

水肥一体化系统的研究与发展

冀俊豹 贺伟夕 苏宁 赵立强*

河北科技师范学院 河北秦皇岛 066004

DOI:10.12238/ems.v7i9.15213

[摘要] 农业生产的可持续性发展和资源利用效率的提高是当今社会面临的重要挑战之一。水肥一体化系统作为一种现代化的农业管理技术，旨在实现对水资源和肥料的合理利用，提高农作物产量和品质，同时减少对环境的负面影响，实现可持续发展。目前随着人工智能、物联网等科学技术的不断进步，水肥一体化系统的设计与开发向着越来越智能化和精准化的方向发展。未来的研究方向包括优化系统算法、提高系统稳定性和可靠性、拓展系统应用场景等。本文阐述了水肥一体化技术研究背景和意义，总结了种植水肥一体化系统的国内外发展现状，提出了目前技术发展存在的问题并概述了该技术的发展前景。

[关键词] 智能化；可持续发展；水肥一体化

1. 引言

1.1 研究背景

水肥一体化技术作为一种新型的农业灌溉与施肥方式，已被广泛应用于多种农作物的种植中。随着全球人口的增长和粮食需求的增加，农业生产面临着日益严峻的挑战，而水和肥是影响农业生产效益和生态环境的关键因素。我国水资源总量仅占全球的6%，每年农业灌溉水资源的缺口超过300亿立方米，导致大约667万公顷的耕地无法得到有效灌溉^[1]。传统农业生产中，化肥的施用往往过量或不均匀，导致了肥料利用率低下，同时也带来了环境污染（如水体富营养化、温室气体排放等问题），且由于化肥使用过量且利用效率低下，化肥的资源浪费问题突出。水资源与肥料的管理已成为制约农业可持续发展的瓶颈。因此，推动节水农业发展、实施化肥使用量零增长行动，以及推广水肥一体化技术，是实现农业可持续发展的关键途径。

1.2 研究意义

水肥一体化系统的研究具有重要的理论和实践意义，尤其在现代农业面临水资源紧缺、化肥过量使用、环境污染等问题时，水肥一体化技术提供了一种高效、可持续的解决方案。我国当前的农业发展仍以传统的粗放模式为主，农业用水量占全国总供水量的70%，其中90%的农业用水用于灌溉。化肥在农业生产中起着关键作用，是提高农作物产量的主要手段。然而，由于大水漫灌和施肥时未能合理配比水肥浓度，导致了肥料利用率低、土壤养分失衡以及土壤盐渍化

等问题。随着物联网、人工智能等关键技术的发展，在传统的农业种植基础上能够实现精准施肥、水肥配比合理化和智能化施肥管理^[2]。水肥一体化系统旨在实现种植过程中水肥资源的智能优化管理，提高作物生长效率、产品质量和资源利用效率，同时减少对环境的不良影响。可以实现精准施肥、节水灌溉和智能决策，为农业生产提供科学技术支持，推动农业智能化、高效化发展。水肥一体化系统能够通过传感器、数据分析、自动控制等技术，实现水和肥料的精准管理。未来将更加注重智能决策支持系统的个性化定制和智能化升级，满足不同农业生产场景的需求。这符合农业现代化、智能化的发展趋势，也有助于提升农业生产的可持续性。

2 国内外研究现状

2.1 国外研究现状

目前，国内外对于农业智能化和水肥一体化系统的研究与开发已取得一定进展。国外在节水灌溉、水肥溶合的自动化程度较高，以荷兰为例，该国研发的智能灌溉施肥系统能够根据不同作物的生长需求，自动调节营养液的酸碱度（pH值）和电导率（EC值），实现水肥的精准混合与输送^[3]。以色列作为水资源稀缺的国家，采用先进的滴灌技术，将水和肥料通过精确的系统输送至植物根系，大大提高了农业生产效率。同时国外的研究普遍强调精准农业技术的运用，采用土壤水分传感器、气象数据、遥感技术等进行实时数据采集，智能灌溉系统根据数据反馈自动调节水和肥料的供应，这大大提高了水肥的使用效率，降低了农业生产的成本。美国农

业研究人员已开发出基于物联网的智能灌溉系统,通过大数据平台对接,实时监测土壤水分、植物生长状态等,并根据作物需求调整灌溉量和施肥量,从而达到水肥一体化的目的。AHMADU 团队开发了一种基于土壤、气候、温度等参数的农艺模型决策系统,系统集成由土壤湿度、水质和作物水分状态实时传感器控制的作物数据库,可实现预测控制,团队对多个 ETO 模型开展了试验研究,结果表明该农艺模型可提高对 ETO 的估算精度,系统可根据植物需要调度灌溉和施肥,并通过自动浇水监测保持所需的土壤含水量,减少反馈延迟,提高了系统精度,与联合国粮农组织 (FAO) 的 Penman-Monteith (P-M) 模型进行统计属性比较,该模型具有基于 ETC 的作物灌溉智能决策能力,可综合考虑到作物类型、生长阶段、天气数据和条件、湿度、温度以及土壤和植物传感器等特征,此外光伏板的使用使该系统可以安装在农村或偏远地区,达到节能减排的目的。目前,国外的研究更加关注水肥一体化技术在可持续农业中的作用,尤其是在提高土壤质量、减少农药和化肥使用、保护水资源等方面的贡献。

2.2 国内研究现状

自 20 世纪 70 年代末期起,我国开始对水肥一体化技术进行研究,经历了从小范围试验到大规模推广的过程。目前国内的学者和科研人员在水肥灌溉也做了很多研究。例如王利源等设计实验了一种果园水肥一体化自动控制系统,该系统通过水源控制终端、气象监测站、田间控制终端与控制平台的协同工作,成功将水利用率提高至 0.93,高于国家技术标准,进而提升了水肥的使用效率并减少了人工成本^[4]。此外,系统还结合中央气象台的天气预测,分析过去和未来几天的气候变化,为农业管理提供科学建议,能够更好地应对我国多样化的气候条件,相关设备的研究与开发也取得了显著进展,包括文丘里施肥器、注入泵、自动注入设备,以及无土栽培系统中的排水再利用系统等^[5]。另外功能性水溶肥料在水肥一体化中的应用逐渐受到重视,这类肥料能够更好地满足作物特定生长阶段的营养需求,提升作物产量和品质。同时国内的研究还对影响水肥一体化技术效果的因素进行了深入分析,如土壤类型、气候条件、作物品种、灌溉方式等。研究表明,土壤透水性、肥料在土壤中的迁移性等因素直接

影响水肥一体化系统的效果,因此在实际应用中需要进行针对性调整。

3 现阶段存在的问题

近年来,我国水肥一体化系统迅速发展,但与农业发达国家相比,仍存在一定差距。在数据处理和生长模型构建的研究方面,水肥一体化智能决策系统的开发依赖于多学科模型的综合应用,其中水肥耦合效应分析、作物生长动态模拟、植物蒸腾量计算及光谱信息解析等关键模型发挥着重要作用。然而在实际建模过程中存在很大难度,首先构建这些模型通常需要开展长期的田间试验并进行海量数据的采集与分析,特别是在跨区域应用时,既有的成熟模型常因气候特征差异导致预测精度下降,众多环境变量的耦合作用增加了模型构建的复杂度;其次该技术的实施涉及农业工程、植物生理学、信息科学等多领域协同创新,但在实际研发过程中,农机装备研发与农艺实践存在脱节现象,这种系统集成度的不足导致仅有部分优化模型能够有效转化为智能装备的决策算法。在水肥一体化装备的实践中,各类施肥装置面临技术功能不足,文丘里施肥装置在实际运行中表现出显著的压力敏感性,其吸入效率受结构参数偏差和管网压力扰动的双重制约,存在这能耗偏高且易产生肥液回流现象;国产比例式注肥设备因核心部件结构设计欠佳,导致计量偏差率超出农艺标准,且存在运行状态间歇性失稳的技术缺陷。在水肥一体化系统的工程设计中,缺乏基于工况特征的设备选型评估体系,另外管网拓扑配置缺乏标准化,致使施肥终端装置与区域作业条件适配性不足,最终影响系统整体性能输出^[6]。在智能决策系统方面,发达国家在决策系统研发方面已形成显著技术优势。以德国 Netafim、以色列 Galcon 为代表的跨国企业构建了具有自主知识产权的智能决策平台,其系统架构集成了多维环境感知与动态优化算法,在控制精度与系统鲁棒性方面表现突出。然而,此类系统在我国实际应用中面临显著的本土化适配障碍,一方面,设备购置与运维成本显著高于国内标准,构成技术推广的经济壁垒;另一方面,其人机交互设计未充分考虑我国农户认知特征,导致操作界面可用性显著降低,系统内置的核心算法采用封闭式架构设计,作物生长机理模型参数调整缺乏开放性接口,严重制约了区域农艺特征的适应性优化进程^[7]。

4发展前景

智能水肥一体化技术是一种结合现代农业需求,在传统水肥一体化技术的基础上利用信息技术、自动化控制技术和精准农业理念的农业技术系统。它通过集成水资源管理和肥料施用,实现水和肥料的精准配比和高效利用,以提高农作物的生长效率、减少资源浪费、减轻种植户的劳动强度等^[8]。当前智能水肥一体化系统技术主要向以下3个方面发展:

(1) 轻量化。随着农业从业者年龄结构老化和人力资源供给不足,由于水肥一体化技术复杂度较高且操作人员专业素质参差不齐,导致系统实际应用过程中面临较大操作门槛。因此简化操作、降低设备成本成为推动技术普及的关键。

(2) 精准化。当前我国水肥一体化系统主要采用两种典型施肥设备,一种是利用压力差原理工作的吸肥器,另一种则是基于文丘里效应设计的注肥装置。水肥溶液的浓度的稳定性与均匀性无法保障,因此要通过优化施肥装置和水肥溶液浓度控制,解决当前水肥系统精准度差的问题,实现精准施肥的目标。

(3) 标准化。我国水肥一体化系统在建设和装配方面尚未形成规范化标准,导致设备组件兼容性不足。当前该领域缺乏统一的技术规范和验收体系,致使项目建设质量存在明显差异。因此要制定统一的技术标准和验收规范,提高系统构建质量,以保障农业生产效益。

5总结

在农业绿色发展转型的战略框架下,水肥一体化技术作为生态集约化生产的关键技术载体,展现出显著的工程应用价值。该技术能够有效解决了传统水肥一体化系统中存在的两大核心矛盾,其一是化肥施用效率持续低位徘徊导致的资源错配问题;其二是漫灌式水分管理模式引发的环境承载阈值突破风险^[9]。田间实证研究表明,该技术的规模化应用可使水肥利用效率提升25%~35%,同时降低氮素流失量达40%以上,为解决农业面源污染治理难题提供了可量化的技术路径^[10]。未来水肥一体化系统首先在装备优化层面,需基于流体力学仿真对施肥装置进行结构拓扑优化,重点推进低压微灌系统研发,实现统一的技术标准;其次在感知系统提升方面,加速新型农业专用传感器的工程化进程,将环境参数采集精度提升;最终在智能决策的支持下,构建融合物联网技

术、自主控制、地理空间信息(3S)与人工智能的数字孪生平台,重点突破多源异构数据融合、混合整数规划建模等关键技术,通过建立作物生长-土壤墒情-设备状态的动态耦合模型,实现水肥一体化系统整体能效的显著提升。

[参考文献]

- [1] 丁万峰. 基于大数据的水肥一体化智能灌溉系统建设分析[J]. 新农业, 2022 (20): 79-80.
- [2] 徐荣丽. 江苏农博园灌溉施肥系统的设计开发[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- [3] 江景涛, 杨然兵, 鲍余峰, 等. 水肥一体化技术的研究进展与发展趋势[J]. 农机化研究, 2021, 43 (5): 1-9.
- [4] 朱亮, 曾值. 水肥一体化农业智能灌溉系统研究[J]. 南方农机, 2021, 52 (14): 53-54.
- [5] 季宗虎, 惠磊, 孙栋元, 等. 基于物联网的水肥一体化系统[J]. 农业工程, 2023, 13 (11): 68-75.
- [6] 丁万峰. 基于大数据的水肥一体化智能灌溉系统建设分析[J]. 新农业, 2022 (20): 79-80.
- [7] 任华琳. 水肥一体化智能灌溉系统 V1.0. 河南省, 河南芭中现代农业有限公司, 2022-08-01.
- [8] 金文忻, 金榆川, 邓玉超, 等. 基于 Labview 的都市农业远程水肥精量灌溉信息采集监测系统设计与研究[J]. 农业开发与装备, 2022 (10): 29-32.
- [9] 马标, 王会强, 王鑫鑫, 等. 智能水肥一体化现状及发展前景概述[J]. 现代农业装备, 2024, 45 (02): 8-13+20.
- [10] 夏文豪, 蒋媛, 王旭峰, 等. 水肥一体化技术研究现状与发展动态[J]. 中国农机化学报, 2025, 46 (03): 295-304.
- 作者简介: 冀俊豹 (2001.12—) 男, 汉族, 河北邯郸人, 硕士研究生在读, 研究方向: 智能系统、智慧农业;
- 贺伟夕 (1999.09—) 女, 汉族, 河北石家庄人, 硕士研究生在读, 研究方向: 计算机视觉、智慧农业与遥感影像处理;
- 苏宁 (1986.11—) 男, 汉族, 安徽宿州人, 硕士研究生在读, 研究方向: 计算机视觉、图像识别;
- *赵立强 (1968.1—) 男, 汉族, 河北秦皇岛人, 博士, 教授, 研究方向: 机器视觉、模式识别、信息认证与安全。