

水利设计工程对河流生态系统连通性的影响及修复策略

吴淑慧

洛阳水利勘测设计有限责任公司 河南 洛阳 471000

摘要:水利设计工程对河流生态系统连通性产生显著影响,改变了水文情势、水质状况和河流形态,进而影响了生态过程和生物多样性。这些变化导致鱼类迁徙受阻、栖息地丧失及水质恶化等问题。为缓解这些负面影响,需采取生态友好型设计、建设鱼类过鱼设施、优化洪水管理策略及实施生态恢复项目等修复措施。通过这些策略,旨在恢复河流生态系统的自然功能,促进其与水利工程的和谐共生。

关键词:水利设计工程;河流生态系统连通性;影响;修复策略

引言:水利设计工程显著影响河流生态系统连通性,包括改变水文周期、降低水质、破坏自然河流形态,从而影响生物多样性和生态过程。这些变化常导致鱼类迁徙障碍、栖息地减少和水体富营养化等问题。为修复受损的河流生态系统连通性,需采用生态化设计原则,构建鱼类洄游通道,实施水质改善项目和恢复自然河流形态等措施。通过这些综合策略,旨在重建河流生态系统的连通性,促进生态平衡与可持续发展。

1 水利设计工程对河流生态系统连通性的影响

1.1 水文过程变化

(1)大坝与水库通过蓄水和调控改变河流自然水文特征:水库拦截上游径流,使库区水位抬升,下游流量呈现人工调控模式,丰水期流量被削减30%-50%,枯水期则通过放水维持稳定径流,打破季节性流量节律。流速方面,库区因水体蓄积变为缓流或静水区,流速降至天然状态的1/10-1/5;坝下河段因流量骤减,流速较天然状态下下降40%-60%,且水流稳定性增强,洪峰过程被削弱。(2)这些变化严重破坏河流连续性:大坝形成物理屏障,直接切断纵向连通性,阻碍鱼类洄游通道。流量调控使上下游水文节律脱节,破坏河流自然脉冲过程,导致物质输移中断。流速减缓延长水体滞留时间,污染物扩散能力下降,河流自净效率降低20%-30%,进一步加剧上下游生态过程的割裂。

1.2 水质状况恶化

(1)水利工程导致水流速度减缓后,水体扰动减弱,复氧能力下降,溶解氧含量降低10%-20%。水库形成的静水区易发生水体分层,底层缺氧引发底泥中氮、磷等营养盐释放,加速富营养化。同时,水流滞缓使污染物难以稀释扩散,农业面源和工业污染物在局部水域累积,COD、氨氮等指标较天然状态升高2-3倍,导致水体自净能力显著下降^[1]。(2)水质恶化直接威胁水生生物生存:溶解氧不足导致鱼类窒息死亡,富营养化引发蓝藻爆发,释放的藻毒素可使鱼类存活率下降50%以上。污染物在生物体内富集,如重金属通过食物链放大,导致鱼类产卵量减少30%-40%,幼鱼畸形率升高,进而破坏种群延续性。

物生存:溶解氧不足导致鱼类窒息死亡,富营养化引发蓝藻爆发,释放的藻毒素可使鱼类存活率下降50%以上。污染物在生物体内富集,如重金属通过食物链放大,导致鱼类产卵量减少30%-40%,幼鱼畸形率升高,进而破坏种群延续性。

1.3 河流形态改变

(1)水利工程中的河道整治常采用裁弯取直措施,将弯曲系数大于1.5的河道调整至1.2以下,以提高行洪能力;护岸加固多使用混凝土、浆砌石等硬质材料,替代天然河岸的泥土与植被。这些措施使河道断面趋于规则化,消除了自然形成的浅滩、深潭和沙洲。(2)河流自然形态被改变后,生境多样性锐减:浅滩消失导致水生植物生长面积减少40%-60%,深潭消亡使鱼类越冬场所缩减。硬质护岸阻隔地表水与地下水交换,两栖动物产卵场消失,底栖动物栖息地被破坏,物种数量下降30%以上。河道直线化使水流速度均匀化,丧失了不同流速带形成的多样化栖息环境,进一步压缩生物生存空间。

1.4 生态过程与生物多样性响应

(1)水利工程干扰河流生态过程:大坝拦截泥沙使下游输沙量减少50%-70%,导致营养物质循环受阻;库区水体滞留使碳、氮循环速率下降20%-30%,打破原有平衡。能量流动被重塑,上游库区因光照充足,浮游植物光合作用增强,而下游因泥沙减少透明度提高,沉水植物光合作用效率变化,导致食物链能量基础改变。鱼类依赖水流信号的繁殖信息传递被打乱,繁殖周期失调。(2)生物多样性显著下降:大坝阻隔使洄游性鱼类(如中华鲟)迁徙路径中断,种群数量下降60%-80%。繁殖环境恶化导致土著鱼类产卵成功率降低50%以上,产卵场面积缩减。水生植物群落结构单一化,底栖动物优势种更替,外来物种入侵风险增加,生态系统稳定性被削弱,抗干扰能力下降^[2]。

2 河流生态系统连通性的评估方法

2.1 评估指标的选择

(1) 连续性指标包含多项量化工具, 纵向连续性可通过河道连通率(无人工阻隔的河道长度占总长度比例)和水力传导度(反映水流纵向传递能力)衡量; 横向连续性常用河岸带连接度(植被连续覆盖的河岸长度占比)评估; 垂向连续性则以地表水-地下水交换通量为核心指标。树状河网连通性指数(如DCI和PCI)通过计算河网节点间的拓扑连接概率, 呈现支干流的整体连通水平, 其中DCI侧重结构连通性, PCI更关注功能连通性。此外, 生物连通性指数(如洄游鱼类的种群交流频率)可直接反映生态过程的连通状态。(2) 评估指标的选择需结合研究目标与河流特性: 宏观尺度的流域规划优先选用DCI等河网指数; 河段修复评估则侧重河道连通率和生物连通性指数。山区河流因水流湍急, 需重点考虑水力传导度; 平原河网受人类活动影响大, 河岸带连接度更具指示意义。同时, 指标选择需兼顾数据可获得性, 长期监测可选取易获取的河道连通率, 短期评估则可结合遥感数据采用PCI指数。

2.2 数据收集与处理

(1) GIS技术在数据收集集中发挥关键作用, 通过叠加数字高程模型(DEM)、土地利用图和水利工程分布图, 可提取河道长度、阻隔物分布、河网拓扑结构等基础数据, 进而计算树状河网连通性指数。遥感监测方面, 高分卫星影像(如高分七号)可识别河岸带植被覆盖变化和河道形态变迁, 无人机航测能获取厘米级的浅滩、深潭分布数据, 高光谱遥感则可反演水体叶绿素a、悬浮物等水质参数, 为连续性指标计算提供支撑。(2) 数据处理需经过标准化流程: 首先对原始数据进行质量检验, 剔除传感器故障或人为误差导致的异常值; 其次通过坐标转换实现GIS与遥感数据的空间匹配, 误差控制在5米以内; 然后采用Z-score标准化消除不同指标的量纲差异; 最后运用空间插值法(如反距离加权法)补齐监测盲区数据。通过3次以上的重复采样验证, 确保数据误差率低于8%, 为评估结果的准确性奠定基础。

2.3 案例分析

以珠江三角洲某水利枢纽工程为例, 评估其对河网连通性的影响。采用DCI指数计算发现, 工程建成后区域河网连通性下降31%, 主要因3座水闸阻断了支流与干流的自然水流交换。生物连通性监测显示, 鳊鱼等洄游鱼类的跨闸通过率从62%降至19%, 种群基因交流频率减少47%。

GIS分析表明, 闸坝建设导致12条次级河道的连通率

低于50%, 遥感数据显示河岸带植被连续覆盖长度减少28%, 浅滩面积萎缩34%。进一步研究发现, 水利工程通过双重机制影响连通性: 物理阻隔直接切断横向与纵向水流(贡献率63%), 闸门调度导致的流量不稳定则破坏了水文节律连续性(贡献率37%)。评估结果证实, 水闸的非生态化设计和调度方案是连通性下降的核心原因。

3 水利工程设计对河流生态系统连通性的修复策略

3.1 优化水利工程设计

(1) 在水利工程设计阶段融入生态保护理念, 需从源头构建“生态优先”的技术框架。具体措施包括: 一是推行生态化坝体设计, 对于大坝工程, 可采用“分层取水”技术, 通过不同高程的取水口调节下泄水温, 避免下游河段水温骤变对水生生物的影响; 在坝体两侧设置仿自然鱼道, 结合水流动力学模拟, 设计流速梯度适宜的洄游路径, 搭配灯光、水流声等引导信号提高鱼类通过率。二是实施柔性化河道整治, 摒弃全硬化护岸, 采用格宾石笼、植被混凝土等透水材料, 保留河岸与水体的物质交换通道; 整治过程中刻意保留15%-20%的自然弯道比例, 维持浅滩-深潭交替的河道结构, 为底栖生物提供多样化微生境。三是建立动态调度机制, 在水库运行方案中嵌入生态脉冲流量设计, 每年根据鱼类繁殖周期释放2-3次模拟自然洪水的流量过程, 刺激鱼类产卵和水生植物种子扩散^[3]。(2) 保持河流自然形态和生境多样性是维系生态连通性的基础。自然弯曲的河道形成纵向流速差异, 促进泥沙分选和营养物质沉积, 为不同习性的鱼类提供索饵场和产卵场; 深浅交替的地形使水体光照、溶氧呈现空间异质性, 支撑藻类、水生植物的分层生长, 维系食物链的完整性。一旦河流被裁弯取直或硬化, 不仅切断地表水与地下水的渗透循环, 还会导致生境单一化, 降低生态系统对干扰的缓冲能力, 进而破坏物质循环与能量流动的连通性。

3.2 实施生态修复措施

(1) 植被恢复需构建“陆生-湿生-水生”的梯度植被带。在河岸20米范围内种植乡土树种(如垂柳、枫杨), 其发达根系可固岸防蚀, 落叶输入为河流提供有机碳; 在常水位波动区种植芦苇、香蒲等挺水植物, 形成宽度不小于5米的缓冲带, 拦截面源污染并为鸟类提供栖息所; 在浅水区移栽沉水植物(如苦草、黑藻), 覆盖度控制在30%-50%, 既可为鱼类提供隐蔽场, 又能通过光合作用提升水体溶氧。人工湿地建设可采用“表面流+潜流”复合系统, 前置潜流湿地填充沸石、活性炭等基质吸附氮磷, 后续表面流湿地种植美人蕉、梭鱼草等净化植物, 总面积按汇水面积的1%-3%配置, 水力停留

时间设计为2-3天。(2) 这些措施能显著改善生态连通性: 植被缓冲带可使入河污染物减少40%-60%, 人工湿地对COD、总磷的去除率分别达50%和70%, 水质改善为水生生物提供基础生存环境; 沉水植物群落恢复后, 底栖动物种类可增加2-3倍, 进而吸引鱼类觅食繁殖, 使生物多样性指数提升30%以上; 植被带与湿地形成横向生态廊道, 连接孤立的河流生境斑块, 促进物种迁移与基因交流, 同时增强地表水与地下水的交换频率, 恢复水文连通性。

3.3 加强生态监测与评估

(1) 建立长期监测体系需整合多维度技术手段。水文监测布设自动水位计、流量计, 实时记录流量、水位变化, 重点监测生态流量达标情况; 水质监测采用原位传感器阵列, 每小时采集pH、溶氧、氨氮等参数, 结合每月一次的人工采样分析重金属、持久性有机物; 生物监测设置鱼类监测站(采用水下摄像机和刺网采样)、底栖动物采样点, 每季度调查物种组成与种群密度, 同时利用遥感技术(如哨兵2号卫星)每季度监测河岸带植被覆盖度变化。监测数据通过物联网平台实时传输, 建立包含30年基础数据的动态数据库。(2) 定期评估应形成“年度-五年”的分级机制。年度评估聚焦关键指标: 生态流量满足率、鱼类洄游成功率、植被覆盖度等, 采用雷达图直观呈现年度变化; 五年综合评估运用层次分析法, 从水文连通(权重30%)、生态结构(权重40%)、功能过程(权重30%)三个维度, 计算连通性综合指数, 对比工程前后的指数变化。评估结果需形成可视化报告, 针对发现的问题(如鱼道利用率低、湿地净化效率下降), 启动修复方案优化流程, 例如调整鱼道水流速度、更换湿地基质等^[4]。

3.4 完善法律法规与政策保障

(1) 现有制度存在三方面短板: 一是生态流量管理缺乏刚性约束, 部分地区仅将其作为指导性指标, 未纳入工程验收标准; 二是跨流域协调机制缺失, 上游水利工程调度未充分考虑下游生态需求, 导致流域尺度连通

性受损; 三是生态修复资金保障不足, 多依赖政府一次性投入, 缺乏长效运维机制。此外, 现行法律对河流生态连通性的定义模糊, 未明确破坏连通性的处罚标准, 监管力度薄弱。(2) 完善措施需构建全链条保障体系: 立法层面修订《河道管理条例》, 新增“生态连通性保护”专章, 明确水利工程需预留10%-20%的生态基流, 规定鱼类洄游通道的建设标准; 政策层面建立流域联防联控机制, 由省级政府牵头成立协调委员会, 统一调度跨区域水利工程, 推行“生态补偿+水资源置换”制度, 上游保护下游付费; 资金层面设立生态修复专项基金, 从水利工程收益中提取5%注入基金, 同时引入PPP模式吸引社会资本; 监管层面将连通性指标纳入地方政府考核体系, 对未达标项目实施约谈、限批等惩戒措施, 形成“设计-建设-运维”全周期的法律保障网。

结束语

综上所述, 水利设计工程对河流生态系统连通性的影响深远而复杂, 需要在工程规划与建设中高度重视并采取有效措施予以缓解。通过优化水利工程设计、实施生态修复策略、加强生态监测与评估以及完善相关法规政策, 我们可以逐步恢复河流生态系统的连通性, 保障生物多样性, 促进人与自然的和谐共生。未来, 随着科技的进步和理念的更新, 我们有理由相信, 水利设计与生态保护将更加紧密结合, 共同推动河流生态系统的健康与可持续发展。

参考文献

- [1] 张建云. 水利工程对河流生态系统连通性的影响及修复对策[J]. 水利学报, 2021, (03): 25-26.
- [2] 王浩. 河流生态系统连通性评价与修复技术研究进展[J]. 水科学进展, 2020, (10): 97-98.
- [3] 李原园. 长江经济带水利工程对河流连通性的影响及调控策略[J]. 长江流域资源与环境, 2020, (12), 84-85.
- [4] 陈求稳. 梯级水电开发对河流纵向连通性的影响机制与修复[J]. 生态学报, 2021, (05): 59-60.