

灌区现代化改造中智能灌溉系统与节水效益分析

邢卫环

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要：本文聚焦于灌区现代化改造中的核心环节——智能灌溉系统的构建与应用，系统阐述了智能灌溉系统的技术架构、关键组成及其运行逻辑，并在此基础上，通过理论分析与案例实证相结合的方法，深入探讨了其带来的多维度节水效益。研究发现，智能灌溉系统通过精准感知、科学决策与高效执行，能够显著减少无效灌溉用水，提升水分利用效率，同时带来可观的经济效益、生态效益与社会效益。最后，本文针对当前推广中存在的成本、技术集成、运维管理及政策支持等挑战，提出了相应的对策建议，以期为我国灌区高质量、可持续发展提供理论参考与实践路径。

关键词：灌区现代化；智能灌溉；物联网；节水效益；水资源管理

引言

我国人口众多，但水资源匮乏，人均占有量仅为世界平均四分之一且分布不均。农业是用水大户，用水占比超60%，但我国灌区存在工程老化、输配水效率低、灌溉粗放、管理落后等问题，农业用水效率远低于发达国家。同时，工业化、城镇化使农业用水竞争激烈，水资源供需矛盾突出，全球气候变化又带来极端天气威胁农业生产。在此情形下，推动灌区现代化改造是保障粮食安全、提升农业生产能力的战略举措，也是落实治水思路的关键。智能灌溉系统融合现代信息技术与传统水利、农艺，构建“感知-决策-执行”闭环体系，实现“按需供水”。深入研究其构建逻辑、技术路径和综合效益，对指导灌区建设等意义重大。

1 智能灌溉系统的技术架构与核心组成

智能灌溉系统并非单一技术的堆砌，而是一个集成了感知层、网络层、平台层和应用层的复杂有机体。其核心目标是实现对“何时灌、灌多少、怎么灌”这一灌溉核心问题的智能化解答。

1.1 感知层：农田信息的“神经末梢”

感知层是整个系统的数据源头，依赖部署于田间的各类传感器实时采集环境与作物状态信息。土壤水分、温度及电导率传感器埋设于不同深度，动态监测土壤剖面墒情，为判断作物是否缺水提供直接依据。小型气象站则持续获取降雨量、气温、湿度、风速、太阳辐射等关键气象参数，这些数据是计算作物蒸散量（ ET_c ）的基础。为进一步掌握作物生理状态，系统引入遥感技术——如多光谱/高光谱相机、无人机或卫星，提取归一化植被指数（NDVI）、叶面积指数（LAI）等指标，间接评估作物长势与水分胁迫程度。此外，在水源地、泵站、干支渠及田间阀门等关键节点安装水位计、流量计

和压力传感器，可实时监控供水能力与输水效率，有效防范漏损，保障系统稳定运行。

1.2 网络层：信息传输的“高速公路”

网络层负责将感知层采集的异构数据高效、可靠地传输至处理中心。其技术选型需结合灌区规模、地形与成本。在田间尺度，ZigBee、LoRa、NB-IoT等低功耗广域网（LPWAN）技术因覆盖广、功耗低、穿透性强，成为连接分散传感器与区域网关的主流选择。当数据需上传至云端或中央平台时，4G/5G移动通信网络凭借高带宽与低延迟优势，支持实时指令下发及视频监控等业务^[1]。对于大型泵站或管理中心等关键节点，则采用光纤或以太网等有线方式，确保数据传输的稳定性与安全性。多层次、多技术融合的通信架构，打通了信息孤岛，实现全域数据互联互通。

1.3 平台层：智慧决策的“大脑中枢”

平台层通常部署于云端或本地高性能服务器，是系统的核心智能单元，承担数据清洗、融合、存储与决策生成任务。首先对原始数据进行标准化处理，构建统一的时空数据库。在此基础上，运行智能灌溉决策模型。当前主流模型包括三类：一是基于土壤水分阈值的简单控制模型，逻辑直观但忽略气象与作物动态；二是基于水量平衡原理的科学模型，以FAO推荐的Penman-Monteith公式计算参考蒸散量（ ET_0 ），结合特定作物系数（ K_c ）推算实际需水量（ ET_c ），再扣除有效降雨与土壤储水，精准确定净灌溉定额，物理机制清晰，应用最广；三是基于人工智能的预测优化模型，利用支持向量机、随机森林或深度神经网络，挖掘历史灌溉、气象、土壤与产量数据间的复杂关系，实现需水预测与灌溉方案全局优化。最终，平台通过Web端或移动APP提供可视化看板、灌溉计划、异常报警及远程控制功能，完成人

机高效协同。

1.4 应用层：精准执行的“四肢”

应用层是系统末端执行单元，将平台决策精准落地。其核心由智能控制终端与高效节水灌溉设备组成。控制终端接收云端指令，精确调控电磁阀开关、水泵启停及施肥装置运行。喷灌、微喷、滴灌、渗灌等高效节水设备则将水（及养分）直接、均匀输送至作物根系活动层，大幅减少传统漫灌造成的蒸发、径流与深层渗漏损失。当与水肥一体化技术深度融合后，系统可在灌溉同时，根据作物不同生育阶段的营养需求，同步、定量、定点施加水溶性肥料，实现水肥资源的协同高效管理。这一系列精准执行动作，完成了从“感知—决策”到“行动”的闭环，真正让每一滴水都发挥最大生产价值。

整个系统由此形成了一个“感知-传输-分析-决策-执行-反馈”的完整闭环，实现了灌溉管理的自动化、精细化和智能化。

2 节水效益的多维分析框架

2.1 直接节水效益分析

直接节水效益是最为直观的成果，它具体表现为通过智能灌溉系统直接削减的灌溉用水总量。这种节约主要源于对传统灌溉过程中各种无效耗水环节的有效抑制。在输配水环节，通过对干、支、斗渠等各级渠道的流量与水位进行实时在线监控，管理人员能够迅速发现并定位跑冒滴漏等异常情况，及时进行维修，同时还能根据实时需求优化配水调度方案，从而显著减少渠道输水过程中的渗漏损失和水面蒸发损失。在田间应用环节，传统的大水漫灌常常因缺乏科学依据而过度灌溉，导致大量宝贵的水资源或是渗漏至作物根系无法触及的深层土壤，或是积聚于地表后经由无效蒸发散失到大气中。智能灌溉系统则彻底改变了这一局面，它依据作物实时的需水状况进行精准供给，严格控制每次的灌水定额，有效杜绝了深层渗漏和无效蒸发这两种主要的田间水分损失形式^[2]。此外，系统还具备对自然降水的智能响应能力，能够自动识别有效降雨事件，并据此动态调整甚至取消原定的灌溉计划，成功避免了“雨后浇地”这类非理性的资源浪费行为，使得对天然降水的利用也变得更加科学高效。

2.2 水分利用效率提升效益

节水的根本目的不仅在于“省”，更在于“用好”，即将有限的水资源转化为最大的农业产出。水分利用效率（WUE）正是衡量这一转化效能的核心指标。智能灌溉系统对此的贡献主要体现在两个层面。其一是显著提高灌溉水利用系数（ η_{irr} ），该系数定义为作物实际吸

收利用的水量与灌溉系统引入的总水量之比。通过前述对输配水损失和田间无效耗水的有效控制，智能灌溉系统直接提升了这一系数，意味着引入灌区的每一立方米水，都有更大比例被作物有效利用。其二是大幅提升水分生产率（WP），即单位耗水量所能生产的农产品重量（ kg/m^3 ）。精准、适时、适量的水分供给，能够确保作物在整个生育期内始终处于最佳的水分环境中，有效规避了因水分胁迫而导致的光合作用减弱、生长发育受阻乃至产量形成受损等问题^[3]。因此，即便在消耗相同甚至更少水分的情况下，作物也能表现出更强的生长势和更高的产量潜力，从而在根本上实现了从“以水定产”到“以效用水”的转变，使水资源的价值得到了最大化释放。

2.3 经济效益分析

智能灌溉系统所带来的经济效益是其得以推广的重要驱动力，这种效益贯穿于农业生产的全过程。从成本端来看，节约的水量直接转化为水费支出的显著降低；同时，精准的水肥一体化管理策略大幅减少了化肥的施用量，并节省了相应的人工施肥成本；高度的自动化控制更是将农民从繁重、重复的体力劳动中解放出来，有效降低了劳动力投入。从收益端来看，稳定且适宜的水分环境为作物健康生长提供了坚实保障，不仅能普遍提高单产水平，还能改善农产品的外观品质、口感风味和内在营养成分，从而在市场上获得更高的售价和更强的竞争力。尽管智能灌溉系统的初期投资相对较高，但综合考量其在节约水费、电费、人工费以及增加农产品产出等多方面的长期收益，通常能够在数年内收回全部投资成本，展现出极为可观的长期经济回报，为农业经营主体的可持续发展注入了强劲动力。

2.4 生态效益分析

智能灌溉的推广不仅关乎农业生产本身，更对区域乃至流域的生态环境产生深远而积极的影响。在地下水严重超采地区，如华北平原，农业灌溉是地下水消耗的主要途径。通过智能灌溉系统大幅减少农业取水量，可以直接减缓地下水位的持续下降速度，为地下水的自然恢复与保护创造有利条件。此外，过量灌溉是造成农业面源污染的关键因素之一，大量的氮、磷等化肥会随多余的灌溉水向下淋溶进入地下水，或随地表径流汇入河流湖泊，引发水体富营养化等一系列环境问题。精准灌溉通过严格控制灌水量，有效减少了淋溶和径流的发生，从而在源头上遏制了农业面源污染的扩散。从更宏观的视角看，减少田间的无效蒸发，也意味着向大气输送的水汽总量有所降低，这在一定程度上有助于缓解局

部区域的高温和干燥状况,对改善区域小气候亦有微弱但积极的作用。

2.5 社会效益分析

智能灌溉技术的普及还衍生出广泛的社会效益,深刻影响着乡村社会的结构与发展。最直接的影响是解放了农村劳动力,自动化、智能化的灌溉作业将农民从“面朝黄土背朝天”的传统劳作模式中解脱出来,使其能够将更多精力投入到附加值更高的农业经营活动或非农产业中,拓宽了增收渠道^[4]。其次,智能灌溉作为智慧农业的标志性应用,其现代化、科技化的形象极大地提升了农业的整体吸引力,有助于扭转社会对农业“落后、辛苦”的刻板印象,从而吸引有知识、有技术的年轻人返乡创业,为乡村振兴注入新鲜血液和创新活力。最后,在水资源管理层面,基于客观数据的配水方案和透明化的收费模式,有效减少了因人为干预或信息不对称而引发的用水纠纷,使得有限的水资源分配更加公平、公正、公开,促进了农村社区的和谐稳定。

3 面临的挑战与对策建议

尽管前景广阔,但智能灌溉系统在灌区的大规模推广仍面临诸多挑战。

3.1 主要挑战

一是初期投资成本高:传感器、通信设备、控制终端和软件平台的购置与安装费用较高,对于以小农户为主体的经营模式而言,投资门槛过高。二是技术集成与兼容性问题:市场上设备厂商众多,协议标准不一,导致系统集成困难,后期扩容和维护成本增加。三是运维管理能力不足:灌区管理人员普遍缺乏信息技术和数据分析的专业知识,难以对系统进行有效运维和深度应用。四是长效运行机制缺失:“重建轻管”现象普遍存在,缺乏稳定的经费保障和专业的运维团队,导致部分已建系统沦为“摆设”。

3.2 对策建议

(1) 创新投融资与运营模式:推广政府和社会资本合作(PPP)模式,鼓励专业化服务公司提供“建设-运

营-维护”一体化服务(即“灌溉即服务”)。同时,加大对智能灌溉的财政补贴和金融支持力度,降低用户初始投入。(2) 推动技术标准化与模块化:由行业协会或政府部门牵头,制定统一的通信协议、数据接口和设备选型标准,鼓励开发模块化、可插拔的软硬件产品,降低系统集成难度和成本。(3) 强化人才培养与能力建设:建立分级分类的培训体系,对灌区管理人员、基层技术人员和新型农业经营主体进行系统培训,提升其数字化素养和实操能力。(4) 建立健全长效管护机制:明确智能灌溉设施的产权归属和管护责任,探索建立使用者付费、政府补贴相结合的可持续运行经费保障机制。

4 结语

灌区现代化改造关乎国家水安全与粮食安全,智能灌溉系统是推动变革的核心。本文梳理其技术架构,构建效益分析框架,发现智能灌溉通过“天-空-地”感知、“云-边-端”决策及高效设备执行,能解决传统灌溉粗放问题,将水资源精准利用,不仅减少用水量,还提升水资源利用效率,带来经济、生态和社会效益。展望未来,物联网等前沿技术持续发展,智能灌溉系统将更自主、自适应和自学习。不过,技术成功依赖制度、管理和人的协同。所以,在推动技术创新时,要同步加强政策引导、机制创新和人才培养,打通推广应用的最后一公里,让智能灌溉惠及田野,为我国农业现代化和生态文明建设提供强劲动力。

参考文献

- [1]孙蕊卿,张石锐,张来喜,等.智能灌溉技术研究进展与实践[J].蔬菜,2025,(07):1-11.
- [2]胡文超,张国,苗泽玮,等.建设智能灌溉体系赋能农业现代化[J].中国电力企业管理,2025,(29):36-37.
- [3]王慧,张五昌.智能灌溉系统在现代农田水利工程中的应用效果分析[J].农业科技创新,2025,(25):42-44.
- [4]黄达.智能灌溉系统在节水农业中的应用[J].河南农业,2025,(15):24-25.