

引用格式: 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 regionalized carbon footprint analysis of hydropower generation[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(3): 282-289. (in Chinese)

## 水力发电生命周期评价及碳足迹区域化分析

刘宇, 任品桥, 郑焱, 高峰, 孙博学, 龚先政  
(北京工业大学工业大数据应用技术国家工程实验室, 北京 100124)

**摘要:** 基于生命周期评价方法, 对我国典型水电站水力发电生命周期碳足迹及其他环境影响进行了评估, 并分析了不同区域水力发电碳足迹的差异性及原因。结果显示, 三峡水电站单位水电碳足迹(以 $\text{CO}_2$ 当量计)为 $12.7 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ , 主要来源于运行阶段, 造成其他环境影响的主要阶段为土建工程阶段, 其次为机电设备制造阶段; 我国不同省级行政区单位水电碳足迹差距较大, 与全国平均值相差 $\pm 20\%$ 以上的省级行政区有24个; 各省级行政区运行阶段碳足迹占比为 $47.94\% \sim 96.82\%$ , 占比超过 $80\%$ 的省级行政区有19个。研究结果可以为我国及省级发电清单编制与电网结构调整提供数据支撑。

**关键词:** 生命周期评价; 碳足迹; 水力发电; 环境影响; 温室气体排放; 区域化分析

中图分类号: X51

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2024)03-0282-08

doi: 10.11936/bjtxb2022080001

## Life Cycle Assessment and Regionalized Carbon Footprint Analysis of Hydropower Generation

LIU Yu, REN Pinqiao, ZHENG Yan, GAO Feng, SUN Boxue, GONG Xianzheng  
(National Engineering Laboratory for Industrial Big-Data Application Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the method of life cycle assessment, this study evaluated the global warming (carbon footprint) and other environment impacts of hydropower, and analyzed the differences in the carbon footprint of hydropower in different regions. The results show that the global warming impact (carbon footprint) per unit of hydropower of the Three Gorges Hydropower Station is  $12.7 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ , which mainly originates from the operation stage. The main stage causing other environment impacts is the civil engineering stage, followed by the electro mechanical equipment manufacturing stage. The results of regional analysis show that the unit hydropower carbon in different provinces is quite different, and there are 24 provinces that differ from the national average by more than  $\pm 20\%$ . The carbon footprint of each province during the operation stage accounted for  $47.94\% \sim 96.82\%$ , and 19 provinces during the operation stage accounted for more than  $80\%$ . The result can provide support for the adjustment and

收稿日期: 2022-08-04; 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3505204, 2022YFC3901205-3); 北京工业大学“城市碳中和”科技创新基金资助项目(048000514122666)

作者简介: 刘宇(1984—), 男, 副教授, 主要从事材料生命周期评价、产品碳足迹核算方面的研究, E-mail: liuyu@bjut.edu.cn

optimization of the power structure at national and provincial levels.

**Key words:** life cycle assessment; carbon footprint; hydropower; environmental impact; greenhouse gases ( GHG ) emissions; regionalization analysis

电力行业作为供能领域的关键组成部分,是我国未来能源战略的重中之重。2020年我国火力发电CO<sub>2</sub>排放量近40亿t,约占全国能源活动CO<sub>2</sub>排放量的45%。基于绿色低碳转型的新型电力系统构建是实现我国碳达峰、碳中和目标的必要支撑<sup>[1]</sup>。2006年到2019年,我国电力行业通过发展非化石能源、降低煤耗和线损率等措施,累计减少CO<sub>2</sub>排放约159.4亿t,有效减缓了CO<sub>2</sub>排放总量的增长,其中可再生能源发电技术对碳减排的贡献巨大,而水力发电由于技术成熟、资源丰富、发电成本低等优点已成为新型电力系统构建的优先选择,水电建设在支撑国民经济发展中发挥了重要作用<sup>[2-3]</sup>。根据相关统计,2021年仅三峡水电站发电量相对于传统火电可减少CO<sub>2</sub>排放2.2亿t,且发展水力发电对推动西南地区不同发电方式协同互补的意义重大<sup>[4]</sup>。另一方面,水力发电在避免化石燃料燃烧排放的同时,可能会带来其他温室气体排放源,例如,水电站运行过程由于周期性的蓄水、放水会淹没土壤,造成土壤内生物物质腐烂,产生一定量的温室气体;水电站建设需消耗大量钢铁、水泥等基础材料,其生产过程也会造成大量温室气体排放及其他环境影响<sup>[5]</sup>。因此,需要从全生命周期的角度定量化评估水力发电的优势与不足。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法通过对产品系统生命周期(包括从原材料开采、加工、产品生产、运输、销售、使用、回收循环利用和最终处置的全过程)中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价,实现产品综合环境影响的科学定量。该方法作为目前国内外分析产品环境负荷的主流工具,已应用于对水力发电温室气体排放及其他环境影响的定量化研究,如黄跃群等<sup>[6]</sup>对犬木塘水利工程的生命周期碳排放进行研究后发现,水力发电的碳排放主要来自工程建设阶段,占其生命周期(不包括水电站服役过程周期蓄水造成的土壤排放)碳排放量的92.3%。还有部分学者专门针对水电站运行阶段的温室气体排放开展了研究,Osamah等<sup>[7]</sup>的研究结果显示,水力发电的温室气体排放主要集中于运行阶段,当考虑蓄水、放水淹没土壤造成温室气体排放时,运行阶段对全球变暖指标的贡献

占比超过了80%,目前已知的其他相关研究的该数据范围为-0.05~256.1g/(kW·h)<sup>[8-14]</sup>(全文以CO<sub>2</sub>当量计)。杜海龙等<sup>[12]</sup>对长江上游某特大型水电站进行研究后发现,水库被淹没前温室气体的年释放量约为-4.86万tCO<sub>2eq</sub>,淹没后预测的温室气体通量为2540万tCO<sub>2eq</sub>。汪朝辉等<sup>[14]</sup>对主要研究水库CO<sub>2</sub>排放通量的研究进行统计后,得出通量数值范围为-23.4~184.1mmol/(m<sup>2</sup>·d)。杨萌等<sup>[15]</sup>研究发现该数值与上下游河道的不同位置也有关系。夏欣等<sup>[16]</sup>综述了多个水电站全生命周期碳排放的相关研究后发现,水电运行阶段对于全生命周期温室气体排放的影响显著,占比达到58.57%~79.45%,且运行阶段中CH<sub>4</sub>排放量和水库面积成对数分布,其中大型水电站蓄水后温室气体通量较大。综上所述,水库运行阶段释放的温室气体是水电站排放温室气体的主要组成部分,也是水电能源清洁性问题的争议点<sup>[17-19]</sup>。此外,生命周期评价方法可实现不同发电方式的比较。张社荣等<sup>[20]</sup>对某大型水电枢纽生命周期的碳排放进行研究后发现,该工程的碳排放因子为14.09g/(kW·h),仅为火电的1.71%;Mahmud等<sup>[21]</sup>对光电、生物质发电和水电(抽水蓄能)进行了比较,发现10项影响类型中,水电在全球变暖潜值、富营养化等8项影响类型中的影响均最大。

## 1 方法与数据

### 1.1 目的与范围

基于生命周期评价方法综合评估水力发电各阶段的温室气体排放及其他环境影响,考虑我国水力发电的区域差异性,对各省份水电的碳足迹进行定量化分析,为我国及省级单位发电温室气体排放清单编制及电网结构调整提供支撑。

研究选取1kW·h水力发电作为功能单位。系统边界包括水电站建设所需原材料/能源生产及运输、水电站建设(包括机电设备生产与土建工程施工)和水电站运行阶段,如图1所示。目前我国大部分水电站仍处于服役期,水电站拆除的相关数据较少,且为保护生态环境,避免拆除导致的环境影响,大坝可作为景点供参观,故本研究的系统边界不

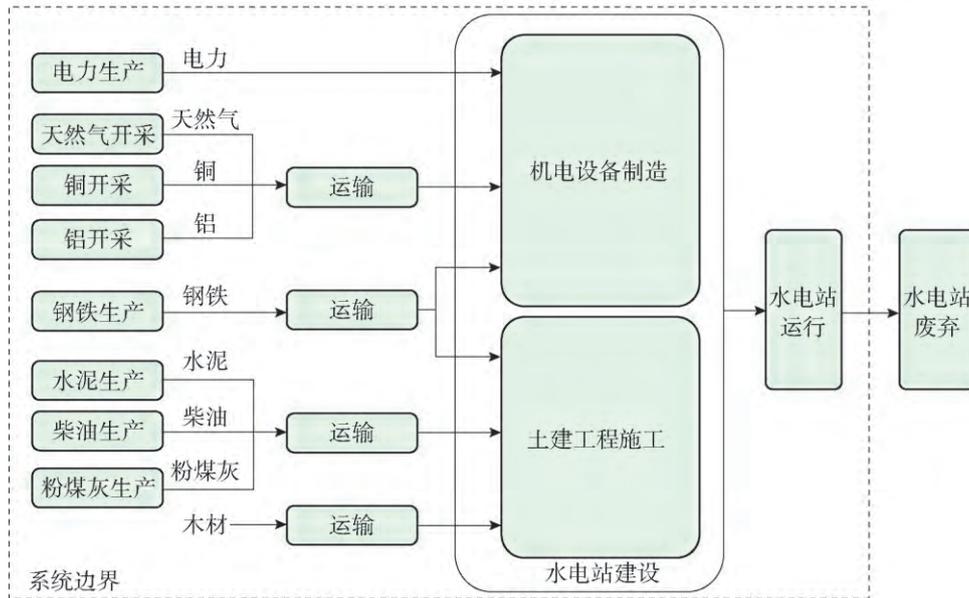


图1 水力发电生命周期评价的系统边界

Fig. 1 System boundary of life cycle assessment of hydropower

包括水电站废弃阶段。

### 1.2 清单分析数据来源

水电站大坝、厂房和发电机组等建设的原材料/能源消耗及运行阶段的温室气体排放清单,取自三峡水电站的相关研究报告<sup>[10]</sup>,建设阶段单位净发电量的主要材料及能源消耗如表1所示。上游原材料生产、能源生产与运输清单取自 Sino-center 数据库、Ecoinvent 数据库<sup>[22]</sup>与相关文献<sup>[23-25]</sup>。

表1 水电站的建设阶段单位净发电量的主要材料与能源消耗

Table 1 Main materials and energy consumption of net power generation in the construction stage

阶段	输入	单位	消耗量
机电设备	钢铁	t/(kW·h)	$2.89 \times 10^{-8}$
	不锈钢	t/(kW·h)	$3.39 \times 10^{-9}$
	铜	t/(kW·h)	$1.11 \times 10^{-9}$
	铝	t/(kW·h)	$9.78 \times 10^{-12}$
	天然气	m <sup>3</sup> /(kW·h)	$9.78 \times 10^{-7}$
	电	kW·h	$2.95 \times 10^{-5}$
土建工程	水泥	t/(kW·h)	$1.391 \times 10^{-6}$
	钢铁	t/(kW·h)	$2.088 \times 10^{-7}$
	粉煤灰	t/(kW·h)	$3.978 \times 10^{-6}$
	木材	m <sup>3</sup> /(kW·h)	$1.025 \times 10^{-8}$
	柴油	t/(kW·h)	$9.025 \times 10^{-8}$

### 1.3 影响评价模型及软件工具

使用生命周期评价软件 SimaPro 9.0 建立三峡

水电站单位水电的生命周期模型,影响评价方法选用 ReCiPe 2016 midpoint (H)。该方法由荷兰 Pre 咨询公司和莱顿大学共同研发,涵盖全球变暖、臭氧层损耗和土壤酸化等 18 类影响评价指标及人体健康等 3 类损害评价指标。碳足迹核算基于 ReCiPe 2016 方法中全球变暖特征化模型进行计算,该模型直接引用 IPCC 方法学,将各类温室气体的全球变暖潜势作为特征化因子。

## 2 典型水力发电的生命周期评价

基于上文确定的方法与基础数据,对水力发电系统边界内各阶段的输入输出数据开展生命周期清单分析。文献[10]预估三峡水电站年均发电量为 882 亿 kW·h,机械设备使用寿命设定 60 年,各类建筑物、坝体、渠道等技术使用寿命根据文献[26-27]设定 150 年,将资源、能源与排放数据分摊到单位发电量上,得到功能单位产品的生命周期清单,进一步基于选取的影响评价方法体系开展碳足迹及其他环境影响分析。

### 2.1 碳足迹清单分析

本研究计算得到的水力发电在机电设备制造、土建工程与运输阶段的主要温室气体排放量如表 2 所示,进一步考虑水电站运行阶段的土壤碳排放量(由于水电站周期性蓄水、放水淹没土壤,导致土壤内生物腐烂,释放温室气体),得到水力发电生命周期各阶段的碳足迹,如图 2 所示。结果显示,单位水力发电碳足迹为 12.67 g/(kW·h),主要来源

表2 水力发电各生命周期阶段的温室气体排放清单

Table 2 Greenhouse gases emissions of each stage of hydroelectric power generation kg/(kW·h)

温室气体类型	机电设备	运输	土建工程	共计
CO <sub>2</sub>	7.50 × 10 <sup>-5</sup>	7.29 × 10 <sup>-5</sup>	1.12 × 10 <sup>-3</sup>	1.27 × 10 <sup>-3</sup>
CH <sub>4</sub>	9.46 × 10 <sup>-8</sup>	3.52 × 10 <sup>-9</sup>	9.30 × 10 <sup>-7</sup>	1.03 × 10 <sup>-6</sup>
N <sub>2</sub> O	2.74 × 10 <sup>-10</sup>	3.36 × 10 <sup>-9</sup>	4.12 × 10 <sup>-9</sup>	7.76 × 10 <sup>-9</sup>

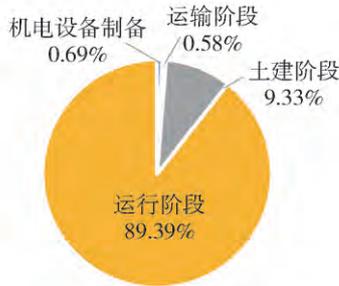


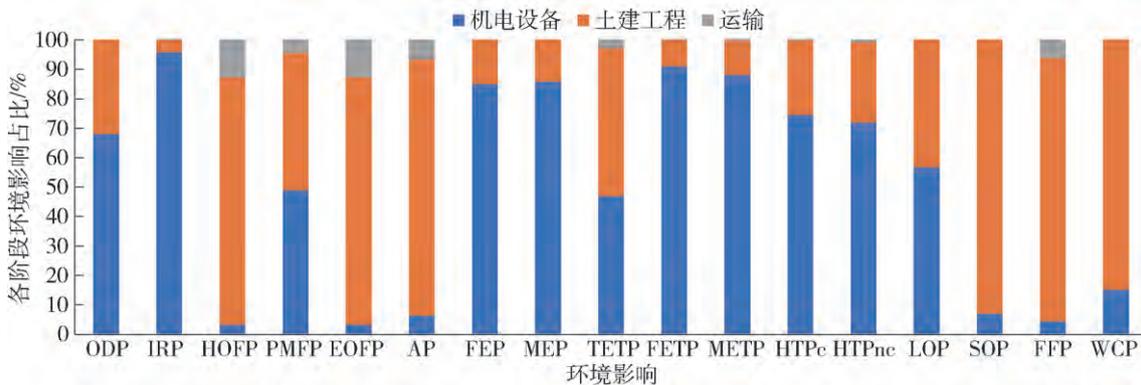
图2 水力发电各阶段碳足迹

Fig. 2 Carbon footprint of hydroelectric power generation at each stage

于运行阶段,占比达到了89.68%,其次为土建工程阶段,占比为9.13%,机电设备制造和原材料运输阶段占比较小。造成运行和土建工程阶段碳排放的主要原因是运行阶段淹没的土壤中微生物的腐烂和土建工程中大量钢铁和水泥的使用。Osamah等<sup>[7]</sup>的研究结果显示,运行阶段的温室气体排放占比超过80%,与本研究结果相似,故未来水力发电的碳减排工作需重点关注运行阶段温室气体排放的削减。

2.2 生命周期影响评价

基于选取的影响评价方法体系,对水力发电生



ODP—臭氧消耗; IRP—电离辐射; HOFP—光化学烟雾对人体损害; PMFP—颗粒物生成; EOFP—光化学烟雾的生态损害; AP—陆地酸化; FEP—淡水富营养化; MEP—海洋富营养化; TETP—陆地生态毒性; FETP—淡水生态毒性; METP—海洋生态毒性; HTPc—人体致癌毒性; HTPnc—人体非致癌毒性; LOP—土地占用; SOP—矿产资源稀缺性; FFP—化石能源消耗; WCP—水资源耗竭。

图3 水力发电各阶段特征化结果

Fig. 3 Characterization results of each stage of hydropower generation

命周期除全球变暖 (globe warming potential ,GWP) 指标的其他环境影响潜力开展评估,如图3所示。结果显示,水力发电的其他环境影响主要来源于水电站的建设阶段,其中机电设备制造阶段贡献较大的环境影响依次为 IRP、FETP 和 METP,占比分别为 95.89%、91.07% 和 88.10%,主要来源于电力与金属铜原料的使用,电力与金属铜原料的生产过程对上述3种环境影响的贡献占比均在99%以上;土建工程阶段贡献较大的环境影响依次为 SOP、FFP 和 AP,占比分别为 92.96%、89.45% 和 86.89%,主要来源于水泥和钢铁的制造阶段,该阶段中水泥和钢铁制造过程对上述3种环境影响的贡献占比分别为 99.89%、60.59% 和 76.80%。因此,在建设阶段减少金属铜、水泥和钢铁的投入,提升可再生能源电力的使用比例,可以有效减少水电的环境影响。运输阶段对环境影响的贡献较小,仅在个别环境影响类型中有所体现,该阶段 HOFP、EOFP 和 FFP 指标的贡献占比分别为 25.11%、29.23% 和 20.00%。由于运行阶段仅考虑土壤温室气体排放带来的环境影响,故不涉及 GWP 外其他环境影响指标。

### 3 水力发电碳足迹的区域化分析

水力发电受区域可再生资源禀赋、装机规模等因素影响,其碳足迹相对于火力发电具有更强的区域差异性。本研究基于典型水电站的温室气体排放分析结果,考虑大 I 型、大 II 型、中型 3 类水电站进一步探索不同省份水力发电碳足迹的差异,为区域电力生命周期清单的建立提供支撑。

各省历年单位水力发电建设阶段碳足迹的计算公式为

$$M_{(x,y)} = \frac{\sum (P_i \cdot M_i)}{\sum P_i} \quad (1)$$

式中:  $M_{(x,y)}$  为  $x$  省第  $y$  年水力发电在建设阶段的碳足迹,  $g/(kW \cdot h)$ ;  $P_i$  为  $x$  省内水电站  $i$  的年均发电量,  $kW \cdot h$  (数据通过《中国水力发电年鉴》及文献[10]等统计数据获得);  $M_i$  为水电站  $i$  单年单位发电量建设阶段的碳足迹,  $g/(kW \cdot h)$  (将水电站建设期的碳足迹分摊到服役期每年单位发电量上)。

水电站  $i$  单年单位发电量建设阶段的碳足迹计算公式为

$$M_i = \frac{I_i \cdot J}{h \cdot P_i} Q \quad (2)$$

式中:  $I_i$  为  $x$  省内水电站  $i$  的装机容量,  $kW$  (本研究共搜集了 995 个水电站的装机容量,其中 614 个水电站已投产,不考虑规划、预备、在建及搁置的水电站及 2020 年后投产的水电站和无法查明具体投产年份的水电站,其中 508 个水电站用于本研究);  $J$  为水电站所属类型(大 I 型、大 II 型、中型)单位装机容量在服役期内的发电量,  $kW \cdot h$  (根据 3 类水电

站中各水电站单位装机容量对应的发电量分别与其年均发电量  $P_i$  计算加权平均得到);  $h$  为水电站  $i$  所属类型大 I 型、大 II 型、中型的服役年限,据相关资料将大 I 型、大 II 型、中型 3 类水电站的服役年限分别设定为 150 年、100 年和 50 年<sup>[27-28]</sup>;  $Q$  为典型水电站单位发电量建设阶段的碳足迹,  $g/(kW \cdot h)$  (数据采用本研究对三峡水电站的研究结果)。

各省历年水力发电运行阶段碳足迹的计算公式为

$$E_{(x,y)} = \frac{\sum E_{大I} P_{大I} + \sum E_{大II} P_{大II} + \sum E_{中} P_{中}}{\sum P_i} \quad (3)$$

式中:  $E_{(x,y)}$  为  $x$  省在第  $y$  年内水力发电运行阶段的碳足迹,  $g/(kW \cdot h)$ ;  $E_{大I}$ 、 $E_{大II}$  和  $E_{中}$  分别为 3 个工程等级水电站运行阶段因蓄放水周期性淹没土壤造成的温室气体排放,数据取自国内相关研究<sup>[9-11,13]</sup>;  $P_{大I}$ 、 $P_{大II}$  和  $P_{中}$  分别为  $x$  省第  $y$  年 3 个工程等级水电站的发电量,  $kW \cdot h$  (数据通过对  $y$  年仍在服役的 3 类水电站的年均发电量分别求和获得)。将运行阶段碳足迹  $E_{(x,y)}$  与建设阶段碳足迹  $M_{(x,y)}$  相加,得到  $x$  省第  $y$  年单位水电的碳足迹。

基于上述计算方法,分析我国 27 个省级行政区的水力发电碳足迹,并计算各省级行政区 10 年间的平均值,如图 4 所示。结果显示,我国平均水力发电碳足迹为  $16.76 g/(kW \cdot h)$ ,各省级行政区间差异较大。其中,湖北、河南等 9 个省级行政区的碳足迹比国家平均水平低 60% 以上;江西、重庆等 6 个省级行政区碳足迹比国家平均水平低 20% ~ 60%;甘肃等 3 个省级行政区碳足迹在国家平均水平  $\pm 20%$  以内;新疆、西藏等 8 个省级行政区碳足迹比国家平均

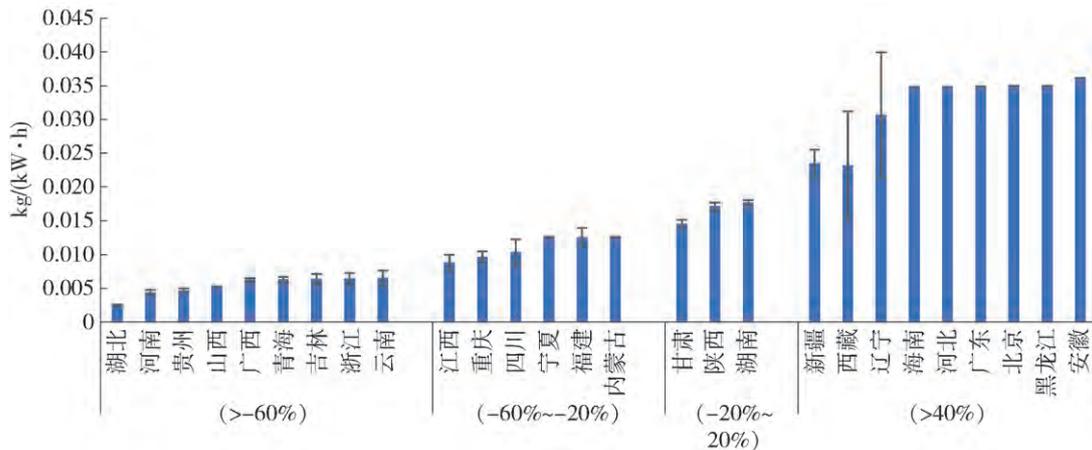


图 4 我国部分省级行政区单位水力发电的碳足迹

Fig. 4 Carbon footprint of hydropower generation in each province in China

水平高出40%以上。我国单位水电碳足迹最大和最小的省级行政区分别为安徽省和湖北省,分别为36.1 g/(kW·h)和2.5 g/(kW·h),原因为:1)湖北省的水电站I值较大,即相同的装机容量,湖北省的水电站发电量较多,单位发电量分摊的碳足迹较小,反之安徽省则较大;2)由于水电站的碳足迹主要来源于运行阶段,且根据计算结果,大I型水电站单位发电量的运行阶段碳足迹远小于大II型和中型水电站,而湖北省大I型水电站发电量在总发电量中占比最大,安徽省则只有单位发电量的运行阶段碳足迹最大的中型水电站,从而导致这2个省份的碳足迹结果差异较大。同一省级行政区不同年份水电碳足迹的标准偏差较大的2个省级行政区分别为辽宁和西藏,因为这2个省级行政区水电站基数小,2011—2020年间新建/拆除对区域水电碳足迹的影

响较大,造成了不同年份间存在较大差异,例如辽宁中型水电站恒仁于2018年废弃,导致2019年单位发电量分摊的碳足迹有明显下降。

进一步分析各省级行政区水力发电建设(包括机电设备、土建工程与运输过程)和运行阶段对碳足迹的贡献比例,如图5所示。结果显示,我国大多数省级行政区单位水力发电的碳足迹均主要来源于运行阶段,湖北、吉林等8个省级行政区水力发电运行阶段的碳足迹比例小于80%;云南、江西等6个省级行政区运行阶段占比在80%~90%;宁夏、陕西等5个省级行政区运行阶段占比在90%~95%;新疆、辽宁等8个省级行政区运行阶段占比大于95%;平均占比最大和最小的省级行政区分别为海南省和湖北省,运行阶段的碳足迹占比分别为96.82%和47.94%。

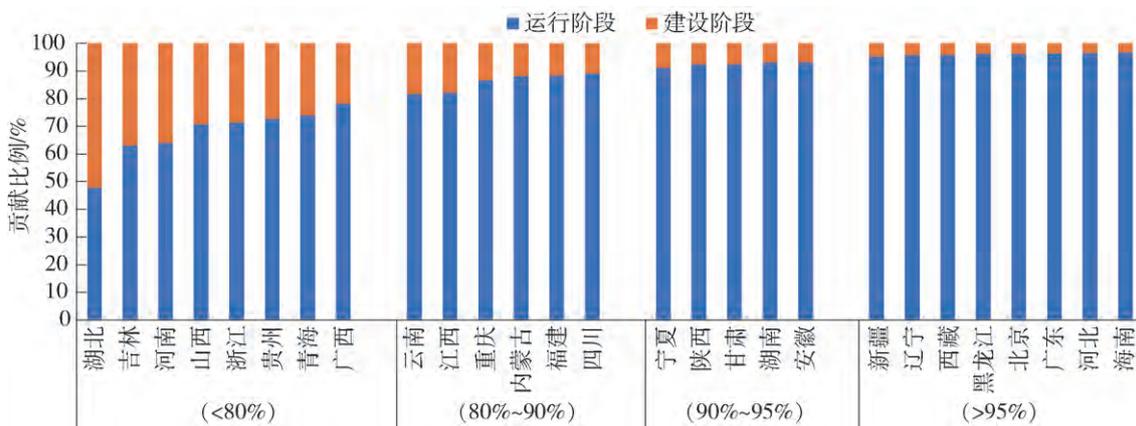


图5 建设阶段与运行阶段对我国部分省级行政区水力发电碳足迹的贡献比例

Fig. 5 Proportion of the construction phase and operation phase in the carbon footprint of hydropower generation by province in China

由图4.5可知,单位水力发电碳足迹除了受建设阶段资源能源投入、服役期发电量等因素影响外,与运行阶段土壤温室气体排放也有很大关系。根据相关研究数据<sup>[9-11,13]</sup>计算可知,大I型水电站单位发电量运行阶段的碳足迹远小于大II型水电站和中型水电站,在我国各省级行政区中,湖北、河南、云南、青海等大I型水电站发电量占比较大的省份,单位水电的碳足迹均小于全国平均值。

#### 4 结论

本研究基于生命周期评价方法,对典型水电站水力发电的碳足迹及其他环境影响进行了评估,进一步考虑不同区域水力发电的差异性,分析了我国部分省级行政区水力发电的碳足迹及其构成,取得主要结论如下:

1) 典型水电站的生命周期评价结果显示,三峡水电站单位水电的碳足迹为12.7 g/(kW·h),其中运行阶段占比为89.68%;化石能源耗竭、陆地生态毒性、矿产资源稀缺和水资源消耗等环境影响主要造成于水电站建设阶段,其中土建工程阶段的贡献比例超过机电设备制备阶段。

2) 各区域水力发电的碳足迹分析结果显示,我国不同省级行政区的水力发电碳足迹差距较大,24个省级行政区与全国平均水平相差20%以上,其中最大值为36.1 g/(kW·h),最小值为2.5 g/(kW·h)。

3) 各区域水力发电运行阶段对碳足迹的贡献分析结果显示,我国各省级行政区水电站运行阶段温室气体排放对水力发电碳足迹的贡献比例为47.94%~96.82%,19个省级行政区运行阶段的碳足迹占比超过80%。

## 参考文献:

- [1] 王丽娟,张剑,王雪松,等. 中国电力行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究,2022,35(2): 329-338.  
WANG L J, ZHANG J, WANG X S, et al. Pathway of carbon emission peak in China's electric power industry [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 329-338. (in Chinese)
- [2] 何潇,李哲,肖艳,等. 基于生命周期的溪洛渡水电站水足迹评估[J]. 水力发电学报,2019,38(7): 36-45.  
HE X, LI Z, XIAO Y, et al. Life cycle assessment of water footprint of Xiluodu hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(7): 36-45. (in Chinese)
- [3] 姜红丽,刘羽茜,冯一铭,等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术,2022,43(1): 54-64.  
JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th Five-Year Plan under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64. (in Chinese)
- [4] 王淦,高进宇,于洋,等. 南方电网水-火电合作博弈及关键影响要素分析[J]. 水力发电学报,2022,41(1): 92-102.  
WANG H, GAO J Y, YU Y, et al. Cooperation game theory model for hydropower and thermal power in China Southern Power Grid and analysis of its key impact factors [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(1): 92-102. (in Chinese)
- [5] 汪冬冬. 环境影响评价与水电环境评价若干关键问题[J]. 当代化工研究,2021(9): 118-119.  
WANG D D. Some key problems in environmental impact assessment and hydropower environmental assessment [J]. Modern Chemical Research, 2021(9): 118-119. (in Chinese)
- [6] 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]. J Tsinghua Univ(Sci & Technol), 2022, 62(8): 1366-1373. (in Chinese)
- [7] OSAMAH S, IBRAHIM D. 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.
- [8] 马忠海. 中国几种主要能源温室气体排放系数的比较评价研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院,2002.  
MA Z H. A comparative evaluation study on the greenhouse gas emission factors of several major energy sources in China [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2002. (in Chinese)
- [9] 龚新,李海英,廖文根. 基于生命周期的水库温室气体排放计算[J]. 水力发电,2012,38(10): 8-12.  
GONG X, LI H Y, LIAO W G. Calculation of greenhouse gas emission of reservoir based on life cycle [J]. Water Power, 2012, 38(10): 8-12. (in Chinese)
- [10] 不同发电能源温室气体排放关键问题研究项目组. 中国不同发电能源的温室气体排放[M]. 北京: 中国原子能出版社,2015: 137.
- [11] 赵小杰. 雅砻江梯级水电开发过程中二滩水库甲烷气体排放特征研究[D]. 焦作: 河南理工大学,2009.  
ZHAO X J. The characteristics of methane gas emissions from Ertan reservoir in Yalong river step hydropower development process [J]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2009. (in Chinese)
- [12] 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.  
DU H L, LI Z, GUO J S. Carbon footprint of a large hydropower project in the upstream of the Yangtze: following ISO14067 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(7): 1102-1110. (in Chinese)
- [13] 钟权,夏欣. 基于生命周期的猴子岩水电站温室气体排放分析[J]. 水电站设计,2021,37(1): 81-84.  
ZHONG Q, XIA X. Greenhouse gas emissions analysis of monkeyan hydropower station based on life cycle [J]. Design of Hydroelectric power Station, 2021, 37(1): 81-84. (in Chinese)
- [14] 汪朝辉,杜清运,赵登忠. 水布垭水库CO<sub>2</sub>排放通量时空特征及其与环境因子的响应研究[J]. 水力发电学报,2012,31(2): 146-151.  
WANG C H, DU Q Y, ZHAO D Z. Study on spatiotemporal characteristics of CO<sub>2</sub> emission and effects of environmental factors in Shuibuya reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 146-151. (in Chinese)
- [15] 杨萌,胡明明,杨腾,等. 高海拔水电水库温室气体的排放特征——以雅鲁藏布江藏木水库为例[J]. 环境科学学报,2022,42(1): 188-194.  
YANG M, HU M M, YANG T, et al. Greenhouse gas emissions from high-altitude hydropower reservoir—an example of the Zangmu reservoir on the Yarlung Tsangpo

- [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1): 188-194. (in Chinese)
- [16] 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, 198. XIA X, ZHONG Q. Research overview of life cycle greenhouse gas emissions from hydropower plants [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(11): 188-192, 198. (in Chinese)
- [17] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量 [J]. *生态学杂志*, 2008(7): 1193-1199. YU Y X, LIU C Q, WANG F S, et al. Spatiotemporal characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide ( $p\text{CO}_2$ ) in Hongjiadu reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008(7): 1193-1199. (in Chinese)
- [18] 李哲, 王殿常. 从水库温室气体研究到水电碳足迹评价: 方法及进展 [J]. *水利学报*, 2022, 53(2): 139-153. LI Z, WANG D C. From reservoir greenhouse gas emissions to hydropower carbon footprint: methodology and advances [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(2): 139-153. (in Chinese)
- [19] 孙志禹, 陈永柏, 李翀, 等. 中国水库温室气体研究(2009—2019): 回顾与展望 [J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 253-267. SUN Z Y, CHEN Y B, LI C, et al. Research of reservoir greenhouse gas emissions in China (2009 - 2019): review and outlook [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(3): 253-267. (in Chinese)
- [20] 张社荣, 庞博慧. 基于碳足迹理论的大型水电枢纽工程环境排放分析 [J]. *水力发电学报*, 2015, 34(4): 170-176. ZHANG S R, PANG B H. Analysis on environmental discharge of large-scale hydropower project using carbon footprint theory [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(4): 170-176. (in Chinese)
- [21] MAHMUD M A, HUDA N, FARJANA S H, et al. Life-cycle impact assessment of renewable electricity generation systems in the United State [J]. *Renewable Energy*, 2020, 151: 1028-1045.
- [22] Swiss Centre for Life Cycle Inventories. The eco-invent Database [EB/OL]. [2022-07-03]. <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10>.
- [23] 崔素萍, 黎瑶, 李琛, 等. 水泥生命周期评价研究与实践 [J]. *中国材料进展*, 2016, 35(10): 761-768, 790. CUI S P, LI Y, LI C, et al. Research and application of life cycle assessment in cement industry [J]. *Materials China*, 2016, 35(10): 761-768, 790. (in Chinese)
- [24] 李昊. 金属铜生产的全生命周期分析研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017. LI H. Lifecycle assessment of copper production [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [25] 彭振国. 典型工业固体废物的生命周期评价方法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015. PENG Z G. Research of life cycle assessment of typical industry solid waste [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范: SL-654—2014 [S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2014: 32-33.
- [27] 水电水利规划设计标准化技术委员会. 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准: DL-T-5180—2003 [S]. 北京: 水电水利规划设计标准化技术委员会, 2003: 8.

(责任编辑 张 蕾)