

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0760

张社荣, 庞博慧, 张宗亮. 2014. 基于混合生命周期评价的不同坝型温室气体排放对比分析 [J]. 环境科学学报, 34(11): 2932-2939

Zhang S R, Pang B H, Zhang Z L. 2014. Comparative analysis of greenhouse gas emissions from different dam types based on the hybrid LCA [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(11): 2932-2939

基于混合生命周期评价的不同坝型温室气体排放对比分析

张社荣^{1,*}, 庞博慧^{1,2}, 张宗亮^{3,4,5}

1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072
2. 华能澜沧江水电有限公司, 昆明 650214
3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 昆明 650051
4. 国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心, 昆明 650051
5. 云南省水利水电土石坝工程技术研究中心, 昆明 650051

收稿日期: 2014-01-21 修回日期: 2014-04-26 录用日期: 2014-05-28

摘要: 为了研究不同坝型对环境造成的影响, 采用混合生命周期评价方法定量分析并比较同规模的重力坝和堆石坝水电枢纽布置在全生命周期内的温室气体排放. 研究基于糯扎渡工程实例, 生命周期考虑材料设备生产阶段、运输阶段、施工阶段和运行维护阶段. 结果表明: 重力坝方案和堆石坝方案生命周期温室气体排放量分别为 1145.49×10^4 和 815.85×10^4 t (以 CO_2 当量计), 重力坝比堆石坝多排放 40.4%. 其中, 重力坝在生产、运输和运行阶段的碳足迹比堆石坝大, 但堆石坝在施工阶段的碳足迹比重力坝大. 运行阶段的温室气体排放量占全生命周期碳足迹的比例最大, 其次是材料设备生产阶段、施工阶段和运输阶段. 糯扎渡水电工程的碳排放因子明显低于火电碳排放因子, 合理开展水电建设, 是实现我国“十二五”规划碳减排目标的有效途径.

关键词: 水电枢纽; 重力坝; 堆石坝; 温室气体; 混合生命周期评价方法

文章编号: 0253-2468(2014)11-2932-08 中图分类号: X196 文献标识码: A

Comparative analysis of greenhouse gas emissions from different dam types based on the hybrid LCA

ZHANG Sherong^{1,*}, PANG Bohui^{1,2}, ZHANG Zongliang^{3,4,5}

1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072
2. Huaneng Lancang River Hydro Power Co., Ltd, Kunming 650214
3. HYDROCHINA Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051
4. High Earth-Rockfill Dam Branch Centre of State Energy Hydropower Technology Research and Development Centre, Kunming 650051
5. Technology Research Centre of Hydraulic and Hydropower Earth-Rockfill Dam Engineering of Yunnan Province, Kunming 650051

Received 21 January 2014; received in revised form 26 April 2014; accepted 28 May 2014

Abstract: In order to explore the effects of different dam types on the environment, a hybrid life cycle assessment (hybrid-LCA) method is presented to analyze and compare the greenhouse gas (GHG) emissions for different hydropower project layouts with the same size throughout the whole life cycle. For this purpose, the Nuozhadu project with concrete gravity dam and rockfill dam schemes is selected as the example. The production stage, transportation stage, construction stage and operation and maintenance stage of the material and equipment are taken into consideration in the life cycle. The results show that the CO_2 emissions of gravity dam and rockfill dam are 1145.49×10^4 t and 815.85×10^4 t $\text{CO}_2\text{-eq}$, respectively. The gravity dam increases CO_2 emissions by approximately 40.4% as compared with the rockfill dam. The carbon footprints of the gravity dam in the production, transportation and operation stages are larger than that of the rockfill dam. However, the carbon footprints of the rockfill dam is smaller than that of the gravity dam in the construction stage. The operation stage is the greatest contributor to CO_2 emissions, followed by the production stage, the construction stage and the transportation stage. The carbon emission factor of Nuozhadu hydropower station is obviously lower than that of the coal-fired power plant. The reasonable development of hydropower is an effective way to achieve carbon emission reduction in the 12th Five-Year Plan.

基金项目: 国家创新研究群体科学基金 (No.51021004); 水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金

Supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (No. 51021004) and the Open Fund of State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety (Tianjin University)

作者简介: 张社荣 (1960—) 男, 教授 (博士), E-mail: tjuzsr@126.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: ZHANG Sherong (1960—), male, professor (Ph.D.), E-mail: tjuzsr@126.com; * Corresponding author

Keywords: hydropower project; gravity dam; rockfill dam; greenhouse gas; hybrid life cycle assessment method

1 引言(Introduction)

我国政府承诺到 2020 年非化石能源将占一次能源消费的 15% 左右, 单位国内生产总值 CO_2 排放比 2005 年下降 40%~45%。水电作为目前最成熟的可再生能源发电技术, 需承担一次能源消费的 8% 以上。但随着水电站在建工程数量及规模的不断扩大, 其 CO_2 排放亦在持续增加。2005—2009 年中国各电力链的碳足迹估算结果表明, 水电碳足迹从 $18.37 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增加到 $29.74 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (王君章等, 2012), 增长了 62%。因此, 作为大力发展的“绿色能源”, 水电温室气体排放的定量研究及其节能降耗工作急需提到重要议程。

碳足迹是某一产品或服务系统在其全生命周期内的碳排放总量, 或活动主体(包括个人、组织、部门等)在某一活动过程中直接和间接的碳排放总量, 以 CO_2 等价物来表示(王微等, 2010)。目前, 碳足迹的研究方法主要有两类(Wiedmann *et al.*, 2008): 一是“自下而上”模型, 以过程分析法(PA-LCA)为基础; 二是“自上而下”模型, 以投入产出分析(EIO-LCA)为基础。两者均基于生命周期评价(LCA)原理。PA-LCA 以系统边界内的过程分析为基本出发点, 通过生命周期清单分析得到所研究对象的输入和输出数据清单, 进而计算研究对象全生命周期的碳排放, 即碳足迹, 但由于不可避免地省略边界外的部分过程而导致存在“截断误差”(Suh *et al.*, 2003)。EIO-LCA 是研究经济系统各部门间“投入”与“产出”关系的数学模型, 无截断误差, 但只能得到部门平均水平的数据, 无法获悉具体某产品的温室气体排放。因此, 结合两种方法各自优势的混合生命周期评价方法(Hybrid LCA)开始得到重视(Finnveden *et al.*, 2009)。在水电碳足迹的定量研究方面, 国内外学者对小水电工程的碳足迹研究多采用 PA-LCA 方法(Pascale *et al.*, 2011; Ribeiro *et al.*, 2010; Suwanit *et al.*, 2011)。Zhang 等(2007)采用 EIO-LCA 方法对中国两座不同规模的水电枢纽工程进行碳足迹分析, 结果表明, 大规模的水电工程比小规模的水电工程的碳排放因子低。不同施工技术所产生的碳足迹也不同, Liu 等(2013)采用混合生命周期评价方法研究了堆石混凝土坝(RFC)和普通混凝土坝的温室气体排放水平, 发现 RFC 可减少 64% 的碳排放。但其研究范围仅限于坝体本身

及混凝土材料, 为了全面深入研究水电的温室气体排放, 有必要将研究范围扩展到整个水电枢纽工程及最常见的堆石坝材料。心墙堆石坝和混凝土坝是最常见的两种坝型, 其枢纽布置不同, 所采用的材料差异较大, 施工工艺也大不相同, 因此, 两种坝型的温室气体排放强度不得而知。目前, 坝型比选时也未考虑坝型的选择对温室气体排放的影响, 可能会造成环境评价的不合理。

基于碳足迹理论和大型水电枢纽工程的特征, 本文提出采用混合生命周期评价方法分析其温室气体排放, 并给出适合水电工程的各阶段碳足迹计算方法。同时, 以糯扎渡水电工程的混凝土重力坝枢纽布置方案和心墙堆石坝枢纽布置方案为例, 定量研究并对比同等规模、不同坝型水电工程对温室气体排放的影响, 以期对水电工程的环境影响评价及坝型的选择提供更全面的参考。

2 大型水电工程碳足迹分析方法(Carbon footprint calculation method for large hydropower plants)

2.1 系统边界

系统边界包括大型水电枢纽工程生命周期内的全部直接和间接的生产、运输、施工、运行和维护等环节。上游上溯到原材料的开采、生产, 下游下沿至水电工程的运行和维护, 具体如图 1 所示。退役阶段的大型水电枢纽工程极少, 且相关数据匮乏, 因此, 大型水电枢纽工程的碳足迹评价可暂不考虑退役阶段(Zhang *et al.*, 2007)。系统中不考虑由于修建生活住宅而产生的材料和能源消耗及其温室气体排放, 因为该部分能耗相对大型水电枢纽工程而

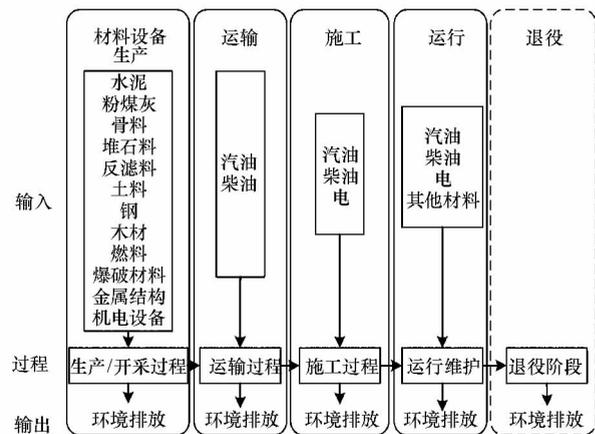


图 1 大型水电枢纽工程生命周期系统边界

Fig.1 System boundary of the large hydropower life cycle

言非常小,可以忽略(Ribeiro *et al.*, 2010).另外,在LCA分析中,一般忽略施工机械的生产过程,因为该过程的影响分摊到每个功能单位上往往非常微小(如一台起重机可用于多个水电站的建设);但应计算设备运行的资源能源投入,例如,在某一特定工程项目中起重机的柴油消耗等.其他排除在系统边界外的因素是生活物资的生产、人员的运输及劳力等.

2.2 碳足迹计算方法

大型水电枢纽工程生命周期长,涉及到的材料和过程非常多,施工工艺复杂,实景数据难以获得,采用PA-LCA必将投入大量人力、物力资源,完全采用EIO-LCA方法又过于笼统化.因此,本文拟采用结合两种方法优势的混合LCA法(Finnveden *et al.*, 2009)来研究大型水电枢纽工程的碳足迹.基于过程分析法(PA-LCA)的碳足迹计算公式一般形式为:

$$C = \sum_{i=1} Q_i \cdot EF_i \quad (1)$$

式中, C 为碳足迹; Q_i 为 i 物质或活动的数量或强度数据; EF_i 为单位碳排放因子.

投入产出分析方法则是根据EIO-LCA模型,由某经济部门的成本投入得到该部门相应的温室气体排放量即产出.对于碳排放因子数据缺乏的材料,或者上游边界较远的单元过程,另外,如金属结构、机电设备、爆破材料等这类不易再划分出更具体产品的情况,可采用投入产出分析方法.EIO-LCA方法得到的计算结果一般为单位货币的CO₂当量,类似于碳排放因子EF,因此,可结合PA-LCA与EIO-LCA分析大型水电枢纽工程的碳足迹.针对大型水电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.

2.2.1 材料设备生产阶段碳足迹 等于各种材料和设备在生产制造阶段的碳足迹之和.碳足迹为材料或设备的数量(或成本)与其碳排放因子的乘积,公式如下:

$$C_1 = \sum_i M_i \cdot \beta_i \quad (2)$$

式中, C_1 为材料和设备生产阶段的碳足迹(t或kg,以CO₂当量计); β_i 为第 i 种材料或设备的碳排放因子($t \cdot t^{-1}$, $kg \cdot kg^{-1}$ 或 $t \cdot \text{元}^{-1}$, $kg \cdot \text{元}^{-1}$, $t \cdot \text{美元}^{-1}$, $kg \cdot \text{美元}^{-1}$, 以CO₂当量计); M_i 为第 i 种材料或设备的用量(t或kg)或成本(元或美元).

2.2.2 运输阶段碳足迹 主要来自运输车辆耗油所排放的温室气体,一般只计算由场外商家运输到

工地的能耗(Liu *et al.*, 2013).但水电枢纽工程施工阶段的工程量非常大,场内的运输能耗不可忽略.为方便计算,将施工期的场内运输能耗列入运输阶段.

对于场外运输,首先由货物运输量、运输距离、运输方式得到运输时间,再根据《水利水电施工机械台班费定额》得到运输车辆的台班耗油量,总耗油量乘以油的碳排放因子即场外运输碳足迹.场外运输假设某一种材料或设备一次运完,不需返程,具体公式如式(3)所示.对于场内运输,假设返程时均为空车,具体公式如式(4)所示.对于油料用量未知时,如铁路运输,可由杨建新等(2002)建立的公用过程环境排放清单计算CO₂排放情况.

$$C_{2外} = \sum_j y_j \cdot M_j = \sum_j (\gamma_j \cdot \sum_i \alpha_j \frac{M_{总i}}{M_{载重}} \frac{L_i}{v} \frac{1}{8}) \quad (3)$$

$$C_{2内} = \sum_j y_j \cdot M_j = \sum_j (\gamma_j \cdot \sum_i \alpha_j \frac{M_{总i}}{M_{载重}} \frac{2L_i}{v} \frac{1}{8}) \quad (4)$$

式中, $C_{2外}$ 、 $C_{2内}$ 分别为场外、场内运输阶段的碳足迹(t或kg,以CO₂当量计); γ_j 为第 j 种油料的碳排放因子($t \cdot t^{-1}$, $kg \cdot kg^{-1}$, 以CO₂当量计); M_j 为第 j 种油料的消耗量(t或kg); $M_{总i}$ 为第 i 种货物的总质量(t或kg); $M_{载重}$ 为车辆的载重量(t或kg); L_i 为第 i 种货物的运输距离(km); v 为运输车辆的行驶速度($km \cdot h^{-1}$); α_j 为车辆每台班消耗第 j 种油料的质量(t或kg); $1/8$ 为台班耗油量转换为小时耗油量的系数.

2.2.3 施工阶段碳足迹 来源主要是施工机械工作耗油或耗电所引起的温室气体排放.施工阶段使用的机械设备数量众多,型号千差万别,都增加了计算碳排放量的难度(李兵, 2012).

施工阶段的能耗主要取决于施工机械的工作时间和单位时间耗能情况.单位时间耗能可通过参考《水利水电施工机械台班费定额》中的台班耗能指标,施工机械的工作时间需要根据施工工程量和生产率得到.耗能包括耗油和耗电,耗油量乘以油的碳排放因子,再加上耗电量乘以电的碳排放因子即可得到总的施工碳足迹.计算公式如下:

$$C_3 = \sum_k \gamma_k \cdot M_k = \sum_k (y_k \cdot \sum_l \sum_r \alpha_{rk} V_{总l} \cdot t_{rl} \frac{1}{8}) \quad (5)$$

式中, C_3 为施工阶段的碳足迹(t或kg,以CO₂当量计); γ_k 为第 k 种能源(柴油、汽油、电)的碳排放因

子($t \cdot t^{-1}$, $kg \cdot kg^{-1}$, 以 CO_2 当量计); M_k 为第 k 种能源的消耗量(t 或 kg); $V_{\text{总}l}$ 为第 l 个单项工程的总工程量(m^3); t_{rl} 为第 r 种机械在第 l 个单项工程上的生产率(台班 m^{-3}); α_{rk} 为第 r 种机械每台班消耗第 k 种能源的质量(t 或 kg); $1/8$ 为台班耗油量转换为小时耗油量的系数.

2.2.4 运行维护阶段碳足迹 采用投入产出分析方法, 这是因为水电枢纽工程运行阶段的能耗来源比较复杂, 没有一个清晰的系统边界, 且收集数 10 年的历史数据费时、昂贵, 因此, 采用 PA-LCA 是不可行的. 工程设计时一般都会对工程进行投资预算, 因此, 可由经济成本通过 EIO-LCA 得到环境排放.

电站发电成本一般包括折旧费、修理费、职工工资及福利费、劳保统筹、材料费、库区维护费、水资源费、移民后期扶持基金、其它费用和利息支出等. 在运行阶段计算温室气体排放时, 仅需考虑与其相关的修理、材料和库区维护. 另外, 由于水库泥沙和植物等造成的温室气体排放也是运行阶段碳足

迹重要的来源(Pacca, 2007), 考虑到该部分研究较少, 可采用项目类比方法进行估算. 公式如下:

$$C_4 = R \cdot \xi + C_{\text{库}} \quad (6)$$

式中, C_4 为运行阶段的碳足迹(t 或 kg , 以 CO_2 当量计); R 为运行维护成本(元或美元); ξ 为单位维护成本所对应的温室气体排放量($t \cdot \text{元}^{-1}$, $kg \cdot \text{元}^{-1}$, $t \cdot \text{美元}^{-1}$, $kg \cdot \text{美元}^{-1}$, 以 CO_2 当量计); $C_{\text{库}}$ 为库区温室气体排放(t 或 kg , 以 CO_2 当量计).

2.2.5 生命周期碳足迹 由各阶段的碳足迹叠加得到, 即:

$$C = \sum_{p=1}^4 C_p \quad (7)$$

2.3 数据来源

本文所采用的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、中国工程院、中国区域电网基准线排放因子、国内外公开文献数据及 EIO-LCA 模型, 详见表 1.

表 1 主要材料、设备及能源的碳排放因子数据

Table 1 Emission factors of the materials, equipment and energy

材料、设备及能源	碳排放因子取值	单位	来源
堆石料	0.002	$t \cdot t^{-1}$	ELCD 数据库 2009
反滤料	0.013	$t \cdot t^{-1}$	ELCD 数据库 2009
防渗土料	1490	$t/10^6$ 美元	EIO-LCA 模型 2002
混凝土	0.094	$t \cdot t^{-1}$	李小冬等, 2011
钢材	2.2	$t \cdot t^{-1}$	中国原子能科学研究院
柴油	0.139	$t \cdot t^{-1}$	CLCD 数据库 2012
汽油	0.229	$t \cdot t^{-1}$	CLCD 数据库 2012
煤炭	2.4933	$t \cdot t^{-1}$	中国工程院
木材	522	$t/10^6$ 美元	EIO-LCA 模型 2002
爆破材料	926	$t/10^6$ 美元	EIO-LCA 模型 2002
金属结构	640	$t/10^6$ 美元	EIO-LCA 模型 2002
机电设备	398	$t/10^6$ 美元	EIO-LCA 模型 2002
电	0.788	$kg \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$	2009 中国区域电网基准线排放因子(南方区域电网)

注: 表中柴油、汽油的碳排放因子是指生产柴油和汽油的碳排放因子; 柴油、汽油燃烧产生动力的碳排放因子分别为 $3.06 t \cdot t^{-1}$ 和 $3.15 t \cdot t^{-1}$ (BP China 2010); 碳排放因子均以 CO_2 当量计.

3 实例应用(Applied case)

糯扎渡水电站在预可研阶段最终归纳成两种坝型, 即重力坝和粘土心墙堆石坝的代表性枢纽布置方案. 在两种方案环境影响评价和综合比较时, 未考虑其对温室气体排放的影响. 混凝土重力坝枢纽布置方案由拦河大坝、水垫塘及二道坝、下游护岸、左岸引水系统及地下厂房、导流工程组成. 粘土

心墙堆石坝枢纽布置方案由心墙堆石坝、开敞式溢洪道、右岸泄洪隧洞、左岸泄洪隧洞、下游护岸、左岸引水系统及地下厂房、导流工程组成. 常态混凝土重力坝最大坝高 265 m, 心墙堆石坝坝高 261.5 m. 电站总装机容量为 5850 MW, 年均发电量 239.12 亿 $kW \cdot h$. 糯扎渡水电站工程筹建期 3 年, 建设期 12 年(初期运行 4 年), 正常生产期 30 年, 计算期共 45 年.

3.1 材料设备生产阶段温室气体排放

采用混合 LCA 法对两方案进行碳足迹分析,得到重力坝和堆石坝在材料设备生产阶段的材料、设备、能源消耗量及温室气体排放,具体如表 2 所示.重力坝方案和堆石坝方案在该阶段的温室气体排放量分别为 520.05×10^4 和 254.53×10^4 t(以 CO_2 当量计),重力坝比堆石坝多排放 104.32%.主要是由于重力坝方案采用大量混凝土,混凝土的重要组成成分水泥是高排放产业,其在生产过程中所产生的 CO_2 排放量占全国 CO_2 排放总量的 18%~22%(崔素萍等,2008).其次,钢材生产所排放的 CO_2 分别占重力坝方案和堆石坝方案的 20.32%和 29.84%,这是因为钢铁行业也是高能耗、高排放的行业,中国每年钢铁工业排放的 CO_2 达 5 亿 t 以上, CO_2 排放量占全国 CO_2 总排放量的 9.2%(张玥等,2013).其他材料包括堆石料、反滤料、防渗土料、柴油、煤炭、木材、爆破材料、金属结构、机电设备等由于用量少或碳排放因子低,其生产阶段的 CO_2 排放量较少.

表 2 材料设备生产阶段的温室气体排放量
Table 2 Greenhouse gas emissions in the production stage

材料设备	用量或费用		温室气体排放量/ 10^4 t	
	重力坝	堆石坝	重力坝	堆石坝
堆石料		5648.64		11.30
反滤料		396.68		5.16
防渗土料		57.61		2.93
混凝土	3532.83	861.64	332.09	80.99
钢材	48.04	34.52	105.69	75.94
柴油	63.58	26.06	8.84	3.62
煤炭	5.28	4.62	13.16	11.52
木材	63.83	18.38	3.33	0.96
爆破材料	54.89	71.88	5.08	6.66
金属结构	95.37	124.20	6.10	7.95
机电设备	1149.77	1193.57	45.76	47.50
总计			520.05	254.53

注:堆石料、反滤料、混凝土、钢材、柴油、煤炭的用量单位为 10^4 t;防渗土料、木材、爆破材料、金属结构、机电设备的费用单位为 10^6 美元;温室气体排放量以 CO_2 当量计.

3.2 运输阶段温室气体排放

由于堆石坝方案采用大量当地材料,故其场外运输所造成的温室气体排放较少,但场内运输产生的温室气体排放较多.两方案运输阶段的温室气体排放如表 3 所示.运输阶段,两方案温室气体排放量分别为 16.04×10^4 和 14.90×10^4 t(以 CO_2 当量计),重

力坝比堆石坝多排放 7.67%.

表 3 运输阶段的温室气体排放量
Table 3 Greenhouse gas emissions in the transportation stage

材料	温室气体排放量/t			
	重力坝		堆石坝	
	场内运输	场外运输	场内运输	场外运输
水泥	1551.30	35416.19	571.13	13038.80
木材	66.46	624.44	19.14	179.86
钢材	225.95	8947.55	162.36	6429.42
天然掺合料	225.76	—	51.74	—
粉煤灰	225.76	8479.55	51.74	1943.23
金属结构及机电设备	61.28	4062.62	59.26	3941.27
爆破材料	15.19	649.36	19.90	850.40
煤炭	24.83	1007.25	21.73	881.34
油料	299.04	11886.76	122.57	4872.11
施工机械	—	5979.82	—	3442.84
土石方明挖出渣	42292.37	—	51489.15	—
石方洞挖出渣	6029.67	—	6665.89	—
土石方填筑	1669.68	—	39246.61	—
混凝土浇筑	17040.18	—	4941.76	—
砂石骨料加工母岩	13639.67	—	9994.58	—
总计	83367.15	77053.52	113417.56	35579.28

3.3 施工阶段温室气体排放

施工阶段考虑挡水建筑物、泄水建筑物、引水发电系统及导流工程的施工过程能耗和温室气体排放,考虑主要单项工程,如土石方明挖、石方洞挖、石方槽挖、石方井挖、堆石坝填筑、混凝土浇筑、钢筋、锚杆、喷混凝土、帷幕灌浆、固结灌浆、回填灌浆、接缝灌浆、排水孔、护坡等.经分析,在施工阶段重力坝方案和堆石坝方案分别排放 38.62×10^4 和 49.41×10^4 t(以 CO_2 当量计),重力坝比堆石坝少排放 21.85%.主要是因为堆石坝的工程量比重力坝大得多,其施工过程耗费更多的柴油,混凝土重力坝施工主要耗较多电能,而柴油燃烧产生动力的碳排放因子为 $3.06 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 CO_2 当量计),电的碳排放因子仅为 $0.788 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (以 CO_2 当量计).两个方案各单项工程的温室气体排放比例如图 2 所示.堆石坝施工过程中,主要是土石方明挖和堆石坝填筑过程所产生的温室气体较多,分别占施工阶段总排放的 35.77%和 17.35%.重力坝在施工过程中,混凝土填筑和土石方明挖过程产生的温室气体比例最大,分别占施工阶段总排放的 27.98%和 25.90%.

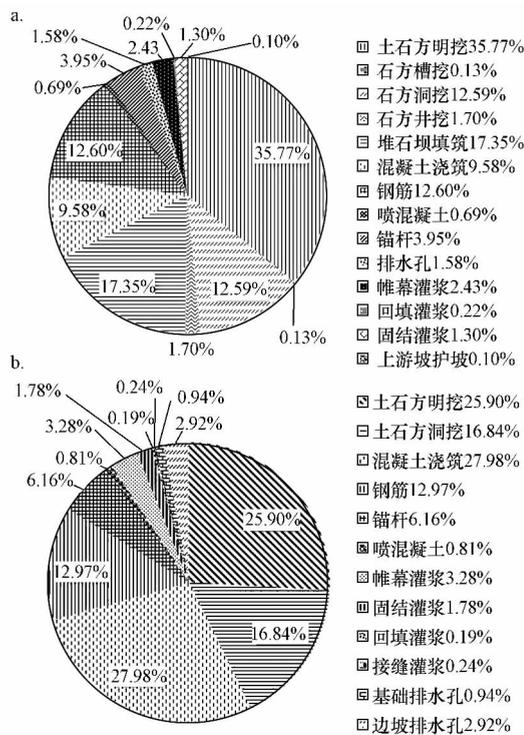


图2 堆石坝 (a) 和重力坝 (b) 方案各单项工程在施工阶段的温室气体排放比例

Fig.2 Greenhouse gas emissions proportion of unit construction for rockfill dam (a) and gravity dam (b) in the construction stage

3.4 运行阶段温室气体排放

水电工程在运行维护阶段的温室气体排放分为两部分,一是因运行维护产生的材料和能源消耗而引起的温室气体排放;二是水库温室气体排放.堆石坝方案的修理费、材料费及库区维护费共 12133.48×10^6 元(按 2003 年 6 月底价格水平) 根据 2003 年中国购买力平价转换因子 PPP 为 3.29 将人民币转换为美元,再由 2003 年美国居民消费价格指数(CPI) 1.84 和 2002 年美国居民消费价格指数(CPI) 1.799 计算得到 2002 年费用为 3605.8×10^6 美元.根据 2002 年美国 EIO-LCA 模型,选择 Construction 部门的 Nonresidential Maintenance and Repair 子部门,计算得到从第 12~45 年运行发电阶段堆石坝工程的 CO_2 排放量为 225.00×10^4 t,平均每年排放 6.62×10^4 t.重力坝方案的修理费、材料费及库区维护费共 14793.36×10^6 元(按 1998 年价格水平) 根据 1998 年中国购买力平价转换因子 PPP 为 3.41 将人民币转换为美元,再由 1998 年美国居民消费价格指数(CPI) 1.63 和 2002 年美国居民消费价格指数(CPI) 1.799 计算得到 2002 年费用为

4788.0×10^6 美元.根据 2002 年美国 EIO-LCA 模型,选择 Construction 部门的 Nonresidential Maintenance and Repair 子部门,计算得到从第 12~45 年运行发电阶段重力坝工程的 CO_2 排放量为 298.77×10^4 t,平均每年排放 8.79×10^4 t.

第二部分是水库库区温室气体排放,与水库面积及泥沙(Pacca, 2007)、植物的特性有关.由于糯扎渡库区的气候与加拿大相似,略偏高(Zhang et al., 2007),故采用加拿大的研究成果即 $250 t \cdot km^{-2}$ (以 CO_2 当量计).糯扎渡库区面积为 $320 km^2$,则两方案平均每年的水库温室气体排放均为 8×10^4 t (以 CO_2 当量计).另外,运行阶段厂区消耗的电均为自生产的电量,向广东、云南和泰国提供的有效电量为 239.12 亿 $kW \cdot h$.因此,不考虑运行阶段厂区耗电所造成的温室气体排放.

重力坝和堆石坝方案在运行阶段温室气体分别排放 570.77×10^4 和 497.00×10^4 t (以 CO_2 当量计).重力坝比堆石坝多排放 14.84%.运行阶段排放的温室气体较多是因为运行期长达 34 年.重力坝和堆石坝的平均每年排放量分别仅为 16.79×10^4 和 14.62×10^4 t (以 CO_2 当量计).

3.5 生命周期温室气体排放

重力坝方案和堆石坝方案在生命周期内总的温室气体排放量分别为 1145.49×10^4 和 815.85×10^4 t (以 CO_2 当量计),重力坝比堆石坝多排放 40.4%.在

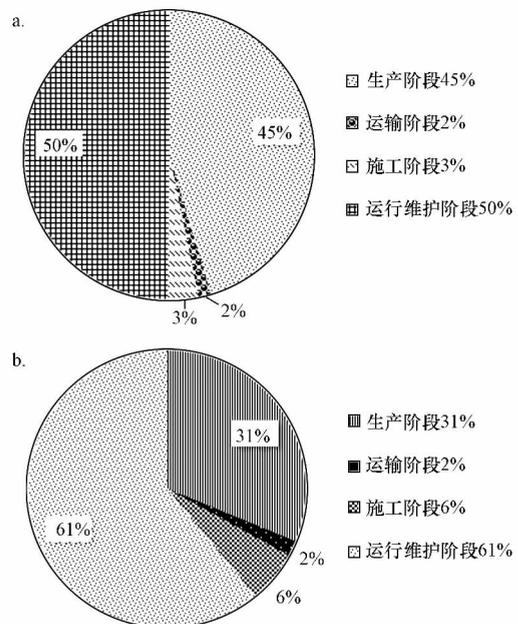


图3 重力坝 (a) 和堆石坝 (b) 各阶段的温室气体排放比例

Fig.3 Greenhouse gas emissions proportion for gravity dam (a) and rockfill dam (b) in the life cycle stage

计算期 45 年内,重力坝和堆石坝平均每年排放 25.46×10^4 和 18.13×10^4 t (以 CO_2 当量计)。由图 3 可知,两种坝型在运行阶段的温室气体排放比例最大,重力坝运行期的温室气体排放占全生命周期的 50%,堆石坝运行期的温室气体排放占全生命周期的 61%。其次材料生产阶段所排放的温室气体较多,重力坝材料生产所排放的温室气体占全生命周期的 45%,堆石坝材料生产所排放的温室气体占全生命周期的 31%。而施工阶段和运输阶段的温室气体排放比例较小。虽然 34 年运行期的碳足迹最大,但平均每年的温室气体排放与运输阶段相近。因此,应从各阶段开展水电工程的节能降耗工作,减少水泥、钢材等高排放产品的用量,优化施工过程,降低施工能耗,同时加强运行管理,注重日常养护并及时清理库区,使得水电工程生命周期的温室气体排放降到最低水平。

3.6 糯扎渡水电工程碳排放因子

在 45 年计算期内,糯扎渡水电站运行发电 34 年,年发电量为 239.1×10^8 kW·h。重力坝方案和堆石坝方案平均每 kW·h 的碳排放因子分别为 14.09 和 10.04 $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (以 CO_2 当量计)。在计算期外若再运行,温室气体排放仅考虑运行阶段,则重力坝和堆石坝的水电碳排放因子分别仅为 7.02 和 6.11 $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。糯扎渡水电工程的碳排放因子介于其他水电站碳排放因子的研究范围内 ($2 \sim 48$ $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 以 CO_2 当量计) (USNEI, 2005)。而火电站的碳足迹一般为 890 $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (以 CO_2 当量计) (Pacca, 2007)。郭敏晓等 (2012) 计算得到的风电场碳排放因子为 9.47 $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (以 CO_2 当量计)。因此,可再生能源发电技术的温室气体排放强度比火电大大减小,同时对温室效应的影响也小很多。

4 结论 (Conclusions)

1) 基于混合生命周期评价方法定量研究同规模、不同坝型的水电工程温室气体排放,研究表明,心墙堆石坝方案比混凝土重力坝方案产生的温室气体较少,同时不论哪种水电枢纽布置都较火电具有较大的环境效益。重力坝方案和堆石坝方案在生命周期内总的温室气体排放量分别为 1145.49×10^4 和 815.85×10^4 t (以 CO_2 当量计),重力坝比堆石坝多排放 40.4%。在材料设备生产阶段、运输阶段和运行阶段,重力坝方案较堆石坝方案排放较多的温室气体,分别多排放 104.32%、7.67% 和 14.84%; 但在

施工阶段,重力坝方案比堆石坝方案少排放 21.85% 的温室气体。

2) 由于运行期较长,水电工程在运行阶段的温室气体排放量最多,平均每年的排放量与运输阶段排放量相近,主要是由于建筑物、设备及库区的维护和排放造成;其次排放较多温室气体的阶段是材料生产阶段;施工阶段和运输阶段的温室气体排放量比例较小。建议减少水泥、钢材等高排放产品的用量,改进其生产技术,同时改善施工工艺,降低施工能耗,并在运行期间加强建筑物和库区管理。

3) 不论重力坝还是堆石坝,其碳排放因子均明显低于火电碳排放因子。因此,大力开展水电建设,并将节能降耗工作贯穿于工程的整个生命周期,是实现我国“十二五”规划碳减排目标的有效途径。

责任作者简介:张社荣(1960—),男,教授,主要从事水利水电工程安全及环保技术研究。E-mail: tjuzsr@126.com.

参考文献 (References):

- 崔素萍,刘伟. 2008. 水泥生产过程 CO_2 减排潜力分析[J]. 中国水泥, (4): 57-59
- Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, et al. 2009. Recent developments in life cycle assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 91(1): 1-21
- 郭敏晓,蔡闻佳,王灿,等. 2012. 风电场生命周期 CO_2 排放核算与不确定性分析[J]. 中国环境科学, 32(4): 742-747
- 李兵. 2012. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学
- 李小冬,王帅,孔祥勤,等. 2011. 预拌混凝土生命周期环境影响评价[J]. 土木工程学报, 44(1): 132-138
- Liu C N, Ahn C B, An X H, et al. 2013. Life cycle assessment of concrete dam construction: comparison of environmental impacts between rock-filled and conventional concrete [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(12): A4013009-1-A4013009-11
- Pacca S. 2007. Impacts from decommissioning of hydroelectric dams: a life cycle perspective [J]. *Climatic Change*, 84(3/4): 281-294
- Pascale A, Urmee T, Moore A. 2011. Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand [J]. *Renewable Energy*, 36(11): 2799-2808
- Ribeiro F D, Da Silva G A. 2010. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 18(1): 44-54
- Suh S, Lenzen M, Treloar G J, et al. 2003. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches [J]. *Environmental Science & Technology*, 38(3): 657-664
- Suwanit W, Gheewala S H. 2011. Life cycle assessment of mini-hydropower plants in Thailand [J]. *International Journal of Life Cycle*

- Assessment ,16(9) : 849-858
- United States Nuclear Energy Institute (USNEI) . 2005. Life-cycle emissions analysis [EB/OL]. 2013-12-21. <http://www.nei.org/index.asp?catnum=2&catid=260>
- 王君章,方恺.2012.基于来源多样性特征的中国电力碳足迹估算[J].*电力学报* 27(2) : 158-162
- 王微,林剑芝,崔胜辉,等.2010.碳足迹分析方法研究综述[J].*环境科学与技术* 33(7) : 71-78
- Wiedmann T,Minx J.2008.A definition of ‘Carbon Footprint’ //Pertsova C C.Ecological Economics Research Trends [M].Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers.1-11
- 杨建新,徐成,王如松,等.2002.产品生命周期评价方法及应用[M].北京:气象出版社
- 张玥,王让会,刘飞.2013.钢铁生产过程碳足迹研究——以南京钢铁联合有限公司为例[J].*环境科学学报* 33(4) : 1195-1201
- Zhang Q F ,Karney B ,Maclean H L ,et al.2007.Life-cycle inventory of energy use and greenhouse gas emissions for two hydropower projects in China[J].*Journal of Infrastructure Systems* ,13(4) : 271-279

《环境科学学报》(月刊) 2015 年征订启事

《环境科学学报》是国内环境科学领域最有影响的学报级学术期刊,1981年创刊,由中国科学院生态环境研究中心主办,科学出版社出版。本刊为中文核心期刊,多次荣获“百种中国杰出学术期刊”、“中国精品科技期刊”和“中国最具国际影响力学术期刊”称号。

本刊力求及时报道国内环境科学与工程领域新近取得的创新性研究成果,跟踪最新学术进展,推动中国和世界环境科学事业的发展。本刊报道领域涉及环境化学、环境地学、环境毒理与风险评价、环境修复技术与原理、环境污染治理技术原理与工艺、环境经济与环境管理等;读者对象为环境科学与工程领域科研或管理机构的科学家、工程师,以及高等院校相关专业的教师、研究生。

《环境科学学报》现为月刊,国内外公开发行,国内邮发代号:82-625,ISSN 0253-2468,CN 11-1843/X,每期定价80元,全年960元。欢迎广大读者通过各地邮政局订阅或直接与编辑部联系

编辑部地址:北京市海淀区双清路18号,邮编:100085;联系电话:010-62941073

网址:www.actasc.cn; E-mail: hjkxxb@rcees.ac.cn.