

# 节水型灌区水利工程优化设计与灌溉效率提升研究

王百乐

洛阳水利勘测设计有限责任公司 河南 洛阳 471000

**摘要:** 节水型灌区建设成为保障粮食安全与生态平衡的关键。本研究围绕节水型灌区水利工程优化设计与灌溉效率提升展开, 基于节水灌溉核心理论, 提出系统性、经济性、生态兼容性与可持续性四大设计原则。通过渠道防渗升级、管网拓扑优化、智能调控系统构建等关键技术路径, 结合工程设施改造、技术集成应用、管理机制创新等措施, 实现水资源高效利用。研究表明, 该方案可显著降低输水损耗, 提升田间灌溉均匀度, 优化水资源配置。研究成果为缓解水资源短缺、推动农业可持续发展提供理论依据与实践参考。

**关键词:** 节水型灌区; 水利工程优化设计; 灌溉效率提升措施

引言: 在全球水资源短缺与农业用水需求激增的矛盾下, 传统灌区面临工程老化、技术落后、管理粗放等问题, 导致灌溉效率低下与水资源浪费。本文基于土壤-植物-大气连续体理论与工程系统耦合原理, 剖析灌区现存问题, 从理论、技术与管理层面提出优化路径, 旨在突破传统灌溉模式瓶颈, 为水资源可持续利用与现代农业发展提供解决方案。

## 1 节水型灌区水利工程基础理论

节水型灌区水利工程基础理论是实现水资源高效利用、提升灌溉效率的核心依据, 涵盖节水灌溉核心理论、灌区水利工程系统构成及灌溉效率影响因素三个关键层面。(1) 节水灌溉核心理论。以水分传输机理和作物需水规律为基石。土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 理论揭示了水分在土壤、作物根系、植株体内及大气间的动态传输过程, 为精准灌溉提供理论支撑; 作物需水规律则通过分析不同生长阶段的需水量与水分敏感阈值, 指导灌溉时间与水量的科学分配。水效率阈值理论明确了灌溉水利用效率的极限, 为衡量节水潜力提供量化标准。(2) 灌区水利工程系统构成。由水源工程、输配水工程和田间工程构成的复杂耦合系统。水源工程作为起点, 包括水库、泵站、水井等设施, 其蓄水、提水能力直接影响灌区供水稳定性; 输配水工程通过渠道、管网将水源输送至田间, 其布局合理性与防渗性能决定输水损失程度; 田间工程则是灌溉的末端环节, 涉及田块规划、灌溉方式选择等, 直接影响作物对水分的吸收效率。三大子系统相互依存, 任一环节的薄弱都会制约整体节水效果。(3) 灌溉效率影响因素。工程老化导致渠道渗漏、管网破损, 显著降低输水效率; 传统大水漫灌等落后灌溉技术造成水资源浪费; 管理模式粗放, 缺乏精准调度与计量手段, 难以实现按需供水。气候条件、土壤质地、作

物类型等自然因素, 也对灌溉效率产生直接影响<sup>[1]</sup>。

## 2 节水型灌区水利工程优化设计原则

节水型灌区水利工程优化设计需以下遵四大核心原则, 确保工程建设既能实现水资源高效利用, 又能兼顾多方效益。(1) 系统性原则。要求将灌区视为一个有机整体, 统筹规划水源工程、输配水网络与田间设施, 避免各环节孤立设计。如在优化渠道布局时, 需综合考虑地形地貌、水源分布及作物种植结构, 通过建立数学模型模拟水流路径, 实现输水效率最大化。(2) 经济性原则。设计过程中需通过成本-效益分析, 筛选性价比最优的技术方案。例如, 针对渠道防渗, 可对比混凝土衬砌、土工膜铺设等不同工艺的初期投资与长期节水收益, 选择符合区域经济水平的方案。(3) 生态兼容性原则。在设计中需避免过度取水导致地下水位下降或河道断流, 优先采用生态友好型技术, 如生态渠道设计、尾水回收利用等, 减少对周边生态系统的干扰。(4) 可持续性原则。设计时需预留技术升级空间, 例如采用模块化管网设计, 便于未来接入智能控制系统; 选择耐久性强、抗老化的工程材料, 延长设施使用寿命<sup>[2]</sup>。

## 3 水利工程优化设计关键技术路径

### 3.1 输配水工程优化

输配水工程优化设计直接影响输水效率与水量损失控制, 具体优化路径如下: (1) 在渠道防渗技术升级方面。传统混凝土衬砌技术通过改进施工工艺提升防渗性能。基于有限元分析方法, 优化混凝土配合比与衬砌结构参数, 可降低渠道渗漏率。高分子防渗材料 (如土工膜、复合防渗布) 的应用则突破传统材料局限性, 其低渗透系数与强耐腐蚀性特性, 可显著减少水分蒸发与渗漏损失。通过建立材料性能数据库, 结合灌区地质条件与水流特性, 选择适配的防渗材料与铺设工艺, 实现防

渗效果最大化。(2) 管网系统拓扑优化。基于遗传算法的管径与节点布置优化,通过模拟生物进化过程中的选择、交叉与变异机制,构建以管网投资成本、水头损失最小化为目标函数的数学模型。将管径、管长、节点位置等参数作为决策变量,通过迭代计算求解最优管网布局方案。该方法可有效平衡管网建设成本与运行能耗,避免传统经验设计导致的管径冗余或水头不足问题,提升输水系统的整体效能。

### 3.2 田间工程节水设计

田间工程设计需精准匹配作物需水特性与土壤条件,具体如下:(1) 田块规格与畦灌/沟灌参数优化基于土壤入渗特性与水流运动方程,通过建立田块尺度的二维水流模型,模拟不同畦长、畦宽、沟深及坡度条件下的水流推进与消退过程。结合作物种植模式与根系分布特征,优化灌溉参数,减少地表径流与深层渗漏损失,实现均匀灌溉。(2) 微灌系统(滴灌、喷灌)的组合配置设计需综合考虑作物类型、地形地貌与气候条件。基于作物需水规律与灌溉水力学原理,构建微灌系统水力计算模型,优化滴头流量、喷头间距、支管布置等参数。通过压力补偿式滴头与变频供水设备的协同设计,确保不同地形条件下灌水均匀度达标。采用多目标优化算法,平衡微灌系统投资成本、运行能耗与节水效益,形成适用于不同场景的微灌组合配置方案。

### 3.3 智能调控系统构建

智能调控系统是实现灌区精准灌溉的核心支撑,其构建包含墒情-水情监测网络部署与灌溉决策模型开发两部分。(1) 在监测网络部署方面。采用物联网(IoT)技术构建多层次监测体系,将土壤墒情传感器、气象站、水位计等设备进行空间分布式布置。通过无线传感网络实现数据实时采集与传输,结合地理信息系统(GIS)技术,构建灌区水资源信息数据库,实现土壤含水量、气象要素、渠系水位等参数的动态可视化展示。(2) 灌溉决策模型与自动化控制平台设计。基于数据驱动与机理模型融合的方法,利用机器学习算法(如神经网络、支持向量机)挖掘历史气象、土壤、作物数据与灌溉量之间的关联关系,构建灌溉需水量预测模型;结合作物需水模型与水动力学模型,建立动态灌溉决策模型。将预测结果与决策模型嵌入自动化控制平台,通过可编程逻辑控制器(PLC)与电磁阀等设备联动,实现灌溉过程的自动启停、流量调节与轮灌调度,最终达到按需供水、节水增效的目标<sup>[3]</sup>。

## 4 提升灌溉效率的措施

### 4.1 工程设施升级改造

#### 4.1.1 输配水系统优化

输配水系统作为灌溉效率提升的关键环节,其优化需从以两方面突破。(1) 材料应用。在渠道防渗改造中,混凝土衬砌通过调整骨料级配、添加防渗剂及优化浇筑工艺,可将渗漏率降低至原有10%以下;土工膜铺设则利用其低渗透系数特性,结合复合防渗结构设计,形成物理阻隔层。基于明渠均匀流理论构建水力计算模型,通过迭代计算优化渠道断面尺寸与纵坡参数,使水流流速处于临界不冲不淤状态,减少输水过程中的蒸发与滞留损耗。(2) 结构设计。对于管网系统,采用拓扑优化算法构建数学模型,以地形高程、水源分布、用水需求为约束条件,将管道走向、管径组合、节点位置作为决策变量,通过模拟退火算法或遗传算法求解全局最优解。在干管、支管关键节点部署压力传感器与电磁流量计,利用物联网技术实现数据实时采集与传输,构建管网压力-流量动态监测网络,为精准调控提供数据支撑。

#### 4.1.2 田间工程精细化建设

田间工程直接决定灌溉水的利用效率。针对传统畦灌、沟灌,基于Richards方程与Green-Ampt入渗模型,结合土壤质地、作物类型及地形坡度,通过数值模拟优化田块规格与灌水参数。例如,对砂质土壤田块缩短畦长、降低灌水定额,对黏质土壤增加沟深、延长放水时间,减少地表径流与深层渗漏。微灌系统的优化设计需综合考虑作物生理特性与水力性能。基于作物根系分布特征与需水规律,利用灌水均匀度计算公式(CU)量化评估滴头间距、喷头射程等参数,通过正交试验法确定最佳组合方案。在“水肥一体化”管网设计中,采用压力补偿式滴头与变频供水系统,结合流体力学原理优化管网压力分布,确保不同位置灌水器出水流量偏差率控制在5%以内,实现水肥同步精准供给。

## 4.2 先进灌溉技术集成应用

### 4.2.1 智能节水灌溉技术

智能灌溉系统的构建以多源数据融合与模型驱动为核心。通过部署土壤墒情传感器、气象站及作物生理传感器(茎流计、叶水势仪),实时采集土壤含水量、空气温湿度、太阳辐射等数据。利用长短期记忆网络(LSTM)、支持向量回归(SVR)等机器学习算法,建立作物需水预测模型,结合彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)公式计算参考作物蒸散量,动态调整灌溉决策。自动化控制系统基于水动力学模型(如SWAT、MIKESHE),通过PID控制算法调节电磁阀开度与水泵转速,实现灌溉设备的远程启停与流量精确控制。系统内置阈值预警机制,当土壤含水量低于设定下限自动启

动灌溉，达到上限时停止供水，实现按需灌溉。

#### 4.2.2 农艺节水技术协同

农艺节水技术与灌溉技术的协同需从土壤-作物-大气连续体（SPAC）系统出发。覆盖保墒技术通过改变土壤表面能量平衡，采用地膜覆盖减少蒸发量达30-50%，秸秆还田增加土壤有机质含量，提高土壤持水能力。基于区域水资源承载力，运用线性规划模型优化作物种植结构，降低水稻等高耗水作物比例，增加耐旱作物种植面积。耕作技术层面，深耕深松打破犁底层，使土壤孔隙度提高10-15%，增强土壤蓄水能力；免耕播种减少土壤扰动，降低地表径流系数。

#### 4.3 管理机制创新

##### 4.3.1 用水计量与水权管理

用水计量体系的完善依赖先进计量设备与数据管理系统。在干支渠及田间入口安装超声波水表、电磁水表，利用多声道测量技术提高计量精度至±0.5%。构建灌区用水数据库，通过数据清洗、特征提取与关联分析，建立农户用水行为模型，实现水量的精准计量与实时监控。水权管理通过建立初始水权分配模型，采用熵权-TOPSIS法综合考虑耕地面积、作物类型、历史用水等因素，科学分配用水配额。搭建水权交易平台，基于区块链技术实现水权交易的去中心化、透明化管理，通过市场机制优化水资源配置。

##### 4.3.2 专业化运维管理

专业化运维管理需构建标准化流程与质量考核体系。制定渠道清淤、管网巡检、设备检修等操作规范，建立设施健康度评估模型，通过层次分析法（AHP）确定渠道衬砌破损率、管网漏损率等指标权重，量化评估设施运行状态。通过定期开展技能培训，使管理人员掌握智能灌溉系统操作、数据分析及故障诊断技术。引入设备全生命周期管理理念，利用物联网技术对关键设备进行状态监测，结合故障树分析（FTA）提前预判设备故障，降低非计划停机时间。

#### 4.4 信息化管理平台建设

基于Hadoop分布式存储架构，整合灌溉工程数据

（渠道长度、管径参数）、水资源数据（水位、流量）、气象数据（降雨、蒸发）及作物生长数据（叶面积指数、生物量），构建多源异构数据库。利用GIS技术对灌区进行三维数字化建模，实现工程设施空间分布可视化与属性查询。灌溉决策支持系统基于数值模拟模型（如MODFLOW、DSSAT），通过情景模拟分析不同灌溉方案下的水量平衡、作物产量及能耗，为管理人员提供最优决策建议。农户服务平台采用微服务架构，通过手机APP实现用水信息查询、灌溉指令接收及反馈，提升灌溉管理的参与度与透明度。

#### 4.5 生态环境保护与修复

在灌溉规模规划中，基于水资源承载能力评估模型，结合生态需水计算方法（Tennant法、CASI法），合理确定灌溉取水量，避免地下水超采与河道断流。生态渠系建设采用生态混凝土衬砌、植被护坡等技术，通过增加渠底粗糙度促进水生生物栖息，降低渠道硬化对生态系统的影响<sup>[4]</sup>。灌溉尾水治理通过构建人工湿地-生态塘组合系统，利用植物吸收、微生物降解去除氮磷污染物，实现尾水的循环利用，减少农业面源污染。

结束语：本研究通过理论创新与技术集成，构建了节水型灌区水利工程优化设计体系与灌溉效率提升方案，在工程改造、智能调控、生态保护等方面取得显著成效。未来需进一步深化人工智能与灌溉系统融合，探索低碳化、智能化灌溉模式，推动灌区向绿色、高效、可持续发展方向，助力水资源优化配置与农业现代化转型。

#### 参考文献

- [1]张琼.农业水利工程中的节水灌溉技术[J].农业开发与装备,2024(12):106-108.
- [2]陈潇.节水型灌区渠道改造中的衬砌材料优选与结构优化设计研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(4):114-117.
- [3]王瑞.农业灌溉系统中的水资源节约与利用效率提升策略研究[J].河北农机,2024(13):112-114.
- [4]张怀志.水利工程设计中应注意问题的探讨[J].包装世界,2022(6):121-123.