

建筑全生命周期碳排放精细化核算与减碳途径研究

耿杨洋, 岑家曦, 旦增格罗

江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月12日

摘要

本文以建筑全生命周期为研究对象, 系统梳理了从建材生产、施工建造、运营维护到拆除回收各阶段的碳排放核算方法, 提出了基于动态数据的精细化核算模型。结合国内外典型案例, 分析了不同阶段的碳排放特征与关键影响因素, 并从设计优化、材料替代、技术革新与管理提升四个维度提出减碳路径。研究表明, 通过全生命周期视角的精准核算与协同干预, 建筑行业可实现30%~50%的碳减排潜力, 为双碳目标下的建筑低碳转型提供理论依据与实践参考。

关键词

建筑全生命周期, 碳排放核算, 减碳路径, 低碳建筑, 可持续发展

Research on Refined Accounting of Carbon Emissions Throughout the Entire Life Cycle of Buildings and Ways to Reduce Carbon Emissions

Yangyang Geng, Jiaxi Cen, Danzeng Gelo

School of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Apr. 9th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 12th, 2025

Abstract

This article takes the entire life cycle of buildings as the research object, systematically sorts out the carbon emission accounting methods for each stage from building material production,

文章引用: 耿杨洋, 岑家曦, 旦增格罗. 建筑全生命周期碳排放精细化核算与减碳途径研究[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(3): 592-599. DOI: 10.12677/mse.2025.143066

construction, operation and maintenance to demolition and recycling, and proposes a refined accounting model based on dynamic data. Based on typical cases at home and abroad, the carbon emission characteristics and key influencing factors at different stages were analyzed, and carbon reduction paths were proposed from four dimensions: design optimization, material substitution, technological innovation, and management improvement. Research has shown that through precise accounting and collaborative intervention from a full lifecycle perspective, the construction industry can achieve a carbon reduction potential of 30%~50%, providing theoretical basis and practical reference for the low-carbon transformation of buildings under the dual carbon goal.

Keywords

Building Lifecycle, Carbon Emission Accounting, Carbon Reduction Pathway, Low Carbon Buildings, Sustainable Development

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化正在对人类社会产生一系列负面危害,包括但不限于冲击全球经济,影响农业生产,加剧粮食危机,威胁人体健康等[1]。据世界气象组织(WMO) [2]统计,近 50 年间的灾害数量在统计周期内呈现增加趋势。

建筑业是全球能耗及碳排放的主要贡献源,消耗了全球约 40%的能源,其中温室气体(GHGs)排放约占全球总量三分之一[3],在北美与欧洲等一些发达地区占比甚至达到 40%~50% [4]。自 2010 年以来,全球与建筑业相关的温室气体排放量持续增长[5]。因此,建筑领域的绿色低碳发展成为 21 世纪全球各国最为紧迫的任务之一[6]。

Huang 等[7]运用全生命周期理论对全球 8226 个不同类型建筑案例进行了能耗测算,得出了木结构建筑全生命周期能耗强度最低,而对于钢结构与混凝土结构建筑在不同的案例研究中能耗强度存在较大差异的结论。Yumin Liang 等[8]基于全生命周期理论对选取案例建筑全生命周期能耗进行了测算,得出了运营过程占全生命周期比例的最大份额,平均为 67%,其次是生产和施工阶段,平均为 31%,拆除过程中的能耗相对较低,平均为 2%的结论。Kaihan Cai 等[9]对装配式轻钢结构建筑(PLB)与传统现浇建筑(TCB)全生命周期能耗进行了测算,得出了 PLB 和 TCB 的使用和运行阶段均为能源消耗的主要阶段,与 TCB 相比,PLB 的节能减排潜力为 59.58%,发展 PLB 将促进中国建筑业的绿色发展的结论。国内学者也针对我国建筑业能耗与碳排放问题进行了广泛研究,刘哲瑞[10]针对木结构建筑将全生命周期划分为木材生长阶段、建材生产阶段、运输建造阶段、运行维护阶段、拆除回收阶段,并对木结构建筑全生命周期能耗进行测算,提出了低碳木结构建筑推广的政策性建议。对以上文献进行比较分析,发现现有研究在揭示建筑低碳化必要性上达成共识,但需在方法论统一性、区域适配性和政策可操作性层面深化,以支撑全球气候目标的差异化实现路径。

2. 建筑全生命周期碳排放核算方法

建筑全生命周期碳排放(Building Life Cycle Carbon Emissions, LCCa)是指建筑物从原材料开采、建材生产、施工建造、运营使用到拆除废弃的全过程中产生的温室气体排放总和。这一方法旨在全面评估建

筑对环境的影响，并为低碳设计和可持续管理提供依据。

2.1. 建筑全生命周期阶段划分

(1) A1-A3: 建材生产与运输

原材料开采(A1)、运输至工厂(A2)、建材制造(A3)。

碳排放源: 能源消耗(如水泥煅烧、钢铁冶炼)、化工过程(如发泡剂使用)、隐含碳。

(2) A4-A5: 施工阶段

建材运输至工地(A4)、施工过程(A5)。

碳排放源: 施工机械能耗、临时材料消耗、运输排放。

(3) B1-B6: 运营阶段

建筑使用中的能源消耗(B1)、维护(B2)、维修(B3)、翻新(B4)、替换(B5)、水耗(B6)。

碳排放源: 供暖、制冷、照明、设备运行等。

(4) C1-C4: 拆除与废弃阶段

建筑拆除(C1)、废弃物运输(C2)、废弃物处理(C3)、回收利用(C4)。

碳排放源: 拆除机械能耗、填埋或焚烧排放、回收过程的能源消耗。

(5) D: 潜在碳效益

材料回收或再利用带来的碳抵消(如钢材回收利用减少新钢生产排放)。

2.2. 碳排放计算方法

2.2.1. 数据收集与清单分析

(1) 建材清单: 统计建筑中所有材料的种类、数量;

(2) 能源与资源消耗: 施工机械能耗、运营阶段水电气消耗等;

(3) 排放因子: 参考国际数据库(如 EPD、ICE 数据库)或国家标准, 收集建筑材料或能源的每单位碳排放系数;

(4) 无明确的建材生产碳排放数据时, 建材生产碳排放因子按照《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019) [11];

(5) 运输方式碳排放因子按照《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019) [4]附录 E 中默认值及书籍《建筑全生命周期碳足迹》[12]取值;

(6) 能源碳排放因子根据热值、折标煤系数及单位热值碳排放因子计算而来[13]。《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019) [11]中的基本规定;

(7) 绿化年固碳量按照江苏省住房和城乡建设厅《江苏省民用建筑碳排放计算导则》[14]及论文《城市绿地碳汇核算方法及其研究进展》[15]取值。

2.2.2. 碳排放核算边界的建立

本文提出的模型的系统界定义为“从原料采集直到拆除回收”的全过程, 本文除采用 GB14691-93 中规定的全球变暖潜能来代表其环境影响效果外, 还采用综合考虑影响建筑活动对环境总影响的其他多个指标(包括初级能耗、雨水酸化、水体富营养化、臭氧层空洞影响强度和光化学烟雾)进行评价。

3. 结果分析

3.1. 材料生产与运输阶段

建筑材料生产阶段碳排放计算表见表 1, 建筑材料运输阶段碳排放计算表见表 2。

Table 1. Carbon emission calculation table for the production stage of building materials
表 1. 建材生产阶段碳排放计算表

序号	建材种类	用量	单位	生产因子 (tCO ₂ e/单位)	碳排放量 (tCO ₂ e)
1	钢筋		t	2.340	
2	混凝土		m ³	0.295	
3	水泥砂浆	1403.13	m ³	0.730	1024.56
4	烧结页岩多孔砖砌体	1970.01	m ³	0.250	492.50
5	铝合金普通中空玻璃窗		t	0.386	
6	普通平板玻璃		t	1.130	
7	蒸压加气混凝土板	1094.54	t	0.126	137.91
8	不燃型复合膨胀聚苯乙烯保温板	15.65	t	5.020	78.58
9	非多腔塑料型材 Kf=2.7 [W/(m ² -K)]	338.14	m ²	0.254	85.89
10	6 中透光 Low-E + 12A + 6 透明	30.43	t	2.840	86.43
11	节能门 1	3620.12	m ²	0.254	919.51
12	5 + 6A + 5	1.36	t	2.840	3.87
13	细石混凝土	43.71	m ³	0.295	12.90
14	石灰砂浆	10.93	m ³	0.730	7.98
15	防水卷材	4.37	t	0.951	4.16
16	挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(带表皮外保温)	3.83	t	5.020	19.20
17	陶粒混凝土空心砌块	32.79	m ³	0.250	8.20
18	石灰水泥砂浆	23.02	3 m	0.730	16.81
19	难燃型挤塑聚苯板	0.74	t	20.887	15.47
20	SBS 改性沥青防水卷材	1.52	t	1.830	2.79
21	岩棉板(平行纤维)	0.49	t	5.020	2.45
22	合计				2919.20

Table 2. Carbon emission calculation table for the transportation stage of building materials
表 2. 建材运输阶段碳排放计算表

序号	建材种类	用量	单位	运输方式	运输因子 [tCO ₂ e/(t-km)] × 10 ⁻⁴	运输距离 /km	碳排放量 (tCO ₂ e/单位)
1	钢筋		t	货车	3.34	500	
2	混凝土		3 m	货车	3.34	40	
3	水泥砂浆	1403.13	3 m	货车	3.34	500	421.78
4	砖砌体	1970.01	3 m	货车	3.34	500	460.59
5	中空玻璃窗		t	货车	3.34	500	

续表

6	普通平板玻璃		t	货车	3.34	500	
7	蒸压加气混凝土板	1094.54	t	货车	3.34	40	14.62
8	不燃型复合膨胀聚苯乙烯保温板	15.65	t	货车	3.34	500	2.61
9	非多腔塑料型材	338.14	m ²	货车	3.34	500	10.67
10	中透光 Low-E + 12A + 6 透明	30.43	t	货车	3.34	500	5.08
11	节能门	3620.12	m ²	货车	3.34	500	114.26
12	5 + 6A + 5	1.36	t	货车	3.34	500	0.23
13	细石混凝土	43.71	3 m	货车	3.34	40	1.23
14	石灰砂浆	10.93	3 m	货车	3.34	500	2.92
15	防水卷材	4.37	t	货车	3.34	500	0.73
16	挤塑聚苯乙烯泡沫塑料	3.83	t	货车	3.34	500	0.64
17	陶粒混凝土空心砌块	32.79	3 m	货车	3.34	500	6.57
18	石灰水泥砂浆	23.02	3 m	货车	3.34	500	6.53
19	难燃型挤塑聚苯板	0.74	t	货车	3.34	500	0.12
20	SBS 改性沥青防水卷材	1.52	t	货车	3.34	500	0.25
21	岩棉板	0.49	t	货车	3.34	500	0.08
22	合计						1048.93

3.2. 建造阶段

在建造阶段碳排放估算过程中,若缺乏详细的施工阶段碳排放数据,可采用经验公式法[14]进行计算。该方法通过建立数学模型,对单位建筑面积的碳排放量进行估算,并结合建筑总面积,推算整个建造阶段的碳排放总量。根据该方法,单位面积碳排放的计算公式如下:

$$Y = X + 1.99$$

其中:

X 代表建筑的地上层数,

Y 代表单位面积的碳排放量(kgCO₂e/m²)。

通过该公式,可以有效评估不同层高建筑的建造碳排放强度,并为建筑生命周期碳排放核算提供参考数据。具体的建造阶段碳排放数据见表 3,其结果可用于进一步优化施工技术、材料选择和建筑设计,以降低建筑全过程碳排放。

Table 3. Carbon emissions during the construction phase

表 3. 建造阶段碳排放

建筑面积/m ²	地上层数	单位面积碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)	建筑碳排放量 tCO ₂ e
15782.24	16	17.99	283.92

3.3. 建筑运营阶段

在建筑运行与维护阶段，因材料老化或性能下降，需进行周期性的维修与更换，这些过程将产生额外的碳排放。为精准核算该阶段的碳排放量，可采用特定的计算方法进行量化评估。

通常情况下，建筑材料的使用年限被认为与建筑整体使用寿命相匹配。然而，若某些建筑材料的实际耐久性低于建筑寿命，则需要计算其维护和更换次数。其计算思路如下：

维护次数计算 = 建筑使用年限 ÷ 设定的材料使用年限，计算结果向上取整后减去 1。

例如，若建筑整体使用寿命为 100 年，而某种材料的使用年限设定为 60 年，则计算如下：

维护次数 = $[100/60] - 1 = 2 - 1 = 1$

即该材料在建筑生命周期内需维护 1 次。

每次维护所产生的碳排放量由材料生产与运输过程所产生的碳排放之和决定。

通过该计算方法，可合理评估建筑运行阶段由于维护和更换活动带来的碳排放影响，并为建筑全生命周期碳排放优化策略提供量化依据。具体的运行阶段碳排放数据见表 4。

Table 4. Summary of carbon emissions during building operation
表 4. 建筑运行阶段碳排放汇总表

类别	单位面积建筑年运行碳排放量 [kgCO ₂ /(m ² ·a)]		优化比例(%)	单位面积年运行碳排放降低值[kgCO ₂ /(m ² ·a)]
	设计建筑	参照建筑		
供暖	0.85	1.02	16.44	0.17
空调	0.19	0.30	36.24	0.11
照明	9.76	11.05	11.66	1.29
可再生能源	-5.92	0.00		5.92
合计	4.89	12.37	60.49	7.48

本文的碳排放强度在 2016 年执行的节能设计标准的基础上降低了 60.49%，碳排放强度降低 7.48 kgCO₂/(m²·a)。

3.4. 报废阶段

基于经验公式法，即经验公式推算出单位建筑拆除期间的碳排放，结合所拆除的建筑的总面积，最终求得拆除环节的碳排放量。拆除阶段的碳排放见表 5，具体经验公式见下式。

$Y = 0.06X + 2.01$

其中，X 表示建筑物的地上楼层数量，Y 为单位面积碳排放量，单位为 kgCO₂/m²。

Table 5. Carbon emissions during the building demolition phase
表 5. 建筑拆除阶段碳排放

建筑面积(m ²)	地上层数	单位面积碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)	拆除碳排放量 (tCO ₂)
15782.24	16	2.97	46.87

3.5. 结果汇总

建筑全生命周期碳排放汇总表见表 6，各阶段碳排放量占比如下：建材生产 35%，建材运输 13%，建造 3%，运行 48%，拆除 1%。

Table 6. Summary of carbon emissions in the whole life cycle
表 6. 全生命周期碳排放汇总表

名称	碳排放量 (tCO ₂ e/单位)	全生命周期单位面积碳排放 量(kgCO ₂ e/m ²)	全生命周期单位面积年均碳 排放量(kgCO ₂ e/m ² ·a)
建材生产	2919.20	181.29	3.63
建材运输	1048.93	65.14	1.30
建造	283.92	17.63	0.35
运行	3934.02	244.32	4.89
拆除	46.87	2.91	0.06
碳汇	-307.50	-19.10	0.38
合计	7925.45	492.20	9.84

4. 减碳路径与协同优化策略

4.1. 技术创新驱动能源结构转型

技术创新是减碳的核心动力。当下是新能源发展的潜力时期，无论是政策还是大环境，倡导用清洁能源替代传统能源，例如发展风能、太阳能、氢能等。海南通过氢燃料电池汽车的应用，展示了氢能技术在实际场景中的可行性。此外，碳捕捉与封存(CCS)技术、智能电网技术等也是重要方向。研究显示，绿色技术专利集中在东部地区，但中西部对技术需求更迫切，需通过区域协同解决技术分布失衡问题。

4.2. 产业结构优化与循环经济

高耗能行业(如钢铁、水泥、化工)需通过产业升级实现低碳化。例如，钢铁企业可采用电弧炉炼钢替代高炉炼钢，减少碳排放。循环经济模式通过资源回收再利用，可降低生产过程中的碳排放强度。海南的“充换电一张网”模式整合产业链资源，推动新能源汽车与能源系统协同发展，是产业协同的典型案

4.3. 政策引导与市场机制结合

政策工具如碳交易、绿色金融等可激励企业减排。海南通过“免申快享”补贴模式，简化新能源汽车补贴流程，有效提升政策执行效率。同时，碳市场建设可通过价格信号引导企业优化资源配置，例如欧盟碳边境调节机制(CBAM)对高碳产品征税，倒逼企业低碳转型。

5. 结论

本研究通过构建建筑全生命周期碳排放精细化核算模型，揭示了各阶段碳排特征与干预重点。实践表明，通过材料替代、可再生能源利用与智慧运维等技术协同，可实现建筑碳排放强度下降，其中拆除部分的占比最小，运行时期的占比最大，未来需进一步研究碳汇补偿机制、负碳技术集成应用等前沿方向，推动建筑领域从减排向负碳转型。

基金项目

本文系校级学生科研课题资助项目建筑全生命周期碳排放精细化核算与减碳路径研究成果，项目编号：23A155。

参考文献

- [1] 何苗. 全球气候变化与人群健康[J]. 生态经济, 2024, 40(1): 1-4.
- [2] 世界气象组织. WMO 天气、气候和水极端事件造成的死亡和经济损失图集(1970-2019) [Z]. 2021.
- [3] Shi, Q., Chen, J. and Shen, L. (2017) Driving Factors of the Changes in the Carbon Emissions in the Chinese Construction Industry. *Journal of Cleaner Production*, **166**, 615-627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.056>
- [4] Bakirtas, T. and Akpolat, A.G. (2018) The Relationship between Energy Consumption, Urbanization, and Economic Growth in New Emerging-Market Countries. *Energy*, **147**, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.011>
- [5] International Energy Agency (IEA) (2017) Power Sector CO₂ Emissions Continue to Rise. IEA.
- [6] Ma, J., Du, G., Zhang, Z., Wang, P. and Xie, B. (2017) Life Cycle Analysis of Energy Consumption and CO₂ Emissions from a Typical Large Office Building in Tianjin, China. *Building and Environment*, **117**, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.005>
- [7] Huang, Z., Zhou, H., Miao, Z., Tang, H., Lin, B. and Zhuang, W. (2024) Life-Cycle Carbon Emissions (LCCE) of Buildings: Implications, Calculations, and Reductions. *Engineering*, **35**, 115-139. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.019>
- [8] Liang, Y.M., Li, C.Q., Liu, Z.C., *et al.* (2023) Decarbonization Potentials of the Embodied Energy Use and Operational Process in Buildings: A Review from the Life-Cycle Perspective. *Heliyon*, **9**, e20190.
- [9] Cai, K., Wang, H., Wang, J., Bai, J., Zuo, J., Chan, K., *et al.* (2023) Mitigating Lifecycle GHG Emissions of Building Sector through Prefabricated Light-Steel Buildings in Comparison with Traditional Cast-in-Place Buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, **194**, Article ID: 107007. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107007>
- [10] 刘哲瑞. 典型木结构建筑全生命周期碳排放比较及降碳策略研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [11] 住房和城乡建设部. 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.
- [12] 李岳岩. 建筑全生命周期碳足迹[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [13] 生态环境部办公厅. 企业温室气体排放核算方法与项目指南发电设施[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [14] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省民用建筑碳排放计算导则: 苏建科〔2023〕153号[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023
- [15] 朱凯, 张倩倩, 武鹏飞, 等. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展[J]. 陕西林业科技, 2015(4): 34-39.