

成本控制策略在水利工程中的应用

任雪珺

北京市北运河管理处, 北京

收稿日期: 2025年10月18日; 录用日期: 2025年11月9日; 发布日期: 2025年11月20日

摘要

本研究以北京市北运河管理处为典型案例, 基于全生命周期理论与数据驱动方法, 系统分析了水利工程运维成本控制中的关键问题与优化路径。针对成本结构失衡、核算精度不足、技术赋能滞后等现实痛点, 提出了构建动态化成本模型、强化技术驱动的降本增效机制、完善监管与风险防控体系三大策略。通过整合物联网监测数据与历史成本信息, 建立基于机器学习的成本预测模型, 实现预算的动态调整与应急储备金的精准计提; 依托“云-网-端”一体化监控系统, 提升设备故障预警能力, 推动智能化巡检替代传统人工巡检; 结合标准化运维体系与跨部门协同机制, 有效减少资源重复投入。研究表明, 上述策略能够显著提升资金使用效率, 为水利工程的长效运行提供科学决策支持, 对推动水利行业向智能化、绿色化转型具有重要的实践价值。

关键词

水利工程, 运维成本, 全生命周期, 数据驱动, 成本控制

The Application of Cost Control Strategies in Water Conservancy Projects

Xuejun Ren

Beijing North Canal Management Office, Beijing

Received: October 18, 2025; accepted: November 9, 2025; published: November 20, 2025

Abstract

Taking the Beijing North Canal Management Office as a case study, this research systematically analyzes the core issues and optimization strategies of operation and maintenance (O & M) cost control in water conservancy projects based on full life cycle theory and data-driven approaches. Targeting challenges such as cost structure imbalance, low accuracy, and insufficient technological

empowerment, three key strategies are proposed: constructing a dynamic cost model, strengthening technology-driven cost reduction and efficiency improvement mechanisms, and improving the regulatory and risk control system. By integrating IoT monitoring data and historical cost information, a machine learning-based cost prediction model was established to achieve dynamic budget adjustments and accurate allocation of emergency reserves. The “cloud-network-terminal” monitoring system enhances equipment fault prediction, reducing reliance on manual inspections. Standardized maintenance systems and interdepartmental collaboration further minimize resource redundancy. Results demonstrate that these strategies significantly improve capital efficiency, providing scientific support for sustainable engineering operations and advancing the intelligent and green transformation of the water conservancy sector.

Keywords

Water Conservancy Projects, Operation and Maintenance Cost, Full Life Cycle, Data-Driven, Cost Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水利工程作为国家关键基础设施的重要组成部分，其长期稳定运行直接关系到防洪安全、生态保障以及社会经济可持续发展。然而，随着工程规模不断扩大和运行环境日益复杂，传统运维模式在成本结构失衡、技术赋能滞后以及风险预判能力不足等方面面临多重挑战。尤其在智能化与绿色化转型的背景下，如何依托全生命周期管理和数据驱动机制，实现运维成本的精准控制，已成为行业亟需解决的核心议题。研究表明，传统的“静态预算 + 事后审计”管理模式难以适应复杂多变的运维需求，而物联网、机器学习等新一代信息技术的融合应用，为动态化成本调控提供了新的可能路径。本文以北京市北运河管理处为典型案例，系统剖析水利工程运维成本的关键影响因素，进而提出融合动态成本预测模型、智能监控体系与标准化协同机制的综合优化策略，以期为提升资金使用效益、推动水利行业高质量发展提供科学依据与实践支撑。

尽管当前水利工程运维成本控制研究在理论框架与技术路径方面已取得一定进展，但仍存在若干明显不足。多数成本控制模型仍沿用制造业或建筑行业的通用方法，未能充分考虑水利工程“点多线长、类型多样、运行环境复杂”等特有属性，导致模型在实际应用中适应性较差、预测精度有限。例如，现有模型往往未对水工建筑物、机电设备与水环境系统之间的差异化维护逻辑进行有效区分，难以准确识别各子系统的成本驱动因素。此外，数据驱动的实证研究仍较为薄弱。尽管部分流域已部署“云-网-端”等智能监控系统，但由于物联网设备覆盖率不足、数据标准不统一以及信息孤岛现象的存在，高质量、全生命周期的运维数据尚未实现有效整合，从而限制了机器学习等先进算法的实际应用。当前研究多聚焦于单一技术或管理手段的优化，缺乏对“技术-制度-资金”三位一体协同机制的系统性探讨，难以形成可复制、可推广的成本控制范式。同时，在极端气候频发背景下，针对应急成本动态调控机制的研究仍显不足，风险储备金的计提多依赖经验判断，缺乏基于气候预测与历史灾损数据联动的量化模型支持。上述短板共同制约了水利工程运维成本控制从“经验导向”向“智能精准”的转型进程，亟需在后续研究中加强跨学科融合、实证验证与机制创新。

2. 研究背景

2.1. 水利工程运行维护的重要性与经济价值

水利工程作为国家重要基础设施，其运行维护工作直接关系到防洪安全、生态保障以及社会经济的可持续发展。在防洪安全方面，我国已建成有效灌溉面积达 9.68 亿亩的农田灌溉体系，并通过堤防加固、水闸调控等工程措施构建起旱涝保收的防护系统。2024 年《求是》杂志刊发的署名文章进一步强调，要持续推进防洪体系现代化，突显了水利工程在国家安全中的战略地位。在生态保障方面，水利工程通过实施生态流量管控与水环境修复等措施，有效维护河湖生态健康。随着水环境保洁力度不断加大和相关标准逐步提升，河道再生水补水机制也日趋完善，水利工程运行维护在推动生态文明建设方面的作用愈发显著。

水利工程作为基础设施建设的重要组成部分，对促进区域经济发展、保障水资源合理利用和防灾减灾等方面起着至关重要的作用[1]，其对于维护我国社会与经济的稳定发展担负着重要责任[2]。当前水利工程的利润不断缩小[3]，智能化、绿色化转型背景下，运维成本控制尤为迫切。水利工程造价管理是一个复杂而系统的过程，需要从立项、设计、招投标、施工实施、竣工决算以及运行维护等各个阶段进行全面、细致的管理和控制[4]。当水利工程处于投入运行阶段时，降本增效策略可以为水管单位提供积极、有效的维护保养方案，从而降低维护成本[5]，财务管理在工程项目管理中的作用越发重要[6]。厉莎等[7]认为，水利工程 EPC 模式的项目也应该开展全生命周期工程造价管理和控制，以达到项目的全生命周期成本最优。通过“云-网-端”全链路监控系统可降低非计划停机损失；同时，专项维修占比过高、预防性维护投入不足等问题仍存。构建动态化成本模型与智能运维体系，成为提升资金效能、实现水利工程长效运行的关键路径。

范亚军[8]认为，完善成本费用管理体系，构建成本全过程管理系统是水利工程维护成本控制的关键。李新平[9]基于 PLS-SEM 模型对假设进行实证检验。结果表明，缺乏数据可用性和缺乏了解是水利工程项目影响生命周期成本分析的最大障碍。孟德秀[10]提出了一套实用的整合方法，旨在确保成本效率达到最优水平。廖惠霞[11]针对造价计价、材料采购与管理、劳动力使用与管理等方面可能出现的问题，提出加强设计阶段的成本控制、强化工程预决算管理、加强材料供应与管理、优化劳动力配置与使用、加强成本分析和对策研究等措施，以更好地把控水利水电工程项目的成本支出。

2.2. 北运河水利工程运行维护基本情况

北运河作为北京城市副中心防洪排涝的骨干河道，其维护工作主要包括水工建筑物、机电设备、水环境保洁以及智能化系统四大板块。其中，水工建筑物维修在运维任务中占比最高，水环境保洁次之，重点涉及再生水利用与水生植物养护。智能化系统投入目前占总运维成本比重较低，故障预警能力仍有待提升。在资金分配方面，专项维修资金占比超过 40%，结构矛盾较为突出，反映出预防性维护投入不足，且应急措施费用年度波动较大，暴露出风险预判机制缺失的问题。此外，人力成本呈刚性增长趋势，而自动化替代率偏低，形成双重压力，亟需通过技术升级与成本模型优化，推动运维管理向精细化方向发展。北运河 2021~2024 年均运维成本构成占比详见图 1。

3. 现存问题分析

3.1. 维护标准不统一与资源重复投入

北运河管理处的运维工作尚未建立标准化的运行维护与管理体系，造成资源重复投入和运行效率降低。一方面，水工建筑物的维护标准不够明确，例如堤路修复作业中采用不同施工工艺，部分区段仅

北运河2021~2024年均运维成本构成占比

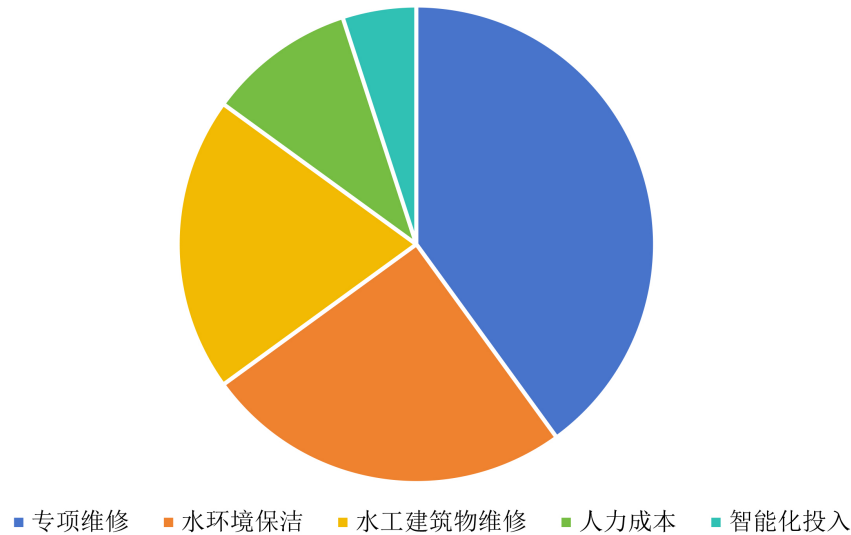


Figure 1. Composition of average annual operation and maintenance costs at the north canal (2021~2024)
图 1. 北运河 2021~2024 年均运维成本构成占比

进行表面粉刷而未应用高耐久性材料，导致维护周期缩短；另一方面，机电设备智能化改造缺乏统一的技术规范，引发设备兼容性不足和后期维护成本上升的问题。此外，跨部门协作机制不健全，水环境保洁、生态修复、水资源配置与调度等工作分属不同科室管理，未能形成有效协同。例如，在 2024 年北运河综合治理移交项目中，绿化维护与水环境保洁存在部分重复作业，反映出资源整合不足的现状。标准化体系的缺失将推高运维成本，亟需通过制度优化提升资源利用效率。

3.2. 成本结构失衡与资金分配矛盾

北运河管理处的运维成本结构存在显著失衡，突出表现为专项维修与预防性维护比例失调，以及技术升级投入不足。2021 年至 2024 年期间，专项维修费用年均占比超过 40%，而日常预防性维护(如堤路粉刷、防护网更换等)投入不足，形成了“重抢修、轻养护”的被动管理局面。2024 年，桥梁荷载试验和应急启闭设备购置等支出均属突发性项目，反映出前期风险预判机制缺失。此外，机电设备智能化改造进程滞后，2023 年自动化监控相关维护费用仅占运维总成本的不足 8%，远未达到智慧化运维的实际需求，制约了故障预警能力与能耗管理水平的提升。在资金分配方面，预算精准性亦有不足，例如 2024 年镜河再生水购置费的实际结算金额偏高，预算偏差超过 50%，凸显出动态调控机制的缺失。与此同时，人力成本呈刚性增长，而自动化替代水平较低，形成双重压力：2023 年大光楼区域的保安保洁费用占日常运行管理费用的 30%，而智能巡检覆盖率不足 10%，亟需通过技术赋能优化人力资源配置与成本结构。

3.3. 成本核算精度与动态调控缺失

当前水利工程维护成本控制暴露出运维成本核算存在显著偏差、动态调控机制薄弱以及资金使用效率低下等问题。从预算执行情况来看，现有体系过度依赖历史数据，缺乏动态修正能力。例如，某水闸标准化建设项目的预算因第三方审核出现较大幅度调整，反映出成本预测模型与实际需求之间存在脱节。此外，应急成本波动剧烈，单批次年度应急措施费用可达近百万元，但由于缺乏风险预判机制，常陷入被动应对状态，导致应急支出挤占预防性维护预算。在动态调控方面，智能化监控手段明显不足，2023 年自动化监控维护费所覆盖的设备范围有限，难以实现全流域运维数据的实时采集，从而制约了成本的

动态分析能力。同时，全生命周期成本台账尚未建立，水工建筑物、机电设备等资产的折旧与维护记录分散，难以精准识别成本驱动因素。研究表明，传统的“静态预算 + 事后审计”模式已难以适应水利工程复杂的运维管理需求，亟需引入基于物联网数据与机器学习的成本预测模型，推动成本管理从“经验估算”向“精准调控”转变。

3.4. 技术赋能与人力成本矛盾

在水利工程运维管理实践中，技术赋能与人力成本刚性增长之间的矛盾日益突出。2023 年数据显示，保安保洁费用占日常运行管理费用的 30%，而智能化相关投入占比不足 8%，反映出当前管理模式仍高度依赖人力。尽管“云-网-端”监控系统已覆盖多数视频监控站及水位流量监测站，但设备整体覆盖率与在线率偏低，制约了自动化水平的提升，导致人工巡检和应急处置频次持续处于高位。此外，人力成本呈刚性上升趋势，2024 年大光楼单批次保安保洁费用资金需求较高，而智能巡检设备的年度维护成本相对较低，技术替代人力带来的成本优势尚未充分体现。究其根源，矛盾主要源于资金配置的结构失衡：专项维修支出挤占了预防性维护预算，智能化改造投入不足又加速了设备老化，进而加剧了人工运维压力。研究表明，应通过“技术升级 + 流程再造”双轮驱动，优化成本结构，例如推广智能语音杆主板电池升级等技术措施，并相应压缩人工巡检频次，从而充分发挥技术红利对人力成本的替代效应。

3.5. 数据驱动决策能力不足与信息孤岛现象

北运河管理处虽已初步建成“云-网-端”全链路监控系统，但其数据驱动决策能力仍有待加强。当前，物联网设备覆盖不全面，例如智能语音杆仅部署于部分河道、堤防及水闸区域，视频监控站数量为 122 个，难以实现对流域内全部水工建筑物和机电设备的实时状态监测。其次，数据整合程度不足，水环境保洁、机电设备维护等业务数据分散在不同科室，形成信息孤岛，致使成本分析多依赖经验判断，缺乏动态模型支撑。同时，镜河再生水购置费预算偏差较大，反映出数据采集频次与精度不足，难以满足机器学习预测的需求。此外，风险预警机制缺失，应急措施费用年度波动达 70 万~90 万元，尚未能结合气候预测模型与历史数据进行联动分析，影响资金的精准配置。研究表明，传统“静态预算 + 事后审计”模式已难以应对复杂的运维管理需求，亟需构建融合物联网与人工智能技术的动态调控体系。

4. 解决策略与优化路径

4.1. 推行标准化运维体系与跨部门协同机制

针对维护标准不统一和资源浪费问题，有必要从制度层面构建标准化体系与协同机制。首先，应制定《水利工程智能化运维技术导则》，明确堤路修复工艺(如强制采用高耐久性材料)、机电设备改造(如统一智能语音杆主板电池型号)等量化指标，并将镜河泵站维护中应用的节能工艺推广至其他管理单位。其次，建立跨部门资源调配平台，整合水环境保洁、绿化维护等业务，利用无人机巡检与 GIS 系统实现任务协同，减少重复作业。例如，在北运河综合治理移交项目中，可将绿化打草与水草清理工序合并，从而有效节约成本。此外，推行专项维修全过程成本追踪机制，结合财政部“以奖代补”政策对资金使用效率进行量化考核，以提升资金利用率。通过标准化与协同机制，可降低无效投入，为水利工程的长效运行提供制度保障。

4.2. 构建动态化成本控制模型

针对北运河管理处运维成本核算偏差较大、应急支出波动显著的问题，有必要构建一套融合物联网与机器学习的动态成本控制模型。首先，整合历史数据与实时监测信息，运用回归分析方法建立成本预测模型。结合 2021 至 2024 年间堤路维修、智能语音杆维护等分项支出数据，识别关键成本驱动因素，

动态优化预算分配权重。其次，依托“云-网-端”一体化监控系统，借助视频监控站、河道流量监测站等物联网设备，实时采集设备运行状态与能耗信息，并利用机器学习算法预测设备故障概率，从而降低非计划性停机带来的损失。此外，推行全生命周期成本台账管理，对水工建筑物及机电设备的折旧与维修记录进行动态追踪，通过风险评估模型提前判断更新需求，有效控制专项维修费用占比。最后，建立应急成本储备机制，依据历史应急支出波动情况，按年度预算的 3%至 5%计提专项准备金，并结合气候预测模型动态调整储备规模，以实现资金的灵活调度，提升预算编制的精准度，为水利工程的高效、精细化运维提供科学决策支持。

4.3. 强化技术驱动的降本增效

北运河管理处的实践表明，技术赋能是有效应对运维成本刚性增长的关键路径。通过构建“云-网-端”一体化监控系统，实现了设备全生命周期管理及故障预测能力提升。以智能语音杆主板电池升级为例，该举措显著增强了设备运行稳定性，并降低了人工巡检频次；而在自动化监控设备年维护成本较高的情况下，借助物联网传感器与 AI 算法优化，可有效减少非计划停机造成的损失。此外，数字孪生技术的应用大幅提升了管理决策效率，如在多因素变化条件下的防洪排涝能力分析项目中，通过三维建模与数值模拟精准识别堤防沉降风险点，从而提升了专项维修的针对性。在绿色转型方面，镜河泵站设备设施维修改造项目通过采用节能型排涝泵与循环管线防腐工艺，实现了能耗的有效降低。研究进一步指出，技术升级需与流程再造相结合：一方面，推广模块化设计有助于降低备件库存成本；另一方面，构建智能诊断平台能够压缩故障响应时间，减少应急措施费用的波动。未来应持续深化数字孪生与光伏建筑一体化(BIPV)等技术的融合应用，推动运维模式向“预防性维护 + 智能化替代”方向转型升级。

4.4. 完善成本监管与风险防控机制

针对北运河管理处运维成本监管薄弱、应急支出波动显著的问题，有必要从全生命周期成本台账构建、动态预算调控以及风险储备机制三方面系统建立防控体系。首先，应建立资产折旧与维护联动的台账管理体系，利用物联网传感器实时采集水工建筑物及机电设备的运行状态数据，结合机器学习技术分析历史维修记录，精准识别成本驱动因素，扭转“重抢修、轻养护”的被动运维模式。其次，推行动态预算调整机制，依据 2021~2024 年分项支出数据，采用回归分析方法优化预算分配权重，并引入气候预测模型动态调整应急资金比例。例如，针对 2024 年应急措施费用偏高的情况，可基于历史波动率测算，按年度预算的 3%~5%计提专项准备金。最后，加强第三方审计与绩效评估，参照《水利工程供水定价成本监审办法》对专项维修项目实行全过程成本追踪，并依托财政部“以奖代补”政策对资金使用效率开展量化考核。研究表明，上述机制能够有效减少非计划停机损失，提升预算编制的精准度，为水利工程实现精细化运维提供长效支撑。

4.5. 构建全域数据融合与智能决策平台

针对数据驱动能力不足的问题，需构建全域数据融合平台，实现全生命周期成本的动态管理。首先，应提升物联网设施覆盖率，增设河道流量与水位监测站点，并对智能语音杆进行传输功能改造，确保水工建筑物、堤防堤路及机电设备状态数据的实时回传。其次，建立数据共享机制，打通水环境管理、工程管理、自动化与信息化管理等各部门之间的数据壁垒，整合水环境保洁、自动化监控等多源信息，构建统一的成本数据库。同时，引入机器学习算法，基于 2021 至 2024 年的分项支出数据训练成本预测模型，实现预算权重的动态调整。例如，结合气候预测模型，将应急措施费用的计提比例优化至更精准区间，从而减少非计划停机损失。最终，通过数据驱动决策提升成本核算的精确度，为精细化运维提供科学支撑。数据驱动的水利工程成本控制决策流程详见图 2。

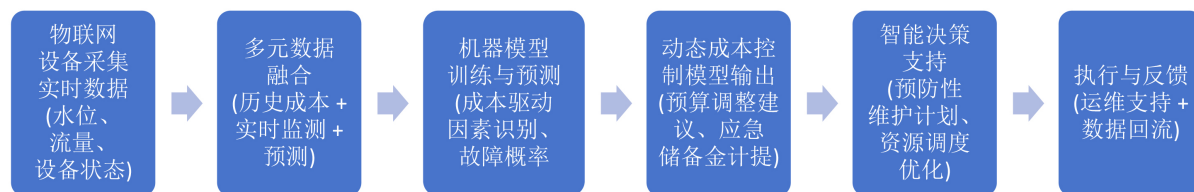


Figure 2. Data-driven decision-making process for cost control in hydraulic engineering projects

图 2. 数据驱动的水利工程成本控制决策流程

5. 结论

1) 传统“静态预算 + 事后审计”模式已难以适应复杂运维需求，亟需构建基于物联网与机器学习的动态成本控制模型。通过整合历史数据与实时监测信息，精准识别成本驱动因素，并动态调整预算分配权重。依托“云-网-端”监控系统采集设备健康状态与能耗数据，结合机器学习算法预测设备故障概率，可有效降低非计划停机造成的损失。同时，建立应急成本储备机制，融合气候预测模型优化资金调配策略，显著提升预算精准性，为精细化运维提供科学决策支持。

2) 技术升级对降低人力依赖、优化成本结构具有关键作用。通过推广“云-网-端”全链路监控系统，实现设备全生命周期管理与故障预测，同步减少人工巡检频次；采用高耐久性材料延长堤路维护周期，从而降低长期维护成本。对智能语音杆主板电池进行升级，并对其通信功能实施改造，可有效提升设备稳定性，也验证了技术替代人工的可行性。未来应进一步探索数字孪生、AI 诊断等技术的应用潜力，推动运维模式向“预防性维护 + 智能化替代”转型。

3) 针对维护标准不统一与资源重复投入问题，需从制度层面构建标准化体系与跨部门协同机制。制定《水利工程智能化运维技术导则》，强制推广高耐久性材料、统一机电设备改造标准，以减少无效投入。同时，建立跨部门资源调配平台，整合水环境保洁、绿化维护等业务，借助无人机巡检与 GIS 系统实现任务协同，避免重复作业。此举不仅有助于提升资金利用效率，也为水利工程长效运行提供可持续的制度保障。

本研究以北京市北运河管理处为案例，系统构建了数据驱动的动态成本控制模型，并提出多项优化策略，但仍存在一定局限性。首先，研究结论高度依赖单一区域的运维数据与管理实践，其成本结构、技术条件与制度环境具有地域特殊性，普适性需在不同流域、不同规模的水利工程中进一步验证。其次，所提出的机器学习预测模型尚未经过长期运行和多场景实证检验，其预测精度与稳定性仍需在实际应用中持续优化。此外，智能化改造投入与成本节约之间的量化关系缺乏对照实验支撑，影响策略效果的客观评估。未来研究应拓展多案例比较与模型迭代验证，以增强理论外推力和实践指导价值。

参考文献

- [1] 曾盼峰. 水利工程项目全过程成本控制的策略与实践[J]. 工程与建设, 2024, 38(3): 714-716.
- [2] 范学进. 浅谈水利水电工程项目中的成本控制及财务管理[J]. 纳税, 2021, 15(21): 83-84.
- [3] 李莹. 浅析控制水利工程施工成本的对策[J]. 财经界, 2020(11): 31-32.
- [4] 蒋茜. 水利工程全生命周期造价管理及其优化策略[J]. 水上安全, 2025(4): 100-102.
- [5] 滕敏. 降本增效策略在水利工程成本管理中的应用与效果分析[J]. 中国商界, 2025(5): 32-33.
- [6] 杨波. 新时期水利水电工程施工项目财务管理的有效策略[J]. 中国管理信息化, 2024, 27(9): 39-42.
- [7] 厉莎, 曾瑜. 全生命周期管理理念在水利工程 EPC 模式下工程造价管理中的应用[J]. 小水电, 2022(1): 6-7 + 23.
- [8] 范亚军. 水利水电施工合同管理与成本控制研究[J]. 企业改革与管理, 2020(16): 189-190.

- [9] 李新平. 水利工程项目生命周期成本分析实施的障碍因素[J]. 水利科学与寒区工程, 2025, 8(4): 137-140.
- [10] 孟德秀. 探究水利工程品牌推广与标准化成本控制的整合[J]. 中国品牌与防伪, 2024(8): 68-70.
- [11] 廖惠霞. 水利水电工程项目成本造价分析与控制管理[J]. 商讯, 2024(2): 176-178.