

水利工程对流域生态环境影响的综合评价

韩绍华 窦明志

开封祥符黄河水利工程养护公司第三分公司 河南 开封 475300

摘要: 水利工程作为人类调控水资源、防治洪涝灾害、保障供水安全和促进经济社会发展的重要手段,在全球范围内被广泛应用。然而,其在带来显著社会效益的同时,也对流域生态系统产生了深远而复杂的影响。本文系统梳理了水利工程对流域水文情势、水体质量、生物多样性、河湖连通性及区域气候等关键生态要素的作用机制,构建了基于“压力—状态—响应”(PSR)模型的综合评价框架。在此基础上,提出了以生态优先、系统治理、智慧监管为核心的优化路径,旨在为实现水利工程与流域生态系统的协同发展提供理论支撑与实践指导。

关键词: 水利工程; 流域生态; 环境影响; 综合评价; PSR模型; 生态调度

引言

流域是自然地理与水文过程的基本单元,承载着丰富的生物多样性与复杂的生态功能。随着全球人口增长、城市化进程加速以及气候变化加剧,水资源供需矛盾日益突出,水利工程成为调节水资源时空分布、支撑可持续发展的关键基础设施。然而,水利工程的建设与运行不可避免地改变了天然河流的水文节律、泥沙输移、营养物质循环及生物栖息环境,导致一系列生态退化问题,如河流断流、湿地萎缩、鱼类洄游受阻、水体富营养化等。联合国《全球环境展望》报告指出,全球近三分之二的河流生态系统因人类活动(尤其是水利工程)而处于中度至重度退化状态。因此,科学评估水利工程对流域生态环境的影响,不仅关乎生态安全,也直接影响水资源的可持续利用与国家生态文明建设战略的实施。

1 水利工程对流域生态环境的主要影响机制

1.1 对水文情势的改变

水利工程,尤其是大型水库,显著改变了天然河流的水文节律。通过蓄丰补枯,水库使下游流量过程趋于均一化,削弱了对生态系统至关重要的洪水脉冲,影响依赖水位涨落触发繁殖行为的水生生物。同时,深水水库常形成热分层,下泄低温水可抑制鱼类产卵与水生植物生长。此外,水库拦截大量泥沙,导致下游河床冲刷下切、岸线侵蚀加剧,并造成河口三角洲淤积减少甚至退缩,如长江口和黄河口的演变即与此密切相关。

1.2 对水质与水体自净能力的影响

水流减缓与滞留时间延长是水利工程影响水质的关键机制。水库蓄水后流速降低,有利于藻类特别是蓝藻增殖,在氮磷负荷较高的区域易引发富营养化与水华事件。深层缺氧水体下泄还可能造成下游溶解氧骤降,威胁需氧生物生存。闸坝等阻隔设施则阻碍污染物自然迁

移稀释,使其在局部水域累积,削弱水体物理、化学及生物自净能力,进一步加剧水质恶化风险。

1.3 对生物多样性与栖息地的破坏

水利工程是淡水生物多样性丧失的重要驱动因素。大坝阻断河流纵向连通性,使中华鲟等洄游鱼类无法完成生命周期,种群数量锐减。上游水库淹没天然河谷湿地与急流生境,下游因水量减少或水文节律改变导致河漫滩干涸,湿地面积萎缩,栖息功能退化^[1]。同时,人工水体环境可能为福寿螺、水葫芦等外来物种提供适宜生境,促使其扩散并排挤本地物种,破坏原有生态平衡。

1.4 对河湖连通性与地貌演化的干扰

天然河流—湖泊—湿地系统依赖高度的水力连通维持生态功能。然而,水利工程严重割裂了这一格局。长江中下游大量通江湖泊因建闸而与干流隔离,失去水文联动,生态系统封闭退化,渔业资源衰退。河道渠化工程如裁弯取直、硬化护岸虽提升防洪或航运效率,却破坏了自然河曲、边滩等微地貌,削弱横向连通性,降低河流自我调节与生态韧性,使系统更易受外界扰动影响。

1.5 对局地气候与微环境的间接影响

大型水库形成的广阔水面改变了局地能量与水分交换过程。其强蒸发作用可能增加区域水资源消耗,同时调节周边小气候,如三峡库区观测到冬季雾日增多、气温日较差减小等现象。此外,水库蓄水改变地应力场,存在诱发低震级地震的风险;频繁水位变动亦削弱库岸稳定性,增加滑坡与崩塌等地质灾害概率。这些间接效应虽不直接表现为水质或生物指标变化,却是流域生态系统整体健康不可忽视的组成部分。

2 综合评价框架构建:基于PSR模型

2.1 压力(Pressure)指标

为科学识别水利工程对流域生态系统的干扰源头,

需构建能够反映人类活动强度的压力指标体系。这些指标应聚焦于工程本身对自然过程的直接干预程度。例如，水库调节系数（即年调节库容与多年平均径流量的比值）可有效衡量水库对天然径流过程的控制能力；河流开发利用则直观反映了人类取水对流域水资源的占用水平；大坝密度（单位河长上的水坝数量）是评估河流纵向连通性受阻程度的重要参数；泥沙拦截率揭示了工程对泥沙输移过程的改变强度；而河流连通性指数（如 Dendritic Connectivity Index）则能定量刻画河网结构的完整性。这些压力指标共同构成了评价生态影响的起点，为后续的状态诊断提供依据。

2.2 状态（State）指标

状态指标用于客观描述流域生态系统在水利工程影响下的当前健康状况，是评价的核心环节。水文改变指数（如基于IHA方法计算的指标）可量化天然水文情势被人工调控的程度；水质综合指数则整合了COD、总氮、总磷、溶解氧等关键理化参数，反映水体污染水平；生物完整性指数（IBI）通过分析鱼类或底栖动物群落的组成、丰度与敏感性，间接评估生态系统的结构与功能完整性；湿地面积变化率和河岸带植被覆盖度则从景观尺度上揭示栖息地的丧失与退化趋势^[2]。这些多维度的状态指标共同描绘出流域生态系统的“体检报告”，为判断其是否处于健康、亚健康或退化状态提供科学依据。

2.3 响应（Response）指标

响应指标关注人类社会为缓解水利工程负面生态影响所采取的管理与技术措施，体现治理能力与制度效能。生态流量保障率反映了下游基本生态需水是否得到满足；鱼道的建设数量、类型及其实际过鱼效果是衡量洄游通道恢复成效的关键；水库生态调度的实施频率与科学性体现了运行管理向生态友好转型的程度；河湖生态修复工程的资金投入占比则显示了地方政府对生态治理的重视程度；而环境影响后评价制度的执行情况则是检验全生命周期环境管理是否落实的重要标尺。这些响应指标不仅用于评估现有措施的有效性，也为未来政策优化提供方向指引。

2.4 评价方法

在指标体系构建完成后，需采用科学的综合评价方法进行量化分析。本文建议采用多指标综合评价法，首先运用层次分析法（AHP）或熵权法确定各层级指标的权重，以体现其在整体评价中的相对重要性。随后，可选用模糊综合评价、TOPSIS（逼近理想解排序法）或物元可拓模型等方法对不同流域或工程方案进行打分与排序。最终，根据综合得分将流域划分为“生态友好

型”“轻度干扰型”“中度退化型”“严重受损型”等等级，实现差异化、精准化的生态管理^[3]。该方法不仅具有较强的可操作性，还能有效融合定性判断与定量数据，提升评价结果的科学性与实用性。

3 典型案例分析

3.1 三峡工程

三峡工程作为世界上规模最大的水利枢纽，在防洪、发电、航运等方面创造了巨大经济社会效益，但其对长江流域生态系统的深远影响亦不容忽视。工程运行后，有效控制了长江中下游的特大洪水，显著改善了川江航道条件，并在枯水期向下游补水，缓解了部分地区的用水紧张。然而，其生态代价同样显著：库区形成了长达数百公里的消落带，该区域因水位季节性剧烈波动而植被难以稳定生长，生态系统极为脆弱；下游泥沙通量锐减导致河床持续下切，岸线侵蚀加剧，同时四大家鱼的传统产卵场因缺乏必要的涨水刺激而功能萎缩；更为严峻的是，大坝彻底阻断了中华鲟等珍稀洄游鱼类的上溯通道，使其自然繁殖几近中断。面对这些挑战，管理部门已采取多项应对措施，包括每年实施生态调度，通过人工制造短时涨水过程以模拟自然洪水脉冲，促进鱼类产卵；建设珍稀鱼类增殖放流站，开展人工繁育与放流；并在库区开展消落带植被恢复与生态防护工程，力求在工程效益与生态保护之间寻求平衡。

3.2 南水北调东线工程

南水北调东线工程依托京杭大运河及其沿线湖泊进行跨流域调水，涉及大量泵站、节制闸和调蓄湖泊，其生态影响具有复合性与区域性特征。一方面，工程通过提升枯水期水量，有助于改善受水区水环境；但另一方面，调蓄湖泊如东平湖、洪泽湖因承担调蓄功能而水体交换减缓，加之农业面源污染输入，富营养化风险显著上升。同时，人工水系的贯通改变了原有水系格局，可能为外来水生生物（如克氏原螯虾、水葫芦）提供扩散通道，加速其入侵进程。为此，工程实施坚持“先治污后通水”原则，强化沿线水质监测与预警体系建设，并在关键节点构建生态缓冲带与人工湿地，以拦截污染物、减缓水流、恢复局部生物多样性，力求在保障供水安全的同时最大限度降低生态风险。

4 优化路径与对策建议

4.1 坚持生态优先，强化规划环评

未来的水利工程建设必须彻底转变“重工程、轻生态”的传统思维，将生态保护置于规划决策的优先位置。应在流域尺度上开展系统性、累积性的环境影响评价，充分考虑多个工程叠加效应及长期生态后果，避免“头

痛医头、脚痛医脚”的碎片化治理。同时,应严格落实生态保护红线制度,明确禁止在生物多样性关键区、水源涵养区、重要湿地等生态敏感区域新建高干扰性水利工程,从源头上规避不可逆的生态损害。

4.2 推进生态调度,恢复自然水文节律

水库调度不应仅服务于发电、供水等经济目标,而应将生态需求纳入核心考量。应加快制定并实施流域统一的生态调度规程,通过科学设计泄流过程,人工模拟自然洪水脉冲、保障枯水期基流、调控下泄水温等方式,尽可能恢复河流的自然水文节律^[4]。在此基础上,可构建多目标优化调度模型,利用智能算法在防洪、供水、发电与生态用水之间寻求帕累托最优解,实现水资源的高效协同利用。

4.3 加强生态修复,提升系统韧性

针对已受损的流域生态系统,应实施系统性、整体性的修复工程。在纵向维度上,应评估并拆除已无功能的小型废弃水坝,对必要保留的大坝配套建设高效、适用的鱼道设施,如仿自然通道或机械升鱼机,重建洄游通道。在横向维度上,应推动“退田还湖”“退渔还湿”等举措,恢复河漫滩与通江湖泊的自然水文联系,重建洪泛区生态功能。最终,通过构建“河流—湿地—森林”一体化的生态廊道网络,增强流域生态系统的连通性、多样性与抗干扰能力。

4.4 发展智慧水利,实现精准监管

应充分利用物联网、遥感、大数据与人工智能等新一代信息技术,打造覆盖全流域的“空—天—地”一体化生态感知网络。通过实时监测水文、水质、生物及气象等多源数据,建立动态预警与智能决策支持系统,实现对水利工程生态影响的精准识别、快速响应与闭环管理。例如,可根据鱼类产卵窗口期自动触发生态调度指令,或根据水质变化趋势动态调整闸门启闭策略,从而实现从“经验调度”向“数据驱动、智能调控”的根本转变。

4.5 完善制度保障,推动多元共治

健全的制度体系是实现水利工程生态友好的根本保障。应加快修订《水法》《环境保护法》等相关法律法规,明确生态流量的法律地位与保障责任。同时,建立跨区域、跨部门的生态补偿机制,由水资源受益地区向生态保护地区提供合理补偿,激励上游地区加强保护。此外,应鼓励科研机构、环保组织与公众参与流域治理,通过信息公开、听证会、公民科学等方式,形成政府主导、市场激励、社会协同的多元共治格局,共同守护流域生态安全。

5 结语

水利工程是人类改造自然的重要工具,其对流域生态环境的影响具有双重性:既可支撑可持续发展,也可能引发生态危机。本文研究表明,水利工程主要通过改变水文情势、水质、栖息地连通性等途径作用于流域生态系统,其影响程度取决于工程类型、规模、运行方式及流域本底条件。基于PSR模型构建的综合评价体系,能够系统识别压力源、诊断生态状态、评估管理响应,为科学决策提供依据。未来,应摒弃“工程至上”思维,转向“人水和谐”的生态文明范式。通过生态优先的规划理念、智能化的调度技术、系统化的修复工程与制度化的保障机制,实现水利工程从“征服自然”向“顺应自然、修复自然”的转型,最终达成水资源高效利用与流域生态系统健康双赢的目标。

参考文献

- [1]蒋艳.水利工程对流域生态环境影响机理与优化调控模式研究.北京市,中国水利水电科学研究院,2021-03-07.
- [2]石真瑞.水利工程施工中流域水环境污染现状与微生物修复技术研究[J].环境科学与管理,2024,49(12):95-99.
- [3]林志腾.浅谈水利工程措施在流域水环境综合整治中的应用[J].陕西水利,2024,(05):103-105.
- [4]钱宝.从流域水环境与水利工程影响角度分析汉江水华成因[J].长江技术经济,2020,4(04):98-103.