

侯公羽,马骁赞,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 in the whole life cycle of pumped storage power stations [J]. China Environmental Science, 2023,43(S1):326-335.

抽水蓄能电站全生命周期碳排放计算与分析

侯公羽¹,马骁赞^{1,2},杨振华^{1*},陈钦煌¹,刘文秀¹,张又文¹,张丹阳¹,赵梦圆¹ (1.中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院,北京 100083; 2.中国建筑第二工程局有限公司,北京 101149)

摘要: 为了探究蓄能式水电减排效果,以辽宁庄河抽水蓄能电站为案例,基于生命周期评价理论,采用过程分析和投入产出混合分析法,对该抽水蓄能电站全生命周期碳排放量进行了分组计算,并估算了上下水库在蓄水前后温室气体通量的差异.结果显示,该抽水蓄能电站全生命周期碳排放总量为209.4774万tCO₂e,其中运营阶段占59%,建设阶段占41%,碳排放因子为43.46gCO₂e/(kW·h),约为火电碳排放的1/33~1/25,平均每年可产生的减碳效益约0.88亿元.本文定量论证了蓄能式水电是清洁能源,大力发展抽水蓄能电站能够有效节能减排,为抽水蓄能电站低碳建设提供了数据支撑.

关键词: 抽水蓄能电站; 全生命周期; 碳排放

中图分类号: X82 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)S1-0326-10

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2023.0246

Calculation and analysis of carbon emissions in the whole life cycle of pumped storage power stations. HOU Gong-yu¹, MA Xiao-yun^{1,2}, YANG Zhen-hua^{1*}, CHEN Qin-huang¹, LIU Wen-xiu¹, ZHANG You-wen¹, ZHANG Dan-yang¹, ZHAO Meng-yuan¹ (1.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2.China Construction Second Engineering Bureau LTD, Beijing 101149, China). *China Environmental Science*, 2023,43(S1): 326-325

Abstract: In order to explore the effectiveness of carbon reduction in energy storage hydropower, the Zhuanghe pumped storage power station in Liaoning Province was taken as a case study. Based on the life cycle assessment theory, process analysis and input-output mixed analysis were used to group calculate the carbon emissions throughout the entire life cycle of the pumped storage power station, and the differences in greenhouse gas fluxes between the upper and lower reservoirs before and after water storage were estimated. The results show that the total life-cycle carbon emissions of this pumped storage power plant is 2,094,774tCO₂e, of which the operation phase accounts for 59% and the construction phase accounts for 41%, with a carbon emissions factor of 43.46gCO₂e/(kW·h), which is about 1/33~1/25 of the carbon emissions of thermal power, and the average annual carbon reduction benefit can be about 88million yuan. This paper quantitatively demonstrates that storage hydropower is a clean energy source, and that vigorous development of pumped storage power plants can effectively save energy and reduce emissions, and provides data support for the low-carbon construction of pumped storage power plants.

Key words: pumped storage power station; full life cycle; carbon emissions

2020年9月,我国在第75届联合国大会提出2030年前碳达峰、2060年前碳中和目标^[1].我国实现碳排放达峰到“碳中和”仅有30a左右时间,且碳减排总量高达100亿t左右,以风电、光伏为代表的新能源迎来高速发展新机遇^[2].抽水蓄能电站因其运行可靠、经济环保等优势,是目前支撑新能源发展的重要手段.“十四五”以来,国家政府机构出台了一系列政策大力推动抽水蓄能行业发展,提出要加快抽水蓄能电站核准建设,推进抽水蓄能和新型储能规模化应用,构建现代能源体系,推进能源革命^[3-4].其中,2021年9月出台的《抽水蓄能中长期规划(2021-2035)》中,提出到2025年,抽水蓄能投产总规模6200万kW以上;到2030年,投产规模1.2亿kW

左右^[4].蓄能式水电是可再生清洁能源,它不仅是改善我国能源结构,更是节能减排、改善生态环境和应对气候变化的有效手段.但有学者认为水电工程耗资巨大,周期长,清洁性值得怀疑.如研究指出^[5]在同等发电量下,巴西亚马逊河上的水电站碳排放量高于火电,对全球气候变暖造成的影响更大.究其原因,一方面是由于水利水电工程建设期投资大、工程量大,另一方面水库淹没区广,碳排放计算数据资料收集困难.目前,我国关于交通行业、工业、建筑业等

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助重点项目(U1261212,U1361210)

* 责任作者, 硕士研究生, 15967177590@163.com

领域碳排放研究的成果颇丰^[6-8],关于水利水电行业碳排放研究还处于初步探索阶段^[9-14],抽水蓄能电站碳排放研究尚属空白^[15],其碳减排效益并未得到正确认识.现阶段抽水蓄能电站大力建设,对抽水蓄能电站全生命周期碳排放进行计算,并且进一步量化抽水蓄能电站作为超级能源“充电宝”碳减排效益非常必要,有助于推动“双碳”战略发展.

本研究以辽宁庄河抽水蓄能电站为案例,基于生命周期评价理论,采用过程分析和投入产出混合分析法对该抽水蓄能电站进行碳排放量的计算,并针对该抽水蓄能电站建设和运行阶段的碳排放总量(以 CO₂ 当量(CO₂e)表示)进行计算和分析,进一步探讨了蓄能式水电的清洁性和碳减排效益,研究结果可为其它抽水蓄能电站全生命周期碳排放的

计算和研究提供参考,也可为能源转型过程中抽水蓄能电站更清洁、低碳的建设提供数据支撑,促进抽水蓄能电站的可持续发展,助力实现碳达峰碳中和目标.

1 抽水蓄能电站碳排放分析和核算方法

1.1 系统边界

抽水蓄能电站的生命周期一般划分为建设阶段、运行阶段和退役阶段.抽水蓄能电站设计使用年限一般为 40~60a,目前国内外通过退役阶段拆除的电站较少.我国对于水电站退役管理制度还未建立完善,水电站退役拆除处置污染排放方面的基础数据缺乏,因此本文在计算抽水蓄能电站生命周期碳排放时不考虑退役阶段.系统边界如图 1 所示:

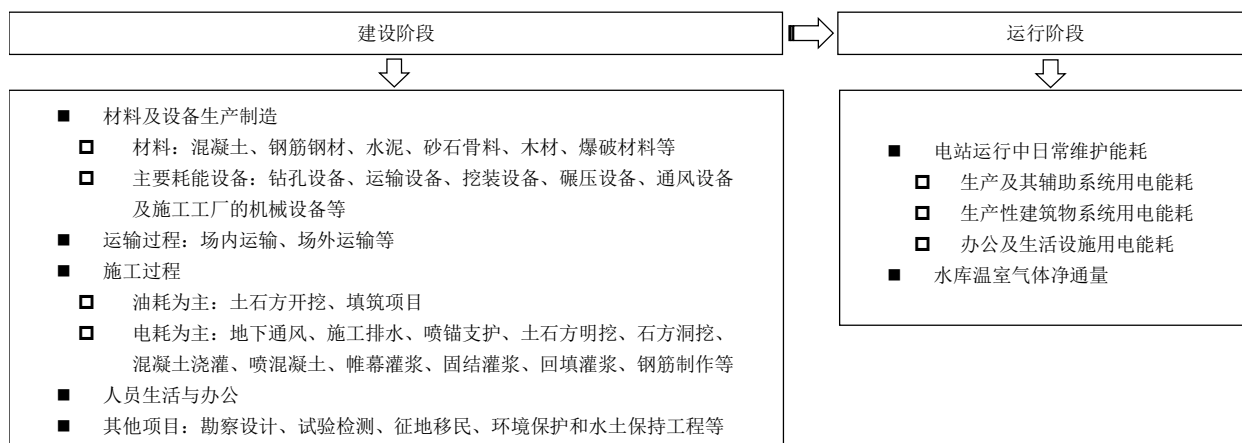


图 1 系统边界

Fig.1 System boundary

1.2 碳排放计算方法

有学者指出,碳排放研究可以按照研究对象的边界和方法不同进行划分,不同的边界有其对应的常用方法^[16].目前,国内对于水利水电工程全生命周期碳排放的研究一般是基于生命周期评价理论,通过碳排放源的分析,完成计算.常用的方法有以下几种:

1.2.1 过程分析法 过程分析法(PA-LCA)通过对过程进行分析,得到碳排放计算清单,从而根据清单对碳排放量进行计算.该方法计算结果精确,可信度高,但是对于系统边界复杂、子过程众多的大型水利水电工程,在计算过程中易忽略部分子过程的上游过程,使得计算的结果有偏差,造成“截断误差”^[17].

过程分析法计算公式如下:

$$E_a = \sum_{i=1} Q_i \cdot R_i \quad (1)$$

式中: Q_i 表示某一活动的强度; R_i 表示单位活动碳足迹.

1.2.2 投入产出法 投入产出法(EIO-LCA),以经济部门的“投入”与“产出”为基础建立数学模型,通过计算出的碳排放因子,从而计算出碳排放量.该方法计算简便,但是不区分详细的过程,计算过于粗略,不能准确评估过程中各个子过程的详细情况,但是可以避免“截断误差”^[18].

具体计算过程如下:

$$P_{2002} = P_n \times \frac{CPI_{2002}}{CPI_n} \quad (2)$$

$$E_{2002} = \frac{P_{2002}}{PPP} \times F_n \quad (3)$$

$$E_n = E_{2002} \times \frac{I_n}{I_{2002}} \tag{4}$$

式中: P_n 表示静态投资(基准年); CPI_n 表示居民消费价格指数(在 n 年); PPP 表示中国对美国的购买力平价指数(2002 年); F_n 表示单位经济活动碳足迹参数; I_n 表示中国碳排放强度(在 n 年); I_{2002} 表示美国碳排放强度(2002 年).

1.2.3 混合分析法 PA-LCA 和 EIO-LCA 各有优劣,研究表明,在核算较为集中的能源消耗的碳排放量时,EIO-LCA 与 PA-LCA 计算结果较为一致,但在能耗较少的情况下,两种模型计算值有很大的差别.对于上游边际较大的过程,采用 PA-LCA,投资过大,部分碳排放源也可能被忽略,因此采用 EIO-LCA 是比较好的选择^[19].依据计算清单中的碳排放量特征,可以将项目分为两类:碳可溯源类(材料、能源)和碳不可溯源类(人员生活与办公、施工过程、其他项目),可结合 PA-LCA 法和 EIO-LCA 法对水利水电项目的全生命周期碳排放进行计算和分析^[20].具体思路如下:

(1)利用 PA-LCA 方法对碳可溯源类项目的碳排放量进行细致的计算和评价.目前国内外对材料和能源的碳排放研究比较全面,能够得到有关材料、加工、能源消费等方面的更权威的碳排放因子数据资料.

(2)将工程总投资扣除主要材料和能源预算价成本,然后可得出剩余投资,进而再利用 EIO-LCA 模型对碳不可溯源类的碳排放量进行估算,该过程计算全面简便,且保证了一定的精确度.

表 1 主要材料及能源的碳排放因子数据

Table 1 Carbon emission factor data for major materials and energy sources

项目	碳排放因子	文献
混凝土	0.094tCO ₂ e/t	[10]
水泥	0.73tCO ₂ e/t	[21]
钢材钢筋(包含金属结构)	2.2tCO ₂ e/t	[22]
砂石骨料	0.003tCO ₂ e/m ³	[23]
粉煤灰	0.008tCO ₂ e/m ³	
柴油	3.67tCO ₂ e/t	
汽油	3.5tCO ₂ e/t	
电	0.9947tCO ₂ e/(MW·h)	[20]

利用 PA-LCA 和 EIO-LCA 相结合的碳排放计算方法,不仅对具备详细评估条件的材料、能源

的碳排放进行了重点考虑,而且利用投入产出法对扣除材料、能源后的剩余投资的碳排放进行了测算.该方法计算简便,精确度高,对目前水利水电项目全生命周期的碳排放量的测算评估具有更好的适用性.

1.3 数据来源

计算所使用的主要材料及能源的碳排放因子数据主要来源于国内外公开的文献数据,详见表 1.

2 抽水蓄能电站碳排放实例测算与应用研究

2.1 工程概况

庄河抽水蓄能电站位于辽宁省大连庄河市,是辽宁省“十四五”期间首个核准并开工建设的抽水蓄能电站项目.该电站总装机容量为 1000MW,枢纽工程主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房系统和地面开关站等建筑物组成,设计年发电量 12 亿 kW·h,项目静态总投资 50.28 亿元,其中枢纽工程(建筑与安装工程)41.91 亿元.该电站供电范围为辽宁电网,建成后主要承担辽宁电力系统调峰、填谷、调频、调相、紧急事故备用等任务,有效促进节能减排和环境保护,提高电力系统运行经济性.

2.2 建设阶段碳排放量计算与分析

依据设计概算表,枢纽工程建设阶段 41.91 亿元,其中施工辅助工程 3.8797 亿元,建筑工程 22.1760 亿元,环境保护和水土保持工程 1.1001 亿元,机电设备及安装工程 13.2282 亿元,金属结构设备及安装工程 1.5257 亿元.

2.2.1 碳可溯源类碳排放计算与分析 对混凝土、水泥、钢材(包括金属结构所用钢材)、砂石骨料、粉煤灰等主要材料以及能源(油料消耗统一按照柴油计算)消耗进行了分析.

运输过程包含场外运输和场内运输两部分,该过程碳足迹主要是柴油的消耗过程,场外运输量和耗油量如表 2 所示.假设场外运输采用 45t 载重汽车,耗油 20.75kg/h,车速为 50km/h^[24],由表 2 可知场外运输耗油量为 3345.49t.场内运输量和耗油量如表 3 所示,场内新建永久公路 11.6km,临时公路 12.3km,共计 23.9km,假设场内运输路程均为 11.95km,采用 45t 载重汽车,耗油 12.45kg/h,车速为 30km/h,由表 3 可知场内运输耗油量为 4457.22t.

表 2 场外运输阶段耗油清单

Table 2 List of fuel consumption during off-site transportation

材料	运输起讫点	运输距离 (km)	运输量 (10 ⁴ t)	耗油量 (t)
水泥	大连水泥厂-工地	203.8	18.7	351.46
钢筋钢材			3.9436	18.77
木材			1.04	4.95
火工材料			1	4.76
油料	营口电厂-工地	102.4	2.76	13.13
粉煤灰			5.22	49.3
重大件设备(金属结			1500	2903.12
构、机电设备等)				
省外(船舶/火车-汽车)				
小计				3345.49

本文将运输和施工过程柴油消耗合并为柴油消耗过程.参考长江上游某大型水电站的相关研究^[25],由《水电工程施工机械台时费定额》得到单位施工过程的能源消耗情况^[26],油料消耗总量已知,为避免重复计算,施工过程只考虑电能消耗,施工过程电能消耗清单如表 4 所示,施工过程电能消耗总量为 11908 万 kW·h.

根据可研报告,得到本项目所需的主要材料和能源的消耗量.通过参考已有的主要材料、能源的碳排放因子,可以计算出各项目的碳排放量,计算结果如表 5 所示.

由表 5 可知,水泥材料中的碳排放量最高,钢材和混凝土次之,这主要是由于水利水电工程中的建

筑物大多以水泥、钢筋和混凝土为主.水泥、钢材钢筋以及混凝土的使用量分别达 18.7 万 t、3.9 万 t 和 88.95 万 t.同时,由于水泥生产中的煅烧和钢筋生产均为高碳排工艺,因此在用量和单量都大的情况下,其碳排放量也是非常大的.混凝土单位排放量为 0.094tCO₂e/t,从这个意义上来说,混凝土本身是低碳材料,但是其用量巨大,碳排放总量也是巨大的.能量消耗碳排放量总量超过 24 万 tCO₂e,大部分是通过用电量和柴油产生.在这一基础上,项目施工阶段的主要材料和能源的碳排放总量为 575759.91tCO₂e,用 C₁₁ 表示.

表 3 场内运输阶段耗油清单

Table 3 List of fuel consumption during on-site transportation

运输物质	运输量(10 ⁴ t)	耗油量(t)
土石方明挖出渣	2269.06	2511.09
石方洞挖出渣	197.71	218.80
土石方填筑	1262.67	1397.35
混凝土浇筑	88.95	98.44
砂石骨料加工母岩	155.57	172.16
水泥	18.7	20.69
钢筋钢材	3.9436	4.36
木材	1.04	1.15
火工材料	1	1.11
油料	2.76	3.05
粉煤灰	5.22	5.78
金属结构及机电设备	20.9864	23.22
小计		4457.22

表 4 施工过程电能消耗清单

Table 4 List of electric energy consumption during construction

施工过程	项目	工程量	综合耗电能	耗电量(kW·h)
土石方工程	土石方明挖	1449.88×10 ⁴ m ³	850kW·h/10 ⁴ m ³	1232398.00
	石方洞挖	126.33×10 ⁴ m ³	13310kW·h/10 ⁴ m ³	1681452.30
	土方填筑	806.82×10 ⁴ m ³	850kW·h/10 ⁴ m ³	685797.00
混凝土工程	混凝土浇灌	80.99×10 ⁴ m ³	45120kW·h/10 ⁴ m ³	3654268.80
	喷混凝土	7.96×10 ⁴ m ³	21450kW·h/10 ⁴ m ³	170742.00
灌浆工程	帷幕灌浆	1.24×10 ⁴ m	170970kW·h/10 ⁴ m	212002.80
	固结灌浆	11.33×10 ⁴ m	76810kW·h/10 ⁴ m	870257.30
	回填灌浆	6.32×10 ⁴ m ²	8030kW·h/10 ⁴ m ²	50749.60
	接触灌浆	0.69×10 ⁴ m ²	8030kW·h/10 ⁴ m ²	5540.70
	钢筋制作	32982×t	704kW·h/t	23219328.00
剩余施工项目用电				87297463.5
小计				119080000

2.2.2 碳不可溯源类碳排放计算与分析 碳可溯源类材料、能源的费用见表 6 所示,费用总计约 108322.3595 万元,扣除计算的该费用后,还剩余投

资 310777.641 万元(2020 年价格水平),这部分投资主要用于环境保护和水土保持工程、机电设备及安装工程、金属结构设备及安装工程、建设征地

和移民安置补偿费用、人员生活和办公及其他项目等.

表 5 工程主要材料和能源消耗碳排放计算
Table 5 Calculation of carbon emissions from the main materials and energy consumption of the project

序号	项目	碳排放因子	消耗量	碳排放量 (10 ⁴ tCO ₂ e)
1	混凝土	0.094tCO ₂ e/t	88.9510 ⁴ t	8.3613
2	水泥	0.73tCO ₂ e/t	18.710 ⁴ t	13.651
3	钢材钢筋	2.2tCO ₂ e/t	3.943610 ⁴ t	8.6759
	金属结构(闸门等)		7007t	1.5415
4	砂石骨料	0.003tCO ₂ e/m ³	155.5710 ⁴ t	0.4667
5	粉煤灰	0.008tCO ₂ e/m ³	5.2210 ⁴ t	0.0418
6	柴油	3.67tCO ₂ e/t	3.540310 ⁴ t	12.9929
7	电	0.9947tCO ₂ e/(MW·h)	119080MW·h	11.8449
小计				57.5760

表 6 建设阶段工程主要材料和能源费用
Table 6 Cost of main materials and energy in the construction phase

序号	项目	消耗量	材料单价 (预算价)	费用(万元)
1	混凝土	88.9510 ⁴ t	300 元/t	26685
2	水泥	18.710 ⁴ t	655.63 元/t	12260.28
3	钢材钢筋	3.943610 ⁴ t	3704.77 元/t	16091.47
	金属结构(闸门等)	7007t	5000 元/t	3503.5
4	砂石骨料	155.5710 ⁴ t	130 元/t	20224.1
5	粉煤灰	5.2210 ⁴ t	220.26 元/t	1149.76
6	柴油	3.540310 ⁴ t	5669.76 元/t	20072.65
7	电	119080MW·h	700 元/(MW·h)	8335.6
小计				108322.3595

表 7 剩余投资碳排放计算
Table 7 Carbon emission calculation of remaining investment

剩余项目投资	静态投资 (万元)	碳排放量 <i>E</i> ₂₀₂₀ (tCO ₂ e)
环境保护和水土保持工程	11001.34	10486.19
机电设备及安装工程	132282.06	126087.75
金属结构设备及安装工程	15256.6	14542.19
建设征地和移民安置补偿费用	35905.43	34224.10
人员生活和办公及其他	116332.21	110884.78
小计	310777.641	296225.01

参考国家统计局的资料,中国 2020 年 CPI₂₀₂₀ 指数为 686.55(以 1978 年水平为 100,下同),中国 2002 年 CPI₂₀₀₂ 指数为 433.5,中国对美国的购买力平价指数 PPP 在 2002 年为 2.68,利用 EIO-LCA 模型,选择非住宅制造业建筑物经济部门,该类经济部门的碳排放因子为 437tCO₂e/百万美元,从而可以计算出剩

余投资在 2002 年价格水平时的碳排放量 *E*₂₀₀₂.参考世界银行 CO₂ 排放强度数据,2018 年(由于最新数据为 2018 年,因此使用 2018 年的数据近似处理)中国的 CO₂ 排放强度为 *I*₂₀₁₈=0.512kg/PPP 美元 GDP,根据 EIO-LCA 模型,可以计算出 2020 年剩余项目投资的碳排放量,如表 7 所示,其余项目的总投资在 2020 年价格水平上的碳排放量为 296225.01tCO₂e,用 *C*₁₂ 表示.

根据 *C*₁₁ 和 *C*₁₂ 得到庄河水电站工程建设阶段的总碳排放量为 871984.98tCO₂e.

2.3 运行阶段碳排放计算与分析

2.3.1 电站运行中能源消耗及日常维护

(1)碳可溯源类碳排放计算与分析

抽水蓄能电站运行能源消耗及日常维护能耗大致分为:生产及其辅助系统用电能耗、生产性建筑物系统用电能耗、办公及生活设施用电能耗.其中生产及其辅助系统用电能耗一部分指和机组运行直接相关的机组及其附属设备用电能耗,生产性建筑物系统用电能耗主要包括通风空调系统、照明系统及给排水系统用电能耗,办公及生活设施用电能耗主要指办公生活区的设备用电能耗.由于抽水耗电的电是用电低谷时富余的风电、光电等,这部分电能相当于是被储存在抽水蓄能电站中,从能源消耗的角度分析,抽水蓄能电站减少了能源消耗.如果把所有的抽水耗电量作为碳排放计算基数,那么就会把抽水蓄能电站变为“重点排放单位”,显然不符合抽水蓄能电站作为储能设施的用途,因此本文在运行阶段不包含抽水耗电量.根据可行性研究设计以及经验计算,平均每年能源消耗量及碳排放量如表 8 所示.

表 8 运行阶段工程主要能源消耗及碳排放
Table 8 Main energy consumption and carbon emission of the project in operation stage

项目	消耗量	材料单价 (预算价)	碳排放因子	费用 (万元)	碳排放量 (tCO ₂ e)
汽油	480t	0.6936 万元/t	3.5tCO ₂ e/t	332.928	1680
柴油	48t	0.567 万元/t	3.67tCO ₂ e/t	27.216	176.16
电	4764MW·h	0.07 万元/ (MW·h)	0.9947tCO ₂ e/ (MW·h)	333.48	4738.75
小计				693.624	6594.91

根据表 8 数据可知,庄河抽水蓄能电站运行阶

段主要能源消耗平均每年碳排放量为 6594.91tCO₂e,按照设计使用期限 40a 计算,可求得庄河抽水蓄能电站在运行阶段主要能源消耗产生的总碳排放量为 263796.43tCO₂e,用 C₂₁ 表示.

(2)碳不可溯源类碳排放计算与分析

根据文献[27],水电站运行期年费用为水电站初期总投资的 1%~4%,并随水电站规模变大比例降低,该水电站年运行费假设定为静态投资的 1%,为 5028 万元(2020 年价格水平),该部分资金主要用于每年运行期的设备维护,材料购买,库区维护费.减去已知的每年运行期能源消耗费用后,年运行费剩余投资金额为 4334.376 万元,该部分投资利用 EIO-LCA 模型,选择非住宅保养和维修经济部门,该经济部门的碳排放因子为 624tCO₂e/百万美元,通过投入产出法计算,得到每年剩余投资碳排放量为 5898.8tCO₂e,从而求得该部分在运行期 40a 碳排放总量为 235952.19tCO₂e,用 C₂₂ 表示.

根据求得的 C₂₁ 和 C₂₂ 得到庄河水电站在 40a 设计使用期限内排放的总碳排放量为 499749.22tCO₂e.

2.3.2 水库温室气体净通量 根据文献[28],由于淹没地区有机物的分解,引入水库时会释放温室气体,该部分释放的温室气体是水电站温室气体的主要组成部分,也是目前水电能源清洁性问题争论的焦点.水库水体温室气体通量有两类指标,一类是总通量,指的是水库温室气体的直接释放量;另一类是净通量,指的是排除蓄水因素外的温室气体释放量.本文选用温室气体净通量作为上下水库释放过程的指标,净通量计算公式如式(5)所示:

$$C_4=C_1-C_2-C_3$$
 (5)

式中:C₁ 表示上下水库温室气体总通量;C₂ 表示蓄水前淹没区温室气体通量;C₃ 表示无关人为源水库温室气体通量;C₄ 表示上下水库温室气体净通量.鉴于案例计算所需的数据量大且获取难度较高等客观因素的影响,本文在计算库区温室气体净通量时进行了一定的假设和概化.

(1)蓄水前淹没区温室气体通量

上水库及下水库淹没区总面积 179.37 万 m²,各种类型土地比例情况如图 2 所示.各种土地类型的排放参数如表 9 所示,本文认为硬化地表无温室气体释放过程且不考虑其他土地类型,蓄水前水体碳

足迹参数采用长江上游某大型水电站库区淹没区淹没前水体实地监测碳足迹系数^[25].因为淹没区在淹没前土地利用类型以林地为主,能够大量吸收并储存碳,该水库淹没前温室气体年吸收量为 109tCO₂e,表明该区域淹没前属于碳汇.

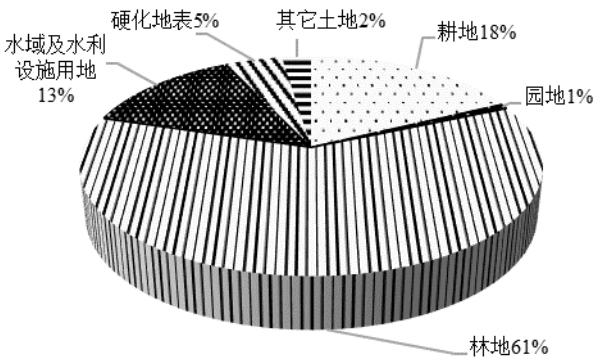


图 2 淹没区土地类型比例
Fig.2 Proportion of land types in inundated area

表 9 淹没区各土地类型碳足迹通量参数
Table 9 Carbon footprint flux parameters of various land types in the inundated area

土地类型	单位	CO ₂ 通量 (CO ₂ -C)	CH ₄ 通量 (CH ₄ -C)	数据来源
耕地	mg/(m ² ·h)	41.1	-0.012	[17]
园地、林地		-27.4	-0.012	
水域及水利设施用地		20.5	0.06	
硬化地表		0	0	

(2)水库温室气体总通量

GHG Risk Assessment Tool(Bate Version)是通过国际水电协会和联合国教科文组织全球环境变化教席领导的多方利益相关者研究项目创建的经验模型^[29].该模型通过库龄,平均气温,年平均径流深度,年平均降雨模拟基于有限的现有数据得出 95% 置信区间的温室气体释放量,对水库温室气体总释放(已存在或未来)水平进行估算,本文采用该评估工具进行总通量估算.

上、下水库蓄水后年平均气温分别约为 7.0 和 8.4℃,蓄水后正常水位上水库和下水库面积分别为 35.4 万 m² 和 143.97 万 m²,集水区面积分别为 0.441km² 和 162.1km²,上、下水库年平均径深度为 342.4mm,年平均降雨深度为 757.4mm.上、下水库蓄水后 40a 温室气体通量预测值为 718680tCO₂e.

(3)无关人为源温室气体通量

流域内由于人员活动会产生温室气体排放,然而对于该部分人为源对水库温室气体通量影响的研究较少,且该项目上下水库库区人口密度相对较少,经济发展滞后,相对而言人为影响较小,本文假定人为源的温室气体通量为零.

2.4 生命周期碳排放清单

根据庄河抽水蓄能电站各阶段碳足迹情况,得到生命周期清单如表 10,各过程比例情况如图 3 所示.可知该抽水蓄能电站生命周期碳排放量达 209.4774 万 tCO₂e,水库温室气体净通量占 35%,运营过程中能源消耗及日常维护占 24%,材料及设备生产制造过程占 15%.根据庄河抽水蓄能电站分组计算比例情况如图 4 所示,可知碳可溯源类项目即建设期和运营期的工程主要材料和能源消耗碳排放占比最高达 40%,水库温室气体净通量占 35%.可见该抽水蓄能电站全生命周期碳排放过程中主要贡献者属于建设期和运营期的工程主要材料和能源消耗,水库温室气体净通量也是碳足迹的重要因素.

表 10 庄河抽水蓄能电站生命周期碳排放清单
Table 10 Life cycle carbon emission list of Zhuanghe pumped storage power station

阶段	分类	过程	碳排放量(10 ⁴ tCO ₂ e)
建设阶段	碳可溯源类	材料及设备生产制造	32.7382
		运输及施工过程	24.8378
	碳不可溯源类项目		29.6225
运行阶段	碳可溯源类	能源消耗及日常维护	26.3796
	碳不可溯源类		23.5952
		水库温室气体净通量	72.304
总和			209.4774

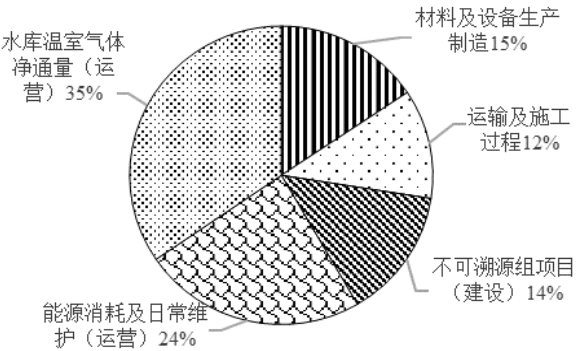


图 3 庄河抽水蓄能电站碳足迹
Fig.3 Carbon footprint of Zhuanghe pumped storage power station

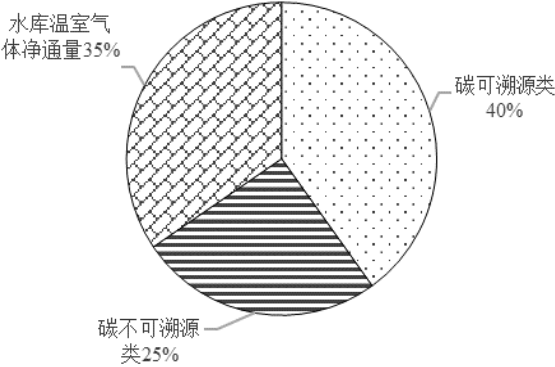


图 4 庄河抽水蓄能电站分组计算碳足迹比例
Fig.4 Calculation of carbon footprint ratio by group for Zhuanghe pumped storage power station

3 分析与讨论

3.1 清单分析

抽水蓄能电站建设周期长、建设内容复杂,消耗材料和能源巨大,是主要的碳排放来源.在保证工程质量与安全的前提下,尽量使用绿色建材,注重工程设计优化.抽水蓄能电站的维护运营材料生产和设备生产制造主要涉及能源与材料消耗,通过合理设计可以有效的降低物料的损耗和减少碳排放量.施工过程主要涉及机械使用而消耗能源,通过加快工程智慧化信息化应用,优化管控过程,加强管理,从而提高工作效率,减少碳排放.水库温室气体通量是抽水蓄能电站建设期和运营期各个过程碳足迹的重要贡献者,这一研究结果与相关研究相吻合^[25,30-31].为进一步减少蓄水后的碳足迹过程,水电站在蓄水前应将植被大部分清运,对上下水库淹没区进行较为严格的清库工作.

3.2 庄河抽水蓄能电站碳排放因子分析

庄河抽水蓄能电站作为一种储能技术,有效的提高了辽宁省核电、风电、光伏等新能源系统的调节能力,提高了电力系统运行经济性.该电站设计年发电量为 12.05 亿 kW·h,设计使用年限为 40a,则在设计使用年限中预计总发电 482 亿 kW·h.根据该抽水蓄能水电站生命周期碳排放量 209.4774 万 tCO₂e,得到碳排放因子为 43.46gCO₂e/(kW·h),即每发电 1kW·h,直接或间接碳排放量 43.46gCO₂e.

通过统计 30 多座国内外水电站的碳排放因子,研究的不同水电站生命周期一般为 50~100a,发现国内外水电站生命周期碳排放因子基本为 3.7~

47.3gCO₂e/(kW·h)^[13-14,20,24-25,32-35]。如图 5 所示,水电站温室气体排放系数整体上呈现稳定分布特点,该抽水蓄能电站全生命周期碳排放因子为 43.46gCO₂e/(kW·h),相对于水电站的碳排放指标偏高。考虑是由于抽水蓄能电站作为储能设施的特殊性,其发电量受综合循环效率的制约影响,显然会比单纯发电为主的水电站的碳排放因子高。

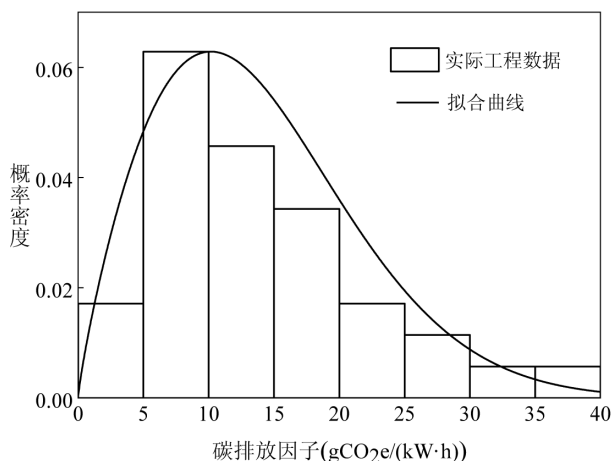


图 5 典型水电站工程碳排放因子统计

Fig.5 Statistical diagram of carbon emission factors for typical hydropower station projects

3.3 清洁性与节能减碳效益

根据相关研究成果表明^[22],我国火力发电生命周期温室气体排放因子为 1083.7~1341.9kgCO₂e/MWh。庄河抽水蓄能电站碳排放因子为 43.46gCO₂e/(kW·h),仅约为火力发电的 1/33~1/25,表明水力发电的清洁属性^[36]。

抽水蓄能电站利用电网进行调度,在用电低谷时将富余的风电、核电等把水从下水库抽到上水库,在用电高峰时放水发电,既节约了多余的清洁能源,又成为了电力系统的稳定器、调节器和平衡器。根据庄河抽水蓄能电站可研报告,该电站年发电量约为 12.05 亿 kWh,年抽水电量为 16.07 亿 kWh,综合循环效率约为 75%。根据辽宁电网有无方案电力电量平衡分析,庄河抽水蓄能电站的投入运行,可使辽宁电网每年节约标煤 13.9 万 t,折合原煤 19.5 万 t,年节约燃料费用 13900 万元。相应的每年可以减少各种大气污染物的排放量,其中减少 CO₂ 排放量为 94.3 万 t,减少二氧化硫(SO₂)排放量为 0.62 万 t。仅从减碳效益来看,按照 93 元/t 碳排放配额计算,平均每年可产

生的减碳效益约 0.88 亿元,节能减排效益明显。由此可见,抽水蓄能电站不仅是超级能源“充电宝”,更是“双碳”战略中的绿色能源主力军^[37]。

4 结论

4.1 以辽宁庄河抽水蓄能电站作为研究案例,通过对抽水蓄能电站生命周期的系统边界进行清单识别和合理简化,对抽水蓄能电站生命周期的碳排放量进行了计算。结果表明,该抽水蓄能电站生命周期碳排放总量为 209.4774 万 tCO₂e,其中运营阶段的碳排放量占比达 52%,建设阶段的碳排放量占比达 41%。

4.2 在抽水蓄能电站发展初期,充分考虑到当地的特殊环境特征,有效避免不合理开发。在水库蓄水之前,要加强水库的前期清库工作,做好水库的运营,可以降低水库的碳排放量。通过对抽水蓄能电站的优化设计和强化管理,可以有效地降低物料消耗、降低能耗,从而达到节能减排目的。

4.3 庄河抽水蓄能电站碳排放因子为 43.46gCO₂e/(kW·h),远小于火电的取值区间。平均每年可产生减碳效益约 0.88 亿元,作为超级能源“充电宝”,充分发挥了碳减排的环保作用。

参考文献:

- [1] 国务院.中共中央、国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [N]. 人民日报, 2021-10-25(001).
The State Council. The Communist Party of China Central Committee and the State Council: Working guidance for carbon dioxide peaking and carbon neutrality in full and faithful implementation of the new development philosophy [N]. People's Daily, 2021-10-25(001).
- [2] 马良.碳达峰、碳中和背景下抽水蓄能建设发展研究 [J]. 中国工程咨询, 2021,(9):35-38.
Ma L. Research on the development of pumped storage energy construction under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. China Engineering Consultants, 2021,(9):35-38.
- [3] 产业信息网.2022 年中国抽水蓄能行业相关政策汇总:政府大力推动抽水蓄能电站建设,促进抽水蓄能规模化形成 [R/OL].
https://www.chyxx.com/industry/1123301.html2022-8-25.
Industrial Information Network. Summary of policies related to China's pumped storage industry in 2022: The government vigorously promotes the construction of pumped storage power stations and promotes the formation of large-scale pumped storage energy [R/OL]. 2022-8-25.
- [4] 中国政府网.《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035)》印发实施 [R/OL].
http://www.gov.cn/xinwen/202109/09/content_5636487.html. 2021-09-09.

- Chinese government website. Issuance and implementation of the medium and long term development plan for pumped storage energy (2021–2035) [R/OL]. 2021–09–09.
- [5] Fearnside P M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of ‘greenhouse’ gases [J]. *Environmental Conservation*, 1995, 22(1):7–19.
- [6] 曾晓莹,邱荣祖,林丹婷,等.中国交通碳排放及影响因素时空异质性[J]. *中国环境科学*, 2020,40(10):4304–4313.
- Zeng X Y, Qiu R Z, Lin D T, et al. Spatio-temporal heterogeneity of transportation carbon emissions and its influencing factors in China [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(10):4304–4313.
- [7] 马晓君,陈瑞敏,董碧滢,等.中国工业碳排放的因素分解与脱钩效应[J]. *中国环境科学*, 2019,39(8):3549–3557.
- Ma X J, Chen R M, Dong B Y, et al. Factor decomposition and decoupling effect of China's industrial carbon emissions [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(8):3549–3557.
- [8] 洪竞科,李沅潮,郭偲悦.全产业链视角下建筑碳排放路径模拟:基于RICE-LEAP模型[J]. *中国环境科学*, 2022,42(9):4389–4398.
- Hong J K, Li R C, Guo S Y. Simulating building carbon emission path with a RICE-LEAP model from the perspective of the whole supply chain [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(9):4389–4398.
- [9] Zhang Q F, 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.
- [10] 庞博慧.基于碳足迹理论的水电枢纽工程能耗分析研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- Pang B H. Energy consumption analysis of hydropower projects based on carbon footprint theory [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [11] 郑巧珍.水电工程建造阶段碳足迹评价研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- Zheng Q Z. The carbon footprint evaluation of hydropower projects during construction phase [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [12] 柳春娜.基于生命周期的混凝土大坝碳排放评价方法研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
- Liu C N. Research on evaluating methods for carbon emissions of concrete dams based on life cycle assessment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [13] 何 坤,钟 权.玉瓦水电站生命周期温室气体排放研究[J]. *四川水力发电*, 2020,39(2):115–118.
- He K, Zhong Q. Study on greenhouse gas emission in the life cycle of Yuwa hydropower station [J]. *Sichuan Hydro Power*, 2020,39(2):115–118.
- [14] 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. Analysis of greenhouse gas emissions at Houziyan hydropower station based on life cycle theory [J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2021,37(1):81–84.
- [15] 何姗姗.结合储能技术的电力系统低碳发展模式研究——以抽水蓄能为例[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- He S S. Research on low carbon development model of power system with energy storage technology—A case study of pumped storage power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 景侨楠,侯慧敏,白宏涛,等.自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法[J]. *中国环境科学*, 2019,39(1):420–427.
- Jing Q N, Hou H M, Bai H T, et al. A top-bottom estimation method for city-level energy-related CO₂ emissions. *China Environmental Science*, 2019,39(1):420–427.
- [17] Suh S, Lenzen M, Treloar G J, et al. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004,38(3):657–664.
- [18] Lave L B, Matthews S H. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services [J]. *Nihon Heikatsukin Gakkai Zasshi*, 2012,4(2):2606–2613.
- [19] Lenzen M. A Generalized Input-Output Multiplier Calculus for Australia [J]. *Economic Systems Research*, 2010,13(1):65–92.
- [20] 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——以大木塘工程为例[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.
- [21] 陈康海.建筑工程施工阶段的碳排放核算研究[D]. 广东:广东工业大学, 2014.
- Chen K H. Research on quantitative assessment method of GHG emission for construction projects [D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2014.
- [22] 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. Comparative evaluation of greenhouse gas emission coefficients of several major energy sources in China [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2002.
- [23] 张孝存.建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- Zhang X C. Research on the quantitative analysis of building carbon emissions and assessment methods for low-carbon buildings and structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [24] 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.
- [25] 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 analysis of a hydropower project in the upstream of the Yangtze: following ISO14067 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017,26(7):1102–1110.
- [26] 水电水利规划设计总院.水电工程施工机械台时费定额[M]. 北京:中国电力出版社, 2005:43–88.
- China Renewable Energy Engineering Institute. Quota of construction machinery hourly fee for hydropower engineering [M]. Beijing: China Electric power Press, 2005:43–88.
- [27] 袁俊森,潘 纯.水利工程经济[M]. 北京:中国水利水电出版社,

- 2005:99-102.
- Yuan J S, Pan C. Water Conservancy Project Economy [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005:99-102.
- [28] 李雨晨,秦宇,杨柳,等.长江上游大中型水库碳排放量估算与分析:以 IPCC 国家温室气体清单指南为基础 [J]. 湖泊科学, 2023,35(1):131-145.
- Li Y C, Qin Y, Yang L, et al. Estimation and analysis of carbon emissions from the large-and medium-sized reservoirs in the upper reaches of Changjiang River: On the basis of the IPCC National Greenhouse Gas Inventory [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1):131-145.
- [29] International Hydropower Association. GHE Risk Assessment Tool (Beta Version) User manual [EB/OL]. [2022-12-19].<https://www.hydropower.org/>.
- [30] Ribeiro F D, Da Silva G A. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2010,18(1):44-54.
- [31] Jiang T, Shen Z, Liu Y, et al. Carbon footprint assessment of four normal size hydropower stations in China [J]. Sustainability, 2018, 10(6):2018.
- [32] 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.
- [33] 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. Life cycle carbon footprint of small hydropower stations [J]. Hydropower and New Energy, 2020,34(2):31-35.
- [34] 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. Assessment of carbon emission reduction potential of hydropower development in Kedu river based on ISO14067 [J]. Pearl River, 2017,38(12):45-49.
- [35] 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), 2017.
- Du H L. Carbon footprint of typical hydro-projects in Jinsha River [D]. Chongqing: University of Chinese Academy of Sciences (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [36] 吴世勇,申满斌,陈求稳.清洁发展机制(CDM)与我国水电开发 [J]. 水力发电学报, 2008,27(6):53-55.
- Wu S Y, Shen M B, Chen Q W. Clean development mechanism (CDM) and hydropower development in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(6):53-5.
- [37] 李长健.抽水蓄能电站减碳效益研究 [J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6):45-48,80.
- Li C J. Study on carbon reduction benefit of pumped storage power station [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021,7(6):45-48,80.

作者简介：侯公羽(1965-),男,辽宁辽阳人,教授,博士,主要从事岩土工程、工程管理等研究.发表论文 80 余篇.hgyht@126.com.