

基于土壤墒情的农业灌溉精准控制技术研究

葛海年

日照市岚山区安东卫街道办事处 山东 日照 276807

摘要: 本文系统梳理了土壤墒情的基本概念及其在农业灌溉中的核心地位,深入分析了当前主流的土壤墒情监测技术(包括传感器法、遥感法及模型估算法)的原理、优缺点及适用场景;重点探讨了基于实时墒情数据的智能灌溉决策模型,涵盖阈值控制、作物需水模型耦合、人工智能算法应用等策略;并结合物联网、边缘计算、数字孪生等新兴信息技术,构建了“感知—决策—执行”一体化的精准灌溉控制系统架构。最后,文章总结了该技术体系在实际应用中面临的挑战,并对未来发展方向进行了展望,旨在为智慧农业与节水农业的发展提供理论支撑与实践参考。

关键词: 土壤墒情; 精准灌溉; 水分传感器; 智能决策; 物联网; 智慧农业

引言

农业是全球最大的淡水消耗部门,其用水量约占全球淡水总消耗量的70%以上。然而,在我国乃至世界许多地区,水资源时空分布不均、利用效率低下等问题日益突出。随着人口增长与气候变化的双重压力,如何在有限的水资源条件下实现农业的高产、高效、可持续发展,已成为全球性战略课题。精准农业(Precision Agriculture)理念的兴起为此提供了新的解决思路。精准灌溉作为精准农业的核心组成部分,其核心目标在于“在正确的时间、正确的地点,以正确的水量供给作物所需”。而实现这一目标的关键前提,是对作物根区土壤水分状况——即“土壤墒情”的准确、实时、动态感知。土壤墒情是指土壤中水分的含量及其有效性状态,它直接决定了作物可利用的水分资源,是连接气象、土壤、作物三者水分关系的枢纽变量。因此,构建一套以土壤墒情为驱动的精准灌溉控制技术体系,对于优化水资源配置、提升作物水分利用效率(WUE)、降低生产成本、保护生态环境具有重大现实意义。

1 土壤墒情的概念、表征与监测技术

1.1 土壤墒情的内涵与重要性

土壤墒情并非一个单一的物理量,而是一个综合反映土壤水分状态的动态指标体系。在农业应用中,通常关注以下几个关键参数:

体积含水率(θ_v): 单位体积土壤中所含水分的体积,是工程应用中最常用的直接测量指标。

质量含水率(θ_m): 单位质量干土中所含水分的重量。

土壤水势(ψ): 衡量土壤水分能量状态的指标,更能反映水分对作物的有效性。其中,基质势(ψ_m)是植物吸水的主要阻力来源。

相对有效含水量(REW): 当前含水量与田间持水量

之差占田间持水量与萎蔫点含水量之差的比列,用于评估作物水分胁迫程度。

准确掌握这些参数,是制定科学灌溉制度的基础。例如,当土壤水势低于作物的临界吸水阈值时,即使土壤含水量看似不低,作物也可能出现生理干旱。因此,现代精准灌溉越来越倾向于采用能反映水分有效性的水势传感器,而非仅依赖含水率。

1.2 土壤墒情监测技术体系

1.2.1 原位传感器监测法

这是目前应用最广泛、精度最高的田间墒情监测手段,主要分为两类:(1)基于介电常数的传感器:如时域反射仪(TDR)、频域反射仪(FDR)和电容式传感器。它们通过测量电磁波在土壤中的传播速度或频率响应来反演土壤介电常数,进而计算出体积含水率。此类传感器安装便捷、可连续自动监测,但易受土壤温度、盐分、质地等因素干扰,需进行本地化校准。(2)基于热脉冲或张力的传感器:热脉冲传感器通过测量加热前后温度变化来推算含水率;张力计(Tensiometer)则直接测量土壤基质势^[1]。张力计尤其适用于指导灌溉,因为其读数(以kPa或cbar为单位)能直观反映作物根系吸水的难易程度。例如,多数大田作物在张力计读数达到30-50kPa时即需灌溉。近年来,多参数集成传感器(同时监测水分、温度、电导率EC甚至氮磷钾)的发展,为全面评估土壤环境提供了可能。

1.2.2 遥感监测法

遥感技术能够提供大范围、周期性的土壤墒情信息,适用于区域尺度的水资源管理和宏观决策。一是光学遥感:利用植被指数(如NDVI)间接反演土壤水分,但易受云层、植被覆盖度影响。二是微波遥感:特别是主动微波(雷达)和被动微波(辐射计),能穿透云层和部分

植被,对地表粗糙度和土壤介电特性敏感,是当前研究热点。如SMAP、Sentinel-1等卫星数据已被广泛应用于区域墒情制图。遥感的优势在于空间覆盖广,但其空间分辨率(通常数百米至公里级)难以满足田块尺度的精准灌溉需求,且反演模型复杂,精度受限于地表异质性。

1.2.3 模型估算法

通过建立土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统模型,结合气象数据、土壤属性和作物参数,模拟土壤水分动态。常用模型包括AquaCrop、SWAP、HYDRUS等。模型法成本低、可预测未来墒情,但其精度高度依赖于输入数据的质量和模型参数的本地化校准,存在“垃圾进,垃圾出”的风险。

综合来看,未来趋势是构建“点-面-模型”融合的墒情监测网络:以高精度原位传感器为“点”提供地面真值,以遥感数据为“面”提供空间格局,以机理/数据驱动模型为“脑”进行时空插值与预测,从而实现全田块、全天候的墒情精准感知。

2 基于土壤墒情的智能灌溉决策模型

2.1 阈值控制策略

这是最基础也是最常用的策略。根据作物不同生育期的需水特性,设定土壤水分(或水势)的上下限阈值。当监测值低于下限时启动灌溉,达到上限时停止。例如:播种期:维持较高墒情以利出苗。营养生长期:可适当控水以促进根系下扎。开花结实期:需保持充足水分以防落花落果。成熟期:适度控水以利籽粒灌浆和收获。阈值的设定需结合土壤类型(砂土持水能力弱,黏土反之)、作物种类及气候条件,通常通过田间试验或专家经验确定。

2.2 作物需水模型耦合策略

更高级的决策模型将实时墒情数据与作物需水模型相结合。经典的Penman-Monteith公式可计算参考作物蒸散量(ET_0),再乘以作物系数(K_c)得到实际作物蒸散量(ET_c)。灌溉量则根据 ET_c 、有效降雨量、当前土壤储水量及计划湿润层深度进行动态计算:

$$I = ET_c - P_e - \Delta S$$

其中, I 为净灌溉量, P_e 为有效降雨量, ΔS 为土壤储水量变化。此类模型能实现按需供水,但对气象数据连续性和作物系数动态调整要求较高。

2.3 数据驱动与人工智能策略

随着大数据与人工智能技术的迅猛发展,数据驱动方法正逐步改变传统灌溉决策模式。机器学习算法能够从海量历史数据中自动挖掘墒情、气象、作物生长与灌溉响应之间的复杂非线性关系,无需依赖严格的物理假设。例如,支持向量回归(SVR)和随机森林(RF)可

用于建立土壤含水率与最优灌溉量之间的映射模型;而长短期记忆网络(LSTM)等深度学习模型则擅长处理时间序列数据,能够结合过去数日的墒情变化趋势与未来天气预报,提前预测需水高峰并生成灌溉处方^[2]。更具前瞻性的是强化学习(RL)方法,它将灌溉过程建模为马尔可夫决策过程,通过与虚拟或真实环境的反复交互,自主学习在不确定条件下最大化作物产量或水分利用效率的最优策略。尽管AI模型展现出强大的适应性与预测能力,但其“黑箱”特性使得决策过程缺乏可解释性,且对训练数据的质量和数量高度敏感。未来需在模型透明度、泛化能力与边缘部署效率之间寻求平衡,推动AI从“实验室智能”走向“田间实用”。

3 精准灌溉控制系统架构与关键技术集成

3.1 系统总体架构

现代精准灌溉控制系统已从单一设备控制演变为集感知、传输、决策、执行于一体的智能化平台。其典型架构采用“云-边-端”三层设计:感知层由部署于田间的各类传感器(墒情、气象、视频等)、执行器(电磁阀、水泵)及本地网关构成,负责原始数据采集与指令执行;边缘层依托部署在农场本地的计算节点,承担数据预处理、异常检测、本地快速决策(如暴雨前紧急停灌)及协议转换等功能,有效缓解云端压力并降低网络延迟;平台层则运行于云端服务器,提供大数据存储、高级分析(如AI模型训练与优化)、可视化监控、远程控制及用户交互服务^[3]。这种分层架构既保证了系统的实时性与可靠性,又支持灵活扩展与远程运维,为大规模推广应用奠定了技术基础。

3.2 关键技术集成

精准灌溉系统的高效运行离不开多项前沿技术的深度融合。物联网(IoT)技术,特别是低功耗广域网(LPWAN)如LoRa和NB-IoT,解决了农田环境中远距离、低功耗、低成本的数据传输难题,使得广袤田野中的传感器节点能够稳定联网。数字孪生技术则通过构建农田的虚拟镜像,实时映射物理世界的墒情分布、作物长势与灌溉状态,并在数字空间中模拟不同灌溉方案的预期效果,为管理者提供“先试后行”的决策支持。在执行层面,电动或液压控制阀、变频水泵与水肥一体化设备的普及,确保了灌溉指令能够被精确、节能地执行。此外,面向农户的移动应用与Web平台通过图形化界面、语音提示和智能报警功能,大幅降低了技术使用门槛,使精准灌溉真正“看得见、摸得着、用得起”。

3.3 典型应用场景

不同农业生产场景对精准灌溉系统提出了差异化需

求。在大田作物种植区,通常采用网格化布设墒情传感器,结合无人机多光谱遥感获取的作物长势信息,实现分区变量灌溉,避免“一刀切”式供水。设施农业(如温室、大棚)由于环境高度可控,可部署高密度传感网络,并结合作物生理传感器(如茎流计、叶温仪),实现对单株或小区的超高精度微灌控制,显著提升资源利用效率^[4]。对于果园与经济林等多年生木本作物,灌溉重点在于深层土壤水分管理,系统需具备监测60cm甚至1m以下土层墒情的能力,并通过滴灌或微喷系统实现单株精准供水,兼顾节水与稳产目标。这些多样化应用场景共同推动了精准灌溉技术向专业化、定制化方向发展。

4 应用挑战与未来展望

4.1 应用挑战

尽管基于土壤墒情的精准灌溉技术展现出巨大潜力,但在实际推广中仍面临多重障碍。首先是成本问题,高精度传感器、通信模块及系统集成的初始投入较高,对小规模农户构成经济压力,亟需通过规模化应用、国产化替代和政策补贴降低成本。其次是技术复杂性,系统的安装、校准、维护及数据分析对用户技术素养要求较高,市场亟需开发操作简便、维护便捷的“傻瓜式”产品。此外,行业标准缺失导致不同厂商设备间协议不兼容、数据格式不统一,“信息孤岛”现象严重,阻碍了系统互联互通。同时,现有模型多针对特定区域或作物开发,跨区域、跨作物迁移能力弱,普适性不足。最后,在偏远无电网覆盖的农田,持续能源供应仍是难题,需大力发展太阳能、风能等绿色供能方案。

4.2 未来展望

面向未来,精准灌溉技术将朝着多源信息深度融合、轻量化智能部署、可信数据治理与服务体系完善等方向演

进。一方面,墒情数据将与作物表型、气象预报、市场价格等多维信息融合,实现水、肥、药、经济效益的多目标协同优化;另一方面,通过模型压缩、知识蒸馏等技术,推动AI模型在边缘设备上的高效运行,实现“端侧智能”。区块链技术有望用于确保灌溉数据的真实性与可追溯性,服务于农业保险、碳汇交易等新兴业态。更重要的是,需建立健全的技术推广、运维服务与金融支持体系,打通从技术研发到田间落地的“最后一公里”,让精准灌溉真正惠及广大农民。

5 结语

基于土壤墒情的农业灌溉精准控制技术,是破解水资源约束、推动农业绿色转型的关键抓手。通过构建“高精度感知—智能化决策—自动化执行”的技术闭环,不仅能显著提升灌溉水利用效率,还能促进作物增产提质、减少环境污染。当前,该技术已从单一传感器应用迈向多技术融合的系统化发展阶段。未来,随着物联网、人工智能、数字孪生等新一代信息技术的深度融合,以及成本下降与服务体系的完善,精准灌溉必将从“高端示范”走向“普惠应用”,为保障国家粮食安全、水安全与生态安全作出更大贡献。

参考文献

- [1]王炜,晋华.基于土壤墒情的精准自动化灌溉系统研究[J].海河水利,2021,(01):115-117.
- [2]许盼盼.基于土壤墒情监测的灌溉水有效利用系数测算方法研究[J].山西水土保持科技,2022,(02):17-22.
- [3]刘晓艳.基于土壤墒情监测的农田灌溉系统研究[J].自动化应用,2020,(09):1-3.
- [4]陈俊武.基于物联网的岭南丘陵地带土壤墒情预测平台研发及灌溉应用[D].广州大学,2022.