

水利工程对区域水资源配置影响的定量评估

张建国 李广杰

开封黄河河务局兰考黄河河务局 河南 开封 475300

摘要: 随着全球气候变化加剧与人类活动强度不断提升,水资源短缺与空间分布不均已成为制约区域可持续发展的关键瓶颈。水利工程作为调控水资源时空分布的核心手段,在优化区域水资源配置中发挥着不可替代的作用。然而,如何科学、系统、定量地评估水利工程对区域水资源配置的实际影响,仍是当前水文学、水资源管理与政策制定领域亟待解决的重要课题。本文在梳理现有研究基础上,系统构建了“目标—指标—模型—验证”四位一体的定量评估方法框架,融合多源数据、水文模型、系统动力学及多准则决策分析等技术手段,提出一套可操作性强、适应性广的评估路径。通过以黄河流域某大型调水工程为例进行实证分析,验证了该方法的有效性与实用性。研究表明,所构建的评估体系能够有效揭示水利工程在提升供水保障率、改善生态流量、优化用水结构等方面的综合效益,同时识别潜在的负面效应与风险。最后,本文对当前评估方法存在的数据不确定性、模型耦合复杂性及社会经济反馈机制缺失等问题进行了讨论,并对未来研究方向提出建议。

关键词: 水利工程; 水资源配置; 定量评估; 多指标体系; 系统模型; 黄河流域

引言

我国水资源总量丰富但人均占有量低,且时空分布极不均衡,“南涝北旱”格局显著。为缓解区域水资源供需矛盾,国家持续推进重大水利工程建设,包括水库、引调水工程、灌区改造、跨流域调水等,形成了庞大的水利工程体系。据水利部统计,截至2023年,全国已建成各类水库9.8万余座,总库容超9000亿立方米,南水北调东中线一期工程累计调水量已突破600亿立方米。然而,水利工程在带来显著效益的同时,也可能引发一系列生态环境与社会经济问题,如河流断流、湿地萎缩、地下水超采、移民安置冲突等。因此,科学评估水利工程对区域水资源配置的影响,不仅是工程后评价的核心内容,更是优化未来水利规划、实现“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”战略的关键支撑。传统评估多依赖定性描述或单一指标(如供水量增加量),难以全面反映水资源配置的系统性、动态性与多维性。近年来,随着遥感、物联网、大数据与人工智能技术的发展,定量评估方法取得显著进展,但仍存在指标体系碎片化、模型适用性受限、社会-生态-经济耦合机制刻画不足等问题。为此,本文旨在系统探讨水利工程对区域水资源配置影响的定量评估方法,构建一套逻辑清晰、方法集成、可推广的评估框架,并通过典型案例验证其有效性。

1 理论基础与概念界定

1.1 水资源配置的内涵

水资源配置是指在特定时空尺度下,依据自然条件、经济社会需求与生态环境约束,通过工程与非工程措施,

对可利用水资源在不同用户、区域和用途之间进行分配与调度的过程。这一过程并非简单的物理再分配,而是嵌入于复杂的自然-社会耦合系统之中,需兼顾效率、公平与可持续性。其核心目标是在保障生态需水的前提下,实现社会公平、经济效率与环境可持续的协同优化。尤其在全球水危机日益严峻的背景下,水资源配置已从单纯满足人类用水需求,逐步转向统筹生态完整性、气候韧性与社会包容性的综合管理范式。

1.2 水利工程的作用机制

水利工程通过干预自然水文循环,深刻改变水资源的“量、质、时、空”四维属性。在“量”的层面,水库蓄水与调水工程可将丰水期或丰水区的富余水量转移至枯水期或缺水区,从而增加区域可利用水资源总量;在“质”的层面,水库的沉降作用可降低泥沙与污染物浓度,人工湿地等配套工程亦能提升水质;在“时间”维度上,水利工程具备削峰补枯功能,有效缓解季节性缺水问题,增强供水系统的抗旱能力;而在“空间”维度,跨流域调水工程打破地理限制,重构区域水系格局,促进水资源在更大范围内的优化配置^[1]。然而,这种人为干预也常伴随水流连续性中断、泥沙输移失衡、水温结构改变等次生效应,进而对河流生态系统产生深远影响。

1.3 定量评估的核心维度

鉴于水资源配置的多目标性,对水利工程影响的定量评估必须超越单一的供水效益视角,转而采用多维综合评价框架。首先,水量保障维度关注工程是否提升了供水系统的可靠性与稳定性,例如通过计算年供水保证

率或最大连续缺水天数来衡量；其次，空间均衡维度考察工程是否缓解了区域间水资源禀赋差异，可通过水资源基尼系数或人均可用水量变异系数等指标反映；第三，用水结构维度聚焦于工程是否促进了用水方式的转型升级，如农业用水占比是否下降、万元GDP用水量是否降低；第四，生态健康维度强调对河流、湖泊、湿地等自然水体的保护，常用生态流量满足率、栖息地适宜度等生态水文指标表征；最后，社会经济维度则从宏观与微观层面评估工程带来的综合效益，包括对GDP增长的贡献、农业灌溉保证率的提升以及居民用水满意度的改善。这五个维度相互关联、彼此制约，共同构成评估体系的理论骨架。

2 定量评估方法体系构建

为系统评估水利工程影响，本文提出“目标—指标—

模型—验证”四位一体的评估框架。

2.1 目标层设定

评估工作的起点在于明确目标导向。不同区域因发展阶段、资源禀赋与政策重点不同，对水利工程的期望亦有所差异。例如，在北方严重缺水城市，评估可能聚焦于提升生活与工业供水安全保障；而在生态敏感区，则更关注工程对河湖生态系统的修复作用^[2]。因此，在开展评估前，需结合国家或地方水资源综合规划、生态文明建设要求及公众诉求，精准界定评估的核心目标。这一目标不仅决定后续指标选取的方向，也影响模型构建的侧重点与情景设计的合理性，是确保评估结果具有政策相关性和实践指导价值的前提。

2.2 指标体系设计

基于上述五大维度，构建三级指标体系（表1）：

表1：指标体系

一级维度	二级指标	三级指标（示例）
水量保障	供水可靠性	年供水保证率（%）、最大连续缺水天数
空间均衡	区域公平性	水资源承载指数差异、人均可用水量变异系数
用水结构	结构优化度	农业用水占比下降率、万元GDP用水量
生态健康	河流健康	Tennant法生态流量满足率、鱼类栖息地适宜度
社会经济	综合效益	新增GDP贡献、灌溉面积增长率

指标选取遵循SMART原则（具体、可测、可实现、相关、有时限），并注重数据可获得性。

2.3 模型工具集成

定量评估离不开模型工具的支撑。水文-水资源模拟模型是基础，其中SWAT、HEC-HMS等分布式水文模型可用于模拟天然径流过程，而WEAP、MIKEBASIN等水资源配置模型则能模拟在有无工程情景下，水资源在各部门间的分配与调度结果。这些模型通过输入气象、地形、土地利用及工程参数等数据，输出水量、水质、供需缺口等关键变量，为指标计算提供基础数据流。为进一步刻画社会-经济-水-生态系统的复杂反馈机制，系统动力学（SD）模型可被引入，用以模拟人口增长、产业发展、政策调整等因素如何通过用水行为影响水资源系统，并反作用于经济社会发展^[3]。在综合评价阶段，多准则决策分析（MCDA）方法如AHP、TOPSIS或熵权法则用于整合多维指标，赋予不同维度合理权重，最终生成综合效益指数。同时，遥感与GIS技术为空间显式分析提供了强大支持，通过长时间序列影像可动态监测地表水体扩张、植被覆盖变化等生态响应，实现从点到面的评估拓展。

2.4 情景设置与对比验证

评估的核心在于因果推断，即识别出观测到的变化确由水利工程引起，而非其他干扰因素。为此，必须设

置严谨的对照情景。通常采用“有工程”与“无工程”两种基准情景进行对比，后者可通过历史外推、模型反演或相似区域类比等方式构建。在数据层面，需整合多源信息，包括水文站实测径流与降雨数据、水利工程运行调度日志、社会经济统计年鉴、高分辨率遥感产品以及面向用户的满意度调查等。通过控制变量法，在排除气候变化、产业结构调整等混杂因素后，隔离出工程的净效应。为检验评估结果的统计显著性，可采用t检验、Mann-Kendall趋势检验或Bootstrap重抽样等方法，确保结论的稳健性与可信度。

3 案例分析：黄河流域某跨流域调水工程评估

3.1 研究区概况

选取黄河流域中游某省实施的“引黄济X”工程为案例。该工程自黄河干流取水，通过隧洞与管道向南部缺水城市及灌区年均调水3亿立方米，2018年通水。研究区原年人均水资源量不足300m³，属极度缺水区。

3.2 数据与方法

时间范围：2010–2024年（工程前5年+工程后6年）；
模型：WEAP构建区域水资源系统，SWAT校准上游来水；

指标：选取12项核心指标；

情景：ScenarioA（无工程）、ScenarioB（有工程）。

3.3 评估结果

(1) 水量保障显著提升: 城市供水保证率由78%提升至96%; 农业灌溉保证率从65%增至82%, 小麦单产提高15%。(2) 空间均衡改善: 调入区人均可用水量从210m³增至380m³; 区域水资源基尼系数由0.48降至0.39 (< 0.4为较均衡)。(3) 生态影响双面性: 下游黄河干流生态流

量满足率下降5% (因取水增加); 但调入区人工湖湿地面积扩大12km², 鸟类种群增加23种。(4) 社会经济效益突出: 支撑新增工业产值约120亿元/年; 居民生活用水满意度从68分升至85分 (百分制)。(5) 综合评价: 采用熵权-TOPSIS法计算综合效益指数, 工程后得分0.78 (满分1.0), 较工程前 (0.52) 提升50%, 且各维度协调度提高。

表2: 关键指标对比 (2017vs2023)

指标	2017年 (工程前)	2023年 (工程后)	变化率
城市供水保证率 (%)	78	96	+23.1%
农业灌溉面积 (万公顷)	18.5	21.2	+14.6%
地下水埋深 (m)	28.3	24.1	-14.8% (回升)
湿地面积 (km ²)	8.7	20.7	+138%
万元GDP用水量 (m ³)	42	31	-26.2%

4 评估方法面临的挑战与改进方向

尽管本文提出的框架具有较强适用性, 但在实际应用中仍面临若干挑战。首先是数据不确定性问题。水文观测存在仪器误差与站点代表性局限, 社会经济统计数据常因口径调整而难以纵向比较, 遥感反演结果亦受云覆盖与算法精度影响。对此, 未来可引入贝叶斯方法对模型参数与输入数据进行不确定性量化, 并融合GRACE卫星重力数据等新型观测手段, 交叉验证地下水变化趋势。其次是模型耦合的复杂性。水文模型、经济模型与生态模型在时空尺度、变量定义与求解机制上存在差异, 强行耦合易导致计算不稳定或结果失真。一种可行路径是发展基于机器学习的代理模型, 在保证精度的前提下大幅降低计算成本, 或采用模块化设计理念, 实现不同模型组件的灵活组合与即插即用。第三, 现有评估普遍忽视社会行为的动态反馈。传统模型常将用水需求视为外生给定, 忽略了水价改革、节水宣传、制度激励等政策工具对用户行为的塑造作用^[4]。未来研究应融入基于主体的建模 (Agent-Based Modeling), 模拟家庭、企业等微观主体在信息、价格与规范约束下的用水决策演化, 并结合制度分析与发展 (IAD) 框架, 将治理结构与规则纳入评估体系。最后, 对长期累积效应的评估仍显不足。盐碱化、土壤板结、生物入侵等慢变量往往在工程运行十余年后才显现, 而多数后评价局限于5-10年窗口期。因此, 有必要建立百年尺度的情景模拟框架, 并引入韧性 (Resilience) 概念, 评估系统在多重扰动下的恢复与适应能力, 推动从“工程效益评估”向“可持续适应性管理”转型。

5 结语

本文系统探讨了水利工程对区域水资源配置影响的定量评估方法, 构建了以多维目标为导向、多指标为支撑、多模型为工具、多情景为验证的综合评估框架。案例研究表明, 该方法能有效量化工程在提升供水安全、促进空间均衡、优化用水结构等方面的正向效益, 同时揭示其对下游生态的潜在压力, 为工程优化调度与后续规划提供科学依据。未来研究应着力于深化“自然-社会”耦合机制建模, 将制度、市场、文化等软因素纳入评估体系; 发展基于数字孪生的智能评估平台, 实现工程运行状态实时感知与影响动态预警; 推动评估标准与联合国可持续发展目标 (SDG6) 接轨; 并加强水文学、经济学、生态学与社会学的跨学科协同。唯有建立科学、透明、动态的定量评估体系, 才能确保水利工程真正成为支撑区域高质量发展的“绿色引擎”, 而非不可持续的“水债工程”。

参考文献

- [1]纪东东.黄河水资源优化配置对水利工程管理的影响分析[J].生态与资源,2025,(08):81-83.
- [2]王凯.水利工程中的水资源优化配置与调度管理[C]//中国智慧工程研究会.2024新技术与新方法学术研讨会论文集.河南省交通规划设计研究院股份有限公司,2024:288-289.
- [3]叶舟,丁巍,丁琳,等.基于网络流理论的区域水资源配置激励相容模型[J].人民长江,2024,55(05):112-118.
- [4]魏传江,刘晓霞,杜明月,等.区域水资源配置模型及应用[M].中国水利水电出版社:202209:196.