

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-61-08

碳权衡视角下建筑全生命周期减排有效性研究

杨晓君¹ 高波^{1,2} 袁中原¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 四川省建筑科学研究院有限公司 成都 610000)

【摘要】 基于全生命周期混合分析评估法, 建立建筑全生命周期碳排放核算模型, 以夏热冬冷地区某办公建筑为例, 开展建筑全生命周期碳排放核算。并与同一气候区下的传统建筑、近零能耗建筑从建筑寿命、建筑材料回收利用率角度进行比较, 开展建筑全生命周期碳排放权衡研究。结果显示: 案例建筑全生命周期内建材生产、运输、建造拆除及建筑运营阶段碳排放占比分别为 65.8%、1.0%、2.4%、30.8%; 将建筑减排水平提升至近零能耗, 当建筑寿命低于 45 年时, 全生命周期减碳有效性较案例建筑稍有降低, 延长建筑使用寿命能够增强建筑全生命周期减排有效性; 建材回收利用能有效减少隐含碳的投资回收期, 传统建筑受影响程度更大, 更适用于建筑节能改造。

【关键词】 建筑全生命周期评价; 碳排放权衡; 近零能耗建筑; 减排有效性

中图分类号 TU201.5 文献标志码 A

Research on the Effectiveness of Building Life-cycle Carbon Reduction from the Perspective of Carbon Trade-off

Yang Xiaojun¹ Gao Bo^{1,2} Yuan Zhongyuan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu, 610000)

【Abstract】 The development of zero-carbon buildings and near-zero energy buildings is a comprehensive solution for the construction industry to reduce environmental impact. However, few studies have focused on the impact of the improvement of energy-saving effects of building operations on the balance of carbon emissions throughout the life cycle. This study takes an office building in a hot summer and cold winter area as a case, and based on the hybrid analysis method of the whole life cycle, the carbon emission accounting of the whole life cycle of the building is carried out. And compared with traditional buildings and near-zero energy buildings in the same climate zone from the perspective of architectural design life and recycling rate of building materials, a study on the carbon emission trade-offs of the entire life cycle of buildings was carried out. The results show that the carbon emissions of building materials production, transportation, construction and demolition, and building operation during the whole life of the case building accounted for 65.8%, 1.0%, 2.4%, and 30.8% respectively; after raising the level of building carbon reduction to nearly zero energy consumption, When the life of the building is less than 45 years, the effectiveness of carbon reduction in the whole life cycle is slightly lower than that of the case building. Extending the service life of the building can enhance the effectiveness of carbon reduction in the life cycle of the building; recycling of building materials can effectively reduce the investment recovery of embodied carbon During the period, traditional buildings are more affected and more suitable for

基金项目: 四川华西集团科技项目 (HXKX2021/024); 四川省住房城乡建设厅科技创新研究课题 (SCJSKJ2021-05)

作者简介: 杨晓君 (1999.04-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 2682763277@qq.com

通讯作者: 袁中原 (1983.08-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-08-15

building energy-saving renovation.

【Keywords】 Life cycle assessment of building; carbon emission trade-offs; net-zero energy building; carbon reduction effectiveness

0 引言

建筑行业的总能源消耗和碳排放逐年增长, 2021 年建筑运营的能源需求及碳排放较 2020 年分别增加约 4% 和 5%, 其中运营和施工占全球能源相关二氧化碳排放的近 40%^[1]。2020 年我国建筑全过程碳排放总量为 50.8 亿 tCO₂e, 占全社会总碳排放的 50.9%^[2]。在这样的大环境下, 建筑向绿色低碳、零碳方向发展是必然的, 但目前我国针对绿色建筑的环境性能或碳排放研究大多集中在建筑运营阶段, 较少将建筑物化过程与建筑运营阶段联系并挖掘其中关系。例如, 更侧重于建筑运营节能减排的策略作新建建筑的设计标准, 但对于这些策略的应用是否会导致建筑有隐含碳减排的潜力尚未有同等程度的探索^[3]。从建筑全生命周期评估 (LCA) 角度来看, 减少运营的能源消耗通常会增加能源密集型的材料或系统应用, 这可能会导致建筑全生命周期产生更多的能耗和碳排放。传统公共建筑中运营能耗达到全生命期的 70% 以上^[4], 所以从传统建筑的全生命周期能源消费来看, 专注建筑运营减排是有效的, 但不足以显示整个建筑的环境及经济效益。

Jonathan 等人^[5]评估了哈佛绿色建筑与城市中心 (CGBC) 的一个零碳排放改造项目全生命周期有效能源利用和减少隐含碳排放的设计策略, 结果显示建筑归一化的隐含碳排放为 488kgCO₂e/m², 其中 42% 以上的碳排放由建筑技术系统产生; 罗智星等人^[6]利用 BIM 建模统计建筑构件用量, 预测出建筑物化阶段碳排放, 结合理论分析总结出办公建筑的建材碳排放加权平均值为 533.69kgCO₂e/m²; 李文清^[7]以一栋典型办公建筑为例探究用能行为对建筑运行碳排放的影响, 研究显示约束用能行为后可减少 16% 的碳总量排放, 其中空调系统的减排潜力最大, 可降低 18% 的空调相关用能碳排放; 郭春梅等人^[8,9]对不同星级的绿色公共建筑运营碳排放化分析, 结果表明低碳建筑中应用的节能减排措施不一定比在普通建筑中表现优秀。

国际上评价建筑生命周期内对环境影响的 LCA 方法有三种, 包括投入—产出法 (IO)、过程分析法和混合分析法^[10]。过程分析法虽然可以对建

筑各阶段分析并获得详细数据, 但受客观条件的限制, 系统边界定义并不清晰, 不可避免的存在截断误差; 投入—产出法拥有清晰的系统边界, 但核算建筑内部的具体用能情况的准确性不高。基于这种系统边界定义与数据精细程度的矛盾, Treloar 等^[11]人提出一种基于投入产出和过程分析的 LCA 混合法, 结合近几年一些研究人员利用该方法开展全生命周期研究的情况^[12-16]来看, 混合分析法综合两种方法的优点, 应用范围更广。

本文将基于全生命周期混合评估方法, 对夏热冬冷地区某超低能耗办公建筑全生命周期碳排放进行量化分析, 权衡其隐含与运营碳排放; 对不同节能水平建筑的排放及减排情况比较, 评估案例建筑的全生命周期减排效果。

1 研究方法

1.1 计算指标与范围

“生命周期评估”指基于产品生产到最终废弃处理的全过程, 对产品资源、能源、环境影响的一种分析评估方法^[17]。近年来这种方法被广泛应用于各国绿色建筑的评估及应对气候变化策略报告中^[18]。本文采用以过程分析法为主, 投入—产出分析法为辅的全生命周期混合分析法。对主要生产或使用活动过程采用过程分析法, 对其他过程采用投入—产出法, 总碳排放为二者之和。

建筑的碳排放计算范围一般包括建材生产、建筑建造、建筑运营及拆解处理四个阶段。如图 1 所示, 同国际上认可度较高的 EN 15978 对比, 我国碳排放核算体系不完善, 但鉴于我国建筑碳排放计量评估尚处于起步阶段, 数据追溯过程复杂且困难, 故本文基于《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019) 划定的边界范围及计量指标展开建筑全生命周期碳排放研究 (不包括碳汇); 其中建材或产品的生产、运输安装及处置等过程中产生的碳排放被称为隐含碳排放 (Embodied Carbon, EC), 它与运行碳排放 (Operational Carbon, OC) 相对, 二者共同组成全生命周期碳排放, 并存在一个最佳平衡点使得全生命周期碳排放最低。

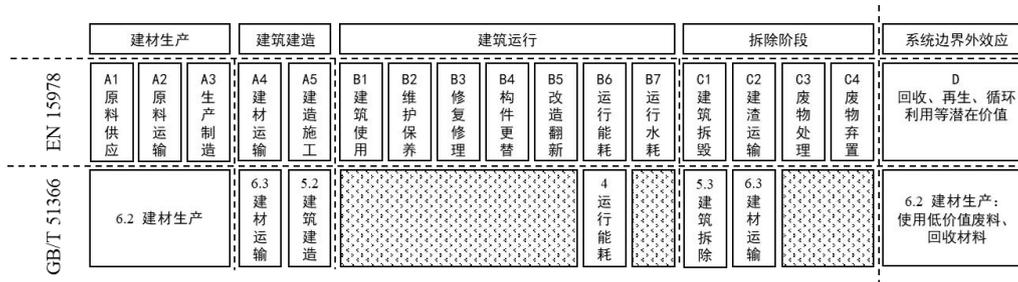


图 1 建筑碳排放计算标准范围对比

Fig.1 Comparison of the standard range of carbon emission calculation for buildings

1.2 碳排放计量模型

构建建筑全生命周期碳排放计量模型如下:

$$B_{LC} = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot MF_i) / S + \sum_{a=1}^2 \sum_{k=1}^n (C_{ak} \cdot CF_{ak}) / S + \left(\sum_{j=1}^n (E_j \cdot EF_j - CaR) \cdot Y / S + \sum_{b=1}^n (M_b \cdot D_b \cdot T_b) / S \right) \quad (1)$$

式中, B_{LC} 为全生命周期单位建筑面积碳排放, kgCO_2/m^2 ; M_i 为第 i 种主要建材的消耗量, m^3 或 m^2 ; MF_i 为第 i 种建材的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/$ 单位建材量; S 为建筑面积, m^2 ; E_j 为建筑运营阶段由暖通空调、照明等用能系统运行产生的能源消耗量, kWh/a ; EF_j 为 j 类系统消耗的能源对应的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$; CaR 为建筑可再生能源系统替代的能源产生的碳排放, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{a}$; Y 为建筑设计运营寿命, a ; C_{ak} 为建筑 a 阶段 ($a=1、2$ 分别指建造施工阶段、拆解阶段) 产生的能源消耗量, kgce ; CF_{ak} 为 a 阶段对应消耗 k 种能源对应的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kgce}$; M_b 指第 b 种建材的消耗量, t ; D_b 指第 b 种建材平均运输距离; T_b 指第 b 种建材对应运输方式下的建材运输碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$ 。

2 活动数据与假设

2.1 建筑概述

选择成都市某办公建筑为研究对象。建筑采用钢筋混凝土框架结构, 设计使用年限为 40 年, 建筑高度 51.2m, 总面积 14982.7 m^2 , 2018 年投入使用。建筑分主楼与副楼, 主楼地上 13 层, 副楼 3 层; 其中主楼及副楼一楼作接待、展示功能, 其他层均做办公使用, 副楼主要作学术报告厅及展览使用。该建筑采用了自保温外墙、保温隔热节能窗、南向水平遮阳、垂直绿化及光伏发电等节能措施, 暖通空调系统采用空气源热泵机组。案例建筑围护结构构造及热工参数如表 1 所示。

表 1 围护结构构造及热工参数

Table 1 Envelope structure and thermal parameters

类别	构造 (由外到内)	面积 (m^2)	传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
屋面	40mm 细石混凝土+20mm 水泥砂浆+40mm 挤塑聚苯板	1108	0.55
	+4mm 改性沥青防水卷材		
外墙	+20mm 水泥砂浆+30mm 水泥膨胀珍珠岩+20mm 水泥砂浆+120mm 钢筋混凝土	6184.1	0.65
	+20mm 水泥砂浆		
外窗	20mm 水泥砂浆+240mm 加气混凝土砌块+20mm 水泥砂浆	2250.5	2.36
	断热铝合金 (6 中透光 Low-E+9A+6/1.14PVB/6) 中空玻璃窗		

2.2 建材消耗与建筑施工能耗

建材消耗数据根据施工方提交的《工程清单表》及建筑书施工图整理收集, 拆解阶段的能耗按施工阶段能耗的 10%取值^[19]。通过严谨整理核对, 工程量清单如表 2 所示。

表 2 建筑材料与建筑施工能源的消耗情况

Table 2 Consumption of building materials and construction energy

项目名称	材料/能源	用量	碳排放因子
混凝土	C15 混凝土	159.2 m^3	117.8 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$
	C20 混凝土	432.0 m^3	264.7 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$
	C30 混凝土	2863.5 m^3	295 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$
	C35 混凝土	72.9 m^3	362.6 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$
	C40 混凝土	33.0 m^2	410.4 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$
	C45 混凝土	54.8 m^2	441.3 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$

续表 2 建筑材料与建筑施工能源的消耗情况

Table 2 Consumption of building materials and construction energy

项目名称	材料/能源	用量	碳排放因子
砂浆	M2.5 干混砂浆	36.5m ³	154.9kgCO ₂ e/m ³
	M5 干混砂浆	52.5m ³	236kgCO ₂ e/m ³
	M7.5 干混砂浆	1.24m ³	181.3kgCO ₂ e/m ³
	M15 干混砂浆	413.3m ³	236kgCO ₂ e/m ³
	M20 干混砂浆	560.1m ³	239.1kgCO ₂ e/m ³
	抗裂砂浆	65.3t	350kgCO ₂ e/t
砖石	MU10 页岩多孔砖	527.8m ³	204kgCO ₂ e/m ³
	MU10 页岩砖	301.3m ³	292kgCO ₂ e/m ³
	耐火砖	496.45m ³	1790kgCO ₂ e/m ³
	内墙面砖	161.5t	350kgCO ₂ e/t
	地砖	941.8m ²	13.3kgCO ₂ e/m ²
	黏土砖	1747.2m ³	295kgCO ₂ e/m ³
金属	花岗石	41.8t	220kgCO ₂ e/t
	不锈钢	3.8t	6130kgCO ₂ e/t
	轻钢龙骨吊顶	4716m ²	3.8kgCO ₂ e/m ²
	热镀锌型钢	45.7t	2487kgCO ₂ e/t
	镀锌钢管	8.34t	3110kgCO ₂ e/t
	热扎钢筋	401.2t	2340kgCO ₂ e/t
玻璃	铝板带	0.9t	28500kgCO ₂ e/t
	Low-E 玻璃	33.76t	2010kgCO ₂ e/t
	平板玻璃	67.5t	1190kgCO ₂ e/t
木材	钢化玻璃	19.15t	1790kgCO ₂ e/t
	木板	3985.3m ²	2.9kgCO ₂ e/m ²
	发泡水泥保温板	65.4m ³	735kgCO ₂ e/m ³
	挤塑聚苯板	2.8t	6120kgCO ₂ e/t
	膨胀聚苯板	2.9t	7860kgCO ₂ e/t
	聚乙烯高弹泡沫	11.5t	2620kgCO ₂ e/t
保温	水泥膨胀珍珠岩	23.9t	2642kgCO ₂ e/t
	岩棉板	1.2t	1980kgCO ₂ e/t
	B06 加气混凝土	918.1m ³	336kgCO ₂ e/m ³
	加气砼空心墙板	411.9m ³	336kgCO ₂ e/m ³
	矿棉板	14.1t	1200kgCO ₂ e/t
	聚合物砂浆	22.5m ²	277kgCO ₂ e/m ²
其他材料	3:7 灰土	665t	359kgCO ₂ e/t
	PVC 对花卷材	1.2t	6790kgCO ₂ e/t
	JS 防水涂料	14t	3500kgCO ₂ e/t
施工过程	柴油	46100kg	3.0959kgCO ₂ e/kg
	电	143620kWh	0.123kgCO ₂ e/kwh
其他	空气源热泵机组	12 台	6.49tCO ₂ e/台
	太阳能光伏电板	234 片	2.27kgCO ₂ e/片

注：以上碳排放因子数据分别来源于：（1）《建筑碳排放计算标准》（GB/T GB/T51366-2019）；（2）中国产品全生命周期温室气体排放系数库；（3）来自文献[10,17,20-26]。

2.3 全年运营能耗

在 SketchUp 中创建几何模型，导入 TRNSYS 设置建筑围护结构参数及设备用能系统。室内灯光功率依据建筑绿色建筑设计文件设置，照明功率密度均不高于《建筑照明设计标准》（GB 50034-2013）。计算采用成都市典型小时数据天气文件，用以计算建筑暖通空调负载及能源使用；源数据包括年度设计数据、典型年份数据、最大焓、风向、最高和最低温度和太阳辐射等。四川省电力碳排放因子远低于国家平均值，所以本文使用基于《2010 年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》、《中国区域电网企业外购电力排放因子计算表》更新的 2020 年四川省碳排放因子计算电力消耗带来的温室气体排放^[21]。建筑运营阶段用能活动数据如表 3 所示。

表 3 建筑运营活动数据

Table 3 Activity data of building operation

用能系统	年耗电量 (MWh)	单位面积耗电量 (kWh/m ² ·a)	人均耗电量 (kWh/p·a)
空调系统	290.42	18.7	625.9
照明系统	66.52	4.4	143.3
办公设备	99.02	6.6	213.4
其他设备	73.02	4.9	157.4

注：其他设备包括电梯、给排水泵及应急照明。

2.4 建筑能源假设

为探究夏热冬冷地区绿色建筑隐含排放以及运营排放间的权衡关系，本文从能源消耗及环境影响的角度，模拟两栋相同框架、朝向、使用功能的假想建筑，通过改变围护结构保温材料、外窗及可再生能源利用情况进行比较。假想近零能耗建筑围护结构传热系数以及设备能效根据《近零能耗建筑技术标准》（GB/T 51350-2019）选择，使用更多保温材料及高效设备以满足设计要求，设计照明密度 5.3W/m²，外窗选择中透光 Low-E 中空玻璃窗；假想传统建筑围护结构不考虑使用保温材料，设计照明密度 10W/m²，外窗选择普通中空玻璃窗，传热系数相对较高。表 4 列出了案例建筑与两栋假想建筑的不同热工性能。空气源热泵系统在夏热冬冷地区的应用较为广泛，所以假想建筑中应用与案例建筑相同的 HVAC 系统；传统建筑与案例建筑机组 COP 均为 3.35，近零能耗建筑机组 COP 设置为 3.5；案例建筑与近零能耗建筑 HVAC 系统考虑变频调

控策略, 传统建筑不考虑。为简化计算, 假想建筑隐含阶段建材消耗量通过保温材料及其相关的辅助材料的增减计算。

表 4 建筑热性能比较

Table 4 Comparison of thermal properties

项目	传统建筑	案例建筑	近零能耗建筑
外墙	1.96W/(m ² ·K)	0.65W/(m ² ·K)	0.17W/(m ² ·K)
屋顶	2.0W/(m ² ·K)	0.55W/(m ² ·K)	0.18W/(m ² ·K)
外窗	2.82W/(m ² ·K)	2.36W/(m ² ·K)	2.0W/(m ² ·K)
地面	2.0W/(m ² ·K)	1.0W/(m ² ·K)	0.52W/(m ² ·K)

3 结果及讨论

3.1 隐含阶段碳排放

基于材料的总投资、材料加工运输及现场施工能耗数据, 采用 LCA 法计算以上三种能耗水平的建筑隐含碳排放。案例建筑隐含过程排放比例如图 2 所示。计算结果显示, 建材生产阶段的碳排放贡献最大, 占整个隐含阶段的 98%以上; 而建材运输和主要设备应用碳排放均不超过 2%, 施工碳排放不超过 4%。随着建筑节能水平的不断提高, 保温材料被大量应用于围护结构中, 以保证建筑运行过程的节能, 但这也导致了保温材料的用量增加, 保温材料比例从 4.7%升高至 19.5%; 且在近零能耗建筑中, 排放比例超过混凝土, 成为建筑隐含碳排放贡献第三大主要来源。因此, 选择隐含碳强度低的建筑材料是减少建筑隐含碳排放的有效途径之一, 尤其应将重点放在混凝土、金属制品、砖石材料以及保温材料的选择上。

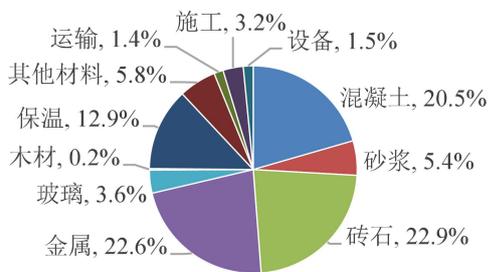


图 2 案例建筑隐含碳来源

Fig.2 Sources of embodied carbon of case building

3.2 运营阶段碳排放

运营阶段的年碳排放计算结果如图 3 所示, 传统建筑年运营排放 65.1tCO₂e, 其中制冷产生的碳排放占比最高 (35.6%), 其次是办公设备 (18.3%)、照明 (17.4%)、供暖 (15.2%)、其他设备 (13.5%);

案例建筑年运营排放 56.6tCO₂e, 较传统建筑减少 13.1%的排放, 其中制冷产生的碳排放占比最高 (35.0%), 其次是办公设备 (21.0%)、其他设备 (15.5%)、供暖 (14.4%)、照明 (14.1%); 近零能耗建筑运营碳排放 45.1tCO₂e, 较传统建筑减少 30.6%的排放, 其中制冷产生的碳排放占比最高 (34.9%), 其次是办公设备 (23.3%)、其他设备 (17.2%)、供暖 (12.8%)、照明 (11.8%)。

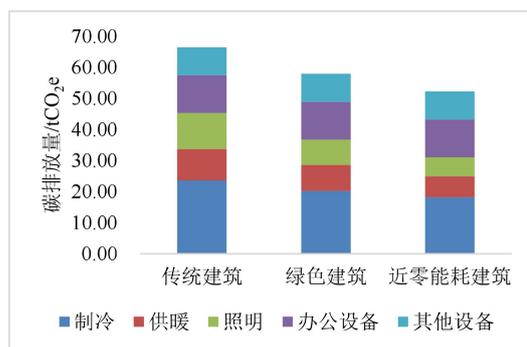


图 3 建筑运营阶段碳排放对比

Fig.3 Comparison of carbon emissions in operational stage

从排放结构上看, 空调系统产生的碳排放始终是建筑运营阶段的主要贡献者, 占比在 50%左右, 而其中制冷产生的碳排放贡献最大。随着建筑围护结构性能的增强, 建筑制冷、供暖产生的碳排放呈下降趋势, 但在减排效果上二者呈现不同的强度, 近零能耗建筑 HVAC 系统整体表现出的减排量并没有达到案例建筑的两倍, 尽管其在保温隔热材料的用量及厚度上是案例建筑的两倍以上且较案例建筑拥有更好的气密性及高效设备等; 尤其在制冷部分, 近零能耗建筑较案例建筑仅减少 10%的排放, 而供暖部分减少了 19.5%的排放。有两方面原因, 首先, 由于围护结构的蓄热特性, 保温层厚度的增加并不等于冷负荷的减少, 高度保温隔热的围护结构可能导致过热风险; 其次, 虽然可以通过夜间自然通风改善室内热环境, 但是本文案例所处气候区夏季室外空气湿度大、温度高、日差小, 夜间自然通风降温变得不适宜^[4]。值得注意的是, 随着建筑节能水平的提高, 空调系统碳排放显著降低, 其他终端碳排放的比重明显增加, 这一部分的节能减排更应引起重视。

3.3 全生命周期碳排放权衡

案例建筑及假想建筑的全生命周期碳排放如表 5

所示，计算时间跨度为 40 年，三栋建筑的隐含碳结果均落在对 1007 栋办公建筑的隐含碳基准研究 (ECB) 得到的隐含碳范围内^[27]，运营碳结果落在同气候区研究的办公建筑运营碳范围内^[4,5,28,29]。案例建筑运营碳排放 56.56tCO₂e/a，占建筑全过程排放的 30.75%；隐含碳排放 5093.84tCO₂e，占建筑全过程排放的 65.85%。其中运输碳排放和施工碳排放占比分别为 0.99%、2.4%，二者计算结果落在中国平均排放范围内^[6]。

表 5 全生命周期各阶段碳排放

Table 5 Carbon emissions at various stages of life cycle		传统建筑 /tCO ₂ e	案例建筑 /tCO ₂ e	近零能耗建筑 /tCO ₂ e
隐含碳	产品生产	4611.53	4844.38	5301.65
	建筑施工	141.14	176.42	227.41
	产品运输	75.97	73.04	73.95
运营碳	建筑运行	2658.16	2262.32	1806.10
全生命周期碳排放		7486.80	7356.16	7409.11

从运营碳与隐含碳的不平衡程度来看，随着更多建筑被动节能技术的应用，建筑全生命周期碳排放的不平衡程度越高。从碳排放增减情况上看，案例建筑较传统建筑运营碳减少 395.60tCO₂e，隐含碳增加 265.21tCO₂e；近零能耗较传统建筑运营碳减少 852tCO₂e，隐含碳增加 774.37tCO₂e，近零能耗建筑的碳排放增减量差值较小。从年均单位面积碳排放看，案例建筑年均碳排放 12.27kgCO₂e/m²·a，近零能耗建筑年均碳排放 12.36kgCO₂e/m²·a。

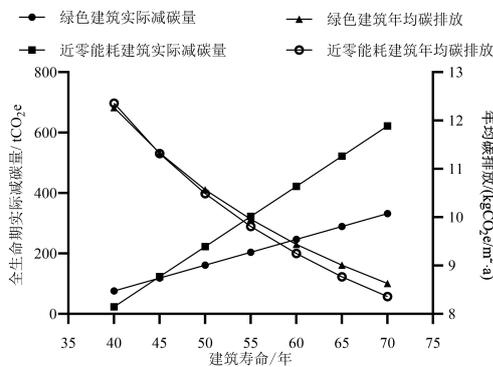


图 4 建筑寿命对全生命周期碳排放权衡影响

Fig.4 Impact of building life on life cycle carbon trade-offs

以上结果都显示近零能耗建筑全生命期减碳能力相对低于案例建筑，这说明该时间跨度内，近零能耗建筑全生命期的节能减排有效性减弱，所以本文改变建筑使用寿命，探索建筑寿命改变对建筑全生命期碳排放不平衡程度的影响。如图 4 所示，随着建筑寿命的增加，近零能耗建筑的实际减碳量线性增加，且增长幅度较案例建筑更大，近零能耗建筑实际减碳量在大于 45 年设计寿命时超过案例建筑，在运营 70 年时，实际减排量达到 716.63tCO₂e；在年均碳排放上，整体呈下降趋势，但明显近零能耗建筑的降幅较案例建筑更大，在运营 70 年时，年均碳排放降至 8.36kgCO₂e/m²·a。

3.4 敏感性分析

通过前面的分析，可以了解到建筑隐含阶段碳排放贡献主力当属建材生产部分，隐含碳的减排工作首先应当聚焦于建材生产减排，而目前倡导的方式主要分为两种：增大绿色建材的应用占比，增加建材回收利用率。但目前我国对绿色建材生产工艺及相关碳排放因子数据统计并不完善，本文不作深入分析。而建筑运营碳排放主要来自于建筑空调系统，其产生的碳排放可以通过改善围护结构热工性能、增加可再生能源利用及提高系统能效等主被动节能技术减少。

如图 5~6 所示，图中误差线及阴影部分表示由于碳排放的敏感性变化，投资回收期 and 全生命期减碳量变化 10% 的结果。图 5 展示了设计寿命 70 年情景下，案例建筑全生命期减碳量及隐含碳投资回收期随建筑材料回收率改变的变化情况，更高的材料回收率说明有更多的隐含碳在建筑拆解处理阶段后被再利用，所以随着材料回收率升高，案例建筑全生命期减碳量线性增加，隐含碳投资回收期逐渐降低；同时该图显示，案例建筑要达到全生命期内隐含碳投资回收，需要材料回收率达到 87% 左右，而 2020 年我国建筑垃圾资源化利用率仅为 50%^[30]，所以要实现建筑全生命期内的隐含碳回收，除了提高建筑材料回收率，还应注重建筑减排水平的提升。图 5 对比了传统建筑、案例建筑和近零能耗建筑的隐含碳投资回收曲线，可以发现，在同样的材料回收率下，建筑节能减排水平越高，越容易实现建筑全生命期内隐含碳回收，近零能耗建筑在材料回收率 70% 时实现全生命期内隐含碳回收；在影响力度上，材料回收率对节能水平低的建

筑影响更大, 而随着节能减排水平的提高, 材料回收带来的减排效果减弱, 变化逐渐平缓, 趋近于线性。

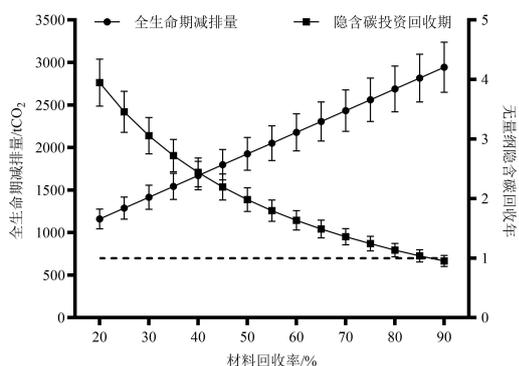


图 5 案例建筑全生命周期碳排放权衡

Fig.5 Life cycle carbon trade-offs of case building

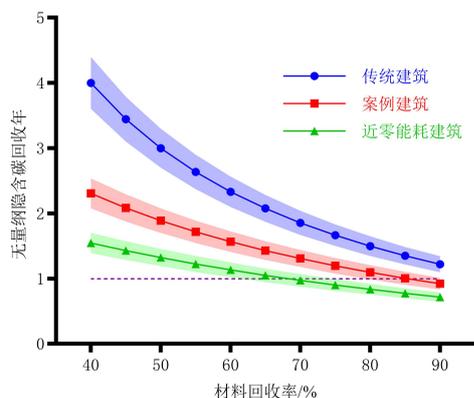


图 6 隐含碳无量纲回收年对比

Fig.6 Dimensionless payback year comparison of embodied carbon

4 结论

本文基于 LCA 方法, 对夏热冬冷地区某高层绿色三星建筑进行全生命周期碳排放统计核算, 并模拟两栋相同框架、朝向、使用功能但不同节能水平的假想建筑进行对比; 从全生命周期角度对建筑的隐含碳及运营碳排放进行权衡比较, 探究建筑寿命对建筑全生命周期碳排放不平衡程度的影响; 对比不同, 分析了材料回收对建筑隐含碳投资回收的影响。得到如下结论:

(1) 案例建筑运营 40 年全生命周期内, 隐含碳排放较传统建筑高 5.5%, 为 5093.84tCO_{2e}, 运营碳排放较传统建筑低 15%, 为 2262.4tCO_{2e}; 将案例建筑节能水平提升至近零能耗建筑标准后, 隐含

碳排放较传统建筑高 16%, 为 5603tCO_{2e}, 运营碳排放较传统建筑低 32%, 为 1806tCO_{2e}。这一结果显示案例建筑及近零能耗建筑在运营阶段的减排量足以弥补隐含阶段增加的碳排放, 在整个全生命周期内, 运营减排是有效的。

(2) 建筑隐含碳与运营碳的高度不平衡也会影响建筑全生命周期减碳效果。在节能技术已布置好的前提下, 提高建筑运营年限, 建筑全生命周期减碳效果会更好, 因为它是线性增加的, 同时发现提高建筑节能水平的同时, 建筑设计寿命不应低于 45 年, 否则为了减少运营碳排放而增加的隐含碳将变得无意义, 徒增加额外投资; 而随着建筑全生命周期有效性的增强, 运营碳与隐含碳的占比趋近于平衡, 所以在同时推进建筑隐含碳和运营碳减排的前提下, 还应注意把控全生命周期内建筑隐含碳和运营碳平衡问题, 避免出现运营减排量低于增加的隐含碳的情况。

(3) 随着全生命周期减碳量的增加, 建筑隐含碳投资回收期逐渐降低。案例建筑要想实现全生命周期隐含碳的投资回收, 建筑材料回收利用率需要达到 87%; 而对于近零能耗建筑, 只需要达到 70% 的材料回收率即可实现隐含碳投资回收。但增大材料回收率对不同节能水平建筑的隐含碳回收期影响程度是不同的, 节能水平越低, 受材料回收率影响越大, 节能水平越高, 变化越趋近于线性。

参考文献:

- [1] The United Nations Environment Programme. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction[R/OL]. (2022-09-11)[2023-05-04]. <http://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>.
- [2] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会. 2022 建筑能耗与碳排放研究报告[R]. 重庆: 中国建筑节能协会, 2022.
- [3] Zhu W, Feng W, Li X, et al. Analysis of the embodied carbon dioxide in the building sector: A case of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,269:122438.
- [4] Su X, Tian S, Shao X, et al. Embodied and operational energy and carbon emissions of passive building in HSCW zone in China: A case study[J]. Energy and Buildings, 2020,222:110090.

- [5] Grinham J, Fjeldheim H, Yan B, et al. Zero-carbon balance: The case of HouseZero[J]. *Building and Environment*, 2022,207:108511.
- [6] 罗智星,仓玉洁,杨柳,等.面向设计全过程的建筑物碳排放计算方法研究[J].*建筑科学*,2021,37(12):1-7,43.
- [7] 李文清,徐蔼彦,朱轶韵,等.基于用能行为的建筑碳排放计算研究[J].*西安理工大学学报*,2023,(3):310-316.
- [8] 郭春梅,黄梦娜,楚尚玲.绿色公共建筑运营阶段二氧化碳排放量化分析[J].*环境工程*,2018,36(5):184-188.
- [9] 郭春梅,卞晨航,孟冲,等.天津生态城低碳体验中心碳排放及减碳潜力研究[J].*环境监测管理与技术*,2022,34(2):7-11.
- [10] Zhang X, Wang F. Hybrid input-output analysis for life-cycle energy consumption and carbon emissions of China's building sector[J]. *Building and Environment*, 2016,104:188-197.
- [11] Treloar G J. Extracting Embodied Energy Paths from Input-Output Tables: Towards an Input-Output-based Hybrid Energy Analysis Method[J]. *Economic Systems Research*, 1997,9(4):375-391.
- [12] Stephan A, Crawford R H, de Myttenaere K. A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses[J]. *Applied Energy*, 2013,112:23-34.
- [13] Zhang Z, Chu C, Guan J. Quantification of building embodied energy in China using an input-output-based hybrid LCA model[J]. *Energy and Buildings*, 2016,110:443-452.
- [14] Rauf A, Crawford R H. Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings[J]. *Energy*, 2015,79:140-148.
- [15] Stephan A, Crawford R H. A multi-scale life-cycle energy and greenhouse-gas emissions analysis model for residential buildings[J]. *Architectural Science Review*, 2014,57(1):39-48.
- [16] Hong J, Shen G Q, Mao C, et al. Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: an input-output-based hybrid model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,112:2198-2207.
- [17] Zhang X, Wang F. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China[J]. *Building and Environment*, 2015,86:89-97.
- [18] Cabeza L F, Rincón L, Vilariño V, et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014,29:394-416.
- [19] 崔朋飞.基于全生命周期碳排放测算的建筑业分阶段减排策略研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [20] 张孝存.建筑碳排放化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [21] 宁礼哲,张哲,蔡博峰,等.2020年中国区域和省级电网温室气体排放因子研究[J].*环境工程*,2023,41(3):222-228.
- [22] 杨远程,路宾,何涛,等.北京农村地区冬季供暖系统碳排放研究[J].*建筑科学*,2018,34(12):87-91.
- [23] 陈文娟.平板玻璃生产的生命周期评价研究[D].北京:北京工业大学,2007.
- [24] 李兆坚,江亿.我国城镇住宅节能空调器适用性研究[J].*暖通空调*,2007(10):44-51.
- [25] 林立身,江亿,燕达,等.我国建筑业广义建造能耗及 CO₂ 排放分析[J].*中国能源*,2015,37(3):5-10.
- [26] Zhang X, Wang F. Assessment of embodied carbon emissions for building construction in China: Comparative case studies using alternative methods[J]. *Energy and Buildings*, 2016,130:330-340.
- [27] K Simonen, BR Droguett, L Strain, et al. Embodied Carbon Benchmark Study: LCA for Low Carbon Construction[R/OL]. University of Washington, 2017. (2017.10.02)[2023-05-04]. <https://digital.lib.washington.edu/443/researchworks/handle/1773/38017>.
- [28] 钟辉智,蔡君伟.夏热冬冷地区净零能耗示范建筑能耗及碳排放分析[J].*制冷与空调*,2022,36(2):258-262.
- [29] Dong Z, Zhao K, Liu Y, et al. Performance investigation of a net-zero energy building in hot summer and cold winter zone[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021,43:103192.
- [30] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知[EB/OL].(2021-07-01)[2023-05-04].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202107/t20210707_1285530.html.