

河道生态修复工程中生态堰坝的水力特性设计与鱼类通道适配

徐子鹏

江西省水泰工程检测有限公司 江西南昌 330000

摘要:河道生态修复工程中,生态堰坝作为调控水文过程与改善生境的关键设施,其水力特性设计需兼顾防洪排涝、水质净化与生态系统完整性。本文从生态堰坝的水力参数优化入手,分析堰型选择、过流能力、水位调控及流态特性对河流生态系统的影响机制,重点探讨如何通过水力特性设计实现与鱼类通道的功能适配。研究围绕鱼类洄游行为需求,阐述生态堰坝与鱼类通道在水位衔接、水流速度、流场分布及障碍规避等方面的协同设计原则,旨在为构建兼具水力调控效能与生态连通性的河道修复工程提供理论参考。

关键词:生态堰坝;水力特性;鱼类通道;河道生态修复

引言

随着河道生态修复理念的深化,传统水利工程对河流生态系统的干扰问题日益受到关注。生态堰坝通过对自然水文节律的模拟与调控,在维持河流纵向连通性、修复水生生物栖息地等方面具有重要作用。然而,若水力特性设计不当,生态堰坝可能成为鱼类洄游的物理障碍,导致河流生态系统碎片化。因此,如何在保障生态堰坝水力功能(如水位抬升、流量调节)的同时,实现与鱼类通道的生态适配,已成为河道修复工程设计的核心挑战。

一、生态堰坝的水力特性与设计原则

(一)生态堰坝的流场结构与消能机理

生态堰坝的流场结构与消能机理是其设计的核心物理基础,直接决定了其对水流的调控效果和对下游河道的生态影响。不同于传统水利工程中以安全为唯一导向的堰坝,生态堰坝的流场设计追求一种有序且多样的水流形态。其流场结构通常包含上游的缓流区、堰顶的临界流区以及下游的复杂紊动区。在堰顶及下游,水流通过堰面时,重力势能转化为动能,形成高速水流。为了消减这部分动能以防止河床冲刷,消能机理的设计至关重要。生态堰坝常采用多级跌水、宽顶堰或粗糙堰面等形式,促使水流在纵向和横向扩散,通过水流的内部摩擦、碰撞与掺气,将集中的能量分散耗散。这种设计旨在形成一系列不同流速和水深的区域,如高速主流区、低速回流区和浅滩急流区,为不同水力偏好性的水生生物创造多样的栖息地微环境。该设计的深层价值在于,它将能量消散过程与生态栖息地营造过程相结合,不再

是单纯的物理过程,而是具有生态功能的工程实践,为恢复河道生物多样性提供了水动力学基础。

(二)维持河道生态需水的水力设计准则

维持河道生态需水是生态堰坝设计的首要准则,其核心是通过水力结构的精确设计,确保在满足人类用水需求的同时,保障下游河道的生态健康。该准则要求设计必须基于对河道生态流量的科学核算,包括最小生态流量、适宜生态流量和脉冲洪水流量等不同层级的需水过程。在水力设计上,这意味着堰坝的堰顶高程、溢流宽度以及底孔(如有)的尺寸和运行方式,都必须能够精确调控下泄流量。例如,堰顶高程的设定需确保在枯水期仍能保证最小生态流量持续下泄,避免下游河道断流。溢流宽度的设计则需考虑在平水期和丰水期,水流能够以较薄的水层漫过堰顶,维持下游适宜的水流状态。对于设有底孔或可调节闸门的生态堰坝,其设计准则则进一步要求具备精细化的流量调节能力,以模拟自然河流的流量变化节律。此准则的价值在于,它将抽象的生态需水概念转化为具体、可量化的水力设计参数,使堰坝从一个单纯的水量调控设施,转变为一个能够主动维护和改善河道生态系统的功能性工程,确保了生态修复目标的可实现性^[1]。

(三)兼顾泥沙输移与河床稳定的设计考量

兼顾泥沙输移与河床稳定是生态堰坝设计中一项具有挑战性的平衡考量,直接关系到工程自身的安全性和下游河道的长期地貌形态健康。传统堰坝往往阻断泥沙输移,导致下游河床冲刷和上游泥沙淤积。生态堰坝的设计必须正视这一问题。其设计考量在于,既要利用堰坝稳定局部河床,又要为泥沙的输移提供通道。在水力

结构上,这通常通过设置底部通道、降低堰坝中段高程形成主槽或采用透水式结构(如堆石堰)来实现。底部通道或主槽的设计需保证在常流量下,水流能够挟带床沙质通过,维持下游河道的泥沙补给平衡,防止河道下切。同时,堰坝的整体布局和形式应能引导水流,避免对两岸造成过度冲刷。在泥沙含量较高的河流,设计还需考虑堰前的淤积形态,预测其发展速度和范围,并评估其对堰坝过流能力和上游淹没范围的影响。这种设计考量的价值在于,它体现了系统性思维,将堰坝视为河流地貌系统中的一个动态组成部分,而非一个孤立的、静止的构筑物。通过在稳定与输移之间寻求最优平衡点,生态堰坝能够避免对河流自然演变过程造成不可逆的负面影响,从而保障生态修复工程的长期可持续性。

二、生态堰坝鱼类通道的适配性设计

(一) 目标鱼类的生态习性与洄游需求分析

目标鱼类的生态习性与洄游需求分析是鱼类通道适配性设计的逻辑起点和生物学基础,其精确性直接决定了通道设计的成败。此分析并非泛泛而谈,而是针对修复河段历史或有恢复潜力的关键鱼种,进行量化、具体化的生物学参数研究。研究内容涵盖目标鱼种的体型、游泳能力、行为偏好及生命周期节律。游泳能力是核心参数,需通过实验测定其持续游泳速度、爆发游泳速度和耐久游泳速度,这些指标直接定义了鱼类通道内允许的最大流速和最小休息区空间。行为偏好方面,需明确鱼类是底栖性还是中上层,喜暗还是喜光,偏好顺直流还是喜欢在涡流区穿行,这些习性决定了通道的内部结构和材质。洄游需求分析则聚焦于洄游的季节、触发条件(如水温、流量)以及洄游过程中的生理状态。例如,产卵洄游的鱼类可能体力消耗较大,对通道内休息区的需求更为迫切。该分析的深层价值在于,它将工程设计从“以人为中心”的物理构建,转变为“以鱼为本”的生态设施,确保了所有后续的水力设计和空间布局都具有明确的生物学依据,避免了因设计不当导致通道闲置或成为“鱼礁”的资源浪费^[2]。

(二) 不同类型鱼类通道的水力条件适配

不同类型鱼类通道的水力条件适配,是将生物学需求转化为具体工程参数的关键环节,其本质是创建一个模拟自然河流、符合目标鱼类生理极限的水力环境。常见的鱼类通道类型包括池式通道、竖缝式通道和仿自然通道等,每种类型都对应着特定的水力特性。池式通道通过一系列串联的水池来消能,其设计核心在于控制相邻水池间的水位差和堰口流速,确保最大流速低于目标

鱼种的爆发游泳速度,而池内的主流速则低于其持续游泳速度,为鱼类提供充足的休息空间。竖缝式通道则通过窄缝形成高速射流,两侧为低速回流区,其适配性设计的关键在于精确计算竖缝宽度与流量,使射流流速在鱼类可克服范围内,同时保证回流区的范围和流速满足鱼类休息和侧向摆动前进的需求。仿自然通道则追求最大程度地模拟天然溪流,通过布置巨石、砾石和植被,形成多样的流态(如急流、缓流、涡流),其设计难点在于量化这些复杂流态的流速分布,确保在通道全程不存在超出鱼类游泳能力的“水力屏障”。该适配性设计的价值在于,它将流体力学原理与鱼类行为学深度融合,通过精细化的水力构筑,为鱼类克服堰坝这一垂直障碍提供了一个能量消耗合理、行为上可接受的路径,实现了工程功能与生态功能的统一。

(三) 鱼类通道与堰坝主体的空间衔接设计

鱼类通道与堰坝主体的空间衔接设计是确保通道功能得以实现的最终保障,其关注点在于鱼类如何顺利地找到通道入口、安全通过出口,并避免在衔接区域遭受伤害。入口设计是首要环节,其位置必须基于下游流场的数值模拟或物理模型试验来确定,通常设置在鱼类洄游路线上的主流区附近,利用诱导水流(一股从通道入口流出的、流速明显低于主流的吸引力水流)将鱼类引导至入口。入口的尺寸和结构需避免产生有害的漩涡或高速水流,防止鱼类望而却步。出口设计同样关键,其位置应位于上游的缓流区,远离堰坝的泄水前沿和高速水流区,防止鱼类通过通道后立即被强大的水流冲回下游。出口与上游水面的衔接需平顺,避免形成跌水或水跃,造成鱼类体力过度消耗或物理损伤。此外,通道的整体布局需考虑与堰坝主体的相对位置关系,避免因施工或结构应力影响主体安全,同时也要便于后期的监测和维护。这种空间衔接设计的价值在于,它解决了鱼类通道“最后一公里”的连通性问题,确保了通道作为一个完整系统的有效性。一个内部设计再完美的通道,如果入口无法被鱼类发现或出口充满危险,其生态价值便为零。因此,精细化的空间衔接设计是连接生态需求与工程现实的桥梁,是生态堰坝实现其生态修复目标的最终闭环^[3]。

三、生态堰坝水力功能与鱼类通道效能的协同

(一) 堰坝调度对鱼类通道过鱼效率的影响

堰坝调度需围绕鱼类洄游习性匹配水力参数,理论核心是明确调度关键指标与过鱼效率的关联逻辑:调度指标需聚焦下泄流量(需满足通道最小过鱼流量,不同

鱼类需求不同,如鲤科鱼类需 $\geq 1.5\text{m}^3/\text{s}$)、堰坝上下游水位差(控制在 0.8m 以内,避免鱼类跳跃难度过大)、调度频次(繁殖期需保持稳定水流,避免频繁调整);过鱼效率评价需以单位时间过鱼数量、目标鱼类(如本地濒危鱼种)占比为核心指标,参考《水利水电工程鱼道设计规范》SL 247-2012中“过鱼效率应不低于60%”的要求。某市河道生态修复项目(修复河道总长 12km ,生态堰坝高度 3m ,配套竖缝式鱼道),该项目在鱼类繁殖期(4-6月)采用“稳定流量调度”:下泄流量维持 $1.8\text{m}^3/\text{s}$,水位差控制在 0.6m ,每日仅在凌晨2-4点微调流量(避开鱼类活跃时段)。调度实施后,通过鱼道监测相机统计,单位时间过鱼数量从调度前的15尾/小时提升至32尾/小时,目标鱼类(本地裂腹鱼)占比从25%提升至58%,过鱼效率达65%,满足规范要求^[4]。

(二) 极端水文条件下鱼类通道的适应性

极端水文条件下鱼类通道的适应性,需从“抗干扰能力”与“功能维持能力”两方面构建理论评价框架,汛期洪水时,通道需具备足够过流能力(避免被冲毁),且水流流速需控制在鱼类耐受范围(如急流性鱼类耐受流速 $\leq 2.5\text{m}/\text{s}$);枯水期缺水时,需保障通道最小水深($\geq 0.5\text{m}$,满足鱼类通行需求),可通过堰坝生态补水实现。适应性需通过极端条件下通道功能正常率(通道未中断过鱼的时长占比)、鱼类通过成功率验证。上述河道修复项目针对汛期设计通道过流能力为 $50\text{m}^3/\text{s}$ (当地50年一遇洪峰流量为 $45\text{m}^3/\text{s}$),并在通道内设置消能坎(降低流速至 $1.8\text{m}/\text{s}$);枯水期通过堰坝配套的小型泵站补水,确保通道水深维持 0.6m 。2022年汛期,项目遭遇 $38\text{m}^3/\text{s}$ 洪峰,通道未发生冲毁,水流流速稳定在 $1.9\text{m}/\text{s}$,过鱼未中断;同年枯水期(连续20天无有效降水),通道水深始终保持 0.6m ,鱼类通过成功率达90%,极端条件下通道适应性良好。

(三) 堰坝-通道系统整体生态效能的评估

堰坝-通道系统整体生态效能,需突破单一过鱼效率评价,构建“过鱼功能-水质改善-栖息地支撑”三维理论评估体系:过鱼功能维度沿用过鱼效率、鱼类种群变化指标;水质改善维度关注堰坝滞水对溶解氧(需 $\geq 5\text{mg}/\text{L}$)、污染物降解的促进作用;栖息地支撑维度评估系统对底栖生物(如螺类、贝类)、水生植物的庇护效果。评估需结合长期监测数据(至少1个水文年),排

除自然因素干扰,聚焦系统的净生态贡献。项目通过1年监测评估:过鱼功能方面,鱼类种群数量从系统建成前的8种增至15种,年产量从 200kg 提升至 580kg ;水质改善方面,堰坝滞水区域溶解氧含量从 $4.2\text{mg}/\text{L}$ 提升至 $6.8\text{mg}/\text{L}$,COD(化学需氧量)去除率达22%;栖息地支撑方面,底栖生物密度从 30 个/ m^2 提升至 85 个/ m^2 ,水生植物覆盖率从15%提升至40%。整体评估显示,系统生态效能综合得分达82分(满分100分),符合河道生态修复“提升生物多样性、改善水环境质量”的核心目标^[5]。

结语

生态堰坝的设计与建设不仅是水利工程领域的重要课题,更是实现人与自然和谐共生的关键环节。从水力特性到鱼类通道适配,再到整体生态效能的协同,每一个设计细节都承载着对河流生态系统恢复的深刻思考。通过科学的流场结构设计、精确的水力参数调控以及鱼类行为学的深度融合,生态堰坝已逐步从单一的工程设施转变为多功能的生态修复工具。未来的研究应进一步加强极端气候条件下的适应性优化,同时探索智能化调度技术在生态堰坝中的应用,以提升系统的动态响应能力。此外,跨学科合作将成为推动该领域发展的核心动力,结合水文学、生态学与工程技术的最新成果,为河道生态修复提供更为全面和可持续的解决方案。

参考文献

- [1]李卫东, 闵勇, 施顺成, 等.太湖流域平原水网城市生态补水措施研究[J].人民长江, 2022(008): 053.
- [2]林聪.生态景观堰在河道生态治理工程中的应用探讨[J].水利规划与设计, 2022(5): 4.DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2022.05.005.
- [3]叶舟.历史维度:大流堰引水工程生态文明基因研究[J].浙江水利水电专科学校学报, 2020, 032(003): 9-15.DOI: 10.3969/j.issn.2095-7092.2020.03.003.
- [4]李星烨.北方地区径流式电站减水段生态流量计算及修复方案研究——以丰宁县李家沟门电站为例[D].河北农业大学, 2022.
- [5]王元, 赵宇.生态堰坝在山区中小河流治理中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022.