

水利工程施工阶段碳排放核算模型与减排策略

黄婵婵

浙江富江建设集团有限公司 浙江 温州 325000

摘要:水利工程施工阶段碳排放核算需构建涵盖直接、间接及隐蔽排放源的模型,以生命周期评价理论为基础,结合排放因子法与过程分析法,分阶段量化碳排放。减排策略包括推广低碳建材、应用新能源施工设备、优化施工工艺、引入智能调度系统、加强现场管理、实施碳交易机制及生态修复等。这些措施可有效降低施工碳排放,助力水利工程绿色转型。

关键词:水利工程; 施工阶段; 碳排放; 核算模型; 减排策略

引言:在全球碳中和目标推动下,水利工程建设正面临节能降碳的迫切需求。其施工阶段因涉及大型机械作业、混凝土浇筑、土方开挖等高耗能环节,碳排放占全生命周期的比重显著,但现有核算方法多聚焦单一环节,缺乏系统性动态模型支撑。因此,构建覆盖全排放源、适配施工特性的核算模型,并制定技术-管理协同的减排策略,成为推动水利工程绿色转型的关键路径。

1 水利工程施工阶段碳排放特征分析

1.1 碳排放源识别与分类

(1) 直接排放源:指施工过程中直接产生温室气体的环节,核心为施工机械燃油消耗,如挖掘机、装载机等大型设备运行时柴油燃烧排放 CO_2 ;此外,爆破作业中炸药分解会释放 CO_2 和 N_2O ,钢结构焊接过程也会因燃料燃烧和焊材反应产生少量碳排放。(2) 间接排放源:源于施工所需能源与物资的间接消耗,主要包括电力消耗,如混凝土搅拌站、水泵等设备用电对应的发电碳排放;材料运输过程中运输车辆燃油消耗产生的排放;以及临时宿舍、办公区供暖、照明等临时设施运行带来的碳排放。(3) 隐蔽排放源:易被忽视但影响显著,涵盖施工废水处理过程中曝气、药剂反应产生的碳排放;土方开挖、河道疏浚等作业对地表生态的扰动,导致土壤有机质分解释放 CO_2 ;此外,施工废弃物填埋、处置过程也会产生少量甲烷等温室气体。

1.2 水利工程碳排放特点

(1) 排放动态性强:水利工程普遍施工周期长,多跨季节甚至多年,且作业面分散,从基础开挖到主体浇筑、设备安装,不同阶段碳排放强度差异大;同时受水文、气候等自然条件影响,施工节奏波动会导致碳排放呈现明显动态变化。(2) 高能耗设备主导:工程需大量大型重型设备,如挖掘机、起重机、盾构机等,此类设备功率大、燃油消耗高,单位作业量碳排放强度远高于

常规建筑设备,是施工阶段碳排放的核心贡献者。(3) 关键工序排放集中:混凝土浇筑是碳排放最集中的工序,水泥生产本身碳排放量大,且混凝土搅拌、运输、振捣等环节能耗高;此外,大坝碾压、地基处理等关键工序也存在集中碳排放现象,此类工序碳排放占比可达总排放的60%以上^[1]。

1.3 碳排放影响因素

(1) 工程规模与复杂度:规模越大、结构越复杂,所需材料、设备和能源消耗越多,碳排放总量越高;跨流域调水、大型水库等复杂工程的碳排放强度显著高于小型水利设施。(2) 施工工艺选择:传统粗放式工艺碳排放较高,如现场搅拌混凝土比商品混凝土碳排放高;采用预制装配、绿色施工等先进工艺可有效降低碳排放。(3) 能源结构:施工能源以煤炭、柴油等化石能源为主时碳排放强度高,推广光伏、风电等清洁能源供电,或使用新能源施工设备,可显著降低碳排放。(4) 管理水平:精细化管理可减少资源浪费与能耗,如合理调度设备降低空转率、优化施工进度减少工期延误带来的额外排放;反之,管理混乱易导致重复作业、能源浪费,加剧碳排放。

2 水利工程施工阶段碳排放核算模型构建

2.1 模型构建原则

(1) 系统性原则:全面覆盖施工阶段直接、间接及隐蔽碳排放源,兼顾能源消耗、材料流转、设备运行等全流程环节,避免遗漏关键排放路径,确保核算体系的完整性;(2) 科学性原则:以生命周期评价理论、碳排放核算标准为基础,采用经过验证的排放因子与计算方法,保证模型逻辑严谨、数据来源可靠,核算结果具备科学性与说服力;(3) 可操作性原则:充分考虑水利工程施工数据的可获取性,简化冗余计算步骤,设计清晰的数据收集与核算流程,便于工程技术人员实际应用,降低核算难度;(4) 动态性原则:契合水利工程施工周

期长、环境波动大的特点,预留动态修正接口,可根据施工进度、天气变化、工艺调整等变量实时更新核算参数,保证核算结果的时效性与准确性。

2.2 核算方法选择

(1) 基于生命周期评价(LCA)的“从摇篮到现场”方法:聚焦施工阶段核心环节,将核算边界延伸至材料生产、运输至施工现场的全流程,可精准追溯混凝土、钢材等关键材料的隐含碳排放,弥补传统核算仅关注现场排放的局限性。该方法通过拆解材料流转、设备运行等生命周期阶段,明确各环节碳排放贡献度,为针对性减排措施制定提供精准依据,尤其适用于材料消耗占比高的水利工程,如大坝、闸室等混凝土构筑物施工^[2]。(2) 输入输出法(IO)与过程分析法(PA)的混合模型:单一方法存在明显短板,输入输出法可快速核算宏观层面的间接碳排放,但精度较低;过程分析法则能精准核算具体施工环节的直接碳排放,却存在数据收集繁琐、覆盖范围有限的问题。混合模型整合两者优势,通过过程分析法精准核算施工机械运行、现场作业等直接排放源,借助输入输出法核算材料生产、电力供应等间接排放源,既保证了关键环节的核算精度,又提升了间接排放核算的效率,适配水利工程排放源复杂、核算范围广的需求。

2.3 模型框架设计

(1) 边界界定:明确核算的时空范围是保障核算准确性的前提。时间边界聚焦施工阶段,具体界定为从施工准备期(临时设施搭建)至主体工程完工验收的全周期,可根据工程需求进一步细化为基础开挖期、主体浇筑期、设备安装期等细分阶段;空间边界以施工现场为核心,涵盖施工区域、临时设施区、材料堆放与运输通道,同时明确材料运输的起始节点(如水泥厂、钢材厂至施工现场),避免边界模糊导致的重复核算或遗漏。例如,大坝工程核算边界可设定为坝体施工全周期,空间覆盖坝区作业面、混凝土搅拌站、施工道路及材料运输线路。(2) 数据清单:构建标准化数据收集体系,明确核心数据类型与来源。主要包括能源消耗数据(柴油、汽油、电力等消耗量,来源于施工台账、能源采购发票)、材料用量数据(水泥、钢材、砂石等材料消耗量,取自材料进场验收记录)、设备运行数据(各类施工机械的运行时间、功率,来源于设备台班记录)、运输数据(材料运输距离、运输车辆类型,取自运输合同与物流台账),同时收集施工进度计划、天气记录等动态数据,为后续修正模块提供支撑。(3) 计算公式:采用分类核算模式,分别计算直接与间接碳排放,核心公式如下:1) 直接排放: $E_{\text{direct}} = \sum_i A_i \times EF_i$,其中 A_i 为直接排放源的活动数据,如

施工机械燃油消耗量(单位:t)、爆破作业炸药用量(单位:kg); EF_i 为对应排放源的排放因子,如柴油燃烧 CO_2 排放因子(单位: $\text{tCO}_2/\text{t柴油}$)、炸药分解 N_2O 排放因子(单位: $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{kg炸药}$),通过汇总各直接排放源的碳排放得到总直接排放量。2) 间接排放: $E_{\text{indirect}} = \sum_j M_j \times CF_j$,其中 M_j 为间接排放相关的材料消耗或能源使用数据,如混凝土用量(单位: m^3)、施工用电总量(单位:kWh); CF_j 为对应材料或能源的碳足迹因子,如商品混凝土碳足迹因子(单位: $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$)、电网电力碳足迹因子(单位: $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{kWh}$),汇总得到总间接排放量。此外,隐蔽排放可通过补充对应活动数据与排放因子,纳入直接或间接排放核算体系^[3]。(4) 动态修正模块:引入变量修正系数,弥补静态核算的局限性。针对施工进度波动,根据实际施工强度与计划强度的比值修正活动数据;针对天气影响,如雨季施工导致设备效率下降、能耗增加,引入天气修正系数调整排放因子;同时考虑材料替代、工艺优化等技术变更,实时更新碳足迹因子与活动数据,确保核算结果与工程实际情况一致。

2.4 模型验证与敏感性分析

(1) 模型验证:采用案例数据验证法,选取已完工的同类水利工程(如小型水库、河道治理工程),收集其施工阶段的能源消耗、材料用量、碳排放监测等实测数据,将实测值与模型核算值进行对比。通过计算相对误差、均方根误差等指标,评估模型的准确性;若误差超出允许范围(一般控制在5%以内),则反向修正排放因子、边界界定标准等模型参数,直至模型核算精度满足工程需求。同时,邀请行业专家对模型的逻辑合理性、方法科学性进行评审,确保模型具备实际应用价值。(2) 敏感性分析:聚焦影响核算结果的关键参数,识别核心影响因素。选取混凝土强度等级(影响混凝土碳足迹因子)、施工机械效率(影响燃油消耗活动数据)、电网电力碳足迹因子、材料运输距离等关键参数,采用单因素变量法,在合理范围内调整各参数值(如 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$),观察模型核算结果的变化幅度。通过排序各参数的敏感性系数,明确对碳排放核算结果影响最大的因素,为后续优化模型参数、制定减排措施提供重点方向。例如,若混凝土强度等级的敏感性系数最高,则需重点精准核算混凝土用量与碳足迹因子,提升模型核算精度。

3 水利工程施工阶段减排策略优化研究

3.1 技术减排策略

(1) 清洁能源替代。在施工现场全面推广太阳能照明、光伏供电系统,满足临时设施及小型设备用电需求;逐步替换传统燃油施工设备,推广电动挖掘机、电动装载

机等新能源设备,减少燃油消耗带来的直接碳排放;针对偏远施工区域,可配套建设小型风电、储能装置,构建多元化清洁能源供应体系。(2)低碳材料应用。大力推广粉煤灰、矿渣等工业废渣替代水泥的低碳混凝土,降低建材生产环节隐含碳排放;积极采用建筑垃圾再生骨料制备混凝土,实现废弃物循环利用;对钢结构构件优先选用高强度钢材,减少材料用量,同步降低运输与安装阶段能耗。(3)工艺创新优化。通过数值模拟技术优化爆破参数,减少炸药使用量并降低爆破作业碳排放;推广预制装配式结构施工,将坝体构件、闸门等在工厂预制后运输至现场安装,缩短现场施工周期,减少现场浇筑带来的集中碳排放;优化混凝土浇筑工艺,采用免振捣混凝土、自密实混凝土技术,降低振捣能耗^[4]。

3.2 管理减排策略

(1)搭建智能调度系统。基于BIM技术构建施工全过程数字化平台,实时监控施工机械的能耗、运行状态,通过智能算法优化设备调度方案,减少设备空转与无效运输,降低能源浪费;对能源消耗、碳排放数据进行实时统计分析,为减排决策提供数据支撑。(2)引入碳交易机制。将碳排放权纳入工程招投标评价体系,优先选择碳排放水平低的施工企业;在工程合同中明确碳排放管控目标,建立碳排放奖惩机制,激励施工企业主动落实减排措施;积极参与区域碳交易市场,通过碳配额交易盘活减排效益。(3)强化人员培训。定期开展低碳施工技术与管理规范培训,提升施工人员的低碳环保意识;针对新能源设备操作、低碳工艺实施等关键环节,开展专项技能培训,确保减排技术能够规范落地;建立低碳施工考核机制,将减排成效与人员绩效挂钩。

3.3 政策与经济激励

(1)加大绿色信贷支持。鼓励金融机构推出专项绿色信贷产品,为水利工程低碳施工技术研发、新能源设备采购、低碳材料应用等提供低息贷款;对采用先进减排技术的项目给予信贷贴息优惠,降低项目减排改造的

资金压力。(2)落实碳税约束政策。建立差异化碳税征收机制,对高排放施工工艺、传统燃油设备使用等征收高额碳税,倒逼施工企业加快减排转型;对采用低碳技术实现减排目标的企业给予碳税减免优惠,形成“约束+激励”的双重调控机制。

3.4 减排策略效果评估

(1)建立多目标优化模型。以成本、碳排放、工期为核心目标,构建多目标优化模型,量化分析不同减排策略组合对各目标的影响;通过模型求解得到最优减排策略组合,在保障工程质量与工期的前提下,实现减排效益与经济效益的平衡。(2)采用层次分析法确定优先级。结合水利工程施工特性,构建包含技术可行性、减排效果、经济成本、政策适配性等维度的评价指标体系;运用层次分析法(AHP)量化各指标权重,对不同减排策略进行综合评分,确定策略实施的优先级,为减排资源的合理配置提供依据。

结束语

水利工程施工阶段的碳排放核算模型构建与减排策略研究,是推动行业绿色转型的重要实践。通过系统识别排放源、建立动态核算模型,可为精准量化碳排放提供科学依据;而清洁能源替代、低碳工艺优化及智能管理等策略的实施,则能有效降低施工能耗与排放强度。未来需进一步强化技术创新与政策协同,促进减排技术标准化应用,助力水利工程实现经济效益与生态效益的双赢。

参考文献

- [1]时曼,王磊.水利工程施工阶段碳排放核算方法研究[J].水利水电技术,2021,52(4):45-52.
- [2]刘洛生,伏建民,钱凯,等.水利工程施工阶段减碳措施与碳排放管理研究[J].水利经济,2024,42(4):47-50.
- [3]李奕,刘佳,张炯.水利工程领域在减碳方面的措施与进展[J].水资源开发与管理,2023,9(12):60-64.
- [4]申勇,宋致军.“双碳”背景下水利工程的发展趋势与研究进展[J].水利发展研究,2023,23(6):30-36.