



# 基于 LCA 的长江上游某内河港口工程 碳排放估算与分析\*

任建林, 秦宇, 欧阳常悦, 李卫青

(重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 国家内河航道整治工程技术中心, 重庆 400074)

**摘要:** “十四五”期间“双碳”目标的提出, 推动着我国基础设施建设向绿色低碳的方向发展, 生命周期评价方法(LCA)作为一款全面的环境影响评价工具逐渐开始应用到我国建筑业。以生命周期评价理论为基础, 选取长江上游某内河港口工程为研究对象, 将该港口工程全生命周期划分为施工阶段、运维阶段及退役阶段进行碳排放来源分析并估算碳排放。结果表明, 该港口工程全生命周期碳排放为 8.67 万 t CO<sub>2</sub>-eq(当量), 施工阶段、运维阶段、退役阶段分别占比 39.4%、56.7%、3.9%, 单位碳排放为 95%置信区间为 651.92~745.21 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, 中位数为 698.14 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, 清单数据不确定性较小, 港口工程碳排放敏感因素为混凝土和电力。碳排放评价结果总体较好, 可作为后续制定碳减排政策的相关依据。

**关键词:** 生命周期评价; 内河港口工程; 碳排放; 不确定性分析

中图分类号: U65; X828

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0053-07

DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20240029.024

## Estimation and analysis of carbon emissions from inland river port project in upper Yangtze River based on LCA

REN Jianlin, QIN Yu, OUYANG Changyue, LI Weiqing

(Key Laboratory of Ministry of Education for Hydraulic and Water Transport Engineering,

National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** With the introduction of the “carbon peak and neutrality” in the 14th Five-Year Plan, China’s infrastructure construction is driven towards a green and low-carbon direction, and the life cycle assessment(LCA) method is gradually being applied to China’s construction industry as a comprehensive environmental impact assessment tool. Based on the life cycle assessment theory, we select an inland river port project in the upper reaches of the Yangtze River as the research object, and divide the whole life cycle of the port project into the construction phase, operation and maintenance phase and decommissioning phase to analyze the carbon emission sources and estimate the carbon emission. The results show that the life-cycle carbon emissions of the port project are 86,700 t CO<sub>2</sub>-eq, with 39.4%, 56.7% and 3.9% for the construction, operation and maintenance and decommissioning phases respectively. The 95% confidence interval for unit carbon emissions is 651.92 to 745.21 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, with a median value of 698.14 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. The uncertainty in the inventory data is little, and the sensitive factors for port carbon emissions are concrete and electricity. The carbon emission evaluation results are generally good, and can be used as a relevant basis for the subsequent formulation of carbon emission reduction policies.

**Keywords:** life cycle assessment; inland waterway port engineering; carbon emission; uncertainty analysis

收稿日期: 2023-06-13

\* 基金项目: 重庆市研究生联合培养基地建设项目 (JDLHPYJD2020024)

作者简介: 任建林 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口碳排放。

通讯作者: 秦宇 (1981—), 女, 博士, 教授, 研究方向为生态港口及水库碳排放。E-mail: qinyu@cqjtu.edu.cn

为应对全球气候变暖，减少温室气体排放，我国在 2020 年提出碳达峰、碳中和两个目标，“双碳”目标的提出推动了我国低碳、零碳产业的发展，内河航运以其运量大、成本低、排放少等众多优势，迎来了新的发展机遇<sup>[1]</sup>。2018—2020 年我国内河港口码头长度从 790 km 增长至 1 140 km，内河港口泊位从 11 148 个增加到 17 297 个<sup>[2]</sup>。内河港口等基础设施建设高速发展的同时也为我国“双碳”目标带来不小的压力，尽管水运相较于陆运、空运在节能减排、环境保护等方面更具优势，但在港口码头建设过程中，因场地材料运输、施工机械设备的能源消耗以及港口后期运行维护等排放出的温室气体对环境的影响不容忽视。生命周期评价(life cycle assessment, LCA)作为一种新型的环境影响评价方法，因其综合、全面、彻底的评价特点，被广泛应用到各个领域。LCA 结合建筑、能源的案例越来越多，但大多是关于水电、火电、风电、房屋建筑、桥梁等研究，极少有关于港口 LCA 的研究。以往的学者大都只是采用相关参数、指标定性地评价一个港口的低碳属性<sup>[3]</sup>，并没有定量地计算港口的碳排放。目前暂未有相关学者使用 LCA 对我国内河港口工程进行碳排放评估，而这一方法恰好能定量地计算港口工程全生命周期碳排放，并且找出影响碳排放的关键因素，针对性地指定减碳对策，因此结合 LCA 方法对我国内河港口工程开展全生命周期碳排放评估工作意义重大。

本文以生命周期评价理论为基础，对长江上游某内河港口工程进行全生命周期碳排放估算，提出一种适用于我国内河港口工程全生命周期碳排放估算方法，可为今后进一步对我国河港、海港开展碳排放评价工作提供帮助和数据参考。

## 1 研究方法

### 1.1 LCA 定义

通常来说，LCA 是指对工业产品的整个生命周期——从原材料的获取到设计、制造、使用、循环利用和最终报废等过程，定量地计算和评价产品整个生命周期实际或潜在的能源物质消耗以及排出的温室气体<sup>[4]</sup>。根据 ISO 14040《生命周期评价原则与框架》的规定，组成 LCA 的基本结构大致可分为 4 个：目标和范围(边界)定义、清单分析、影响评价、结果解释<sup>[5-6]</sup>。本文的港口工程 LCA 严格按照此步骤进行，其结构框架如图 1<sup>[7]</sup>所示。

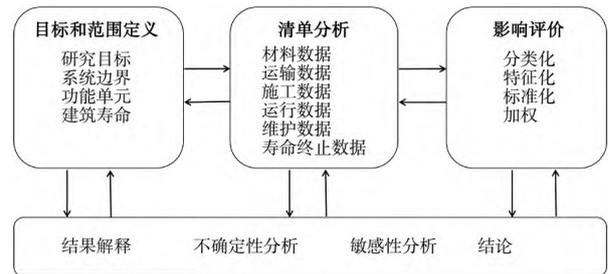


图 1 LCA 框架

### 1.2 目标与范围

本文 LCA 的目标即评估该港口工程生命周期全过程碳排放量，分析其碳排放组成。将港口工程全生命周期分为 3 个阶段，即施工阶段、运维阶段，退役阶段，其系统边界如图 2 所示。施工阶段碳排放主要是建筑原材料开采、施工机械设备能源消耗等带来的碳排放；运维阶段碳排放主要来源于港口日常运作的能源消耗；退役阶段的碳排放为港区废弃拆除或改造升级排放的二氧化碳。假设本文港口 LCA 不考虑项目基础数据资料未涉及的碳排放以及港口运行期间各类船舶来往、停靠产生的碳排放，功能单元设定为案例港口每平方米所产生的二氧化碳。

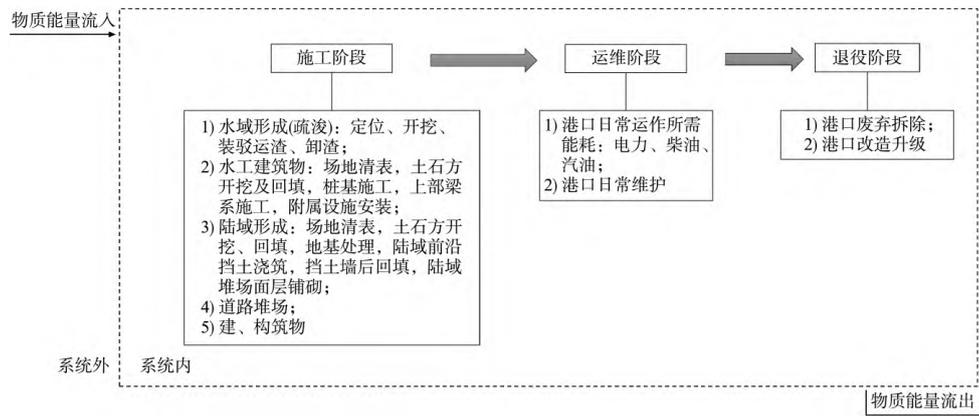


图 2 港口工程系统边界

### 1.3 清单分析

清单分析是统计、计算符合 LCA 系统边界内的所有物质能源消耗,是整个 LCA 流程中最繁琐的一个阶段<sup>[8]</sup>。由于本文港口案例目前尚处于规划建设阶段,LCA 的基础数据大部分来自于港口项目设计说明书的统计数据,以及根据统计数据转换计算得出的数据,其余未统计的数据参考 LCA 数据库。根据系统边界内划分的 3 个阶段,分别对各个阶段内的清单数据进行统计分析。

#### 1.3.1 施工阶段

该港口占地 12.4 万 m<sup>2</sup>,拟建设 3 000 和 5 000 吨级多用途泊位各 1 个并配套相应设施,设计年吞吐量 170 万 t,设计年通过能力 170 万 t。主要建设内容为港区开挖、水工建筑物、陆域形成、堆

场道路、生产辅助建筑物、装卸设备购置及安装以及相应的配套设施。涉及的材料消耗包括混凝土 6.84 万 m<sup>3</sup>、钢筋铁件 3 037.96 t、粗砂 4 545.61 m<sup>3</sup>、碎石 6.13 万 m<sup>3</sup>、塑料管 5 216.66 m、沥青木板 1 824.87 m<sup>2</sup>、三维网 7 782.2 m<sup>2</sup>。

施工阶段各种施工活动涉及的机械设备和运输设备因能源的消耗也会产生大量的二氧化碳,主要的施工活动有港区疏浚、现浇混凝土、挖土方、钢筋加工、软基强夯、填筑工程等,其能源消耗量可通过 JTS/T 275-1—2019《内河航运水工建筑工程定额》<sup>[9]</sup>和 JTS/T 275-2—2019《内河航运工程船舶机械艘(台)班费用定额》<sup>[10]</sup>两部相关规范,根据各单位工程的实际工程量进行定额转换计算得出,具体能源消耗见表 1。

表 1 施工阶段能源消耗

施工类型	工程量/万 m <sup>3</sup>	单位油耗量/[kg·(100 m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	实际油耗量/t	单位电耗量/(kW·h·m <sup>-3</sup> )	实际电耗量/(万 kW·h)
疏浚	5.80	98.68	57.23	-	-
挖方	45.78	56.01	256.37	-	-
填方	33.31	30.21	100.62	-	-
现浇混凝土	4.62	114.00	52.65	1.53	7.07
钢筋处理	0.21	-	-	70.43	14.69
软基强夯	7.61	6.64	5.05	-	-
填筑工程	28.04	105.90	296.93	-	-
合计	-	-	768.85	-	21.76

#### 1.3.2 运维阶段

该港口在运维阶段涉及的能耗主要有装卸运输系统、供电照明系统、给排水(消防)系统、环保系统等,主要能耗种类有电力、柴油、汽油、

燃料油等。由于该阶段不同于施工阶段,并不涉及各种施工项目以及原材料输入,且该阶段的碳排放大部分来自于港区日常运行维护所需要的电力、柴油等,因此只需要统计该阶段的能源消耗。

本项目计算期 22 a，其中建设期 2 a，运行期 20 a，其运维阶段每年的能耗种类及数量消耗见表 2。

表 2 运维阶段能耗种类及数量

能耗种类	能耗	占该阶段能耗比例/%
电力	314 万(kW·h) /a	54.9
油耗	258 t/a	45.1

### 1.3.3 退役阶段

港口的退役阶段产生的碳排放以及对环境的影响同样不容忽视，欧盟统计局估计欧盟 27 国每年的建筑拆除废物产量为 9.7 亿 t，平均回收率为 47%<sup>[11]</sup>，固体废物的再利用目前还处于发展阶段，因此大部分都被填埋，而没有考虑到对环境的影响，例如铅、砷、镉和二氧化硅等进入土壤后，导致土体和地下水污染<sup>[12]</sup>。由于目前缺少该港口工程退役阶段的相关数据资料，假定该港口的退役方式为废弃拆除，拆除过程中所使用的物质和能源消耗量与施工阶段的工程量有直接关系，相关研究表明<sup>[13]</sup>，其产生的碳排放大约是施工阶段碳排放的 10%。

### 1.4 生命周期碳排放计算方法

内河港口工程全生命周期碳排放指的是在其生命周期各阶段内由于能源、资源的消耗，向外界直接或间接排放的二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>-eq)<sup>[14]</sup>，CO<sub>2</sub>-eq 指的是 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCs(氢氟碳化物)、PFCs(全氟碳化物)、SF<sub>6</sub>这 6 种温室气体根据全球变暖潜力值(GWP)，以 CO<sub>2</sub> 为基准进行折算<sup>[15]</sup>，按照惯例，以 CO<sub>2</sub> 的 GWP 值为 1，其余气体与 CO<sub>2</sub> 的比值作为该气体 GWP 值，部分温室气体全球变暖潜力值见表 3<sup>[16-17]</sup>(以 HFC134a、CF<sub>4</sub> 作为 HFCs、PFCs 的代表性气体)。可以看出，其余温室气体的 GWP 值一般远大于二氧化碳，但由于它们在空气中含量少，所以绝大部分温室效应都是由二氧化碳引起的。目前计算碳排放的常用方法有基于清单分析的 PLCA 以及基于经济投入产出的 EIO-LCA<sup>[18]</sup>，常用的 LCA 软件有 Simapro、Gabi、openLCA 等。Simapro 作为一款专门进行生命周期评价的软件，因其强大的数据库和众多的环境影响评价方法，被广泛用于能源、材料、化工、基建等各个领域，本文选用 Simapro 对该港口工程全生

命周期碳排放进行评价，数据库选择 ecoinvent 3.5，评价方法选择 IPCC 2013 GWP 100 a。

表 3 温室气体全球变暖潜力值

温室 气体	GWP/(kg CO <sub>2</sub> -eq·kg <sup>-1</sup> )		
	20 a	100 a	500 a
CO <sub>2</sub>	1	1	1
CH <sub>4</sub>	72	25	7.6
N <sub>2</sub> O	289	298	153
HFC134a	3 300	1 300	400
CF <sub>4</sub>	3 850	5 650	8 730
SF <sub>6</sub>	16 300	22 800	32 600

## 2 结果与讨论

### 2.1 港口工程碳排放结果分析

根据 1.3.1 的材料消耗数据及表 1、2 的工程数据，输入 Simapro 建模计算得出碳排放结果为：该港口工程全生命周期碳排放总量为 8.67 万 t CO<sub>2</sub>-eq，单位碳排放量为 698.46 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>。其中运维阶段的碳排放量最大，为 4.91 万 t CO<sub>2</sub>-eq，占生命周期总碳排放量的 56.7%；其次是施工阶段，碳排放量为 3.41 万 t CO<sub>2</sub>-eq，占比 39.4%；最后是退役阶段，碳排放量为 3 409.30 t CO<sub>2</sub>-eq，占比 3.9%。

各阶段碳排放贡献见图 3。运维阶段碳排放虽然占比最多(运行周期为 20 a，大部分为电力消耗)，但其年均碳排放量为 2 455.41 t CO<sub>2</sub>-eq，而施工阶段年均碳排放量为 1.70 万 t CO<sub>2</sub>-eq，约是前者的 7 倍，因此施工阶段的碳排放仍是应重点关注的阶段。施工阶段中碳排放量占比最大的是建筑材料的消耗，其中占比最多的是混凝土(74%)，其次是钢筋(18.8%)、碎石(5.2%)。能源消耗带来的碳排放量最少，不到 2%。造成此现象的主要原因可能是因为生产混凝土的单元过程涉及的上游原材料较多、生产工序复杂、单位碳排放因子较大，其次混凝土使用量较多也是一部分原因，因此在保证安全和工程质量的情况下，减少高碳排放的建筑材料使用量和增加对再生材料的使用可有效降低该港口工程的碳排放。运维阶段碳排放量占比 56.7%，原因是其时间跨度较大，且该阶段长期大量消耗电力，导致电力消耗

所带来的碳排放占比高达 90% 以上, 如能大力发展绿色岸电设施建设、淘汰耗电量和耗油量高的

机械设备、提高港区清洁能源使用比例, 可有效减少运维期间碳排放量。

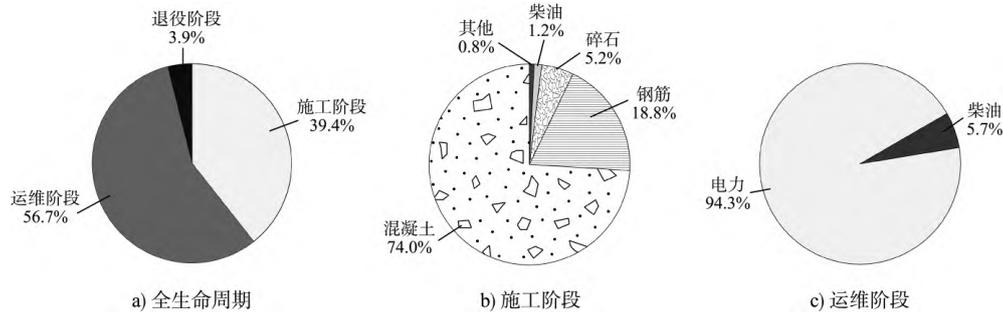


图 3 碳排放贡献

## 2.2 不确定性与敏感性分析

在港口工程全生命周期评价中涉及的步骤众多, 基础数据的种类、来源、获取方式和计算方法的选择不同将直接影响碳排放评价的最终结果<sup>[19]</sup>, 对结果进行不确定性分析, 可以提高港口工程碳排放评价结果的可信度。本文采用数据质量指标与不确定性随机模拟相结合的分析方法, 根据数据质量指标矩阵, 对每个清单数据进行评分, 把数据质量分值转化为 Beta 概率分布输入到 Crystal Ball 软件中, 使用蒙特卡洛分析方法进一步模拟清单结果的不确定性<sup>[20-21]</sup>。

根据碳排放计算结果对 3 个阶段碳排放量进行假设, 以单位碳排放量为预测目标, 进行 5 万次随机模拟<sup>[22]</sup>, 并分别对原材料消耗、能源使用进行敏感度分析。概率分布见图 4。可以看出, 该港口工程单位碳排放量 95% 置信区间为 651.92~745.21 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, 中位数为 698.14 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, 概率分布图端点范围较小, 数据质量整体较好, 港口工程全生命周期单位碳排放量不确定性较小。

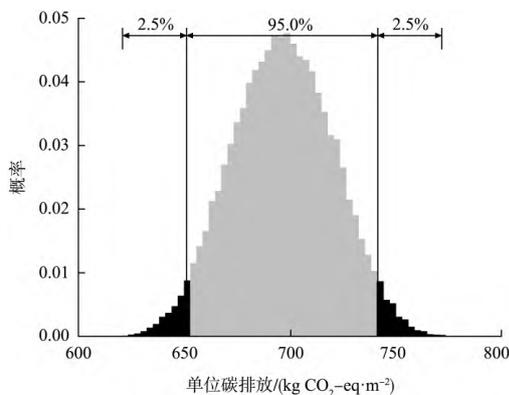


图 4 概率分布

方差贡献见图 5。可以看出, 材料类中混凝土的碳排放量的方差贡献率为 94.5%, 属于最敏感因素, 对碳排放的影响最大; 钢筋的方差贡献率为 5.2%, 为次敏感因素; 其他为不敏感因素, 对碳排放量的变化几乎没有影响; 能源类中最敏感因素为电力, 占 95.6%, 原因是在港口运行期间大量使用电力(运行期 20 a), 导致其对碳排放的影响较大。综上, 该港口工程全生命周期碳排放的敏感性因素分别是混凝土和电力。

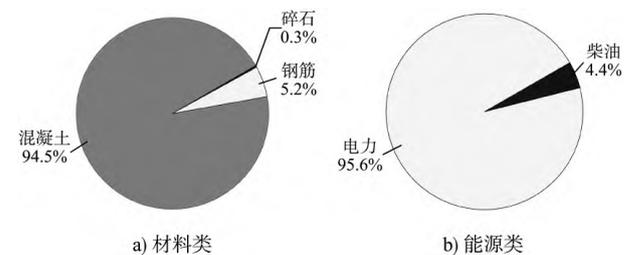


图 5 方差贡献

## 2.3 港口工程碳减排讨论

根据该港口工程碳排放评价结果与敏感性分析可知, 占全生命周期碳排放量比重最大的是混凝土与电力, 敏感度最大的也是二者。因此, 可以根据以上 2 个关键影响因素制定港口工程的节能减排计划, 无疑是最高效、科学的。

施工材料一直以来都是造成建筑碳排放的关键性因素之一<sup>[23]</sup>。在本文的 LCA 中, 使用混凝土造成的碳排放大约是使用钢筋的 4 倍, 是碎石的 14 倍, 而混凝土又是修建港口所必不可少的主体材料, 因此在保证安全施工和工程质量的前提下, 优化施工方案, 节省混凝土自身用量, 可大幅减

少温室气体排放。根据本文研究的方法计算,若减少10%的混凝土用量,可减少约2 300 t CO<sub>2</sub>-eq,使该阶段碳排放下降6.7%;若减少10%钢筋用量,仅使该阶段碳排放下降1.2%。

另一个影响港口工程碳排放的关键因素即电力,港区在运维阶段主要的能耗种类为电力和柴油,但电力的碳排放因子明显高于柴油的碳排放因子<sup>[24]</sup>,导致该阶段使用电力产生的碳排放高于柴油。若运维阶段每年减少10%的电力消耗,可使该阶段每年减少200 t CO<sub>2</sub>-eq,整个运维阶段共减少4 000 t CO<sub>2</sub>-eq,大约下降8.1%。针对该影响因素给出2条减排建议:1) 淘汰耗电量、耗油量高的机械设备,选择使用具有能耗低、排放低、效率高的生产设备,合理规划港区运作方案,提高生产效率,减少装卸载时间,进而达到降低电力消耗、减少港区碳排放的目的;2) 大力发展港区风力发电、光伏发电等新能源发电方式,减少火力发电这类碳排放高的用电形式,进而改用风电、光伏等绿色电能,提高港区清洁能源的使用比例,逐渐实现港区电力自给自足,达到港区在运维阶段低碳排放甚至是零碳排放的效果。

### 3 结论

1) 本文以生命周期理论为基础对长江上游某内河港口工程进行了全生命周期碳排放估算,提出一种适用于我国内河港口工程全生命周期碳排放的估算方法。估算结果显示,该港口工程全生命周期碳排放总量为8.67万t CO<sub>2</sub>-eq,其中施工阶段碳排放占比39.4%、运维阶段碳排放占比56.7%、退役阶段碳排放占比3.9%。

2) 结合生命周期评价理论与Simapro软件对我国内河港口工程进行碳排放估算是可行的,碳排放估算结果不确定性较小,影响港口工程全生命周期碳排放的2个关键因素分别是混凝土和电力,且电力的减排措施和减排效果较混凝土更好,后续可以根据碳排放评价结果和敏感因素制定实施碳减排对策。

3) 减少港口工程生命周期碳排放可从混凝土

与电力入手。在允许范围内降低混凝土用量,优化港区运作方式节省耗电量,发展港区风电、光伏发电等措施都可以有效降低港口工程生命周期碳排放总量。

### 参考文献:

- [1] 吴宏宇.基于低碳经济的内河航道尺度估算研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [2] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021.
- [3] 宫治军.低碳港口全生命周期评价体系研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [4] 伊坪德宏,田原聖隆,成田暢彦.LCA 概論[R].東京:産業環境管理協會,2007.
- [5] KLÜPPEL H J.ISO 14041: environmental management—life cycle assessment—goal and scope definition—inventory analysis [J]. The international journal of life cycle assessment,1998,3(6): 301.
- [6] 徐长春,黄晶,RIDOUTT B G,等.基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J].自然资源学报,2013,28(5): 873-880.
- [7] RASHID A F A, YUSOFF S. A review of life cycle assessment method for building industry [J]. Renewable and sustainable energy reviews,2015,45: 244-248.
- [8] 郑秀君,胡彬.我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J].科技进步与对策,2013,30(6): 155-160.
- [9] 交通运输部水运工程造价定额中心,原交通部水运工程定额站.内河航运水工建筑工程定额: JTS/T 275-1—2019 [S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [10] 交通运输部水运工程造价定额中心,原交通部水运工程定额站.内河航运工程船舶机械艘(台)班费用定额: JTS/T 275-2—2019 [S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [11] BERGMANS J, BROOS K, NIELSEN P, et al. Recycling of construction and demolition waste: case study in the port of Antwerp [C]//The International Solid Wastes and Public Cleansing Association. Proceedings of ISWA. Antwerp: ISWA, 2015: 7-9.
- [12] BUTERA S, CHRISTENSEN T H, ASTRUP T F. Life cycle assessment of construction and demolition waste

- management [J]. *Waste management*, 2015, 44: 196-205.
- [13] HERTWICH E G, GIBON T, BOUMAN E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(20): 6277-6282.
- [14] 黎维林, 李建华, 孙即梁. 河道护岸工程生命周期碳排放评价探讨[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(2): 200-205.
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. New York: IPCC, 2006.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change. Safeguarding the ozone layer and the global climate system: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [17] SHINE K P, FUGLESTVEDT J S, HAILEMARIAM K, et al. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases [J]. *Climatic change*, 2005, 68(3): 281-302.
- [18] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述: 兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(7): 1232-1242.
- [19] 陈莎, 李焱佩, 曹磊, 等. 产品碳足迹评价中不确定度与敏感度相结合的数据质量分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(4): 1067-1072.
- [20] 莫华, 张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价[J]. *环境科学研究*, 2003(5): 55-58.
- [21] WANG E, SHEN Z. A hybrid data quality indicator and statistical method for improving uncertainty analysis in LCA of complex system-application to the whole-building embodied energy analysis [J]. *Journal of cleaner production*, 2013, 43: 166-173.
- [22] 杜海龙, 李哲, 郭劲松. 基于 ISO 14067 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.
- [23] SARA VIA R R, FERNÁNDEZ-SÁNCHEZ G, ESTEBAN M D, et al. Carbon footprint of a port infrastructure from a life cycle approach [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2020, 17(20): 7414.
- [24] 尚春静, 张智慧, 李冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(8): 149-154.
- ( 本文编辑 王璁)

( 上接第 34 页)

- [3] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZIANI R. Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1972, 55(10): 534-535.
- [4] THOMAS M, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag [J]. *Cement and concrete research*, 1999, 29(4): 487-495.
- [5] 郝磊, 陈峰, 彭文锋, 等. 沿海混凝土结构氯离子对流区深度计算模型 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(5): 1627-1637.
- [6] 蔡荣, 杨绿峰, 余波. 海洋潮汐浪溅区混凝土表面氯离子浓度的改进计算模型[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(4): 122-129.
- [7] 吴灵杰. 港口工程混凝土结构氯离子侵入与耐久性评估[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [8] 张建球. 钦州港老码头临水面混凝土氯离子扩散研究[J]. *西部交通科技*, 2019(8): 164-167.
- [9] 交通运输部天津水运工程科学研究所, 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [10] 郑少强, 陈业强, 刘荣桂, 等. 海洋环境下混凝土结构耐久性寿命的概率分析[J]. *工业建筑*, 2023, 53(5): 165-173.
- [11] 许泽启, 麻海燕, 余红发, 等. 海洋混凝土结构表面自由氯离子含量时变规律及对其寿命影响[J]. *海洋工程*, 2017, 35(4): 126-134.
- [12] 许梅, 麻海燕, 余红发, 等. 大连港服役 50 年混凝土的力学性能与耐久性[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(3): 470-477.

( 本文编辑 王璁)