

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。

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, 鳗鲡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 水利设计工程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].水力学报,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.