准性差及缺乏关键技术,这给其应用带来一定阻力。例如,在决策生成阶段,决策模型的

泛化能力不足且优化维度单一;在决策执行阶段,传感器精度、电磁阀寿命及多系统之间的兼容性问题仍然突出。但变量喷药仍是环境可持续发展的最优解。未来该领域在技术上将趋向于以下方面:多传感器融合,提升系统整体的稳定性、可靠性、鲁棒性、灵活性,从而增强环境感知与决策能力;多目标作业,针对不同目标,指定不同的喷药方案,满足复杂农田环境的多样化需求;多系统集成,结合多种先进技术、设备、系统,实现精准、快速、高效的喷药作业,形成完整的作业体系,从而提升系统信息共享能力与整体效能;多策略优化,通过引入匹配算法,根据实时采集数据不断调整当前喷药状态,从而实现资源的最优配置;多平台应用,提高变量喷药的灵活性和普及率,拓宽技术适用范围与场景,为农业生产提供多种类的解决方案。未来变量喷药技术将深度融入现代农业装备体系,成为构建智慧农业的关键支撑,推动作业向高效化、精准化持续演进,为全球农业的可持续发展提供坚实的技术动力。

参 考 文 献 (References)

- Avent TH, Norsworthy JK, Patzoldt WL, Schwartz-Lazaro LM, Houston MM, Butts TR, Vazquez AR. 2024. Comparing herbicide application methods with See & Spray™ technology in soybean. *Weed Technology*, 38: e74
- Basso B, Ritchie JT, Pierce FJ, Braga RP, Jones JW. 2001. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural Systems*, 68(2): 97–112
- Bueno MR, Sousa Alves G, Silva SM, Hachiya TSS, Guimarães HTS, Costa GA, Gonçalves FS, Oliveira MAVG. 2024. Air assistance and electrostatic spraying in soybean crops. *Agrochemicals*, 3(2): 107–117
- Cai JC. 2018. Research on tree on-line detection method and targeted variable-rate spraying techniques based on laser-scanning sensor. PhD thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [蔡吉晨. 2018. 基于二维激光雷达的果树在线探测方法及对靶变量喷药技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Chang XC. 2014. Research on the design and test of the system variable spray control pressure. Master thesis. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University (in Chinese) [常相铖. 2014. 压力式变量喷雾控制系统设计试验研究. 硕士学位论文. 大庆: 黑龙江八一农垦大学]
- Chen FN, Zhang Y, Zhang JC, Liu LM, Wu KH. 2022. Rice false smut detection and prescription map generation in a complex planting environment, with mixed methods, based on near earth remote sensing. *Remote Sensing*, 14(4): 945
- Chen HX, Chen ZG, Zhao X, Chen MX, Chen JJ. 2013. Study on online mixing pesticide technology and automatic control and detection of concentration. *Advanced Materials Research*, 838/

- 839/840/841: 2019–2024
- Chen YX. 2025. Design and experiment of direct injection inline mixing system. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [陈宇翔. 2025. 直接注入式在线混药系统设计与试验. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Chen ZG, Wang PC. 2022. Experimental study on double-stage on-line jet mixing apparatus. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 13(3): 2142001
- Chen ZH, Chen JZ, Song SR, Sun DZ. 2022. Development and experiments of the hanging flexible targeted spray device for orchards. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(18): 11–20 (in Chinese) [陈泽鸿, 陈建泽, 宋淑然, 孙道宗. 2022. 果园悬挂式柔性靶喷雾装置研制与试验. 农业工程学报, 38(18): 11–20]
- Corbari C, Gabrieli D, Furlan L, Furlanetto J, Skokovic D, Sobrino J, Morari F. 2024. Optimizing variable rate irrigation using model and satellite-based dynamic prescription maps. *Agricultural Water Management*, 299: 108896
- Dai XF. 2003. Development strategy of plant protection science and technology in China. PhD thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [戴小枫. 2003. 中国植物保护科学技术发展战略研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Debnath S, Paul M, Debnath T. 2023. Applications of LiDAR in agriculture and future research directions. *Journal of Imaging*, 9(3): 57
- Deng W, Ding WM, He XK. 2009. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 40(1): 74–78 (in Chinese) [邓巍, 丁为民, 何雄奎. 2009. PWM间歇式变量喷雾的雾化特性. 农业机械学报, 40(1): 74–78]
- 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 YS, Chen MX, Chen ZG, Wei XH. 2018. Development of vehicular farmland information processing system based on Beidou positioning//2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). IEEE, pp. 99–103
- Fu ZT, Qi LJ, Wang JH. 2007. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 38(1): 189–192 (in Chinese) [傅泽田, 祁力钧, 王俊红. 2007. 精准施药技术研究进展与对策. 农业机械学报, 38(1): 189–192]
- Gu CC, Zou W, Wang X, Chen LP, Zhai CY. 2022. Wind loss model for the thick canopies of orchard trees based on accurate variable spraying. *Frontiers in Plant Science*, 13: 1010540
- Guo W, Li CW, Wang JX, Ding RF, Zhang WZ, Pei PC, Wang CB, Lu YH, Qiao HB. 2021. Construction of estimation models for the damage levels of cotton spider mites based on hyperspectral imaging of unmanned aerial vehicle (UAV). *Journal of Plant Protection*, 48(5): 1096–1103 (in Chinese) [郭伟, 李成伟, 王锦翔, 丁瑞丰, 张万臻, 裴鹏程, 王成博, 陆宴辉, 乔红波. 2021. 基于无人机成像高光谱的棉叶螨为害等级估测模型构建. 植物保护学报, 48(5): 1096–1103]
- Guo YM, Zhang RR, Chen LP, Li LL. 2019. Research on the atomization characteristics of the nozzle controlled by PWM. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 41(12): 145–150 (in Chinese) [郭一鸣, 张瑞瑞, 陈立平, 李龙龙. 2019. PWM变量控制喷头雾化特性研究. 农机化研究, 41(12): 145–150]
- 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]
- Huang KF. 2023. Design of variable spraying control system for orchard based on Android terminal interaction. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 45(11): 111–116 (in Chinese) [黄克飞. 2023. 基于Android终端交互的果园变量喷雾控制系统设计. 农机化研究, 45(11): 111–116]
- Huang Q, Wu WB, Zhang L, Li DD. 2010. MODIS-NDVI-based crop growth monitoring in China agriculture remote sensing monitoring system//2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing. IEEE, pp. 287–290
- Huang YY, Hu CH, Wang T, Chen YK. 2024. Research progress and prospect of indoor plant phenotype collection platform. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 52(18): 10–15 (in Chinese) [黄语燕, 胡楚涵, 王涛, 陈永快. 2024. 室内植物表型采集平台的研究进展与展望. 安徽农业科学, 52(18): 10–15]
- Jamar L, Mostade O, Huyghebaert B, Pigeon O, Lateur M. 2010. Comparative performance of recycling tunnel and conventional sprayers using standard and drift-mitigating nozzles in dwarf apple orchards. *Crop Protection*, 29(6): 561–566
- Jia WD, Li X, Zhou HT, Gong C, Ou MX. 2018. Research on the calculation method of droplet drift in air curtain boom sprayer. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 40(8): 10–15, 20 (in Chinese) [贾卫东, 李信, 周慧涛, 龚辰, 欧鸣雄. 2018. 风幕式喷杆喷雾雾滴漂移距离计算方法研究. 农机化研究, 40(8): 10–15, 20]
- Jia WD, Zhang LJ, Yan MD, Xue XY. 2013. Current situation and development trend of boom sprayer. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 34(4): 19–22 (in Chinese) [贾卫东, 张磊江, 燕明德, 薛新宇. 2013. 喷杆喷雾机研究现状及发展趋势. 中国农机化学报, 34(4): 19–22]
- Jiang HH, Zhang CY, Zhang Z, Mao WH, Wang D, Wang DW. 2020. Detection method of corn weed based on Mask R-CNN. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51(6): 220–228, 247 (in Chinese) [姜红花, 张传银, 张昭, 毛文华, 王东, 王东伟. 2020. 基于Mask R-CNN的玉米田间杂草检测方法. 农

- 业机械学报, 51(6): 220-228, 247]
- Kong H. 2020. Intelligent variable spraying system with multi-parameter modulation based on PWM. Master thesis. Zibo: Shandong University of Technology (in Chinese) [孔辉. 2020. 基于PWM多参数调制的智能变量喷施系统. 硕士学位论文. 淄博: 山东理工大学]
- Kong H, Yi LL, Lan YB, Bai JB, Han X. 2021. Design and test of variable spraying concentration regulation system based on PWM. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 43(12): 123-127 (in Chinese) [孔辉, 伊丽丽, 兰玉彬, 白京波, 韩鑫. 2021. 基于PWM的变浓度喷施控制系统设计与试验. *农机化研究*, 43(12): 123-127]
- Lei DX. 2022. Study on classification of cotton aphid damage level by multispectrum of UAV. Master thesis. Alar: Tarim University (in Chinese) [雷定湘. 2022. 无人机多光谱的棉蚜危害等级分类研究. 硕士学位论文. 阿拉尔: 塔里木大学]
- Li SG. 2021. Analysis on the application of 3S technology in land resource management. *China Southern Agricultural Machinery*, 52(12): 108-109, 114 (in Chinese) [李锁刚. 2021. 浅析3S技术在土地资源管理中的应用. *南方农机*, 52(12): 108-109, 114]
- Li Y, Yang DQ, Tao XY, Wang XL, Liu MM, Chen XY, Jia JX. 2024. Market overview of foreign self-propelled sprayer. *Agricultural Engineering*, 14(11): 12-16 (in Chinese) [李洋, 杨德秋, 陶鑫愿, 王喜龙, 刘萌萌, 陈新予, 贾晶霞. 2024. 国外自走式喷雾机市场概况. *农业工程*, 14(11): 12-16]
- Lin Y, Zeng YL, Liu JT, Li JJ, Li S, Dong H, Yang Y. 2024. Detection and identification method of grape leaf diseases based on EBP-YOLOv8. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 55(3): 322-334 (in Chinese) [蔺瑶, 曾晏林, 刘金涛, 李佳骏, 李双, 董晖, 杨毅. 2024. 基于EBP-YOLOv8的葡萄叶病害检测与识别方法研究. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 55(3): 322-334]
- Liu CL, Gong L, Yuan J, Li YM. 2022. Current status and development trends of agricultural robots. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 53(7): 1-22, 55 (in Chinese) [刘成良, 贡亮, 苑进, 李彦明. 2022. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势. *农业机械学报*, 53(7): 1-22, 55]
- Liu CX. 2024. Atomization mechanism of air induction nozzle with aerosol droplets and characteristics of anti-drift and deposition. PhD thesis. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University (in Chinese) [刘昶希. 2024. 气吸式射流喷头含气雾滴雾化机理与减飘沉积特性研究. 博士学位论文. 大庆: 黑龙江八一农垦大学]
- Liu CX, Hu J, Li YF, Zhao SX, Zhang W, Li QD. 2021. Optimization of the inner flow channel of conical wind field anti-drift spray device and anti-drift characteristics. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(22): 11-20 (in Chinese) [刘昶希, 胡军, 李宇飞, 赵胜雪, 张伟, 李庆达. 2021. 锥形风场式防飘喷雾装置内流道优化与防飘特性. *农业工程学报*, 37(22): 11-20]
- Liu JT, Li S, Li JJ, Lin Y, Zeng YL, He YT, Yang Y. 2023. Coffee leaf diseases and insect pests identification method based on improved YOLOv5s. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 54(5): 691-699 (in Chinese) [刘金涛, 李双, 李佳骏, 蔺瑶, 曾晏林, 贺壹婷, 杨毅. 2023. 基于改进YOLOv5s的咖啡叶病虫害识别方法. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 54(5): 691-699]
- Liu LM, He XK, Liu YJ, Zeng AJ, Song JL. 2023. Target pesticide application technology equipment and future developments in the control of plant pests, diseases and weeds. *Plant Health and Medicine*, 2(5): 1-16 (in Chinese) [刘理民, 何雄奎, 刘亚佳, 曾爱军, 宋坚利. 2023. 对靶施药技术装备在植物病虫害防控中的应用及展望. *植物医学*, 2(5): 1-16]
- Liu XM, Ma MR, Hou XW, Chen YF, Yu SH, Yuan J. 2025. Research progress and trend analysis of gas-liquid twin-fluid nozzle. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 56(6): 296-318 (in Chinese) [刘雪美, 马旻睿, 侯献伟, 陈月锋, 于世辉, 苑进. 2025. 气液两相流喷头研究现状与展望. *农业机械学报*, 56(6): 296-318]
- Lu JC. 2024. Popularization of mechanical spraying technology for common diseases and pests of apricot trees. *Farm Machinery*, (2): 100-102 (in Chinese) [卢继成. 2024. 杏树常见病虫害机械喷药技术推广. *农业机械*, (2): 100-102]
- Lü SX, Hu JN, Ren ZH, Hu SB. 2021. Design of control system of variable flow target mist sprayer based on PLC. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 43(12): 152-156 (in Chinese) [吕世雄, 胡佳宁, 任振辉, 胡顺斌. 2021. 基于PLC的可变量对靶弥雾喷药机控制系统设计. *农机化研究*, 43(12): 152-156]
- Luo SY, Wen S, Zhang L, Lan YB, Chen XS. 2024. Extraction of crop canopy features and decision-making for variable spraying based on unmanned aerial vehicle LiDAR data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224: 109197
- Ma FY. 2022. Research on variable spraying pesticide control system based on the prescription map. Master thesis. Changchun: Jilin Agricultural University (in Chinese) [马付远. 2022. 基于处方图的变量施药控制系统研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学]
- Mao W. 2022. Research on two-stage jet on-line mixing system based on BP-PID control. Master thesis. Zhenjiang: Jiangsu University (in Chinese) [毛伟. 2022. 基于BP-PID控制的双级射流在线混药系统研究. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学]
- Motalab MB, Al-Mallahi A. 2024. Development of a flexible electronic control unit for seamless integration of machine vision to CAN-enabled boom sprayers for spot application technology. *Smart Agricultural Technology*, 9: 100618
- 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与台架试验. *中国农机化学报*, 46(12): 146-153]
- Qi YC, Chen YF, Yang HM, Yu C, Wang XN. 2024. Design and test of variable spray system based on PLC. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 46(11): 162-168 (in Chinese) [齐亚聪, 陈毅飞, 杨会民, 喻晨, 王学农. 2024. 基于PLC的变量喷雾系统

- 的设计与试验. 农机化研究, 46(11): 162–168]
- Qiao BY, Han L, Wang ZC, Li YF, Wang LX, Han H, Liu YJ, He XK. 2024. Design and testing of an intelligent variable-rate spraying system based on LiDAR-guided application. *Crop Protection*, 184: 106874
- Qiao TZ, Yang YF, Shao WQ, Jiang ZL, Lin T. 2023. Research status of online drug mixing technology at home and abroad. *Modern Agricultural Machinery*, (6): 123–125 (in Chinese) [乔天柱, 杨亚飞, 邵万齐, 蒋周良, 林彤. 2023. 在线混药技术国内外研究现状. 现代农机, (6): 123–125]
- Qiu BJ, Li HF, Wu CD, Shi CJ, Zhou N. 2004. On variable-rate spraying equipment and its key technology. *Journal of Jiangsu University (National Science Edition)*, 25(2): 97–101 (in Chinese) [邱白晶, 李会芳, 吴春笃, 史春建, 周宁. 2004. 变量喷雾装备及关键技术的探讨. 江苏大学学报(自然科学版), 25(2): 97–101]
- Qiu BJ, Li K, Shen CJ, Xu XC, Mao HP. 2010. Experiment on response characteristics of variable-rate continuous spraying system. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 41(9): 32–35, 79 (in Chinese) [邱白晶, 李坤, 沈成杰, 徐溪超, 毛罕平. 2010. 连续可变量喷雾系统响应特性试验. 农业机械学报, 41(9): 32–35, 79]
- Ran GL. 2022. Research on the generation technology of spraying three-dimensional prescription map of apple orchard based on aerial photography 3D modeling. Master thesis. Lianyungang: Jiangsu Ocean University (in Chinese) [冉根龙. 2022. 基于航拍三维建模苹果园喷药立体处方图生成技术研究. 硕士学位论文. 连云港: 江苏海洋大学]
- Reddy J, Niu HY, Scott JLL, Bhandari M, Landivar JA, Bednarz CW, Duffield N. 2024. Cotton yield prediction *via* UAV-based cotton boll image segmentation using YOLO model and segment anything model (SAM). *Remote Sensing*, 16(23): 4346
- Sanchez PR, Zhang H. 2023. Precision spraying using variable time delays and vision-based velocity estimation. *Smart Agricultural Technology*, 5: 100253
- Sankaran S, Khot LR, Carter AH. 2015. Field-based crop phenotyping: multispectral aerial imaging for evaluation of winter wheat emergence and spring stand. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118: 372–379
- Shi H, Liu CX, Wu M, Zhang H, Song H, Sun H, Li YF, Hu J. 2025. Real-time detection of Chinese cabbage seedlings in the field based on YOLO11-CGB. *Frontiers in Plant Science*, 16: 1558378
- Shi WP, Wang X, Wang XZ, Zhuang WD, Wang C. 2007. Study on variable rate spraying technology based on pulse width modulation and volume control. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 29(10): 125–127 (in Chinese) [史万莘, 王熙, 王新忠, 庄卫东, 汪春. 2007. 基于PWM控制的变量喷药技术体系及流量控制试验研究. 农机化研究, 29(10): 125–127]
- Silva JE, Zhu HP, da Cunha JPAR. 2018. Spray outputs from a variable-rate sprayer manipulated with PWM solenoid valves. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(3): 527–534
- Sun G, Huang WJ, Chen PF, Gao S, Wang X. 2018. Advances in UAV-based multispectral remote sensing applications. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 49(3): 1–17 (in Chinese) [孙刚, 黄文江, 陈鹏飞, 高帅, 王秀. 2018. 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展. 农业机械学报, 49(3): 1–17]
- Sun YR. 2019. Rice pest and disease monitoring based on multi-scale remote sensing technology. Master thesis. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese) [孙盈蕊. 2019. 基于多尺度遥感技术的水稻病虫害监测研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学]
- Tai SY. 2024. Research and experiment on variable spray system based on canopy measurement by LiDAR. Master thesis. Chongqing: Southwest University (in Chinese) [台少瑜. 2024. 基于激光雷达树冠测量的变量喷雾系统研究与试验. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学]
- Tewari VK, Pareek CM, Lal G, Dhruw LK, Singh N. 2020. Image processing based real-time variable-rate chemical spraying system for disease control in paddy crop. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4: 21–30
- Vondricka J, Schulze Lammers P. 2009. Evaluation of a carrier control valve for a direct nozzle injection system. *Biosystems Engineering*, 103(1): 43–48
- Wang FJ. 2020. Design of online mixing system and performance test of mixed pesticides for the plant protection machine. Master thesis. Changsha: Hunan Agricultural University (in Chinese) [汪福杰. 2020. 植保机在线混药系统设计与混药性能试验研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学]
- Wang G, Zhang X, Chen X, Liu DJ, Gong Y. 2023. Current research status and prospects of precision pesticide application technology and device. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 44(6): 68–73 (in Chinese) [王果, 张晓, 陈晓, 刘德江, 龚艳. 2023. 农药精准施用技术与装备研究现状及展望. 中国农机化学报, 44(6): 68–73]
- Wang L, Lan YB, Hoffmann W, KFritz B, Chen D, Wang SM. 2016. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 47(1): 15–22 (in Chinese) [王玲, 兰玉彬, WClint Hoffmann, Bradley KFritz, 陈度, 王书茂. 2016. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究. 农业机械学报, 47(1): 15–22]
- Wang LX, Zhang SH, Ma CL, Xu Y, Qi JT, Wang W. 2010. Design of variable spraying system based on ARM. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(4): 113–118 (in Chinese) [王利霞, 张书慧, 马成林, 徐岩, 齐江涛, 王薇. 2010. 基于ARM的变量喷药控制系统设计. 农业工程学报, 26(4): 113–118]
- Wang PC. 2021. Research on two-stage jet on-line drug mixing system based on fuzzy PID control. Master thesis. Zhenjiang: Jiangsu University (in Chinese) [王鹏程. 2021. 基于模糊PID控制的双级射流在线混药系统研究. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学]
- Wang XD. 2020. Design of variable spraying control system based on STM32. Master thesis. Changchun: Jilin Agricultural University (in Chinese) [王新东. 2020. 基于STM32的变量喷药控制系统设计. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学]
- Wang YL, Yin X, Yang S, Yao HB, Ma WP, Jin CQ. 2023. Design and

- experiment of electronically controlled precision spray control system based on PWM. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 44(5): 81–88 (in Chinese) [王亚林, 印祥, 杨爽, 姚海斌, 马文鹏, 金诚谦. 2023. 基于PWM的电控精量喷雾控制系统设计与试验. *中国农机化学报*, 44(5): 81–88]
- Wei LL, Luo YS, Xu LZ, Zhang Q, Cai QB, Shen MJ. 2022. Deep convolutional neural network for rice density prescription map at ripening stage using unmanned aerial vehicle-based remotely sensed images. *Remote Sensing*, 14(1): 46
- Wei XP. 2021. CFD simulation and experiment of shields spray system. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [魏锡攀. 2021. 罩盖式喷雾系统仿真分析及试验研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Xu N, Hu MY, Sang YY, Ai QH, Cao ZK. 2024. Design and test of sub-controlled variable spray system based on STM32. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 45(8): 107–111 (in Chinese) [徐宁, 胡敏英, 桑永英, 艾庆贺, 曹泽坤. 2024. 基于STM32的分控变量喷雾系统设计与试验. *中国农机化学报*, 45(8): 107–111]
- Yan CY, Li WH, Lan YB, Hu CX, Lu LQ, Zhao J. 2022. Study on cotton defoliation effect monitoring and formulation map generation based on multi-spectral remote sensing of UAV. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 45(4): 799–808 (in Chinese) [闫春雨, 黎文华, 兰玉彬, 胡传旭, 鲁力群, 赵静. 2022. 基于无人机多光谱遥感的棉花脱叶效果监测及处方图生成研究. *南京农业大学学报*, 45(4): 799–808]
- Yang GY, Lan YB, Geng LJ, Zhang BY, Yi LL, Han X. 2023. Experimental research on three-layer intelligent centrifugal variable sprinkler. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 45(8): 155–160 (in Chinese) [杨光玉, 兰玉彬, 耿丽杰, 张博远, 伊丽丽, 韩鑫. 2023. 三层智能离心式变量喷头试验研究. *农机化研究*, 45(8): 155–160]
- Yang YF, Wang GQ, Wang L. 2023. Experimental study on online mixing of spray-boom sprayer. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 44(11): 38–42 (in Chinese) [杨亚飞, 王国强, 王力. 2023. 喷杆式喷雾机在线混药试验研究. *中国农机化学报*, 44(11): 38–42]
- Yang ZH. 2021. Design and experiment of greenhouse target spraying robot based on LiDAR. Master thesis. Urumqi: Xinjiang Agricultural University (in Chinese) [杨征鹤. 2021. 基于LiDAR的温室对靶喷雾机器人设计与试验. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学]
- Yin DF, Chen SR, Pei WC, Shen BG. 2011. Design of map-based indoor variable weed spraying system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(4): 131–135 (in Chinese) [尹东富, 陈树人, 裴文超, 沈宝国. 2011. 基于处方图的室内变量喷药除草系统设计. *农业工程学报*, 27(4): 131–135]
- Yin HZ, Xu J, Xi XB, Zhang RH. 2021. On the research and development of tunnel spray technology. *Agricultural Equipment & Technology*, 47(3): 4–6 (in Chinese) [殷慧子, 徐金, 奚小波, 张瑞宏. 2021. 隧道喷雾技术研究与展望. *农业装备技术*, 47(3): 4–6]
- Yin WH. 2021. Design and experiment of control system of wolfberry intelligent spraying machine. Master thesis. Zhenjiang: Jiangsu University (in Chinese) [殷文豪. 2021. 枸杞智能喷药机控制系统的研究与试验. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学]
- 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 [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 ZN, Hu J, Chu X, Liu CL, Liu QL, Sun SY. 2019. Research status and prospect of the spray control method of variable spray system. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 40(9): 72–79 (in Chinese) [余昭南, 胡军, 初鑫, 刘崇林, 刘权磊, 孙舒仪. 2019. 变量喷雾系统的喷雾控制方式研究现状及展望. *中国农机化学报*, 40(9): 72–79]
- Yuan CJ, Zhang LT, Han H, He XK, Liu YJ. 2024. The PWM spray characteristic test of the asynchronous opening and closing of solenoid valve. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 46(2): 139–144 (in Chinese) [袁常健, 张兰婷, 韩虎, 何雄奎, 刘亚佳. 2024. 电磁阀异步启闭的PWM喷雾系统设计与试验. *农机化研究*, 46(2): 139–144]
- Yuki S, Yasuda H, Matsubayashi T, Ishizuka H. 2013. Development of tractor automatic controlled boom sprayer using CAN-BUS//4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry. Espoo: Finland, pp. 264–269
- Zhai CY, Wang X, Mi YR, Fan PF, Ma YB. 2012. Nozzle flow model of PWM variable-rate spraying. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 43(4): 40–44 (in Chinese) [翟长远, 王秀, 密雅荣, 范鹏飞, 马永兵. 2012. PWM变量喷雾喷头流量模型. *农业机械学报*, 43(4): 40–44]
- Zhai CY, Zhang YL, Zou W, Song J, Han CJ, Dou HJ. 2024. Design and test of precision variable-rate spray monitoring and control system based on pesticide spraying traceability. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 55(2): 160–169 (in Chinese) [翟长远, 张焱龙, 邹伟, 宋健, 韩长杰, 窦汉杰. 2024. 基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统设计与试验. *农业机械学报*, 55(2): 160–169]
- Zhang BC, Zhao JG, Ma ZK, You GY, Wang CW, Cui WJ. 2024. Circular double arc drift-proof cover design and optimization of drift-proof performance parameters. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 45(10): 86–93 (in Chinese) [张宝川, 赵建国, 马志凯, 尤广宇, 王春伟, 崔文君. 2024. 环形双圆弧防飘罩设计与防飘性能参数优化. *中国农机化学报*, 45(10): 86–93]
- Zhang CF, Zhai CY, Zhao XG, Zou W, Zhang M, Zhao CJ. 2022. Experimental study on the pressure fluctuation characteristics of target spray system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(18): 31–39 (in Chinese) [张春风, 翟长远, 赵学观, 邹伟, 张萌, 赵春江. 2022. 对靶喷药系统压力波动特性的试验研究. *农业工程学报*, 38(18): 31–39]
- Zhang J, He XK, Tao L, Song JL. 2008. Research on the application effect of curved cover spray technology after improvement// *Research Progress of China's Agricultural System* 2008. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, pp. 432–435 (in Chinese)

- [张京, 何雄奎, 陶雷, 宋坚利. 弧形罩盖喷雾技术改进后应用效果研究//中国农作制度研究进展2008. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, pp. 432-435]
- Zhang JC, Deng W, Zhang Y. 2015. Status quo on research of constant pressure and variable-rate spraying technology. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 37(2): 257-260 (in Chinese) [张佳琛, 邓巍, 张燕. 2015. 恒压变量喷雾技术研究现状. *农机化研究*, 37(2): 257-260]
- Zhang PL, Gao WG, Zhao C, Wang XH, Meng XZ. 2023. A parameterized deposition rate model of electrostatic spraying rotating bell atomizer. *Journal of Coatings Technology and Research*, 20(3): 1019-1037
- Zhang Q, Xu YL, Wang XD, Meng XT, He R, Du JQ. 2020. Real-time variable spraying system based on DSP and single chip microcomputer. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 42(7): 138-143 (in Chinese) [张奇, 徐艳蕾, 王新东, 孟笑天, 何润, 杜家奇. 2020. 基于DSP和单片机的实时变量喷药系统设计. *农机化研究*, 42(7): 138-143]
- Zhang YL. 2024. Design of precision spraying monitoring and control system for field boom sprayer. Master thesis. Urumqi: Xinjiang Agricultural University (in Chinese) [张焱龙. 2024. 喷杆喷药机精准喷药监控系统设计. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学]
- Zhang ZT. 2020. Design and test of "expanding and shrinking door" type liquid recycling orchard air-fed sprayer. Master thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [张镇涛. 2020. "扩缩门"型药液回收式果园风送喷雾机的设计与试验. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- Zhao DN, Cooper S, Chima P, Wang GB, Zhang LC, Sun BS, Zhang XJ, Lan YB. 2024. Development and characterization of a contact-charging electrostatic spray UAV system. *Agriculture*, 14(3): 467
- Zhao HM, Li YQ, Li ZB, Liu ZG, Pu YY, Qiu XW. 2024. Experimental on optimization of field precision spray prescription based on dual-way control. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 45(6): 113-118 (in Chinese) [赵浣旻, 李亚芹, 李志博, 刘兆光, 蒲岩岩, 邱新伟. 2024. 基于双路控制的农田精准喷药处方优化试验. *中国农机化学报*, 45(6): 113-118]
- Zhao MC, Zheng JQ. 2003. Tree crown recognition and precision toward-target pesticide application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 19(6): 150-153 (in Chinese) [赵茂程, 郑加强. 2003. 树形识别与精确对靶施药的模拟研究. *农业工程学报*, 19(6): 150-153]
- Zhao S, Castle GSP, Adamiak K. 2008. Factors affecting deposition in electrostatic pesticide spraying. *Journal of Electrostatics*, 66(11/12): 594-601
- Zheng HW, Liu CJ, Zhong L, Wang J, Huang JM, Lin F, Ma X, Tan SY. 2025. An Android-smartphone application for rice panicle detection and rice growth stage recognition using a lightweight YOLO network. *Frontiers in Plant Science*, 16: 1561632
- Zhou JC. 2023. Research on key technologies of precise spraying of fruit tree spraying robots based on RGB-D camera. Master thesis. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology (in Chinese) [周加超. 2023. 基于深度相机的果树喷药机器人精准喷施关键技术研究. 硕士学位论文. 柳州: 广西科技大学]
- Zou W, Wang X, Song J, Feng QC, Dou HJ. 2021. Design of variable spraying control system based on Android terminal interaction. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 43(3): 95-100 (in Chinese) [邹伟, 王秀, 宋健, 冯青春, 窦汉杰. 2021. 基于Android终端交互的果园变量喷药控制系统设计. *农机化研究*, 43(3): 95-100]

(责任编辑:张俊芳)