

水利水电工程建设生态水文响应评估及调控策略

张铁

蓝田县水政水资源管理中心, 陕西 西安 710500

DOI:10.61369/ME.2024100010

摘 要 : 为更好评估水利水电工程建设对生态环境造成的影响, 本文以某河流上游峡谷段水电站为研究对象, 通过构建“空-地-模”三位一体多维度评价方法体系, 系统评估其生态水文响应, 结果显示工程建设对当地生态环境造成了众多影响, 比如河谷带常绿阔叶林面积减少、植被覆盖度降低、群落结构稳定性下降、水生生物产卵场缩减等, 文章在分析上述不良影响的同时提出了相对应的生态修复策略, 以促进水电开发与生态保护协调发展。

关 键 词 : 水利水电工程; 生态水文响应; 评价方法; 调控策略

Ecological Hydrological Response Assessment and Regulation Strategies for Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction

Zhang Tie

Lantian County Water Administration and Water Resources Management Center, Xi 'an, Shaanxi 710500

Abstract : To better assess the impact of water conservancy and hydropower project construction on the ecological environment, this paper takes a hydropower station in the canyon section of an upper river as the research object. By constructing a "space-ground-model" three-in-one multi-dimensional evaluation method system, its ecological and hydrological responses are systematically evaluated. The results show that the project construction has caused numerous impacts on the local ecological environment. For instance, the area of evergreen broad-leaved forests in the river valley has decreased, the vegetation coverage has declined, the stability of the community structure has dropped, and the spawning grounds of aquatic organisms have shrunk. While analyzing the above-mentioned adverse effects, this article also proposes corresponding ecological restoration strategies to promote the coordinated development of hydropower development and ecological protection.

Keywords : water conservancy and hydropower engineering; ecological moisture response; evaluation method; regulatory strategy

一、工程概况

本研究聚焦于位于某河流上游峡谷段的水电站, 该水电站主体工程涵盖了最大坝高285m的混凝土双曲拱坝, 总库容达15.6亿 m^3 , 正常蓄水位为2135m, 工程建设目标主要是发电, 同时兼顾防洪与航运需求, 施工周期从2015年至2022年, 淹没影响区涉及3个县级行政单元, 这对水电站建设和运行过程中的生态保护工作提出了严峻挑战。

二、基于“空-地-模”三位一体的生态水文响应评价方法与结果

(一) 多维度评价方法体系

本研究构建了一套基于“空-地-模”三位一体的多维度评价方法体系, 旨在全面且精准地评估水利水电工程对区域生态环境的影响。

第一, 遥感监测。

选用分辨率为30m的Landsat8OLI卫星影像, 通过最大似然分类法和像元二分模型对2015—2022年的影像数据进行处理与分析, 反演归一化植被指数(NDVI)的动态变化, 从而获取植被覆盖度的时空演变信息, 为植被生态系统响应评估提供宏观层面的数据支持^[1]。

第二, 实地验证。

在研究区域内, 依据不同的生态功能区和植被类型, 运用随机抽样与分层抽样相结合的方法^[2], 设置27个植被样方, 样方面积为100m $\times$ 100m, 详细记录植被的种类、高度、盖度等参数; 同时, 在下游河道选取具有代表性的15个鱼类监测断面, 采用电击法、网捕法等多种采样方式, 对鱼类的种类、数量、体长、体重等指标进行监测, 以实地监测数据校验和补充遥感与模型模拟结果。

第三, 模型模拟。

1.InVEST模型。运用InVEST模型中的碳储量模块, 基于土

地利用 / 土地覆盖数据、土壤有机碳含量数据以及植被生物量数据^[3]，对工程前后的碳储量进行模拟与评估，量化工程建设导致的碳储量变化，分析其对区域碳循环的影响。

2.HEC-RAS6.0模型。利用 HEC-RAS6.0模型构建研究区域的一维河网水力模型，输入地形数据、河道糙率、流量等边界条件，模拟工程建设前后的水文情势变化，包括水位、流速、流量过程等，为水生生物栖息地和生态系统服务功能评估提供水文基础数据^[4]。

3.Circuitscape4.0模型。借助 Circuitscape4.0模型，以土地利用 / 土地覆盖数据为基础，结合物种的生态习性和扩散能力，设定不同的阻力面参数，模拟物种在景观中的潜在扩散路径^[5]，分析生境连通性的变化，评估工程对生物多样性保护的影响。

（二）量化评价结果

1. 植被生态系统响应

经分析，工程建设后常绿阔叶林面积减少21.3%，NDVI均值下降18.7%，表明植被覆盖度显著降低，生态系统的初级生产力受到抑制。碳储量增加23.6%源于新生湿地的碳汇效应，部分抵消了植被破坏的负面影响，但仍难以弥补生物多样性的损失。Margalef指数和Pielou指数分别降低11.2%和7.7%，说明群落物种丰富度与均匀度下降，优势物种更替为耐水淹植物（如水蓼、芦苇），群落结构稳定性减弱。具体数据如表1所示。

表1 植被生态系统响应关键指标变化

指标	工程建设前 (2015 年)	工程建设后 (2022 年)
常绿阔叶林面积 (km²)	66.7	52.5
NDV 均值	0.72	0.59
碳储量 (× 10 ⁴ tCO ₂ e/a)	8.9	11.0
Margalef 指数	3.21	2.85
Pielou 指数	0.78	0.72

2. 水生生物影响

工程建设对水生生物的影响如表2所示。工程建设导致产卵场面积缩减32.5%，溶解氧含量（5.8 mg/L）低于临界值（6.5 mg/L），严重威胁鱼类呼吸代谢。FST值由0.18升至0.47（阈值0.3），表明坝体阻隔加剧了鱼类种群遗传分化，基因交流显著受阻。裂腹鱼数量锐减66.4%（12,500→4,200），而宽鳍鱲占比增至38.7%，反映出水生生物群落向广适性物种倾斜，特有物种濒危风险升高。

表2 水生生物影响关键参数对比

参数	工程建设前	工程建设后	阈值 / 临界值
产卵场面积缩减率	/	32.5%	-
溶解氧含量 (mg/L)	7.2 ± 0.3	5.8 ± 0.4	6.5(临界值)
FST 值 (遗传分化指数)	0.18 ± 0.05	0.47 ± 0.08	0.3(阈值)
裂腹鱼种群数量 (尾)	12,500	4,200	-
宽鳍占比 (%)	15.3	38.7	-

3. 景观格局演变

借助 Fragstats软件，对工程前后的土地利用 / 土地覆盖数据进行景观格局指数分析，数据如表3所示。数据表明工程建设导致景观破碎化加剧，自然连续生境被分割为孤立斑块，生态稳定性显著降低。

表3 景观格局演变指数变化

指数	工程建设前	工程建设后	变化幅度 (%)
斑块密度 (PD, 个 /km²)	0.86	1.32	+53.5%
聚集度指数 (AI,%)	92.7	85.4	-7.3%
最小累积阻力值 (MCR)	125.6	218.9	+74.3%

三、基于生态水文响应评估结果的生态调控策略

（一）水文生态协同调度

1. 做好生态流量保障

运用 RVA（Range of Variability Approach）法，通过对历史水文数据的深入分析，精确确定关键期（3-5月）的最小下泄流量为182m³ /s。RVA法综合考虑了河流流量的年内变化、年际变化以及极值情况，通过构建流量指标体系，能够准确界定维持河流生态系统健康所需的流量范围^[6]。在实际操作中，利用先进的流量监测设备，实时监测坝下流量，并通过自动化控制系统，确保关键期内的下泄流量稳定维持在设定值，保障下游河道的基本生态需水。

2. 水温分层调控

在坝体上安装3层取水口，且各层取水口高程差达15m，采用 CFD（计算流体力学）模拟技术，对不同工况下取水口的水流特性、温度分布进行数值模拟，优化取水口布置方案，确保下泄水温变幅 <2℃，有效避免了因水温骤变对水生生物造成的生理胁迫，维持了下游河道水生生态系统的稳定性。

长期监测数据显示，当生态流量得到有效保障时，下游河道的溶解氧含量显著提升，水生生物多样性有所恢复，同时通过 DNA 条形码技术对水生生物群落结构进行分析，发现一些依赖特定水流条件的鱼类，开始重新出现在下游河道，并且水温分层调控措施有效缓解了坝下江段水温骤变对水生生物的不利影响，使得鱼卵的孵化率提升以及幼鱼的存活率增加。

（二）生物通道修复工程

为了为水中生物营造更加便利的生存条件，围绕以下几点进行生物通道的修复。

第一，构建复合式鱼道。该系统由竖缝式主鱼道和仿自然旁路通道组成，竖缝式主鱼道坡度设计为1:15，通过水力学模型试验，精确确定流速控制在0.8 ~ 1.2m/s，以满足不同鱼类的洄游习性。主鱼道内设置了特殊的消能设施，如迷宫式消能池，有效降低水流能量，确保鱼类能够顺利通过 [7]。而仿自然旁路通道能够营造出接近自然的栖息环境。在后续工程运营中通过声学标记追踪技术对复合式鱼道系统的运行效果进行跟踪监测，结果表明，竖缝式主鱼道和仿自然旁路通道相互配合，大大提高了过鱼效率，过鱼效率达到74.6%。

第二，人工增殖放流工作。严格按照科学的增殖放流规划进行，年投放裂腹鱼苗种50万尾，鱼苗均经过严格的种质鉴定和健康检测，确保其遗传多样性和健康状况，同时配套设置3处索饵场，根据鱼类的食性和生态习性，利用生态位理论，合理规划索饵场的位置和面积，通过投放适宜的饵料生物，如浮游动物、底栖生物等，为幼鱼提供充足的食物资源。通过定期的种群数量监

测,采用标志重捕法和基于环境 DNA (eDNA) 的监测技术 [8],发现裂腹鱼的种群数量在局部区域有所回升,种群增长率达到 15% 左右。

（三）智慧化管理平台

随着水利水电工程对生态环境影响的日益凸显,实现生态系统的科学管理和有效保护成为关键,传统管理方式难以满足对生态系统实时、全面监测与动态调控的需求,因此,构建智慧化的管理平台对于提升生态管理效率,实现水电开发生态保护平衡具有重要作用。在智慧化管理平台建立后,实现了对生态系统的实时监测和动态管理^[9],通过生态物联网系统收集的大量数据,利用大数据分析技术和机器学习算法,能够及时发现生态系统的异常变化,并根据 ESI 指数调整生态调度方案。例如,当监测到下游河道溶解氧含量下降时,系统自动发出预警,并通过数据分析模型,为生态调度决策提供科学建议,如适当增加下泄流量等。

在做好智慧化管理平台建设的同时还需要形成相应的适应性管理机制,建立生态调度绩效指标 (ESI 指数)^[10],该指数综合考虑了水文、水质、生物多样性等多个方面的指标,采用层次分

析法 (AHP) 和模糊综合评价法确定各指标的权重,构建科学合理的评价体系,实施阶梯式生态补偿金制度 (基准价 0.015 元 / kWh),根据生态调度绩效指标的评价结果,对水电企业进行奖惩。当 ESI 指数达到优秀水平时,给予水电企业一定的经济奖励;当 ESI 指数低于设定标准时,按照阶梯式标准扣除相应的生态补偿金,这样就能够有效激励了相关部门和企业在水电开发过程中更加注重生态保护,促进了水电开发与生态保护的协调发展。

四、结语

水利水电工程建设会对区域生态环境造成长期影响,为确保区域生态环境,在工程建设中必须做好生态水文响应的持续评估。通过长期生态监测,深入研究生态系统的演变规律,及时发现和解决潜在的问题,并利用更加先进的技术手段,提升生态保护的科学性和有效性,不断优化和完善调控策略,提升生态修复效果。

参考文献

[1] 李晓芬,王建盼,柴璐艳. 水利工程生态环境影响评价分析 [J]. 清洗世界, 2024, 40(07): 106-108.
[2] 韩旭. 大型水利工程陆生生态环境影响评价 [D]. 华侨大学, 2021.
[3] 马锐迪, 杨青, 王辉, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统水源涵养功能评估——以龙潭水库影响范围为例 [J]. 河北农业科学, 2024, 28(06): 87-91.
[4] 王鹏全. 湟水流域环境变化的生态水文效应及生态服务演变研究 [D]. 青海师范大学, 2024.
[5] 吴楠, 王甜, 程鹏, 等. 基于电路理论的扬子鳄保护区块间生态廊道和节点识别研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(06): 1228-1238.
[6] 陈垚, 余雪花, 郑爽, 等. 基于生态水文响应的海绵城市不透水面控制指标 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 116-121.
[7] 李中艳. 辽河流域不同土地利用模式情景下生态水文响应研究 [J]. 中国水能及电气化, 2018, (02): 37-41.
[8] 班学君, 樊博, 刘瀚, 等. 鱼类产卵行为与生态水文指标响应关系研究——以长江四大家鱼为例 [J]. 水生态学杂志, 2024, 45(01): 67-74.
[9] 余晓瑛. 水利工程智慧化运行管理探析 [J]. 大陆桥视野, 2022, (10): 114-115.
[10] 孙培. 溇沱河生态修复工程草本植物应用生态绩效评估 [J]. 建筑与文化, 2023, (10): 257-259.