

# 水利水电工程对河流生态系统连通性的影响及生态修复策略

唐兴国

622921\*\*\*\*\*1516

**摘要:** 河流生态系统连通性是维持河流健康与水生物多样性核心功能的关键。水利水电工程在满足社会经济需求时,显著干扰了河流纵、横、垂向连通性,导致生境破碎化等后果。本文基于景观生态学与河流连续体理论,分析了水利水电工程对不同空间维度连通性的作用机制,阐述了大坝与水库的负面效应。在此基础上,文章从工程调控、结构改造与生境重建三个层面提出生态修复策略,包括生态流量调度等关键技术路径。研究表明,恢复河流连通性并非简单拆坝,应在保障工程安全与功能前提下,通过适应性管理与多目标协同,实现水利效益与生态保护的动态平衡。未来应强化跨学科整合,建立连通性评价体系,推动工程水利向生态水利转型。

**关键词:** 水利水电工程;河流连通性;生境破碎化;生态流量;鱼道;生态修复

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.05.037

## 引言

河流是地球上重要的淡水资源库与生物多样性热点区域,其生态完整性很大程度依赖水流自由连通特性。河流生态系统连通性指水流、泥沙等在河流纵向、横向和垂向空间维度上的无障碍迁移与交换能力,支撑多级营养结构,维系河流廊道生态服务功能。然而,长期以来人类为控制洪水、灌溉农田、生产电力,在主要江河修建大量水利水电工程。全球超1000公里的河流中,仅不到三分之一保持自然连通,其余被大型水坝阻断。我国主要江河形成梯级开发格局,河流片段化程度突出。水利水电工程对河流生态系统的影响是通过多重路径、多个尺度累积作用的,对连通性的破坏是最根本的生态胁迫因子。河流自然连通格局被打断后,连续的生态系统变为相对隔离的水库-河段系统,引发一系列生态响应,且影响具有滞后性与不可逆性,给河流生态修复带来困难。近年来,随着生态文明建设与水生态文明理念兴起,科学评价并有效修复水利水电工程扰动下的河流连通性,成为水资源管理、水利工程设计与生态保护交叉领域的热点课题。

## 1 河流生态系统连通性的内涵与生态意义

河流生态系统连通性不仅指水体物理贯通,涵盖水文、地貌、化学和生物等多层面功能耦合。从空间维度分,包括纵向、横向与垂向连通性。纵向连通性指从河源到河口水流、泥沙等沿水流方向迁移,理论基于河流连续体概念;横向连通性指河流主槽与洪泛区水文交换,是维持洪泛林生态系统和鱼类繁殖生境关键;垂向连通性涉及地表水与地下水等交换,影响水温调节等。

三种连通性在自然河流中协同,塑造生态系统动态平衡。纵向连通保障物种扩散与基因流动,横向连通提供繁殖与觅食空间,垂向连通维持底栖生物与幼鱼庇护所功能。连通网络良好时,河流有自我调节与恢复能力;某一维度连通性削弱,生态效应会放大。如纵向阻隔阻断鱼类洄游,改变河道形态,破坏横向连通性;水库水温分层削弱垂向热量交换,影响鱼类产卵。

因此,保护河流连通性是维护生态系统整体性与动态性。水利水电工程对连通性的干预是对河流系统结构-功能耦合体的深刻扰动。理解这一复杂性是制定生态修复策略的前提。

## 2 水利水电工程对河流连通性的影响机制

### 2.1 纵向连通性的阻断与片段化

水利水电工程对河流生态系统最直接显著的影响是纵向连通性丧失。大坝作为人工障碍物,改变河流自然连续梯度,将原本从源头到河口的水深、流速等序列分割为库区静水段、坝下减水段和恢复段。这种片段化阻断鱼类洄游通道,使溯河洄游和半洄游性鱼类无法到达历史产卵场,梯级开发还会分割短距离迁移鱼类种群,导致基因多样性丧失、局部灭绝风险上升。

此外,纵向连通性破坏切断物质输移链条。河流是泥沙等的载体,大坝建成后,上游来沙被拦截,导致库尾三角洲发育、库容减少,下游河床下切等。如黄河中游水库建成后,下游河床下切影响河势稳定及湿地与河漫滩水文连通。同时,库区拦截的有机质等可能在富营养化时释放,坝下河流因缺乏外源性有机碳输入,导致异养型微生物代谢受限、底栖动物群落结构简化。

另一个常被忽视的影响是流量节律的改变。自然河流具有丰枯交替的脉冲式水文过程,这种节律是河流生物完成生活史的关键信号。水利水电工程为满足发电、灌溉或供水需求,往往对流量进行平抑或反季节调节,使得洪峰削减、枯水流量抬高,从而消除了自然水文脉冲。对于依赖洪水信号进入河漫滩繁殖的鱼类,如鲤、鲫等产粘性卵鱼类,缺乏有效洪水过程意味着繁殖失败。由此可见,纵向连通性的破坏远不止物理阻隔,而是通过水文、泥沙、水温、水质等多因子耦合对河流生态系统实施全面控制。

## 2.2 横向连通性的退化与河漫滩隔离

在自然条件下,河流与河漫滩之间存在着周期性的水量交换。洪水季节,水流漫出河槽,进入河漫滩、沼泽和洼地,形成丰富的浅水生境,为鱼类提供产卵场和幼鱼育肥场;枯水期,河漫滩储存的水体缓慢回归河道,维持基流。这种横向水文连通性是河流-洪泛区系统高生产力的基础。然而,水利水电工程尤其是堤防、丁坝与水库运行管理方式的改变,严重削弱了这一连通性。

一方面,为了防洪安全,河流两岸往往修建高标准的堤防系统,直接切断了主槽与河漫滩之间的物理联系。即使在洪水期,水流也无法漫溢至堤外区域,导致河漫滩生态功能基本消失。另一方面,水库蓄水与下泄过程改变了洪水天然形态。很多大型水库采用防洪库容削峰,人为降低了洪峰流量与持续时间,使得自然洪水过程难以触发横向连通。在某些梯级开发河段,水库日调节引起的频繁水位涨落甚至导致了“假潮汐”现象,但这种人工涨落与自然洪水脉冲的水文形态完全不同,无法有效替代横向连通带来的生态效应。

横向连通性退化的生态后果十分显著。首先,依赖河漫滩进行繁殖的鱼类种群急剧减少,例如我国长江中游的四大家鱼自然繁殖与河漫滩洪水过程高度相关,三峡水库运行后,坝下河段横向连通显著减弱,天然鱼苗发生量出现长期低迷。其次,河漫滩湿地失去水文输入后,出现干旱化、植被退化与土壤有机质矿化,丧失了对氮磷等营养盐的拦截与转化能力,反而可能成为污染物释放源。最后,横向连通的丧失削弱了河流生态系统的灾害缓冲能力,使沿岸带更加脆弱。

## 2.3 垂向连通性的扰乱与潜流带功能退化

垂向连通性主要描述地表水与地下水、河床潜流带之间的交换过程。潜流带是指河床沉积物之下饱水但水流缓慢的区域,是许多底栖无脊椎动物、幼鱼及微生物

的重要栖息地,同时承担着硝化-反硝化、有机质分解等关键生态系统过程。水利水电工程对垂向连通性的干扰主要通过两种机制实现。

第一,大坝蓄水导致库区水位大幅度抬升,改变了河流原有水力梯度,使得库区上游河谷区域的地下水补给关系发生逆转,部分河段由排泄区变为补给区,潜流带生物群落因水化学条件突变而死亡。第二,下泄水流往往具有低温、低浊、低溶解氧等特点,且大坝下泄方式导致水温分层,使得坝下游河床垂向热量交换异常。低温水抑制了潜流带微生物活性,减弱了自净能力。更为严重的是,水库对泥沙的拦截使得下游河床缺乏细颗粒补给,河床粗化加剧,孔隙度降低,从而直接破坏了潜流带的水文交换通道。

## 3 面向连通性恢复的生态修复策略

### 3.1 生态流量调度与水文节律重建

在难以拆除大型水利枢纽的现实条件下,优化水库调度是恢复连通性最可行且成本相对较低的途径。生态流量调度是指在水库满足防洪、供水、发电等传统目标的同时,专门设计并下泄能够触发河流生态过程的水流过程,包括维持最小生态基流、模拟自然洪水脉冲以及提供鱼类洄游激发流量。其核心在于通过流量过程的动态模拟,部分恢复纵向与横向连通性的生态功能。

在具体操作上,需要基于河流历史水文序列与关键物种生活史特征,确定不同季节的生态需水阈值。对于洄游性鱼类,可在其繁殖季节集中下泄持续数日的诱导流量,配合水温条件形成繁殖信号。对于河漫滩生态系统,可结合汛前水库预泄,适当制造人工小洪水过程,恢复河漫滩的季节性淹没。我国在珠江流域实施的“压咸补淡”调度中已初步探索了生态调度的可行性,而长江上游梯级水库群正在尝试通过联合调度恢复中下游自然水文节律。需要强调的是,生态流量调度不是固定的泄放值,而应基于监测反馈进行适应性调整,建立“调度-监测-评估-修正”的闭环管理机制。

### 3.2 过鱼设施优化与鱼类通道恢复

过鱼设施是直接解决大坝纵向阻隔功能的工程措施。传统鱼道设计多基于特定经济鱼类的游泳能力,对非目标物种及小型鱼类考虑不足,导致过鱼效率普遍偏低。近年来,现代鱼道设计理念正从单一物种通道向多物种、全生活史通道转变。具体策略包括:依据河流鱼类群落结构设计多种流速与流态组合的池室;利用声、光、流场诱鱼技术提高入口找寻率;在梯级开发河段建

立鱼类通道网络,避免重复过坝造成的额外能量消耗。

对于高坝大库,传统鱼道因水头过大而难以实施,此时可考虑升鱼机与集运鱼系统组合方案,即通过集鱼设施将坝下鱼类诱捕后机械提升过坝,再放流至库区适宜水域。我国雅砻江锦屏一级水电站等工程已建成此类设施并开展运行监测。需要指出的是,过鱼设施不能完全替代自然河流的连通性,尤其对于需要进行多河段迁移的鱼类,即使成功过坝,库区静水环境仍可能构成行为障碍。因此,过鱼设施应作为综合修复策略的一部分,而非唯一手段。

### 3.3 水库分层取水与水温恢复

水温是河流垂向连通性的重要表征因子。针对水库下泄低温水问题,可采取分层取水技术,即建设多层取水口或可升降取水筒,在水库不同深度选取较高温度的表层水体下泄,以恢复下游河段自然水温过程。分层取水对促进坝下鱼类产卵、提高孵化率具有直接效果。日本、美国等国已在多座水坝上验证了分层取水的生态效益。我国紫坪铺、瀑布沟等水电工程也已增设分层取水设施,运行后坝下水温回升明显,产卵场出现恢复迹象。此外,库区前置库、人工湿地等预处理措施也可在一定程度上缓解水温分层问题。

### 3.4 河流再自然化与河漫滩重建

针对横向连通性丧失问题,河流再自然化是有效的修复方向。这包括拆除不必要的低坝、丁坝,退堤还滩,恢复河流的蜿蜒形态,重建河漫滩与主槽的水文交换路径。在空间允许的河段,可通过开挖洪泛区、恢复天然植被、构建侧向连通水道等方式,恢复洪水漫溢过程。对于已渠化、硬化的城市河流,可通过生态护岸替代混凝土护岸,增加河岸渗透性与粗糙度,部分恢复垂向与横向交换能力。欧洲莱茵河的“鲑鱼2000”计划通过拆除拦河建筑物、重建侧向连通河道,成功使大西洋鲑重返上游河段,是全球河流再自然化的经典范例。

### 3.5 基于自然的解决方案与适应性管理

近年来,基于自然的解决方案在河流连通性修复中受到广泛关注。其核心思想是利用或模拟自然过程来同

时实现工程安全与生态增益。例如,在库区消落带构建人工湿地与挺水植物带,不仅可以拦截面源污染,还能为鱼类提供替代产卵基质;在坝下河段投放大型木质残体、构建人工砾石浅滩,可模拟自然河流的底质异质性,增强垂向潜流交换。此外,适应性管理强调在不确定条件下将修复措施视为假设检验的过程,通过持续的监测与模型更新来动态调整管理策略。

## 4 结语

水利水电工程推动社会经济发展,但对河流生态系统连通性造成广泛负面影响,通过三个维度连通性下降,导致水文等过程解耦,表现为生境破碎化等。修复策略需走向多目标协同的系统性路径。生态流量调度等构成恢复河流连通性的技术工具箱,其有效性依赖于对生态过程和物种需求的理解及多部门协同治理。未来水电开发规划应将连通性保护前置,纳入生态连通性评估,优先保留或恢复关键连通河段,同时建立健全评价指标体系,推动水利工程向生态水利转型。实现目标需多学科深度融合,建立决策者等之间的有效沟通机制,如此才能在保障工程服务功能的同时修复受损河流连通性,实现现代化河流治理愿景。

## 参考文献

- [1] 李康,戚海棠,王蓓. 水利水电工程对河流生态系统累积性影响评价及规划调控[J]. 大众标准化,2026,(06):122-124.
- [2] 赖丁全. 水利工程对河流生态系统的累积影响及对策研究[J]. 中国水运,2024,(17):63-65.
- [3] 乐可多. 水利工程城市河流治理过程现状及应对分析[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024,(24):199-201.
- [4] 王猛,彭笑孔,周明明. 水利工程对河流生态系统的影响及其改善措施[J]. 水利规划与设计,2024,(06):85-88.
- [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,2022,44(S1):69-70.