

水利工程生态化施工技术应用与发展前景研究

张修娟¹ 薛俊法²

1. 山东丰通建工有限公司 山东 日照 276800

2. 沂水县久远水利水电建筑安装有限公司 山东 临沂 276400

摘要: 本文系统梳理了水利工程生态化施工技术的内涵与理论基础,重点分析了当前主流生态化施工技术(如生态护岸、生态鱼道、绿色混凝土、水下生态修复、低扰动施工等)的应用现状与典型案例,并深入探讨其在实施过程中面临的技术标准不统一、成本偏高、监管机制薄弱等现实挑战。在此基础上,结合“双碳”目标、智慧水利、生物多样性保护等国家战略导向,对生态化施工技术的未来发展趋势进行展望,提出完善法规体系、强化科技创新、推动全生命周期管理、加强跨学科融合等发展路径。研究表明,生态化施工技术不仅是实现水利工程绿色转型的关键支撑,更是构建人水和谐共生新格局的重要保障。

关键词: 水利工程;生态化施工;生态修复;绿色技术;可持续发展;人水和谐

引言

水利工程是国家基础设施的关键部分,对保障水资源安全、防洪减灾等意义重大。但传统水利工程建设以“工程优先”为导向,重结构强度、施工效率与经济效益,忽视对河流生态系统的干扰,引发河道渠化、水体自净能力下降、生物栖息地破碎化、水生生物多样性锐减等生态问题,如硬质护岸阻断物质能量交换、大坝阻隔鱼类洄游、施工加剧水体浑浊度,威胁流域生态健康。21世纪以来,“两山”理念深入人心,相关法律法规出台,对水利工程建设提出更高生态要求。在此背景下,生态化施工技术兴起并快速发展。它指在水利工程全过程中,综合运用多学科知识,采用低干扰等技术手段,最大限度减少工程对自然生态的负面影响,促进生态功能恢复提升。

1 水利工程生态化施工技术的内涵与理论基础

1.1 内涵界定

水利工程生态化施工并非简单地在工程中“点缀”绿化或增设生态设施,而是将生态理念内嵌于施工全过程的系统性变革。其核心内涵包括:(1)全过程生态考量:从项目前期环评、方案比选,到施工组织设计、材料选用、工艺选择,再到后期生态监测与适应性管理,均需纳入生态影响评估与优化。(2)最小化生态扰动:通过精准施工、时序优化、空间避让等手段,最大限度减少对水体、底泥、植被、野生动物的直接破坏。(3)生态功能修复与增强:不仅修复因施工受损的生态要素,更通过工程措施主动营造有利于生物栖息、水质净化、河岸稳定的生态微环境。(4)资源循环与低碳运行:推广使用再生材料、节能设备,减少碳排放与废弃

物产生,实现施工过程的绿色低碳化。

1.2 理论基础

生态化施工技术的理论支撑源于多个学科的交叉融合。其中,河流连续体概念(River Continuum Concept, RCC)为理解河流生态系统的整体性提供了基础框架,强调任何水利工程都应尽量维护河流在纵向、横向、垂向及时序上的连续性,避免造成生态断裂。生态水力学则进一步深化了水流动力过程与生物行为之间的关联认知,为生态流量保障、鱼类栖息地模拟、过鱼设施设计等提供了定量依据。景观生态学从空间格局视角出发,指出斑块、廊道与基质的合理配置对物种迁移、基因交流及生态系统稳定性具有决定性作用,这为生态护岸布局、河岸带植被恢复及生态廊道构建提供了理论指导^[1]。此外,循环经济与绿色建造理论则从资源效率与环境负荷角度,推动施工方式由线性消耗向闭环循环转变,强调在保障工程性能的前提下,最大限度减少碳排放、能源消耗与废弃物产生。这些理论共同构成了水利工程生态化施工的科学根基,使其不仅是一种技术选择,更是一种系统性的生态治理范式。

2 水利工程生态化施工关键技术及应用

2.1 生态护岸技术

传统混凝土或浆砌石护岸虽具备良好的抗冲刷能力,但其刚性、封闭的结构特性严重割裂了水体与岸坡之间的物质、能量和信息交换,导致滨水带生态功能退化。相比之下,生态护岸技术通过采用柔性、透水、多孔的结构形式,在保障工程安全的同时,有效恢复了河岸生态界面的活力。目前,植物护岸广泛应用于流速较低的河段,通过种植根系发达的本土草本或灌木(如芦

苇、香蒲、杞柳等），形成天然的固土屏障，兼具水土保持与生物栖息功能。在需要更高结构稳定性的区域，则常采用生态袋或植生毯技术，即利用可降解纤维袋填充种植土后垒砌成坡，表面播种或铺设预制植生毯，可在短期内实现植被覆盖，防止初期水土流失。格宾石笼与植被相结合的复合护岸形式则在中小河流治理中展现出良好适应性，其镀锌钢丝网箱填充块石后形成稳定骨架，缝隙间填土植草，既满足抗冲要求，又为微生物、昆虫及小型动物提供栖息空间。近年来，多孔生态混凝土技术也逐步成熟，通过特殊配比使混凝土内部形成连通孔隙，允许植物根系穿透生长、水体自由渗透，并促进微生物膜附着，从而实现水质净化与生态修复的双重目标。以浙江省“万里清水河道”建设为例，大量采用“格宾石笼+本土植物”组合护岸模式，不仅有效提升了防洪能力，还显著改善了河道生物多样性与景观美学价值，成为生态化施工的典范。

2.2 鱼类通道与生态调度技术

大型水利枢纽工程，尤其是拦河大坝，往往对水生生物特别是洄游性鱼类造成严重阻隔，破坏其生命周期完整性。为此，生态化施工必须同步考虑过鱼设施的建设与生态调度机制的建立。传统鱼道多采用池式或槽式结构，虽能提供水流通道，但因流态单一、缺乏自然生境特征，实际过鱼效果有限。近年来，仿自然鱼道逐渐兴起，其设计理念是模拟天然溪流的蜿蜒形态，设置深潭、浅滩、砾石堆及缓流区，营造符合鱼类行为习性的复杂流场，显著提升过鱼成功率。对于高坝工程，升鱼机或集运鱼系统则成为必要补充，通过机械辅助方式将鱼类转运至上游^[2]。与此同时，生态调度技术强调在施工期及运行期保障下游河道的最小生态需水量，避免因断流或流量骤变导致水生生态系统崩溃。以金沙江乌东德水电站为例，工程在建设阶段即同步实施了集运鱼系统，并配套建设生态流量实时监控平台，确保关键时期下游生态用水需求，有效缓解了对圆口铜鱼等珍稀特有鱼类的生存压力，体现了生态化施工从“被动补偿”向“主动协同”的转变。

2.3 绿色建材与低碳施工技术

材料与装备是施工过程生态化水平的直接体现。当前，绿色建材的研发与应用已成为生态化施工的重要方向。再生骨料混凝土技术通过将建筑垃圾或废弃混凝土破碎筛分后作为骨料重新利用，不仅减少了天然砂石开采对山体与河床的破坏，还实现了建筑废弃物的资源化循环。生态混凝土则在多孔性基础上进一步拓展功能，例如掺入光催化材料二氧化钛（TiO₂），可在光照条件下

分解水体中的有机污染物，赋予护岸结构自清洁与水质净化能力。在施工装备方面，推广使用电动或混合动力工程机械，可显著降低噪声与振动对周边居民及野生动物的干扰；智能喷淋降尘系统则依托扬尘传感器实时监测PM10浓度，自动启停喷雾装置，实现精准控尘，避免水资源浪费。这些技术的集成应用，使水利工程施工从高能耗、高排放的传统模式，逐步转向绿色、低碳、智能的新范式。

2.4 水下生态修复与底泥处理技术

水利工程施工，尤其是疏浚、清淤等水下作业，极易扰动底泥，引发污染物再悬浮与扩散，对水体生态造成二次伤害。生态化施工强调对水下环境的原位保护与修复。一方面，采用环保型绞吸船配合密闭管道输送系统，可有效控制疏浚过程中泥沙外溢，减少对水体透明度的冲击；另一方面，针对已受污染的底泥，可采取原位覆盖或化学固化技术，利用活性矿物材料（如沸石、活性炭）或环保固化剂将其封存，阻断重金属与有机物向水体释放^[3]。在此基础上，部分工程还主动开展水下生态重建，如在水库或湖泊区域投放生态型人工鱼礁，为鱼类提供庇护与产卵场所；同时种植苦草、狐尾藻等沉水植物，构建“水下森林”，恢复水体初级生产力，增强生态系统自净能力。此类措施不仅修复了施工造成的生态损伤，更提升了水域的整体生态服务功能。

2.5 低扰动施工组织与信息化管理

生态化施工不仅依赖于具体技术手段，更离不开科学的施工组织与全过程信息化管控。借助BIM（建筑信息模型）与GIS（地理信息系统）技术的深度融合，可在设计阶段构建三维数字孪生模型，模拟不同施工方案对周边生态敏感区（如湿地、鸟类栖息地、珍稀植物分布区）的影响，从而优化施工路径与时序，实现空间避让。施工过程中，无人机遥感技术可高频次获取工地影像，动态监测植被破坏范围、水土流失状况及施工边界合规性，为现场管理提供即时反馈。尤为重要的是，生态施工时序的优化需充分考虑生物节律，例如避开春季鱼类产卵期、夏季鸟类繁殖期等生态敏感窗口，将高强度作业安排在生态影响最小的时段，体现对自然规律的尊重。这种以数据驱动、时空协同为核心的精细化管理模式，是生态化施工从理念走向实践的关键保障。

3 当前面临的挑战与瓶颈

尽管生态化施工技术取得显著进展，但在推广应用上仍面临多重挑战。首先，技术标准与规范体系尚不健全。现行水利工程技术标准多聚焦于结构安全与耐久性指标，对生态性能缺乏量化要求与验收依据。例如，

生态护岸的植被成活率、孔隙连通性、生物附着能力等关键生态参数尚未纳入强制性规范,导致设计方案主观性强,施工质量难以统一评估。其次,初期投资成本较高制约了技术普及。生态材料、专用设备及长期监测系统的投入普遍高于传统方案,而在财政资金紧张或生态效益难以货币化的项目中,业主单位往往因短期经济压力而放弃生态选项^[4]。第三,跨学科协同不足成为落地障碍。生态化施工涉及水利、生态、环境、材料、园林等多个专业领域,但当前设计、施工、监理单位多由单一工程背景人员组成,缺乏对生态过程的理解与整合能力,致使生态理念停留在图纸层面,难以转化为有效实践。第四,长效运维机制缺失导致“建而不管”。许多生态措施如植被护岸、人工湿地等需持续养护才能发挥功能,但项目竣工后常因无专项资金、无责任主体而迅速退化,造成资源浪费。最后,公众认知与参与度不高也限制了社会监督与共治格局的形成。多数民众仍将生态水利工程等同于“岸边种树”,对其技术内涵与系统价值认识不足,参与决策与反馈的渠道有限,难以形成推动生态化转型的社会合力。

4 发展前景与对策建议

面向“双碳”目标与美丽中国建设,水利工程生态化施工技术将迎来更广阔的发展空间。未来应着力推进以下方向:一是完善法规标准体系,强化制度保障。加快修订《水利工程施工技术规范》《堤防工程设计规范》等核心标准,增设生态化施工专章,明确生态材料性能、施工工艺生态阈值及验收方法;同时建立涵盖生物多样性指数、水质改善率、碳减排量等维度的生态绩效评价体系,并探索“生态补偿+激励”机制,对采用先进生态技术的项目给予财政补贴或政策倾斜。二是推动技术创新与集成应用。重点研发高性能、低成本的生态材料,如具备自修复能力的混凝土、可完全生物降解的护岸网格;发展“智慧生态施工”平台,融合物联网、人工智能与数字孪生技术,实现施工扰动、生态响应与调控措施的闭环管理;同时结合地域水文地貌特征,探索“近自然工法”的本土化路径,形成差异化、适应性

强的技术解决方案。三是构建全生命周期管理模式。将生态运维费用纳入工程总投资预算,推行“建设—移交—运维”一体化合同机制,明确后期管护责任;推广EOD(Ecology-Oriented Development)模式,通过生态产品价值实现(如碳汇交易、生态旅游、水质服务付费)反哺运维成本;建立覆盖工程全周期的生态监测网络,利用大数据分析评估长期效益,支撑适应性管理决策。四是加强人才培养与跨学科融合。在高校水利工程专业课程中增设生态工程、环境修复、景观生态等模块,培养兼具工程能力与生态素养的复合型人才;鼓励设计院、科研机构、环保企业组建创新联合体,开展技术攻关与示范工程建设。五是提升公众参与与社会认同。通过科普展览、社区听证会、志愿者巡河等形式,增强公众对生态水利工程的理解;建立信息公开与反馈平台,保障社会监督权,营造共建共治共享的良好氛围。

5 结语

水利工程生态化施工是新时代水利高质量发展的必然选择,是实现“人水和谐”愿景的关键路径。当前,我国已在生态护岸、鱼道建设、绿色建材等领域积累了丰富经验,但仍需在标准体系、成本控制、长效运维等方面持续突破。未来,应以系统思维统筹工程安全与生态健康,以科技创新驱动绿色转型,以制度创新保障可持续实施。唯有如此,方能真正实现水利工程从“征服自然”向“顺应自然、修复自然、共生共荣”的历史性转变,为建设美丽中国和全球生态文明贡献水利智慧与中国方案。

参考文献

- [1]李旭成,李继军,陈新民.水利工程绿色施工技术与生态环境保护研究[J].中国设备工程,2025,(22):213-215.
- [2]金鹏举.水利工程施工中生态保护技术的应用[J].工程建设与设计,2025,(16):156-158.
- [3]卢晶,郝淑涵.农田水利工程施工对生态环境的影响与保护策略探讨[J].新农民,2025,(22):28-30.
- [4]郭健.水利工程施工中的环境保护与生态恢复措施[J].石材,2025,(08):165-167.