

长三角与珠三角城市群建筑隐含碳排放时空分异特征分析

孙昌辉¹, 高 文²

¹重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

²重庆科技大学管理学院, 重庆

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月29日

摘 要

在快速城镇化与“双碳”目标双重背景下, 建筑隐含碳排放已成为城市群低碳转型的重要议题。基于2003~2020年长三角和珠三角城市群建筑隐含碳排放数据, 采用全局与局部莫兰指数分析其时空格局。结果表明: 两大城市群建筑隐含碳排放总量持续上升, 呈显著“核心-外围”格局, 高排放集中于上海、苏南、杭州湾、合肥及广州、深圳、东莞, 并逐步向外围扩散。全局莫兰指数均为正且显著, 由2003年0.357波动升至2006~2007年峰值0.362, 后降至2020年0.295, 空间集中度减弱但正自相关仍存。LISA以H-H和L-L集聚为主, 2003年合计占75%, 2020年占72%; 上海、佛山持续H-H集聚, 安徽外围多为L-L集聚。研究建议推进跨城市区域协作与差异化低碳治理。

关键词

建筑隐含碳排放, 长三角, 珠三角, 空间自相关

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Building Embodied Carbon Emissions in the Yangtze River Delta and Pearl River Delta

Changhui Sun¹, Wen Gao²

¹School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²School of Management, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: September 21, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 29, 2026

文章引用: 孙昌辉, 高文. 长三角与珠三角城市群建筑隐含碳排放时空分异特征分析[J]. 地理科学研究, 2026, 15(5): 976-982. DOI: 10.12677/gser.2026.155088

Abstract

Under the dual context of rapid urbanization and the “dual carbon” goals, building embodied carbon emissions have become an important issue in the low-carbon transition of urban agglomerations. Based on building embodied carbon emission data from the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta from 2003 to 2020, this study analyzes their spatiotemporal patterns using global and local Moran's I. The results show that total building embodied carbon emissions in both urban agglomerations continued to rise, exhibiting a pronounced core-periphery pattern. High emissions were concentrated in Shanghai, southern Jiangsu, Hangzhou Bay, Hefei, Guangzhou, Shenzhen, and Dongguan, and gradually spread toward peripheral areas. Global Moran's I values were positive and significant, fluctuating upward from 0.357 in 2003 to a peak of 0.362 in 2006~2007, and then declining to 0.295 in 2020. Spatial concentration weakened, but positive spatial autocorrelation persisted. LISA results were dominated by high-high (H-H) and low-low (L-L) clusters, which together accounted for 75% in 2003 and 72% in 2020. Shanghai and Foshan consistently showed H-H clustering, while the peripheral areas of Anhui mostly showed L-L clustering. The study recommends promoting cross-city regional collaboration and differentiated low-carbon governance.

Keywords

Building Embodied Carbon Emissions, Yangtze River Delta, Pearl River Delta, Spatial Autocorrelation

Copyright © 2026 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

气候变化现象因温室气体的扩散而加剧,成为全球性的严峻环境挑战[1]。为实现经济、社会 and 环境的和谐发展,新型城镇化战略显得格外重要。中国作为世界最大的发展中国家,2020年,中国的城镇化率已达到63.9%,预计未来还将继续上升[2][3]。近年来在快速城市化进程中导致能源消耗和碳排放的急剧增加,面临着巨大的碳减排压力[4][5]。由此可见,中国亟待探索节能减排的可行途径。

建筑行业作为能源消耗和碳排放的重要领域,2022年中国建筑隐含碳排放占全国能源相关碳排放的26.6%,具有很高的减排潜力[6]。对于建筑全生命周期来讲,建筑碳排放分为运营碳和隐含碳[7]。隐含碳贯穿于建筑全生命周期的多个阶段,从原材料的开采、加工、运输、制造的“摇篮到大门”阶段产生的碳排放[8][9]。持续城镇化导致建筑和基础设施规模扩大,建筑材料需求增加,建筑领域碳排放压力不断上升,使其成为低碳转型的关键领域。与建筑运营排放相比,建筑隐含碳排放与材料生产、施工活动以及建成环境扩张更为直接相关。一旦这些排放被封存于建筑和基础设施中,就难以在短期内减排,并可能形成长期碳锁定效应。这一问题在城市群尤为突出,因为集中的建筑、基础设施和建造活动持续增加了建筑材料的需求。因此,仅关注建筑运行阶段的节能降碳,已不足以全面反映城镇化带来的碳影响。

城市群是碳排放的主要空间单元,集中了人口、经济活动和基础设施,代表着城镇化的一种高级空间形态。长三角和珠三角是中国经济最活跃、城镇化程度最高的区域之一,建筑活动密集、建筑材料需求大,建筑隐含碳排放问题尤为突出。现有研究对两大城市群的建筑隐含碳排放的总量变化、空间分布

和空间关联关注相对不足。事实上,城市群内部城市之间的基础设施建设、产业链分工和人口流动密切相关,建筑隐含碳排放可能呈现显著的空间依赖性和区域异质性。若忽视这种空间效应,就难以准确识别高排放集聚区与低排放集聚区,也不利于制定差异化的区域低碳治理策略。

从区域经济地理学看,核心城市凭借资本、人口和基础设施优势率先集聚建设活动,带动建材需求和隐含碳排放集中;随着核心城市成本上升和产业扩散,建设活动向外围转移,排放格局由集中转向扩散。据此,本文基于 2003~2020 年数据,采用全局与局部莫兰指数,分析长三角和珠三角建筑隐含碳排放的时空分异特征。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 研究区域概况

长江三角洲位于中国东部沿海,是全国最发达的地区之一,其发展受到国家碳政策的强烈影响。在本研究中,长三角样本包括上海、江苏、浙江和安徽的 27 个城市,珠三角样本包括广东省的 9 个城市,其中包括广州、深圳以及其他 7 个城市。珠三角的经济活动高度集中,这导致了高能耗和高碳排放。长三角的快速城市化使建筑活动急剧增加。长三角建筑存量的扩张,加之高能耗建筑材料的使用,可能导致建筑能耗上升。珠三角的快速经济增长和土地利用变化,大幅扩大了建设用地的供给。这种高能耗、高人口增长的轨迹,推高了区域碳强度。

2.2. 数据来源

本研究使用的建筑隐含碳排放数据来源 Liang 等人[9]发表的公开数据集,该数据集涵盖 11 种主要建筑材料,空间分辨率为 500 米。由于数据限制,最终样本包含 36 个地级市。该数据集采用自下而上的框架开发,整合了夜间灯光(NTL)数据、开放街图(OSM)数据、建筑轮廓信息、材料强度系数以及排放因子,用于估算建筑材料存量,进而将其转化为“从摇篮到工厂”阶段的隐含碳排放量。

2.3. 研究方法

本研究采用空间自相关分析方法探究两大城市群建筑隐含碳排放的时空集聚特征。空间自相关分析分为全局与局部两个层面,其中全局莫兰指数用于量化整体空间自相关程度,局部莫兰指数用于识别局部空间集聚模式。

全局莫兰指数用于量化两个城市群空间结构与隐含碳排放之间的空间自相关,其定义如下:

$$I = \frac{n}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (ECE_i - \overline{ECE})(ECE_j - \overline{ECE})}{\sum_i (ECE_i - \overline{ECE})^2} \quad (1)$$

式中, ECE 表示为建筑隐含碳排放, w_{ij} 为经济距离矩阵,全局莫兰指数的取值范围为-1 到+1,取值在 (0, 1)之间表示正空间自相关,即相似值集聚。取值在(-1, 0)之间表示负自相关——不相似值相邻。取值接近 0 则表示空间随机性。

局部莫兰指数扩展了全局莫兰指数的解释。由此出现四种局部模式: H-H (高 - 高)、L-H (低 - 高)、L-L (低 - 低)和 H-L (高 - 低)。其估计量定义如下:

$$I = \frac{n(ECE_i - \overline{ECE}) \sum_{j \neq i} w_{ij} (ECE_j - \overline{ECE})}{\sum_i (ECE_i - \overline{ECE})^2} \quad (2)$$

3. 研究结果

3.1. 空间分布特征

图 1 为 2003 年、2009 年、2015 年和 2020 年长三角与珠三角建筑隐含碳排放空间分布。2003~2020 年，两大城市群建筑隐含碳排放总量均呈持续增长态势。这说明在快速城镇化和城市群扩张背景下，建筑材料需求、施工活动和建成环境扩张共同推动了建筑隐含碳排放上升。

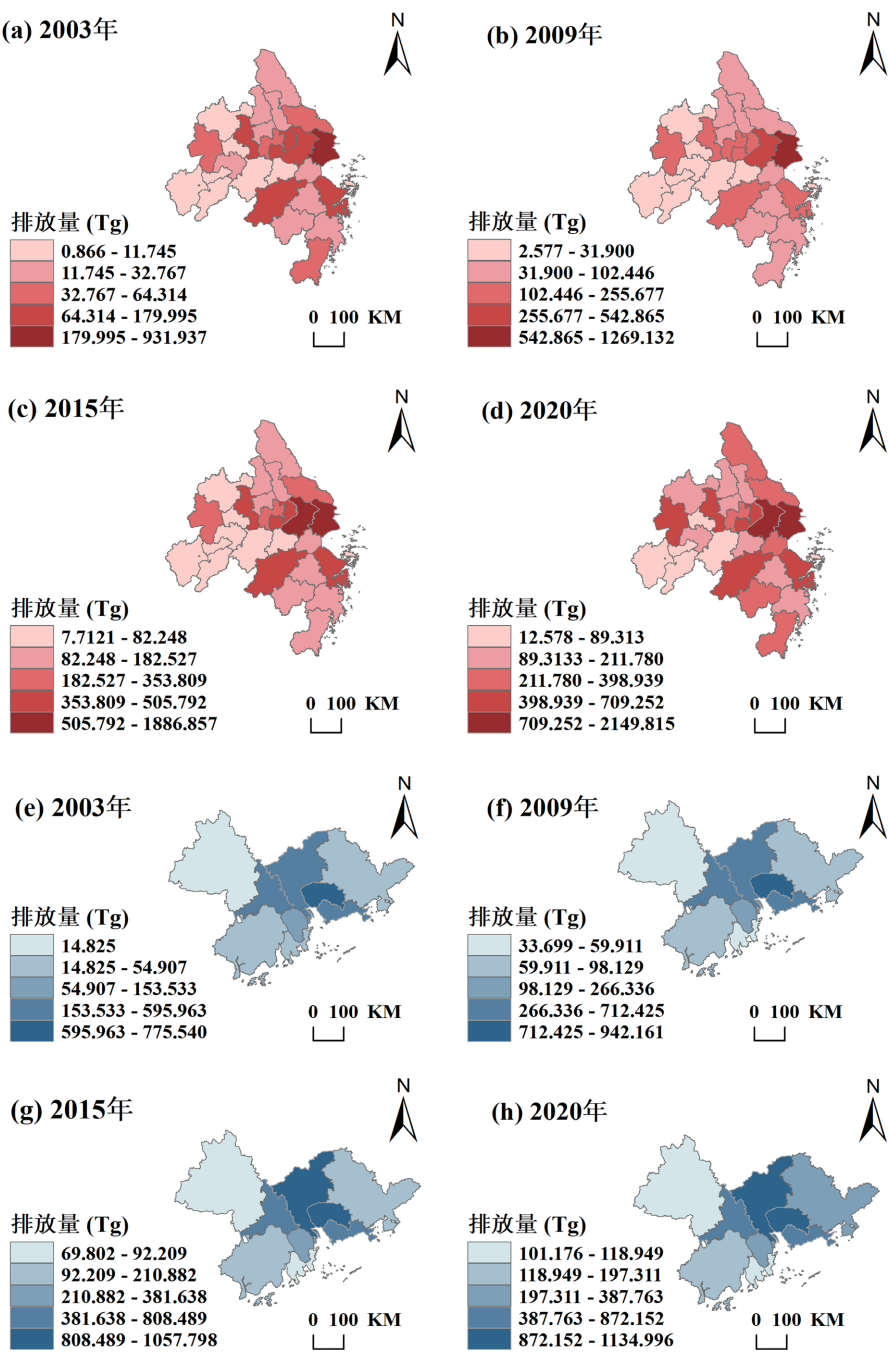


Figure 1. Spatial distribution of embedded carbon emissions in buildings across two major urban agglomerations
图 1. 两大城市群建筑隐含碳排放的空间分布

从空间角度看, 建筑业碳排放呈现显著的区域异质性及明显的聚集模式。在长三角地区, 高排放区域始终集中于上海等核心城市, 以及江苏南部(苏州、南京、南通)、杭州湾地区(杭州、宁波)和合肥, 形成了一个连片的高排放集群。随着时间推移, 这些高排放中心逐渐向周边城市外扩, 呈现出扩散趋势。在珠三角地区也观察到了类似的模式, 其中广州、深圳和东莞构成了主要的排放热点。随着城市扩张的持续, 这些核心城市的排放正日益向周边地区蔓延, 强化了核心 - 外围的空间结构。外围城市虽然排放水平较低, 但也呈现出稳步上升的趋势。这些观察到的模式表明, 建筑隐含碳排放的增长与核心城市的基础设施发展密切相关, 而排放的空间扩散可能与城市间的联系有关。

长三角高排放区域始终集中于上海等核心城市, 以及苏州、南京、南通、杭州、宁波和合肥, 形成连片高排放集群。随时间推移, 高排放中心逐渐向周边城市外扩。珠三角也呈类似模式, 广州、深圳和东莞构成主要排放热点, 并日益向周边蔓延, 强化了核心 - 外围结构。外围城市排放水平较低, 但呈稳步上升趋势。

3.2. 空间自相关分析

为探究各市建筑隐含碳排放的空间自相关性及聚类特征, 本研究采用全局空间自相关分析方法, 分析结果显示如表 1 所示, 2003~2020 年全球莫兰指数均为正值, 且 Z 得分介于 3.000~3.604 之间(均大于 1%显著性水平下的临界值 2.58), P 值均为 0.000, 显著性水平达到 0.01, 严格拒绝了“不存在空间自相关”的原假设。这表明长三角与珠三角两大城市群的建筑隐含碳排放并非随机分布, 而是存在显著的空间正自相关特征, 即相邻城市的碳排放水平具有较高的相似性。2003 年莫兰指数为 0.357, 随后几年波动上升, 于 2006 年和 2007 年达到峰值(0.362), 此时建筑隐含碳排放的空间集中度最高; 2011 年出现明显转折, 降至 0.332, 此后呈现持续下降趋势, 至 2020 年降至最低点 0.295, 同期 Z 得分也从 3.563 回落至 3.000。全局莫兰指数下降说明建筑隐含碳排放的空间集中度逐渐减弱, 排放格局由相对集中转向一定程度的扩散, 但高排放城市与低排放城市在空间上仍分别保持相近的分布状态。

Table 1. Moran's I of embedded carbon emissions in buildings across two major metropolitan areas
表 1. 两大城市群建筑隐含碳排放的莫兰指数

年份	Moran's I	Z 得分	P 值	年份	Moran's I	Z 得分	P 值
2003	0.357	3.563	0.000	2012	0.350	3.494	0.000
2004	0.358	3.569	0.000	2013	0.331	3.316	0.000
2005	0.357	3.560	0.000	2014	0.333	3.329	0.000
2006	0.362	3.604	0.000	2015	0.318	3.202	0.000
2007	0.362	3.598	0.000	2016	0.319	3.217	0.000
2008	0.356	3.543	0.000	2017	0.314	3.175	0.000
2009	0.356	3.538	0.000	2018	0.310	3.138	0.000
2010	0.362	3.595	0.000	2019	0.298	3.031	0.000
2011	0.332	3.336	0.000	2020	0.295	3.000	0.000

为解决全局莫兰指数在捕捉城市层面集聚方面的局限, 本研究采用局部空间关联指标(LISA)。图 2 展示了 2003 年、2009 年、2015 年和 2020 年两大城市群 LISA 聚类结果的时空演变。整体来看, 空间集聚呈现以高 - 高(H-H)和低 - 低(L-L)为主导的格局, 高 - 低(H-L)和低 - 高(L-H)类型呈零星分布, 说明两大城市群内部的碳排放具有显著的空间正相关性, 两大城市群内部以相似排放水平的空间集聚为主。

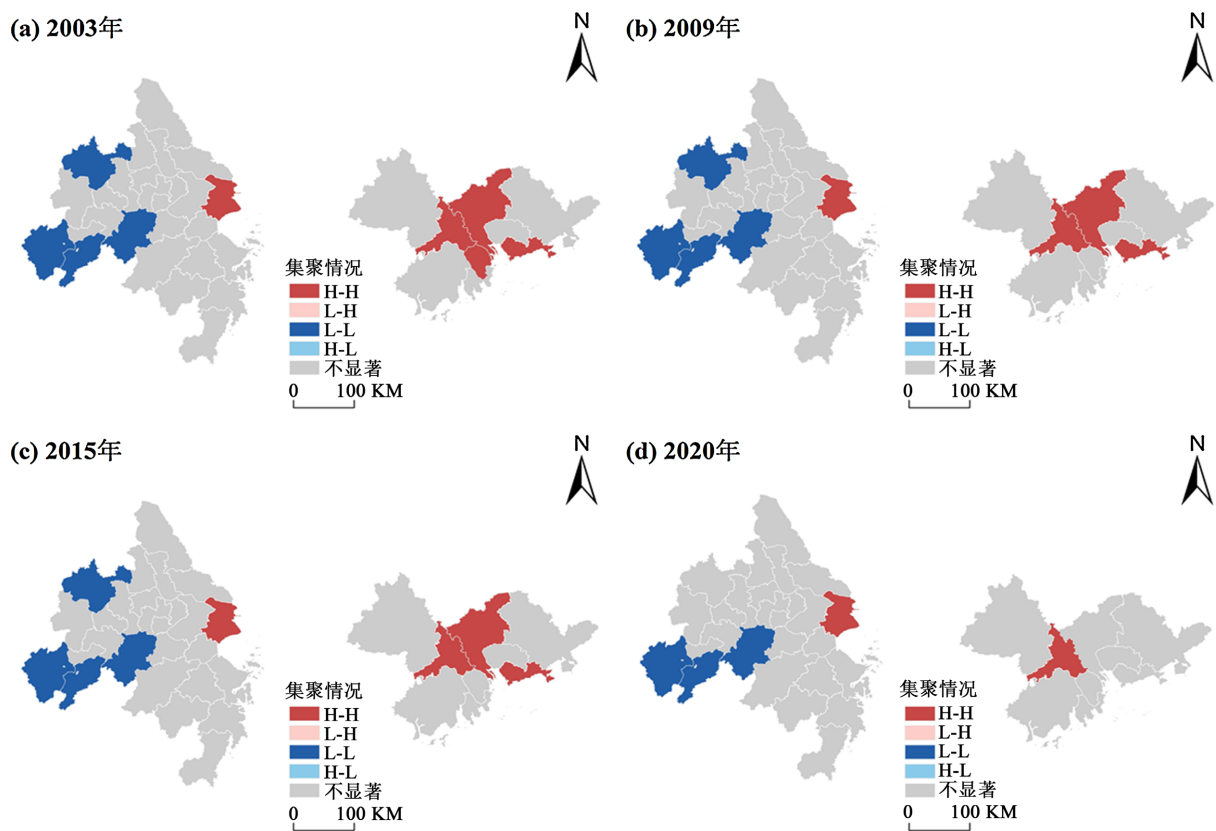


Figure 2. Spatial aggregation characteristics of two major urban agglomerations
图 2. 两大城市群的空间集聚特征

2003 年有 15 个城市呈现 H-H 集聚, 12 个城市呈现 L-L 集聚, 合计占样本总数的 75%; 到 2020 年, H-H 集聚降至 10 个, L-L 集聚增至 16 个, 两者合计占 72%, 整体集聚比例保持相对稳定, 但局部发生了明显的类型转移。空间分布上, 高排放集聚区主要集中在上海、广州和南京等发达枢纽, 低排放集聚区主要位于外围和较小城市。长三角仅有上海呈现此类集聚, 同时安徽省若干城市识别出 L-L 集聚; 到 2020 年, H-H 集聚在上海和佛山持续存在, 且长三角核心区的 H-H 范围有连片扩大的趋势, 多数此前为 L-L 的城市保持该状态, 滁州除外。在珠江三角洲, 基础设施发展与产业扩张的协同效应往往可能使与建设相关的经济活动集中。相反, 长江三角洲较高的密度加剧了城市间的竞争。上海虽保持了 H-H 集聚模式, 但其周边城市并未表现出相同的模式。安徽省在长江三角洲上游地区经济发展相对滞后、建设规模较小且城市化进程较慢, 形成了 L-L 集聚模式。综合 Moran 指数和 LISA 的结果展现出建筑隐含碳排放存在显著的空间集聚。

4. 讨论

本研究采用全局与局部莫兰指数探究 2003~2020 年期间长三角与珠三角的建筑隐含碳排放的空间自相关性及其聚类特征。

分析结果显示, 高排放中心逐渐向周边城市外扩, 外围城市排放水平较低, 但呈稳步上升趋势。空间自相关分析表明长三角与珠三角两大城市群的建筑隐含碳排放并非随机分布, 而是存在显著的空间正自相关特征, 但呈下降趋势, 高排放城市与低排放城市在空间上仍分别保持相对邻近的分布状态, 两大城市群内部以相似排放水平的空间集聚为主。这可能的原因是经济发达的核心城市在推进新型城镇化过

程中公共服务设施的扩张以及跨城市间建筑材料的使用相关的碳锁定效应, 部分产业和建设活动向外围转移。

与现有研究相比, Hu [8]等发现住宅建筑隐含碳排放存在显著区域差异。本文进一步从城市群识别空间格局及集聚特征。但文本也有一定的局限性, 由于数据可得性的限制, 本研究仅涵盖截至 2020 年, 纳入更近期的数据并探索其他因素, 可能提供更深入的见解并进一步改进分析。

5. 结论

(1) 在上三角与珠三角两大城市群, 建筑隐含碳排放均呈现持续上升趋势。空间自相关分析结果显示, 建筑隐含碳排放呈现出显著的“核心-外围”集聚格局, 高排放区域主要集中于经济发达的核心城市, 并逐渐向周边地区扩展。

(2) 在实践中, 城市群内的地方政府应在低碳新型城镇化中优先推进区域协作。建筑隐含碳治理不应仅依赖单个城市的行动, 而应通过跨城市合作来推进, 尤其是在区域规划、基础设施布局和低碳建筑标准等方面。

(3) 对于 H-H 集聚政府应提高低碳建材使用比例, 探索碳普惠机制。对于 L-L 集聚区, 应避免高碳建材产能转入, 执行绿色建筑标准。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目: YKJCX2520710; 重庆市研究生科研创新项目: CYS260938。

参考文献

- [1] IPCC (2023) The Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [2] Xiao, Y., Huang, H., Qian, X., Zhang, L. and An, B. (2023) Can New-Type Urbanization Reduce Urban Building Carbon Emissions? New Evidence from China. *Sustainable Cities and Society*, **90**, Article ID: 104410. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104410>
- [3] Chen, H. and Lu, C. (2023) Research on the Spatial Effect and Threshold Characteristics of New-Type Urbanization on Carbon Emissions in China's Construction Industry. *Sustainability*, **15**, Article 15825. <https://doi.org/10.3390/su152215825>
- [4] Fan, J., Wang, J., Qiu, J. and Li, N. (2023) Stage Effects of Energy Consumption and Carbon Emissions in the Process of Urbanization: Evidence from 30 Provinces in China. *Energy*, **276**, Article ID: 127655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127655>
- [5] Huo, T., Tang, M., Cai, W., Ren, H., Liu, B. and Hu, X. (2020) Provincial Total-Factor Energy Efficiency Considering Floor Space under Construction: An Empirical Analysis of China's Construction Industry. *Journal of Cleaner Production*, **244**, Article ID: 118749. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118749>
- [6] Huo, T., Ren, H., Zhang, X., Cai, W., Feng, W., Zhou, N., et al. (2018) China's Energy Consumption in the Building Sector: A Statistical Yearbook-Energy Balance Sheet Based Splitting Method. *Journal of Cleaner Production*, **185**, 665-679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.283>
- [7] Zhu, C., Li, X., Zhu, W. and Gong, W. (2022) Embodied Carbon Emissions and Mitigation Potential in China's Building Sector: An Outlook to 2060. *Energy Policy*, **170**, Article ID: 113222. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113222>
- [8] Hu, M. (2023) A Look at Residential Building Stock in the United States—Mapping Life Cycle Embodied Carbon Emissions and Other Environmental Impact. *Sustainable Cities and Society*, **89**, Article ID: 104333. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104333>
- [9] Liang, H., Zhang, B., Qian, X., Chen, Y., Luo, Y., Huang, Y., et al. (2025) Building Material Stocks and Embodied Carbon Dataset for Two Urban Agglomerations in China from 2000 to 2020. *Scientific Data*, **12**, Article No. 930. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05258-4>