

部分河段出现水华暴发、水质黑臭等现象。尤其在塔里木河与叶尔羌河下游，径流不连续使得沉积物与污染物长期堆积于干流或支流断面，通水后集中释放，引发水质骤变。断续性变化还削弱了水生态系统的调节功能，使得污染物稀释、迁移、分解过程滞后甚至失效，造成水环境质量波动性上升、污染治理难度增大。

5.3 人类活动耦合下非点源污染扩散路径的调整

新疆大规模农业灌溉、城市扩展与工业布局使得水利工程与人类活动呈现高度耦合态势，非点源污染在径流过程中的扩散路径与行为机制发生根本转变。渠系衬砌、田间管网、输水闸口等水利设施改变了地表径流收集与汇流模式，污染物流动方向不再遵循自然地貌形态，而是依托人工输配网络在特定节点快速汇聚。雨季初期，地表残留化肥、农药、工业沉积物被集中冲刷入河，形成短时间高浓度负荷峰值，尤其在灌区尾水回流区或分洪渠交汇区表现突出。非点源污染呈现出“聚集释放—突发超标”的高风险特征，对水质监测和应急响应提出更高要求。新疆地广人稀但局部强干预区密集，非点源污染扩散路径需纳入工程调度全过程动态控制机制中，避免污染事件跨区域传播与系统性叠加。

6 地表径流变化环境响应的定量分析与调控路径

6.1 多源数据融合的径流响应评估方法构建

新疆地域跨度大、地貌差异强，水文站点覆盖有限，单一数据源难以全面反映地表径流与环境响应过程。构建以遥感数据、气象监测、水质实测和模型模拟成果为基础的多源数据融合系统，可突破数据孤岛局限，实现对径流量、植被变化、水体面积、水质指标等多维参数的时空综合评估。利用卫星影像提取积雪范围与湖泊动态，结合地面流量水位数据与水文模型输出结果，可高效构建新疆干旱区地表径流响应图谱。图1展示了典型区域内地表径流变化引发环境指标波动的定量分析框架，有助于揭示水文扰动对生态系统的阶段性和区域性影响趋势，为水资源精准管理与调控策略优化提供量化依据，图1为地表径流变化环境响应的定量分析图。

6.2 生态阈值识别与调蓄模式优化路径研究

新疆生态系统对水文变化具明显的边界反应特征，部分绿洲生态带或湿地区域的退化与恢复与生态水量阈值高度吻合。识别不同地类或生态单元对径流、水位、水质的关键响应阈值，是提升工程调度生态适应性的核心环节。通过构建多目标水文生态模拟平台，叠加地理信息与实测数据，能动态捕捉典型断面在不同运行模式下的生态响应曲线，并对下限警戒值设定提供依据。调蓄模式的优化应结合灌溉周期、生态需水周期及地表水动态过程，统筹安排库容释放节奏与流域用水需求分布，提升水工程的综合调控效能。在博斯腾湖等区域实践中，生态阈值识别已为调度规则调整与生态补水制度建立提供理论支撑与实践经验。

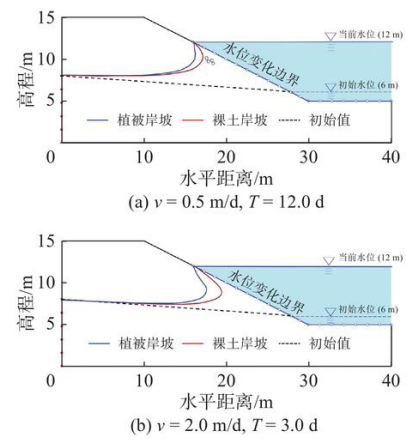


图1 地表径流变化环境响应的定量分析图

6.3 流域尺度的水文生态适应性调控策略设计

新疆大多数水系属于独立内流区域，流域封闭性强、水系完整性易受人为调度影响，需在流域尺度上构建系统化、适应性强的水文生态调控策略。通过构建以“蓄—引—补—放”为主线的复合调度网络，实现上中下游的统一调度与用水功能的空间分区管理，是实现资源最优配置与生态平衡的现实路径。在调控体系中引入生态红线、最小生态流量、地下水位预警指标等硬约束因子，将生态安全与调度目标同步嵌入调控逻辑之中，提升系统响应能力与调整效率。依托实时遥感与水文监控平台，构建水量、水质、水生态三位一体的调控预警机制，使水利工程具备主动调节与被动适应双重功能，实现区域资源保障与生态维稳的同步推进。

7 结语

新疆地处干旱与半干旱过渡地带，水资源时空分布极端不均，水利工程在资源配置中的作用不可替代，但对地表径流过程的深度干预也引发了区域生态格局与水文机制的复杂演化。工程调控下的径流变化加剧了生态系统的敏感性与脆弱性，表现出从水量平衡到水质演变、从湿地萎缩到植被退化的多重环境响应。系统识别工程运行对水文过程的结构性扰动，明确生态阈值并构建流域尺度的动态调控体系，已成为新疆生态安全屏障构建的重要支撑路径。未来应强化遥感监测、数值模拟和阈值识别的协同应用，提升工程运行的生态适应能力，推动水利工程从功能性设施向生态协调载体转型，助力区域水资源与生态环境协调发展。

参考文献

- [1] 向军.赤水河上游径流对气候和土地利用变化的响应研究[D].导师:倪福全.四川农业大学,2024.
- [2] 王奕勤.石川河流域径流变化规律及其对土地利用变化的响应研究[D].导师:周维博,靳德武.长安大学,2023.
- [3] 李苏.气候变化和人类活动对流域径流的影响研究[D].导师:王树谦.河北工程大学,2021.
- [4] 方健梅.变化环境下青海湖流域水文过程演变及其驱动机制研究[D].导师:余新晓;马国青.北京林业大学,2020.

Current Issues and Optimization of Water Conservation Project Construction in Irrigation District Canals

Wei Liu¹ Zhengbo Ding²

1. Inner Mongolia Jiyu Water Conservancy Engineering Construction Co., Ltd., Bayannur, Inner Mongolia, 015000, China

2. Jinyu Construction Group Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

Abstract

Targeting the plain agricultural irrigation area of the Hetao Irrigation District in Inner Mongolia, this study identified key shortcomings—including channel leakage, lining aging and damage, delayed facility maintenance, and insufficient intelligentization levels—based on recent operational and measurement data. The proposed solutions include: steel mesh-concrete standard linings, membrane bag anti-seepage reinforcement, joint water-stabilization consolidation, integrated smart gates with a comprehensive metering chain and SCADA-linked pump station variable-frequency drives, along with a closed-loop inspection work order system and a data-driven operation and maintenance framework. Post-optimization, water conveyance efficiency increased from 71% to 86%, water distribution accuracy improved from $\pm 11\%$ to $\pm 5\%$, automated monitoring coverage rose from 35% to 68%, pump station energy consumption decreased from 0.24 to 0.20 kWh/m³, and the implementation rate of ecological water conveyance improved from 77% to 91%, yielding an annual total benefit of approximately RMB 2.1 million. The results demonstrate that the synergy between technical adaptation and management mechanisms significantly enhances water conservation efficiency and irrigation reliability in the Hetao Irrigation District.

Keywords

Hetao irrigation district; canal water conservation project; steel wire mesh concrete lining; seepage prevention optimization; intelligent scheduling; operation and maintenance management

灌区渠道节水工程建设现存问题及优化

刘伟¹ 丁政博²

1. 内蒙古济禹水利工程建设有限公司, 中国·内蒙古 巴彦淖尔 015000

2. 金誉建设集团有限公司, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

摘要

面向内蒙古河套灌区平原农业灌区, 基于近年运行与计量资料诊断, 识别渠道渗漏、衬砌老化破损、设施运维滞后、智能化水平不足为核心短板。提出钢丝网片混凝土标准衬砌、膜袋防渗补强、节点稳水加固, 配套智能闸门与全域计量链、SCADA 联动泵站变频, 叠加巡检工单闭环与数据化运维体系。优化后输水效率由71%提高至86%, 配水误差由 $\pm 11\%$ 收敛至 $\pm 5\%$, 自动化监测覆盖率由35%提升至68%, 泵站单位能耗由0.24降至0.20 kWh/m³, 生态输水落实率由77%提高至91%, 年综合效益约210万元。结果表明, 技术适配改造与管理机制协同, 可显著提升河套灌区节水效能与灌溉保障能力。

关键词

河套灌区; 渠道节水工程; 钢丝网片混凝土衬砌; 防渗优化; 智能调度; 运维管理

1 引言

内蒙古河套灌区作为我国重要的粮食生产基地, 巴彦淖尔市五原县地处灌区核心区域, 农业以小麦、玉米、葵花轮作为主, 灌溉依赖引黄输水渠道网络, 同时承担区域生态补水任务^[1]。灌区渠道工程多建成于二零零几年, 近年逐步推进节水改造, 主流采用钢丝网片混凝土衬砌、膜袋防渗等

工艺, 但受建设标准、运行年限、地质条件及运维投入等影响, 暴露出衬砌破损渗漏、设施老化、计量精度不足、自动化覆盖率低、运维管理薄弱等突出问题, 严重影响灌溉效率、水资源利用率及农业稳产增收。为此, 本文结合河套灌区五原县段实际, 聚焦钢丝网片混凝土衬砌渠道运行现状, 构建从渗漏治理、设施升级到智能调度、运维优化的成套方案, 为河套灌区同类渠道节水改造提供工程化参考范式。

【作者简介】刘伟(1986-), 男, 中国内蒙古巴彦淖尔人, 本科, 高级工程师, 从事水利工程技术与管理研究。

2 工程概况

2.1 工程基本情况

本研究对象为内蒙古河套灌区巴彦淖尔市五原县段渠道工程，骨干渠系涵盖干渠、支渠、斗渠三级网络，总长115km，服务五原县多个乡镇农田灌溉及区域生态补水。渠道多建成于20世纪70-90年代，2015年后逐步开展节水改造，主流采用钢丝网片混凝土衬砌工艺，部分低洼易渗段辅以膜袋防渗，渠道跨越黄河冲积平原区，土壤以粉砂、壤土为主，地下水埋深较浅，既要保障输水防渗效果，又需兼顾区域地下水合理补给。取水枢纽依托引黄供水体系，干渠首部设置节制闸、量水断面及水位监测设备，承担流量调度、水量计量与用水分配功能，整体服务于河套灌区农业灌溉与生态补水双重需求^[2]。

2.2 工程节水现状分析

梳理近年（2022-2024年）渠道运行、计量及养护资料，河套灌区五原县段渠道节水工程呈现局部改造见效、整体短板突出的现状。渠道衬砌率70%，其中钢丝网片混凝土衬砌占比85%、膜袋防渗衬砌占比15%，剩余未衬砌段为土渠。输水效率71%（末级计量断面实测供水量与取水枢纽引水量之比），年渗漏量约 $1.6 \times 10^6 \text{m}^3$ ，渗漏主要集中在钢丝网片混凝土衬砌裂缝、接缝处及膜袋破损段、老旧土渠段。

现状调度以人工操作闸门、定期人工巡检为主，自动化监测覆盖率仅35%（仅干渠部分关键断面布设监测设备，支斗渠基本空白），计量设施完好率80%，配水误差维持在 $\pm 11\%$ 水平，生态输水落实率77%，泵站单位能耗 $0.24 \text{kWh}/\text{m}^3$ ，峰期能耗偏高，计划性维护到位率72%，预防性养护不足。详见表1，核心短板集中在渗漏治理、设施完好度、自动化监测、精准调度四大方面。

3 河套灌区渠道节水工程现存问题

3.1 渠道渗漏严重，输水效率偏低

河套灌区五原县段渠道长期运行，渗漏问题突出，输水效率持续偏低，核心源于钢丝网片混凝土衬砌老化破损、膜袋防渗失效及土渠渗漏三大因素。渠道跨越黄河冲积平原，土壤粉砂含量高、土质松散，加之冬季严寒冻胀、夏季高温暴晒，钢丝网片混凝土衬砌易出现裂缝、掉块、接缝开裂，共排查出42处渗漏点，其中衬砌裂缝渗漏占比65%、接缝渗漏占比20%；局部膜袋防渗段因老化、外力划伤出现破损，防渗失效，渗漏占比10%；剩余未衬砌土渠段渗透系数大，输水时沿线持续渗失，占比5%。整体年渗漏量达 $1.6 \times 10^6 \text{m}^3$ ，直接导致输水效率仅71%，末端供水水头不足、供水时序不稳定，部分农田灌溉不及时，水资源浪费严重。

表1 河套灌区五原县段渠道节水现状指标表

指标	数值	数据来源	说明
渠道衬砌率	70%	2022-2024年运行档案	主流为钢丝网片混凝土衬砌，局部膜袋防渗，剩余为土渠
输水效率	71%	2022-2024年计量复核	末级计量断面供水量与引水量之比，反映输水损失与调度偏差
年渗漏量	$1.6 \times 10^6 \text{m}^3$	2022-2024年水量平衡分析	钢丝网片混凝土裂缝、接缝渗漏及膜袋破损段为主要渗漏区
计量设施完好率	80%	设备台账与抽检记录	以超声波流量计、水位计为主，支斗渠计量精度衰减明显
自动化监测覆盖率	35%	SCADA配置清单	仅干渠关键断面布设在线监测，支斗渠无覆盖
配水误差	$\pm 11\%$	运行调度记录	人工启闭闸门、来水波动叠加，末端配水不均衡突出
生态输水落实率	77%	生态调度月报	实际补水量与计划比值，灌溉高峰期易出现滞后
泵站单位能耗	$0.24 \text{kWh}/\text{m}^3$	能耗台账与电表读数	高峰负荷下能耗上浮，低谷期设备空转冗余
计划性维护到位率	72%	运维工单与巡检闭环	以破损抢修为主，预防性养护频次低、针对性弱

$$\eta = \frac{\text{实际输水量}}{\text{设计输水量}} \times 100\%$$

式中： η ——输水效率（%）；实际输水量——末级计量断面时段通水量（ m^3 ）；设计输水量——同期计划供水量（ m^3 ）。渗漏导致沿线流量衰减、水位波动，是输水效率偏低的核心诱因。

3.2 节水设施老化破损，技术应用滞后

河套灌区渠道多建成于20世纪70-90年代，早期改造设施服役年限久，节水设施老化破损严重、先进节水技术应用不足。台账数据显示，闸门、分水口、计量设备等核心设施65%超期服役：钢丝网片混凝土衬砌渠道配套闸门密封件硬化、阀体锈蚀磨耗，启闭不灵活、开度漂移，导致闸门处渗漏；计量设备（流量计、水位计）老化，零点漂移、精

度衰减，配水误差扩大至 $\pm 11\%$ 。同时，智能化节水技术覆盖极低，SCADA系统仅覆盖干渠，支斗渠无在线水位、流量监测设备，泵站启停、闸门启闭完全依赖人工经验，无法精准匹配作物（小麦、玉米、葵花）不同生长期需水规律。

现状缺乏土壤墒情监测、按需配水智能模型，田间灌溉仍采用固定配额模式，亩均用水量较河套灌区行业标准偏高13%，灌溉高峰期能耗激增、生态输水计划执行错位。

3.3 管理机制不健全，运维保障能力薄弱

河套灌区五原县段渠道运维资金投入不足、人员专业能力弱、管理制度不完善，形成“重建设、轻管护”的突出问题。年维护费用不足工程总投资的0.4%，资金优先用于应急抢修，预防性养护、设施升级、智能化改造资金缺口大，衬砌裂缝修补、计量设备校准、监测点位增设等工作滞