

DOI:10.13205/j.hjgc.202603017

吴达,邵光成,章凯,等. 基于LCA碳排放核算与多情景分析的河道整治工程绿色低碳建设策略研究:以南京句容河为例[J]. 环境工程,2026,44(3):189-196.

WU D, SHAO G C, ZHANG K, et al. Green and low-carbon construction strategies for river regulation projects based on LCA carbon emission accounting and multi-scenario analysis: a case study of Jurong River in Nanjing[J]. Environmental Engineering, 2026, 44(3): 189-196.

基于LCA碳排放核算与多情景分析的河道整治工程绿色低碳建设策略研究:以南京句容河为例

吴 达¹ 邵光成¹ 章 凯² 章二子² 冯 骞^{3,4*} 罗景阳^{3,4*}

(1. 河海大学 农业工程学院, 南京 210098; 2. 南京市江宁区水务局, 南京 211112; 3. 河海大学 环境学院, 南京 210098; 4. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘 要:河道整治工程的绿色低碳建设是“双碳”目标下水利工程绿色转型的重要内容。针对传统河道整治工程绿色低碳建设策略定性描述多、生命周期评价(life cycle assessment, LCA)少、过程解析多、多场景指导少的共性问题,以南京市句容河整治工程示范段为例,在LCA评价识别河道整治工程碳排放特征的基础上,利用环境/经济二元模型对绿色低碳建设技术的选择进行了不同目标下的情景分析,形成了相应的绿色低碳建设技术措施的组合策略。结果表明:句容河示范段(长度8.46 km)建设期碳排放强度为2705 t CO₂eq/km,其中,原材料生产阶段占比最高达92.49%,其次依次为工程建设阶段5.75%>工程运输1.06%>工程准备0.70%。多情景分析显示:采用低碳新能源运输、粉煤灰及再生混凝土等措施,可实现减碳4486 t CO₂eq,产生108.14万元的最优经济价值;采用粉煤灰、再生骨料混凝土及碳捕捉水泥(替代率达90.32%)等组合,可减碳7551 t CO₂eq,实现经济与环境绩效均衡;实施全部降碳措施可减碳9596 t CO₂eq,但需投入113.37万元。经济效益最大化情景与经济生态平衡情景更具工程适用性,可为河道整治工程的绿色低碳建设提供决策依据。

关键词:河道整治工程;生命周期评价;碳排放;低碳建设

Green and low-carbon construction strategies for river regulation projects based on LCA carbon emission accounting and multi-scenario analysis: a case study of Jurong River in Nanjing

WU Da¹, SHAO Guangcheng¹, ZHANG Kai², ZHANG Erzi², FENG Qian^{3,4*}, LUO Jingyang^{3,4*}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Jiangning District Water Authority, Nanjing 211112, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The green and low-carbon construction of river regulation projects is an important part of the green transformation of water conservancy projects under the goals of "carbon peaking and carbon neutrality". Aiming at the common problems

收稿日期:2026-02-05; 修改日期:2026-02-16; 接收日期:2026-02-25

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20231465);江宁区句容河综合整治工程科学研究试验项目(JNZC-2023GK0045);苏北灌溉总渠堤防加固工程(淮安市淮安区境内工程)科学研究试验项目

第一作者:吴达(1999—),男,研究生,主要研究方向为碳排放核算。240310040001@hhu.edu.cn

*通信作者:冯骞(1977—),男,博士,教授,主要研究方向为绿色低碳水系统。xiaofq@hhu.edu.cn

罗景阳(1989—),男,博士,教授,主要研究方向为污水及废弃物资源化。luojy2016@hhu.edu.cn

existing in the green and low-carbon construction of traditional river regulation projects, such as excessive qualitative descriptions of strategies, insufficient life cycle assessment (LCA), excessive process analysis, and inadequate multi-scenario guidance, this paper took the demonstration section of the Jurong River Regulation Project in Nanjing as a case study. Based on identifying the carbon emission characteristics of river regulation projects via LCA, an environment-economic dual-objective model was adopted to conduct scenario analysis for the selection of green and low-carbon construction technologies under different objectives, and corresponding combined strategies of green and low-carbon technical measures were proposed. The results showed that the carbon emission intensity during the construction period of the Jurong River demonstration section (length 8.46 km) was 2705 t CO₂eq/km, among which the raw material production stage accounted for 92.49%, followed by the engineering construction stage (5.75%), engineering transportation (1.06%), and engineering preparation (0.70%). Multi-scenario analysis indicated that the application of measures including low-carbon new energy transportation, fly ash, and recycled concrete could reduce carbon emissions by 4486 t CO₂eq and achieve an optimal economic benefit of RMB 1.0814 million. The combination of fly ash, recycled aggregate concrete, and carbon capture and reduction cement (with a replacement rate of 90.32%) could reduce emissions by 7551 t CO₂eq, realizing a balance between economic and environmental performance. Implementing all carbon reduction measures could achieve a carbon reduction of 9596 t CO₂eq but would require an investment of RMB 1.1337 million. The scenarios of maximum economic benefit and economic-ecological balance present better engineering applicability and can provide a decision-making basis for the green and low-carbon construction of river regulation projects.

Keywords: river regulation project; life cycle assessment; carbon emissions; low-carbon construction

0 引言

河道整治工程是水利工程中最常见且重要类型之一^[1],是为保障河道行洪排涝安全、改善水生态环境、提升滨水空间品质、恢复河道自然功能而在河道及滨水区域开展的系统性治理、修复、改造与管护工程。河道整治工程因建设规模大、能源/材料消耗多,碳排放十分可观。研究数据显示^[2-4],建设1 km 钢筋混凝土桩板护岸工程即可产生碳排放447.2 t CO₂eq,大约相当于生产44.85万kW·h电消耗的碳排放。因此,在“双碳目标”国家战略的驱动下,推动河道整治工程向绿色、低碳模式转型,已成为水利行业落实“双碳”目标,实现水利高质量发展的关键路径之一。

近年来,围绕河道整治工程的绿色低碳转型,国内多个地区在碳排放环节分析的基础上^[5-7],逐步认识到建设期是河道整治工程碳排放的主要时期^[8-10],形成了以低碳材料替代^[11]、新型生态护坡开发^[12]、清洁能源使用^[13]等为代表的环境友好型技术与可持续管理策略,也取得了一定成效^[14]。但综观河道整治工程的绿色低碳建设研究,仍呈现出“定性描述多、LCA评价少、过程解析多、多场景指导少”的鲜明特征,具体表现为:碳排放核算和分析已被普遍关注^[15],但基于LCA分析的碳排放特征研究仍然十分有限^[16];生态护坡、节能机械等低碳理念已被广泛接纳,但对其环境效益的评估多以定性描述和宏观策略为主;大量研究

集中于对施工工艺、技术流程的详细解析^[17],而对不同技术组合在全生命周期内的综合减碳潜力与成本效益缺乏多情景、多目标的对比分析与优化研究,导致从量化评估到优选决策的链条断裂,难以支撑工程层面精准、经济的低碳建设决策。

鉴于此,本文围绕河道治理工程绿色低碳建设的共性需求,以南京市江宁区句容河整治工程为例,采用LCA评价法,从工程建设阶段材料生产、运输和施工建造的全过程出发,识别河道整治工程碳排放特征,在此基础上根据低碳建设技术降碳绩效、经济成本,结合碳市场价格,建立环境/经济二元模型,获得经济效益、经济-环境平衡、生态效益最大化等不同目标下的绿色低碳建设技术组合模式,形成多场景下河道整治工程绿色低碳建设策略,为河道整治工程的绿色低碳建设提供决策参考。

1 工程项目概况

南京市江宁区句容河综合整治工程是近年来南京市的重点水务项目。主要采用“生态修复+工程治理”模式,通过堤坝断面加固、堤防防渗、生态护坡、景观绿化、涵闸等工程建设,对句容河下游汤水河口至西北村段约20.5 km的河道进行综合治理。

考虑到湖熟镇地处经济最发达的长三角地区,句容河湖熟镇区段河道整治工程在我国广大城镇化地区河流综合治理中具有高度代表性。因此,本研

究选择了湖熟镇区246省道桥到西北村8.46 km的工程段,开展碳排放核算和低碳建设策略研究,以期为全国城镇化区域河道综合整治工程的绿色低碳建设提供参考样本。

2 研究过程与方法

2.1 研究过程

本研究通过明确句容河示范段的时间和空间边界,采用LCA评价方法分析河道整治工程的碳排放环节与排放清单,进而利用IPCC排放系数法核算各个阶段产生的碳排放量,识别河道整治项目建设阶段碳排放特征。生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是一种用于定量评估产品、过程或活动等研究对象从原材料获取、生产、使用到最终处置整个生命周期对环境影响的方法^[18]。本研究根据国际标准化组织提供的技术框架(ISO14040)^[19],将河道整治工程建设的生命周期分为工程准备、原材料生产、运输和施工建设4个阶段^[20],并结合河道整治工程中工程永久占地及施工期临时占地,以及河道疏浚、护岸结构、生态护坡、道路及配套设施等全部工程建设内容要求,以工程用地红线范围为参考,明确核算的时空边界(图1)。在此基础上,充分考虑各类低碳建设技术的降碳绩效和经济成本,建立环境/经济二元模型,结合碳市场机制和价格,分别在经济效益最大化、降碳效益最大化、经济降碳平衡等三种情景下对模型求解,获得河道整治工程绿色低碳建设技术组合方式,形成多情景下的绿色低碳建设策略。

2.2 基于LCA的碳排放核算方法

在确定核算边界的基础上,采用IPCC排放因子

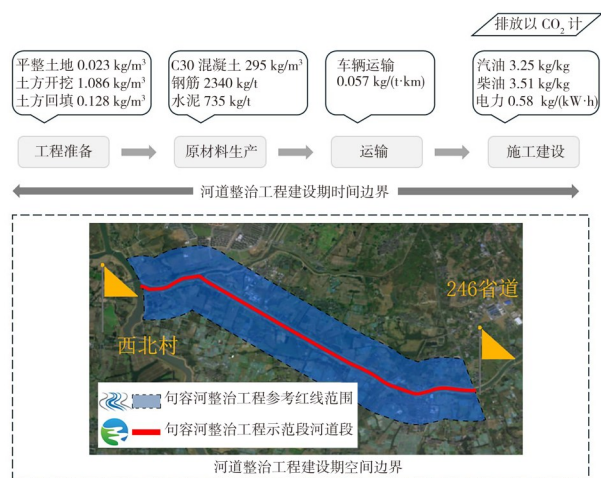


图1 河道整治工程建设生命周期阶段与时空边界

Figure 1 Life cycle stages and spatiotemporal boundaries of the river regulation project during construction

法对各个阶段产生的碳排放进行测算、汇总和特征分析,测算中使用的排放因子如表1所示。其中,核算中涉及的基础数据一方面通过研究团队走访设计院、施工单位,实地勘察、调研施工工地情况,记录河道整治工程建设阶段各工序的施工建造、材料生产和材料运输过程的数据获得;另一方面,利用设计院给出的施工图纸数据进行统计获得。两种方法综合对比后最终确定,以保证数据完整、真实、可靠^[21]。

表1 河道整治项目涉及工程、能源及材料的碳排放因子

Table 1 Carbon emission factors for engineering, energy, and materials involved in the river regulation projects

排放阶段来源	碳排放因子名称	因子数值/(kg CO ₂ eq)	说明	文献
工程准备	平整土地	0.023 kg/m ³		[22]
	土方开挖	1.086 kg/m ³		
	土方回填	0.128 kg/m ³		
	人工	6.61 kg/工日		
原材料生产	混凝土	250~505.67 kg/m ³	依照混凝土标号与是否为预制件选择	[23]
	水泥	735 kg/t		
	钢筋	2340 kg/t		
	生石灰	1190 kg/t		
	土工网	7.3 kg/kg		
	沥青	277 kg/m ³		
	木材	300 kg/t		
	砂石垫层	8.76 kg/m ³		
	碎石	3.1 kg/t		
	块石	6.49 kg/t		
工程运输	土方运输	0.057 kg/(t·km)		[24]
	原材料运输	0.057 kg/(t·km)		
工程建设	人工	6.61 kg/工日		[25]
	燃料	3.25~3.51 kg/kg	依照燃料类型选择	
	电力	0.58 kg/(kW·h)		
	人工	6.61 kg/工日		

2.3 基于环境/经济二元模型的低碳建设技术多情景优化方法

围绕河道整治工程中低碳建设技术的应用场景,本文在调查分析工程中不同低碳建设技术的额外投资成本与减碳量关系的基础上,将低碳建设技术的单位减碳成本(UEC)按从小到大排序(即 $UEC_1 < UEC_2 < \dots < UEC_n$),并建立绿色低碳建设技术的环境经济二元模型,见式(1)。

$$C_i = C_0 + \sum_{j=1}^i UEC_j \cdot (E_{j-1} - E_j) \quad (1)$$

式中: C_0 为无减碳技术下的总成本,万元; E_0 为无减碳

技术下的碳排放量, $t \text{ CO}_2\text{eq}$; C_i 为采用前 i 项减碳技术后的总成本, 万元; E_i 为采用前 i 项减碳技术后的碳排放量, $t \text{ CO}_2\text{eq}$; UEC_j 为第 j 项减碳技术的单位减碳成本, 万元/ $t \text{ CO}_2\text{eq}$ 。

基于该模型, 进一步定义额外投资成本、减碳量和碳市场价格3项核心评价指标, 根据工程条件与低碳建设目标, 结合河道整治工程绿色低碳建设的实际需求、技术可行性及“双碳”目标下的多元价值诉求, 兼顾研究的科学性与工程适用性, 设定3种差异化建设情景对技术组合方案进行优化求解: 经济效益最大化情景、经济与环境价值平衡情景、减碳最大化情景。经济效益最大化情景依据工程财政资金预算约束及低成本低碳技术可行性设置, 为经济效益基准情景提供决策参考; 经济与环境价值平衡情景基于“双碳”目标与工程效益协同要求, 实现减碳与成本双向均衡; 减碳最大化情景结合“双碳”战略刚性约束, 实现减碳最大化; 同时, 将工程实际建设碳排放与成本作为基准情景, 完善情景体系构建, 并为不同需求的工程决策提供支撑。

额外投资成本计算见式(2)。

$$\Delta C_i = C_i - C_0 \quad (2)$$

减碳量计算见式(3)。

$$\Delta E_i = E_0 - E_i \quad (3)$$

碳市场价格计算见式(4)。

$$EB_i = k \cdot \Delta E_i \quad (4)$$

式中: EB_i 为减碳量换算的碳市场的价值, k 为碳价, 本研究取值为 0.0104 万元/ $t \text{ CO}_2\text{eq}$, 数据来源于工程项目建设周期内(2024年)全国碳排放配额(CEA)碳排放权交易价格^[26]。

3种差异化情景分别为:

1) 经济效益最大化情景: 以额外投资成本最低为目标, 实现“无成本减碳”的经济效益最大化情景, 即选择所有满足 $\Delta C_i \leq 0$ 的技术组合。

2) 经济与环境价值平衡情景: 以额外投资成本等于减碳获得碳市场收益为目标, 实现成本投入与降碳价值相符的平衡情景, 即选择 $EB_i = \Delta C_i$ 的技术组合。

3) 减碳最大化情景: 以碳排放最小化为目标, 实现极限减碳效果的减碳最大化情景, 即选择可实现最大 ΔE_i 的技术组合。

3 基于LCA的句容河整治工程示范段建设期碳排放特征

句容河整治工程示范段建设期的碳排放总量和

排放特征如图2所示。由图2a可知: 句容河整治工程示范段碳排放总量为 22888 $t \text{ CO}_2\text{eq}$, 其单位长度碳排放量为 2705 $t \text{ CO}_2\text{eq}/\text{km}$ 。其中, 原材料生产阶段碳排放量最大, 单位长度碳排放量达到 2502 $t \text{ CO}_2\text{eq}/\text{km}$, 占建设期排放总量的 92.49%, 其次为工程建设阶段, 单位长度碳排放量为 155 $t \text{ CO}_2\text{eq}/\text{km}$, 碳排放占比为 5.75%。工程运输阶段和工程准备阶段碳排放量占比较小, 单位长度碳排放量分别为 28.81, 18.86 $t \text{ CO}_2\text{eq}/\text{km}$, 占比仅为 1.06% 与 0.70%。原材料生产是工程建设中碳排放量最大、占比最高的阶段, 这与杨子杰等^[27]、潘美萍^[28]、Zhang等^[29]的研究结果吻合。但与杨子杰等^[27]的研究相比, 本研究中河道整治工程建设期单位长度排放量整体更大, 这是由于句容河整治工程不仅包括了河道护坡, 还囊括了堤坝断面加固、堤防防渗、道路、涵闸等其他内容, 消耗了更多混凝土等高碳排放材料。

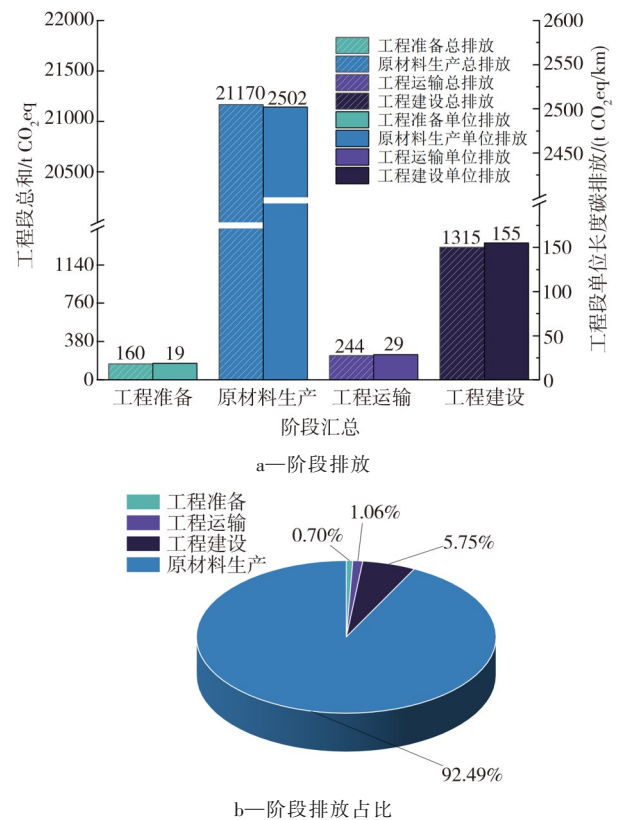
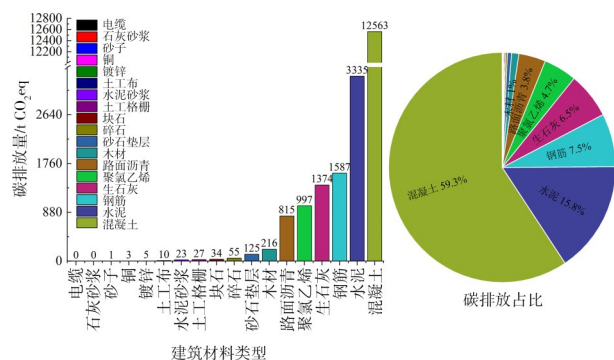


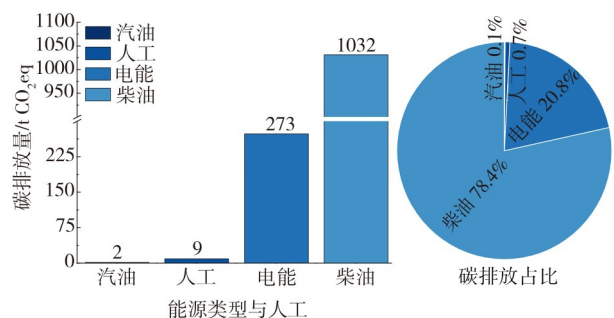
图2 河道整治工程建设期碳排放特征
Figure 2 Carbon emission characteristics during the construction period of the river regulation project

进一步分析句容河整治工程建设中使用的主要建筑材料(20种)的碳排放, 结果如图3所示。可知: 生石灰、钢筋、水泥、混凝土等高碳排放材料的生产, 贡

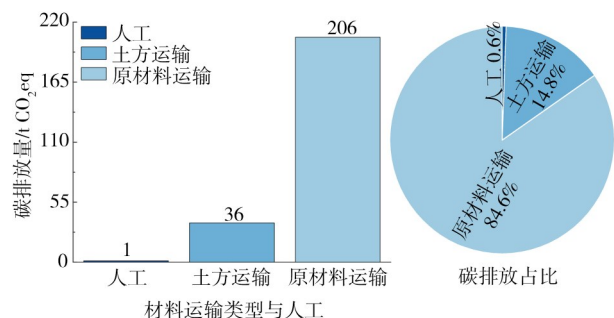
献了原材料生产阶段90%的碳排放。其中,仅混凝土材料生产,就贡献了原材料生产阶段59.34%的碳排放量。其余材料尽管使用量约占建材总量的60%,但碳排放在工程原材料生产中的贡献仅为6.19%。



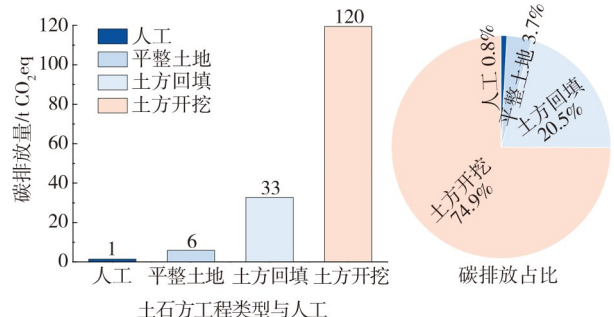
a—原材料生产阶段



b—施工建设阶段



c—运输阶段



d—准备阶段

图3 河道整治工程建设期各阶段碳排放特征

Figure 3 Carbon emissions characteristics of each stage in the construction period of the river regulation project

工程施工建设阶段消耗的燃油、电力和人工贡献了建设期5.75%的碳排放,这也进一步证明优化施工作业方案、减少机械台班、提高施工机械的效率、使用清洁能源对建设期减碳的重要作用。

4 基于多情景分析的河道整治工程绿色低碳建设策略

4.1 河道整治工程绿色低碳建设措施技术经济分析

目前,在河道整治工程中常用的绿色低碳建设措施主要包括原材料生产减碳、再生材料应用减碳、新能源使用减碳等。对上述措施的成效研究与市场价格调查,对各项措施的降碳效率与技术成本参数进行设置。现场布置的光伏设施发电减碳量计算采用美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)开发的PVWatts® Calculator软件模拟估算。各项措施的减碳绩效及投资成本如表2所示。

4.2 多情景下河道整治工程绿色低碳建设策略

基于本文构建的环境经济二元模型与多情景优化方法,对经济效益最大化、经济与价值平衡、减碳最大化3种情景进行定量评估与比较,获得相应情景下的绿色低碳建设策略(图4a),详述如下。

1) 经济效益最大化情景。

在此情景下,优先采用单位减碳成本低、甚至具有负成本的技术措施。使用新能源运输、粉煤灰和再生混凝土等措施,不仅实现减碳4486 t CO₂eq,同时降低材料成本61.49万元,并创造46.65万元的碳市场价值。该情景表明,部分低碳技术在当前碳价条件下已具备经济竞争力,可在不增加额外投资的前提下实现减碳。

2) 经济与价值平衡情景。

该情景追求减碳投入与碳市场收益动态平衡,即额外投资成本等于碳市场价值。通过模型求解,平衡点对应的技术组合包括:全面采用电动运输车辆、粉煤灰替代石灰石、再生骨料混凝土、捕碳水泥、光伏发电系统及碳捕捉工艺钢材。该方案可实现减碳7551 t CO₂eq,需额外投入78.53万元,同时产生78.53万元的碳市场价值。该情景兼顾了减碳效果与项目经济性,适用于对成本控制与低碳绩效均有要求的项目。

3) 减碳最大化情景。

此情景以减碳量最大化为目标,采用全部可行

表 2 河道整治工程绿色低碳建设措施技术经济分析

Table 2 Technical and economic analysis of green and low-carbon construction measures for the river regulation project

降碳措施	降碳产品	降碳技术方法	降碳效率	技术成本
原材料生产	碳捕捉工艺水泥	通过化学吸收法、冷氨工艺、膜分离法和固体吸收法等,在水泥生产加工制造过程中将生产过程燃烧烟气中的CO ₂ 捕获并储存、利用 ^[30]	CO ₂ 平均捕捉率85%~90%,水泥生产碳排放平均降低85%~90%,本研究中设置为90%	平均减碳成本高达455元/t CO ₂ eq
	碳捕捉工艺钢筋	通过高炉回收、氧燃烧法、MEA吸收法和膜分离法等,在钢材生产工艺中实现捕碳 ^[30]	CO ₂ 平均捕捉率40%~90%,钢筋生产碳排放平均降低40%~90%,本研究中设置为90%	平均减碳成本高达588.5元/t CO ₂ eq
	塑料材料	采用聚乙烯替代聚氯乙烯 ^[30]	碳排放因子由7300 kg CO ₂ eq/t下降至2620 kg CO ₂ eq/t	材料采购成本由7200元/t上升至11000元/t
再生材料应用	混凝土	采用再生骨料混凝土替代普通混凝土 ^[31]	碳排放降低35%~40%。以C30混凝土为例,由295 kg CO ₂ eq/m ³ 下降至189 kg CO ₂ eq/m ³	再生骨料混凝土与普通混凝土价格类似
	粉煤灰	将使用的生石灰等额替换为粉煤灰 ^[30]	碳排放因子由1190 kg CO ₂ eq/t下降至8 kg CO ₂ eq/t	材料采购成本由550元/t下降至120元/t
新能源应用	新能源运输车	采用新能源车替代传统燃油汽车 ^[30]	由0.057 kg CO ₂ eq/(t·km)下降至0.031 kg CO ₂ eq/(t·km)	运输成本由2.456元/km下降至0.9569元/km
	光伏设施	施工现场布设光伏设施 ^[32]	依照光伏发电设备装机容量、铺设面积、组件效率等确定,本研究中降碳为124.7 kg CO ₂ eq/(m ² ·a)	光伏发电系统的购买安装成本市场价格为700元/m ²

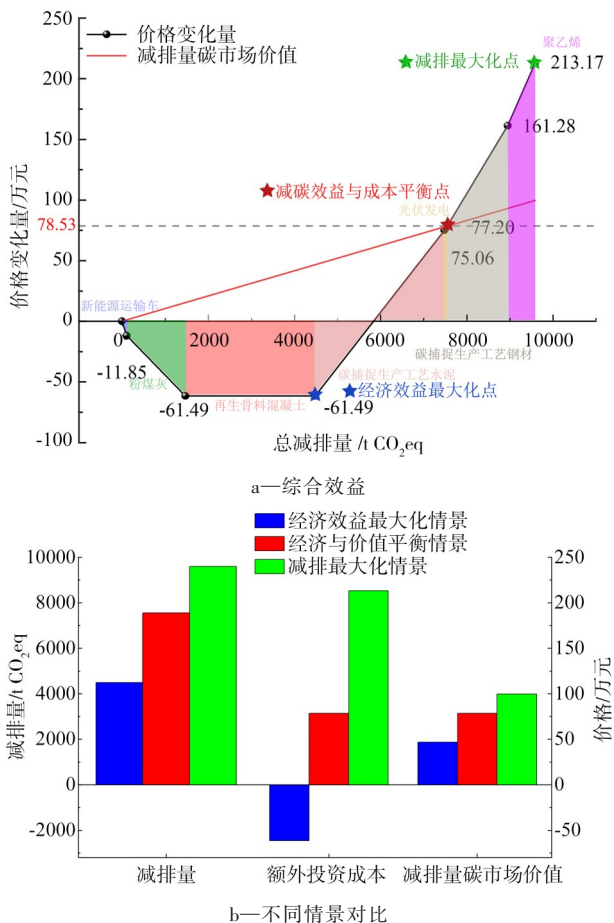


图 4 多情景下河道整治工程绿色低碳建设措施优化组合及降碳成本绩效

Figure 4 Optimized combination of green and low-carbon construction technical measures and their carbon reduction cost performance for the river regulation project under multiple scenarios

低碳技术。与传统建设模式(碳排放22888 t CO₂eq,单位长度排放强度2705 t CO₂eq/km)相比,该情景下总排放量降至13292 t CO₂eq,单位长度排放强度为1571 t CO₂eq/km,累计实现减碳9596 t CO₂eq。从减碳贡献来看,原材料生产阶段减碳效果最为显著,占总减碳量的绝大部分;运输与施工阶段也具有一定贡献。然而,该情景需额外投入213.17万元,产生碳市场价值仅为99.80万元。与平衡情景相比,需多投入134.64万元(增加171.45%),而减碳量仅增加2045 t CO₂eq(增长27.08%)。结果表明:在追求极限减碳的情景下,投资的边际减碳成本急剧上升,经济性显著降低。

综合对比3种情景(图4b),经济效益最大化情景与经济与价值平衡情景具有较好的技术经济可行性,适用于多数河道整治工程;而减碳最大化情景因边际成本过高,仅推荐用于碳排放约束极严格或具有专项低碳资金支持的项目。

5 结 论

融合生命周期评价(LCA)与环境经济分析方法,构建了适用于河道整治工程的绿色低碳建设决策模型,从不同情景需求出发,形成了河道整治工程绿色低碳建设策略。

1)基于LCA评价,将河道整治工程建设期划分为工程准备、原材料生产、运输、施工建设阶段4个阶段进行碳排放特征分析。结果表明:原材料生产阶

段是建设期碳排放最多的环节,占比高达92.49%。在该阶段,混凝土生产贡献了59.34%的碳排放,是首要的控制环节;水泥、钢筋与生石灰等关键材料的排放也十分显著。减碳策略应重点关注建材生产环节的绿色化转型。

2)通过构建环境/经济二元模型,提出了以成本-效益为核心的多情景决策方法,并得出以下优化路径:

a. 优先推广“负成本”减碳技术组合。采用再生骨料混凝土、粉煤灰掺合料及新能源运输等措施不仅可实现减碳(如案例中减碳4486 t CO₂eq),还能降低材料成本(节省61.49万元),具备“减碳即盈利”的特点。

b. 合理选择经济与生态平衡点技术包。通过模型可获得使碳市场价值覆盖额外投资的技术组合(如新能源运输、再生骨料混凝土、捕碳水泥等),实现减碳7551 t CO₂eq,实现了环境效益与经济性的均衡。

c. 审慎评估高强度减碳措施的适用性。对于碳捕捉水泥、光伏系统等高成本技术,需结合项目预算、碳约束强度进行专项评估,避免因追求极致减碳而显著牺牲经济合理性。

3)建议在河道整治工程项目中建立基于情景的定量决策流程,依据具体减碳目标与成本约束,进行技术比选与动态优化。综合而言,大多数河道整治工程宜优先采用经济效益最大化情景或经济与价值平衡情景,以实现成本可控下的有效减碳;而减碳最大化情景仅适用于碳约束极端严格且有专项资金支持的特定项目。未来可进一步纳入动态碳价机制、技术进步参数及政策激励等因素,增强模型的前瞻性与适应性,推动绿色低碳建设从理论评价向标准化、精细化决策实践发展。

参考文献

- [1] 李强. 关于生态水利在河道治理中的应用探讨[J]. 水土保持应用技术, 2014(6):30-31.
LI Q. Discussion on the application of ecological water conservancy in river regulation[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2014(6):30-31.
- [2] 庄贵阳. 我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J]. 人民论坛, 2021(18):50-53.
ZHUANG G Y. The practical challenges and countermeasure suggestions faced by China in achieving its "dual carbon" goals [J]. People's Tribune, 2021(18):50-53.
- [3] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1):1-15.
LIU F, GUO L F, ZHAO L Z. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [4] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3):1-15.
HU A G. China's achievement of carbon peaking target before 2030 and its main approaches [J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [5] 张伟, 朱启贵, 高辉. 产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J]. 经济研究, 2016, 51(12):62-75.
ZHANG W, ZHU Q G, GAO H. Industrial structure upgrading, energy structure optimization and low-carbon development of industrial system[J]. Economic Research Journal, 2016, 51(12): 62-75.
- [6] 付允, 马永欢, 刘怡君, 等. 低碳经济的发展模式研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008(3):14-19.
FU Y, MA Y H, LIU Y J, et al. Research on the development mode of low-carbon economy [J]. China Population, Resources and Environment, 2008(3): 14-19.
- [7] 徐佳, 崔静波. 低碳城市和企业绿色技术创新[J]. 中国工业经济, 2020(12):178-196.
XU J, CUI J B. Low-carbon cities and corporate green technology innovation[J]. China Industrial Economics, 2020(12): 178-196.
- [8] 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):47-52.
LIU L S, FU J M, QIAN K, et al. Discussion on carbon reduction methods and carbon emission management in the construction stage of water conservancy projects[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4):47-52.
- [9] 黄跃群, 刘耀儒, 许文彬, 等. 水利水电工程全生命周期碳排放研究:以犬木塘工程为例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8):1366-1373.
HUANG Y Q, LIU Y R, XU W B, et al. Life cycle carbon emissions of water reservoir and hydroelectric projects: A case study of the Quanmutang project[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(8): 1366-1373.
- [10] HELLWEG S, CANALS L M I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment[J]. Science, 2014, 344(6188):1109-1113.
- [11] KHASREEN M M, BANFILL P F G, MENZIES G F. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review[J]. Sustainability, 2009, 1(3): 534-544.
- [12] FINKBEINER M, INABA A, TAN R B H, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2):80-85.
- [13] ZHAO W, VOET E V D, ZHANG Y, et al. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(5):1517-1526.
- [14] 尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算[J]. 工程管理学报, 2010, 24(1):7-12.
SHANG C J, ZHANG Z H. Assessment of life-cycle carbon

- emission for buildings [J]. *Journal of Engineering Management*, 2010, 24(1):7-12.
- [15] 宋志茜. 建筑物化阶段碳排放特征及减碳策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- SONG Z Q. Research on carbon emission characteristics and carbon reduction strategies in the materialization stage of architecture [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [16] 李佳慧, 刘辉, 张素菊, 等. 市政工程碳排放计算方法研究[J]. *江西建材*, 2023(3):444-445.
- LI J H, LIU H, ZHANG S J, et al. Research on carbon emission calculation method of municipal engineering [J]. *Jiangxi Building Materials*, 2023(3):444-445.
- [17] 孙雪兵. 基于减碳技术敏感性分析的碳减排和成本研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- SUN X B. Research on building carbon emission and cost based on sensitivity analysis of carbon reduction technologies [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [18] 申娟娟. 基于LCA的建筑碳足迹测算及减碳对策研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- SHEN J J. Research on carbon footprint calculation and emission reduction measures of buildings based on life-cycle assessment [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [19] ASLAAM M A G N M, EGILMEZ G, KUCUKVAR M, et al. From green buildings to green supply chains: an integrated input output life cycle assessment and optimization framework for carbon footprint reduction policy making [J]. *Management of Environmental Quality An International Journal*, 2017, 28(4): MEQ-12-2015-0211.
- [20] 罗智星, 曹雨, 田瀚元, 等. 建筑景观园林工程生命周期碳排放计算方法研究: 以西安市住宅小区为例[J]. *建筑科学*, 2023, 39(4): 9-18.
- LUO Z X, CAO Y, TIAN H Y, et al. Study on calculation method of architectural landscape engineering life cycle carbon emission: case of a residential community in Xi'an [J]. *Building Science*, 2023, 39(4):9-18.
- [21] 黎维林, 李建华, 孙即梁. 河道护岸工程生命周期碳排放评价探讨[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(2):200-205.
- LI W L, LI J H, SUN J L. Life cycle assessment of carbon emission in river revetment engineering [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(2):200-205.
- [22] 王鹏, 张高旗, 陈丽刚. 再生节能型护坡在城市生态河道治理中的应用[J]. *山西建筑*, 2018, 44(1):179-181.
- WANG P, ZHANG G Q, CHEN L G. Application of recycled energy-saving slope protection in urban ecological river regulation [J]. *Shanxi Architecture*, 2018, 44(1):179-181.
- [23] 马莹. 建筑工程施工阶段碳排放研究进展[J]. *山西建筑*, 2023, 49(23):23-28.
- MA Y. Progress on carbon emission in construction stage of building engineering [J]. *Shanxi Architecture*, 2023, 49(23): 23-28.
- [24] 张潇, 刘立忠, 张倩, 等. 基于LCA的城市道路建设阶段碳排放核算及减碳策略研究[J]. *交通节能与环保*, 2025, 21(1):63-69.
- ZHANG X, LIU L Z, ZHANG Q, et al. Research on carbon emission accounting and carbon reduction strategies for urban road construction phase based on LCA [J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2025, 21(1):63-69.
- [25] 肖金存, 谢婉丽, 王二云, 等. 黄土边坡防护工程碳排放评价体系与模型构建[J]. *地球环境学报*, 2023, 14(6):786-795.
- XIAO J C, XIE W L, WANG E Y, et al. Carbon emission assessment system and model construction of loess slope protection project [J]. *Journal of Earth Environment*, 2023, 14(6):786-795.
- [26] 蒋健美. 全国碳排放权期货的产品设计[D]. 广州: 广东外语外贸大学, 2024.
- JIANG J M. Product design of national carbon emission futures [D]. Guangzhou: Guangdong University of Foreign Studies, 2024.
- [27] 杨子杰, 周滨荣, 魏军, 等. 平原水网地区生态河道碳足迹量化与评价[J]. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(3):216-225.
- YANG Z J, ZHOU B R, WEI J, et al. Quantitative study and evaluation on carbon footprint of ecological watercourse in plain water network area [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2023, 21(3):216-225.
- [28] 潘美萍. 基于LCA的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- PAN M P. The methodology research and application on energy consumption and carbon emissions of highway based on the life cycle assessment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [29] ZHANG Y, YAN D, HU S, et al. Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach [J]. *Energy Policy*, 2019, 134: 110949.
- [30] 张守超. 基于BIM的建筑碳排放计量方法与减碳策略分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- ZHANG S C. Building carbon emission measurement methods and emission reduction strategy analysis based on BIM [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [31] 黄凯. 生命周期内混凝土结构碳排放分析及碳减排研究[J]. *绿色建筑*, 2024(6):144-147.
- HUANG K. Carbon emission analysis and carbon emission reduction research during the life cycle of concrete structures [J]. *Green Building*, 2024(6):144-147.
- [32] 安麒, 王剑晓, 武昭原, 等. 高比例可再生能源渗透下的电力市场价值分配机制设计[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(7):13-22.
- AN Q, WANG J X, WU Z Y, et al. Benefit allocation mechanism design of electricity markets with penetration of high proportion of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(7):13-22.