

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.106



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



建筑施工碳排放动态量化模型与案例分析

陈林^{1a}, 黄乐鹏^{1a, 1b}, 王睿翊^{1a}, 华建民^{1a, 1b}, 陈子萌^{1a}, 刘朝阳^{1a},
王金兵², 丘华生²

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 中建四局建设发展有限公司, 福建 厦门 363107)

摘要: 在全球气候变暖背景下, 建筑行业碳排放问题日益突出, 尤其施工阶段碳排放集中且强度高, 精准评估十分关键。然而, 传统碳排放评估法受数据模糊性及静态假设影响, 难以准确评价施工阶段碳排放。基于蒙特卡罗模拟建立碳排放不确定性修正因子体系, 并通过定义碳特征构建动态碳排放评估模型。通过47个建筑项目的案例研究发现, 动态修正计量模型的碳排放计算结果精确率较传统方法平均高出6.3%, 其中75%的案例相对偏差率在3%~8%之间, 在多工种交叉作业及大型设备协同运行等复杂工况中甚至超过10%。进一步分析显示, 传统方法因忽略运输环节的空载能耗与施工机械能效波动导致系统性低估了实际碳排放, 动态模型对此的修正贡献率在运输环节高达58.94%, 有效补偿了传统方法中的遗漏, 体现出其在复杂数据波动场景下的显著优势。

关键词: 建筑施工; 碳排放; 碳排放动态量化; 蒙特卡罗模拟; 不确定性分析; 案例研究

中图分类号: TU745.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Dynamic quantification model for construction carbon emissions and case study analysis

CHEN Lin^{1a}, HUANG Lepeng^{1a, 1b}, WANG Ruiyi^{1a}, HUA Jianmin^{1a, 1b},
CHEN Zimeng^{1a}, LIU Zhaoyang^{1a}, WANG Jinbing², QIU Huasheng²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Construction Fourth Engineering Division Construction Development Co., Ltd., Xiamen 363107, Fujian, P. R. China)

Abstract: Against the backdrop of global climate change, carbon emissions from the construction industry have become increasingly prominent, particularly during the construction phase, where emissions are highly concentrated and intense, making accurate assessment crucial. However, traditional carbon emission evaluation methods are often limited by data uncertainty and static assumptions, resulting in insufficient accuracy for assessing emissions during construction. To address this, this study establishes a carbon emission uncertainty correction factor system based on Monte Carlo simulation and develops a dynamic carbon emission evaluation model by defining carbon-specific characteristics. A case study involving 47 construction projects demonstrates that the proposed dynamic correction-based measurement model improves the accuracy of carbon emission

收稿日期: 2025-07-02

作者简介: 陈林(1997-), 男, 博士生, 主要从事建筑施工碳排放研究, E-mail: chnlinchen@gmail.com。

华建民(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hjm191@163.com。

Received: 2025-07-02

Author brief: CHEN Lin (1997-), PhD candidate, main research interest: carbon emissions from building construction, E-mail: chnlinchen@gmail.com

HUA Jianmin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: hjm191@163.com.

calculations by an average of 6.3% compared to traditional methods. Among these cases, 75% exhibit a relative deviation rate between 3% and 8%, with deviations exceeding 10% under complex conditions such as multi-trade overlapping operations and large equipment collaborative work. Further analysis reveals that traditional methods systematically underestimate actual carbon emissions due to the omission of factors such as unloaded energy consumption during transportation and fluctuations in equipment energy efficiency. The correction contribution of the dynamic model reaches up to 58.94% in the transportation phase, effectively compensating for omissions in conventional approaches and highlighting the model's significant advantage in scenarios with complex data fluctuations.

Keywords: building construction; carbon emissions; dynamic carbon emission quantification; monte carlo simulation; uncertainty analysis; case study

工业革命以来,人类活动产生的温室气体排放持续增加,推动了全球气候变暖和极端气候事件频发,对世界经济社会的可持续发展构成了重大威胁^[1]。2022年,全球一次能源消费总量和能源相关碳排放量均创历史新高,其中能源消耗相关的碳排放已占全球碳排放总量的87%。因此,应对气候变化、减少全球碳排放和能源消耗成为当前迫切任务。

建筑行业是全球能源消耗和碳排放的重要来源^[2],能源使用量约占全球的32%,温室气体排放占全球的34%^[3]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)表明,到2050年,建筑行业对全球二氧化碳的贡献占比将上升至52%^[4]。在中国,建筑业的碳排放约占能源相关碳排放总量的一半,其中施工阶段的碳排放量尤其显著,因施工活动具有周期短、能耗集中和排放强度高的特点,对建筑全生命周期的碳排放管理具有关键影响^[5]。建筑施工阶段的碳排放量化评估对识别高碳排放源、制定精准减排策略、建立标准化核算体系以及有效管控建筑施工碳排放至关重要,受到学术界和产业界的广泛关注^[6]。因此,近年来大量学者逐渐聚焦于施工阶段碳排放的精准评估与管理,以期推进建筑行业的低碳转型。

其他国家在建筑碳排放领域的研究起步较早,多基于生命周期评价(LCA)理论,广泛应用于建筑材料生产、施工过程及运营阶段等各环节的碳排放评估^[7]。一些学者关注不同施工技术及建材对碳排放的影响,如Pakdel等^[8]通过LCA评估了被动式建筑技术与传统技术的排放差异,Becker等^[9]探讨了新型木结构体系在减少碳排放方面的潜力。此外,一些学者将研究范围扩展至建筑全生命周期,强调全过程评估方法的重要性^[10]。例如,Rinne等^[11]通过软件工具对不同材料建造的公寓楼生命周期碳排放进行比较,并揭示了木材结构的低碳优势。同时,越来越多学者开始关注将LCA与建筑信息模型

(BIM)相结合,以提高数据收集效率和评估精度。Filimonau等^[12]在酒店建筑中运用LCA-BIM框架,指出其显著提高了评估效率。在中国,建筑碳排放的研究也不断推进,学者融合系统动力学、情景分析及投入产出法等多种方法,构建了多种碳排放评估模型。例如,Huo等^[13]结合系统动力学分析商业建筑碳排放的长期趋势,Gao等^[14]系统梳理了碳排放的核算方法,并提出运营阶段之外的施工碳排放评估应予以重视。此外,不确定性分析方法逐渐融入碳排放评估,如蒙特卡罗模拟和敏感性分析逐渐成为研究热点,提升了评估的精准性与决策支持力度。

尽管建筑碳排放研究已较为丰富,但现有量化方法多依赖静态数据和理想化假设,难以准确反映施工过程中的动态变化,导致评估结果存在偏差。同时,缺乏统一、系统的评估体系,不同研究间难以直接对比,也削弱了成果的实践价值。为突破这些局限,笔者建立了基于动态修正因子和碳特征参数的施工碳排放动态修正计量模型。碳特征参数用于结构化表征源项构成、排放强度、作业效率和工况状态,能够识别关键驱动机制并揭示碳排放随施工节奏、资源配置和环境扰动的变化规律。通过引入碳特征参数与动态修正因子,模型不仅更精准地刻画了施工过程中的动态排放特征,还有效应对了不确定性问题,为建筑施工的精细化和系统化碳排放管理提供了方法支持。

1 施工碳排放量化评估基础

1.1 研究对象

选取多种类型的建筑作为研究对象,涵盖住宅、商业及公共建筑等典型项目,而非局限于单一类型或结构,以避免结果的局限性。研究仅聚焦微观层面的施工过程碳排放,不涉及宏观行业层面的评价,旨在通过改进和修正传统碳排放因子法和LCA法,提出更为精准、高效的动态量化评估方法。

考虑到建筑施工周期长、工序复杂,主要分析施工过程中的土建部分,包括土石方、基础、主体结构和地下工程等。这些环节材料投入大、机械使用频繁,是施工阶段的主要碳排放源。室外景观、附属设施和机电安装等由于对整体碳排放贡献较小,且会增加计算复杂性,故未纳入研究范围。

1.2 计算边界

碳排放计算范围涵盖施工人员活动、材料消耗及机械能源消耗等可导致排放变化的环节。系统边界从时间、空间、对象及温室气体4个维度划分,输入包括材料、机械设备、施工人员和能源,输出为建筑垃圾和碳排放。建筑施工过程碳排放量化的系统边界如图1所示。

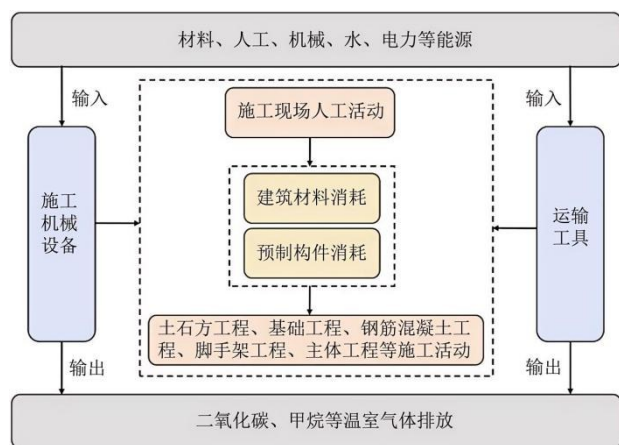


图1 建筑施工过程碳排放量化系统边界

Fig. 1 Boundary of carbon emission quantification system in building construction process

1.3 功能单位

功能单位是建筑施工碳排放计算的基础,其确定为碳排放清单分析中的数据收集提供了依据,并保证结果具有可比性。鉴于案例建筑在结构形式、高度和规模上差异较大,为实现多项目间的横向对比,统一采用碳排放强度作为比较基准。碳排放强度是指单位建筑面积在施工阶段所产生的碳排放总量,其计算公式为:碳排放强度=碳排放总量(kg)÷建筑面积(m^2),单位为 kg/m^2 。该指标不仅能反映不同建筑在单位面积上的碳排放水平,也有助于在多项目间实现标准化、可比性分析与评估基准统一,广泛用于建筑碳排放计算分析与绿色建筑评价体系中。

1.4 案例概况

选取了47个案例建筑项目,共涉及368栋建筑,分布于重庆、四川、湖北、浙江和山东等多个地理与气候区,具有较强的代表性。其中包括平原、丘陵、山地等不同地貌类型,覆盖了严寒地区(如内蒙古呼和浩特、河北廊坊)、沿海软土地区(如天津、

青岛、杭州),以及内陆湿润气候区(如武汉、宜昌、成都)。研究案例类型及结构形式多样,建筑面积和施工周期跨度较大,有助于全面反映不同条件下建筑施工碳排放的动态特征。

多样性的研究样本能够确保后续不确定性分析结果的科学性和广泛适用性。尽管建筑类型存在差异,但旨在通过分析其共同的施工环节和关键不确定性参数,提取具有普遍适用性的规律和特征。此外,这些案例项目均为近年来实际完成或正在实施的建筑工程,相关数据比较完整且可靠,能够为建筑施工碳排放的量化和不确定性分析提供坚实的数据基础。依据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[15],采用碳排放因子法结合LCA方法,对47个案例项目的施工阶段初始碳排放进行了系统量化。

2 施工碳排放动态量化模型

2.1 不确定性分析

对47个案例项目施工各环节碳排放进行蒙特卡罗模拟与统计分析,累计模拟188次,并在此基础上选取若干具有代表性的案例,对其碳排放模拟结果进行对比与剖析,以揭示不同施工情景下碳排放分布特征及其变化规律。

样本容量对蒙特卡罗模拟结果影响显著。容量过小可能导致结果不稳定,容量过大则增加计算负担而降低效率。依据《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》(JJF 1059.2-2012)^[16],当样本容量达到 10^6 时可提供95%置信水平区间估计,且通常满足精度需求,但不宜低于 10^4 。考虑计算成本,采用 10^5 次模拟,得到施工过程各环节碳排放的结果。

模拟结果表明,建材使用、运输及施工机械运行环节的碳排放分布接近正态,呈钟形曲线,虽略有偏斜但整体具有对称性和集中趋势;而人员活动环节则表现出偏态,未呈正态分布特征。这为后续的正态性检验和分布修正提供了依据。进一步采用Kolmogorov-Smirnov(KS)与Shapiro-Wilk检验验证各环节数据的正态性,若 p 值小于0.05,则判定其不符合正态分布。

2.2 建立修正因子体系

基于47个案例项目的蒙特卡罗模拟结果,对施工各环节碳排放分布进行统计分析,计算均值、标准差等参数,用于展示数据特征并给出不确定性描述及正态检验结果。

检验结果表明,建材使用、运输和施工机械运行环节的碳排放均符合正态分布,并通过了KS与Shapiro-Wilk检验;人员活动环节则表现出右偏特

征,部分项目未通过检验。为此,进一步计算了偏度系数,结果显示各项目均为正值,说明人员活动环节碳排放整体呈右偏特征。据此,采用对数转换进行纠偏。对数转换后,碳排放分布更接近正态,呈对称的钟形分布,偏态性显著减弱。基于此,进一步提出了施工各环节碳排放的不确定因子,以提升量化精度。

最后,结合 47 个案例项目的 188 次模拟结果,构建了两个不确定性修正因子公式,用于修正施工 4 个环节的碳排放。将施工过程划分为 4 个主要环节:建材使用(M)、建材运输(T)、施工机械运行(S)和施工人员活动(L),分别代表建筑施工中碳排放的四大构成部分。式(1)为建材使用、运输和施工机械运行这 3 个环节碳排放不确定因子的计算公式。由于这 3 个环节的碳排放符合正态分布特征,因此修正因子通过引入模拟结果和理论值之间的差异,并结合标准差反映碳排放的波动范围来调整碳排放的计算结果,能够有效修正原始数据中由于不确定性引起的误差。

$$\delta_i = 1 + \frac{\mu_i - C_i}{C_i} + \frac{\sigma_i}{C_i} \quad (1)$$

式中: δ_i 为碳排放不确定性修正因子, $i=M、T、S$; μ_i 为蒙特卡罗模拟得到的碳排放均值; σ_i 为蒙特卡罗模拟得到的碳排放标准差; C_i 为利用的碳排放基础计量模型计算得到的初始碳排放量。

对于人员活动环节,由于其碳排放数据呈现对数正态分布特征,式(2)、式(3)采用了对数转换后的均值和标准差进行修正,该修正因子通过指数化的方式对原始数据进行调整,从而使其更符合实际施工过程中的碳排放特征。通过这种方式,可以有效克服人员活动环节碳排放分布的偏态性,提高该环节碳排放量化的准确性。

$$\delta_L = e^{\delta'} \quad (2)$$

$$\delta' = \frac{\mu_{L,\log} - C_{L,\log}}{C_{L,\log}} \quad (3)$$

式中: $\mu_{L,\log}$ 为蒙特卡罗模拟得到的对数转换后的碳排放均值; $C_{L,\log}$ 为利用人员活动碳排放计算公式得到的对数转换后的碳排放量。

根据式(1)~式(3),基于 47 个案例建筑项目的施工碳排放模拟结果与初始碳排放量化结果计算得到建筑施工过程碳排放的不确定性修正因子体系为: $\{\delta_M, \delta_T, \delta_S, \delta_L\} = \{1.034, 1.2517, 1.2077, 0.9589\}$ 。其中, δ_M 为建材使用环节的碳排放修正因子, δ_T 为运输环节的碳排放修正因子, δ_S 为施工机械运行环节的碳排放修正因子, δ_L 为人员活动环节的碳排放修正因子。

最后,基于施工碳排放基础计量模型,将施工碳排放不确定性修正因子体系纳入计算模型,建立基于不确定性的建筑施工碳足迹计量修正模型

$$C_1 = \delta_M C_M + \delta_T C_T + \delta_S C_S + \delta_L C_L \quad (4)$$

式中: C_M 为建材使用环节的碳排放量,kg; C_T 为建材或构件运输环节的碳排放量,kg; C_S 为施工机械运行环节的碳排放量,kg; C_L 为施工现场人员活动环节的碳排放量,kg。

2.3 建立动态量化模型

建筑施工碳排放的精准量化是实施绿色施工管理和制定低碳政策的重要基础。针对传统建筑碳排放量化中存在的清单数据质量模糊以及依赖静态参数与实际施工工况适配性不足的问题,将碳排放不确定性修正因子体系与基于特征操作活动的施工碳排放计算模型相结合,构建了建筑施工碳排放动态修正计量模型。不确定性修正模型有效解决了传统碳排放计算中因清单数据质量模糊导致碳排放计算结果的不确定性与工程实际存在偏差的问题,但未充分考虑施工过程中碳排放的动态变化,而基于碳特征的碳排放量化模型通过构建涵盖机械运行状态、工艺技术参数及环境响应特征的动态化指标体系,能够量化施工过程中碳排放随工序推进、资源调配及环境条件变化的动态特性。因此,将两者相结合可形成互补优势,既保留了修正因子对输入数据不确定性的鲁棒性补偿能力,又通过碳特征参数实现了对碳排放动态特征的表达。

为了量化上述碳特征参数对施工碳排放的协同影响,根据式(5)进一步构建特征参数驱动各环节碳排放计算模型。

$$O_i(F-x) = P^{F-x-i} \times U^{F-x-i} \quad (5)$$

式中: $O_i(F-x)$ 为第*i*类特征操作活动对*x*类特征产生的碳排放量,*x*为特征的种类,包括关系特征、建筑整体特征、施工工艺特征、施工设备特征以及施工环节特征,*i*为特征操作活动的种类, $i=\{\text{eco, rao, eio}\}$,分别对应能源消耗操作、资源调配操作和环境影响操作。 P^{F-x-i} 表示第*i*类特征操作活动量,反映了特征操作活动的实际规模; U^{F-x-i} 表示与特征操作活动相关的碳排放因子。

该模型以特征操作活动为媒介,将施工工艺特征、设备运行状态及外部环境约束等变量纳入施工各环节碳排放的计算框架,通过 7 个可量化的相关因子或系数实现碳排放计算从静态定额向动态情景的转化,其核心逻辑在于将施工过程的变化因素(如工序交叉、结构设计、工艺选择等)与环境影响(如天气、夜间作业情况)纳入施工碳排放计算体系。该方法不仅能够克服传统 LCA 模型对施工过

程动态特性表征不足的缺陷,还可为低碳施工方案优化提供参数敏感性分析的量化基础。基于碳特征操作活动的施工过程各环节碳排放计算模型见式(6)~式(10),最终建筑施工碳排放动态修正计量模型计算式见式(11)。

1) 建材使用环节碳排放

$$O_1 = P^{F-2-1} \times U^{F-2-1} + P^{F-3-2} \times U^{F-3-2} = \sum_{i=1}^n Q_i \times \beta_i \times (1 - \eta_i) \times U_{M,i} \quad (6)$$

式中: Q_i 为建筑材料 i 的消耗量, t 或 m^3 ; $U_{M,i}$ 为建筑材料 i 的碳排放因子, kg/t 或 kg/m^3 ; β_i 为建筑材料 i 的损耗率系数, 反映施工过程中的损耗, $\beta \geq 1$; η_i 为建筑材料 i 的回收补偿系数, 反映废料回收对建材净消耗量的抵减效应。

2) 运输环节碳排放

$$O_2 = P^{F-4-1} \times U^{F-4-1} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_i \times D_{i,j} \times (1 + \lambda) \times U_{Tr,j} \quad (7)$$

式中: V_i 为第 i 种建筑材料或构件的重量, t; $D_{i,j}$ 为第 i 种建筑材料或构件采用第 j 种运输方式的运输距离, km; $U_{Tr,j}$ 为第 j 种运输方式的碳排放因子, $kg/(t \cdot km)$; λ 为空载返回修正系数。

3) 施工机械运行碳排放

$$O_3 = P^{F-1-2} \times U^{F-1-2} + P^{F-2-2} \times U^{F-2-2} + P^{F-4-1} \times U^{F-4-1} + P^{F-5-3} \times U^{F-5-3} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{i,j} \times R_i \times \alpha \times (\sum_{k=1}^4 (t_k \times \delta_k)) \times (\frac{1}{1 - \mu}) \times U_{c,j} \quad (8)$$

式中: $W_{i,j}$ 为施工机械 i 单位台班消耗能源 j 的数量, kg 或 kWh; R_i 为执行每项施工活动所需施工机械 i 的工作台班数; α 为机械台班数修正因子; t_k 为机械 i 在第 k 种工况下的时间占比, $t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 1$; δ_k 为机械在第 k 种工况下的运行效率系数; μ 为机械停工损失系数; $U_{c,j}$ 为能源 j 的碳排放因子; i 为施工机械的种类; j 为能源种类。

4) 人员活动碳排放

$$O_4 = P^{F-3-2} \times U^{F-3-2} = \sum_{i=1}^n X_i \times Y_i \times \epsilon \times U_{L,i} \quad (9)$$

式中: X_i 为第 i 种施工工艺的工程量, 可从工程量清单中获取; Y_i 为第 i 种施工工艺单位工程量所消耗的人工工日数量; ϵ 为人工效率修正因子; $U_{L,i}$ 为劳动力碳排放因子。

基于式(6)~式(9), 建筑施工过程动态碳排放总量可以表示为

$$C_2 = C'_M + C'_T + C'_S + C'_L = O_1 + O_2 + O_3 + O_4 \quad (10)$$

式中: $C'_M = O_1$, 为经动态模拟得到建材使用环节的

碳排放量, kg; $C'_T = O_2$, 为经动态模拟得到运输环节的碳排放量, kg; $C'_S = O_3$, 为经动态模拟得到施工机械运行环节的碳排放量, kg; $C'_L = O_4$, 为经动态模拟得到人员活动环节的碳排放量, kg。

最后, 基于式(1)~式(10)可以得出建筑施工碳排放动态修正计量模型计算公式

$$C_3 = \delta_M \cdot O_1 + \delta_T \cdot O_2 + \delta_S \cdot O_3 + \delta_L \cdot O_4 \quad (11)$$

值得注意的是, 式(11)是在式(5)的基础上引入各环节修正因子及动态量化模型后构建的综合表达式。修正因子来源于蒙特卡罗模拟结果, 对原始碳排放因子进行多轮扰动与调整, 从而反映施工现场多源异质性对碳排放总量的综合影响。动态量化模型以特征操作活动为核心媒介, 将施工工艺特征、设备运行状态及外部环境约束纳入碳排放计算框架。因此, 该方法增强了模型对实际工况的适应性和碳排放估算的精度, 可为施工阶段碳排放的动态评估与低碳优化提供更可靠的决策依据。

3 结果分析与讨论

3.1 施工碳排放量化结果分析

图2展示了47个案例项目施工碳排放总量的对比结果。红色圆点表示基于静态计量模型(传统LCA法)计算的碳排放量, 蓝色圆点表示基于动态修正计量模型的计算结果, 可直观比较两种方法的差异。

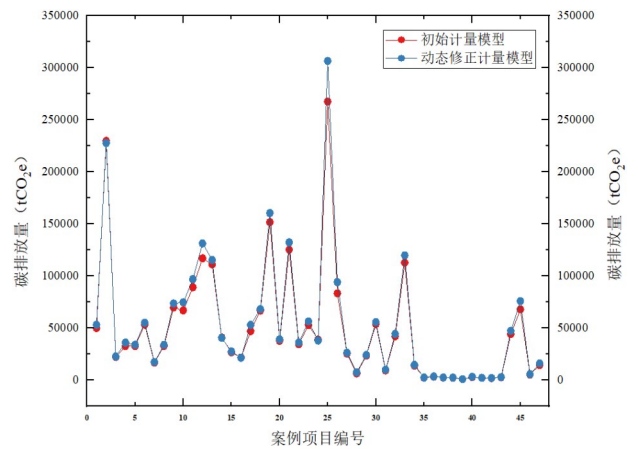


图2 案例项目两种计算模型碳排放结果

Fig. 2 Carbon emission results of two calculation models for case buildings

由图2可见, 动态修正模型计算值整体高于传统LCA法, 反映出新模型因考虑更多施工过程中的动态因素和不确定性而得到更高的排放量。为进一步分析差异, 利用式(12)计算47个案例的相对偏差率。结果显示, 动态修正模型较传统方法平均高出约6.3%。其中, 43个案例的偏差率为正, 仅4个为负, 表明传统LCA法存在系统性低估。偏差率超

过10%的9个案例(4、10、12、17、25、26、28、45、47)普遍涉及复杂工艺或机械调度密集,说明传统模型在多工种交叉、大型设备协同等场景下低估更为显著。另有75%的案例偏差率集中在3%~8%区间,进一步印证传统LCA法对常规施工活动的碳排放估算偏保守。

$$r_i = \frac{M_{2i} - M_{1i}}{M_{1i}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: r_i 为相对偏差率; M_{1i} 为碳排放基础计量模型计算得到的碳排放值; M_{2i} 为动态修正计量模型计算得到的碳排放值; i 为案例项目编号。

3.2 施工各环节碳排放对比分析

1) 建材碳排放

通过相对偏差率评估两种计量模型在建材碳排放环节的差异。由图3可见,案例项目的偏差率分布在-3.99%至14.51%之间,近70%的案例绝对偏差率低于5%。该环节碳排放的平均偏差率为3.75%,标准差为3.96,表明两种模型在建材环节的差异整体较小,且各案例间波动有限,动态修正效果较为稳定。值得注意的是,案例28的偏差率显著高于平均水平。结合施工实际,其异常可能源于建材消耗量的波动,如部分材料损耗率超限或废料回收率偏低,导致动态修正模型下的建材净消耗量显著增加,从而扩大了与初始模型的差异。

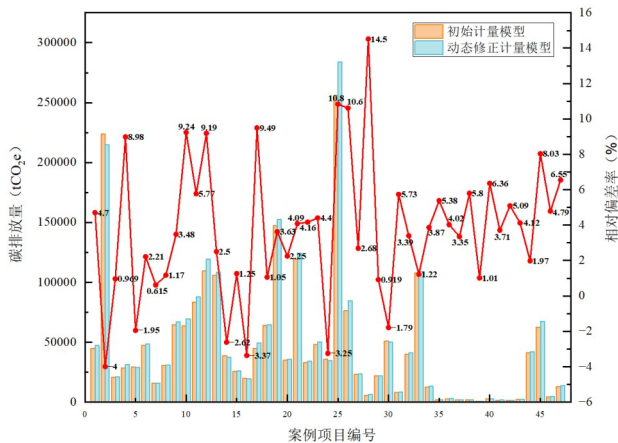


图3 案例建筑建材碳排放相对偏差率

Fig. 3 Building materials carbon emission case building relative deviation rate

2) 运输过程碳排放

对于运输环节碳排放来说,用动态修正计量模型计算得到的碳排放量显著高于初始计量模型的碳排放量。由图4可知,计量模型2的碳排放计算结果较计量模型1普遍提升1~2倍,其中75%的案例项目在该环节的碳排放提升了1.7~2.3倍。平均相对偏差率为103.14%,相对偏差率的标准差为31.43,表明传统LCA模型因假设固定的运输距离

与理想满载率假设,忽略了路况变化以及运输工具空载返回能耗等因素,从而严重低估了实际运输过程中产生的碳排放。此外,剔除异常案例(案例1、案例2和案例28)后,标准差降至24.33,说明动态计量修正模型对运输环节碳排放的动态修正效果在不同建筑类型的项目中的波动性较大,这可能是不同项目运输条件的本质差异导致的。

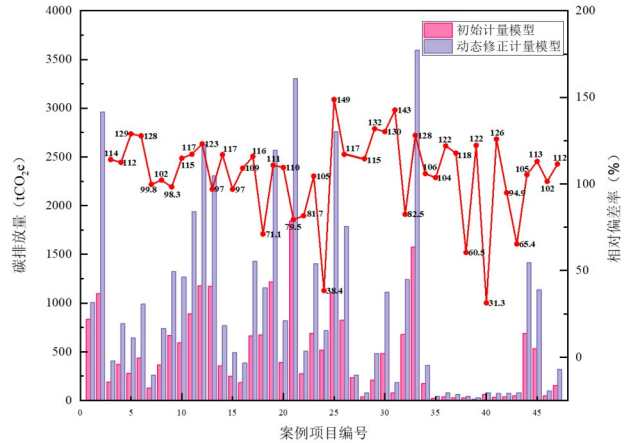


图4 案例建筑运输碳排放相对偏差率

Fig. 4 Building materials transport carbon emission case building relative deviation rate

3) 施工机械碳排放

对于施工机械运行环节碳排放,各案例项目的相对偏差率如图5所示,所有项目的相对偏差率均为正值,这表明传统LCA模型因采用理论台班定额与理想工况的假设,显著低估了机械运行产生的碳排放。值得注意的是,异常案例项目20的偏差率显著高于平均水平,其主要原因在于该项目为大型商业综合体工程,施工阶段涉及大体积钢结构吊装及地下结构逆作法施工,重型机械高负载运行频率远高于常规项目,能耗水平亦显著提升。传统LCA方法未能考虑实际工况下的波动性与空转能耗,导致机械能耗被系统性低估;而动态修正模型通过引入机械运行效率系数与工况时间占比修正机制,更真实反映了复杂工况下的碳排放水平,因而在该类项目中呈现出明显偏差。对于类似多工序协同作业、重型设备频繁调度的施工场景,实际空转待机与降效运行等动态损耗较大,动态模型的修正效应相较于常规工况更为显著;与此同时,精细化的施工组织与管理亦可在一定程度上有效抑制碳排放偏差的离散性。剔除异常案例项目20之后,动态修正计量模型的结果较初始计量模型的平均相对偏差率为37.16%,标准差为34.26。由图5可知,动态修正计量模型的碳排放结果较初始计量模型普遍提高20%~80%,少数项目出现提高一倍的情况,且偏差率分布呈现显著的项目间异质性,波动性较高。在

剔除异常数据之后,标准差仍然较高,揭示了动态修正效应的强情境依赖性。

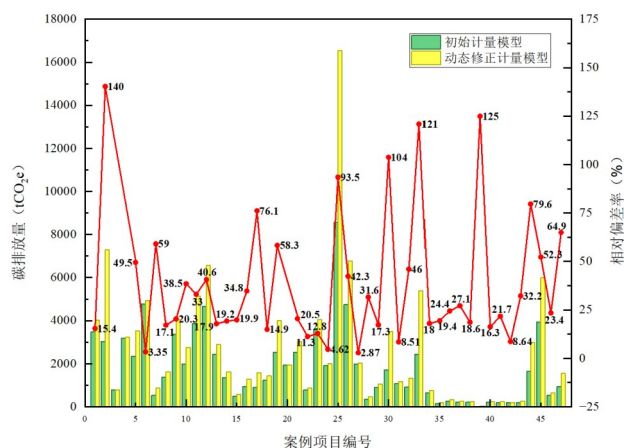


图5 施工机械运行碳排放案例建筑相对偏差率

Fig. 5 Construction machinery operation carbon emission case building relative deviation rate

4) 人员活动碳排放

对于人员活动环节碳排放,47个案例项目的相对偏差率如图6所示,平均相对偏差率为25.18%,标准差为28.04。由图6可知,相对偏差率呈现双向分化,正向偏差案例与负向偏差案例并存。这种现象可能源于动态修正计量模型对传统LCA模型的双重修正逻辑的动态响应,当实际劳动强度高于传统LCA模型的静态假设时,叠加施工超耗工程量及低效工日消耗等因素的影响,可能形成高强度劳动与资源浪费的协同效应,从而推动碳排放动态修正效应朝正向;反之,当技术创新降低人工需求并配合工程量削减(比如案例项目20预制率提升使现浇量25%)或工效优化时(比如案例23机械抹灰降低工日30%),则可能导致碳排放负向修正。尽管劳动强度修正因子均值为0.95,但因该环节碳排放的非对称分布特性及与工程量、工效波动的耦合作

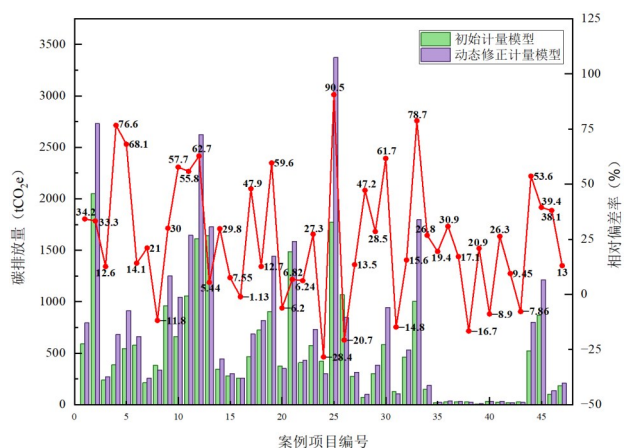


图6 人员活动碳排放案例建筑相对偏差率

Fig. 6 Relative deviation rate of buildings in case of carbon emissions from personnel activities

用,导致偏差方向分化并加剧偏差的离散性。

3.3 各环节碳排放修正贡献率

基于分析结果,为了明确动态修正计量模型的量化结果普遍高于传统的传统LCA模型碳排放计算结果的主要驱动环节,量化了建材、运输、施工机械和人员活动4个环节碳排放对于施工碳排放总增量的贡献率,具体方法如下。

为了消除量纲干扰,避免高量级环节的绝对差值主导贡献率,将各环节相对偏差率进行标准化处理,利用式(13)计算出4个环节对施工碳排放总增量的全局贡献率,结果如表1所示。

$$G_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{|r_{ik}|}{\sum_{i=1}^4 |r_{ik}|} \times 100\% \right) \quad (13)$$

式中: i 为施工过程4个环节(建材=1,运输=2,机械=3,人工=4); G_i 为全局贡献率; r_{ik} 为第 k 个案例项目的相对偏差率; N 为案例总数, $N=47$ 。

表1 各环节对施工碳排放总增量的修正贡献率

Table 1 Correction contribution rate of each stage to the total increment of construction carbon emissions

施工环节	修正贡献率/%
建材使用	2.17
建材运输	58.94
施工机械运行	18.65
人员活动	20.24

由表1可知,建材运输环节对施工碳排放总增量的贡献率最高,占比达58.94%,其次为人员活动和施工机械运行环节,而建材使用环节的影响最小,这表明传统LCA模型对运输路径和载具效率的变化调整和人工劳动效率差异的碳排放可能出现较明显的系统性低估。运输环节的高贡献率反映出,传统LCA中预设的固定运输距离和默认满载率100%等理想化假设显著弱化了实际施工中因供应链临时调整、交通管制或车辆调度失配以及空载返回等引发的碳排放波动。而人员活动的次高贡献率则表明,传统定额中均质化的人工工日消耗量(如忽略工种劳动强度差异)掩盖了高强度作业场景下工人呼吸碳排放的实际增长。相比之下,建材使用环节的低贡献率表明施工过程中混凝土、钢材等建材的实际消耗量受标准化设计及成本控制影响显著,其实际波动幅度较小,传统模型能较准确地反映其碳排放水平。

3.4 建筑类型偏差特性分析

为揭示动态修正计量模型在不同建筑类型中的适用性差异,基于47个案例的碳排放量化结果,按建筑类型分组,从偏差幅度与主导驱动因素两个维度开展对比分析。3类建筑的平均偏差率结果

见表 2。

表 2 不同建筑类型碳排放平均偏差率
Table 1 Average deviation rate of carbon emission of different building types

建筑类型	平均偏差率/%
住宅类	4.39
商业类	5.21
公建类	7.35

由表 2 可知,公建类项目平均偏差率最高,高于总体平均值。该类建筑涵盖学校、医院、体育场等功能复杂项目,施工工艺烦琐,多工种交叉与机械协同频繁(如案例 17 中机电与土建协同延误),使得传统 LCA 模型基于静态参数的假设难以反映实际动态变化,从而导致碳排放显著低估。相比之下,住宅类项目因标准化户型比例高、预制构件应用广泛(案例 3 中预制率达 65%),其施工作业与运输距离较稳定,故两种模型结果偏差较小。商业类项目介于两者之间,但在动态修正中仍表现出显著改进。

为进一步探讨不同类型建筑的驱动差异,基于式(13)计算各环节对总偏差率的贡献率,结果见表 3。分析表明,建材运输在 3 类项目中均为主导贡献环节,但其动态机制及次要贡献环节存在差异。住宅类运输差异多源于集中采购节点变更和分批运输增加空载率,传统模型基于满载假设而低估能耗;其次贡献环节为人员活动,反映人工协同效率与调度冗余的影响。公建类运输差异则受场地限制和绕行影响显著,例如案例 37 因地铁围挡导致运输绕行率上升 25%。商业类同样以运输为主导,但施工机械贡献率明显高于住宅类,人员活动贡献率则偏低,主要因机械化替代率较高(如案例 11 中混凝土泵送替代人工浇筑,工时减少 67%)。

表 3 不同建筑类型各环节对施工碳排放总增量的修正贡献率

Table 3 The revised contribution rate of each link of different building types to the total increment of construction carbon emissions

建筑类型	建材使用贡献率/%	建材运输贡献率/%	施工机械运行贡献率/%	人员活动贡献率/%
住宅类	1.83	57.90	13.72	26.55
商业类	0.80	46.84	27.52	24.84
公建类	2.73	63.15	16.83	17.30

综上,运输环节的高贡献率反映出传统模型在运输路径平均假设与利用率简化上的局限,而修正模型通过引入空载能耗与路径弹性,更准确地刻画了运输排放,为施工运输碳排放的精细化管控提供

了依据。

3.5 模型有效性验证

与传统 LCA 方法的对比表明,动态修正计量模型在施工碳排放评估中展现出更强适配性。传统方法依赖静态参数与均质化假设,常在运输路径波动、机械负载变化和工艺复杂场景中低估排放。新模型通过引入动态修正因子和碳特征参数的耦合机制,有效提升了计算结果的准确性。对比结果显示,新模型计算的施工总碳排放量平均高出 6.3%,其中建材运输环节贡献率最高(58.94%),反映出传统模型在空载率与路径动态调整方面的不足;施工机械环节贡献率为 18.15%,揭示了传统方法因理论台班定额假设而低估能耗,凸显了新模型在运输密集型和高机械负载场景(如商业综合体钢结构吊装与大型设备群协同作业)中的优势。

建筑类型差异分析进一步表明,政府公建类项目的修正效应最显著,平均偏差率达 7.35%。该类项目因工艺复杂、多工种交叉频繁,传统 LCA 方法在工序衔接与资源调度方面的静态假设难以反映实际情况,而动态修正模型能够捕捉协同效率与工艺复杂度的动态变化,因此更适用于医院、体育场馆等复杂功能建筑及多工序交叉施工场景。

此外,基于碳排放计算结果对 3 类建筑的碳排放强度分布进行了横向对比。通过按建筑类型与功能特征交叉分组,筛选案例数量不少于 3 的组别,分别计算碳排放强度的均值、标准差和变异系数,结果如表 4 所示。结果表明,政府公建类项目的碳排放强度均值最高(868.69 kg/m²),且变异系数亦最大,反映出其功能多样性和施工复杂性带来的波动性。医院、学校等建筑因多工种交叉和特殊工艺需求,使碳排放显著增加并呈现更大离散性。商业办公类强度均值高于住宅类,印证了高层商业建筑对高机械负荷和特殊工艺的敏感性;综合开发类均值接近住宅,但更高的标准差表明混合功能场景在资源动态消耗上的差异会引入额外波动。

表 4 不同建筑类型碳排放强度对比

Table 4 Comparison of carbon emission intensity of different building types

建筑类型	碳排放强度均值/(kg/m ²)	标准差	变异系数
高层住宅建筑	354.08	102.98	0.29
商业办公大厦	425.45	121.53	0.29
政府公建类	868.69	353.64	0.41

与传统 LCA 方法相比,动态修正模型进一步放大了类型间差异,显示其对功能需求和施工复杂度的响应能力更强。同时,模型在保留合理组内波动的前提下,并未混淆类型间的本质差异,其分布特

征与既有研究结论保持一致。总之,新模型不仅延续了传统方法对类型差异的刻画能力,还通过动态参数耦合提升了复杂场景下的量化精度,为基于功能定位的差异化碳排放管控提供了可靠依据。

因此,提出的动态修正计量模型在结构逻辑和适用性方面均较传统方法有明显改进。虽然现有研究虽已尝试引入“空载返回系数”“施工损耗率”等参数以提升单一环节的估算精度,但整体仍依赖静态排放因子与理想工况假设,难以系统反映施工过程的多因素不确定性。相比之下,在传统LCA框架基础上,引入基于蒙特卡罗模拟的不确定性修正因子与碳特征驱动模型,构建了涵盖建材、运输、机械和人员活动4个关键环节的动态评估体系。该模型能够根据能效波动、机械工况变化和外部环境响应应对碳排放进行多维修正,显著提升了复杂施工条件下的适应性与估算精度,具备较强的工程应用潜力。

尽管样本数量为47个,但已覆盖多区域、多类型和多结构的项目特征,具有较强代表性。在模型验证中,笔者不仅通过与传统LCA方法对比碳排放偏差和修正贡献率,还基于不同区域与类型项目的分析开展了跨类别适应性测试,提升了模型的稳健性与通用性。然而,由于建筑施工领域尚缺乏统一的碳排放实测数据库,现有企业虽部分部署了临时能耗监测系统,但数据的时效性与完整性仍有限,因此未能引入实测数据进行直接比对。未来研究将通过与施工单位合作采集典型项目的碳排放监测数据,开展模型与实测数据的拟合分析,以进一步验证外部精度并完善参数调优机制。

4 结论与展望

4.1 结论

在全球应对气候变化的大背景下,降低建筑行业能耗与碳排放成为亟待解决的关键问题之一。围绕建筑施工过程中的碳排放量化评估进行研究,建立了基于不确定性和碳特征的建筑施工碳排放动态量化评估模型,旨在解决传生命周期评估法在建筑施工阶段应用中存在的数据质量模糊以及静态性假设导致无法真实反映施工过程碳排放变化的问题。基于47个建筑工程项目进行案例实证研究,验证模型的适用性与有效性,以期为建筑行业的精细化碳管理和减排策略制定提供理论依据与实践工具,得到以下主要结论:

1)为了解决输入数据不确定性影响碳排放量化评估结果准确性的问题,结合数据质量指标评价和蒙特卡罗模拟的方法对现有案例项目的施工碳

排放量化结果进行了不确定性分析,并基于蒙特卡罗模拟结果提出了建筑施工过程各环节的修正因子计算公式,最终根据47个项目的量化评估结果和不确定分析结果计算得到施工过程4个环节的碳排放不确定性修正因子体系为: $\{\delta_M, \delta_T, \delta_S, \delta_L\} = \{1.034, 1.2517, 1.2077, 0.9589\}$,基于此建立了基于不确定性的建筑施工碳排放计量修正模型。该模型通过修正因子对施工过程各环节的碳排放基础计量模型进行调整,解决了传统碳排放评估中数据不确定性导致的计算误差问题,提高了碳排放计算的准确性。

2)针对传统碳排放评估方法的静态局限性,提出了碳特征的概念,并基于碳特征提出建筑施工过程碳排放量化评估框架,该评估框架通过3类特征操作活动实现碳特征与施工过程4个环节碳排放的关联映射,并通过7个可量化的相关系数将施工过程的变化因素与环境影响纳入施工碳排放计算体系,实现碳排放计算从静态定额向动态情景的转化,最终建立基于特征操作活动的施工碳排放计算模型,该模型能克服传统LCA模型对施工过程动态特性表征不足的缺陷。将修正因子体系与基于碳特征的施工碳排放计量模型相结合,构建了建筑施工碳排放动态修正计量模型。该模型通过修正因子和碳特征参数的耦合运算,实现了对施工过程碳排放动态特征的表达,同时增强了对输入数据波动性的应对能力,能够更加准确地评估工程项目施工碳排放的实际情况。

3)通过对现有的47个建筑工程案例进行实证研究,验证了动态修正计量模型在施工碳排放量化中的应用效果。研究发现,传统LCA法因忽略运输空载率及机械运行状态波动等动态因,对施工碳排放存在系统化低估现象。动态修正计量模型的碳排放计算结果比传统LCA法平均高出6.3%,75%的案例项目的相对偏差率集中在3%~8%区间,而在多工种交叉作业、大型设备协同运行等复杂多变的能耗场景中,偏差率超过10%。此外,两种方法的对比分析结果发现建材运输环节以58.94%的修正贡献率成为偏差率的主导增量来源,动态修正模型对运输空载能耗补偿与机械能效波动的修正响应能力尤为突出。最后,对不同建筑类型的碳排放特征分析发现,动态修正模型能够精准响应建筑功能与施工特征的差异化需求,并且对公建类和商业类建筑等复杂施工场景的动态修正效果更为显著,该模型在运输密集型的项目和高机械负载场景中显示出更强的评估优势。

4.2 展望

在传统碳排放因子法的基础上提出了基于不确定性分析和碳特征的建筑施工碳排放动态修正计量模型,为建筑施工过程中的碳排放量化提供了新的思路和方法。但仍存在一些不足,未来仍有一些方面可以进一步改进和完善,具体如下:

1) 基于 47 个案例建筑项目分 3 类建筑类型进行不确定性分析,但数据集的规模仍然较小,可能影响分析结果的普适性和稳定性,限制了模型的泛化能力。模型的精确度与泛化能力有待未来更大规模数据集验证,未来研究可以通过扩展数据集,增加更多类型和规模的建筑项目,并引入敏感性分析,以进一步增强模型在不同施工场景下的适用性。此外,数据的时效性和代表性也应得到关注,以提高模型的适用性和应用价值。

2) 尽管通过与传统 LCA 法计算结果的对比,初步验证了动态修正计量模型的有效性,但由于缺乏施工现场的实测碳排放数据,尚无法对模型的计算精度与实际适用性进行更全面的验证。实测数据的缺失限制了模型在真实施工环境中的外部效度评估。未来研究应通过与施工单位合作,获取典型项目的实测碳排放数据,开展模型与实测值的拟合分析,从而提升模型参数调优的响应能力,并进一步优化其在不同项目与场景下的适用性与准确性。

3) 在建筑垃圾回收碳补偿量化方面仍存在深化空间。受限于实际工程中建筑垃圾回收全链条数据的可获取性与完整性,以及再生材料碳补偿核算权威标准的缺失,当前模型未考虑建筑垃圾再利用回收的减排效益。未来研究可采用 BIM 与 LCA 的耦合,构建建筑垃圾全生命周期的精细化碳排放模拟方法,以更准确地评估建筑垃圾管理对施工过程碳排放的影响。

参考文献

- [1] YANG Z, GAO W J, HAN Q, et al. Digitalization and carbon emissions: How does digital city construction affect China's carbon emission reduction? [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104201.
- [2] BANIHASHEMI S A, KHALILZADEH M, SHAHRAKI A, et al. Optimization of environmental impacts of construction projects: A time-cost-quality trade-off approach [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18(3): 631-646.
- [3] United Nations Environment Programme. Global status report for buildings and construction 2024/2025 [R/OL]. Paris: UNEP, (2025-03-17) [2025-07-01]. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214>.
- [4] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 58-64.
WANG C, ZHANG Y X. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision [J]. *Environmental Conformity Assessment*, 2020, 12(6): 58-64. (in Chinese)
- [5] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年)[J]. *建筑*, 2025(2): 56-63.
China Association of Building Energy Efficiency, Institute of Urban-Rural Construction and Development of Chongqing University. Research report on carbon emissions in urban and rural construction in China (2024) [J]. *Construction and Architecture*, 2025(2): 56-63. (in Chinese)
- [6] 付腾飞, 王晓洁, 乔冬, 等. 建筑施工全过程碳排放分析系统平台设计[J]. *施工技术(中英文)*, 2023, 52(4): 76-80.
FU T F, WANG X J, QIAO D, et al. Design of carbon emission measurement system platform for the whole process of construction [J]. *Construction Technology*, 2023, 52(4): 76-80. (in Chinese)
- [7] HUNT R G, FRANKLIN W E, HUNT R G. LCA: How it came about: Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1996, 1(1): 4-7.
- [8] PAKDEL A, AYATOLLAHI H, SATTARY S. Embodied energy and CO₂ emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary Iranian construction systems [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 39: 102310.
- [9] BECKER I, ANDERSON F, PHILLIPS A R. Structural design of hybrid steel-timber buildings for lower production stage embodied carbon emissions [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107053.
- [10] SEYEDABADI M R, SAMAREH ABOLHASSANI S, EICKER U. District cradle to grave LCA including the development of a localized embodied carbon database and a detailed end-of-life carbon emission workflow [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107101.
- [11] RINNE R, ILGIN H E, KARJALAINEN M. Comparative study on life-cycle assessment and carbon footprint of hybrid, concrete and timber apartment buildings in Finland [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(2): 774.
- [12] FILIMONAU V, ROSA M S, FRANCA L S, et al. Environmental and carbon footprint of tourist accommodation: A comparative study of popular hotel categories in Brazil and Peru [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129561.

[13] HUO T F, XU L B, LIU B S, et al. China's commercial building carbon emissions toward 2060: An integrated dynamic emission assessment model [J]. Applied Energy, 2022, 325: 119828.

[14] GAO H, WANG X K, WU K, et al. A review of building carbon emission accounting and prediction models [J]. Buildings, 2023, 13(7): 1617.

[15] 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. (in Chinese)

[16] 用蒙特卡洛法评定测量不确定度: JJF 1059.2—2012 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.

Monte Carlo method for evaluation of measurement uncertainty: JJF 1059.2—2012 [S]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2013. (in Chinese)

(编辑 XXX)