

高标准农田建设中供水工程布局优化对灌溉效率的影响研究

周慧平¹ 乔金虎²

1.内蒙古恒源水利工程有限公司 内蒙古自治区 呼和浩特 010010

2.西安市三河一山生态管护中心 陕西 西安 710000

【摘要】：供水工程布局作为高标准农田灌溉系统的核心架构，直接决定灌溉水利用系数、灌溉均匀度与农业生产效率。本文针对当前农田供水工程存在的“水源分布不均、管网路径冗余、枢纽匹配失衡”等问题，构建“水源-管网-枢纽”三维布局优化模型，提出基于地形适应性、作物需水特性、水力平衡的布局策略。通过河南、江苏等地案例验证，优化后的供水工程使灌溉水利用系数从0.65提升至0.82，灌溉均匀度提高至90%以上，亩均灌溉成本降低25%。研究表明，科学的布局优化可实现“输水损失最小化、灌水效率最大化、能源消耗最低化”，为高标准农田灌溉系统提质增效提供技术支撑。

【关键词】：高标准农田；供水工程；布局优化；灌溉效率；水力平衡

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.047

1 引言

截至2024年，我国已建成的15亿亩高标准农田中，灌溉保障率达到90%以上，但供水工程布局不合理导致的灌溉效率差异显著：同一区域内，优化布局的农田灌溉水利用系数可达0.85，而布局粗放的区域仅0.60，差值高达25%。典型问题包括：水源选址偏离种植区（输水距离超3km，沿途损失率>20%）、管网管径设计失衡（支管过细导致末端压力不足，灌水不均匀度达30%）、泵站扬程与实际需求不匹配（能耗浪费超30%）。因此，研究供水工程布局优化对灌溉效率的影响，成为破解“高投入、低效益”困境的关键。建立供水工程布局与灌溉效率的量化关联模型，完善高标准农田灌溉系统优化理论体系。

2 高标准农田供水工程布局现状与问题分析

2.1 布局现状特征

当前高标准农田供水工程布局主要呈现三种模式，集中式布局单水源辐射1000亩以上农田，管网呈“树干状”分布，适用于平原连片区域，如河南新乡平原区，灌溉水利用系数约0.70；分散式布局多水源（机井、塘坝）分片供水，管网呈“枝状+环状”结合，适用于丘陵区，如湖北襄阳丘陵区，灌溉水利用系数约0.65；混合式布局主水源（水库）与辅助水源（泵站）结合，管网分级管控，适用于复杂地形区，如江苏淮安湖荡区，灌溉水利用系数约0.75。

2.2 核心布局问题

2.2.1 水源布局与需水空间错配

水源偏离种植重心，某高标准农田项目将泵站建于地块边缘，距核心种植区直线距离2.5km，输水管网沿程水头损失达5m（流速1.2m/s时），末端压力不足0.1MPa，导致30%的农田灌溉不达标。在年降水量800mm的区域盲目建设机井群（单井出水量50m³/h），忽视塘坝调蓄功能，导致丰水期弃水、枯水期超采地下水，灌溉保证率波动达20%。

2.2.2 管网布局冗余与水力失衡

路径设计不合理，某项目管网采用“直角转弯+迂回绕行”路径，实际输水长度较直线距离增加40%（从1.5km增至2.1km），沿程水头损失增加60%，输水效率降至75%。主干管与支管管径比不合理（如DN300主干管接DN50支管，流速骤升至2.0m/s），局部水头损失达3m，导致支管末端流量仅为设计值的60%，灌溉均匀度<70%。

2.2.3 枢纽工程与系统不协同

泵站扬程过剩，某泵站设计扬程30m，实际所需扬程仅20m，因未设变频装置，长期满负荷运行，能耗浪费33%，亩均电费增加15元。采用手动闸阀调节流量，单阀操作耗时15分钟，难以应对作物需水高峰期的动态调度，灌溉滞后时间超4小时。

3 供水工程布局优化的核心技术路径

3.1 水源布局的空间优化

3.1.1 基于需水重心的水源选址

采用加权Voronoi图法，以各种植区的灌溉需水量（权重）与地块面积（参数）计算需水重心。某项目通过该模型将水源选址从边缘调整至需水重心，输水管长缩短1.2km，水头损失降低4m，末端压力提升至0.25MPa。在平原区采用“1座中心泵站+3-5座辅助塘坝”的混合水源模式，中心泵站保障70%基灌需求，塘坝承担30%的应急补水，灌溉保证率提升至95%（原为80%）。

3.1.2 水源类型的生态适配

湿润区（年降水>1000mm）以塘坝-渠道系统为主（占比60%），机井为辅（占比40%），利用塘坝调蓄雨水，减少地下水开采；半干旱区（年降水400-800mm）以泵站-管道系统为主（占比70%），配套集雨设施（占比30%），提高抗旱能力。某半干旱区项目通过该策略，使灌溉保证率从85%提升至

97%，地下水开采量减少 30%。

3.2 管网布局的水力性能优化

3.2.1 路径与管径的协同设计

采用 Dijkstra 算法优化管网路径，在满足地块覆盖的前提下，使输水干管长度最小化。某项目优化后，干管总长度从 5.2km 减至 3.8km，减少 27%，沿程水头损失降低 35%。根据流量递减规律采用“阶梯式变径”（如 DN300→DN200→DN150），确保各管段流速控制在 0.8-1.2m/s（经济流速范围），局部水头损失占比从 30%降至 15%。某项目通过该设计，管网水力效率从 75%提升至 90%。

3.2.2 管网拓扑结构优化

主干管采用环状布局（保证可靠性），支管采用枝状布局（降低成本），在河南某项目应用中，较纯枝状管网漏损率降低 50%（从 8%降至 4%），较纯环状管网成本降低 20%。将灌溉区划分为 3 个压力区（高压 0.3MPa、中区 0.2MPa、低压 0.15MPa），通过变频泵站+减压阀组实现分区稳压，灌溉均匀度从 75%提升至 92%。

3.3 枢纽工程的功能匹配优化

3.3.1 泵站与需水负荷匹配

采用“设计扬程=地形高差+沿程损失+局部损失+安全余量（0.5-1.0m）”公式，避免扬程过剩。某泵站原设计扬程 30m，优化后降至 22m，年节电 1.2 万度。根据实时流量需求自动调节电机转速（频率 30-50Hz），使泵站效率始终保持在 75%以上（非变频泵站效率波动在 50%-80%）。某项目应用后，单位灌溉水量能耗从 0.15kWh/m³ 降至 0.10kWh/m³。

3.3.2 闸阀与计量设施布局

在支管入口处布设电磁流量控制阀（精度±1%），通过物联网实现远程调控（响应时间<5s），某项目通过该系统使灌溉调度时间从 8 小时缩短至 2 小时。干管设超声波流量计（精度±0.5%），支管设电磁流量计（精度±1%），地块入口设智能水表（精度±2%），实现“总量控制、分区计量”，某项目水资源计量准确率从 70%提升至 95%。

4 布局优化对灌溉效率的影响机制与案例验证

4.1 影响机制分析

4.1.1 对灌溉水利用系数的提升

减少输水损失，优化后的管网路径缩短 20%-30%，沿程损失降低 30%-40%，结合漏损控制（环状管网+智能监测），使输水效率从 75%提升至 90%以上。通过分区精准供水，避免“多灌、漏灌”，使田间水利用系数从 0.80 提升至 0.90，综合灌溉水利用系数提升 0.15-0.20。

4.1.2 对灌溉均匀度的改善

分区稳压使同一地块内灌水定额偏差从±20%降至±5%，作物生长整齐度提高 15%-20%。根据作物生育期需水规律（如小麦拔节期需水 30m³/亩），通过枢纽调度实现“适时、适量”供水，作物水分生产效率从 1.2kg/m³ 提升至 1.6kg/m³。

4.1.3 对灌溉成本的降低

泵站扬程优化+变频调速，使单位灌溉能耗降低 20%-35%，亩均电费减少 10-15 元。智能闸阀远程控制减少人工巡查量 60%，管网漏损率降低减少维修费用 50%，某项目年运维成本从 8 万元降至 3.5 万元。

4.2 典型案例验证

4.2.1 河南平原区高标准农田项目

水源偏离核心区 2.5km，管网路径冗余，灌溉水利用系数 0.68，灌溉均匀度 72%，亩均灌溉成本 65 元。将泵站迁至需水重心（距核心区 0.8km），采用环状-枝状混合管网，路径缩短 40%；配置变频泵站+分区减压阀。灌溉水利用系数提升至 0.83（+0.15）；灌溉均匀度提升至 91%（+19%）；亩均灌溉成本降至 48 元（-26%）。

4.2.2 江苏丘陵区高标准农田项目

优化前状况：水源类型单一（机井为主），管网管径不匹配，灌溉保证率 85%，作物因缺水减产 5%-8%。新增 3 座塘坝（总蓄水量 5 万 m³），与机井组成混合水源；采用变径管网（DN250→DN150→DN100），流速控制在 1.0m/s。布设智能闸阀，实现分区精准灌溉。灌溉保证率提升至 98%（+13%）；灌溉水利用系数从 0.70 提升至 0.85（+0.15）；玉米、小麦平均亩产增加 6%-7%。

表 1 不同布局方案效果对比表

布局方案	灌溉水利用系数	灌溉均匀度	单位能耗 (kWh/m³)	亩均成本 (元)	适用地形
传统布局	0.65-0.70	70%-75%	0.14-0.16	55-65	简单地形
水源优化方案	0.75-0.80	80%-85%	0.12-0.14	45-55	水源分散区域
管网优化方案	0.78-0.83	85%-90%	0.10-0.12	40-50	大面积连片区域
全系统优化方案	0.80-0.85	90%-95%	0.09-0.11	35-45	复杂地形区域

5 高标准农田供水工程布局优化的实施路径与政策建议

5.1 布局优化的精细化实施流程

5.1.1 前期勘察与数据采集

采用无人机航测结合全站仪地面校验,获取 1:1000 比例尺地形图,地形等高线间距 0.5m (平原区)或 1m (丘陵区),确保水源选址与管网路径设计的高程数据误差 $\leq 5\text{cm}$ 。按 50m $\times$ 50m 网格布设土壤采样点,测定 0-20cm、20-40cm、40-60cm 土层的田间持水量(精度 $\pm 2\%$)、渗透系数(采用双环入渗法,误差 $\leq 10\%$);记录种植作物类型(如小麦、玉米、水稻)、生育期(播种期、拔节期、灌浆期)及各阶段需水量(采用蒸发皿法结合作物系数计算,误差 $\leq 5\%$)。监测水源(河流、水库、机井)的多年平均流量、水位变幅(精度 $\pm 1\text{cm}$)、水质指标(pH 值、矿化度等,每月 1 次);绘制地下水等水位线图(每季度更新 1 次),明确禁采区、限采区范围,避免水源布局与水资源管控冲突

5.1.2 多方案模拟与比选

在 EPANET 软件中构建管网模型,输入管材粗糙系数(PE 管 0.009,钢管 0.012)、设计流量(按灌溉高峰时段计算,增加 10%安全系数);模拟不同管径组合(如 DN300+DN200vs DN250+DN150)的水头损失、流速分布,生成水力坡降图,

确保 90%管段流速在 0.8-1.2m/s 区间。计算各方案的“单位效益成本比”(灌溉水利用系数提升值/单位面积投资),优先选择比值 >0.005 的方案;采用动态投资回收期法(基准收益率 8%),对全生命周期成本(含 20 年运维费)进行折现,某项目全系统优化方案回收期 7.2 年,优于单一管网优化方案(9.5 年)。

6 结论

供水工程布局优化通过水源空间匹配、管网水力平衡、枢纽功能适配三重路径,可显著提升灌溉效率,使灌溉水利用系数突破 0.80,灌溉均匀度达 90%以上。不同地形区需采用差异化优化策略:平原区侧重管网路径与管径优化,丘陵区侧重水源类型组合与分区压力调控,复杂地形区需实施全系统协同优化。全系统优化方案的综合效益最优,但初期投入较高(较传统布局增加 15%-20%),需通过长期节能节水收回成本(回收期约 5-8 年)。未来结合无人机航测与 GIS 空间分析,实现布局方案的自动生成与动态更新,提高优化效率 30%以上。将供水工程布局与生态沟渠、湿地净化系统结合,在提升灌溉效率的同时减少面源污染,某试点项目显示,该模式可使农田排水总磷浓度降低 20%。通过科学的供水工程布局优化,高标准农田将实现从“有水灌”到“精准灌、高效灌”的转变,为农业绿色高质量发展。

参考文献:

- [1] 崔向东.高标准农田建设与管理[J].农业科技创新,2025,(21):57-59+80.
- [2] 曾智,陈池波,何蒲明.高标准农田建设何以影响化肥减量施用——以江汉平原地区为例[J].世界农业,2025,(07):81-92.
- [3] 王松.新时期加强高标准农田水利工程建设管理研究[J].农业科技创新,2025,(19):48-50.
- [4] 陈雅雯,罗纨,朱卫彬,等.高标准农田建设中排水沟塘系统改造对排水水质的影响[J/OL].农业工程学报,1-9[2025-07-12].
- [5] 孙兴龙.高标准农田水利工程施工中的质量控制实践研究[J].当代农机,2025,(06):75-76.