基于 LCA 的港口工程建设期碳排放测算方法研究

陈　鹏[1,2]，马金涛[1,2]，沈　威[1,2]，潘金霞[1,2]

（1. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；2. 中交集团绿色低碳发展研究中心，北京 100088）

摘要：港口工程建设期碳排放测算是量化港口全生命周期碳排放水平，推进港口节能降碳工作的重要手段。针对港口工程建设期碳排放测算系数缺少来源依据、取值方法不明确等难点问题，创新提出将“工程碳排放测算定额法”运用到港口工程建设期测算，基于生命周期评价(LCA)方法，结合项目的工程量清单和现行工程定额标准，得到各分部分项工程碳排放量以及工程整体的碳排放情况。通过给出水下挖泥工程、基床抛石工程、基础工程、疏浚工程等碳排放定额数据的取值方法，并针对实际港区码头建设项目进行“工程碳排放测算定额法”应用举例，测算得到项目的工程整体碳排放量为 3.32 万 tCO_2，材料(设备)生产及运输碳排放量占比约 79%，能源消耗碳排放量占比约 21%，为港口工程建设期的碳排放分析提供了借鉴。

关键词：港口工程；建设期碳排放；碳排放测算定额

中图分类号：U655；X823　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0122-07

LCA-based carbon emissions estimation methods for port engineering during construction phase

CHEN Peng[1,2], MA Jintao[1,2], SHEN Wei[1,2], PAN Jinxia[1,2]

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. CCCC Green and Low Carbon Development Research Center, Beijing 100088, China)

Abstract: The carbon emissions estimation during the construction phase of port engineering is a crucial method for quantifying the carbon emissions throughout the port's entire life-cycle and advancing energy-saving and carbon reduction efforts. Addressing challenges such as the lack of source references for carbon emissions estimation coefficients and unclear valuation methods during the construction phase, we propose applying the "engineering carbon emission quota method" to the construction phase of port engineering. By integrating the project's bill of quantities and current engineering quota standards, we calculate the carbon emissions of individual sub-projects and the overall project emissions on the basis of the life cycle assessment (LCA) method. Through providing valuation methods for carbon emission quotas in underwater dredging, foundation bed rock throwing, foundation work, and dredging projects, and applying the "engineering carbon emission quota method" to a real-world port terminal construction project, we estimate the total project carbon emissions at 33, 200 tCO_2, with material (equipment) production and transportation accounting for approximately 79% and energy consumption for about 21%, offering valuable insights for carbon emission analysis during the construction phase of port projects.

Keywords: port engineering; carbon emission during construction phase; carbon emission estimation quota

收稿日期：2025-12-06　　**录用日期：**2026-01-19

作者简介：陈鹏(1985—)，男，硕士，高级工程师，从事工程建设领域绿色低碳研究工作。

水运工程

港口作为交通运输领域的重要组成部分，是国家“双碳”目标实现的关键主体[1-4]。通过开展港口工程建设期碳排放测算，有助于实现对共性减排痛点的精准识别，为港口低碳化发展提供支撑。当前港口工程建设期碳排放测算工作仍面临诸多瓶颈，包括碳排放测算系数缺少来源依据、取值方法不明确等核心问题，不同测算主体在实际操作中存在较大主观性和随意性，制约了测算结果的科学性与准确性，难以有效为工程碳减排决策提供可靠支撑。

国内外在碳排放测算方法的研究领域已取得了相关进展。其中，生命周期评价（life cycle assessment，LCA）方法既能够完整覆盖研究对象“全阶段、全链条”，又可系统量化直接碳排放与间接碳排放，从而得到了广泛应用。发展至今，该方法已进入标准化与全球化完善阶段，我国也已发布 GB/T 24040—2008《环境管理 生命周期评价 原则与框架》[5]与 GB/T 24044—2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》[6]等标准。目前生命周期评价方法的应用场景已从单一产品评价扩展至供应链管理、工程全生命周期碳核算等领域，为港口工程碳排放测算方法的研究提供了借鉴。同时，目前针对港口工程碳排放的研究，也已形成相关成果。例如，索晨[7]通过对国内外集装箱码头的低碳措施应用状况进行分析，建立集装箱码头低碳发展方案；郭瑾[8]借助 Gamma 分布概率密度函数，构建低碳港口形成机理分析模型；彭银霞[9]采用长期能源替代规划（long-range energy alternatives planning，LEAP）模型预测软件，构建内河港口全生命周期碳排放预测模型；任建林等[10]以长江上游某内河港口为对象，开展碳排放来源分析，并运用生命周期评价法对施工、运维、退役等阶段的碳排放进行测算；刘磊磊等[11]针对集装箱码头的建设期和运营期碳排放进行研究，并提出零碳港口的建设路径；马武昌等[12]基于碳足迹理念，研究港口、公路等交通建设项目在全生命周期的温室气体相关活动；Budiyanto 等[13]在分析集装箱港口装卸设备运行状态的基础上，对港口碳排放水平进行研究。

碳排放测算工作逐步融入工程整体建设体系，使建设期碳排放分析得到了更多的关注。国际能源署针对工程建设期的隐含碳排放组织了研究，并提出统一测算标准、明确测算边界、保证数据完整性等工作建议；我国 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》[14]明确了建筑建造阶段的碳排放时空边界，同时给出建材生产及运输阶段的碳排放测算方法；王战武等[15]开展基于碳排放定额指标的建筑全生命周期碳排放精细化管理的研究；卢鹏等[16]结合航道整治工程低碳建设特征，从施工现场和运输服务等角度对碳排放测算内容进行界定；杨子杰等[17]针对不同护岸工程的施工工艺、工程量开展了碳排放测算研究；蒋跃楠[18]基于 LCA 理论，构建扭王字块物化阶段的碳排放测算模型。

本文在目前已有成果的基础上，针对港口工程建设期碳排放测算系数缺少依据、取值方法不明确等难点问题，开展基于“工程碳排放测算定额法”的港口工程建设期碳排放测算方法研究。本文对港口工程建设期碳排放测算边界划分，碳排放源识别，明确测算方法、测算定额等问题进行明确，并运用相关方法进行实际案例分析，为港口工程建设期的碳排放测算工作提供借鉴。

1　测算边界

对港口工程建设期碳排放的测算边界可分别从时间边界、物理边界、活动边界等核心维度进行界定，整体覆盖港口建设全流程中可管控的碳排放环节，排除不受港口建设方控制的排放项，具体划分如下。

1.1　时间边界

港口建设期碳排放测算的时间边界核心界定为项目开工至完工的全周期，具体起点、终点及

特殊情形界定应兼顾标准规范要求与工程实践可操作性。起点为施工准备阶段正式启动，通常以施工临时设施搭建、施工机械进场为标志；终点为项目完工，不含后续运维阶段的设施检修或改造；建设期覆盖基础施工、主体结构建造、附属设施建设等全施工环节。

1.2 物理边界

测算的地理范围聚焦港口工程施工的专属区域，一般以工程划定的施工场地区域为核心，涵盖码头岸线、堆场、港区道路、配套辅助设施等建设区域。此边界会排除与工程建设无关、超出施工专属管控范围的区域。

1.3 活动边界

该边界明确了需核算的核心建设环节，主要包含 3 类关键活动：1)材料(设备)生产环节，涵盖水泥、钢筋、预制构件等港口建设所需各类材料(设备)从原材料开采到成品出厂的全流程；2)材料(设备)运输环节，指各类材料(设备)从生产厂到施工现场的运输过程，需要考虑公路、铁路等不同运输方式的排放；3)现场施工环节，包括施工机械作业(如起重机、挖掘机等消耗燃料产生的排放)、建设期间施工人员现场生活造成的碳排放。

2 碳排放源识别

港口工程建设期碳排放源可按直接碳排放源和间接碳排放源分类，覆盖材料(设备)生产运输、工程现场施工等全流程，结合港口工程(码头、堆场、港区道路、配套设施等)建设特点，碳排放具体分类及主要碳排放源见表 1。

表 1 港口工程建设期碳排放源类型及主要碳排放源

Tab. 1 Tape of carbon emission sources and main carbon emission sources during construction phase of port engineering

碳排放源类型	覆盖流程	主要碳排放源
直接碳排放源	施工机械作业	起重机、挖掘机、装载机等施工机械和施工船舶作业，以及机械设备往返施工现场，通过化石燃料消耗产生
	施工人员生活	施工人员炊事、采暖等通过化石燃料消耗产生
间接碳排放源	材料生产及运输	混凝土、水泥、钢筋、预制构件等建筑材料从原材料开采、加工制造到成品出厂全流程产生；各类材料从生产厂到施工现场的运输过程产生，包括公路货运、铁路货运、水路航运等不同方式的碳排放
	设备生产及运输	港口专用设备、辅助生产和附属生产设施设备的制造、运输至现场产生
	外购电力	施工现场外购电力产生

3 测算方法

针对港口工程建设期碳排放构成复杂、测算内容多的特征，本文采用“工程碳排放测算定额法”开展具体研究。所谓工程碳排放测算定额法，是指通过明确港口工程各主要碳排放类型及相关工程所对应的工料机消耗量，结合工程碳排放测算定额进行碳排放测算的方法。在进行碳排放测算时，考虑港口工程建设实施过程的复杂特性，可从分部分项工程的角度对碳排放测算工作进行分解，分别针对各分部分项工程的人工、材料、机械的消耗量确定碳排放，见图 1。同时通过对碳排放源进行分析，可明确港口工程建设期碳排放测算的主要内容，见表 2。

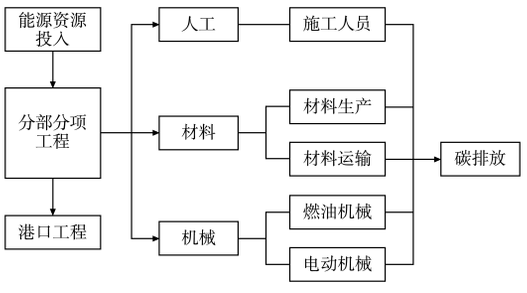

图 1 港口工程建设期碳排放测算逻辑

Fig. 1 Estimation logic of carbon emissions during construction phase of port engineering

表 2　港口工程建设期碳排放主要测算内容

Tab. 2　Main items for carbon emissions estimation during construction phase of port engineering

碳排放类型	工程定额	碳排放因子	碳排放影响因素
施工船机耗能	施工船机定额台(艘)班消耗量	施工船机的台(艘)班耗能碳排放因子	施工船舶及机械运行过程燃用化石燃料(不考虑施工船机使用外购电力的间接碳排放)
施工人员生活耗能	施工人员定额人工消耗量	施工人员生活耗能碳排放因子	施工人员炊事、采暖等活动
材料(设备)生产过程	材料(设备)的定额消耗量	材料(设备)生产过程碳排放因子	构成工程实体的原材料、辅助材料、构配件、零件、半成品或成品，以及项目装卸工艺设备及其他配套工程相关设备的生产过程
材料(设备)场外运输过程	材料(设备)的定额消耗量	运输装备单位周转量的碳排放因子	材料(设备)的场外运输距离
外购电力	施工机械的定额台班消耗量	电网二氧化碳排放因子	施工机械单位台班的用电量

4　测算定额

根据上述工程碳排放测算定额法的基本逻辑，首先需要对港口工程的碳排放测算定额进行明确，同时结合港口工程设计文件，实现对港口工程各分部分项工程碳排放的精准量化，具体可包含土石方工程、基础工程、混凝土及钢筋混凝土工程、钢结构工程、其他工程等方面的碳排放。工程的碳排放测算定额与工程结构、施工工艺、施工条件、质量标准等关系密切，具体可通过各分部分项工程施工期间对应的船机设备、材料生产与运输、人工等计算得到，相关碳排放测算定额示例见表 3。

表 3　港口工程建设期碳排放测算定额示例

Tab. 3　Examples of carbon emissions estimation quotas during port engineering construction phase

分部分项工程名称	单位	工程数量	碳排放基准值/$kgCO_2$
8 m^3 抓斗挖泥船挖泥，运距 5 km，水深 15 m，土壤类别 I	m^3	100	246.50
基床抛石，夯实，自航驳抛填	m^3	100	904.84
陆上桩头处理，修凿，混凝土方桩，断面 60 cm×60 cm	根	10	143.01
13 m^3 抓斗挖泥船，疏浚岩土级别 6 级，四级工况	m^3	10 000	29 968.37
削角王字块，预制，单件体积 60 m^3	m^3	10	58.87
轨道梁上安装，硫磺砂浆锚固螺栓，钢轨类型 70 型扣板式，断面尺寸类型 QU80	单轨延米	100	90.62

在碳排放测算定额的制定过程中，通过参照交通行业一系列定额标准，可以对港口工程建设项目的工程定额数据进行明确，并采用工程定额与相应的碳排放基准值相乘从而计算得到碳排放量。本文分别选取水下挖泥工程、基床抛石工程、基础打入桩工程和疏浚工程，针对碳排放测算定额的计算过程进行说明。其中水下挖泥工程、基床抛石工程、基础打入桩工程所包含主要项目及对应的工程定额、能耗均由 JTS/T 276-1—2019《沿海港口水工建筑工程定额》[19]、JTS/T 2762—2019《沿海港口工程船舶机械艘(台)班费用定额》[20]查得，疏浚工程所包含主要项目及对应的工程定额及能耗由 JTS/T 278-1—2019《疏浚工程预算定额》[21]、JTS/T 278-2—019《疏浚工程船舶艘班费用定额》[22]查得。

4.1　水下挖泥工程

选取 8 m^3 抓斗挖泥船、运距 5 km、水深 15 m、土壤类别为 I 的水下挖泥工程(工程数量 100 m^3)作为测算定额案例。该工程包括移船、定位、测水深、挖泥、运泥、卸泥等内容。工程碳排放测算定额计算结果见表 4，其中人工碳排放因子按照 1.84 $kgCO_2$/工日计取。

水运工程

表 4 水下挖泥工程碳排放测算定额计算结果

Tab. 4 Quota calculation results for carbon emissions estimation in underwater dredging projects

工程定额				艘班能耗/kg 柴油	碳排放基准值/$kgCO_2$
项目	规格	单位	取值		
人工	–	工日	0. 12	–	0. 22
挖斗挖泥船	8 m^3	艘班	0. 060	375. 15	69. 69
自航泥驳	500 m^3	艘班	0. 131	385. 95	156. 53
锚艇	199 kW	艘班	0. 030	216. 00	20. 06
合计	–	–	–	–	246. 50

4. 2 基床抛石工程

选取夯实、自航驳抛填的基床抛石工程（工程数量 100 m^3）作为测算定额案例，该工程包括装船、自航驳运输、移船定位、机械抛填、测量检查等内容。工程碳排放测算定额计算结果见表 5，其中人工碳排放因子按照 1. 84 $kgCO_2$/工日计取，块石碳排放因子按照 4. 36 $kgCO_2/m^3$ 计取。

表 5 基床抛石工程碳排放测算定额计算结果

Tab. 5 Quota calculation results for carbon emissions estimation in foundation bed rock throwing projects

工程定额				艘(台)班能耗/kg 柴油	碳排放基准值/$kgCO_2$
项目	规格	单位	取值		
人工	–	工日	1. 28	–	2. 36
块石	100 kg 内	m^3	123. 00	–	536. 28
自航驳	1 000 t	艘班	0. 395	53. 41	165. 36
方驳	600 t	艘班	0. 185	2. 59	8. 02
拖轮	441 kW	艘班	0. 037	18. 72	57. 96
机动艇	44 kW	艘班	0. 079	2. 92	9. 05
履带式液压挖掘机	2 m^3	台班	0. 272	23. 20	71. 82
轮胎式装载机	3 m^3	台班	0. 209	17. 44	53. 99
合计	–	–	–	–	904. 84

4. 3 基础打入桩工程

选取混凝土方桩、断面 60 cm×60 cm、修凿的陆上桩头处理(工程数量 10 根)作为基础打入桩工程的测算定额案例。该工程包括修凿桩头、切割钢筋、整理钢筋等内容。工程碳排放测算定额计算结果见表 6，其中人工碳排放因子按照 1. 84 $kgCO_2$/工日计取，钢钎材料碳排放因子按照 2. 35 $kgCO_2$/kg 计取，氧气制备碳排放因子按照 0. 342 $kgCO_2/m^3$ 计取，乙炔气制备碳排放因子按照 10. 35 $kgCO_2/m^3$ 计取。

表 6 陆上桩头处理工程碳排放测算定额计算结果

Tab. 6 Quota calculation results for carbon emissions estimation in onshore pile head treatment projects

工程定额				台班能耗/kg 柴油	碳排放基准值/$kgCO_2$
项目	规格	单位	取值		
人工	–	工日	6. 44	–	11. 85
钢钎	–	kg	6. 00	–	14. 10
氧气	–	m^3	2. 04	–	0. 70
乙炔气	–	m^3	0. 89	–	9. 22
内燃空气压缩机	9 m^3/min	台班	0. 672	51. 5	107. 14
合计	–	–	–	–	143. 01

4. 4 疏浚工程

选取 13 m^3 抓斗挖泥船、疏浚岩土级别 6 级、四级工况(工程量 10 000 m^3)作为疏浚工程的测算定额案例，工程碳排放测算定额计算结果见表 7。

表 7 抓斗挖泥船疏浚工程碳排放测算定额计算结果

Tab. 7 Quota calculation results for carbon emissions estimation in grab dredger dredging projects

工程定额				艘班能耗/kg 柴油	碳排放基准/$kgCO_2$
项目	规格	单位	取值		
抓斗挖泥船	13 m^3	艘班	5. 332	722	11 918. 34
自航泥驳	2 000 m^3	艘班	6. 559	845	17 158. 63
锚(机)艇	175 kW	艘班	2. 666	108	891. 40
合计	–	–	–	–	29 968. 37

5 案例计算与分析

本文选取某港区通用码头泊位工程作为碳排放测算案例，通过采用“碳排放测算定额法”进行分部分项工程的碳排放量化分析，为港口工程碳排放分析提供方法参照。

5. 1 工程概况

某工程拟建设通用泊位及相应配套设施，设计通过能力 1 200 万 t/a。该工程所在港池需要针对近年回淤进行疏浚，工程陆域由回填形成，水工建筑物主要为码头、临时护岸及附属设施更新等内容。

5. 2 碳排放测算

基于工程设计文件，针对项目的工程施工工程(包含施工机械碳排放、施工人员生活碳排放)、材料工厂生产过程、材料场外运输过程、外购电力等进行碳排放测算，分别选取各分部分项工程的碳排放测算定额，结合工程量进行逐项计算并累计得到工程总体碳排放量。例如，项目疏浚工

程的外抛疏浚土量共计 20 万 m^3，按照 13 m^3 抓斗挖泥船、疏浚岩土级别 6 级、四级工况定额确定的碳排放基准值为 29 968.37 $kgCO_2$/万 m^3，考虑运距取 45 km，对应超运距定额取 2 000 m^3 自航泥驳增加 8.127 艘班，即碳排放基准值调整为 51 228.95 $kgCO_2$/万 m^3，计算得到该分项工程的碳排放量为 1 024.58 tCO_2。

5.3　碳排放分析

根据各分部分项工程的工程量及碳排放测算定额进行工程总体碳排放测算，结果见表 8。其中材料(设备)生产及运输碳排放量占总排放量的 78.614%，能源消耗产生的碳排放占总排放量的 21.386%。从能源消耗碳排放构成来看，工程施工通过燃料消耗产生的直接碳排放占 15.663%，外购电力产生的间接碳排放占 5.723%。

表 8　工程年碳排放量测算结果

Tab. 8　Calculation results of annual carbon emissions of project

碳排放类型	碳排放量/万 tCO_2	排放量占比/%
工程施工直接碳排放	0.52	15.663
材料(设备)生产及运输碳排放	2.61	78.614
外购电力碳排放	0.19	5.723
工程总碳排放	3.32	100.000

6　结语

1）“工程碳排放测算定额法”可有效解决港口工程建设期碳排放测算系数来源不明确、取值模糊的行业痛点。结合工程量清单与现行工程定额标准，明确关键分部分项工程的碳排放定额取值方式，经实际港区码头工程验证，可为港口工程建设期碳排放精准测算提供可操作的方法支撑。

2）可结合不同地域、不同类型港口工程的建设实践，进一步优化完善碳排放定额数据库，提升方法的通用性与适配性；同时，可细化测算维度，考虑区域资源禀赋等影响因素，构建更全面的碳排放测算体系。

3）未来可基于本文建立的核算方法，探索港口工程建设期低碳技术路径与减排潜力评估模型，为工程的建筑材料采购、施工设备选用、施工工艺改进提供碳排放量化比较，明确重点碳排放环节和关键影响因素，为港口行业碳达峰、碳中和目标的实现提供更有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 贺林林, 金勇, 彭银霞, 等. “双碳”背景下国内外绿色港口建设发展综述[J]. 水运工程, 2024(7): 42-50, 67.
HE L L, JIN Y, PENG Y X, et al. Review of green port construction and development under carbon peaking and carbon neutrality goals background[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 42-50, 67.

[2] 谭凤, 马小江, 李大功, 等. 绿色港口规划设计思路[J]. 水运工程, 2021(10): 104-110.
TAN F, MA X J, LI D G, et al. Planning and design ideas for green port [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 104-110.

[3] 王斌, 黄加华, 徐艳山, 等. 近零碳港口建设路径与实践探索[J]. 交通节能与环保, 2025, 21(4): 136-139, 164.
WANG B, HUANG J H, XU Y S, et al. The construction path and practical exploration of near-zero carbon ports[J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2025, 21(4): 136-139, 164.

[4] AREGALL M G BERGQVIST R MONIOS J. A global review of the hinterland dimension of green port strategies [J]. Transportation research part D transport and environment, 2018, 59: 23-34.

[5] 环境管理　生命周期评价　原则与框架: GB/T 24040—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Environmental management-life cycle assessment-principles and frameworks: GB/T 24040-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[6] 环境管理　生命周期评价　要求与指南: GB/T 24044—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines: GB/T 24044-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[7] 索晨. 集装箱码头碳排放核算及低碳发展方案研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
SUO C. Container terminal carbon emissions accounting and low-carbon development research[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

[8] 郭瑾. 低碳港口形成机理及投资优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.

GUO J. Research on low carbon port formation mechanism and investment optimization [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.

[9] 彭银霞. 内河港口全生命周期碳排放核算及多情景模拟预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
PENG Y X. Study on carbon emission accounting and multi-scenario simulation prediction of inland port based on life cycle [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025.

[10] 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.
REN J L, QIN Y, OUYANG C Y, et al. Estimation and analysis of carbon emissions from inland river port project in upper Yangtze River based on LCA [J]. Port & waterway engineering, 2024(2): 53-59.

[11] 刘磊磊, 杨荣, 康仲飞. 零碳港口建设路径研究[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(5): 14-17, 26.
LIU L L, YANG R, KANG Z F. Research on the construction path of zero carbon port [J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2021, 17(5): 14-17, 26.

[12] 马武昌, 凤振华. 交通建设项目(公路、港口)碳足迹分析[J]. 公路, 2021, 66(1): 315-321.
MA W H, FENG Z H. Analysis of carbon footprint for transport construction projects (highways and ports) [J]. Highway, 2021, 66(1): 315-321.

[13] BUDIYANTO M A, HUZAIFI M H, SIRAIT S J, et al. Evaluation of CO_2 emissions and energy use with different container terminal layouts [J]. Scientific reports, 2021, 11(1): 5476.

[14] 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366-2019 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019.

[15] 王战武, 宋晗, 种云峰, 等. 基于碳排放定额指标的建筑全生命周期碳排放精细化管理研究[J]. 建筑经济, 2025, 46(10): 90-95.
WANG Z W, SONG H, ZHONG Y F, et al. Study on fine management of carbon emissions in the whole life cycle of buildings based on carbon emission quota index[J]. Construction economy, 2025, 46(10): 90-95.

[16] 卢鹏, 伏建民, 张家虎, 等. 航道整治工程施工阶段碳排放计算方法[J]. 水运工程, 2024(10): 118-124.
LU P, FU J M, ZHANG J H, et al. Calculation method of carbon emission in construction stage of waterway regulation project [J]. Port and waterway engineering, 2024(10): 118-124.

[17] 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.
YANG Z J, ZHOU B R, WEI J, et al. Quantitative study and evaluation on carbon footprint of ecological watercourse in plain water network area [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2023, 21(3): 216-225.

[18] 蒋跃楠. 基于 LCA 的扭王字块物化阶段碳排放核算及减排措施[J]. 水运工程, 2024(4): 42-49.
JIANG Y N. Carbon emission accounting and reduction measures of twist-king block in materialization stage based on LCA [J]. Port and waterway engineering, 2024(4): 42-49.

[19] 沿海港口水工建筑工程定额: JTS/T 276-1—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Quota for maritime works in seaport: JTS/T 276-1-2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[20] 沿海港口工程船舶机械艘(台)班费用定额: JTS/T 276-2—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Quota for per-shift cost of ships and machinery used in coastal port engineering: JTS/T 276-2-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[21] 疏浚工程预算定额: JTS/T 278-1—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Budget quota for dredging engineering: JTS/T 278-1-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[22] 疏浚工程船舶艘班费用定额: JTS/T 278-2—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Unit expense quota for ships of dredging engineering: JTS/T 278-2-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

(本文编辑 王璁)