



港口工程预应力混凝土方桩 碳足迹核算方法研究

曹旭^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 赵安琪^{1,2}, 李雪野^{1,2}

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 绿色低碳发展研究中心, 北京 100007;
2. 中国交通建设集团有限公司, 绿色低碳发展研究中心, 北京 100088)

摘要: 针对港口工程混凝土预制件产品碳足迹核算边界模糊、方法不完善等问题, 提出一种适用于预制构件原材料生产至废弃处理全生命周期碳足迹的评价方法, 明确核算方法、核算范围和核算内容, 建立计算模型。以截面边长为 700 mm 的预应力方桩为核算对象, 计算得出其单位产品碳足迹为 18 446.12 kgCO₂eq, 其中生命周期内原材料生产运输阶段碳足迹占比最高, 达 82.2%, 主要源于水泥与钢材生产过程; 其生产环节碳足迹相对较低, 占比 1.70%, 主要集中于搅拌、养护等能耗环节。研究结果可以为港口工程混凝土预制构件碳排放精细化管理提供核算方法参考和量化依据, 为水运领域从业人员估算港口工程建设阶段碳排放水平提供数据参考, 并为开展相关碳足迹标准制定工作提供方法和参考。

关键词: 港口工程; 预制构件; 碳足迹; 评价方法; 全生命周期

中图分类号: U654; X322

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0063-07

Carbon footprint accounting method of pre-stressed concrete square piles in port engineering

CAO Xu^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}, ZHAO Anqi^{1,2}, LI Xueye^{1,2}

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

Abstract: To address the issues of vague accounting boundaries and imperfect methods in the carbon footprint accounting of precast concrete products for port engineering, we propose an evaluation method suitable for the carbon footprint throughout the entire life cycle of precast components, from raw material production to waste disposal, clarify the accounting approach, scope and content, and build a calculation model. Taking a pre-stressed square pile with 700 mm side length of cross-section as the accounting object, we calculate the carbon footprint per unit product to be 18, 446.12 kgCO₂eq. Among them, the carbon footprint in the raw material production and transportation stage accounts for the highest proportion in the life cycle, reaching 82.2%, which mainly comes from the production process of cement and steel; the carbon footprint in the production stage is relatively low, accounting for 1.70%, mainly concentrated in energy-consuming links such as mixing and curing. The results provide an accounting method reference and quantitative basis for the refined management of carbon emissions from precast concrete components in port engineering, can offer data reference for practitioners in the water transportation field to estimate the carbon emission level during the construction stage of port engineering, and provide methods and references for carrying out the formulation of relevant carbon footprint codes.

Keywords: port engineering; prefabricated component; carbon footprint; evaluation method; whole life cycle

收稿日期: 2025-06-03 录用日期: 2025-07-11

作者简介: 曹旭(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运行业绿色低碳研究工作。

“双碳”目标推动下,绿色发展理念已深度融入港口建设运营全链条^[1]。当前,交通基础设施碳足迹研究多聚焦于运营阶段,对建设阶段预制构件的全生命周期碳排放缺乏系统分析。港口工程作为基础设施建设的重要组成部分,相关预制构件在生产、运输等过程中会产生大量的碳排放。准确分析港口工程预制构件的全生命周期产品碳足迹,对于精准评估港口工程建设过程的碳排放水平、推动水运行业的可持续发展具有重要意义。

目前建筑材料及构件碳足迹研究已取得一定成果,生命周期评价法已广泛应用于混凝土、钢材等碳排放研究^[2-5],但港口工程预制构件的专项研究相对较少,部分已开展的研究多聚焦于单一阶段或局部环节,缺乏对构件全生命周期的系统性研究。杨路远等^[6]以生命周期理论为框架,聚焦建筑预制构件从原材料获取到建设完成阶段,突出物化阶段,通过构建覆盖全生命周期的碳足迹计算模型,提出科学系统的测算方法与评估指标体系;陈雪晴等^[7]基于全生命周期评价深入分析混凝土预制桩施工期碳足迹情况,明确了运输、施工装备的能源消耗为主要排放源,创新性得出单位桩面积碳排放基准值;陈为晶^[8]基于T/CBMF 28—2018《蒸压加气混凝土砌块低碳产品评价方法及要求》^[9]和PAS 2050:2011 *Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services*^[10]两项碳足迹评价标准,开展蒸压加气混凝土砌块的相关评价,评价范围包括原材料生产、原材料厂区外运输过程等6个过程的排放,并开展企业案例实证分析;曾韩军等^[11]基于生命周期理论开展预制管片物化阶段碳足迹的研究,采用碳排放系数法对生产、运输及施工阶段的碳足迹进行量化研究,为预制管片产品碳足迹及管理提供数据支撑;潘远山等^[12]基于全生命周期评价法对预拌混凝土各环节进行碳足迹计算,并开展相应的碳减排技术研究。

尽管相关领域已有一定研究成果,但碳足迹核算分析方法尚不完善,亟须结合港口预制构件实际特点建立适用的评价方法。港口工程因荷载

复杂,且长期处于海水强腐蚀环境,相较于其他领域同类产品,混凝土强度等级要求更高,截面尺寸更大,预应力钢绞线和非预应力钢筋直径更大、数量更多,防腐要求更高;同时,港口工程桩基通长需要穿透较厚覆盖层到达持力层,桩基长度较长,桩端需要加强处理,因此港口工程预应力方桩不同于建筑等其他领域,需要单独研究。港口工程中,截面边长为700 mm的预应力空心方桩产品(简称预应力空心方桩)实际应用广泛,具有较好的代表性,本文以其作为研究对象,构建适用于预应力空心方桩全生命周期碳足迹评价的方法,并选取实际案例测算其生命周期排放。

1 全生命周期碳足迹评价方法

1.1 研究方法

产品碳足迹核算领域最常用的方法是生命周期评价法,它能够全面量化产品全生命周期内对环境的影响。基于生命周期法,国际范围内相继制定了多项碳足迹核算指南,包括ISO 14067:2018 *Greenhouse Gases-Carbon Footprint of Products-Requirements and Guidelines for Quantification*^[13]、PAS 2050:2011以及温室气体核算体系(GHG Protocol)的 *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*^[14]等。PAS 2050:2011由英国标准协会(British Standards Institution, BSI)发布,是最早在世界范围应用的产品碳足迹核算方法;GHG Protocol的 *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*由世界资源组织(World Resource Institute, WRI)和世界可持续发展工商理事会(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)发布,最早应用于核算组织层面的碳排放;ISO 14067:2018是目前针对产品碳足迹量化要求广泛应用的国际标准,规定了从原材料获取、生产、使用和回收处置阶段的产品碳足迹量化方法。2024年,生态环境部将ISO 14067:2018转化为国家标准GB/T 24067—2024《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》^[15],标志着我国在产品碳

足迹量化领域取得了关键性的进展。该标准明确适用于产品碳足迹相关研究, 其结果可应用于不同的场景, 并且仅针对单一环境影响类型, 即气候变化, 不评价产品生命周期产生的其他潜在环境影响, 也不评价产品生命周期内可能产生的社会和经济影响。本文以生命周期评价法为理论基础, 依据 GB/T 24067—2024《温室气体 产品碳足

迹量化要求和指南》的要求, 开展预制预应力混凝土方桩的产品碳足迹核算研究。

1.2 系统边界确定

本文结合港口工程预制构件的特点, 确定预应力空心方桩系统边界涵盖原材料生产和运输、预制生产、运输、使用维护及废弃处理等 5 个阶段。生产流程见图 1。

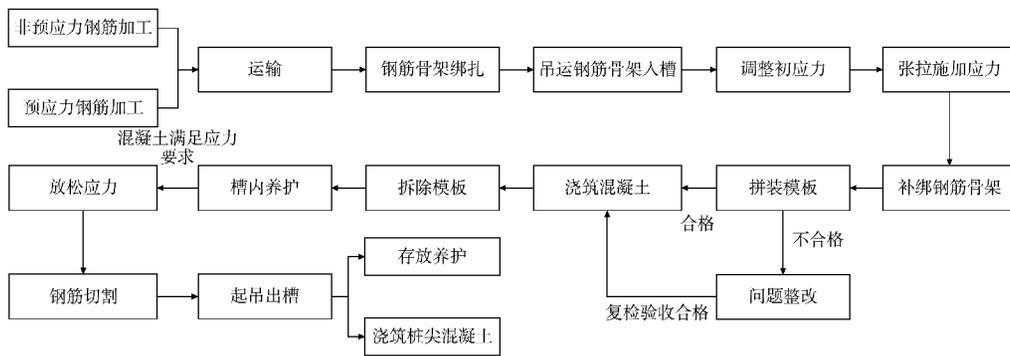


图 1 预应力空心方桩生产流程

Fig. 1 Production flow of pre-stressed hollow square pile

生产过程主要包括 5 个部分: 1) 钢筋加工与骨架成型。非预应力、预应力钢筋分别加工, 经运输后进行绑扎, 形成符合设计要求的钢筋骨架。2) 钢筋骨架入槽预应力处理。吊运钢筋骨架入槽, 调整初应力后张拉预应力钢筋, 随后补绑钢筋骨架。3) 模板拼装与混凝土浇筑。检验合格后拼装模板, 浇筑按设计配合比拌制的混凝土, 采用分层连续浇筑并振捣密实。4) 养护与应力放松。混凝土达一定强度后拆模, 槽内养护至满足强度要求, 放松预应力, 切割钢筋。5) 起吊出槽与后续处理。起吊出槽后, 部分方桩存放养护, 部分浇筑桩尖混凝土。

生产过程碳排放主要来自 3 个方面: 1) 拌和、张拉、钢筋加工、养护、倒运等过程的能源消耗, 主要为电力消耗; 2) 厂区的运输过程能源消耗, 主要为柴油消耗; 3) 辅助材料消耗, 主要为锻造模具和包装材料等材料的消耗。

根据该预应力空心方桩生产工艺流程, 其生

在其他环节中, 原材料生产和运输阶段涉及水泥、钢材、砂石等主要材料的生产与运输过程的能源消耗; 产品运输阶段涉及运输工具的能源消耗; 使用维护阶段, 涉及方桩维护材料的损耗; 废弃处理阶段涉及拆除施工机械与废料运输工具的能源消耗, 主要为柴油等。

产品系统边界见图 2。

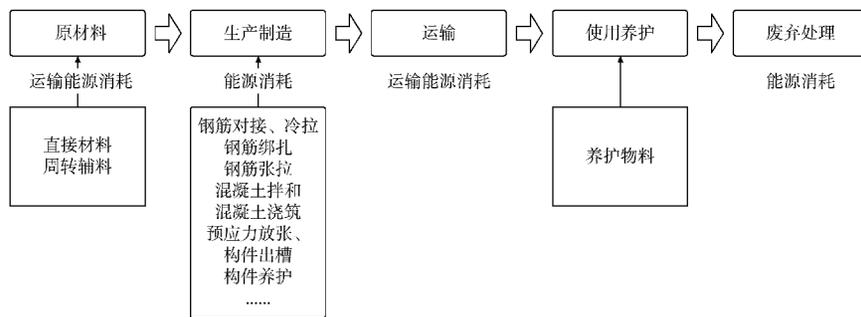


图 2 预应力空心方桩系统边界

Fig. 2 Pre-stressed square pile product system boundary

1.3 数据收集与碳排放因子确定

本文通过实地调研企业生产记录的方式获取活动数据。原材料生产和运输阶段,主要收集单位产品水泥、钢材、砂石等用量数据,并根据国家发布的相关标准确定碳排放因子;预制生产阶段,主要收集设备电力消耗、柴油用量等数据。运输阶段,根据产品的实际运输的出发地与目的地确定运输距离,根据行业标准确定运输工具的碳排放因子;使用维护及废弃处理阶段,结合工程经验与相关研究,估算其能源消耗与碳排放。

1.4 碳足迹计算模型

根据生命周期评价原理,建立港口工程预制构件碳足迹计算模型:

$$C_F = C_{\text{原材料}} + C_{\text{生产}} + C_{\text{运输}} + C_{\text{使用}} + C_{\text{处置}} = \sum C_h + \sum C_d + \sum C_w \quad (1)$$

式中: C_F 为预制构件全生命周期碳足迹, kgCO_2eq ; $C_{\text{原材料}}$ 为原材料阶段活动温室气体排放量, kgCO_2eq ; $C_{\text{生产}}$ 为生产制造阶段活动温室气体排放量, kgCO_2eq ; $C_{\text{运输}}$ 为产品运输阶段活动温室气体排放量, kgCO_2eq ; $C_{\text{使用}}$ 为使用维护阶段活动温室气体排放量, kgCO_2eq ; $C_{\text{处置}}$ 为废弃处置阶段活动温室气体排放量, kgCO_2eq ; C_h 为化石能源消耗活动温室气体排放量, kgCO_2eq ; C_d 为外购电力消耗活动二氧化碳排放量, kgCO_2 ; C_w 为物资消耗活动温室气体排放量, kgCO_2eq 。

全生命周期内化石能源消耗活动的温室气体排放量计算方法为:

$$C_h = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_{h,i,j} F_{\text{Eh},j}) \quad (2)$$

式中: $E_{h,i,j}$ 为单元过程 i 第 j 种化石能源总用量, kg 或 m^3 ; $F_{\text{Eh},j}$ 为第 j 种化石能源的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$ 或 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ 。

外购电力消耗活动温室气体排放量计算方法为:

$$C_d = \sum_{i=1}^n E_{d,i} F_{\text{Ed}} \quad (3)$$

式中: C_d 为全生命周期内电力消耗活动二氧化碳排放量, kgCO_2 ; $E_{d,i}$ 为单元过程 i 电力消耗量,

$\text{MW}\cdot\text{h}$; F_{Ed} 为电力碳排放因子, $\text{kgCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。

全生命周期内物资消耗活动温室气体排放量计算方法为:

$$C_w = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_{w,i,j} F_{\text{Ew},j}) \quad (4)$$

式中: $E_{w,i,j}$ 为单元过程 i 第 j 种物资总消耗量, kg 或 m^3 ; $F_{\text{Ew},j}$ 为第 j 种物资的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$ 或 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ 。

2 碳足迹计算案例

2.1 案例选择与概况

选取北方某大型预制场的预应力空心方桩作为研究案例。该方桩长 50 m, 截面边长为 700 mm, 产品净质量 43.5 t, 钢筋用量约 3.5 t。原材料主要来源于周边地区, 采用卡车运输。预制构件产品运输到业主处采用船舶运输, 平均运输距离 69 n mile。

2.2 产品各阶段碳排放计算

2.2.1 原材料生产和运输阶段

预应力空心方桩原材料主要包括水泥、河砂、碎石、矿粉、钢筋、钢模板等。生产过程原材料投入量及对应碳排放数据见表 1 (原材料碳排放因子数据来源于 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[16])。

表 1 原材料生产阶段碳排放数据
Tab. 1 Carbon emission data of raw material production stage

原材料类别	名称	投入量/ kg	碳排放因子/ ($\text{kgCO}_2\text{eq}\cdot\text{t}^{-1}$)	碳排放量/ kgCO_2eq
直接原料	水泥	7 840	735.00	5 762.40
直接原料	河砂	12 640	2.51	31.73
直接原料	碎石	21 900	2.18	47.74
直接原料	矿粉	1 560	2.18	3.40
直接原料	钢筋	3 560	2 430.00	8 658.09
周转辅料	钢模板	70	2 050.00	143.50

根据供应商名录确认各原材料供应商的运输方式和运输里程。陆运的碳排放因子数据来源于 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》。原材料运输阶段碳排放数据见表 2。

表 2 原材料运输阶段碳排放数据

Tab. 2 Carbon emission data of raw material transportation stage

名称	投入量/kg	运输方式	平均运输距离/km	碳排放因子/($\text{kgCO}_2\text{eq}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)	碳排放量/ kgCO_2eq
水泥	7 840	陆运	195	0.078	119.25
河砂	12 640	陆运	230	0.078	226.76
碎石	21 900	陆运	230	0.078	392.89
矿粉	1 560	陆运	70	0.078	8.52
钢筋	3 563	陆运	40	0.078	0.22
钢模板	70	陆运	245.75	0.078	68.30

2.2.2 生产制造阶段

预应力空心方桩生产制造过程中涉及的能源及资源消耗主要包括电力、柴油和水。生产制造阶段碳排放数据见表 3 (电力、柴油和水的碳排放

因子数据分别参考《2021 年电力二氧化碳排放因子的公告》^[17]、《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》^[18]和 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》)。

表 3 生产制造阶段碳排放数据

Tab. 3 Carbon emission data of production stage

能源及资源消耗种类	排放源名称	消耗量	碳排放因子	碳排放量/ kgCO_2eq
能源	电力	344 $\text{kW}\cdot\text{h}$	0.7355 $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$	253.01
燃料	柴油	23.7 L	3.1591 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$	62.89
资源	水	6 t	0.168 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{t}$	1.01

注: 柴油密度为 0.84 kg/L 。

2.2.3 产品运输阶段

预应力空心方桩产品运输方式为水运, 平均运输距离为 69 n mile, 产品运输的碳排放数据见

表 4 (水运的碳排放因子数据参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》)。

表 4 产品运输阶段碳排放数据

Tab. 4 Carbon emission data of product transportation stage

运输方式	运输距离/n mile	单位产品质量/t	碳排放因子/($\text{kgCO}_2\text{eq}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)	碳排放量/ kgCO_2eq
水运	69	42.5	0.015	81.46

2.2.4 使用维护阶段

预应力空心方桩在使用维护阶段的碳排放主要来源于定期防腐修复或中材料消耗。预应力空心方桩潮差区防腐涂层每 6 a 修复 1 次, 单次修复面积 11.2 m^2 。修复材料采用厚 0.5 mm 环氧树脂 (密度 1.2 g/cm^3 , 碳排放因子 5.8 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$), 经计算单次修复产生碳排放量 39 kgCO_2eq , 50 a 寿命期按共修复 8 次计算共产生碳排放 312 kgCO_2eq 。环氧树脂碳排放因子数据参考 Ecoinvent3.8 数据库^[19]。

2.2.5 废弃处理阶段

由于目前缺少废弃处理阶段预应力空心方桩

拆除的相关数据, 本文结合工程相关经验与行业标准, 对方桩废弃处理阶段的碳排放进行估算。估算共考虑拆除与废渣运输两个环节, 拆除部分根据单根长 50 m 方桩的体积 24.5 m^3 以及混凝土拆除的排放因子 72 $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$, 计算可得碳排放量约为 1 764 kgCO_2eq 。废渣运输部分, 根据方桩质量 (43.5 t)、废渣运输距离 (150 km) 以及陆运的碳排放因子 0.078 $\text{kgCO}_2\text{eq}/(\text{t}\cdot\text{km})$, 可得废渣运输碳排放量为 508.95 kgCO_2eq 。因此, 单根预应力空心方桩废弃处理阶段的碳排放估算为 2 272.95 kgCO_2eq 。其中混凝土拆除的碳排放因子数据参考中国生命周期基础数据库 (Chinese life

cycle database, CLCD) 数据库^[20]。

2.3 结果分析与讨论

综上, 预应力空心方桩产品全生命周期产品碳足迹为 18 446. 12 kgCO₂eq/根。其中原材料生产运输阶段的碳排放占比 82. 2% (15462. 80 kgCO₂eq), 主要由于水泥原材料和钢筋原材料的生产过程排

放较大。废弃处理阶段占比 12. 1%, 主要来自方桩拆除和废渣运输。生产制造、使用维护、产品运输阶段影响较小, 分别占比 1. 7%、1. 7%和 0. 4%, 其中生产制造阶段中电力消耗活动温室气体排放量(253. 01 kgCO₂eq) 为主要能源相关排放, 计算结果见表 5。

表 5 产品全生命周期碳排放数据
Tab. 5 Life cycle carbon emission data of the product

阶段	碳排放量/kgCO ₂ eq	占比/%	关键因素
原材料生产运输	15 462. 80	82. 2	水泥(5 762. 40 kgCO ₂ eq)、钢筋(8 658. 09 kgCO ₂ eq)生产
废弃处理	2 272. 95	12. 1	混凝土拆除(1 764 kgCO ₂ eq)、废渣运输(508. 95 kgCO ₂ eq)
生产制造	316. 91	1. 7	电力消耗(253. 01 kgCO ₂ eq)
使用维护	312. 00	1. 7	-
产品运输	81. 46	0. 4	-
总计	18 446. 12	100	-

3 结语

1) 本文系统识别混凝土预制构件全生命周期各环节的碳排放关键影响因素, 构建了一套适用于港口工程预制构件碳足迹分析的方法。

2) 本文结合实际案例开展量化计算, 较为精确地测算了预应力混凝土方桩的全生命周期碳足迹, 为水运领域从业人员估算港口工程建设阶段碳排放水平提供数据参考, 简化测算方法和流程。

3) 本文通过研究得出了原材料生产运输阶段是预应力混凝土方桩生命周期内碳排放最主要来源的结论, 并进行量化。论证了在港口工程预制构件领域采用生命周期评价法作为核心计算方法的科学性与合理性。

4) 本文在预应力混凝土方桩的使用养护阶段及废弃处理阶段中对部分数据进行估算, 并忽略了部分碳排放占比相对较小的环节。在后续工作中将进一步扩大案例的调研范围, 获取更全面、翔实的数据支撑, 完善相关计算。同时, 将预制梁板、大管桩等更多类型构件纳入研究, 拓展港口工程预制构件的研究范畴, 进一步验证与优化混凝土预制构件的核算方法。

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] 杨广林. 基于生命周期的钢锻件产品碳足迹核算[J]. 锻压技术, 2024, 49(12): 176-179.
YANG G L. Carbon footprint accounting of steel forgings based on life cycle [J]. Forging & stamping technology, 2024, 49(12): 176-179.

[3] 王璐, 马艳梅, 郭珍珠. 建筑材料全生命周期碳足迹分析与优化策略研究[J]. 住宅与房地产, 2025(8): 97-99.
WANG L, MA Y M, GUO Z Z. Research on carbon footprint analysis and optimization strategies of building materials throughout life cycle [J]. Housing and real estate, 2025(8): 97-99.

[4] 莫琼利, 董芳. 装配式混凝土建筑建设阶段碳足迹研究[J]. 低碳世界, 2025, 15(1): 76-78.
MO Q L, DONG F. Research on carbon footprint in the construction stage of prefabricated concrete buildings[J]. Low carbon world, 2025, 15(1): 76-78.

- [5] 陈有才,唐孟雄,罗奥,等. 预拌混凝土碳排放足迹计算与案例分析[J]. 广州建筑, 2024, 52(S1): 89-98.
CHEN Y C, TANG M X, LUO A, et al. Carbon emission footprint calculation and case study of pre-mixed concrete [J]. Guangzhou architecture, 2024, 52 (S1): 89-98.
- [6] 杨路远,黄有亮. 预制构件物化阶段碳足迹计算模型研究[J]. 江苏建筑, 2017(2): 117-120.
YANG L Y, HUANG Y L. Research on pre-fabricated concrete units carbon footprint model in materialization phase[J]. Jiangsu construction, 2017(2): 117-120.
- [7] 陈雪晴,郑艳丹,赖菱宇,等. 基于LCA的混凝土预制桩施工阶段碳足迹研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 473-477, 493.
CHEN X Q, ZHENG Y D, LAI J Y, et al. Carbon footprint research of concrete precast piles based on LCA[J]. Journal of Harbin University of Commerce (natural sciences edition), 2019, 35(4): 473-477, 493.
- [8] 陈为晶. 蒸压加气混凝土砌块产品碳足迹评价方法和实证研究[J]. 市场监管与质量技术研究, 2023(5): 44-46, 56.
CHEN W J. Products carbon footprint evaluation method and empirical analysis of autoclaved aerated concrete block [J]. Market supervision and quality technology research, 2023 (5): 44-46, 56.
- [9] 蒸压加气混凝土砌块低碳产品评价方法及要求: T/CBMF 28—2018[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
Methods and requirements of low-carbon products evaluation for autoclaved aerated concrete blocks: T/CBMF 28-2018 [S]. Beijing: China Building Material Industry Press, 2018.
- [10] Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services: PAS 2050: 2011[S]. London: BSI, 2011.
- [11] 曾韩军,严晓东. 基于LCA预制管片物化阶段的碳足迹测算与应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(17): 89-93.
ZENG H J, YAN X D. Study on calculation and application of carbon footprint in materialization stage of prefabricated segments based on LCA[J]. Construction technology, 2025, 54(17): 89-93.
- [12] 潘远山,龚健,张坤,等. 基于全生命周期评价法的预拌混凝土碳足迹计算分析及碳减排研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(4): 145-149.
PAN Y S, GONG J, ZHANG K, et al. Calculation and analysis of carbon footprint of ready-mixed concrete based on LCA and research on carbon emission reduction technology [J]. New building materials, 2024, 51(4): 145-149.
- [13] Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification[S]. Geneva: ISO, 2018.
- [14] Product life cycle accounting and reporting standard[S]. Washington: WRI, 2011.
- [15] 温室气体: 产品碳足迹量化要求和指南: GB/T 24067—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
Greenhouse gases-carbon: footprint of products-requirements and guidelines for quantifying: GB/T 24067-2024[S]. Beijing: China Standards Press, 2024.
- [16] 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 & Building Press, 2019.
- [17] 生态环境部, 国家统计局. 2021年电力二氧化碳排放因子的公告[R]. 北京: 生态环境部, 2024.
Ministry of Ecology and Environment, National Bureau of Statistics. Announcement on carbon dioxide emission factors of electricity in 2021 [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2024.
- [18] 企业温室气体排放核算与报告指南: 发电设施[S]. 北京: 生态环境部, 2022.
Guidelines for greenhouse gas emission accounting and reporting of enterprises-power generation facilities [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2022.
- [19] Ecoinvent Group. Ecoinvent version 3. 8 [DS/OL]. Ecoinvent Group (2021-09-21) [2025-03-09]. <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.8>.
- [20] 亿科环境科技. 中国生命周期基础数据库[DS/OL]. 亿科环境科技(2024) [2025-03-12]. <https://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd>.
IKE. Chinese life cycle database [DS/OL]. IKE (2024) [2025-03-12]. <https://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd>.