



## 航道整治工程施工阶段碳排放计算方法

卢鹏<sup>1</sup>, 伏建民<sup>1</sup>, 张家虎<sup>1</sup>, 刘双<sup>1</sup>, 崔泽凯<sup>2</sup>, 陈达<sup>2</sup>

(1. 长江宜昌航道工程局, 湖北宜昌 443003; 2. 河海大学, 江苏南京 210098)

**摘要:** 航道整治工程施工阶段尚缺少统一的碳排放计算方法, 针对该阶段碳排放量化困难的问题, 建立以碳排放因子法为基本原理的碳排放计算方法。通过文献查阅、工程调研和理论分析等手段, 探讨能源、人工、船舶机械设备及运输服务的碳排放因子取值思路和计算方法。考虑施工阶段的特征将其划分为施工方案阶段与实施阶段, 进而提出基于分项工程的单位工程量基准碳排放因子以及实际资源消耗的施工阶段碳排放计算方法。该方法有利于实现基于低碳理念的施工方案优选, 并可用于施工过程或完工后的碳排放核算与评价。

**关键词:** 航道整治; 施工阶段; 碳排放; 计算方法

中图分类号: U616; TV91

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0118-07

### Calculation method of carbon emission in construction stage of waterway regulation project

LU Peng<sup>1</sup>, FU Jianmin<sup>1</sup>, ZHANG Jiahui<sup>1</sup>, LIU Shuang<sup>1</sup>, CUI Zekai<sup>2</sup>, CHEN Da<sup>2</sup>

(1. Changjiang Yichang Waterway Engineering Bureau, Yichang 443003, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** There is still no uniform carbon emission calculation method in the construction stage of waterway regulation project. To solve the problem of carbon emission quantification in this stage, a carbon emission calculation method based on carbon emission factor method is established. By means of literature review, engineering investigation and theoretical analysis, this paper discusses the thinking and calculation method of carbon emission factor of energy, labor, ship, construction machinery and transportation service. Considering the characteristics of the construction stage, it is divided into construction scheme stage and implementation stage, and then the calculation method of carbon emission in the construction stage based on the carbon emission factor of the unit engineering quantity and the actual resource consumption is proposed. This method is conducive to the optimization of construction scheme based on low-carbon concept, as well as the calculation and evaluation of carbon emissions during and after construction.

**Keywords:** waterway regulation; construction stage; carbon dioxide emission; calculation method

在“双碳”大背景下, 内河航运以其具有运量大、成本低、排放少等众多优势, 迎来了行业发展绿色革命过程中的巨大机遇与挑战<sup>[1-2]</sup>。近年来, 我国水利工程建设稳步推进, 2022年水利建设投资规模首次突破万亿, 是新中国成立以来完成水利建设投资最多的一年, 在建项目达4.1万个,

创造历史记录<sup>[3]</sup>。

航道整治工程作为水利水运工程建设的重要内容, 可以有效改善通航条件、稳定河势、提升航道等级。我国航道整治工程的投资规模与在建项目数量较多, 在推动社会经济发展的同时也成为能源消耗和碳排放的重要来源<sup>[4]</sup>。特别是在施

收稿日期: 2024-01-01

作者简介: 卢鹏(1986—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程研究。

工过程中, 需要使用大量的船舶、机械设备, 碳排放密度及强度较大。但是, 由于航道整治施工阶段工序复杂, 需要考虑的因素较多, 碳排放计算存在较大难度。因此, 当前迫切需要开展航道整治工程施工阶段碳排放量化计算方法的研究。

在水利水运工程相关领域, 《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》提出的碳排放因子法是应用最为广泛的方法<sup>[5]</sup>。该方法的核心思路是碳排放量等于导致资源消耗的各种活动数据与其对应的碳排放因子的乘积, 其算法简洁、思路清晰、可操作性强<sup>[6-7]</sup>。针对船闸工程碳排放问题, 徐红等<sup>[8]</sup>考虑建筑材料生产、运输建筑材料以及施工机械 3 个方面, 基于碳排放因子法对比了不同结构闸室建设过程的碳排放水平。针对平原河道不同生态护岸工程建设碳排放问题, 杨子杰等<sup>[9]</sup>明确了碳排放来源及其对应的碳排放因子, 开展不同护岸工程的工程量和施工工艺研究, 并在此基础上完成碳排放计算。此外, 黄跃群等<sup>[10]</sup>列举了犬木塘工程的建设阶段及运营阶段碳排放清单, 提出利用碳排放因子分组进行碳排放计算的方法。

本文采用碳排放因子法进行航道整治工程施工阶段碳排放计算。首先探讨能源、机械、人工和运输的碳排放因子, 其次通过工程预算定额与实际资源消耗确定施工阶段的碳排放清单, 进而建立适用于施工方案阶段和实施阶段的碳排放计算方法, 旨在为航道整治施工阶段碳排放计算工作提供参考。

## 1 计算边界限定

碳排放理论上是指以二氧化碳为代表的一系列温室气体的总称, 主要包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化合物、全氟碳化合物、六氟化硫 6 类<sup>[11]</sup>。其中, 二氧化碳是最主要的温室气体, 对环境变化影响最大, 而其余温室气体在碳排放计算领域研究较少且数据难以统计。因此, 本文在航道整治施工阶段碳排放计算过程中仅考虑二氧化碳。

施工阶段碳排放计算的研究对象主要包括以土石方工程、基础工程、疏浚工程、护岸工程等为代表的施工现场活动以及该阶段所涉及的运输环节。施工阶段碳排放研究对象见图 1, 计算内容为:

1) 施工现场碳排放。施工现场的碳排放来源主要由两方面构成。一方面是由于各种施工机械、船舶在运行过程中造成化石燃料、电能的消耗, 从而产生大量碳排放; 另一方面是施工现场的人员在生活、工作过程中造成的碳排放。前者是施工阶段最为主要的碳排放来源。相比之下, 人员因素造成的碳排放相对较小, 但是航道整治工程项目一般规模庞大, 施工人员众多, 由此产生的碳排放也会产生一定影响。因此, 工作人员产生的碳排放也纳入施工阶段的总碳排放计算范围。

2) 运输服务碳排放。运输服务贯彻施工阶段全过程, 该部分主要考虑不同运输方式下由于能源消耗而产生的二氧化碳。

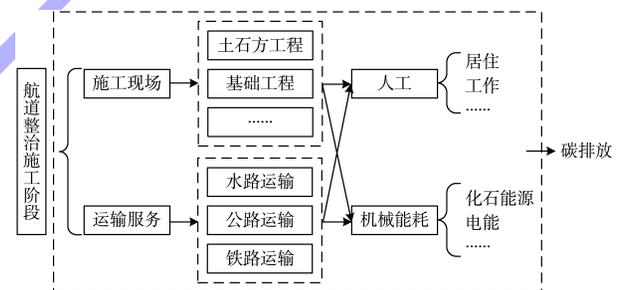


图 1 施工阶段碳排放研究对象

## 2 碳排放因子确定

碳排放因子指生产或消耗单位质量物质而伴随的温室气体生成量, 是表征某种物质温室气体排放特征的重要参数。我国目前碳排放因子库尚不完善<sup>[12]</sup>, 本文参考标准规范、文献, 总结碳排放因子的计算方法, 汇总部分碳排放因子的计算结果, 为碳排放计算提供参考。

### 2.1 能源碳排放因子

施工阶段最常用的能源是化石燃料和电能, 人员日常生活以及各类施工船机、运输设备的运行均涉及能源的消耗。因此, 该阶段的碳排放从本质上可以认为是在施工生产、建造及运输过程

中，因能源消耗直接或间接产生的<sup>[13]</sup>。能源消耗强度直接影响施工阶段的碳排放情况，明确能源碳排放因子是确定人工、船机及运输服务碳排放因子的基础。

### 2.1.1 化石燃料碳排放因子

施工阶段所使用的化石燃料一般作为施工船机和运输过程中的动力来源，主要包括柴油、汽油、天然气等。化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放主要取决于物质的化学构成和燃烧程度，其碳排放因子与燃料单位热值含碳量、燃烧过程的碳氧化率以及燃料的平均低位发热值3大关键因素相关。首先，根据化石燃料的单位热值含碳量、碳化率和二氧化碳分子量，可计算出相应的单位热值碳排放因子：

$$F_{f,i,h} = \frac{44}{12} C_i F_i \quad (1)$$

其次，参考化石燃料的平均低位发热值，将其单位热值碳排放因子转换为单位体积或质量的碳排放因子，便于施工清单统计及后续碳排放计算，部分化石燃料碳排放因子计算结果如表1所示。计算公式为：

$$F_{f,i,m} = 10^{-3} F_{f,i,h} V_i \quad (2)$$

式中： $i$ 为化石燃料的种类； $F_{f,i,h}$ 为化石燃料 $i$ 单位热值碳排放因子， $tCO_2/TJ$ ； $C_i$ 为施工过程中所消耗化石燃料 $i$ 的单位热值含碳量， $tC/TJ$ ； $F_i$ 为化石燃料 $i$ 的碳化率， $\%$ ； $F_{f,i,m}$ 为化石燃料 $i$ 基于单位质量的碳排放因子， $kgCO_2/kg$ ； $V_i$ 为化石燃料 $i$ 的平均低位发热值， $MJ/kg$ 。

表1 化石燃料碳排放因子计算

燃料类型	单位热值含碳量/ ( $tC \cdot TJ^{-1}$ )	碳化率/ %	平均低位发热量/ ( $MJ \cdot kg^{-1}$ )	单位热值的碳排放因子/ ( $tCO_2 \cdot TJ^{-1}$ )	单位质量碳排放因子/ ( $kgCO_2 \cdot kg^{-1}$ )
原煤	26.37	0.94	20.934	90.889	1.903
焦炭	29.5	0.93	28.470	100.595	2.864
原油	20.1	0.98	41.868	72.226	3.024
汽油	18.9	0.98	43.124	67.914	2.929
柴油	20.2	0.98	42.705	72.585	3.100
燃料油	21.1	0.98	41.868	75.819	3.174
液化石油气	17.2	0.98	50.242	61.805	3.105
炼厂干气	18.2	0.98	46.055	65.399	3.012
天然气*	15.3	0.99	35.608	55.539	1.978

注：\* 数据平均低位发热量的单位为  $MJ/m^3$ ，单位质量碳排放因子的单位为  $kgCO_2/m^3$ 。化石燃料的平均低位发热值可参考《综合能耗计算通则》，单位热值含碳量、碳化率等数据来源于《建筑碳排放计算标准》。

### 2.1.2 电力碳排放因子

航道整治施工阶段绝大部分电力消耗来源于外购电网企业，电力消耗量是反映施工阶段碳排放强度的重要指标，因此电力碳排放因子是碳排放量化的关键数据之一。

参考生态环境部《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》报告<sup>[14]</sup>，采用电量边际排放因子作为碳排放计算过程中所用的电力碳排放因子。电量边际排放因子剔除了水电、核电等低运行成本和必须运行机组，根据电力系统中所有电厂的总净发电量、燃料类型和燃料消耗量进

行计算，实际反映燃煤电厂等高排放电厂的平均水平<sup>[15]</sup>，更符合我国现阶段发电结构。计算公式为：

$$F_{e,y} = \frac{E_y}{G_y} = \frac{\sum_i (N_{i,y} V_{i,y} F_{i,y})}{G_y} \quad (3)$$

式中： $F_{e,y}$ 为第 $y$ 年区域电网的电量边际排放因子， $tCO_2/(MW \cdot h)$ ； $E_y$ 为第 $y$ 年区域电网的碳排放量； $G_y$ 为区域电网第 $y$ 年的总净发电量， $MW \cdot h$ ，根据区域电网间交换情况、各城市发电量、厂用电率等确定； $N_{i,y}$ 为第 $y$ 年区域电网对燃料 $i$ 的总消耗量， $t$ 或 $m^3$ ； $V_{i,y}$ 为第 $y$ 年燃料 $i$ 的平均低位发

热量, MJ/kg 或 MJ/m<sup>3</sup>;  $F_{i,y}$  为第  $y$  年燃料  $i$  的 CO<sub>2</sub> 排放因子, tCO<sub>2</sub>/MJ;  $i$  为第  $y$  年区域电网发电消耗的化石燃料种类;  $y$  为可获得数据近 3 a 中的每个年份。

由于不同地区的能源结构存在较大差异, 我国将电网划分为东北、华北、华东、华中、西北

和南方 6 个区域。电力碳排放因子的最终取值是以电网年供电量为权重, 将近 3 a 每年的因子加权平均后的结果。该计算过程较复杂, 且涉及很多地区统计年鉴数据的分析整理, 故简化采用《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》中公布的电力碳排放因子, 如表 2 所示。

表 2 区域电网覆盖省市

区域电网名称	覆盖省市	碳排放因子/(tCO <sub>2</sub> · MW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )
华北	北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、内蒙古自治区	0.941 9
东北	辽宁省、吉林省、黑龙江省	1.082 6
华东	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省	0.792 1
华中	河南省、湖北省、湖南省、江西省、四川省、重庆市	0.858 7
西北	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区	0.892 2
南方	广东省、广西壮族自治区、云南省、贵州省、海南省	0.804 2

注: 各市级单位发电燃料消耗量、消耗化石燃料种类数据来源于《中国能源统计年鉴》。厂用电率数据来源于《中国电力年鉴》, 电网间电量交换数据来源于《电力工业统计资料汇编》。

## 2.2 人工碳排放因子

人工碳排放因子指各工作人员每工日时长在施工现场办公、生活过程中产生的碳排放, 目前相对权威的研究成果资料很少。由于施工人员日常工作、生活、居住均在施工现场附近, 可认为人员产生的碳排放量与居民生活人均能源消费碳排放取值近似。因此, 人工碳排放因子也可根据我国居民的生活能源消费碳排放量折算为每工日 (8 h) 人均碳排放进行估算<sup>[16]</sup>:

$$F_p = \frac{E}{N} \quad (4)$$

式中:  $F_p$  为人工碳排放因子,  $E$  为我国居民的生活能源碳排放量,  $N$  为我国总人数。

值得注意的是, 相比于整个施工阶段周期内产生的碳排放, 人工碳排放占比较小, 其碳排放因子取值也相对较小。因此, 可简单采用文献分析法, 统计相关文献<sup>[17-21]</sup>的人工碳排放因子取值, 基于此进行均值计算作为选取标准。经计算, 人工碳排放因子取值为 5.13 kgCO<sub>2</sub>/(人 · d)。

## 2.3 船机设备碳排放因子

施工船机碳排放因子指施工设备在正常作业情况下, 工作每单位台班时长所产生的碳排放量。施工船机耗能碳排放因子应按式(5)计算:

$$F_m = \sum n_k F_k \quad (5)$$

式中:  $F_m$  为施工船舶或机械碳排放因子, kgCO<sub>2</sub>/台班;  $n_k$  为施工船机每工作 1 个台班过程中资源  $k$  的消耗量(人员、汽油、柴油、电能), 取决于预算定额;  $F_k$  为施工船机消耗资源  $k$  对应的碳排放因子。

对于施工船机设备, 首先基于《内河航运工程船舶机械艘(台)班费用定额》及《疏浚工程船舶艘班费用定额》等台(艘)班费用定额获取各种规格施工船机的资源消耗清单, 参考相应化石燃料、电力、人工碳排放因子, 采用式(5)计算得到不同施工船机的碳排放因子。

## 2.4 运输服务碳排放因子

在航道整治施工阶段, 绝大多数生产活动均涉及运输服务。我国常见的运输方式有公路、铁路、水路以及航空运输 4 种形式<sup>[22]</sup>。施工阶段主要为建筑原材料及制成品、施工机械设备、现场余土及废弃物的运送等活动, 大多采用铁路或者公路运输。考虑到航道整治工程地理位置因素的特殊性, 一定情况下也可利用航道直接进行水路运输。综合来看, 航空运输成本高, 使用条件受限, 不予考虑。因此, 可参考《建筑碳排放计算标准》, 确定公路、铁路及水路运输服务的碳排放因子取值。

### 3 施工阶段碳排放计算

#### 3.1 施工方案阶段

##### 3.1.1 分项工程单位工程量基准碳排放因子

基于工程预算定额，获取不同施工工艺下各分项工程的人工、船机平均使用量，根据相应的碳排放因子估算分项工程单位工程量基准碳排放因子，进而可综合各分项工程量估算工程整体施工阶段碳排放量。以预算定额为基础进行碳排放估算，其科学性和准确性能够得到基本的保障<sup>[23]</sup>。

查阅工程预算定额(《内河航运工程参考定额》、《内河航运水工建筑工程定额》和《疏浚工程预算定额》等)，汇总各分项工程单位工程量的资源消耗清单，结合前述人工、机械的碳排放因子，可以计算得到分项工程单位工程量基准碳排放因子：

$$F_{s,i} = \sum_{j=1}^k n_j F_j \quad (6)$$

式中： $F_{s,i}$ 为第*i*项分项工程的单位工程量基准碳排放因子； $n_j$ 为第*i*项分项工程中第*j*项资源(人工、船机设备)所需消耗量，由工程预算定额确定(不考虑附加计算系数)； $F_j$ 为第*i*项分项工程中第*j*项资源(人工、船机设备)对应的碳排放因子。

为了使航道整治工程碳排放计算工作更加标准化和规范化，可参考上述方法计算所有分项工程在不同施工工艺下的单位工程量基准碳排放因子，综合分项工程和施工工艺特征，将计算得到的单位工程量基准碳排放因子归纳编制成为碳排放定额表，从而完善航道整治工程碳排放量化和标准化计算体系。与工程预算定额不同的是，碳排放定额反映了工程建设过程中各种生产消耗及其碳排放之间对应的量化关系，而不是价格关系。编制碳排放定额有利于简化碳排放的计算过程，进而对不同分项工程和施工工艺的碳排放进行对比分析，定位施工过程中的高碳排放环节，并优选适宜的施工工艺。

碳排放定额表在结构内容上可参考表3的形式，在内容上应包含航道整治施工阶段所涉及的全部分项工程。同时，应将现有规范标准及预算定额为直接参考依据，保证碳排放定额的适配性。本文参考行业标准《内河航运水工建筑工程定额》，以土石方(分部工程)——机械土石方(子分部工程)——铲运机铲土(分项工程)为例进行示范说明。

表3 碳排放定额样表与应用

分项工程名称(单位)	资源消耗类型	消耗数量及单位	碳排放因子(与消耗资源对应)	基准碳排放因子(分项工程单位工程量)
xxx	资源1	$n_1$	$F_1$	xxx
	资源2	$n_2$	$F_2$	
	.....	.....	.....	
	资源 <i>j</i>	$n_j$	$F_j$	
铲运机铲运土 (100 m <sup>3</sup> )	人工	0.65 人	5.13 kgCO <sub>2</sub> /(人·日)	128.04 kgCO <sub>2</sub>
	拖式铲运机 3 m <sup>3</sup>	0.92 台班	119 kgCO <sub>2</sub> /台班	
	履带式推土机 60 kW	0.06 台班	144.49 kgCO <sub>2</sub> /台班	
	洒水车 4 000 L	0.07 台班	93.62 kgCO <sub>2</sub> /台班	

注:示例中人工碳排放因子取前文计算结果 5.13 kgCO<sub>2</sub>/(人·d),其余施工中机械设备均通过查阅台(艘)班费用定额结合式(5)计算得出。

##### 3.1.2 总碳排放量估算

航道整治工程一般可划分为分部工程、子分部工程与分项工程3级，其划分形式见图2。通过计算各分项工程的碳排放量，可汇总得到子分部和分部工程的碳排放量，进而得到整体工程施工

阶段的总碳排放量：

$$E_{s,i} = nF_{s,i} \quad (7)$$

$$E = \sum E_{s,i} \quad (8)$$

式中： $E_{s,i}$ 为第*i*项分项工程施工过程中的碳排放量； $n$ 为第*i*项分项工程实际工程量。

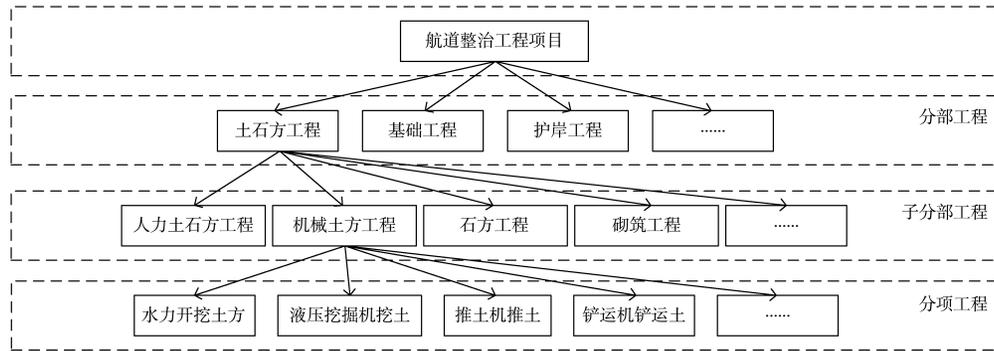


图 2 航道整治工程碳排放计算逻辑结构

### 3.2 施工实施阶段

基于施工阶段消费台账、统计报表等数据,统计汇总施工过程中不同分部分项工程中化石燃料、电能的实际消耗量,以及参与的施工人员数量。根据进出场和入库记录,确定运输服务所采用的运输方式、运输工具、运距等信息。然后,将施工阶段的各类资源消耗、人员数量与其对应的碳排放因子相结合,进而直接计算分项工程、分部工程、整体工程基于实际能耗的碳排放量。此外,也可在施工过程中任意节点计算当前施工阶段的碳排放量。施工阶段总碳排放由施工现场船机设备碳排放、人工碳排放及运输服务碳排放 3 部分组成<sup>[24]</sup>:

$$E = \sum_{i=1} F_{r,i} n_i + F_p k n_p + \sum_{i=1} F_{t,i} n_i D_i \quad (9)$$

式中:  $n_i$  为施工过程中(分项工程、分部工程、整体工程)第  $i$  种资源(化石燃料、电能)所对应的数量;  $F_{r,i}$  为施工场所需第  $i$  种资源(化石燃料、电能)所对应的碳排放因子;  $F_p$  为人工碳排放因子;  $F_{t,i}$  为第  $i$  种资源在某一运输方式下,单位质量运输距离的碳排放因子;  $k$  为施工现场工作人员数量;  $n_p$  为施工工期;  $D_i$  为第  $i$  种资源的运输距离。

## 4 结论

1) 结合航道整治工程低碳建设特征,明确了施工阶段碳排放的主要来源及应当纳入碳排放计算的具体活动,从施工现场和运输服务两个角度对施工阶段碳排放计算的内容做出限定。

2) 结合碳排放因子法的基本原理,明确碳排放计算过程中化石燃料、电力、人员、船机设备和运输服务的碳排放因子确定思路及计算方法,并汇总了部分具有代表性的碳排放因子。

3) 结合施工阶段不同时间节点的特征,提出适用于施工方案阶段及实施阶段的碳排放计算方法。前者可用于施工阶段前期对碳排放做出估算,优选施工方案以实现绿色低碳工程建设;后者可用于施工过程中和完工后的碳排放计算,进一步用于工程评估验收等工作。

### 参考文献:

- [1] 任建林,秦宇,欧阳常悦,等.基于 LCA 的长江上游某内河港口工程碳排放估算与分析[J].水运工程,2024(2):53-59.
- [2] WANG Y, GUO C H, CHEN X J, et al. Carbon peak and carbon neutrality in China: Goals, implementation path and prospects[J]. China geology, 2021(4): 720-746.
- [3] 李森,刘阳,崔晨甲.2022 年水利建设投资数据分析研究[J].水利发展研究,2023,23(2): 14-19.
- [4] 王清燕.航道整治及建设对水运经济的影响探究[J].中国水运(下半月),2015,15(05): 37-38.
- [5] 程豪.碳排放怎么算:《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J].中国统计,2014(11): 28-30.
- [6] 鞠颖,陈易.建筑运营阶段的碳排放计算:基于碳排放因子的排放系数法研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(3): 175-179.
- [7] 李小冬,朱辰.我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述[J].安全与环境学报,2020,20(1): 317-327.

- [8] 徐红, 马育斌, 陈丹. 基于低碳理念的船闸闸室结构选型[J]. 水运工程, 2023(S1): 48-51.
- [9] 杨子杰, 周滨荣, 魏军, 等. 平原水网地区生态河道碳足迹量化与评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3): 216-225.
- [10] 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.
- [11] 徐鹏鹏, 申一村, 傅晏, 等. 基于定额的装配式建筑预制构件碳排放计量及分析[J]. 工程管理学报, 2020, 34(3): 45-50.
- [12] 吴泽洲, 黄浩全, 陈湘生, 等. “双碳”目标下建筑业低碳转型对策研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 202-209.
- [13] LIN B Q, LIU H X. CO<sub>2</sub> mitigation potential in China's building construction industry: a comparison of energy performance [J]. Building and environment, 2015, 94(12): 239-251.
- [14] 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子. 生态环境部网[EB/OL]. (2020-12-29) [2023-12-20]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229\\_815386.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml).
- [15] 张时聪, 王珂, 徐伟. 建筑碳排放标准化计算的电力碳排放因子取值研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(2): 46-57.
- [16] 刘胜男. 装配式混凝土建筑物物化阶段碳足迹评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [17] 吴水根, 谢银. 浅析装配式建筑结构物化阶段的碳排放计算[J]. 建筑施工, 2013, 35(1): 85-88.
- [18] 杨路远. 预制混凝土构件物化阶段碳足迹测算[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [19] 欧阳磊. 基于碳排放视角的拆除建筑废弃物管理过程研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- [20] 肖旭东. 绿色建筑生命周期碳排放及生命周期成本研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [21] 周越. 浙江省建筑外墙保温体系物化过程 CO<sub>2</sub> 排放研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [22] 田佩宁, 毛保华, 童瑞咏, 等. 我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(3): 347-356.
- [23] 陈彬彬, 陈婵璐, 杨建宇, 等. 施工阶段碳排放定额估算方法研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(11): 147-150.
- [24] ATMACA A, ATMACA N. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO<sub>2</sub>A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey [J]. Energy & buildings, 2015, 102(9): 417-431.
- (本文编辑 王传瑜)
- 
- (上接第 68 页)
- [9] 程弘宇, 张首元, 赵根生, 等. 通航隧洞船舶航行阻力试验研究[J]. 水运工程, 2023(9): 101-105, 125.
- [10] 王月华, 包中进, 王斌. 基于 FLOW-3D 软件的消能池三维水流数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学报), 2012, 45(4): 454-457, 476.
- [11] 陈雪华. 乌江通航隧洞与千吨级船舶关联性数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [12] 李志松, 吴卫, 陈虹, 等. 内河航道中船行波在岸坡爬高的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2016, 31(5): 556-566.
- [13] LO D C, SU D T, CHEN J M. Application of computational fluid dynamics simulations to the analysis of bank effects in restricted waters [J]. Journal of navigation, 2009, 62(3): 477-491.
- [14] MA S J, ZHOU M G, ZOU Z J. Hydrodynamic interaction among hull, rudder and bank for a ship sailing along a bank in restricted waters[J]. Journal of hydrodynamics, 2013, 25(6): 809-817.
- [15] YU G N, ZHAO J Q. Research on hydraulic characteristics of navigable tunnels of high-dam navigable structures and ship navigation test [J]. Earth and environmental science: (IOP conference series), 2021, 768: 012041.
- [16] 周华兴, 郑宝友. 关于深水、浅水与限制性航道界定的探讨[J]. 水运工程, 2006(1): 53-58, 67.
- (本文编辑 王传瑜)