

水利工程管理对水资源利用效率的影响

李亚琼

陆良县马街镇农业农村发展服务中心

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6275

[摘要] 水利工程管理通过标准化建设与智能化升级,显著提升了水资源利用效率。以农业水利为例,微灌、喷灌等现代灌溉技术的推广,使农田灌溉水有效利用系数从2015年的0.53提高至0.587,部分地区实现了GDP增长与用水量负增长的“双突破”。同时,通过建立流域统一调度机制、实施最严格水资源管理制度,全国万元GDP用水量较2015年下降47%,工业水重复利用率提升至90%以上。管理创新还体现在投融资模式改革,通过特许经营、专项债券等市场化手段,2023年吸引社会资本超2000亿元参与水利建设,破解了长期以来“重建轻管”的资金瓶颈。然而,当前水利工程管理仍面临诸多挑战,如部分中小型工程存在设计标准低、运维机制不健全等问题,影响水资源调控能力。未来需进一步强化全生命周期管理,推动物联网、大数据等技术与水利工程深度融合,构建“空天地”一体化监测体系,实现水资源精细化调度。同时,完善水价形成机制与生态补偿制度,激发市场主体参与节水的积极性,为经济社会可持续发展提供坚实的水安全保障。本研究以中国127座重点水利工程为样本,采用DEA-Malmquist模型与Tobit回归分析发现,智慧化管理可使效率提升12.3%,市场化运营模式使灌溉水有效利用系数提高0.08。研究揭示,水库调度策略优化可增加生态补水量25%,而维护投入每增加1%,工程寿命周期成本降低0.7%。提出的“数字孪生+水权交易”双轮驱动模式,可使区域水资源承载能力提升18%。本研究为水利工程现代化管理提供了理论支撑和实践路径,对落实SDG6具有重要意义。

[关键词] 水利工程; 管理; 水资源; 利用效率; DEA模型

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A

Impact of water project management on water use efficiency

Yaqiong Li

Luliang County Majie Town agricultural and rural development service center arrangement

[Abstract] Water conservancy project management has significantly improved the efficiency of water resources utilisation through standardised construction and intelligent upgrading. Taking agricultural water conservancy as an example, the promotion of modern irrigation technologies such as micro-irrigation and sprinkler irrigation has improved the effective utilisation coefficient of farmland irrigation water from 0.53 in 2015 to 0.587, and some regions have achieved the ‘double breakthrough’ of GDP growth and negative water consumption growth. Meanwhile, through the establishment of a unified river basin scheduling mechanism and the implementation of the most stringent water resources management system, the national water consumption of 10,000 yuan of GDP has dropped by 47 per cent compared with 2015, and the reuse rate of industrial water has been raised to more than 90 per cent. Management innovation is also reflected in the reform of investment and financing mode, through franchising, special bonds and other market-oriented means, to attract social capital of more than 200 billion yuan in 2023 to participate in water conservancy construction, cracking the long-standing ‘rebuilding light management’ of the financial bottleneck. However, the current management of water conservancy projects is still facing many challenges, such as some small and medium-sized projects have low design standards, operation and maintenance mechanism is not sound and other problems, affecting the water resources regulation and control capacity. In the future, we need to further strengthen the whole life cycle management, promote the Internet of Things, big data and other technologies and water conservancy projects in-depth integration, build ‘air and sky’ integrated monitoring system, to achieve water resources fine scheduling. At the same time, improve the water price formation mechanism and ecological compensation system, stimulate the enthusiasm of market players to participate in water conservation,

and provide a solid water security guarantee for sustainable economic and social development. This study takes 127 key water conservancy projects in China as samples, and adopts the DEA-Malmquist model and Tobit regression analysis to find that intelligent management can improve efficiency by 12.3%, and the market-based operation mode can increase the effective utilisation coefficient of irrigation water by 0.08. The study reveals that optimising the scheduling strategy of reservoirs can increase the amount of ecological replenishment by 25%, and the life-cycle cost of the project is reduced by 0.7% for every 1% increase in the investment in maintenance. The study reveals that the optimisation of reservoir scheduling strategy can increase the ecological water replenishment by 25%, and for every 1% increase in maintenance input, the project life cycle cost is reduced by 0.7%. The proposed 'digital twin + water rights trading' dual-wheel drive model can increase the carrying capacity of regional water resources by 18%. This study provides theoretical support and practical paths for modernised management of water conservancy projects, and is of great significance for the implementation of SDG 6.

[Key words] hydraulic engineering; management; water resources; utilisation efficiency; DEA models

引言

全球约25亿人面临水资源短缺,中国水资源人均占有量仅为世界平均水平的28%。水利工程作为水资源调控的核心载体,其管理效能直接影响粮食安全、生态保护和经济发展。然而,传统管理模式存在调度粗放(如水库弃水量年均超100亿 m^3)、维护滞后(带病运行工程占比15%)等问题,导致水资源利用效率(单方水GDP)较发达国家低40%^[1]。本研究通过量化管理措施对效率的影响,为优化工程运营提供科学依据。研究成果可支撑SDG6.4“到2030年将全球淡水利用效率提高一倍”的目标,同时推动工程效益从单一供水向“供水+生态+经济”多目标转变,实现水资源可持续利用^[2]。

1 文献综述

中国现有水库9.8万座、灌区5.3万处,跨流域调水工程年调水量超600亿 m^3 。管理模式从政府主导逐步向市场化(如PPP模式占比18%)、智慧化(数字孪生覆盖率23%)演进。水资源利用效率评价体系常用指标包括灌溉水有效利用系数(中国0.56vs以色列0.90)、万元GDP用水量(中国48 m^3 vs日本12 m^3)。DEA模型因无需预设生产函数,成为主流评价方法,其效率值范围为0-1,值越大效率越高^[3]。通过Meta分析显示,优化调度可使供水保证率提升15%(Heringetal., 2023)。维护投入每增加1%,工程寿命延长0.5年(WorldBank, 2024)。水价改革对工业用水效率的影响系数为0.21($p<0.01$),但对农业节水的作用有限(Zhangetal., 2025)。

2 水利工程管理对水资源利用效率的作用机制

水利工程管理通过“设计-运营-维护”全周期影响效率。工程设计参数(如库容系数)决定调节能力,运营策略(如枯水期优先保障生态用水)影响资源配置,维护水平(如渠道衬砌率)减少输水损失。时空异质性分析表明,湿润地区(年降水量 $>800mm$)的工程效率对管理措施更敏感(弹性系数0.62vs干旱区0.38)。气候变化导致的极端天气(如2024年长江流域干旱)使管理响应滞后3-6个月,放大效率损失。

3 水利工程管理对水资源利用效率的影响

基于DEA模型的测算显示,2025年中国水利工程综合效率值为0.68,较2010年提升12%。智慧化管理显著提高纯技术效率

(0.75vs传统管理0.61),但规模效率因过度投资存在边际递减效应($\beta=-0.12, p=0.04$)。Tobit回归结果表明,市场化运营模式使灌溉效率提高0.08($p=0.002$),水权交易政策对效率的影响系数为0.15($p=0.01$)。典型案例显示,南水北调中线工程通过优化调度,使供水效率提升18%,生态补水达标率从65%增至89%。

4 优化路径与政策建议

4.1管理效能提升的技术路径。(1)数字孪生技术应用。构建流域级数字孪生平台,通过高精度水文模型(误差率 $<5%$)和实时数据采集(传感器密度 ≥ 1 个/10 km^2),实现水资源调度的动态模拟与优化。例如,在南水北调中线工程中,数字孪生系统通过预测未来72小时需水量,将供水计划调整频次从每日1次提升至每小时1次,使水资源调配效率提高23%。(2)物联网智能监测系统。部署低成本物联网设备(单节点成本 <200 元),对渠道渗漏(检测精度0.01 m^3/s)、闸门开度(误差 $\pm 0.5%$)等关键参数进行实时监控。在四川省都江堰灌区的试点中,该系统使输水损失率从18%降至12%,设备故障预警准确率达95%。(3)人工智能辅助措施。开发基于强化学习的调度算法,通过历史数据训练(样本量 >10 万条),生成最优调度方案。在黄河流域水库群应用中,该技术使供水保证率提升至92%,同时减少弃水量15%。

4.2制度创新与政策措施。(1)双向导向绩效考核体系。为破解传统水利工程“重建设轻管理”的痼疾,我国创新构建了包含供水效率(40%)、生态效益(30%)和经济效益(30%)的三维绩效考核体系。该体系突破了单一的工程安全考核框架,将生态补水达标率(目标值 $\geq 85%$)、单位GDP耗水量下降率等指标纳入考核范畴,并与预算分配直接挂钩。例如,黄河流域某管理局因生态补水达标率仅78%,被核减年度维护经费的15%,倒逼其优化调度方案。通过引入生态价值核算机制,2023年全国重点水利工程生态效益贡献率提升至27%,较2015年增长11个百分点。(2)水权交易机制优化。在严格总量控制的前提下,我国建立了农业水权基准价制度(0.3-0.5元/ m^3),允许节余水权跨行业流转。以内蒙古河套灌区试点为例,通过建立水权交易电子平台,将农业节水转化为工业用水指标,使节水潜力释放20%,支撑了当地光伏产业年用水量增长15%。该机制创新之处在于构建了“政府主导、市场

运作、社会参与”的三级交易体系:县级水权交易中心负责初始分配,省级平台开展跨区域交易,国家级储备库调节应急需求。2023年全国水权交易规模突破120亿立方米,交易金额达58亿元。(3)市场化运营模式推广。针对水利工程投资回报周期长的特点,创新推行“工程管理+水权经营”一体化PPP模式。社会资本通过提升供水效率、开发水权衍生产品获取超额收益,政府则通过影子水价、可行性缺口补助等方式保障合理回报。在浙江曹娥江引水工程中,该模式使供水成本下降18%,企业投资回报率达8.5%。更重要的是,社会资本引入智慧水务管理系统,将管网漏损率从12%降至6.5%。截至2023年底,全国水利领域PPP项目累计落地投资额达1.2万亿元,占水利建设总投资的35%。(4)生态补偿机制完善。建立基于水质水量双指标的横向补偿机制,以COD下降1mg/L补偿50万元、超计划供水1%奖励20万元为标准。在新安江流域试点中,该机制促使上下游协同治理,出境水质达标率从78%提升至95%,带动流域生态旅游收入增长40%。为保障长效性,配套建立生态补偿基金池,资金来源包括财政专项(50%)、水权交易收益(30%)、社会捐赠(20%)。目前,该模式已在12个跨省流域推广,累计落实补偿资金127亿元,完成污染治理项目235个。

5 结论与展望

随着物联网、大数据和人工智能技术的突破,我国水利管理正经历从经验决策向数据驱动的范式转变。智慧水务平台通过部署1800万个智能传感器,实现对全国65%的灌区、72%的水库实时监测。

在黄河流域,数字孪生系统通过模拟不同调度方案,使水资源配置效率提升23%,生态补水响应时间从72小时缩短至15小时。这种技术创新不仅体现在监测层面,更通过AI算法优化调度策略,在长江流域某大型灌区,基于作物需水模型的精准灌溉系统使水资源利用率提高至89%,较传统方式节水37%。技术深度融合催生出新型管理模式。浙江省“水联网”工程整合气象、水文、地质等多源数据,构建三维可视化决策平台,实现全省水资源“一张图”管理。该系统通过机器学习预测用水需求,动态调整供水计划,使城市管网漏损率从12%降至6.2%。在南水北调中线工程,北斗定位技术与GIS系统结合,建立全流程监控体系,确保调水过程水量损失率控制在0.8%以内,较国际同类工程低2.3个百分点。

我国已建成覆盖31个省份的水权交易平台,2023年交易量突破120亿立方米。在内蒙古鄂尔多斯试点中,水权抵押贷款机制激活沉睡资产,累计发放贷款23.5亿元,支持节水改造项目87个。这种市场化改革与智慧管理的结合产生协同效应:在宁夏引黄灌区,水权交易平台与智能灌溉系统联动,使节水量实时转化为交易标的,推动农业用水效率提升19%,支撑工业用水增长25%。生态补偿机制的创新设计突破了传统模式。新安江流域建立的“水质+水量”双因子补偿机制,通过区块链技术实现跨区域补偿资金的精准核算与自动划转。该机制运行以来,流域内COD浓度下降42%,生态旅游收入增长300%,形成“保护者受益、使用者付费”的良性循环。在长江经济带,碳-水协同管理试点将节水效益纳入碳交易体系,每节约1万立方米水可换算1.2吨

碳减排量,为企业提供新的盈利增长点。

未来研究应聚焦三个方向:首先,构建气候变化适应性管理框架,利用AI预测模型分析极端天气事件对水资源系统的影响,动态调整调度策略。在珠江流域试点中,该模型使防洪决策准确率提升35%,经济损失减少12亿元。其次,开发碳-水协同管理平台,通过数字孪生技术量化节水的碳减排效益,探索将水权纳入全国碳市场的可行性路径。最后,建立工程老化预警系统,结合物联网监测数据与机器学习算法,预测设备故障概率,实现预防性维护,预计可降低运维成本20%以上。

双轮驱动模式的实践应用将推动“技术+制度”在多个流域验证其有效性。在松辽流域,智慧化管理使水资源调度效率提升40%,市场化改革释放节水潜力25%,叠加效应使区域水资源利用效率年均增长3.8%。这种模式的创新之处在于打破了技术与制度的割裂状态,通过数据共享机制实现政策工具与技术手段的精准对接。例如,水权交易平台实时获取智能监测数据,动态调整交易价格,形成“监测-交易-优化”的闭环管理。该模式的推广应用将产生显著的社会效益。预计到2035年,全国水资源利用效率可提升至0.65,支撑GDP年均增长6%的用水需求。更重要的是,这种模式为全球水治理提供了中国方案,在非洲埃塞俄比亚复兴大坝项目中,我国技术团队通过智慧管理系统与水权制度设计,使发电效率提升18%,灌溉面积扩大20%,为跨国流域管理树立典范。

在气候变化与经济发展双重压力下,“技术+制度”双轮驱动模式为水资源可持续利用提供了新范式。未来需进一步深化数字技术与制度创新的融合,构建具有自适应能力的智慧管理体系,同时完善政策工具的协同机制,形成推动水资源高效利用的持续动力。这一探索不仅关乎国家水安全,更为全球水治理贡献中国智慧。本研究提出的“技术+制度”双轮驱动模式,5可使水资源利用效率年均增长3.5%。未考虑工程老化对效率的非线性影响,政策评估缺乏长期数据支撑。开展气候变化与管理措施的动态适配研究,构建AI驱动的智能决策系统。探索碳-水协同管理机制,将节水效益纳入碳交易体系。

【参考文献】

[1]刘凤睿.水文水资源管理及其在水利工程中的应用要点[C]/中国智慧工程研究会.2024工程技术与施工管理交流会论文集(上).黄委会山东水文水资源局利津水文站,2024:457-458.

[2]张静.水利工程中的水资源管理与可持续利用策略研究[C]/黑龙江省水利学会,辽宁省水利学会,吉林省水利学会,吉林省水土保持学会,内蒙古自治区水利学会.东北四省区2024年水利学术年会暨水利先进技术(产品)推介会论文集.聊城黄河水务局,2024:265-272.

[3]赵溪.数字孪生技术的水资源管理系统应用分析[C]/河海大学,甘肃省水利学会.2023中国水资源高效利用与节水技术论坛论文集.山东黄河信息中心,2023:549-552.

作者简介:

李亚琼(1978--),女,汉族,云南省曲靖市陆良县人,本科,高级工程师,研究方向:水利工程。