

大型水利工程对流域生态系统的累积影响评估

王勇

塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6761

[摘要] 大规模水利设施诸如拦河坝和水库的营造,在实现防洪、发电、灌溉以及供水这类社会经济类目标的过程中,对流域生态系统同样形成了深远而繁复的累积效应。此类效应并非单一孤立存在,却通过长时段、多通道、多组成的互动效应在流域区域不断累加叠加,或许会引发生态系统的结构、功能与服务出现不可逆的变动。本文的核心目标是系统剖析大型水利工程的累积生态影响概念与特性,探究其针对水文情势、生物地球化学循环及生物多样性的特定作用机理,进而分析当下主流的累积影响评估方法路径,期望为水利工程的科学规划、生态友好型管理及流域可持续发展提供理论基础与决策借鉴。

[关键词] 大型水利工程; 累积影响; 流域生态系统; 水文情势; 生物多样性; 评估方法

中图分类号: TV 文献标识码: A

Cumulative impact assessment of large-scale water conservancy projects on watershed ecosystems

Yong Wang

Yarkant River Water Management Center of the Tarim River Basin

[Abstract] The construction of large-scale water conservancy facilities such as dams and reservoirs has also formed profound and complex cumulative effects on the watershed ecosystem in the process of achieving socio-economic goals such as flood control, power generation, irrigation, and water supply. This type of effect does not exist in isolation, but through long-term, multi-channel, and multi-component interactive effects that continuously accumulate and stack in the watershed area, it may trigger irreversible changes in the structure, function, and services of the ecosystem. The core objective of this article is to systematically analyze the concept and characteristics of cumulative ecological impacts of large-scale water conservancy projects, explore their specific mechanisms of action on hydrological conditions, biogeochemical cycles, and biodiversity, and then analyze the current mainstream cumulative impact assessment methods. It is expected to provide theoretical basis and decision-making reference for scientific planning, eco-friendly management, and sustainable development of water conservancy projects.

[Key words] large-scale water conservancy projects; Cumulative impact; Watershed ecosystem; Hydrological conditions; bio-diversity; evaluation method

引言

流域构成一个完整的地表水文生态单元,该区域内部的水文流程、地貌样貌、生物群落及化学物质循环紧密耦合、相互影响。规模型水利项目堪称剧烈的人类介入活动,直接改变了河道的天然水流形态,且经由拦挡、调控、浸没等途径,引发一连串连锁反应。传统类影响评估多把目光投向工程的直接性与局部性效应范畴,往往没有关注到时间角度的滞后性、空间层面的扩展性以及不同影响源之间的协同或拮抗效应。因此,落实全面性的累积影响研判,筛选核心累加流程与临界节点,对于平衡水资源开发与生态保护的矛盾、推动人与自然和谐相融具有极其

核心的现实价值。

1 大型水利工程累积生态影响概述

1.1 累积影响的基本内涵

累积影响可定义为单一活动与以往、当前及可合理预见的未来其他活动的联合,由此生成的渐次叠加式环境效应。从流域尺度的范畴看,它侧重强调多个水利工程(梯级开发)、抑或水利工程与其他人类活动(诸如土地利用变化、污染排放)共同影响下,生态环境变迁在时间范畴的累积现象、空间维度的延展态势以及影响因子间的交互联动,最终造成流域生态系统整体状态出现本质变化。

1.2 累积影响的主要特征

大型水利工程累积生态作用展现出时空异质性、滞后性、非线性与不可逆性等显著特性,空间维度上的影响从坝址朝向,向上游淹没区、下游河道、三角洲乃至近海海域扩散;一些生态效应好比物种消亡、地下水格局变动或许要数年乃至数十年才能彻底呈现。若干影响的叠加也许会催生协同放大效果,若超出生态系统的弹性临界点,会引发无法逆转的伤害。

1.3 流域系统的关联性与复杂性

流域内水文连通性构成生态过程的核心基础,水利工程阻隔河流的纵向、横向及垂向连通性,还会直接关联到水流、泥沙与养分的输移,更易借助生态网及生物迁徙,影响涵盖从水生到陆生的各类生物群落^[1]。这种“牵一发而动全身”效应下的网络化联结,要求累积影响评估必须以整体性、系统性的视角为根基。

2 大型水利工程对流域生态系统的累积影响

2.1 对水文与地貌过程的累积性改变

梯级水库群建设引发自然水文节律(如流量、频率、时机、历时)在整条河流范围内出现层层均一化现象,洪水脉冲效应呈现弱化乃至消退态势,泥沙经逐层拦截,引发下游河道冲刷、河床下切、岸滩萎缩,河口三角洲面临侵蚀后退,此类水文与地貌构造的持久化、系统性变动,构成诸多后续生态问题的本源。

2.2 对水环境与生物地球化学循环的累积效应

水库滞留引发水体更新周期变长,追加流域面源污染汇入总量,易致使上游库区水体富营养化与温室气体(例如甲烷)排放增加^[2]。下游水温、溶解气体(像溶解氧这类)的结构出现变动,影响水生生物生理环节,养分物质(含氮、磷、硅)的传输进程被截断,调整河口及近海的生产力格局与生态系统协调,或许会诱发赤潮类生态问题。

2.3 对生物多样性与生态系统完整性的累积胁迫

水文情势演变直接造成依赖特定水文条件的湿地减少、河岸带植被衰退,河道沿程连通性丧失,阻断鱼类洄游及基因融合,或许造成种群碎片化乃至灭绝,生境同质化及水文稳定状态驱动外来物种入侵风险的风险程度,优化本地生物群落的结构组成。这些生物效应彼此交叉联动,最终弱化流域生态系统的抗干扰力、抗逆力与服务功能。

3 流域生态系统累积影响评估方法

3.1 评估框架与基本流程

科学领域的效应评估,旨在系统把握多个活动或压力源耦合作用对生态系统形成的叠加、协同或迟滞效应。其核心分析范式一般遵循“压力—状态—响应”的逻辑框架,这一框架初始阶段系统识别并剖析源自人类行为或自然变迁的各类“压力”,进而探究这些压力对环境或生态系统“状态”的改变作用,旨在采取优化状态的“响应”举措,属于最终评估或规划范畴。遵循这一范式,评估流程经具体化后成为一系列精准、井然有序的技术环节,用以保证分析的周全性与结论的可靠性。

评估工作的开端是对评估目标与范围的精准界定,该事项

涉及明确需聚焦的地理空间边界,应通过系统方式甄别所有相关压力源^[3]。这不仅得列出当下存在的项目,需探究历史上的重大干扰事件,且纳入未来规划中或可落地的行动,开展识别工作时需重视压力源在空间范畴的叠加属性与时间领域的连续或间歇性特点。基于这一基础,必须筛选出一批能敏锐体现生态系统健康状况与完整性的关键指标,比如特定对水环境波动敏感的指示类物种(像某些鱼类或底栖生物)的种群动态趋势、体现河流原生水文情势改变幅度的水文完整性指数,以及映射栖息地结构与功能可用程度的栖息地质量指数等。

后续的分析聚焦于搭建压力与状态转变之间的量化或定性联系,此工作需探讨单个压力的直接作用模式,以及多类压力如何借助复杂路径(如通过改变水流继而影响泥沙输移、水质与食物网)产生叠加效应,采用模型模拟类手段,可针对各类未来发展场景做出预判,明确关键生态参数的潜在变动走向,从而预估累积影响的潜在走向与严重等级。评估并非预测的边界,此时则得开展全面研判,综合评估影响的显著性、可逆性及空间差异化表现。报告需提出针对性强的缓解及管控举措,比如设定开发临界值、优化工程统筹、谋划生态修复工程或搭建长期监测体系,以阻隔或降低负面的累积影响,为区域可持续发展规划提供扎实的科学支撑。

3.2 主要技术方法与模型工具

累积影响评估的复合性及系统性,要求它必须综合采取多种互补的分析路径,为实现全面且可靠的认知,情景分析法属于一种基础且核心的方法,该方法通过搭建并对照各类假设情境下的未来场景,来呈现累积变化的潜在路径。典型场景设定涉及“无工程”基线情景、仅含当前工程的“现状”场景,以及整合了所有规划内开发行为的“未来高强度发展”情境。通过比对这些情境下关键生态参数(如物种多样性、水质参数)的不同,能清晰拆分并统计人类活动增量所触发的累积发展态势,从而为决策层传递不同发展方向及其引发的生态后果预判。

就空间维度为参照,地理信息系统技术及空间叠加分析彰显出不可替代的效能,依托GIS,可将不同压力源(含多个污染源点位、土地利用变化斑块、道路网络)的空间分布图层聚合,对生态敏感区(包含自然保护区、关键栖息地、水源地)的分布图层开展叠加分析。此类可视化呈现与空间统计分析手段,可明确呈现压力在空间范畴的汇聚区域,鉴别出担负多重压力的“热点”地带,还影响景观层面的扩散与联结格局,进而全面凸显累积影响的空间格局及异质性表现。

针对牵扯多变量非线性联动的复杂生态进程,系统动力学模型与生态模型跻身定量模拟的关键工具之列,水文生态模型可模拟水坝调度、引水灌溉等压力共同改变河流水文情势的机制,还能深度干扰水生生物群落^[4]。可测算水文、水质、底质等多种条件变动对特定物种适宜生境面积与质量综合效应的鱼类栖息地模型。相对宏观层面的生态系统模型或系统动力学模型,则试图融合生物物理与社会经济范畴的要素,模拟压力触发源借助反馈回路产生的长时、动态化累积表现,此类模型为理解与

预判复杂累积影响机制的有力途径,整体瞄准未来趋势的模型预判,可靠性的核心支撑来自对历史变化的精准把握,长期连贯的生态监测数据是进行回顾性累积效应分析、模型校准与验证的必需且宝贵的基础。

3.3 不确定性管理与适应性管理

累积影响评估工作全程都存在明显的不确定性,这源于生态系统固有的复杂性与人类认知的有限度的支配,此类不确定性的源头涵盖范围广,囊括核心生态数据在时空范畴内的缺失或连贯度不足,多个压力源与生态反应间互动的具体生物物理机理尚未完全弄清楚,还有在搭建预测模型阶段对现实世界实施的必要简化与假设。由于这些难以彻底消除的不确定性,科学且严谨的评估不得逃避或忽略它们,却需要全面地辨明且留存不确定性的主要根源,比方参数范畴的不确定性、模型框架的不确定性以及未来情境的不确定性,需采用敏感性分析、蒙特卡洛概率模拟等量化手段,以呈现这些不确定性对评估结论的影响覆盖范围及程度层级,助力决策者得以知晓预测成果的置信范围及潜在风险区间。

仅在评估报告里体现不确定性还不够充分,更核心的要点在于构建一套可与不确定性共处的动态管理模式,这需把累积影响评估从一类相对僵化的预判类研究转化,自然地纳入“适应性管理”的动态循环流程里,适应性管理的核心理念体现为认同对复杂系统的认知存在不足,把管理决策本身看作一种可适配的“实验”,该流程的核心呈现为“规划—实施—监测—评估—调整”的闭环迭代模式,以流域开发的范畴为背景,这显示出在按照初期评估编制工程运行规程及区域管理措施并开始实施后,不是短暂举措可长久生效,而是应当同步启动且长期运营一套系统化的生态监测体系。

依靠持续追踪收集到的实际生态反馈数据,是核对与调整早期评估及预测的最高权威参照,管理岗人员需定期(比如每五年)围绕监测数据实施系统性审核,核验实际出现的生态状态转变与原先预估是否相符,剖析差异形成的原因^[5]。依托此类“从实践中学习”的评估反馈,管理策略和工程运行方式(如坝体下

泄生态流量、土地利用管控力度)应被及时、弹性地调整且优化,以更精准地贴合生态系统的实际反馈,此迭代机制推动管理活动能依照最新认知及变化中的环境条件实现动态演进,进而在无法全面预判未来的情形下,实现流域生态风险的可持续与弹性化管控实施落地,推动流域开发与管理转化为持续逼近科学内核与优化均衡的适应性学习机制。

4 总结

大型水利工程给流域生态系统的累积影响,属于多维动态且复杂的系统性问题。其起始于工程对流域自然水文与生态进程的核心性干扰,还通过水文地貌、水环境化学及生物生态等多个层次互动联动、逐步放大,最终冲击流域生态安全及可延续性。切实可行的累积影响分析,需要突破单一项目的束缚,从流域整体为尺度范畴内,依托结构化的框架、全面性的路径以及弹性适配的管控举措。未来科研应进一步推进长期生态监测网络搭建,开发能更深度融合自然与人文进程的耦合模型,且要把生态系统服务价值核算更系统地纳入决策机制,从而推动水利工程向更具生态亲和性、系统整合性的方向升级。

[参考文献]

- [1]赵君,朱金仓.黄土高塬沟壑区固沟保塬工程对流域水流路径的影响[J].地下水,2024,46(5):284-287.
- [2]王思涵,邢洁,闫澄澄.水利工程对森林生态系统服务价值的影响研究[J].环境科学与管理,2019,44(10):5.
- [3]刘畅,刘耕源,杨青.水坝建设对河流生态系统服务价值影响评估[J].人民黄河,2019,41(8):88-94.
- [4]徐曦.水利工程对河流生态系统的影响研究[J].安家,2024(11):0253-0255.
- [5]何博.水利水电工程对生态环境的影响及对策[J].艺术与设计(电子版),2022(12):0243-0245.

作者简介:

王勇(1979—),男,汉族,四川平昌人,本科,高级工程师,研究方向:水利工程建设。