

# 水利工程节水灌溉系统设计优化与效益分析

徐锦鸿

沂水县久远水利水电建筑安装有限公司 山东 临沂 276400

**摘要:** 随着全球水资源短缺问题日益严峻,农业作为用水大户,其用水效率直接关系到国家水安全与粮食安全。节水灌溉技术作为缓解水资源供需矛盾、提升农业用水效率的关键手段,在现代水利工程建设中占据重要地位。本文以水利工程节水灌溉系统为研究对象,系统梳理了当前主流节水灌溉技术(如滴灌、微喷灌、低压管道输水灌溉等)的技术特点与适用条件;在此基础上,从水源配置、管网布局、控制策略、智能监测等多个维度,提出节水灌溉系统的设计优化方法;并构建涵盖经济效益、社会效益与生态效益的综合评价体系。本研究可为我国农业节水工程的规划、设计与实施提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 节水灌溉;水利工程;系统优化;效益分析;智能灌溉;水资源高效利用

## 引言

水是生命之源、生产之要、生态之基。然而,全球淡水资源仅占地球总水量的2.5%,其中可供人类直接利用的不足1%。我国人均水资源量约为2100立方米,仅为世界平均水平的1/4,属于联合国认定的“重度缺水”国家。与此同时,农业用水长期占据全国总用水量的60%以上,部分地区甚至高达80%。传统大水漫灌方式导致水资源浪费严重,灌溉水利用系数普遍低于0.55,远低于发达国家0.7-0.9的水平。在此背景下,发展高效节水灌溉技术已成为国家水资源战略的重要组成部分。《国家节水行动方案》《“十四五”节水型社会建设规划》等政策文件明确提出,到2025年,全国农田灌溉水有效利用系数需提高到0.58以上,并大力推广现代化灌区建设。因此,如何通过科学设计与系统优化,提升节水灌溉系统的整体效能,成为当前水利工程领域亟待解决的核心问题。节水灌溉系统不仅是工程技术问题,更涉及资源管理、经济投入与生态环境等多维目标。开展系统设计优化与效益分析研究,具有重要意义。

## 1 节水灌溉技术类型与适用性分析

### 1.1 主流节水灌溉技术

(1) 滴灌:通过毛管上的滴头将水缓慢、均匀输送到作物根区。水分利用效率极高,灌溉水利用系数达0.90至0.95,能减少无效蒸发、深层渗漏,抑制杂草生长、降低病害传播风险,还可实现水肥一体化精准供给。但对水质要求高,易堵塞滴头,初期投资成本大,适用于果树、蔬菜、温室大棚等高附加值经济作物种植区域。(2) 微喷灌:用微型喷头将水雾化洒向作物冠层或根区,湿润范围比滴灌广,适合密植型作物如茶园、苗圃、部分果园。工作压力低、喷洒强度小,受风力影响小,有降

温增湿功能,抗堵塞性能优于滴灌,维护成本低,但水分蒸发损失略高,在气候干燥、风速大的区域需谨慎评估适用性。(3) 低压管道输水灌溉:用塑料或混凝土管道替代土渠输水,结合地面软管或移动式出水口田间配水。可减少渠道渗漏与水面蒸发,输水效率超0.95,结构简单、投资适中、运行维护便捷,适合大面积平原地区的粮食作物灌溉,在我国华北、东北等粮食主产区广泛应用,虽节水效果不及滴灌和微喷灌,但推广基础和社会接受度良好<sup>[1]</sup>。(4) 喷灌:模拟自然降雨,加压将水喷洒至空中形成水滴降落田面,有固定式、移动式、中心支轴式等多种形式,适合地形平整、面积大的农田。机械化程度高,灌水均匀性好,能满足多种作物需求。但受气象条件影响大,高温、大风环境下水分蒸发漂移损失大,实际灌溉效率常低于理论值,在干旱半干旱地区应用需精细化管理,必要时采取辅助措施减少损失。

### 1.2 技术选型原则

节水灌溉技术选型不能只看单一指标,要综合多方面因素系统研判。作物类型决定灌溉频率与湿润深度,密植作物适合微喷或滴灌,大田粮食作物可优先考虑低压管道系统;地形起伏影响管网压力分布,高差大的区域要分区加压;土壤质地决定入渗速率,黏重土壤易积水,砂质土壤需高频少量灌溉;水源水质影响系统堵塞风险,硬水地区要加强过滤处理;农户经济承受能力和管理水平也是关键,经济实力弱、管理水平低的地区,复杂先进的技术难以推广。

## 2 节水灌溉系统设计优化方法

科学的系统设计是实现高效节水的前提。传统设计往往侧重单一技术指标,忽视系统整体性能。本文提出“全链条、多目标、智能化”的优化设计框架。

### 2.1 水源配置优化

水源是整个灌溉系统的命脉，其稳定性与可持续性直接决定系统运行效果。在单一水源难以满足灌溉需求或存在季节性短缺的地区，应推动多水源联合调度机制，整合地表水、地下水、再生水以及雨水集蓄等多种水源，形成互补互济的供水格局。例如，在城市近郊灌区，可将污水处理厂达标排放的再生水作为补充水源，既缓解了农业用水压力，又实现了水资源循环利用。同时，应在灌区上游或关键节点配套建设小型调蓄工程，如蓄水池、塘坝或地下水库，用于调节灌溉高峰期的用水高峰，平抑供需矛盾。对于对水质敏感的滴灌或微喷系统，还需在首部枢纽设置完善的预处理单元，包括沉沙池、筛网过滤器、叠片过滤器乃至自动反冲洗装置，确保进入管网的水质符合运行要求，从根本上预防堵塞问题的发生。

### 2.2 管网布局优化

管网作为输配水的核心载体，其布局合理性直接影响系统水力性能与建设成本。优化设计的目标在于在保证供水均匀性和压力稳定性的前提下，最小化水头损失与管材投资。首先，应根据灌区地形、地块划分及作物布局，合理确定管网拓扑结构，可采用树状、环状或混合式布置方式，兼顾施工便利性与运行灵活性。其次，各级管道的管径选择需基于水力计算与经济性分析，通常采用经济流速法或线性规划模型，在满足流量需求的同时避免过大管径造成的资源浪费<sup>[2]</sup>。对于高程变化显著的丘陵或山地灌区，应实施压力分区设计，通过设置减压阀或分设加压泵站，确保各分区末端压力处于设备允许范围内，防止因超压导致爆管或因欠压造成灌水不均。现代设计中，常借助EPANET等专业水力模拟软件对管网进行动态仿真，通过多轮迭代优化，最终确定最优管径组合与阀门布置方案。

### 2.3 控制策略优化

控制策略是连接硬件系统与灌溉目标的“大脑”。传统依赖人工经验的定时或定额灌溉方式难以适应作物需水动态变化，易造成水分亏缺或过量。现代节水灌溉系统应向自动化、智能化方向演进。一种有效的路径是构建基于实时反馈的闭环控制系统：在田间布设土壤水分传感器，持续监测根区含水状态，当实测值低于设定阈值时自动启动灌溉；同时，系统可接入气象站数据，结合FAO推荐的Penman-Monteith公式计算参考作物蒸散量（ $ET_0$ ），再根据当前生育期的作物系数（ $K_c$ ）动态调整灌水定额，实现“按需供水”。更进一步，可引入天气预报接口，在预测有有效降雨前自动暂停灌溉计划，避免无效补水。这种“土壤墒情+气象驱动+作物模型”三位一

体的控制逻辑，显著提升了灌溉决策的科学性与精准度。

### 2.4 信息化与智能管理平台建设

随着物联网、云计算与人工智能技术的发展，节水灌溉系统正加速向智慧化转型。理想的智能管理平台应覆盖“感知—传输—决策—执行”全链条。在感知层，通过部署土壤温湿度、气象六要素、管道压力流量等传感器，构建全域物联网；在传输层，利用4G/5G、LoRa或NB-IoT等通信技术，实现数据低延时上传；在平台层，依托云服务器进行大数据存储与分析，结合机器学习算法识别灌溉规律、预测需求趋势、诊断设备故障；在应用层，通过Web端或手机APP向管理者提供可视化监控界面，支持远程启停、参数调整与报警推送<sup>[3]</sup>。此外，数字孪生技术的应用使得灌区可在虚拟空间中进行仿真推演，辅助优化调度方案。这种高度集成的信息化架构，不仅提升了系统运行效率，也为灌区精细化管理提供了强大工具支撑。

## 3 节水灌溉系统效益分析体系构建

效益评估是检验系统成效的关键环节。本文构建三维综合效益评价体系：

### 3.1 经济效益分析

经济效益是衡量节水灌溉项目可行性的核心指标。其直接体现为节支增收的净收益。一方面，系统通过减少输配水损失和精准灌水，显著降低单位面积用水量，从而节省水费支出；另一方面，水分供应的优化改善了作物生长环境，通常可带来10%至25%的产量提升，直接增加销售收入。此外，水肥一体化技术的应用减少了肥料淋失，降低了农资投入；水泵运行时间的缩短也带来了电费节约。然而，这些收益需与项目全生命周期成本进行对比。成本主要包括初期建设投资（如设备采购、土建施工、安装调试）和持续发生的运行维护费用（如电费、人工、维修耗材）。通常，滴灌系统使用寿命为8至10年，管道系统可达20年。在此基础上，可采用净现值（NPV）、内部收益率（IRR）和投资回收期（Pt）等经典经济评价指标进行量化分析。一般而言，若NPV大于零、IRR高于社会折现率（通常取8%）、且Pt在5至7年以内，则项目具备良好的经济可行性。

### 3.2 社会效益分析

节水灌溉的社会效益虽难以完全货币化，但其对农村社会发展具有深远影响。首先，通过增产节本，农户家庭收入得到实质性提高，户均年增收可达千元以上，有助于巩固脱贫攻坚成果。其次，系统的建设与运维催生了新的就业岗位，如设备安装工、系统操作员、技术服务人员等，促进了农村劳动力就地转移。更重要的是，

节水灌溉改变了“靠天吃饭”的传统耕作观念，推动农业生产向科技化、标准化迈进，提升了农民的科技素养与市场意识<sup>[4]</sup>。在极端气候频发的背景下，高效灌溉系统还增强了农业抗旱减灾能力，保障了基本口粮安全，维护了农村社会稳定，体现了重要的公共价值。

### 3.3 生态效益分析

从生态视角看，节水灌溉是实现农业绿色发展的关键路径。在地下水超采严重的华北、西北地区，减少灌溉取水量有助于遏制地下水位持续下降趋势，逐步修复受损的水生态系统。精准控水还能有效抑制土壤次生盐渍化——传统漫灌导致大量水分深层渗漏，将土壤盐分带至根区，而节水灌溉通过控制湿润深度，阻断了这一过程。同时，由于化肥随灌溉水流失量大幅减少，农业面源污染得到缓解，周边河流湖泊水质得以改善。从碳足迹角度看，节能型水泵的使用以及化肥生产运输环节的缩减，间接降低了温室气体排放。这些生态效益虽不直接体现在账面上，但对区域可持续发展具有不可估量的战略意义，可通过能值分析或生命周期评价等方法进行量化表征。

## 4 讨论与建议

### 4.1 存在的问题

尽管节水灌溉成效显著，但在推广过程中仍面临多重挑战。高昂的初期投资使许多小农户望而却步，过度依赖政府补贴导致项目可持续性存疑；部分农村地区缺乏专业技术力量，系统建成后因操作不当或维护缺失而提前失效；现行水权制度与水价机制尚未充分反映水资源稀缺性，农户节水后难以获得直接经济回报，削弱了其参与积极性；此外，“重建设、轻管理”的现象普遍存在，技术方案与当地实际脱节，造成资源浪费。

### 4.2 发展建议

为破解上述困境，需多措并举。首先，应强化政策协同，完善财政补贴、贷款贴息、节水奖励等激励机制，并

探索水权交易、节水量回购等市场化手段，让节水者真正受益。其次，推动“建管一体”模式，鼓励农民合作社、农业龙头企业或专业化服务公司统一负责系统建设与后期运维，提升专业化水平。再次，加强基层技术培训，建立村级技术服务站，培养本土化运维队伍。长远来看，应将节水灌溉深度融入数字乡村与智慧水利整体布局，通过技术赋能降低管理门槛。最后，可探索PPP、绿色金融等多元化投融资模式，吸引社会资本参与，形成政府引导、市场主导、农民参与的良性发展格局。

## 5 结语

本文系统探讨了水利工程节水灌溉系统的设计优化路径与综合效益。研究表明：节水灌溉技术的选择必须因地制宜，滴灌、微喷灌、低压管道等各有适用场景，需结合作物、地形、水源等要素综合决策；系统设计应从“单点技术”转向“全系统优化”，重点在水源配置、管网布局、智能控制与信息平台四个维度协同提升。未来发展方向在于智能化、集成化与服务化，通过数字技术赋能，构建“感知精准、决策科学、执行高效”的现代灌溉体系。在国家大力推进农业现代化与生态文明建设的背景下，节水灌溉不仅是技术工程，更是系统工程与制度工程。唯有技术、管理、政策多轮驱动，方能真正实现“藏粮于地、藏粮于技、藏水于效”的战略目标。

## 参考文献

- [1] 戚洪鹏. 水利工程灌溉系统节水技术优化研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(23): 182-185.
- [2] 任建华. 智能化节水灌溉技术在农田水利工程中的应用[J]. 农业机械, 2025, (09): 155-157.
- [3] 董辛, 庄付磊, 谢崔越. 农田水利工程高效节水灌溉技术的应用分析[J]. 现代农村科技, 2025, (11): 101-102.
- [4] 王天俊. 基于水资源高效利用的农田水利工程节水灌溉技术研究[J]. 农业开发与装备, 2025, (10): 193-195.