

建筑全生命周期碳效应空间显式模型的构建及应用 ——以宁波市为例

刘盈紫薇^{1,2,3,4,5}, 刘宇鹏^{1,2,3,6*}, 毛婷^{1,2,3,4}, 聂宇^{1,2,3,4}, 陈伟强^{1,2,3,4}

(1. 区域与城市生态安全全国重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 厦门市城市代谢重点实验室, 福建 厦门 361021; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 生态系统大数据与模拟中心, 北京 100101; 6. 厦门市城市环境智慧管理重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: [目的] 建筑全生命周期具有能耗高、排放量大等特点, 因此深入理解建筑全生命周期碳排放的时空特征以有效实现节能减排对我国实现“碳达峰、碳中和”具有重要意义。[方法] 本研究构建了一个兼具时间动态和空间显式特征的建筑碳效应综合评估模型来进行隐含碳和运行碳的排放核算, 并以宁波市为例开展了模型应用与验证。[结果] 宁波市建筑碳排放总量呈现倒 U 型趋势, 在 2002 年达到峰值 45.23 Mt。其中隐含碳排放占据主导地位, 且建材生产与运输阶段是隐含碳排放的主要来源。从空间格局上看, 中心区的碳排放逐步由建材流入的隐含碳为主转变为建筑运行碳为主, 而周边区域则由于快速建设形成了新的隐含碳排放“热点”并逐步向四周“扩散”。[结论] 本研究构建的建筑全生命周期碳效应空间显式模型能够精准刻画建筑碳排放的时空格局与构成特征, 为城市相关管理部门对建筑碳排放的“感-传-知-控”提供了详实的数据基础与可靠的分析能力, 可为因地制宜、分类施策并逐步持续推进建筑部门的低碳转型提供有力支撑。

关键词: 生命周期评价; 物质流分析; 建筑全生命周期碳排放; 隐含碳排放; 运行碳排放

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0546-09

Developing and applying a spatially-explicit model for quantifying building's carbon effect under its whole life cycle: a case study in Ningbo City

LIU Yingziwei^{1,2,3,4,5}, LIU Yupeng^{1,2,3,6*}, MAO Ting^{1,2,3,4}, NIE Yu^{1,2,3,4}, CHEN Weiqiang^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory for Ecological Security of Regions and Cities, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Xiamen Key Laboratory of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China; 5. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, National Ecosystem Science Data Center, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 6. Xiamen Key Laboratory of Smart Management of Urban Environment, Xiamen 361021, China)

Abstract: [Objective] Carbon emissions throughout the whole life cycle of buildings mainly arise from the production of building materials, energy use during operation, and waste disposal during demolition. Since the whole life cycle of buildings is characterized by

收稿日期: 2024-10-16 录用日期: 2025-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(42271298); 中国科学院城市环境研究所“揭榜挂帅”项目(IUE-JBGS-202201); 中国科学院青年创新促进会基金(2022307)

*通信作者: ypliu@iue.ac.cn

引文格式: 刘盈紫薇, 刘宇鹏, 毛婷, 等. 建筑全生命周期碳效应空间显式模型的构建及应用——以宁波市为例[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 546-554.

Citation: LIU Y Z W, LIU Y P, MAO T, et al. Developing and applying a spatially-explicit model for quantifying building's carbon effect under its whole life cycle: a case study in Ningbo City[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 546-554. (in Chinese)



high energy consumption and emissions, a deep understanding of the temporal and spatial characteristics of carbon emissions in the building sector is crucial for effectively achieving energy conservation and emission reduction in China, which is essential for achieving "carbon peaking and carbon neutrality". [Methods] This study developed a dynamic and spatially-explicit model to quantify both embodied and operational carbon emissions of buildings. The model was applied and verified in Ningbo City. [Results] The findings revealed that carbon emissions of buildings in Ningbo City followed a pattern resembling an inverted U-shape, peaking at 45.23 Mt in 2002. After 2002, emissions declined, then began rising gradually in 2013, reaching a peak of 20.86 Mt in 2018. In terms of the distribution of carbon emissions across each stage of a building's whole life cycle, embodied carbon emissions were predominant. From 1990 to 2018, the total amount of embodied carbon emissions in buildings was 369.56 Mt, while the amount of carbon emissions that were produced by building operations was 258.58 Mt. The primary sources of embodied carbon emissions associated with buildings were the production and transportation of building materials (269.05 Mt), followed by the phase of building repair (89.68 Mt) and finally the transportation and disposal of building waste (10.83 Mt). In terms of spatial patterns, the rate of expansion of carbon emissions varied by district in both extent and density. During the period of rapid urbanization, the emission hotspots were primarily situated in the central areas, such as the Sanjiangkou area (which coincided with the intersection of Jiangbei District, Haishu District, and Yinzhou District), Zhenhai District, and Beilun District. As a result, emissions in the central areas gradually shifted from being dominated by embodied carbon from building materials to being dominated by the carbon from building operations. Meanwhile, the areas surrounding the central areas formed new "hotspots" of embodied carbon emissions due to rapid construction, which have been progressively "spreading" outwards. [Conclusion] These results demonstrate that the spatially explicit model of the carbon effect of the whole life cycle of buildings constructed in the study can accurately characterize the spatial and temporal distribution patterns and composition characteristics of building carbon emissions. This provides relevant urban management departments with a detailed database and reliable analysis capabilities for the "perception-transmission-cognition-control" of building carbon emissions. It also provides strong support for promoting low-carbon transformation in the building sector by adapting measures to local conditions and implementing policies according to different categories. This work reveals that carbon emission reduction from buildings should consider the entire life cycle and is closely related to the development and spatial layout of cities. A systematic and comprehensive emission reduction plan needs to be formulated to improve overall outcomes and help cities achieve the goal of "carbon peaking and carbon neutrality" and sustainable development. For example, embodied carbon emissions of buildings can be effectively reduced by choosing bio-based building materials (such as wood) and strengthening the recycling of building materials such as steel, sand, and gravel. Operational carbon emissions can be significantly reduced by reasonably constructing and using renewable energy sources such as photovoltaics, wind power, and geothermal energy.

Keywords: life cycle assessment; material flow analysis; building whole-life-cycle carbon emission; embodied carbon emission; operational carbon emission

城市化促进了社会经济飞速发展,但也给城市及其周边区域带来了巨大的生态环境影响^[1].特别是城市中建筑的修建与持续使用产生了大量直接或间接的温室气体排放,导致建筑部门“碳贡献”持续高企^[2-5].因此,如何在建筑领域实现碳减排对我国实现“碳达峰、碳中和”具有重要意义.

国内外研究者对建筑碳排放从单体建筑至宏观区域开展了系统性研究^[6].单体建筑碳排放主要针对单一建筑或一类建筑物的碳排放及其影响因素开展分析.例如:Atmaca等^[7]基于生命周期分析法(life cycle assessment, LCA)对土耳其两栋住宅建筑全生命周期的碳排放进行测算,结果显示建筑运行阶段能耗和碳排放占比最大;Ramesh等^[8]统计分析来自13个国家的73栋建筑全生命周期的能耗情况,认为建材生产的隐含碳排放同样具有重大贡献,此外办公建筑的能耗往往高于住宅建筑的能耗.宏观区域碳排

放则是在全球、国家、城市、区域等较广范围内测算相关建筑产生的碳排放并分析其影响因素.例如:Göswein等^[9]采用“自上而下”的方法预测了不同情景下建筑材料的需求,并将建筑材料存量与各自对应的碳排放因子相结合,量化未来城市建成环境中可能产生的隐含碳排放量;Ye等^[10]基于能源消耗数据细分每种燃料的类型和行业特定的排放因子,计算了中国各省CO₂的排放量,并针对碳减排提出了相应的政策建议;曲建升等^[11]基于1982—2011年的统计数据对中国居民住房建筑在建材生产阶段的固定碳排放进行了区域分析,并计算了不同类型房屋建筑的碳排放因子,发现中国居民建筑固定碳排放区域特征与经济发展水平密切相关;杨佳^[12]收集整理了中国28个省市2000—2014年各种建筑的能耗数据,并分别建立了定性和定量评价指标来描述、分析及测算省域间碳排放的差异性.

综上所述,建筑全生命周期内碳排放主要来自建筑材料生产、运行期间的能源使用以及拆除过程中的废物处理.为了进一步深入理解建筑全生命周期碳排放的时空特征以有效实现节能减排,本研究首先融合光学遥感影像、土地利用数据、POI(point of interest)、AOI(area of interest)等新兴数据源解决建筑空间属性数据不全问题,进而构建了一个兼具时间动态和空间显式特征的建筑碳效应综合评估模型,将“存量驱动”+“自下而上”的物质流分析(material flow analysis, MFA)模型与地理信息系统(Geographic Information System, GIS)相结合,揭示了建筑材料代谢的时空格局与过程,同时融合 LCA 为建筑全生命周期碳排放核算提供了方法,并以宁波市为例开展了模型应用与验证.

1 研究方法

1.1 模型框架

本研究以核算建筑全生命周期碳排放为目标,针对建筑建造、维修、运行、报废 4 个阶段开展隐含碳和运行碳排放核算(图 1).首先,研究融合了遥感影像、土地利用数据、POI 和 AOI 等地理空间数据构建高分辨率城市建筑空间属性信息数据库;接着,采用 LCA 与存量驱动流量的“自下而上”MFA 相结合的模型核算建筑的隐含碳排放;最后,基于电力当量法将各类能源均折算为电力,核算建筑运行阶段的碳排放.

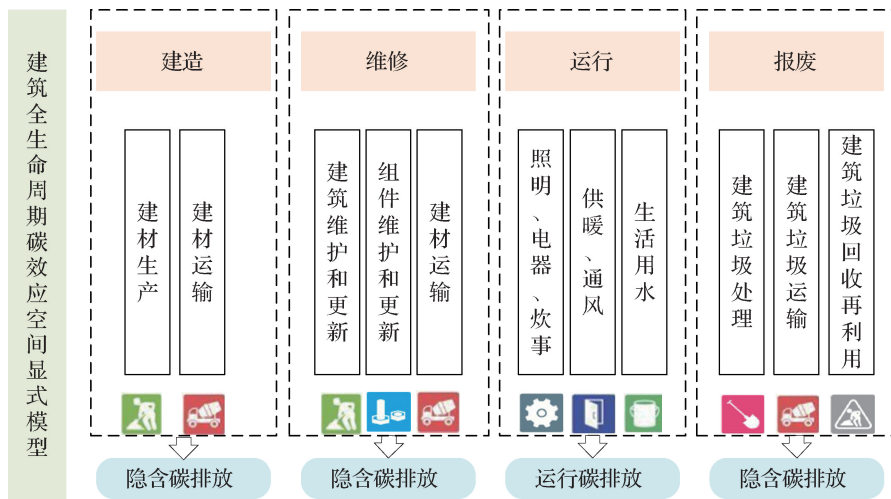


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

1.2 建筑地理空间数据库的构建

本研究使用的空间数据主要包括遥感影像数据、土地利用数据、POI 和 AOI.遥感影像来自北京数城未来科技有限公司和中国科学院资源环境科学与数据中心,包含宁波市海曙区、江北区、镇海区、北仑区和鄞州区 5 个区所属建筑的地理位置、底面轮廓和高度信息.建筑用途信息如住宅建筑(住宅区和村庄)、公共建筑(办公建筑、学校、医院、商场店铺、旅馆和仓库)和工业建筑等主要来自高德软件有限公司提供的 POI.此外,还使用 OpenStreetMap 的 AOI 数据作为各年份 POI 数据的补充.在 ArcGIS 10.8 软件中整合收集到的空间数据属性信息,并构建 1990—2018 年宁波市建筑空间属性信息数据库,数据的空间分辨率达到 200 m×200 m.

1.3 建筑全生命周期碳效应空间显式模型的构建

在建筑全生命周期碳排放核算方面,国内外有许多研究者根据碳排放系数法构建了自己的核算模型,但由于研究边界和阶段划分不同,各模型间存在差异^[13-15].本研究是宏观层面的建筑碳排放核算,基于先前构建的建筑空间属性信息数据库可以将建筑全生命周期碳排放进一步分为建筑隐含碳排放和建筑运行碳排放.具体计算公式如下:

$$C_{\text{emission}} = C_{\text{embodied}} + C_{\text{operation}}, \tag{1}$$

其中, C_{emission} 是建筑全生命周期碳排放, C_{embodied} 是建筑隐含碳排放, $C_{\text{operation}}$ 是建筑运行碳排放.

1.3.1 建筑隐含碳排放

建筑隐含碳排放包含建材生产与运输阶段、建筑

维修阶段和建筑垃圾运输与处理阶段的碳排放. 计算公式如下:

$$C_{\text{embodied}} = C_{\text{construct}} + C_{\text{repair}} + C_{\text{demolish}}, \quad (2)$$

其中, $C_{\text{construct}}$ 是建材生产与运输阶段的碳排放, C_{repair} 是建筑维修阶段的碳排放, C_{demolish} 是建筑垃圾运输与处理阶段的碳排放.

1) 建材生产与运输阶段的碳排放

该阶段的碳排放包含建材生产和建材运输两部分. 由于无法获取具体施工机械设备的能源消耗, 所以不考虑建筑施工阶段的碳排放. 计算公式如下:

$$C_{\text{construct}} = C_{\text{produce}} + C_{\text{p, transport}}, \quad (3)$$

其中, C_{produce} 是建材生产阶段的碳排放, $C_{\text{p, transport}}$ 是建材从建材厂运输到施工现场阶段的碳排放.

建材生产阶段的碳排放首先需要核算建筑材料的流入量. 本研究使用存量驱动流量的“自下而上”MFA 法来核算宁波市建筑材料的流入量, 各材料的强度系数如支撑材料 (<https://jxmu.xmu.edu.cn/Upolad/html/20250318.html>) 表 S1 所示. 不同类型材料的碳排放因子可以从文献[16]或《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)[17] 中获得. 计算公式如下:

$$C_{\text{produce}} = \sum_m (M_{\text{IF},m,t} \times F_{\text{produce},m}), \quad (4)$$

其中, $M_{\text{IF},m,t}$ 是材料 m 第 t 年的流入量, $F_{\text{produce},m}$ 是材料 m 在建材生产阶段的碳排放因子.

材料存量是将建筑的总面积与各材料的强度系数[18]相乘, 即可得出建筑的总材料存量. 计算公式如下:

$$M_{\text{S},m,t} = \sum_i (Q_{i,s,j,n,t} \times I_{m,s,j,n,t}). \quad (5)$$

其中: $M_{\text{S},m,t}$ 是材料 m 第 t 年的总存量, $Q_{i,s,j,n,t}$ 是第 i 座建筑第 t 年的总建筑面积 (占地面积 × 楼层), 其结构为 s , 类型为 j , 建造年份为 n ; $I_{m,s,j,n,t}$ 是材料 m 第 t 年的强度系数, 其结构为 s , 类型为 j , 建造年份为 n .

材料流量是指两个时间段之间的材料存量差额, 即流入量与流出量之间的差额. 计算公式如下:

$$M_{\text{NF},m,t+1} = M_{\text{S},m,t+1} - M_{\text{S},m,t} = M_{\text{IF},m,t+1} - M_{\text{OF},m,t+1}, \quad (6)$$

其中, $M_{\text{NF},m,t+1}$ 是材料 m 第 $t+1$ 年的净流量, $M_{\text{IF},m,t+1}$ 是材料 m 第 $t+1$ 年的流入量, $M_{\text{OF},m,t+1}$ 是材料 m 第 $t+1$ 年的流出量. 建筑活动的各阶段是相辅相成的, 均会产生材料的流入与流出, 包括新建、拆除、更新和维修. 因此, 材料总流入量 (或总流出量) 等于这些分流入量 (或分流流出量) 之和:

$$M_{\text{IF},m,t+1} = M_{\text{IF},m,t+1,s1} + M_{\text{IF},m,t+1,s2}, \quad (7)$$

$$M_{\text{OF},m,t+1} = M_{\text{OF},m,t+1,s1} + M_{\text{OF},m,t+1,s2}, \quad (8)$$

其中, 下标 $s1$ 代表建筑的新建与拆除阶段, $s2$ 代表建筑的更新与维修阶段.

建筑新建是指在没有建筑物的地面上进行的新建活动, 其材料净流量等于建造新建筑物的总材料流入量减去该过程中产生的建筑垃圾 (即流出量); 拆除过程代表拆除使用中的建筑物, 因此只产生流出量. 计算公式如下:

$$M_{\text{NF},m,t+1,s1} = \sum_i M_{\text{IF},i,m,t+1,s1} - \sum_i M_{\text{OF},i,m,t+1,s1}, \quad (9)$$

其中, $M_{\text{IF},i,m,t+1,s1}$ 是新建建筑 i 使用建筑材料 m 的流入量, 这些流入量在接下来的 $t+1$ 年转换为材料存量. 同时, 新建建筑也会产生建筑垃圾, 从而产生流出量 ($M_{\text{OF},s1}$), 例如在中国为 50 kg/m^2 [19].

建筑更新与维修阶段既会产生材料流入量又会产生材料流出量. 本研究使用拆除率来估算材料流出量[20-21]. 假定建筑物将使用新型组件代替破损组件, 从而以新组件取代报废材料. 计算公式如下:

$$M_{\text{OF},m,t+1,s2} = \sum_i [Q_{i,m} \times (D_{i,t+1} - D_{i,t}) \times I_{i,m,n}], \quad (10)$$

$$M_{\text{IF},m,t+1,s2} = \sum_i [Q_{i,m} \times (D_{i,t+1} - D_{i,t}) \times I_{i,m,t+1}], \quad (11)$$

$$D_{i,t} = \frac{1}{(t-n)\sigma_i \sqrt{2\pi}} \times \exp\left\{-\frac{[\ln(t-n) - \bar{n}_i]^2}{2\sigma_i^2}\right\}. \quad (12)$$

其中: $I_{i,m,n}$ 是第 i 座建筑的强度系数, 其材料为 m , 建造年份为 n ; $I_{i,m,t+1}$ 是第 i 座建筑第 $t+1$ 年的强度系数, 其材料为 m ; $D_{i,t}$ 是第 i 座建筑在第 t 年的拆除率, 其值与第 i 座建筑的平均寿命 (\bar{n}_i) 及其标准偏差 (σ_i) 有关. 建筑 i 的平均寿命由调查得出, 例如, 砖混结构为 30 年, 钢筋混凝土结构为 50 年[22-25].

建筑材料的运输是指建筑材料从建材厂装车完毕到将建筑材料运输至建造现场的过程. 建材运输碳排放取决于运输距离、能耗类型以及车辆单位距离的能源消耗量. 计算公式如下:

$$C_{\text{p, transport}} = \sum_m (M_{\text{IF},m,t} \times x_m \times F_{\text{transport},m}), \quad (13)$$

其中, x_m 和 $F_{\text{transport},m}$ 分别是材料 m 从建材厂到施工现场的运输距离及这一运输阶段的碳排放因子.

在实际项目中, 公路货运车辆使用的燃料 97.5% 以上皆为柴油[26], 故假设运输工具为柴油卡车. 由于轻型卡车主要负责小规模的建筑活动, 对于面向城市规模

的建筑活动参考已有研究^[16,26],将运输车辆定义为中型和重型柴油卡车.对于建筑材料的平均运输距离,本研究参考《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)中的规定^[17];当建筑材料运输距离不确定时,混凝土的运输距离可以取值为 40 km,其他建筑材料可以取值为 500 km.因此对水泥、砂和砾石的运输距离取值为 40 km,其他建材取值为 500 km.表 1 总结了建筑材料生产和运输碳排放因子,以及从建材厂到施工现场的平均距离.

表 1 宁波市建材生产与运输阶段的计算参数

Tab. 1 Calculation parameters for the production and transportation stages of building materials in Ningbo City

材料类型	$F_{produce}/$ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	$F_{transport}/$ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	$x/$ km
钢	2 380.00	0.057	500
木	200.00	0.057	500
水泥	735.00	0.057	40
砂	2.51	0.057	40
砾石	2.18	0.057	40
石灰	1 190.00	0.129	500
玻璃	1 130.00	0.129	500
油毡	7 300.00	0.179	500
沥青	162.00	0.179	500
砖和瓷砖	292.00	0.179	500

2) 建筑维修阶段的碳排放

建筑维修阶段的碳排放是指建筑在运行阶段的维护、翻新、更换等过程产生的碳排放.除主体结构外,建筑还包含一些组件,如瓷砖、门窗、装潢等.它们的使用寿命往往比建筑本身更短,因此在建筑的运行阶段,这些组件需要更换和翻新.在已有研究中,建筑每年因组件更换和翻新造成的碳排放被确定为建筑初始碳排放(即建材生产与运输阶段碳排放)的 0.3%~2.8%^[26-27].考虑到中国建筑的平均寿命为 30~50 年,随着建筑使用年限的增加,组件更换的频率也会增加.本研究参考 Wang 等的研究^[28],假设建筑维修阶段产生的碳排放(C_{repair})占建筑初始碳排放的 1/3.计算公式如下:

$$C_{repair} = (C_{produce} + C_{p,transport})/3. \quad (14)$$

3) 建筑垃圾运输与处理阶段的碳排放

该阶段的碳排放包含建筑垃圾运输与垃圾处理两部分.由于无法获取拆除阶段具体施工机械设备的

能源消耗,所以不考虑建筑拆除时机械设备运行产生的碳排放.计算公式如下:

$$C_{demolish} = C_{d,transport} + C_{disposal}, \quad (15)$$

其中, $C_{d,transport}$ 是建筑垃圾运输阶段的碳排放, $C_{disposal}$ 是建筑垃圾处理阶段的碳排放.

建筑垃圾运输阶段的碳排放首先需要核算建筑材料的流出量,具体核算方法已在前文给出.建筑垃圾中的钢、砂和砾石属于可回收材料,被运往回收站进行再处理,其平均距离为 50 km^[26];其他材料属于不可回收的建筑垃圾,被送往垃圾填埋场进行处理,其平均距离为 30 km^[26,29].计算公式如下:

$$C_{d,transport} = \sum_k (M_{OF,k,t} \times x_k \times F_{demolish,k}) + \sum_l (M_{OF,l,t} \times x_l \times F_{demolish,l}), \quad (16)$$

其中, $M_{OF,k,t}$ 是不可回收材料 k 第 t 年的流出量, x_k 和 $F_{demolish,k}$ 分别是不可回收材料 k 运输到填埋场的平均距离及这一运输阶段的碳排放因子, $M_{OF,l,t}$ 是可回收材料 l 第 t 年的流出量, x_l 和 $F_{demolish,l}$ 分别是可回收材料 l 运输到回收站的平均距离及这一运输阶段的碳排放因子. $F_{demolish}$ 数值等同于 $F_{transport}$.

建筑垃圾处理阶段的碳排放主要考虑不可回收材料的处理及可回收材料的回收再利用.垃圾处理碳排放因子可从文献^[16]和《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[17]中获得(表 2).Chen 等^[16]的研究表明,钢、砂和砾石在最终处置中的回收率分别为 50%,30%和 30%.其他建筑材料也有一定的回收价值,但回收后不作为建筑的主要材料,如废弃的砖、水泥等会被压碎作为路基以及一些基础设施地基的

表 2 宁波建筑垃圾运输与处理阶段的计算参数

Tab. 2 Calculation parameters for the transport and disposal stages of building waste in Ningbo City

材料类型	$F_{demolish}/$ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	x/km	$F_{disposal}/$ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	$F_{recycle}/$ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
钢	0.057	50		1 990.00
木	0.057	30	424.49	
水泥	0.057	30	43.99	
砂	0.057	50		2.59
砾石	0.057	50		2.29
石灰	0.129	30	43.99	
玻璃	0.129	30		
油毡	0.179	30		
沥青	0.179	30		
砖和瓷砖	0.179	30	4.20	

材料^[30],故本研究不考虑这些材料回收过程中的碳排放.计算公式如下:

$$C_{\text{disposal}} = \sum_k (M_{\text{OF},k,t} \times F_{\text{disposal},k}) + \sum_l (M_{\text{OF},l,t} \times F_{\text{recycle},l}), \quad (17)$$

其中, $F_{\text{disposal},k}$ 是不可回收材料 k 在垃圾处理阶段的碳排放因子, $F_{\text{recycle},l}$ 是可回收材料 l 在回收再利用阶段的碳排放因子.

1.3.2 建筑运行碳排放

建筑运行碳排放主要包括直接碳排放、电力间接碳排放和热力间接碳排放.直接碳排放是指在建筑中直接燃烧煤炭、石油和天然气等化石能源排放的 CO_2 . 电力间接碳排放是指从外界输入到建筑内的电力在其生产过程中产生的碳排放.热力间接碳排放是指从外界输入到建筑内的热力,主要为集中采暖系统采用热电联产或集中燃煤燃气锅炉所提供的热量,在其生产过程中产生的碳排放.

由于建筑运行中涉及电、热、煤、天然气等多种能源形式,需要将建筑使用的各类能源进行加和得到总建筑能耗,目前可用终端能耗法、一次能耗法和电力当量法核算建筑总能耗.由于电力在能源结构中的占

比逐步增大,所以本研究使用基于能源转换系数基准值的电力当量法折算建筑运行总能耗^[31].宁波市单位面积建筑的能耗强度为 54 kWh/m^2 .

目前,中国还没有统一的电力 CO_2 排放系数标准,需要通过区域电网基准线和区域电网平均碳排放系数这两个参数才可以计算得到电力碳排放因子.本研究的电力碳排放因子采用生态环境部应对气候变化司发布的《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》中的数据^[32],宁波市电力碳排放因子为 0.5896 kg/kWh .

建筑运行阶段碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{operation}} = \sum_i (Q_{i,n,t} \times E_1 \times F_{\text{electric}}), \quad (18)$$

其中, $Q_{i,n,t}$ 是第 i 座建筑在 t 年的总建筑面积,其建造年份为 n ; E_1 是宁波市单位面积建筑的能耗强度; F_{electric} 是宁波市的电力碳排放因子.

1.4 案例研究区

宁波市位于浙江省东北部、长江三角洲南翼,是中国东南沿海重要的港口城市.本研究选取宁波市的海曙区、江北区、镇海区、北仑区、鄞州区这 5 个区来分析 1990—2018 年建筑全生命周期的碳排放(图 2).

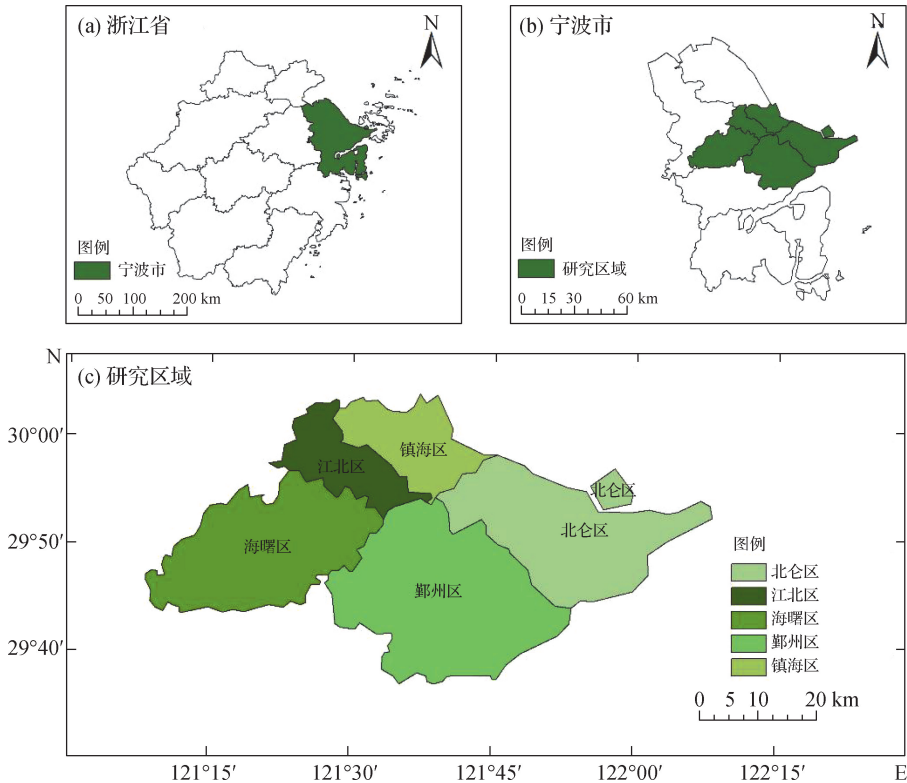


图 2 宁波市研究区域

Fig. 2 Research area of Ningbo City

2 结果与分析

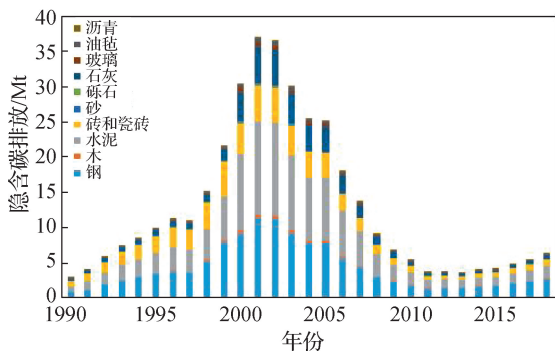
2.1 建筑隐含碳排放

宁波市建筑隐含碳排放呈现倒 U 型趋势[图 3(a)]. 总体上该时期的隐含碳排在 2001 年达到峰值 36.93 Mt, 随后进入减速期, 2013 年隐含碳排放仅为 3.54 Mt. 从 2014 年开始, 隐含碳排放缓慢增加, 2018 年达到 6.26 Mt, 年均增长率约为 12.07%.

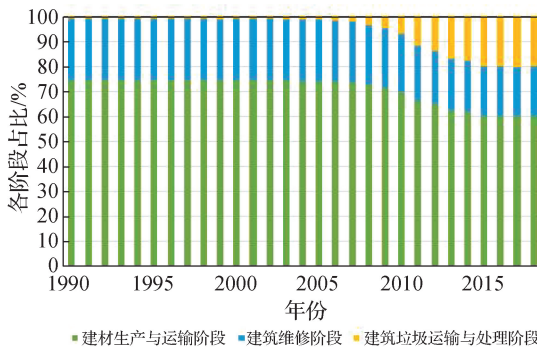
从建筑全生命周期各建筑材料碳排放的占比来看, 水泥和钢是产生隐含碳排放的主要材料, 其 1990—2018 年产生的隐含碳排放分别为 122.83 和

122.01 Mt, 分别占隐含碳排放的 33.24% 和 33.01%; 其次是砖和石灰, 产生的隐含碳排放分别为 61.68 和 43.58 Mt, 占隐含碳排放的 16.69% 和 11.79%; 砂、砾石和沥青产生的隐含碳排放较少, 分别为 1.97, 1.51 和 0.44 Mt, 占隐含碳排放的 0.53%, 0.41% 和 0.12%.

从各阶段隐含碳排放的占比来看[图 3(b)], 建材生产与运输阶段的隐含碳排放占据主导地位, 占比达 60% 以上. 从 2002 年起, 建材生产与运输阶段的碳排放占比逐年下降, 建筑维修阶段的变化趋势与其同步, 而建筑垃圾运输与处理阶段的碳排放占比则逐年增长.



(a) 不同材料的建筑隐含碳排放



(b) 建筑隐含碳排放各阶段占比

图 3 建筑隐含碳排放

Fig. 3 Embodied carbon emissions of building

2.2 建筑运行碳排放

宁波市建筑运行阶段碳排放呈 S 型增长, 在 2018 年达到峰值, 约 14.60 Mt, 是 1990 年的 35.68 倍, 年均增长率为 13.64% (图 4). 在过去的 20 余年里, 2000—2006 年为运行阶段碳排放的高速增长期, 从 2000 年的 5.46 Mt 快速增长到 2006 年的 12.98 Mt, 年均增长率为 15.47%.

2.3 建筑全生命周期碳效应时空格局演变

前文分析了宁波市建筑隐含碳排放和建筑运行碳排放的结果, 通过计算得到宁波市建筑全生命周期碳排放(图 5). 建筑全生命周期碳排放呈现倒 U 型趋势, 在 2002 年达到峰值 45.23 Mt, 随后进入减速期; 从 2013 年开始, 建筑全生命周期碳排放缓慢增加, 在 2018 年达到 20.86 Mt.

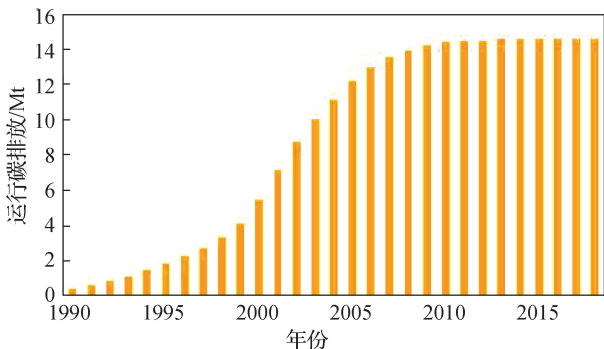


图 4 建筑运行碳排放

Fig. 4 Carbon emissions of building operation

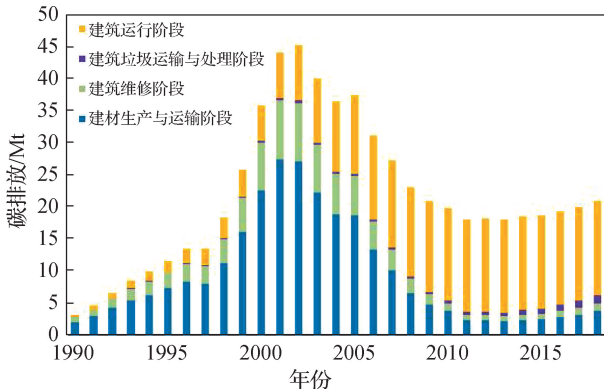


图 5 建筑全生命周期碳排放

Fig. 5 Carbon emissions during the whole life cycle of building

从建筑全生命周期碳排放各阶段的占比来看,建筑隐含碳排放占据主导地位. 1990—2018年,建筑隐含碳排放为369.56 Mt,建筑运行碳排放为258.58 Mt. 在建筑隐含碳排放中,建材生产与运输阶段是碳排放的主要来源,碳排放为269.05 Mt;其次是建筑维修阶段,碳排放为89.68 Mt;建筑垃圾运输与处理阶段最少,碳排放仅为10.83 Mt.

从空间格局上来看,各区碳排在范围和密度上的增速各不相同. 在快速城市化时期碳排放热点主要位于三江口(江北区、海曙区、鄞州区的交界处)、镇海区、北仑区等中心区;随后中心区的碳排放逐步由建材流入的隐含碳为主转变为建筑运行碳为主,而周边区域则由于快速建设形成了新的隐含碳排放“热点”,并逐步向四周“扩散”(图6).

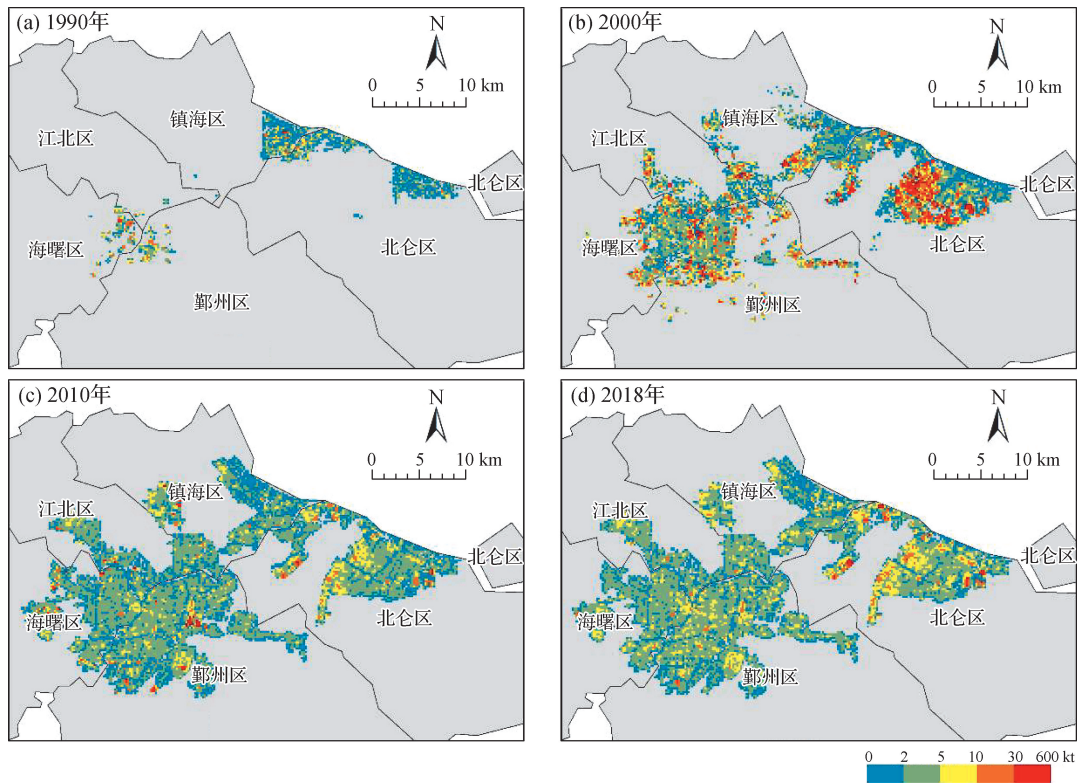


图6 宁波市建筑全生命周期碳排放的空间格局演变

Fig. 6 Development of spatial patterns of carbon emissions during the whole life cycle of building in Ningbo City

3 结论

本研究构建了建筑全生命周期碳效应空间显式模型,并以宁波市为例分析了建筑全生命周期中碳排放的时空格局与阶段特征. 结果表明:建筑隐含碳排放贡献最高,在2001年达到峰值后进入减速期,直到2014年开始缓慢上升,其中建筑垃圾运输与处理阶段的隐含碳排放逐年增加,可以通过选择生物基建材(如木材)及加强钢、砂和砾石等建材的循环利用,以有效降低建筑隐含碳排放. 建筑运行碳排放逐年增长,空间热点主要位于三江口、镇海区和北仑区,这些地区具有较大的减碳空间,可通过合理建设并利用光伏、风能和地热等可再生能源显著降低运行碳排放. 本研究揭示的建筑碳减排涉及其全生命周期且与城

市的发展和空间布局息息相关,需要制定系统性、全面性的减排方案才能达到减排效果的整体提升,助力城市“碳达峰、碳中和”目标的达成与可持续发展.

参考文献:

- [1] 郭芳,王灿,张诗卉. 中国城市碳达峰趋势的聚类分析[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 40-48.
- [2] 张雅欣,罗荟霖,王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.
- [3] 张静,薛英岚,赵静,等. 重点行业/领域碳达峰成本测算及社会经济影响评估[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 414-423.
- [4] 宋国恺. 中国落实碳达峰、碳中和目标的行动主体及实现措施[J]. 城市与环境研究, 2021(4): 47-60.
- [5] 中国建筑节能协会, 能耗统计专业委员会. 中国建筑能耗研究报告(2019)成果发布[EB/OL]. [2024-10-06].

- <https://www.cabee.org/site/content/23565.html>.
- [6] 应华权. 湖北省建筑碳排放情景预测与峰值调控研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015:1-94.
- [7] ATMACA A, ATMACA N. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO₂A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey[J]. *Energy Build*, 2015, 102: 417-431.
- [8] RAMESH T, PRAKASH R, SHUKLA K K. Life cycle energy analysis of buildings; an overview [J]. *Energy Build*, 2010, 42(10): 1592-1600.
- [9] GÖSWEIN V, KRONES J, CELENTANO G, et al. Embodied GHGs in a fast growing city: looking at the evolution of a dwelling stock using structural element breakdown and policy scenarios[J]. *J Ind Ecol*, 2018, 22(6): 1339-1351.
- [10] YE B, JIANG J J, LI C S, et al. Quantification and driving force analysis of provincial-level carbon emissions in China[J]. *Appl Energy*, 2017, 198: 223-238.
- [11] 曲建升, 王莉, 邱巨龙. 中国居民住房建筑固定碳排放的区域分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(2): 200-207.
- [12] 杨佳. 我国省域城镇民用建筑能耗及碳排放差异性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016:1-94.
- [13] WANG E D, SHEN Z G. Lifecycle energy consumption prediction of residential buildings by incorporating longitudinal uncertainties[J]. *J Civ Eng Manag*, 2013, 19: S161-S171.
- [14] 张军学, 黄莉. 中国建筑全生命周期的碳排放研究综述[J]. *城市建筑*, 2024, 21(5): 179-182.
- [15] 黄蓓佳, 崔航, 宋嘉玲, 等. 上海市建筑碳排放核算研究[J]. *上海理工大学学报*, 2022, 44(4): 343-350.
- [16] CHEN W L, YANG S Y, ZHANG X Z, et al. Embodied energy and carbon emissions of building materials in China[J]. *Build Environ*, 2022, 207: 108434.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [18] HUANG T, SHI F, TANIKAWA H, et al. Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2013, 72: 91-101.
- [19] HU D, YOU F, ZHAO Y H, et al. Input, stocks and output flows of urban residential building system in Beijing city, China from 1949 to 2008[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2010, 54(12): 1177-1188.
- [20] TANIKAWA H, HASHIMOTO S. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4D-GIS[J]. *Build Res Inf*, 2009, 37(5/6): 483-502.
- [21] REYNA J L, CHESTER M V. The growth of urban building stock unintended lock-in and embedded environmental effects[J]. *J Ind Ecol*, 2015, 19(4): 524-537.
- [22] YANG W, KOHLER N. Simulation of the evolution of the Chinese building and infrastructure stock[J]. *Build Res Inf*, 2008, 36(1): 1-19.
- [23] HU M M, BERGSDAL H, VAN DER VOET E, et al. Dynamics of urban and rural housing stocks in China [J]. *Build Res Inf*, 2010, 38(3): 301-317.
- [24] HAN J, XIANG W N. Analysis of material stock accumulation in China's infrastructure and its regional disparity[J]. *Sustain Sci*, 2013, 8(4): 553-564.
- [25] HUANG C, HAN J, CHEN W Q. Changing patterns and determinants of infrastructures' material stocks in Chinese cities [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2017, 123: 47-53.
- [26] ZHU W N, FENG W, LI X D, et al. Analysis of the embodied carbon dioxide in the building sector: a case of China [J]. *J Clean Prod*, 2020, 269: 122438.
- [27] DIXIT M K. Life cycle recurrent embodied energy calculation of buildings: a review [J]. *J Clean Prod*, 2019, 209: 731-754.
- [28] WANG T, SEO S, LIAO P C, et al. GHG emission reduction performance of state-of-the-art green buildings: review of two case studies [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 56: 484-493.
- [29] PENG C H. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling [J]. *J Clean Prod*, 2016, 112: 453-465.
- [30] PENG Z Y, LU W S, WEBSTER C J. Quantifying the embodied carbon saving potential of recycling construction and demolition waste in the Greater Bay Area, China: status quo and future scenarios [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 792: 148427.
- [31] 杨子艺, 胡姗, 徐天昊, 等. 面向碳中和的各国建筑运行能耗与碳排放对比研究方法及应用[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(6): 749-760.
- [32] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子 [EB/OL]. (2020-12-29) [2024-10-06]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml.

(责任编辑:曾礼娜)