

李朋,白孝轩,丁宁,等.水电碳足迹关键影响因素及区域化研究趋势[J].中国环境科学,2025,45(4):2251-2263.

Li P, Bai X X, Ding N, et al. Key factors influencing hydropower carbon footprint assessment and geo-regional research trends [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2251-2263.

## 水电碳足迹关键影响因素及区域化研究趋势

李朋<sup>1</sup>,白孝轩<sup>1</sup>,丁宁<sup>2</sup>,赵思琪<sup>2</sup>,李超<sup>1</sup>,周卫青<sup>1</sup>,张高翔<sup>2\*</sup> (1.国网冀北电力有限公司电力科学研究院,北京100045; 2.中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京100085)

**摘要:**面向水电低碳发展问题,对水电碳足迹关键影响因素及水电碳足迹区域化差异进行综述研究.结果表明,全球范围内对现有水电碳足迹研究的关注度不断增高.通过案例研究发现,水电碳足迹主要由建设阶段的建材制造和工程施工,以及运行维护阶段的设备运行耗能产生.总结了影响水电碳排放的关键因素:水电类型、装机量、蓄水量、蓄水区面积和生命周期阶段等,并从地理空间的视角对水电碳排放进行了区域化研究,指出因地理位置不同导致的气候、降水量、生态环境等差异对水电碳足迹的影响.

**关键词:**水电; 碳足迹; 生命周期评估; 碳排放; 区域化分析

**中图分类号:** X323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)04-2251-13

**Key factors influencing hydropower carbon footprint assessment and geo-regional research trends.** LI Peng<sup>1</sup>, BAI Xiao-xuan<sup>1</sup>, DING Ning<sup>2</sup>, ZHAO Si-qi<sup>2</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, ZHOU Wei-qing<sup>1</sup>, ZHANG Gao-xiang<sup>2\*</sup> (1.State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China; 2.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *China Environmental Science*, 2025,45(4): 2251-2263

**Abstract:** This research addressed the issue of low-carbon development in hydropower, provided a review of the key factors influencing the carbon footprint of hydropower and the regional variations in these footprints. The findings of this research indicated an increasing global focus on research into the carbon footprint of hydropower. Case studies revealed that the primary contributors to the hydropower carbon footprint were the manufacture of construction materials and engineering activities during the construction phase, as well as energy consumption by equipment during the operation and maintenance phase. This research identified key factors affecting hydropower carbon emissions, including the type of hydropower, installed capacity, water storage volume, reservoir area, and life cycle stages. Furthermore, from a geographical perspective, it explored the regional variation in hydropower carbon emissions, highlighting the impact of differences in climate, precipitation, and ecological environment due to geographical location on the hydropower carbon footprint.

**Key words:** hydropower; carbon footprint; life cycle assessment; carbon emissions; regionalization analysis

水电是被广泛认可的清洁能源之一,中国拥有全球最大的水电装机和生产规模<sup>[1]</sup>.国际能源署发布《水力发电市场报告》,预测全球水力发电量将在2021~2030年增长17%,并主要由中国、印度、土耳其与埃塞俄比亚带动<sup>[2]</sup>.随着中国水电开发加速,装机容量从1978年的1.7亿kW增长至2020年的3.7亿kW<sup>[3]</sup>.《2030年前碳达峰行动方案》中指出,要因地制宜开发水电;积极推进水电建设,推动金沙江上游、澜沧江上游、黄河上游等已纳入规划,符合生态保护要求的水电项目开工建设,并推动小水电绿色发展<sup>[4]</sup>.水电是中国“碳达峰十大行动”中能源绿色低碳转型行动所重点倡议的清洁能源类型.

作为可持续性能源,水电碳足迹计算和水电减

排对于减缓气候变化至关重要.2024年6月,中国提出产品碳足迹管理体系建设方案.水电碳足迹计算能够从全生命周期评估水电碳排放,是水电绿色低碳转型的基础. Kadiyala 等<sup>[5]</sup>指出水电生命周期温室气体(GHG)排放量与水电装机容量和类型有关,即同类型水电中,大型(装机容量大)水电生命周期GHG排放量大于小型(装机容量小)水电(SHP);同体积情况下,蓄水水电生命周期GHG排放量大于径流式水电.然而,Kumar 等人<sup>[6]</sup>认为小型水电所造成的

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(5200-202314489A-3-2-ZN)

\* 责任作者, 硕士, 科研助理, gxzhang@rcees.ac.cn

单位碳排放和环境影响远远大于大型水电.还有综述研究从核算方法、系统边界、数据局限性等方面提出问题<sup>[7-8]</sup>,但对影响水电碳足迹的关键影响因素尚缺乏系统梳理.

此外,由于水电碳足迹计算使用了不同的生命周期评估(life cycle assessment, LCA)方法,计算缺乏统一标准,导致计算结果存在差异.根据国际水电协会披露的结果,水电生命周期温室气体排放的中值为 23gCO<sub>2</sub>eq/(kW·h),与 IPCC 的研究结果一致<sup>[9]</sup>.有研究估计,水电碳足迹的全球平均排放量为 85gCO<sub>2</sub>eq/(kW·h)和 3gCH<sub>4</sub>eq/(kW·h),而非洲北部法属圭亚那地区的热带水电碳排放量甚至达到 1550gCO<sub>2</sub>eq/(kW·h),远高于燃煤发电<sup>[10]</sup>.因此,对于水电是否为清洁能源存在争议,需要进一步构建碳足迹核算方法和关键影响因素解析,为水电降碳提供支撑.

综上所述,当前水电开发潜力较大,符合减碳和发展清洁能源的政策目标,但在碳足迹核算方面仍存在优化空间.本研究基于 Web of Science (WOS) 和中国知网 (CNKI)两个国内外主流期刊数据库,分别对全球和国内水电碳足迹和水电 LCA 相关出版

物进行数据收集和梳理,利用 CiteSpace 进行可视化分析,探索该领域当下研究热点、高频关键词以及主要研究机构.本研究通过对全球范围内多个水电碳足迹研究案例进行气候、水电类型、装机容量、碳足迹计算方法等多角度分析,将详细讨论不同因素对水电碳足迹的影响,探索水电碳足迹区域性差异及研究趋势,弥补现有研究对水电碳排放区域化分析不足的问题,旨在全面解析水电碳排放影响因素,为后续研究提供理论依据.

## 1 文献计量

### 1.1 方法

1.1.1 文献计量方法 CiteSpace 主要被运用于分析和显示一个学科或者某一研究方向某一时间段的学术成果的发展趋势与动向,形成若干研究前沿领域的发展历程<sup>[11]</sup>,可以实现对大量的文献进行快速的关键词、合作机构、作者、研究热点等信息进行可视化成图并进一步进行分析讨论<sup>[12]</sup>.本文的文献计量将基于 CNKI 和 WOS 为数据库,使用 CiteSpace 对水电的碳足迹主题的文献进行信息可视化处理.

表 1 水电碳足迹中英文综述文章概要

Table 1 Summary of the review articles on hydropower carbon footprint

GHG 主要影响因素	主要内容	存在问题	参考文献
水电建设、蓄水植被淹没、备用电力系统、总静头(进水口与涡轮之间的距离)高度、电力生产能力和现有水利基础设施的利用	使用分类指数对水电系统进行统计评估,水电系统的 GHG 排放受建设活动、淹没植被和备用电力系统等因素的影响,结果将有助于制定减少 GHG 排放的能源政策	水电生命周期系统边界划分不一致; 缺乏统一的功能单位; GHG 排放研究方法不统一; 水电碳排放差异受地域性影响较大	[5]
水库特性(库容量、使用年限、位置等)、建设阶段、运行和维护阶段、退役阶段(大坝拆除和废弃回收)	研究水电生命周期内的 GHG 排放,重点分析不同类型水电(如水库型和径流式水电)的排放差异	数据不一致、缺乏标准化; LCA 不确定性分析不足; 区域化分析缺乏	[8]
水温、溶解氧含量、有机碳输入、水温的热分层、水库使用年限、平均深度、季节变化	探讨了水电生命周期内 GHG 排放的多样性和影响因素,指出蓄水水库相关的 GHG 排放是主要的驱动因素,而径流水电项目的排放相对较低	数据有限且不一致; LCA 模型和方法不一致; 局限于某些地理区域,如印度的热带和亚热带	[6]
蓄水生物物质分解、运营排放、基础设施建设、拆除和废弃回收	对比水电和其他发电技术在 GHG 排放方面的差异,从生命周期角度分析水电的建设和运营过程中产生的排放.水电的碳排放量低于火电,但由于建设过程中生物物质分解和基础设施建设等原因,水电仍会产生显著的 GHG 排放	碳排放核算方法缺乏标准化; 模型不确定性较高; 数据不足	[7]

1.1.2 检索步骤和数据处理 设定检索式 1 为“SU=“水电” AND TKA=“碳足迹” OR “SU=“水电” AND TKA=“生命周期””,在 CNKI 中文数据库中进行专业检索,时间范围为 2014 年至 2023 年.

设置检索式 2 为“(TS=(carbon emission) AND

(TS=(hydropower) OR TS=(hydroelectricity))) AND (AB=(life cycle assessment) OR AB=(carbon emission))”,时间范围为 1991 年至 2023 年,出版物类型为 Web of Science 核心集.

将 CNKI 和 WOS 的结果分别导出为“refworks”

和“纯文本文件”格式,插入 CiteSpace 进行可视化分析。

## 1.2 文献计量结果与讨论

当前,水电碳足迹研究数量较多,但仍存在生命周期系统边界划分不一致、计算方法不统一和数据获取有局限性等问题(表 1)。因此,需对现有水电碳足迹研究案例进行计量分析,以确定未来研究方向。如图 1 所示,基于检索式 1 内容的出版物数量为 303 篇,其中学术期刊和学位论文共计 195 篇。由于其他类型文章包含新闻报道、政府政策宣传等,缺乏学术性,因此只使用学术期刊和学位论文作为参考。根据图 1

结果可知,从 2014 至 2023 年,国内“水电”和“碳足迹”以及“生命周期”相关的出版物数量呈先上升后下降的趋势。2014 年全年中文相关出版物共计 2 篇,2017 年年出版物数量达到最高峰,共计 38 篇。而 2018 年和 2019 年,相关出版物年度数量出现下滑趋势,分别为 19 篇和 17 篇。2020 年全年,该主题相关出版物数量再次出现上升趋势,共计 27 篇。2021 年下滑至 20 篇,2022 年小幅增长至 25 篇。而 2023 年全年相关文章数量仅有 12 篇。由此可见,该领域的中文研究数量有先急速加剧到放缓平稳的趋势。

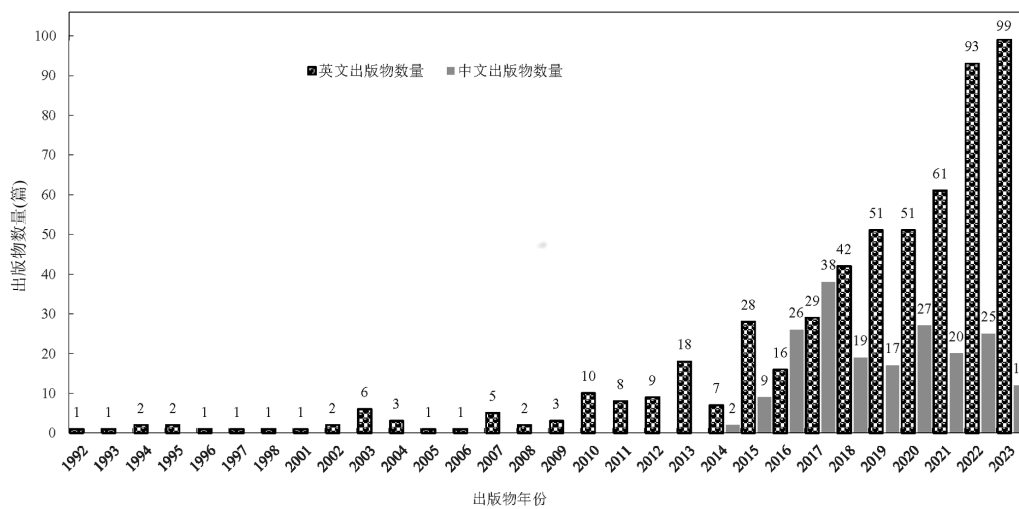


图 1 1992~2023 年水电碳足迹和水电 LCA 相关中英文出版物数量

Fig.1 Number of publications in Chinese on hydropower carbon footprint and hydropower LCA, 1992~2023

基于检索式 1,2

在 WOS 英文数据库中进行专业检索,基于检索式 2 的出版物共有 555 篇。由图 1 可知,在 2000 年以前,与检索式 2 相关的年度英文出版物数量属于相对稳定的趋势。而自 2001 年开始,全球范围内相关课题的出版物数量开始增加。2001 年全年相关英文出版物共计 1 篇,而到 2020 年则增长至 51 篇。由于《巴黎协定》的促进作用,以及各个主要国家相关碳中和、净零碳排放政策的落实,2020 年以后相关领域出版物数量年度增长速度再度提升,截止 2023 年,当年英文出版物共计 99 篇。

**1.2.1 关键词可视化** 根据图 2(a)可知,目前国内出版物高频关键词为“生命周期”、“碳足迹”、“水电工程”、“小水电”、“成本控制”、“环境管理”等。其主要原因是,水电的碳足迹和 LCA 是对已有水电进行生命周期碳排放计算和数学模型建设,

并对水电整个运行周期进行碳排放因素评估和管理优化。从生命周期视角来看,“成本控制”与水电建设有关,“绿色管理”与水电运营有关,因此可知水电碳排放与水电建设和水电运营密切相关。除此之外,一些研究中提及了关键词“小水电”,因此,后续研究中应聚焦水电体积和水电碳排放之间的关系研究。

如图 2(b)所示,国际出版物关键词主要集中在“life cycle assessment”、“hydropower reservoirs”、“greenhouse gas emission”、“storage”等方面。由此表明,水电碳足迹相关的英文出版物中,水电水库、水电容量等关键词出现频率较高,可作为后续研究的重点。虽然发达国家对于水电的建设和使用较早,但也有学者质疑,在陈旧的技术和运行管理体系下,水电虽作为清洁型能源,其运营过程和生命周期并没有做到净



铝材生产的能耗数据进行比较,发现误差仅在 10% 以内<sup>[24]</sup>。

**2.1.3 生态足迹分析方法** 水库水坝建设需要庞大的占地面积,从而导致水电站建设过程中会征用并淹没大量土地、耕地、动物栖息地或森林等。在水库淹没土地后,原有生物质分解导致蓄水区域 GHG 排放,并对生态环境造成破坏<sup>[10,25]</sup>。因此,在对水电进行碳排放核算时,忽略人为因素对区域环境和生态系统服务功能的影响是不全面的<sup>[26]</sup>。

Lu 等<sup>[27]</sup>对水电开发过程进行了生态足迹和碳减排之间的关联分析。研究表明,水电开发过程中化石能源的消耗呈逐年上升的趋势,由 1949 年消耗 1700t 标准煤增长至 2010 年 884000t 标准煤,带来碳排放的相应上升;1949 年淹没土地的生态足迹为 2600hm<sup>2</sup>,2010 年增加至 142 万 hm<sup>2</sup>。由此可见,生态足迹分析可以从自然资源消耗的角度对不同水电项目的可持续性做出评估。同时,利用生态足迹分析法计算碳排放可以从更宏观的角度判断水电建设带来的物质和能源消耗,便于掌握碳排放的总体趋势<sup>[28]</sup>。

## 2.2 水电碳足迹范围及影响因素

本节将对碳足迹计算结果以及影响因素进行分析,以期得到影响水电碳足迹的关键要素,为未来水电低碳优化提供理论基础。

**2.2.1 水电碳足迹范围** 表 2 总结了全球范围内 35 个水电碳足迹研究案例,研究表明,水电单位碳足迹范围为 2.06~251.35gCO<sub>2</sub>eq/(kW·h),主要产生碳排放的阶段包括水库建设(建设工程和材料制造)和运行维护(水电力发电机等机械耗能和蓄水区域碳释放)阶段<sup>[29]</sup>。此外,不同水电案例在不同生命周期阶段碳足迹贡献存在差异,除计算方法不同外,导致水电碳排放区域间差异的影响因素包括地理位置、地理环境、水库淹没面积等。

### 2.2.2 水电碳足迹的主要影响因素

**2.2.2.1 生命周期阶段** 由表 2 中的案例可知,在

水电生命周期的各个阶段中,建设阶段和运行维护阶段的碳排放占比最大。湖北省某 SHP 的寿命周期碳排放量为 1.88×10<sup>4</sup>tCO<sub>2</sub>eq,建设阶段碳排放量占总量的 84.8%,运行阶段占比 4.7%,报废拆除阶段占比 10.5%。因此,该水电寿命周期碳排放主要由建设阶段产生<sup>[30]</sup>;另有研究表明,位于江西的峡江水电寿命周期碳排放量为 3.72×10<sup>6</sup>tCO<sub>2</sub>eq,运行维护阶段碳排放量占其总排放量的 70.49%,建设阶段的碳排放量占总体的 27.42%<sup>[31]</sup>;侯公羽等<sup>[32]</sup>的研究表明,辽宁省庄河抽水蓄能水电的寿命周期碳排放为 2.09×10<sup>6</sup>tCO<sub>2</sub>eq,运营阶段碳排放量占总体 59%,建设阶段碳排放量占总体 41%。由此可知,建设阶段和运行维护阶段在水电寿命周期碳排放中占比较大。

除此之外,水电建设和水电运行阶段的碳排放亦与水电规模密切相关。多数研究中,SHP 在建设和运营阶段的碳足迹明显小于大型水电<sup>[33]</sup>。SHP 在建设运营阶段的碳排放范围在 4.33~16.01gCO<sub>2</sub>eq/(kW·h)之间,平均值为 8.36gCO<sub>2</sub>eq/(kW·h)。根据上述案例可得,水电建设阶段的碳排放主要来自建设过程中水泥、混凝土等材料的生产和材料运输、工程修建所产生的废气;水电运行阶段的碳排放来源为水电维持自身设备运行和水库蓄水区域碳排放等。

**2.2.2.2 水电蓄水区域** 美国能源部水力发电技术办公室指出,在水电蓄水区域中因淹没地区的生物质水下分解产生 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放,从而改变了河流系统中碳的排放和储存方式<sup>[34]</sup>。Aung 等<sup>[35]</sup>的研究表明,缅甸的耶涯大坝和瑞丽江一级大坝在装机量、水电类型均为径流式水电以及自然环境相近的情况下,耶涯大坝的蓄水面积为 59.0km<sup>2</sup>,大于瑞丽江大坝的蓄水面积为 1.1km<sup>2</sup>。因此,耶涯大坝的单位发电碳足迹为 16.62kgCO<sub>2</sub>eq/(MW·h),高于瑞丽江水电站单位发电碳足迹 13.43kgCO<sub>2</sub>eq/(MW·h)。由此可知,水库蓄水面积越大,所造成的蓄水区域碳排放越多。

表 2 基于 LCA 方法的全球范围内水电碳足迹案例

Table 2 Global hydropower carbon footprint cases based on LCA method

序号	水电设施名称	区域	气候	水电设施类型	装机容量	水电设施等级	发电量/面积/总发电量	方法	单位发电碳足迹	生命周期碳排放	参考文献
1	溪洛渡水电站	四川省、云南省交界	亚热带季风性湿润气候	双曲拱坝	13860 MW	大(1)型水电站	575.5 亿 kW·h/a 133.65km <sup>2</sup>	LCA	3.83kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	生命周期碳排放量为 1.10×10 <sup>10</sup> kg	[36]

续表 2

序号	水电设施名称	区域	气候	水电设施类型	装机容量	水电设施等级	发电量/面积/总发电量	方法	单位发电碳足迹	寿命周期碳排放	参考文献
2	庄河抽水蓄能电站	辽宁省,中国东北部	暖温带季风气候	抽水蓄能电站	1000MW	大(2)型水电站	12 亿 kW·h/a 35.4 万 m <sup>2</sup> (上水库) 143.97 万 m <sup>2</sup> (下水库)	EIO-LCA、PA-LCA	43.46gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	2.09×10 <sup>6</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[32]
3	隔河岩水电站	湖北省 中国中部	亚热带季风气候	蓄水式水电站	121.2 万 kW	大(1)型水电站	30.4 亿 kW·h/a 72km <sup>2</sup>	EIO-LCA、PA-LCA	33.22gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	1.01×10 <sup>7</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[37]
4	金沙江水电基地	金沙江中游 前段:乌东德水电站 金沙江中游 后段:白鹤滩水电站 金沙江下游 前段:溪洛渡水电站 金沙江下游 后段:向家坝水电站	亚热带季风性湿润气候	梯级水电站	10200 MW 16000 MW 12600 MW 6400MW	大(1)型水电站	38.93TW·h/a 127.1km <sup>2</sup> 62.52TW·h/a 216.49km <sup>2</sup> 57.12TW·h~ 64.06TW·h/a 133.65km <sup>2</sup> 30.88TW·h/a 95.6km <sup>2</sup>	EIO-LCA、LCA	7.22gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h) 9.14gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h) 4.39gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h) 6.32gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	2.81×10 <sup>7</sup> tCO <sub>2</sub> eq 5.72×10 <sup>7</sup> tCO <sub>2</sub> eq 2.51×10 <sup>7</sup> tCO <sub>2</sub> eq 1.94×10 <sup>7</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[15]
5	通城县外环大桥拦河闸枢纽水电站	湖北省 中国中部	亚热带季风气候	河床式水电站	900kW	小(2)型水电站	374.5 万 kW·h/a 703km <sup>2</sup>	LCA	251.35gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	1.88×10 <sup>4</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[30]
6	可渡河阿都水电站	贵州省 中国西南部	亚热带湿润季风气候	水库型水电站	60MW	中型水电站	2.72 亿 kW·h/a 66.8 万 m <sup>2</sup>	EIO-LCA	13.05gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	1.77×10 <sup>5</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[38]
7	犬木塘水利工程	湖南省 中国南部	亚热带季风气候	蓄水式水电站	34MW	小(1)型水电站	1.15 亿 kW·h/a (暂无水库水域面积)	EIO-LCA、PA-LCA	12.80gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	4.78×10 <sup>5</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[18]
8	伊泰普水电站	巴西西南部 与巴拉圭临近处	亚热带气候	蓄水式水电站	12.6GW	大(1)型水电站	3.26E+11MJ(2007a)	LCI	1.56kgCO <sub>2</sub> /(MW·h)	9.64×10 <sup>4</sup> tCO <sub>2</sub> /a	[39]
9	某土耳其河流蓄能式水力发电厂	吉雷松省 土耳其北部	地中海气候	河流蓄能式水力发电厂	4MW	小(2)型水电站	7.43GW·h/a 49.6km <sup>2</sup>	LCI	30.6kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	无	[40]
10	马扎尔-杜达斯水电项目	厄瓜多尔中部	热带气候	径流式水电站	21MW	小(1)型水电站	125GW·h/a	LCI	2.6kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	无	[41]
11	巴巴水电站	厄瓜多尔中西部沿海地区		多用途水坝	42MW	小(1)型水电站	161GW·h		547kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	8.8×10 <sup>6</sup> tCO <sub>2</sub> eq	
12	耶涯大坝	彬乌伦 缅甸中部			790MW	大(2)型水电站	3550GW·h/a 59.0km <sup>2</sup>		16.62kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	5.9×10 <sup>10</sup> kgCO <sub>2</sub> eq	
13	瑞丽江一级水电站	木姐县 缅甸东北			600MW	大(2)型水电站	4022GW·h/a 1.1km <sup>2</sup>		13.43kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	5.41×10 <sup>10</sup> kgCO <sub>2</sub> eq	
14	下邦朗大坝	彬马那镇 缅甸中南部	热带季风气候	径流式水电站	280MW	中型水电站	911GW·h/a 17km <sup>2</sup>	LCI	8.14kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	7.42×10 <sup>9</sup> kgCO <sub>2</sub> eq	[35]
15	达平河 1 水坝	八莫市 缅甸北部			19MW	小(1)型水电站	1065GW·h/a 0.4km <sup>2</sup>		7.31kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	7.79×10 <sup>9</sup> kgCO <sub>2</sub> eq	
16	塔耶卡特 2 水电站	东吁 缅甸南部			120MW	中型水电站	604GW·h/a 13.8km <sup>2</sup>		8.19kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	4.95×10 <sup>9</sup> kgCO <sub>2</sub> eq	

续表 2

序号	水电设施名称	区域	气候	水电设施类型	装机容量	水电设施等级	发电量/面积/总发电量	方法	单位发电碳足迹	寿命周期碳排放	参考文献
17	峡江水电站	江西省吉安市峡江县巴邱镇 中国东南部	亚热带季风气候	综合性水利枢纽工程	360MW	大(2)型水电站	11.4 亿 kW·h/a 119km <sup>2</sup>	LCA	32.63gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	3.72 × 10 <sup>6</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[31]
18	库鲁阿-乌纳水电站	圣塔伦市西南 70 公里 巴西西北部	赤道(热带)雨林气候	无	30.3MW	小(1)型水电站	8 年内 18MW,32 年内 28MW,60 年内 39MW 102km <sup>2</sup>	LCI、LCIA	5.46kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	无	[42]
19	加拿大安大略省的水电站	安大略省加拿大东部	亚寒带气候	无	无	无	无	LCA	15.2gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[17]
20	糯扎渡水电站	云南省南部澜沧江下游,向家坝之后 中国西南部	低热河谷地区,部分属热带气候	心墙土石坝 重力坝	5850MW	大(1)型水电站	239.1×10 <sup>8</sup> kW·h/a	EIO-LCA、PA-LCA	8.36gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h) 11.11gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	8.8×10 <sup>6</sup> tCO <sub>2</sub> eq 1.17×10 <sup>7</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[43]
21	长江上游 34 座水电站	四川省中国西南部	亚热带气候	无	79GW	无	无	TES-LCA	28.76gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)(LHP); 9.82gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)(SHP)	无	[33]
22	直孔水电站	西藏自治区拉萨河中下游 中国西南部	温带半干旱季风气候区	无	100MW	中型水电	4.07×10 <sup>8</sup> kW·h/a	EIO-LCA	195gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	3.97×10 <sup>12</sup> gCO <sub>2</sub> eq	[44]
	三峡大坝	长江中国西南部			22500MW	大(1)型水电站			17.8gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)		
	向家坝水电站	金沙江下游河段上 中国西南部			6400MW	大(1)型水电站			无		
23	溪洛渡水电站	金沙江中国西南部	亚热带季风性湿润气候	无	12600MW	大(1)型水电站	无	EIO-LCA	无	无	[16]
	白鹤滩水电站	金沙江中国西南部			16000MW	大(1)型水电站			7.4gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)		
	乌东德水电项目	云南省金沙江中国西南部			10200MW	大(1)型水电站			9.3gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)		
	A 公司的水电站	利马市东北秘鲁西侧		径流式水电站	172MW	中型水电站	837GW·h/a		2.06gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	8.46×10 <sup>4</sup> tCO <sub>2</sub> eq/a	
24	B 公司的一号水电	利马市东南	沙漠草原气候	迷你径流式水电站	220MW	小(1)型水电站	1100GW·h/a	LCA	2.42gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	1.26×10 <sup>5</sup> tCO <sub>2</sub> eq/a	[45]
	B 公司的二号水电	秘鲁西侧			18.4MW	小(1)型水电站	147GW·h/a		2.33gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	1.72×10 <sup>4</sup> tCO <sub>2</sub> eq/a	
25	巴西某水电站	巴西	热带气候	无	87789MW	无	517TW·h,2021 年	LCA	0.0509kgCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	2.1×10 <sup>10</sup> kgCO <sub>2</sub> eq/2021 年	[46]
26	美国某抽水储能水电站	美国	无	抽水储能水电站	31~2100MW	无	无	LCA-EIO	5.6gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[47]
27	图库鲁伊水电站	巴西	热带气候	无	4000MW	大(1)型水电站	18TWh/a	LCA	237gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	4.26×10 <sup>6</sup> tCO <sub>2</sub> eq	[48]

续表 2

序号	水电设施名称	区域	气候	水电设施类型	装机容量	水电设施等级	发电量/面积/总发电量	方法	单位发电碳足迹	寿命周期碳排放	参考文献
28	克莱德达曼德水电站.	新西兰	北部为亚热带气候;南部为温带气候.	无	432MW	大(2)型水电站	186 × 10 <sup>9</sup> kW/100a	LCA	4.6gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	8.61 × 10 <sup>8</sup> kgCO <sub>2</sub>	[49]
29	威尔德格-布鲁格水电站	瑞士	海洋性气候	径流式水电站	50MW	小(1)型水电站	300GW·h/a	LCA	3.1gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[50]
30	恩布雷茨瀑布水电站	挪威	温带海洋性气候.	径流式水电站	无	无	285.736.000 kW·h/a		2.19gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[51]
31	蓄水式水电站	无	无	蓄水式水电站	1,000 MW	大(2)型水电站	无	无	15gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[52]
	径流式水电站			100MW	中型水电站	5.0gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)					
32	印度尼西亚某微型水电站	印度尼西亚	热带气候.	径流式水电站	9MW	小(2)型水电站	3312GW·h/50a 180000m <sup>2</sup>	LCA	1.2kgCO <sub>2</sub> eq/(MW·h)	无	[53]
33	比利时某抽水储能电站	比利时	温带海洋性气候.	非高山地区抽水蓄能电站	无	无	190GW·h/a	LCA	5.46gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[54]
34	威尔士某微型水电站	英国	温带海洋性气候.	无	70kW	小(2)型水电站	无	LCA	7.19±3.09gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[55]
	85kW										
35	佩尼·塞芬水处理工程;	英国	温带海洋性气候.	无	90kW	小(3)型水电站	无	LCA	2.14gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)	无	[56]
	瓦特里水库及水处理厂;				140kW				4.36gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)		
	斯特拉塔弗洛里达水处理厂				140kW				2.78gCO <sub>2</sub> eq/(kW·h)		

注:根据DL5180-2003水电枢纽工程等级划分及设计安全标准<sup>[57]</sup>:大(1)型水电站(总装机容量≥1200MW);大(2)型水电站(1200MW>总装机容量>300MW);中型水电站(300MW>总装机容量>50MW);小(1)型水电站(50MW>总装机容量>10MW);小(2)型水电站(总装机容量<10MW).

Steinhurst 等<sup>[7]</sup>的研究同样表明水电蓄水区域是水电碳排放的影响因素,地理位置差异会导致蓄水区的生物分解排放值不同.例如,在热带雨林地区的水电蓄水区,由于蓄水前原有树木密集,提供的碳截存较多;但在淹没后,树林碳截存功能被取缔,同时淹没区有机物生物质分解产生的碳排放量较大.因此,位于北美热带地区的水电水库的碳排放率高达1300~3000kgCO<sub>2</sub>eq/(MW·h).而位于非热带北部地区的水库蓄水区,由于原有树木密度较低,提供的碳截存较少,淹没后生物质分解产生的碳排放较少,因此,该地区水电碳排放率仅有0.5~152kgCO<sub>2</sub>eq/(MW·h).所以,水电的碳排放量与蓄水区面积有关.

**2.2.2.3 水电蓄水量** 水电碳足迹与水源的蓄水量关系密切,水电蓄水量规模直接影响其总发电量<sup>[58]</sup>.以溪洛渡水电站为例, LCA 研究所得单位发电碳足迹为 3.83kgCO<sub>2</sub>eq/(MW·h)<sup>[36]</sup>.杜海龙等<sup>[37]</sup>使

用 EIO-LCA 和 LCA 方法也对该水电进行了计算,所得单位发电碳足迹为 4.39gCO<sub>2</sub>eq/(kW·h).二者研究结果出现差异的主要原因:(1)方法论不同, LCA 和 EIO-LCA 方法底层计算逻辑具有差异;(2)区域降水量差异,四川省 2022 年平均降水量较 2017 年减少 96.65mm, 占比约 10.27%<sup>[59-60]</sup>.云南省 2022 年平均降水量较 2017 年减少 178.6mm, 占比约 13.21%<sup>[61-62]</sup>.因此,在年降水量减少的情况下,水电的单位发电碳足迹也随之减少.由此可知,水电蓄水量是水电碳排放影响因素之一,而当地的气候条件会对蓄水量产生直接影响.

**2.2.2.4 水电装机量** 2022 年,云南省溪洛渡水电的装机容量为 13860MW, 较 2017 年的容量 12600MW 增加了 1260MW.根据 DL5180-2003 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准,装机量大于等于 1200MW 的水库均属于大(1)型水电<sup>[57]</sup>.由此可知,

在 2017 年到 2022 年之间,溪洛渡水电站的装机容量增长量相当于在原有基础上增加了一个大(1)型水电.装机量的增多在运行维护阶段会产生更多的碳排放<sup>[20]</sup>,从而导致水电生命周期碳排放量增加.因此,2022 年溪洛渡水电站总碳排放量为  $3.83 \times 10^7 \text{tCO}_2\text{eq}$ ,2017 年的总碳排放量为  $2.51 \times 10^7 \text{tCO}_2\text{eq}$ . Verán-Leigh 等<sup>[45]</sup>对秘鲁两座装机容量分别为 172 和 220MW 的中型水电和一座装机容量为 18.4MW 小(1)型水电的碳排放进行对比分析.其水电单位发电量碳足迹分别为 2.06,2.42 和  $2.33 \text{gCO}_2\text{eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ .结果表明,在种类均为径流式水电和相同地理环境的情况下,水电规模越小,其单位发电碳足迹就越高.上述分析以不同地区的案例印证了 Pascale 等<sup>[63]</sup>的结论,即水电装机容量(水电等级)是碳排放的影响因素之一.

此外,水电的碳足迹还和项目规模有关.Pascale 等<sup>[63]</sup>以泰国农村地区为例,对比 3kW 水电、电网以及 7kVA 柴油发电机的全球变暖潜值(Global warming potential, GWP).研究表明,7kVA 的柴油发电机的 GWP 为 27,泰国国家电网的 GWP 为 18.5, 3kW 水电的 GWP 为 18.与大型水电相比,SHP 通常为偏远或贫困地区居民提供电力,具有自身优势.例如,SHP 具有可用资源丰富、易于安装等优势<sup>[64]</sup>.Pang 等<sup>[65]</sup>对中国 SHP 碳排放进行研究,结果表明水电运行阶段和建设阶段产生的 GHG 最大.因此,SHP 的碳减排与水电装机容量密切相关.

**2.2.2.5 水电类型** 水电类型包括蓄水式水电和径流式水电等.结合加拿大安大略省的多个水电案例分析得知,在相似地理位置下,径流式水电规模较蓄水式水电占地面积偏小,装机量在 10~52MW 之间.蓄水式水电装机量在 40~1499MW 之间.规模较小的径流式水电的平均单位发电碳足迹为  $1.5 \text{tCO}_2\text{eq}/(\text{GW}\cdot\text{h})$ ,体积较大的蓄水式水电的平均单位发电碳足迹为  $22.5 \text{tCO}_2\text{eq}/(\text{GW}\cdot\text{h})$ <sup>[66]</sup>.由此可知,在地理环境相似的情况下,径流式水电装机量较小,其对环境的影响和释放的 GHG 远小于体积较大的蓄水式水电.

不同类型的水电建造方式也是导致碳排放差异的因素.有学者对位于中国云南省南部澜沧江流域的糯扎渡水电系统中两种不同水电类型碳足迹进行对比分析.研究表明,在装机量同为 5850MW 时,土芯堆石坝(ECRD)的单位发电碳足迹为  $8.36 \text{gCO}_2\text{eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,寿命周期总碳排放为

$8.8 \text{MtCO}_2\text{eq}$ ;混凝土重力坝(CGD)的单位发电碳足迹为  $11.11 \text{gCO}_2\text{eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,寿命周期碳排放为  $11.69 \text{Mt CO}_2\text{eq}$ .可知,CGD 的碳排放大于 ECRD.二者碳足迹研究中,最显著的差别是在材料生产阶段,ECRD 系统对钢材、水泥和木材等高排放建筑材料的消耗较少,且材料与 GCD 相比多来自于本地,因此 ECRD 方案的二氧化碳排放量比 GCD 系统低 46%<sup>[43]</sup>.因此,不同类型水电建设材料的种类和来源是水电减碳的影响因素之一.

### 3 讨论

通过本文对水电碳足迹主题出版物的文献计量可知,目前对于水电碳足迹计算的研究关注度逐渐升高,相关出版物数量呈逐年上升的趋势.相关研究主要集中在水电工程、成本控制、环境管理和水电生命周期评估等方向,并且,现有出版物对于水电碳排放区域化差异的研究较为不足.

#### 3.1 区域化研究

为了更好地研究水电的碳足迹影响因素,考虑到不同水电的地理环境以及人为原因所造成的差异,一些学者开展了水电碳排放区域差异研究.刘宇等<sup>[29]</sup>在研究中指出,中国水电碳排放存在区域差距较大的问题.中国平均水电碳排放为  $16.76 \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,9 个省份比平均值低 60%以上,6 个省份比平均值低 20%~60%,然而大于等于平均值 $\pm 20\%$ 以上的仍有 11 个省市.其中,碳排放最大值为  $36.1 \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,最小值为  $2.5 \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ .水电碳排放的区域化差异主要由该地区水资源多少以及气候环境导致.虽然水电数量和种类同样会起到影响作用,但从空间层面来看,并非主要原因.例如,在中国大陆地区,水电主要集中在以东南、中部和西南为主的水资源丰富、降水量充足的南方地带.因此,湖南、湖北、广西、云南等地的水电碳足迹较低.相反,干旱、少雨的新疆、西藏、辽宁、北京和河北等北方城市,水电碳足迹较高.

本文在对水电碳足迹范围及影响因素的分析中也多次提及水电碳足迹区域化差异的特点.首先,在生命周期阶段,如果水电的选址地与材料产地距离间隔较小,且交通便利,则在建设阶段的碳排放会因交通运输产生的碳排放减少而降低.其次,位于热带地区和生物多样性程度较高、生物分布密度较大

地区的水电蓄水区,通常会因为淹没区原有有机物数量大,生物分解 GHG 排放较多,从而产生比其他地区更多的碳排放,并且,水电蓄水区碳排放通常被归类为水电运营阶段碳排放。Barros 等<sup>[67]</sup>指出,假设水电水库面积增加 5000km<sup>2</sup>,且该水电位于北温带和寒带地区,则碳排放可能会增加 1~2Tg C/a。然而,在热带地区(非亚马逊河流域)对同样的水电水库扩建,则因蓄水区生物质 GHG 排放多于北温带和寒温带地区,每年的碳排放量可能会增加 4Tg C/a。而亚马逊河流域的水电碳排放量则进一步增加到 7Tg C/a。所以,水电碳足迹与水电地理位置和环境有关。

同时,导致水电碳足迹区域差异的还有气候因素。在湿润多雨的地区,水电蓄水量通常高于干燥缺雨地区的水电蓄水量。因此,这些湿润地区的水电装机量和实际产能更为吻合,有效减少了装机量过剩的情况,从而避免了需要额外能源来维持机械运作的问题。相比之下,干燥缺雨地区由于水电蓄水量较低,可能会面临装机量过剩的问题,这不仅浪费资源,还会因为需要额外的能源来维持机械运转而导致更高的碳足迹。因此,气候因素在不同区域的水电碳足迹差异中起着关键作用,湿润多雨的地区具有显著的碳足迹优势。

总之,水电碳足迹的区域化差异是显著的,在进行水电规划和建造时,为了降低碳排放,应充分考量水电的区域化差异。然而,当前关于水电碳足迹区域化差异的文献较少,未来根据水电碳足迹的影响因素可以进一步从空间分布和地理位置的角度进行研究。

### 3.2 水电碳足迹研究存在的问题

尽管水电在世界范围内得到大力推广,然而,IPCC 虽然认为水电属于可再生能源,但同时指出,由于水电的环境影响较大,其是否是绿色能源的定义至今仍待明确<sup>[68-69]</sup>。在关于可再生能源和减缓气候变化的特别报告中,IPCC 将关于水电大坝碳排放的结论总结为对于水库是净排放还是净吸收还没有达成共识<sup>[38]</sup>。该报告将水电定义为每千瓦时发电产生的环境影响仅占包括风能和太阳能在内的任何其他能源的一半或更少<sup>[39]</sup>。该结论表明水电是优质的可再生能源,其环境危害较小。但由于在热带地区水电碳排放值极高,也有学者对水电是绿色能源的结论提出质疑。Fearnside<sup>[70]</sup>指出,尽管 IPCC 报告中

的汇总表明该研究使用了来自热带水坝的三个值,但其中罗列的来自不同气候带的 11 个水坝均不位于热带地区,对热带水电碳足迹案例举证较为缺乏。因此,对于水电低碳的性质仍存在争议。

由于水电碳足迹计算边界很难界定,许多研究存在对生命周期系统边界不统一而导致结果不精确的问题。譬如,巴西第一份国家温室气体排放清单中的估算忽略了水电涡轮机和溢洪道的碳排放<sup>[40]</sup>;Abril 等<sup>[71]</sup>指出水库中树木、木材在水上腐烂产生的二氧化碳常被忽视,且该情况在亚马逊水库中格外严重;Chu 等<sup>[72]</sup>指出,水电运行阶段化石能源使用统计不完整是影响中国水电碳足迹计算误差的主要原因之一。

尽管各国开始对水电全生命周期中的碳排放进行评估,但由于计算方法的差异、通用的数据库、多变的环境,以及水电自身因素(如淹没地区大小、淹没地区 GHG 吸收能力、蓄水区域的生物 GHG 释放等),目前还无法实现对水电碳排放进行统一的研究和优化管理。在世界范围内,对于水电完整的碳排放量计算研究还有待完善。

## 4 结论

4.1 对水电碳排放产生影响的主要因素有:水电碳足迹计算方法差异、水电生命周期中的建造阶段和运行阶段、水电蓄水区气候条件、水电蓄水量多少、水电装机量以及水电类型等。

4.2 水电具有蓄水面积越大,碳排放越多;装机量越多,维护和运行阶段因能源消耗产生的碳排放越多;气候越湿润的地方(热带雨林地区除外)产生的碳排放越少;热带雨林地区水电碳排放较多;径流式水电碳排放小于蓄水式水电站等特点。

4.3 水电地理位置、周边环境和所处地气候等区域性亦对水电碳排放产生突出的影响,从而改变了水电生命周期碳排放计算结果。

4.4 当前对水电碳排放区域化差异的研究较为缺少。在未来的研究中,可以国家为范围,对境内所有水电碳排放计算结果使用 GIS 技术进行地理信息建模,结合区域化差异,从地理空间位置的角度对水电碳排放问题进行进一步分析,从而对现有水电碳排放因素有更全面的理解。加强现有水电碳排放优化,在未来实现水电净零碳排放设计、管理和运行。

## 参考文献:

- [1] International Hydropower Association. 2021 hydropower status report [EB/OL]. <https://www.hydropower.org/publications/2021-hydropower-status-report>. 2021/2024-06-21.
- [2] International Energy Agency. Hydropower special market report – analysis [EB/OL]. IEA. <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>. 2021/2024-06-21.
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203\\_1901004.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901004.html). 2021/2024-06-03.  
National Bureau of Statistics. Statistical communiqué of the People's Republic of China on the national economic and social development in 2020 [EB/OL]. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203\\_1901004.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901004.html). 2021/2024-06-03.
- [4] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm). 2021/2024-06-21.  
State Council. Notice of the state council on issuing the carbon peak action plan before 2030\_environmental monitoring, protection and governance\_ [EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm). 2021/2024-06-21.
- [5] Kadiyala A, Kommalapati R, Huque Z. Evaluation of the life cycle greenhouse gas emissions from hydroelectricity generation systems [J]. Sustainability, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2016, 8(6):539.
- [6] Kumar A, Yu Z G, Klemeš J J, et al. A state-of-the-art review of greenhouse gas emissions from Indian hydropower reservoirs [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,320:128806.
- [7] Steinhurst W, Patrick K. Hydropower greenhouse gas emissions [J]. Conservation Law Foundation, 2012,24(6):1-26.
- [8] Gemechu E, Kumar A. A review of how life cycle assessment has been used to assess the environmental impacts of hydropower energy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022,167:112684.
- [9] International Hydropower Association. Hydropower's carbon footprint [EB/OL]. <https://www.hydropower.org/factsheets/greenhouse-gas-emissions>. /2024-06-25.
- [10] Hertwich E G. Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(17):9604-9611.
- [11] 侯剑华,胡志刚.CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望 [J]. 现代情报, 2013,33(4):99-103.  
Hou J H, Hu Z G. Review and prospect of citespace software application research [J]. Modern Intelligence, 2013,33(4):99-103.
- [12] 张 宁,张 盛,杨海超,等.粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 [J]. 环境科学, 2019,40(12):5581-5592.  
Zhang N, Zhang S, Yang H C, et al. Quantitative and visual analysis of soil pollution problems in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Environmental Science, 2019,40(12):5581-5592.
- [13] Gunkel G. Hydropower – A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions [J]. Clean – Soil, Air, Water, 2009,37(9): 726-734.
- [14] Briones-Hidrovo A, Uche J, Martínez-Gracia A. Determining the net environmental performance of hydropower: A new methodological approach by combining life cycle and ecosystem services assessment [J]. Science of the Total Environment, 2020,712:136369.
- [15] 杜海龙.金沙江大型水电站碳足迹的生命周期分析研究 [D]. 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), 2018.  
Du H L. Research on the life cycle analysis of carbon footprint of large hydropower stations on the Jinsha River [D]. Chongqing: University of Chinese Academy of Sciences (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [16] Li Z, Du H, Xu H, et al. The carbon footprint of large- and mid-scale hydropower in China: Synthesis from five China's largest hydro-project [J]. Journal of Environmental Management, 2019,250:109363.
- [17] Siddiqui O, Dincer I. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: A life cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,164: 848-860.
- [18] 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, (8vo 62):1366-1373.  
Huang Y Q, Liu Y R, Xu W B. Study on carbon emissions during the whole life cycle of water conservancy and hydropower projects: A case study of the Quanmutang project [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022,(8vo 62):1366-1373.
- [19] Zhang Q, Karney B, MacLean H L, et al. Life-cycle inventory of energy use and greenhouse gas emissions for two hydropower projects in China [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2007,13(4):271-279.
- [20] Wang J, Chen X, Liu Z, et al. Assessing the water and carbon footprint of hydropower stations at a national scale [J]. Science of the Total Environment, 2019,676:595-612.
- [21] 林 雷.凉头水电站技改项目风险管理研究 [D]. 昆明:昆明理工大学, 2014.  
Lin L. Research on risk management of Liangtou Hydropower Station technical transformation project [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [22] Quintana-Pedraza G A, Vieira-Agudelo S C, Muñoz-Galeano N. A cradle-to-grave multi-pronged methodology to obtain the carbon footprint of electro-intensive power electronic products [J]. Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019,12(17):3347.
- [23] Bhat V I K, Prakash R. Life cycle analysis of run-of river small hydro power plants in India [J]. The Open Renewable Energy Journal, 2008, 1(1):11-16.
- [24] Varun, Prakash R, Bhat I K. Life cycle greenhouse gas emissions estimation for small hydropower schemes in India [J]. Energy, 2012, 44(1):498-508.
- [25] 雷冬梅,徐晓勇,胡 斌,等.水电开发对流域自然生态系统影响的研究 [J]. 安徽农业科学, 2010,(29vo 38):16401-16403,16406.  
Lei D M, Xu X Y, Hu B, et al. Research on the impact of hydropower development on the natural ecosystem of the basin [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010,(29vo 38):16401-16403,16406.
- [26] Franchetti M J, Apul D. Carbon footprint analysis: Concepts, methods, implementation, and case studies [M]. New York: CRC Press, 2012.
- [27] Lu C, Ma C, Zhang Y, et al. Ecological Footprint of Hydropower Development in China and the Associated Reductions of Greenhouse Gas Emission [J]. Journal of Resources and Ecology, 2013,4(4):369-

- 373.
- [28] Bello M O, Solarin S A, Yen Y Y. The impact of electricity consumption on CO<sub>2</sub> emission, carbon footprint, water footprint and ecological footprint: The role of hydropower in an emerging economy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018,219:218–230.
- [29] 刘宇,任品桥,郑焱,等.水力发电生命周期评价及碳足迹区域化分析 [J]. *北京工业大学学报*, 2024,50(3):282–289.  
Liu Y, Ren P Q, Zheng Y, et al. Life cycle assessment and regional analysis of carbon footprint of hydropower [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2024,50(3):282–289.
- [30] 邹一雄,刘羽.小型水电站生命周期碳足迹研究 [J]. *水电与新能源*, 2020,34(2):31–35.  
Zou Y X, Liu Y. Study on the life cycle carbon footprint of small hydropower stations [J]. *Hydropower and New Energy*, 2020,34(2): 31–35.
- [31] Li X, Gui F, Li Q. Can hydropower still be considered a clean energy source? Compelling evidence from a middle-sized hydropower station in China [J]. *Sustainability*, 2019,11(16):4261.
- [32] 侯公羽,马晓赞,杨振华,等.抽水蓄能电站全生命周期碳排放计算与分析 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(S1):326–335.  
Hou G Y, Ma X Y, Yang Z H, et al. Calculation and analysis of carbon emissions over the entire life cycle of pumped storage power stations [J]. *Chinese Environmental Science*, 2023,43(S1):326–335.
- [33] Liu X, Zheng X, Wu L, et al. Techno-ecological synergies of hydropower plants: Insights from GHG mitigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,853:158602.
- [34] Water Power Technologies Office. Tracking the carbon footprint of hydropower [EB/OL]. <https://www.energy.gov/eere/water/tracking-carbon-footprint-hydropower>. 2024/2024-06-20.
- [35] Aung T S, Fischer T B, Azmi A S. Are large-scale dams environmentally detrimental? Life-cycle environmental consequences of mega-hydropower plants in Myanmar [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020,25(9):1749–1766.
- [36] 夏欣.溪洛渡水电站生命周期环境影响分析 [J]. *水电站设计*, 2022,38(4):71–75.  
Xia X. Life cycle environmental impact analysis of Xiluodu Hydropower Station [J]. *Hydropower Station Design*, 2022,38(4):71–75.
- [37] 杜海龙,王文忠.清江隔河岩水电开发的综合碳减排效益分析 [J]. *长江科学院院报*, 2024,41(11):49–55,74.  
Du H L, Wang W Z. Comprehensive carbon emission reduction benefit analysis of Geheyan hydropower development in Qingjiang River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024,41(11): 49–55,74.
- [38] 杜海龙,魏俊,李哲.基于 ISO14067 评估可渡河水电开发碳减排潜力 [J]. *人民珠江*, 2017,38(12):45–49.  
Du H L, Wei J, Li Z. Evaluating the carbon emission reduction potential of Keduhe hydropower development based on ISO14067 [J]. *People's Pearl River*, 2017,38(12):45–49.
- [39] Ribeiro F D M, Da Silva G A. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010,18(1):44–54.
- [40] Bor A, Üçtuğ F G. Environmental and economic life cycle assessment of a run-of-the-river type hydroelectricity power plant in Turkey [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2022,41(1): e13716.
- [41] Briones Hidrovo A, Uche J, Martínez-Gracia A. Accounting for GHG net reservoir emissions of hydropower in Ecuador [J]. *Renewable Energy*, 2017,112:209–221.
- [42] Geller M, Meneses A A D M. Life cycle assessment of a small hydropower plant in the Brazilian Amazon [J]. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2016,4(4): 379–391.
- [43] Zhang S, Pang B, Zhang Z. Carbon footprint analysis of two different types of hydropower schemes: comparing earth-rockfill dams and concrete gravity dams using hybrid life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015,103:854–862.
- [44] Zhang J, Xu L. Embodied carbon budget accounting system for calculating carbon footprint of large hydropower project [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015,96:444–451.
- [45] Verán-Leigh D, Vázquez-Rowe I. Life cycle assessment of run-of-river hydropower plants in the Peruvian Andes: A policy support perspective [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019,24(8):1376–1395.
- [46] Barros M V, Piekarski C M, De Francisco A C. Carbon footprint of electricity generation in Brazil: An analysis of the 2016–2026 Period [J]. *Energies*, 2018,11(6):1412.
- [47] Denholm P, Kulcinski G L. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004,45(13/14):2153–2172.
- [48] Gagnon L, Van De Vate J F. Greenhouse gas emissions from hydropower [J]. *Energy Policy*, 1997,25(1):7–13.
- [49] Rule B M, Worth Z J, Boyle C A. Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009,43(16):6406–6413.
- [50] Yumpu.com. EPD Run-of-river Power Plant Wildegg-Brugg - Axpo [EB/OL]. <https://www.yumpu.com/en/document/read/7299827/epd-run-of-river-power-plant-wildegg-brugg-axpo>. 2016/2024-07-01.
- [51] Arnoy S, Modahl I S. Life cycle data for hydroelectric generation at Embretsfoss 4 (E4) power station [R]. OR.03.13, Energy Buskerud Co., 2013.
- [52] Donnelly C R, Carias A, Ali M, et al. An assessment of the life cycle costs and GHG emissions for alternative generation technologies [EB/OL]. <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/21397681>. 2010/2025-01-15.
- [53] Hanafi J, Riman A. Life cycle assessment of a mini hydro power plant in Indonesia: A case study in Karai River [J]. *Procedia CIRP*, 2015, 29:444–449.
- [54] Oliveira L, Messagie M, Mertens J, et al. Environmental performance of electricity storage systems for grid applications, a life cycle approach [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015,101:326–335.
- [55] Ueda T, Roberts E S, Norton A, et al. A life cycle assessment of the construction phase of eleven micro-hydropower installations in the UK [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,218:1–9.

- [56] Gallagher J, Styles D, McNabola A, et al. Life cycle environmental balance and greenhouse gas mitigation potential of micro-hydropower energy recovery in the water industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015,99:152–159.
- [57] DL5180–2003 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准 [S]. DL5180–2003 Classification and design safety standards for hydropower hub projects [J].
- [58] Turner S W D, Hejazi M, Kim S H, et al. Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs [J]. *Energy*, 2017,141:2081–2090.
- [59] 四川省生态环境厅.2022 年四川省生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://sthjt.sc.gov.cn/sthjt/c104157/2023/6/5/644b1b19bbe249cb8b302ae8de2f1538.shtml>. 2023/2024–06–20. Sichuan Provincial Department of Ecology and Environment. 2022Sichuan provincial ecological environment bulletin [EB/OL]. <https://sthjt.sc.gov.cn/sthjt/c104157/2023/6/5/644b1b19bbe249cb8b302ae8de2f1538.shtml>. 2023/2024–06–20.
- [60] 四川省水利厅.2017 年四川省水资源公报 [EB/OL]. <http://slt.sc.gov.cn/scsslt/szyzwgk/2020/3/9/22121685d4cc4cd6beec059cc7bf977e.shtml>. 2020/2024–06–20. Sichuan Provincial Water Resources Department. 2017 Sichuan provincial water resources bulletin [EB/OL]. <http://slt.sc.gov.cn/scsslt/szyzwgk/2020/3/9/22121685d4cc4cd6beec059cc7bf977e.shtml>. 2020/2024–06–20.
- [61] 云南省水利厅.2017 年云南省水资源公报 [EB/OL]. [http://wcb.yn.gov.cn/html/2018/shuiziyuangongbao-tongji\\_1029/52741.html](http://wcb.yn.gov.cn/html/2018/shuiziyuangongbao-tongji_1029/52741.html). 2018/2024–06–20. Yunnan Provincial Water Resources Department. Yunnan provincial water resources bulletin 2017 [EB/OL]. [http://wcb.yn.gov.cn/html/2018/shuiziyuangongbao-tongji\\_1029/52741.html](http://wcb.yn.gov.cn/html/2018/shuiziyuangongbao-tongji_1029/52741.html). 2018/2024–06–20.
- [62] 云南省水利厅.省水文局编发《2022 年云南水文情势报告》\_云南省水利厅 [EB/OL]. [http://wcb.yn.gov.cn/html/2023/yewuzhuanlan\\_0315/56088.html](http://wcb.yn.gov.cn/html/2023/yewuzhuanlan_0315/56088.html). 2023/2024–06–20. Yunnan Provincial Department of Water Resources. The provincial hydrological bureau compiled and issued the "2022 Yunnan Hydrological Situation Report"\_Yunnan Provincial Department of Water Resources [EB/OL]. [http://wcb.yn.gov.cn/html/2023/yewuzhuanlan\\_0315/56088.html](http://wcb.yn.gov.cn/html/2023/yewuzhuanlan_0315/56088.html). 2023/2024–06–20.
- [63] Pascale A, Urmee T, Moore A. Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand [J]. *Renewable Energy*, 2011,36(11):2799–2808.
- [64] Islam Miskat M, Ahmed A, Rahman Md S, et al. An overview of the hydropower production potential in Bangladesh to meet the energy requirements [J]. *Environmental Engineering Research*, 2020,26(6):200514–0.
- [65] Pang M, Zhang L, Wang C, et al. Environmental life cycle assessment of a small hydropower plant in China [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015,20(6):796–806.
- [66] Mallia E, Lewis G. Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generation in the province of Ontario, Canada [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013,18(2):377–391.
- [67] Barros N, Cole J J, Tranvik L J, et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude [J]. *Nature Geoscience*, 2011,4(9):593–596.
- [68] IPCC. Hydropower [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/hydropower/2011/2024-07-01>.
- [69] IPCC. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>. 2011/2024–07–01.
- [70] Fearnside P M. Emissions from tropical hydropower and the IPCC [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015,50:225–239.
- [71] Abril G, Parize M, Pérez M A P, et al. Wood decomposition in Amazonian hydropower reservoirs: An additional source of greenhouse gases [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2013,44:104–107.
- [72] Chu Y, Pan Y, Zhan H, et al. Systems accounting for carbon emissions by hydropower plant [J]. *Sustainability*, 2022,14(11):6939.

**作者简介：**李 朋(1986–),男,湖北仙桃人,高级工程师,博士.主要从事能源与环保领域、绿色供应链相关研究.发表论文 20 余篇.lipengzt@139.com.