

基于生命周期评价的八字嘴航电枢纽工程节能减碳效益评估

谢玉堂¹, 周娟², 董焕焕², 赵红^{2*}, 黄全胜³, 骆祖林⁴, 叶巍⁴, 罗超⁵

¹江西省港航建设投资集团新干航电枢纽分公司, 江西 南昌

²江西省交通科学研究院有限公司, 江西 南昌

³交通运输部规划研究院, 北京

⁴江西省港航建设投资集团有限公司, 江西 南昌

⁵南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2022年11月23日; 录用日期: 2022年12月20日; 发布日期: 2022年12月27日

摘要

航电枢纽在促进区域经济发展的同时, 在应对气候变化方面亦发挥了重要作用。以江西省八字嘴航电枢纽工程为例, 基于生命周期评价法(LCA)对航电枢纽碳足迹进行调查评估, 并构建了节能减碳效益评价模型, 结果发现: 1) 八字嘴航电枢纽工程生命周期碳足迹为 2.3×10^6 t CO₂eq, 其建设阶段和运行阶段的碳足迹分别为 0.49×10^6 t CO₂eq和 1.79×10^6 t CO₂eq, 分别占总碳足迹的18%和82%; 2) 八字嘴航电枢纽工程运营期内向外输送的电量达 128.40×10^8 kWh, 总减碳量达 4.66×10^6 t CO₂eq。该研究表明以该航电枢纽工程为代表的江西航电工程开发价值大、节能减碳效果显著, 可为准确核算航电枢纽项目的碳排放及其环境效益提供精细指导, 同时对于探索双碳目标的实现路径具有一定的支撑作用。

关键词

生命周期评价法, 航电枢纽工程, 碳足迹, 节能减碳效益

Energy Saving and Carbon Reduction Benefits of Bazizui Navigation Power Junction Project Based on Life Cycle Assessment

Yutang Xie¹, Juan Zhou², Huanhuan Dong², Hong Zhao^{2*}, Quansheng Huang³, Zulin Luo⁴, Wei Ye⁴, Chao Luo⁵

*通讯作者。

文章引用: 谢玉堂, 周娟, 董焕焕, 赵红, 黄全胜, 骆祖林, 叶巍, 罗超. 基于生命周期评价的八字嘴航电枢纽工程节能减碳效益评估[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(6): 1283-1291. DOI: 10.12677/aep.2022.126159

¹Jiangxi Provincial Port & Waterway Construction Investment Group, Xingan Hydraulic Project Branches, Nanchang Jiangxi

²Jiangxi Transportation Institute, Environmental Monitoring and Assessment Centre, Jiangxi Nanchang

³Transport Planning and Research Institute Ministry of Transport, Beijing

⁴Jiangxi Provincial Port & Waterway Construction Investment Group Co., Ltd, Jiangxi Nanchang

⁵School of Hydraulic & Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Jiangxi Nanchang

Received: Nov. 23rd, 2022; accepted: Dec. 20th, 2022; published: Dec. 27th, 2022

Abstract

Navigation-power junction project not only promotes regional economic development, but also plays an effective role to cope with climate change. This study takes the Bazizui navigation-power junction project in Jiangxi province as an example, the carbon footprint of navigation and power hub is investigated and evaluated based on life cycle assessment, and builds an evaluation model of energy saving and carbon reduction benefits based on this. The results show that: 1) The carbon footprint of Bazizui navigation-power junction project is 109.82×10^4 t CO₂eq, and the carbon footprint of the construction and operation periods are 0.49×10^6 t CO₂eq and 2.3×10^6 t CO₂eq respectively. 2) The total electricity delivered by the project is 128.4×10^8 kWh in the 30-year operation period, and the total carbon reduction is 4.66×10^6 t CO₂eq. The research results have certain guidance and reference significance for accurate accounting of carbon emissions and environmental benefits of Navigation-power junction project. It has a certain theoretical and practical guiding significance for Jiangxi to explore the path of realizing dual carbon goal.

Keywords

Life Cycle Assessment, Navigation-Power Junction Project, Carbon Footprint, Energy Saving and Carbon Reduction Benefits

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国目前是碳排放总量最大的国家, 为了实现可持续低碳发展, 中国沿着 1.5°C 路径不懈努力, 提出了“碳达峰碳中和”的双碳目标[1] [2]。2021 年 10 月 26 日, 国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》中提到“将绿色低碳理念贯穿于交通基础设施规划、建设、运营和维护全过程, 降低全生命周期能耗和碳排放”。水电作为水利水电工程的一部分, 也是“碳达峰十大行动”之一的“能源绿色低碳转型行动”中所提倡的需要因地制宜开发的能源类型[3]。航电枢纽工程是航电结合、以电养航、综合效益高的工程, 相较于水电工程, 最大区别在于其将满足航运要求作为开发的首要目标[4] [5]。航电枢纽工程对我国建设与发展具有强大的经济带动作用, 亦可在应对气候变化方面发挥重要作用。因此, 明确航电枢纽工程的碳排放及其节能减碳效益具有重要的意义。

碳足迹生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是评估碳排放环境影响的系统方法, 可用于分析和量化产品、系统或过程的环境影响[6]。生命周期评价的碳足迹评价方法, 能够反映隐含在产业链中的温

室气体排放[7], 可为航电枢纽工程节能减碳效益评价提供有效途径。目前已有部分研究采用生命周期评价法揭示水电工程的碳足迹[8]-[16]。杜海龙等[8]以长江上游某大型水电站为案例进行研究, 明确了生命周期评价方法对水电站碳足迹评估的适用性; Zhang 等[9]利用投入产出法计算了中国装机容量 44 MW 与 3600 MW 的两座水电站温室气体排放情况; Raadal 等[10]分析了 1996~2010 年间 39 篇水电站生命周期评价, 揭示不同水电站温室气体排放量存在一定的差异性; Pang 等[11]运用过程分析法计算了中国小水电——观音岩水电站的环境效应; 张社荣等[12]采用混合生命周期评价法对大型水电工程各阶段的温室气体排放进行了定量分析, 结果表明运行阶段碳足迹比重最大, 占生命周期的 50%, 其次为材料设备生产阶段, 占 45%, 并且计算结果显示水电碳排放水平远低于火电, 可证明大型水电属于清洁能源, 具有一定的碳减排作用; Li 等[13]开展了溪洛渡和向家坝水电站项目的生命周期碳足迹研究, 结果表明 95% 以上的碳排放可归因于水电生产, 大型水电站的水库净温室气体排放是生命周期温室气体排放的一个重要组成部分; Wang 等[14]开发了一套完整的碳足迹评估方法, 并将其应用于中国 50 个最具影响力的水电站的案例研究, 结果表明碳足迹大部分来自水电站的运行和维护阶段; Sunwanit 等[15]针对泰国 5 个小型水电站进行了生命周期评价分析, 计算了相应的温室气体排放系数; Zhang 等[16]对西藏直孔水电站项目进行了生命周期温室气体排放的计算, 并对大型水电站的清洁属性提出了质疑。然而, 目前对航电工程碳足迹的研究仍处于起步阶段, 由于缺乏统一的评价方法和标准, 碳足迹理论尚未在水电行业广泛应用, 如何高效、准确地完成碳足迹评价并进行碳排放优化都需要继续深入讨论。

本文在已有研究的基础上, 构建了航电枢纽节能减碳效益的核算模型, 并以八字嘴航电枢纽为例开展实证研究, 从生命周期的角度对航电枢纽碳足迹进行调查评估, 揭示其碳减排效益, 以为航电枢纽工程碳足迹的核算和节能减碳效益评估提供精细指导。

2. 材料与方法

2.1. 八字嘴航电枢纽工程简介

本文以江西八字嘴航电枢纽工程为例来开展研究, 航电枢纽地处鄱阳湖支流的信江下游河段, 地理坐标为东经 116°40'30", 北纬 28°27'20", 总投资 43.86 亿元, 是一座以航运为主、兼顾发电等综合利用的航电枢纽工程, 分别由西、东大河上的通航、挡水、泄水、发电及过鱼设施等建筑物组成。电站正常蓄水位 18.0 m, 初拟虎山嘴电站装机容量为 5.6 MW, 豹皮岭电站装机容量为 7.0 MW, 合计装机容量 12.6 MW。

2.2. 基于生命周期评价的碳足迹分析方法

2.2.1. 系统边界确定

八字嘴航电枢纽工程生命周期包括建设阶段、运营维护阶段及退役阶段。八字嘴航电枢纽工程由于退役阶段的航电枢纽工程极少, 且相关数据匮乏, 因此, 本研究中八字嘴航电枢纽工程的碳足迹评价暂不考虑退役阶段[17]。

八字嘴航电枢纽工程生命周期包括 2 个阶段: 建设阶段和运营维护阶段, 如表 1 所示。其中建设阶段主要包括三大块: 1) 材料生产过程, 是该工程材料设备生产阶段消耗的混凝土、钢材、柴油等主要材料、能源用量及其碳足迹; 2) 运输阶段, 包含场外运输、场内运输; 3) 施工过程是建设阶段的主要过程, 涉及众多单项工序和多种机械的使用。由于八字嘴航电枢纽目前还处于建设阶段, 对于运营期的具体情况我们还无法得知, 故针对其碳排放清单还有部分不确定的地方, 因此通过对已经运营的航电枢纽(新赣航电枢纽、石虎塘航电枢纽等)进行现场调研来预估八字嘴航电枢纽的核算范围。通过调研可知, 核算航电枢纽在发电过程中的能源消耗量须通过整个发电产业链的能源消耗来计算, 但是由于涉及的设备过多,

单独统计易出现错误。所以在本研究中，八字嘴航电枢纽运营期电能消耗核算范围估算主要包括两部分：1) 工程主体系统/工程辅助系统；2) 生活/管理区。其中工程主体系统/工程辅助系统包含在发电过程中整个系统的耗电量、设备监控系统的耗电量、生产区空调及照明的耗电量，生活/管理区包含空调设备、照明设备以及监控设备的耗电量。同时由于水库水位落差小，且水库两侧无植被等影响，故本研究忽略水库温室气体排放。其他因素包括生活物资的生产及劳力间接不可管控部分碳排放也排除在系统边界外。

Table 1. System boundary of carbon footprint for navigation and power hub projects
表 1. 航电枢纽工程碳足迹的系统边界

建设阶段	运营维护阶段
1. 材料生产过程 ① 混凝土 ② 木材 ③ 柴油 ④ 钢材 ⑤ 爆破材料 ⑥ 机电与金属结构 2. 运输过程 ① 柴油 3. 施工过程 ① 混凝土 ② 木材	1. 工程主体/辅助系统 ① 控制系统 ② 电站设备 ③ 船闸设备 ④ 船舶 ⑤ 辅助机械设备 ⑥ 通风换气系统等 2. 生活/管理区 ① 空调 ② 照明系统 ③ 生活污水处理设施 ④ 天然气 ⑤ 管理运营 ⑥ 生活耗电

2.2.2. 碳足迹的计算方法

本研究参考文献[18]，结合过程分析法(PA-LCA)的“自下而上”模型方法，针对枢纽工程各阶段的能耗特征，提出相应各阶段的碳足迹计算方法。

建设阶段的碳足迹为：

$$C_a = C_1 + C_2 + C_3 = \sum_i M_i \beta_i + \sum_j M_j \gamma_j + \sum_k M_k \alpha_k \quad (1)$$

式(1)中， C_a 为建设阶段的碳足迹； C_1 、 C_2 和 C_3 分别代表材料设备生产过程、施工过程和运输过程产生的碳排放； M_i 和 β_i 分别为生产阶段所消耗 i 种材料/能源的用量及设备的成本和相应的碳排放系数； M_j 与 γ_j 为施工过程 j 种能源的消耗量和相应的碳排放因子； M_k 和 α_k 为运输过程中 k 种材料/能源的消耗量与碳排放因子。

运营维护阶段的碳足迹主要来自日常运营及维护阶段所造成的材料、能源的损耗，具体的测算公式如式(2)所示：

$$C_b = R \times b \quad (2)$$

式(2)中， C_b 为运营阶段的碳足迹； R 为运营维护成本； b 为单位成本产出的温室气体。

生命周期碳足迹 C_{life} 由建设和运营阶段的碳排放相加所得，即

$$C_{life} = C_a + C_b \quad (3)$$

2.3. 节能减碳效益核算模型

运营期生产的清洁电能所等同的潜在节约碳排放为 $C_{potential}$ ，则总的减碳效益核算模型为：

$$C = C_{potential} - C_{life} = E \cdot C_{coal} \quad (4)$$

其中， C 为总的减碳量， E 为总的煤炭节约量(单位标准煤)， C_{coal} 为每一吨标准煤所产生的碳排放量。 $C_{potential}$ 由公式(5)计算所得：

$$C_{potential} = E_{elec} \cdot f \quad (5)$$

其中， E_{elec} 为清洁电量， f 为电力碳排放因子。

2.4. 数据来源

碳排放因子数据主要来源于 CLCD 数据库、ELCD 数据库、中国原子能科学研究院、中国区域电网基准线排放因子、国内外公开文献数据以及 EIO-LCA 模型。建设阶段和运营维护阶段主要用料来自八字嘴航电枢纽工程规划，具体见表 2。

Table 2. Data on carbon emission factors of major materials/energy sources during construction and operation and maintenance phases

表 2. 建设阶段与运营维护阶段主要材料/能源碳排放因子数据

阶段	材料	碳排放因子	来源	
建设阶段	混凝土	0.094 t CO ₂ eq/t	文献[19]	
	木材	522 t CO ₂ eq/million dollar	EIO-LCA (2012)	
	材料设备生产过程	柴油	0.139 t CO ₂ eq/t	CLCD (2012)
		爆破材料	926 t CO ₂ eq/million dollar	EIO-LCA (2012)
	机电与金属结构	钢材	2.2 t CO ₂ eq/t	中国原子能科学研究院
			640 t CO ₂ eq/million dollar	EIO-LCA (2012)
	施工过程	柴油	0.139 t CO ₂ eq/t	CLCD (2012)
电		0.542×10^{-3} t CO ₂ eq/kW·h	2017 中国区域电网基准线排放因子	
运输过程	柴油	0.139 t CO ₂ eq/t	CLCD (2012)	
运营维护阶段	电	0.542×10^{-3} t CO ₂ eq/kW·h	2017 中国区域电网基准线排放因子	
	汽油	0.229 t CO ₂ eq/t	CLCD (2012)	

3. 结果与分析

3.1. 碳足迹

3.1.1. 建设阶段

1) 材料设备生产过程

八字嘴航电枢纽分别由西、东大河上的通航、挡水、泄水、发电及过鱼设施等建筑物组成。该工程材料设备生产阶段消耗的混凝土、钢材、柴油等主要材料、能源用量及其碳足迹见表 3。材料设备生产阶段的碳足迹为 47.73 t CO₂eq，其中混凝土和钢材碳足迹分别占生产阶段的 64.86% 和 30.92%，其他如柴油、木材、爆破材料、机电与金属结构等由于用量少或碳排放因子低，其碳足迹也较少。

Table 3. Major material/energy carbon footprint in material and equipment production phase

表 3. 材料设备生产阶段主要材料/能源碳足迹

材料	用量(单位)	碳足迹
混凝土	329.37 (10 ⁴ t)	30.96×10^4 t CO ₂ eq
木材	5.78 (million dollar)	0.30×10^4 t CO ₂ eq
柴油	5.68 (10 ⁴ t)	0.79×10^4 t CO ₂ eq
爆破材料	5.21 (million dollar)	0.48×10^4 t CO ₂ eq
钢材	6.71 (10 ⁴ t)	14.76×10^4 t CO ₂ eq
机电与金属结构	6.88 (million dollar)	0.44×10^4 t CO ₂ eq
总计		47.73×10^4 t CO ₂ eq

2) 运输过程

运输阶段包含场外运输，场内运输两部分过程，该过程碳足迹主要是柴油的消耗过程。运输阶段柴油消耗量 2.37×10^4 t，运输阶段碳足迹为 0.33 t CO₂eq。

3) 施工过程

施工过程是建设阶段的主要过程，涉及众多单项工序和多种机械的使用，产生大量的能耗，排放大量的温室气体。施工期间，总能耗指标为耗电总量 1.09×10^4 kW·h，柴油消耗量 0.87×10^4 t。参考 IPCC 对于各种温室气体的全球变暖潜能值和《省级温室气体清单编制指南》，柴油消耗的碳足迹量为 1.31 t CO₂eq，电能消耗过程碳足迹为 0.33 t CO₂eq，施工阶段总碳足迹为 1.44 t CO₂eq。

因此，建设阶段总的碳足迹为 0.49×10^6 t CO₂eq。其中，材料设备生产过程占比最大，约占整个建设阶段碳排放的 96.42%，施工过程和运输过程的碳足迹比例分别为 2.90% 和 0.68%。

3.1.2. 运营阶段

根据生命周期评价的方法学初步得出的电能消耗测算清单结果如下表 4 所示：

Table 4. Preliminary energy consumption measurement list of Bazizui hydropower complex in operation period

表 4. 八字嘴航电枢纽运营期初步电能消耗测算清单

耗能系统		耗能情况
工程主体系统/工程辅助系统		9893665.60 kWh
生活/管理区	空调设备	354500.76 kWh
	照明系统	231232.64 kWh
	监控设备	9076.16 kWh
合计		1.1×10^8 kWh

根据核算结果，八字嘴航电枢纽运营期电能消耗测量达 1.1×10^8 kWh，计算得到 30 年运行碳足迹为 1.79×10^6 t CO₂eq。

因此，八字嘴航电枢纽运在建设阶段和运行阶段的碳足迹分别为 0.49×10^6 t CO₂eq 和 1.79×10^6 t CO₂eq，生命周期碳足迹为 2.3×10^6 t CO₂eq。

3.2. 节能减碳效益

八字嘴航电枢纽工程在运营阶段每年向外输送的清洁电量为 4.28×10^8 kW·h，运营期内向外输送的电量约 128.40×10^8 kW·h，运营期生产的清洁电能所等等的潜在碳足迹 $C_{potential}$ 为 696.62×10^4 t CO₂eq。八字嘴航电枢纽运的总减碳量 C 为潜在节约碳足迹 $C_{potential}$ 与八字嘴航电枢纽生命周期碳足迹 C_{life} 之差，为 4.66×10^6 t CO₂eq (见图 1)。

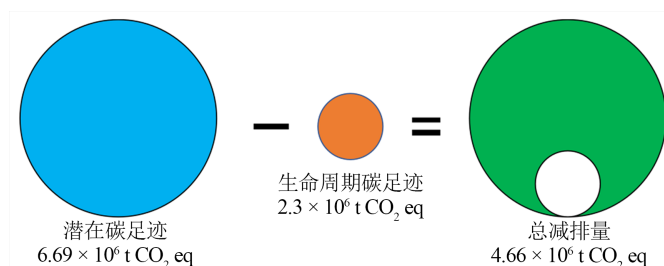


Figure 1. Carbon reduction benefits of navigation power junction project

图 1. 航电枢纽工程的减碳效益

运营期间清洁电能节省的碳排放可以抵消总的碳足迹。每吨标准煤所产生的 CO_2 为 $2.7 \text{ t CO}_2 \text{ eq/tce}$ ，八字嘴航电枢纽工程总的节能量为 $173 \times 10^4 \text{ t}$ 标准煤。

4. 讨论

本研究从生命周期的角度对八字嘴航电枢纽碳足迹进行调查，并给出了详细的定量结果，但可能与生命周期实际值具有一定差异。一是八字嘴航电枢纽工程生命周期只考虑建设阶段和运营维护阶段，未考虑退役阶段。目前鲜有研究关注航电枢纽碳足迹，除了运营阶段航电枢纽具有通航功能外，航电枢纽与相关水电工程的碳足迹较为相似，运营阶段是八字嘴航电枢纽工程温室气体排放的关键阶段，但比例略低[20] [21] [22] [23] [24]。二是本研究未考虑温室气体排放，这也导致八字嘴航电枢纽运营阶段碳足迹比例略低。温室气体排放是新增淹没区改变了原生环境，其主要是生物降解而产生的甲烷和二氧化碳以及微量的氧化亚氮[25] [26]。然而，经调研发现：八字嘴航电枢纽水库水位落差小，且水库两侧无植被等影响，故水库温室气体排放可忽略。

目前大部分温室气体排放是由能源相关排放，特别是由化石燃料燃烧造成的。优化能源结构，降低化石能源消费比重，实现无碳能源替代将是实现双碳的最优路径，其中提高水电等无碳能源消费比重，将对减排带来直接、显著的影响[27]。八字嘴航电枢纽工程在运营阶段向外输送的电量约 $128.40 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ，总减碳量为 $586.80 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，总的能量为 $173 \times 10^4 \text{ t}$ 标准煤，每年碳减排量达 $20.97 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，本工程能够有效降低温室气体排放。根据文献[28]，江西 2020 年需减排 $1.35 \times 10^8 \text{ t CO}_2\text{eq}$ 。2020 年 GDP 为 2.57×10^{12} 元，单位 GDP 碳减排为 5.25 kg/元 。八字嘴航电枢纽工程投资 43.86 亿元，总减碳量为 $586.80 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，则单位 GDP 碳减排 133.97 kg/元 ，因此八字嘴航电枢纽工程对江西省碳减排具有一定支撑作用。

水利工程生命周期评价涉及的过程繁冗且复杂，各过程的不确定性会对最终结果产生叠加效应。八字嘴航电枢纽工程不确定性的影响因素有两点，一是运行阶段设备维护造成碳足迹的不确定性。由于缺乏相关实例，本研究的八字嘴航电枢纽运营期碳排放采用估算的方法，但实际调研过程发现较新的航电枢纽通过技术革新其发电损耗及智慧管理可有效降低碳排放，如新干枢纽和石虎塘枢纽。与此同时，八字嘴航电枢纽是交通运输部科技示范项目，在建设期采用水头范围较大的贯流式水轮发电机、自然通风等多项节能技术，尽管目前八字嘴航电枢纽运营期的碳排放尚未有准确数据，但根据本研究的研究边界，将为后期碳排放的核算提供支撑。二是选取碳排放因子的不确定性。关键碳排放因子(如电力引因子，中国区域电网基准线排放因子)随着时间的变化会有较大的差异，计算的结果也会产生变化。尽管存在以上不确定性，但本研究基于科学的碳足迹计算理论与方法，采用中国生命周期基础数据库发布的碳足迹数据，系统调研了江西省八字嘴航电枢纽建设的基础数据，总体上，数据可有效地反映航电枢纽的碳足迹和节能减碳效益情况。

5. 结论

本文通过生命周期评价方法全面核算了江西八字嘴航电枢纽工程的碳足迹，并构建了节能减碳核算模型，定量分析了工程的节能减碳效益，具体结论如下：

- 1) 八字嘴航电枢纽工程建设阶段总的碳足迹为 $0.49 \times 10^6 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，材料设备生产过程占比最大，约占整个建设阶段碳排放的 96.42%，其中混凝土和钢材碳足迹分别占生产阶段的 64.86%和 30.92%；
- 2) 八字嘴航电枢纽工程运营阶段碳足迹为 $1.79 \times 10^6 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，向外输送的电量约 $128.40 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ；
- 3) 八字嘴航电枢纽工程生命周期碳足迹为 $2.3 \times 10^6 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，其中，建设阶段和运行阶段的碳足迹分别占总碳足迹的 18%和 82%，总减碳量为 $4.66 \times 10^6 \text{ t CO}_2\text{eq}$ ，结果表明以该航电枢纽工程为代表的江西

航电工程开发价值大、节能减碳效应明显,可为准确核算航电枢纽项目的碳排放及其环境效益提供指导,同时对于探索双碳目标的实现路径具有一定的支撑作用。

基金项目

江西省交通运输厅项目(2019C0006, 2018R0017)。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(2).
- [2] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[N]. 人民日报, 2020-12-13(1).
- [3] 陈怡, 田川, 曹颖, 等. 中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(5): 632-640.
- [4] 黄伟杰, 谢丽芳, 李军, 等. 多目标航电枢纽项目投资分摊方法研究[J]. 水运工程, 2006(2): 65-69+85.
- [5] 谢丽芳, 罗德芳, 李军. 内河航电枢纽工程航运经济效益的量化计算探讨[J]. 水运工程, 2009, 424(2): 113-118.
- [6] Harvey, J.T., Meijer, J., Ozer, H., *et al.* (2016) Pavement Life-Cycle Assessment Framework; No. FHWA-HIF-16-014. U.S. Department of Transportation, Washington DC.
- [7] Zhang, S., Pang, B. and Zhang, Z. (2015) Carbon Footprint Analysis of Two Different Types of Hydropower Schemes: comparing Earth-Rockfill Dams and Concrete Gravity Dams Using Hybrid Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, **103**, 854-862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.053>
- [8] 杜海龙, 李哲, 郭劲松. 基于 ISO14067 的长江上游某水电项目碳足迹分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(7): 1102-1110.
- [9] Zhang, Q., Karney, B., MacLean, H.L., *et al.* (2007) Life-Cycle Inventory of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Two Hydropower Projects in China. *Journal of Infrastructure Systems*, **13**, 271-279. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2007\)13:4\(271\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:4(271))
- [10] Hanne, L., Luc, G., Ingunn, S., *et al.* (2011) Life Cycle Greenhouse Gas (GHG) Emissions from the Generation of Wind and Hydro Power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 3417-3422. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.001>
- [11] Pang, M.Y., Zhang, L.X., Wang, C.B., *et al.* (2015) Environmental Life Cycle Assessment of a Small Hydropower Plant in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **20**, 796-806. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0878-7>
- [12] 张社荣, 庞博慧, 张宗亮. 超高心墙堆石坝工程的碳足迹分析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 283-287.
- [13] Li, Z., Du, H., Xiao, Y., *et al.* (2017) Carbon Footprints of Two Large Hydro-Projects in China: Life-Cycle Assessment According to ISO/TS 14067. *Renewable Energy*, **114**, 534-546. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.073>
- [14] Wang, J.Y., *et al.* (2019) Assessing the Water and Carbon Footprint of Hydropower Stations at a National Scale. *Science of the Total Environment*, **676**, 595-612. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.148>
- [15] Suwanit, W. and Gheewala, S.H. (2011) Life Cycle Assessment of Mini-Hydropower Plants in Thailand. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **16**, 849-858. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0311-9>
- [16] Zhang, J. and Xu, L. (2015) Embodied Carbon Budget Accounting System for Calculating Carbon Footprint of Large Hydropower Project. *Journal of Cleaner Production*, **96**, 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.060>
- [17] Pascale, A., Urmee, T. and Moore, A. (2011) Life Cycle Assessment of a Community Hydroelectric Power System in Rural Thailand. *Renewable Energy*, **36**, 2799-2808. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.023>
- [18] Li, H., Luo, Z., Xu, X., *et al.* (2021) Assessing the Embodied Carbon Reduction Potential of Straw Bale Rural Houses by Hybrid Life Cycle Assessment: A Four-Case Study. *Journal of Cleaner Production*, **303**, Article ID: 127002. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127002>
- [19] 李小冬, 王帅, 孔祥勤, 等. 预拌混凝土生命周期环境影响评价[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 132-138.
- [20] 杜海龙. 金沙江大型水电站碳足迹的生命周期分析研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2017.
- [21] 夏欣, 钟权. 水电站生命周期温室气体排放研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 188-192.
- [22] Bakken, T.H., Modahl, I.S., Engeland, K., *et al.* (2016) The Life-Cycle Water Footprint of Two Hydropower Projects in Norway. *Journal of Cleaner Production*, **113**, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.036>
- [23] Levasseur, A., Mercier-Blais, S., Prairie, Y.T., *et al.* (2021) Improving the Accuracy of Electricity Carbon Footprint:

Estimation of Hydroelectric Reservoir Greenhouse Gas Emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **136**, Article ID: 110433. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110433>

- [24] 袁俊森, 潘纯. 水利工程经济[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [25] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2377-2384.
- [26] 程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展[J]. 湿地科学, 2012, 10(1): 121-128.
- [27] 张全斌, 周琼芳. “双碳”目标下中国能源 CO₂ 减排路径研究[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(4): 22-30.
- [28] 刘书玲. 中国省域二氧化碳减排目标与成本分担策略研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.