

水利水电工程对河流连续体影响的生态水力学评估与修复

柯成建

江西创裕建筑工程有限公司 江西南昌 330013

摘要：水利水电工程在发挥兴利除弊功能的同时，不可避免地对河流连续体的水文情势、水动力条件及栖息地完整性产生显著影响，进而引发生态系统退化。为科学评估并有效修复这些影响，生态水力学评估与修复技术应运而生。评估体系通过构建基于水文过程、水动力条件及栖息地适宜性的多维指标，量化工程对河流生态的扰动程度，精准识别关键问题。修复技术则针对评估结果，采取综合性措施：通过生态流量调控与水库优化调度，模拟自然水文节律；通过河道形态修复与栖息地再造，恢复地貌多样性与生物生境；通过闸坝生态化改造与连通性恢复，重建河流纵向连通性。这一整套“评估-修复”相结合的技术路径，旨在系统性地减缓工程建设的负面效应，促进河流生态结构与功能的恢复，为实现水利水电开发与生态环境保护之间的协调共生提供了科学依据与实践指导。

关键词：水利水电工程；河流连续体；生态水力学；生态修复

引言

河流是流动的生态系统，其连续性是维持流域健康与生物多样性的核心。然而，大规模水利水电工程的建设，如大坝、水库和闸坝，在提供防洪、发电、供水等巨大社会效益的同时，也像一道道“闸门”，阻断了河流的自然流态，改变了其水文、水力及地貌特征，对河流连续体的生态完整性构成了严峻挑战。如何科学地量化这些工程带来的生态影响，并采取有效措施进行修复，以减缓生态损失、维系河流健康，已成为当前水利工程领域亟待解决的重大课题。生态水力学作为一门交叉学科，为解决这一问题提供了独特的理论视角与技术手段。因此，系统探讨水利水电工程对河流连续体影响的生态水力学评估方法与修复技术，对于推动水利工程向绿色、生态化转型，实现人与自然和谐共生具有重大的理论价值与紧迫的现实意义。

一、水利水电工程对河流连续体的生态水力学影响

绿色“一带一路”建设的跨国性与生态敏感性，对环境咨询服务提出超越传统本土项目的新要求，核心集中在全流程管理、标准协调与风险防控三个维度。

（一）全生命周期环境管理的需求

传统环境咨询服务多聚焦项目前期环评，仅满足项目审批需求，而绿色“一带一路”要求覆盖项目“规划-建设-运营-退役”全生命周期的环境管理。规划阶段需结合东道国生态红线（如生物多样性保护区、水资

源敏感区）开展战略环境评价，避免项目选址触碰生态禁区；建设阶段需提供施工期环境监理方案，如针对东南亚雨林项目的植被移栽保护、中亚干旱地区的扬尘控制；运营阶段需设计长期环境监测体系，如跨国输电线路的电磁环境监测、港口项目的海水水质跟踪；退役阶段需制定场地生态修复计划，如矿产项目闭坑后的土壤重金属治理、公路项目的植被恢复。全生命周期管理要求环境咨询服务从“一次性报告”转向“全程陪伴式服务”，确保项目各阶段生态影响可控^[1]。

（二）跨国别环境标准融合的需求

绿色“一带一路”沿线国家环保标准差异显著，部分国家标准宽松（如部分非洲国家未制定PM2.5限值），部分国家采用国际严格标准（如中东部分国家参考欧盟环保法规），同时项目还需符合国际组织要求（如联合国环境规划署的生态保护指南），环境咨询服务需实现多标准融合。例如，某中欧合作光伏项目需同时满足中国《光伏电站环境影响评价技术导则》、匈牙利《可再生能源项目环保标准》及国际能源署的低碳排放要求，环境咨询需梳理各标准的核心指标（如噪声限值、生态补偿比例），找到兼容点并制定统一的环境管理方案；若标准存在冲突（如中国与某国的废水排放标准差异），需协调项目方与东道国环保部门，提出折中可行的措施，避免因标准不兼容导致项目停滞。

（三）生态环境风险预警与应对的需求

绿色“一带一路”沿线国家生态系统脆弱且多样，

项目面临的环境风险具有复杂性与突发性，传统“静态风险评估”难以应对，需环境咨询服务提供动态风险预警与应急方案。例如，东南亚季风地区项目需防范暴雨引发的水土流失风险，非洲草原项目需警惕施工对迁徙动物栖息地的破坏，北极圈附近项目需考虑冻土融化对工程结构与生态的影响。风险预警要求环境咨询服务建立“监测-分析-预警-应对”的闭环机制：通过布设监测设备收集生态数据（如水位、植被覆盖率），结合当地气候与生态规律分析风险趋势，提前识别潜在隐患（如某水电项目通过降雨量数据预警山体滑坡风险），并制定针对性应对方案（如增设截洪沟、调整施工时序），确保风险发生时可快速响应，减少生态损失。

二、河流连续体生态水力学影响的评估方法

（一）基于水文过程的评估指标

基于水文过程的评估体系以“科学识别水文情势改变程度”为核心目标，通过构建系统化的量化指标体系，准确反映水利工程对自然水文节律的多维度影响。该体系主要包含两类核心评估指标：第一类为生态流量满足率，该指标通过系统计算河道在关键生物生命周期不同时段（如产卵期、育幼期或越冬期）的实际观测流量与科学研究确定的适宜生态流量之间的比例关系，科学评估流量保障的实际水平。适宜生态流量的确定通常采用国际公认的“Tennant法”或基于生物需求的“栖息地模拟法”等方法综合确定。例如在某河流的具体评估实践中，研究确定鱼类产卵期的适宜生态流量应为10立方米每秒，但工程影响下实际观测流量仅达到5立方米每秒，计算得出生态流量满足率为50%，清楚表明当前水文条件无法满足水生生物繁殖的基本需求。第二类核心指标为水文改变度（IHA），该方法通过选取与生态过程密切相关的32个关键水文参数（包括年均最大流量值、年最小流量出现时间、高低流量脉冲频率和持续时间等），系统计算工程建设前后这些参数的改变幅度，并根据改变程度划分评估等级：改变度小于30%为轻度改变，30%~60%为中度改变，大于60%则为重度改变。例如某水库建成后的评估显示，水文改变度高达75%，充分表明工程导致水文情势发生重度扰动，必须采取重点修复和调控措施^[2]。

（二）基于水动力条件的评估方法

基于水动力条件的评估体系通过现场监测与数值模拟相结合的技术手段，系统化水利对河流水动力参数（包括流速分布、水深变化及水力剪切力等）的直

接影响。常用评估方法主要包括两种：第一种为现场监测法，该方法采用ADCP（声学多普勒流速剖面仪）、电磁流速仪等高精度仪器，沿河道纵向与横向合理布设多个监测断面，获取不同工况条件下的流速场分布、水深变化规律以及水力剪切力空间数据。例如在某闸坝工程的生态影响评估中，下游河段共布设5个监测断面，监测数据明确显示泄水时段局部流速高达1.8米每秒，显著超过底栖生物生存的适宜流速上限（1.2米每秒），为闸坝调度方式的生态化改进提供了直接依据。第二种方法为数值模拟法，采用MIKE 11（一维水动力模型）、FLUENT（三维计算流体力学模型）等专业软件，构建精确的河流水动力数学模型，模拟预测工程建设前后水动力场的详细变化情况。例如通过对某水库流域进行MIKE 11模型模拟，发现下游河道枯水期平均流速较天然状态下降60%，为生态流量调控方案的制定提供了重要数据支撑。需要强调的是，水动力评估需特别关注生物敏感区域（如鱼类产卵场、浅滩湿地和岸边带）的参数变化，确保评估结果与实际生物生态需求紧密适配。

（三）基于栖息地适宜性的评估体系

基于栖息地适宜性的评估体系以“目标水生生物生存与繁殖需求”为核心导向，通过构建量化的栖息地适宜性模型，科学评估水利工程对河流栖息地质量的综合影响。该体系核心采用栖息地适宜性指数（HSI）模型，其构建需首先明确目标生物物种（如珍稀鱼类中华鲟、特有物种铜鱼等），进而通过详尽的野外生态调查与可控实验研究，确定影响这些物种生存的关键生态因子（通常包括流速、水深、底质组成、水温及溶解氧等），并建立各生态因子的适宜性曲线关系（例如研究表明中华鲟产卵适宜流速范围为0.5~1.0米每秒，适宜水深为3~8米）。随后，结合水动力评估获取的空间数据，采用加权叠加或模糊逻辑等方法计算河道各区域的栖息地适宜性指数（HSI值域为0~1，越接近1表示栖息地质量越优）。通常将HSI值低于0.3的区域判定为不适宜栖息地，0.3~0.7为较适宜栖息地，高于0.7则为高度适宜栖息地。应用实例表明，某河流在水利工程建设后经HSI模型评估，其适宜目标鱼类生存的栖息地总面积从工程建设前的20平方公里急剧减少至8平方公里，整体HSI平均值也从0.65下降至0.32，量化结果明确指示了栖息地修复的重点空间区域与具体质量目标，为生态修复工程的规划与设计提供了决定性依据^[3]。

三、受影响河流连续体的生态水力学修复技术

(一) 生态流量调控与水库优化调度技术

生态流量调控通过模拟自然水文过程,恢复河流适宜的流量条件,常见技术路径结合工程实践如下。某流域水库采用“汛期脉冲泄放”技术:每年鱼类产卵期(4-5月),按天然洪水过程调控泄流量,使下游流量从日常 $10\text{m}^3/\text{s}$ 骤增至 $30\text{m}^3/\text{s}$,持续72小时,模拟自然洪水脉冲,促进鱼类产卵;实施后,该流域土著鱼类产卵场面积恢复至工程前的70%,鱼苗存活率提升40%。另一水库采用“分层取水”优化调度:夏季水库表层水温较高($25-28\text{ }^\circ\text{C}$),底层水温低($10-12\text{ }^\circ\text{C}$),通过表层取水口泄水,避免低温水直接入河,下游河道水温提升 $5-8\text{ }^\circ\text{C}$,满足鱼类生长的温度需求;同时,采用“多时段小流量泄放”替代“集中大流量泄放”,下游日内流量波动幅度从3倍降至1.5倍,减少水流骤变对幼鱼的冲击^[4]。

(二) 河道形态修复与栖息地再造技术

河道形态修复通过仿自然设计,恢复地貌多样性,栖息地再造则针对目标生物需求构建适宜生境。某河下游因河床冲刷严重,采用“深潭-浅滩”再造技术:沿河道纵向间隔500-1000米,开挖深潭(水深5-8米),堆砌浅滩(水深0.5-1.0米),浅滩采用砾石与卵石混合铺设,模拟自然河床结构;同时,在河道两侧构建仿自然护岸(植草混凝土网格+本土植被),替代传统硬质混凝土护岸,护岸植被覆盖率从5%提升至60%,为水鸟提供栖息与觅食场所。某水库消落带采用“梯级植被带”修复:根据水位变幅(5-10米),从低到高依次种植耐淹草本(芦苇)、湿生灌木(杞柳)、中生乔木(枫杨),形成梯级植被结构,消落带植被覆盖率从10%提升至75%,土壤侵蚀量减少60%,同时为小型哺乳动物与鸟类提供迁徙通道。

(三) 闸坝生态化改造与连通性恢复技术

闸坝生态化改造通过增设生态设施、优化结构设计,恢复河流纵向连通性,核心技术结合案例如下。某大型闸坝增设“仿自然鱼道”:鱼道采用弯曲河道形态,设置石质障碍与水流扰动装置,模拟自然河道流场,适配不同体型鱼类(小型鱼类、中型洄游鱼类)的洄游需求;鱼道宽度8米,长度500米,设计流速 $0.3-0.8\text{m/s}$,实施后监测显示,鱼类洄游成功率从改造前的15%提升至80%,上游土著鱼类种群数量年均增长15%。某流域对

小型挡水坝实施“拆除+生态堰改造”:拆除流域内10座高度 $<5\text{米}$ 的挡水坝,恢复河道自然连通;对保留的3座关键闸坝,将传统重力坝改造为宽顶生态堰,堰顶增设齿状结构,增加过流面积与水流扰动,改善坝下流场分布,回流区面积从30%降至10%,污染物淤积量减少50%;同时,在堰体两侧设置小型鱼槽,进一步提升鱼类通行能力^[5]。

结语

水利水电工程对河流连续体影响的生态水力学评估与修复,体现了人类在改造自然的同时,努力寻求与自然和谐共生的智慧与责任。它不再是简单的工程问题,而是一个涉及水文、水力、生态、地貌等多学科交叉的复杂系统工程。通过科学的评估,能够精准地“诊断”出河流的“病症”;而通过系统的修复,则可以对症下药,帮助河流恢复其生命的“脉动”。从优化水库调度以模拟自然脉冲,到重塑河道形态以再造生命家园,再到改造闸坝以疏通生命通道,每一项技术都蕴含着对河流生态规律的深刻尊重。展望未来,随着生态理念的深入和技术的进步,生态水力学将在水利工程规划、设计、运行的全过程中扮演更加核心的角色,推动水利工程从单纯的“工程体”向融合生态功能的“生命体”转变,让每一条被工程影响的河流都能重新焕发生机与活力。

参考文献

- [1]陈福胜.分析水利水电工程中的河流治理与防洪措施[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(8).
- [2]龙晓飞,陈丕翔.山区河流连续溃坝洪水过程数值模拟[C]//中国大坝工程学会2021学术年会.1.珠江水利科学研究院;2.广东省水利水电科学研究院,2022.
- [3]纪凤兰.水利水电工程建设在生态环境中的影响分析[J].水电水利,2020,4(1):2.DOI:10.32629/hwr.v4i1.2722.
- [4]王明疆,张锦堂,郭浩洋,等.水利水电工程蓄水期生态流量泄放措施研究[J].西安理工大学学报,2021,37(1):4.
- [5]刘安富,万伟,李政龙,等.河流生态修复技术在水利水电工程中的应用[J].人民黄河,2022(S1):69-70.