

DOI:10.11784/tdxbz202307023

零碳独栋住宅生命周期环境影响及成本分析

毕雪皎, 杨 崑, 李 洁, 李奇莞

(天津大学建筑学院, 天津 300072)

摘要: 降低建筑行业碳排放是实现碳中和目标的重要举措。为避免环境负担转移、市场推广困难等问题, 应从生命周期视角研究零碳建筑, 并综合考虑建筑的环境和经济效益。本研究对中国国际太阳能十项全能竞赛作品 R-CELLS 这一针对严寒地区设计的零碳独栋住宅实例进行了相对完整的使用寿命环境影响和成本评价, 并依据评价结果调整建筑配置以提升市场推广潜力。结果表明, 通过被动式设计, R-CELLS 建筑本体能效达到了近零能耗标准, 其光伏发电量为用电量的 5 倍, 并选用环境友好型材料以降低碳排放, 建筑预期将在运行 7 年和 15 年后分别偿还碳排放和一次能源消耗, 最终实现生命周期负碳排放和正能源, 环境效益突出。R-CELLS 建筑初始成本为 2.38 万元/m², 为了增加市场吸引力, 研究分析 R-CELLS 的环境影响和成本构成, 以在建筑生命周期(50 年)内实现零碳排放和零一次能耗为前提, 提出了两种减配方案: 当仅调整可再生能源系统时, 建筑初始成本降至 2.25 万元/m²; 调整全部构件系统时, 建筑初始成本降至 1.03 万元/m²。第 2 种减配方式对建筑经济效益提升显著。根据计算结果, 结合相关研究综述, 讨论了我国零碳建筑隐含碳排放限值的设置; 对权衡环境和经济效益的零碳建筑决策方法提出建议, 为未来零碳建筑性能评估和方案比选等提供了参考。

关键词: 零碳建筑; 生命周期评价; 生命周期成本; 中国国际太阳能十项全能竞赛

中图分类号: TU241.91

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)05-0544-12

Life-Cycle Environmental Impacts and Cost Analysis of Zero-Carbon Single Family Residence

Bi Xuejiao, Yang Wei, Li Jie, Li Qiyuan

(School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Reducing carbon emissions in the building sector is an important measure towards achieving the goal of carbon neutrality. To avoid issues such as environmental burden shifting and market promotion difficulties, zero-carbon buildings should be studied from of a life cycle perspective, and both their environmental and economic benefits should be considered. In this paper, the environmental impacts and cost of a zero-carbon single family residence R-CELLS, which was a competition entrant for Solar Decathlon China and designed for extremely cold regions, were evaluated in a relative complete life cycle, and adjustments to the building prototype were made to enhance its market promotion potential based on the evaluation. Results show that R-CELLS reached the nearly zero energy building standard through passive design, and its photovoltaic electricity generation capacity was nearly 5 times that of its electricity consumption. In addition, environmental-friendly materials were selected to reduce its carbon emissions. The building was expected to pay back carbon emissions and primary energy consumption after 7 and 15 years of operation, respectively. Ultimately, the building would achieve negative carbon emissions and positive energy, highlighting its environmental benefits. The initial cost of R-CELLS was 23 800 ¥/m², and to enhance its market attractiveness, two low-configuration scenarios were proposed based on the analysis of its environmental impacts and cost

收稿日期: 2023-07-24; 修回日期: 2023-11-07.

作者简介: 毕雪皎(1993—), 女, 博士研究生, shinb@tju.edu.cn.

通信作者: 杨 崑, walker_yang@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878436).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51878436).

composition, with the premise of achieving zero carbon emission and zero primary energy consumption in its life cycle (50 years). When only the renewable energy system was adjusted, the initial cost was reduced to 22 500 ¥/m². When all the component systems were adjusted, the initial cost was reduced to 10 300 ¥/m². In comparison, the second scenario significantly enhanced the economic benefits of R-CELLS. Based on the calculation results and combined with the relevant reviews, the setting of embodied carbon emission benchmark for zero-carbon buildings in China was discussed, and recommendations for the decision-making approaches of zero-carbon buildings were proposed to balance the environmental and economic benefits, providing a reference for the performance assessment and configuration scenario selection of zero-carbon buildings in the future.

Keywords: zero-carbon building; life cycle assessment; life cycle cost; Solar Decathlon China

为了将全球平均气温升幅控制在相对工业化前提高 1.5 °C 以内,包括中国在内的数十个国家设置了碳中和目标^[1]. 建筑行业碳排放占全球碳排放总量的近 40%^[2], 零碳建筑成为研究热点. 该概念由英国首次提出^[3], 美国、德国、挪威等国家也陆续提出了相关定义^[4]. 中国近年出现了多个优秀零碳建筑实践, 并发布了《建筑碳排放计算标准》^[5]和《零碳建筑技术标准(征求意见稿)》^[6]等, 将建筑碳排放计算作为强制性要求, 对零碳建筑及全过程零碳建筑提出了明确定义.

建筑碳排放根据发生阶段可分为运行碳排放和隐含碳排放, 当前国内外建筑减排研究仍侧重于通过降低运行能耗及增加可再生能源利用等方式实现运行阶段的净零能源和碳排放平衡^[7-8]. 然而, 与隐含碳排放仅占约 20% 的普通建筑相比, 高效建筑的隐含碳排放占比上升至 45%~70%^[9], 甚至达到 100%. 仅关注运行性能可能导致环境影响的负担转移^[10], 因此越来越多的研究强调应将零碳建筑性能评估范畴延伸至全生命周期^[11-12]. 与此同时, 经济可行性是现阶段推行零碳建筑的主要障碍之一^[13], 有必要从生命周期角度综合评价建筑环境与经济效益.

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)和生命周期成本(life cycle cost, LCC)是评估环境和经济效益的有效方法, 已在建筑研究中得到广泛应用. 欧洲建筑环境绩效评估标准^[14]将生命周期划分为生产、建造、使用、处置 4 个阶段, 以及可选择的回收阶段. 据 Saade 等^[15]统计, 只有约 50% 的建筑 LCA 研究包含了 4 个生命周期阶段, 作为补充的回收阶段则更少被考虑在内^[16]. 现有研究通常将 LCA 和 LCC 分别进行, 很少获得生命周期环境影响和成本的综合评估结果^[17]. Grinham 等^[11]、Maierhofer 等^[18]、张军军等^[19]对零碳建筑案例进行了较为完整的全生命周期环境效益评估, 但不涉及经济效益. Moraveji 等^[20]、Hajare 等^[21]、Liu 等^[22]同时评估了零碳建筑的环境和经济效益, 但侧重讨论建筑成本与运行性能间的关

系, 仅对少量构件的隐含影响做简略计算.

零碳独栋住宅原型 R-CELLS 是由天津大学联队(Team Tianjin U+)设计并建造的 2022 年中国国际太阳能十项全能竞赛(Solar Decathlon China, SDC)参赛作品^[23]. 本研究对这一典型零碳建筑实例进行了较为完整的 LCA 和 LCC 核算, 分析各生命周期阶段及构件系统对建筑生命周期性能的贡献, 提出多种减配方案平衡建筑环境和经济效益, 为未来零碳建筑性能评估及方案比选等提供了参考.

1 零碳独栋住宅原型概述

R-CELLS(图 1^[23])针对严寒地区气候特点设计, 于 2021 年在张家口市张北县建造完成. 其建筑面积为 150 m²(外墙围合总面积 162 m²), 包含 15 个预制模块, 具有空间灵活性和可拓展性, 能适应不同功能和用户规模的使用需求, 可在中低密度城乡环境中推广^[23].



(a) 室外

(b) 室内

图 1 R-CELLS 实景照片

Fig.1 Photos of R-CELLS

R-CELLS 建筑形体简洁, 围护结构保温性强, 选用大量可再生、易回收的环境友好型材料. 建筑中采用的主要可持续技术如图 2^[23]所示. 不对称的 V 形屋顶既有助于夏季遮阳和冬季太阳能获取, 也减少了北立面暴露面积. 屋顶设有单硅光伏模块、薄膜光伏模块和光电光热一体化复合模块, 与小型风机形成风光互补, 充分利用当地可再生能源. 光储直柔技术的应用使 R-CELLS 可以利用储能系统提高负荷调节的灵活性^[24].

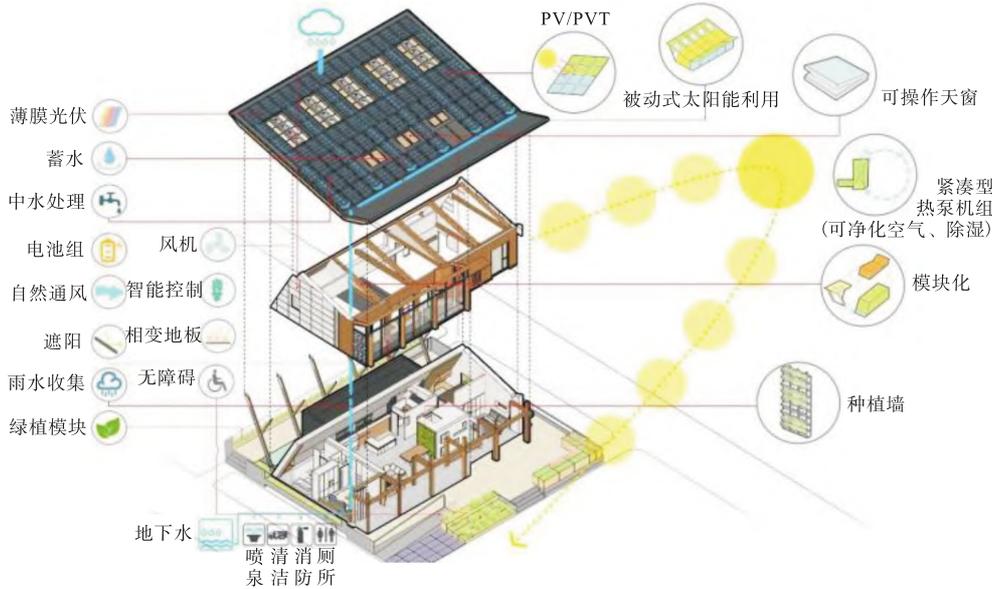


图 2 R-CELLS 可持续技术示意
Fig.2 Schematic of sustainable technologies of R-CELLS

2 方法

2.1 研究流程

研究流程如图 3 所示. 首先, 统计 R-CELLS 的生命周期材料、能耗、运输和设备用量清单; 然后, 将清单数据和背景数据输入 LCA 及 LCC 计算模型, 获得建筑的隐含和运行环境影响、初始成本和成本增量等, 综合评价零碳建筑原型的生命周期环境和经济效益; 在此基础上, 以提升市场推广可行性为目标提出多种减配方案, 评估减配方案生命周期性能并与原方案对比分析; 最后, 讨论研究结果与现有研究的异同, 提出权衡环境与经济效益的零碳建筑方案比选建

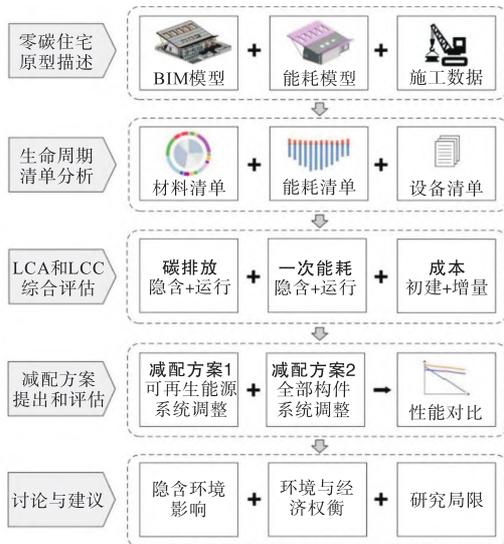


图 3 研究流程
Fig.3 Flow chart of research

议, 并指出研究局限.

2.2 评价指标和系统边界

LCA 有多个环境影响评价指标, 研究选取其中具有代表性的全球变暖潜能值 (global warming potential, GWP) 和一次能源需求 (primary energy demand, PED), 二者分别体现碳排放和能源消耗情况.

建筑预期使用寿命依据《建筑碳排放计算标准》^[5] 设置为一般建筑使用年限 50 年. 评价包含的生命周期阶段如图 4 所示, 涉及生产、建造、使用、处置及回收阶段, 其中使用阶段可分为运行阶段 (B6) 和替换阶段 (B2—B4). 研究中的运行环境影响为 B6 的环境影响, 隐含环境影响为 B6 以外各阶段环境影响之和; 初始成本为 A1—A5 的成本之和. 评价的物理边界为建筑范围内, 不包含场地中的充电桩及电动汽车等.

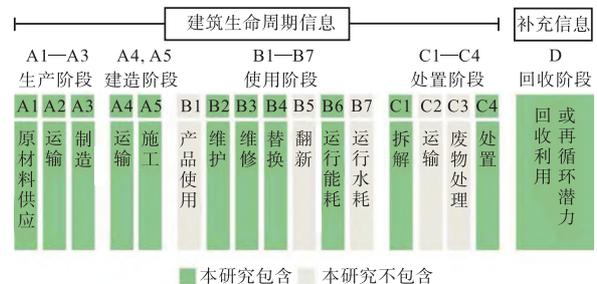


图 4 本研究包含的建筑生命周期阶段
Fig.4 Life cycle stages included in this research

2.3 计算方式和数据来源

GWP 计算方式如式 (1) 所示, 其中: CE 为生命

周期碳排放； CE_{sc} 为生产阶段碳排放； CE_{jz} 为建造阶段碳排放； CE_{yx} 为运行阶段碳排放； CE_{th} 为替换阶段碳排放； CE_{cz} 为处置阶段碳排放； CE_{hs} 为回收阶段碳排放； M 为该阶段材料用量； E 为该阶段能源用量； Q 为该阶段的运输量和设备台班用量等； EF 为该阶段对应的碳排放因子； A 为建筑面积。PED 计算公式与 GWP 相同，计算 PED 时 EF 为材料或能源在该阶段对应的一次能源消耗因子。

$$\begin{cases} CE = CE_{sc} + CE_{jz} + CE_{yx} + CE_{th} + CE_{cz} + CE_{hs} \\ CE_{sc} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot EF_i}{A} \quad (CE_{th} \text{ 和 } CE_{hs} \text{ 计算原理相同}) \\ CE_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot EF_i}{A} \\ CE_{jz} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot EF_i}{A} \quad (CE_{cz} \text{ 计算原理相同}) \end{cases} \quad (1)$$

LCC 计算方式如式(2)所示，其中： C 为建筑生命周期成本； C_m 为材料产生的成本； C_e 为能源消耗产生的成本； C_q 为设备及人工等产生的成本； T 为建筑生命周期； t 为建筑运行年份（计算建筑初始成本时 t 取值为 0）； P_{m0} 、 P_{e0} 和 P_{q0} 为初建年份三者的单价， p_m 、 p_e 和 p_q 为三者的价格指数； d 为折现率。

$$\begin{cases} C = \sum_{t=0}^T (C_{m,t} + C_{e,t} + C_{q,t}) \\ C_{m,t} = \frac{M_t \cdot P_{m0,t} (1 + p_m)^t}{A \cdot (1 + d)^t} \\ C_{e,t} = \frac{E_t \cdot P_{e0,t} (1 + p_e)^t}{A \cdot (1 + d)^t} \\ C_{q,t} = \frac{Q_t \cdot P_{q0,t} (1 + p_q)^t}{A \cdot (1 + d)^t} \end{cases} \quad (2)$$

碳排放回收期 CEPP 计算方式如式(3)所示。一次能源回收期和成本回收期计算方式相同，只需将 CE 替换为生命周期 PED 和生命周期成本，将 CE_{yx} 替换为运行阶段 PED 和运行阶段成本。

$$CEPP = (CE - CE_{yx}) / (-1 \times CE_{yx}) \quad (3)$$

生产阶段材料用量来源为参照建筑设计图纸和暖通空调等技术图纸在 Revit 中建立的建筑信息模型 (building information model, BIM)，然后通过改良因子法^[25]估算构件预期使用寿命和在建筑生命周期内的替换次数，得到替换阶段材料数量。运行阶段建筑预测能耗和可再生能源系统 (renewable energy system, RES) 发电量来自在 DesignBuilder 中建立的能耗模型的模拟结果。运输和设备用量来源为 R-CELLS 预建造和正式建造过程中的销售合同和施工记录等文件。

材料的碳排放因子和一次能耗因子来源以中国本土数据库 CLCD 为主，进口材料及本土数据库中缺失的环境影响因子取自 One Click LCA 数据库 (OCL)、Ökobaudat 数据库及相关文献^[26]。电网碳排放因子来源为中国国家气候战略中心 2014 年公布的华北电网平均碳排放因子 (当前最新版本)，一次能源消耗因子来源为 CLCD 数据库。构件参考使用寿命来自数据库及厂家提供的信息，回收方式、回收率和回收价格等来自数据库和回收机构产业报告。建筑材料和施工设备的初建年份单价来自建筑建造过程中收集的合同文件及厂家报价，能源价格、能源及建材价格指数、贴现率等经济数据参考国家统计局公布的信息设定。

3 清单分析

3.1 材料清单

本研究统计了结构、墙体、屋顶、地面、门窗、设备、可再生能源共 7 个构件系统的材料用量，表 1 为各系统所包含的主要构件及预期使用寿命。

表 1 构件系统

Tab.1 Component systems

系统	主要构件				
结构	 重木架 50年	 木龙骨 50年	 钢节点 50年	 钢底盘 50年	 钢支脚 50年
墙体	 外饰板 50年	 SIP板 50年	 保温层 50年	 石膏板 20年	 内饰板 20年
屋顶	 屋面板 50年	 钢板 50年	 SIP板 50年	 保温板 50年	 内饰板 20年
地面	 地板 25年	 SIP板 50年	 保温板 50年	 FC板 50年	 聚氨酯 50年
门窗	 室外窗 50年	 室内窗 30年	 天窗 50年	 室外门 50年	 室内门 30年
设备	 新风机 15年	 电热膜 50年	 水箱 30年	 管道 25年	 配电箱 50年
可再生能源	 PV 25年	 PVT 25年	 薄膜PV 25年	 蓄电池 15年	 风机 25年

建筑在初建阶段投入建材 94t, 替换阶段投入建材 29t, 生命周期内合计投入材料 123t. 将 R-CELLS 中使用的近 50 种建材划分为金属、木材、保温、门窗、板材、设备及其他共 7 类, 各构件系统的材料组成如图 5 所示, 其中结构和墙体系统的生命周期材料用量最多, 分别为 38t 和 30t. 建筑生命周期内各类材料的流入流出情况如表 2 所示. 在材料流入方面, 生产阶段投入量最多的是木材和金属类, 分别占该阶段材料流入总量的 31% 和 28%; 替换阶段投入量最多的是板材类(如石膏板、石塑地板等)和设备类(如彩钢复合板、单晶硅等), 分别占该阶段材料流入总量的 65% 和 28%. 在材料流出方面, 金属类材料回收率超过 90%, 设备类材料回收率超过 80%, 木材回收率超过 70%, 门窗类和板材类的回收率也超过 50%, 材料总量的 64% 可在拆除后被直接回收利用.

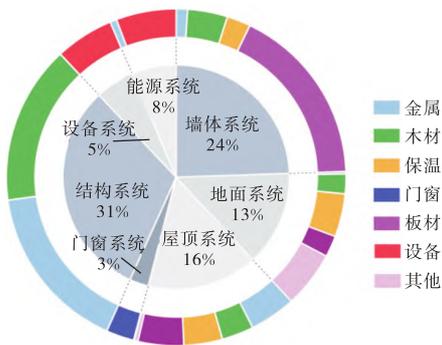


图 5 构件系统的材料组成

Fig.5 Material composition of component systems

表 2 建筑生命周期材料清单

Tab.2 List of materials in building life cycle

材料类别	流入/t		流出/t	
	生产投入	替换投入	直接回收	其他方式
金属	26.03	1.02	25.42	1.63
木材	28.94	0	20.56	8.38
保温	12.14	0.03	1.86	10.31
门窗	3.23	1.14	2.47	1.90
板材	9.93	18.64	16.05	12.52
设备	7.63	8.09	13.25	2.47
其他	6.96	0.79	0.97	6.78

3.2 能耗清单

通过针对严寒地区的被动式设计及高效暖通空调设备等的选用, R-CELLS 预测用电量为 $50 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其中暖通空调占 26%, 生活热水占 12%, 照明占 9%, 其他用电器(包括炊事、插座等)占 53%. 由于风力发电不确定性较强且占比较低, 本研究在模拟建筑可再生能源系统产能时只考虑光伏部分. 预测建筑发电量为 $247 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 约为用电量的 5 倍. 建筑逐月运行能耗及发电量预

测值如表 3 所示, 可见 12 月至次年 1 月用电量较高, 4 月至 6 月、9 月至 10 月用电量较低, 每月发电量均显著高于用电量. 据模拟, 全年运行过程中蓄电池始终有余电, R-CELLS 不需要从电网取电, 余电上网量可达到 $197 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

表 3 运行能耗及发电量清单

Tab.3 List of operational energy consumption and power generation

月份	用电量/ $((\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-2})$	发电量/ $((\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-2})$	月份	用电量/ $((\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-2})$	发电量/ $((\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-2})$
	1 月	5.61		13.95	7 月
2 月	4.28	16.45	8 月	4.07	23.86
3 月	4.14	22.23	9 月	3.50	21.73
4 月	3.78	23.65	10 月	3.69	17.87
5 月	3.63	28.23	11 月	4.35	13.54
6 月	3.42	26.87	12 月	5.29	12.29

3.3 运输和建造清单

表 4 为建造阶段主要建材运输量: 其中帕莱斯外饰板为西班牙进口, 花旗松胶合木为加拿大进口, 通过远洋货轮海运运输; 其他建材为 30t 货车陆运运输, 或直接在当地购买. 表 5 为建造和处置阶段的施工设备台班量: 建造时, 预制模块到达场地后可在 5 天内实现拼接和调平, 施工难度低; 处置时, 模块易拆解, 并可重组使用.

表 4 运输量清单

Tab.4 List of transportation volume

运输方式	运输距离/km	运输质量/t
海运	16 000	1.40
	9 800	15.00
陆运	2 400	2.70
	1 600	15.50
	1 100	13.70
	400	9.40

表 5 施工设备台班量清单

Tab.5 List of construction equipment

阶段	设备类别	台班量
建造	25 t 吊车	20
	30 t 吊车	3
	3 t 叉车	30
处置	30 t 吊车	2
	3 t 叉车	10

4 结果和讨论

4.1 零碳建筑原型 LCA 及 LCC

表 6 为 R-CELLS 现有配置下的 LCA 和 LCC 计算结果. 在环境效益方面, 建筑隐含碳排放为 $36 \text{ kg CO}_2\text{eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 隐含一次能耗为 $681 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 替

换阶段的碳排放是生产阶段的 42%，一次能耗是生产阶段的 21%；环境友好型材料和可再生能源的利用使 R-CELLS 运行和回收阶段产生的碳收益之和为其他阶段碳排放的约 5 倍，能源收益之和为其他阶段一次能源消耗的约 3 倍；R-CELLS 可以在运行 7 年后偿还碳排放，在运行 15 年后偿还能源消耗，进而实现生命周期负碳排放和正能源。在经济效益方面，建筑初始成本为 2.38 万元/m²，高于课题组调研所得的独栋住宅造价(约 1 万元/m²)；生命周期成本增量为 0.86 万元/m²，替换成本是初始成本的 42%，通过余电上网和材料回收利用得到的经济收益可以将其其他阶段产生的成本回收约 4%。

表 6 R-CELLS 的 LCA 和 LCC 计算结果

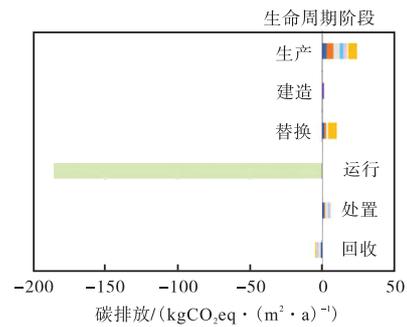
Tab.6 LCA and LCC results of R-CELLS

阶段	碳排放/ (kgCO ₂ eq · (m ² · a) ⁻¹)	一次能耗/(MJ · (m ² · a) ⁻¹)	成本/ (万元 · m ²)
生产	24.05	696.14	2.13
建造	1.22	16.32	0.25
替换	10.05	148.91	0.99
运行	-174.68	-2 338.81	-0.10
处置	5.69	-16.32	0.02
回收	-4.69	-163.96	-0.05
合计	-138.36	-1 657.72	3.24

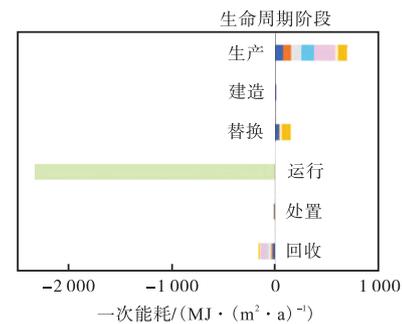
图 6 为建筑生命周期环境影响和成本的构成。对建筑生命周期隐含碳排放贡献最多的是占比 33% 的可再生能源系统，其次是地面和屋顶系统，分别为 19% 和 15%；生产阶段占比最高的是可再生能源、地面和屋顶系统，分别为 25%、20% 和 18%；替换阶段可再生能源系统占比 60%，超过其他构件系统之和。对建筑生命周期隐含一次能耗贡献最多的是可再生能源、结构和门窗系统，分别占比 24%、21% 和 19%；生产阶段占比最高的是结构、门窗和屋顶系统，分别占比 30%、17% 和 15%；替换阶段可再生能源系统占比 57%，墙体系统占比 24%，设备系统占比 12%。对建筑生命周期成本贡献最多的是占比 21% 的结构系统，其次是占比均为 16% 的设备和可再生能源系统；初始成本中占比最多的是结构、门窗和设备系统，分别为 24%、15% 和 14%；替换成本中占比最多的则是可再生能源、设备和墙体系统，分别为 27%、18% 和 16%，结构系统在替换阶段的成本是由维护(B2)产生的。

4.2 减配方案 LCA 和 LCC

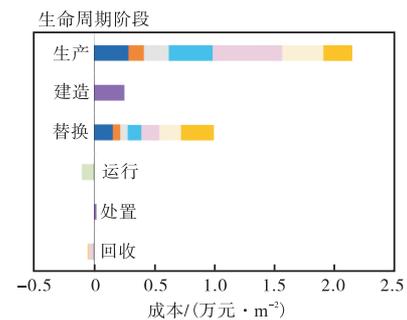
为满足竞赛提出的严格控制室内环境和离网运行等要求，R-CELLS 现有配置超过常规建筑标准。以提高这一零碳建筑原型的市场推广可行性为目标，本



(a) 碳排放



(b) 一次能耗



(c) 成本



图 6 建筑生命周期环境影响及成本构成

Fig.6 Composition of environmental impacts and cost in building life cycle

研究将根据以上 LCA 及 LCC 分析结果提出减配方案。

4.2.1 仅调整可再生能源系统

根据前文分析，可再生能源系统对 R-CELLS 隐含环境影响和生命周期成本的贡献均较高。若只要在生命周期内实现零碳排放和零一次能耗，原方案的可再生能源系统有较大减配空间。

本研究保持建筑主体不变，以可再生能源系统装配置(光伏装机量及蓄电池容量等占原方案的百分比)为变量，得到不同配置对应的建筑 LCA 和 LCC 如图 7 所示，其中可再生能源系统装机量超过原方案的 20% 可实现运行阶段零碳排放和零一次能源消耗，超过原方案的 35% 可实现生命周期零碳排放，超过原方案的 40% 可实现生命周期零一次能耗。

可再生能源系统引起的初始成本变化幅度均为 10%，生命周期成本变化幅度为 11%。

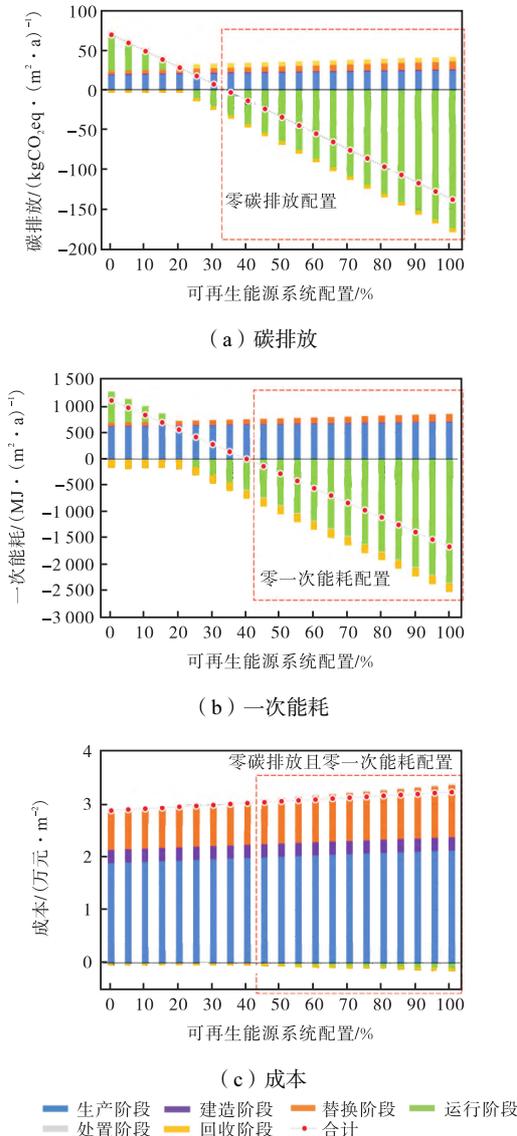


图 7 不同可再生能源系统配置下的建筑 LCA 及 LCC
Fig.7 LCA and LCC under different renewable energy system scenarios

将能满足生命周期零碳排放和零一次能耗的最低可再生能源系统配置(原方案的 45%)作为减配方案 A, 对应的建筑 LCA 及 LCC 如表 7 所示, 其中隐含碳排放为 30 kgCO₂eq/(m² · a), 隐含一次能耗为 589 MJ/(m² · a); 可在运行 20 年后偿还碳排放, 运行 50 年后偿还一次能耗; 初始成本为 2.25 万元/m², 生命周期成本增量为 0.77 万元/m²。

4.2.2 调整全部构件系统

减配方案 B 以不改变建筑运行能耗并实现生命周期零碳排放和零一次能耗为前提, 根据 R-CELLS 生命周期性能分析结果将各构件系统中对环境影响

表 7 减配方案 A 的 LCA 和 LCC 计算结果

Tab.7 LCA and LCC results under Scenario A

阶段	碳排放/(kgCO ₂ eq · (m ² · a) ⁻¹)	一次能耗/(MJ · (m ² · a) ⁻¹)	成本/(万元 · m ⁻²)
生产	20.79	649.45	2.00
建造	1.22	10.74	0.25
替换	6.73	102.05	0.83
运行	-54.27	-726.67	-0.03
处置	5.66	-15.38	0.02
回收	-4.36	-157.84	-0.05
合计	-24.23	-137.65	3.02

或成本贡献突出的构件替换为相同 U 值(传热系数)但环境影响或成本更低的构件. 表 8 为减配方案 B 各系统配置与原方案的对比. 表 9 为方案配置调整涉及到的 LCA 及 LCC 背景数据; 与原方案相比, 减配方案 B 的结构系统初始成本降低了 70 万元, 设备系统初始成本降低了 40 万元, 可再生能源系统初始成本降低了 34 万元; 减配方案使用的雪松外饰面板、铝镁锰屋面板的初始成本分别为原方案的 27%和 10%, 虽然二者在建筑生命周期内均需替换, 但生命周期成本仍将低于原方案; 减配方案使用的 MDF 内饰板和木地板与原方案初始成本接近, 但环境影响因子明显降低。

表 8 方案配置对比

Tab.8 Comparison between two scenarios

条目	原方案	减配方案 B
BIM 模型		
结构	重木结构加钢底盘	轻钢结构加钢底盘
墙体	10 mm 帕莱斯外饰板、14 mm 铝镁复合内饰板	6 mm 雪松外饰板、3 mm MDF 内饰板
地面	5 mm 石塑地板, 阳光房有相变材料	8 mm 木地板, 阳光房无相变材料
屋顶	0.7 mm 钛锌屋面板	1.5 mm 铝镁锰屋面板
门窗	智能天窗, 西立面有动态遮阳构件	普通天窗, 西立面无动态遮阳构件
设备	一体式新风机, 有直流配电设计和智能控制	分体式新风机, 无直流配电设计和智能控制
能源	屋顶大坡 PV 满铺, 有蓄电池、薄膜光伏、螺旋风机	屋顶大坡 45%的面积铺设 PV, 无蓄电池、薄膜光伏、螺旋风机

表 10 为减配方案 B 建筑的 LCA 和 LCC 计算结果, 其中隐含碳排放为 36 kgCO₂eq/(m² · a), 隐含一次能耗为 462 MJ/(m² · a); 减配方案 B 可在运行 49 年后偿还碳排放, 运行 50 年后偿还一次能耗; 初始成本为 1.03 万元/m², 生命周期成本增量为 0.32 万元/m²。

表 9 LCA 及 LCC 背景数据

Tab.9 Background data of LCA and LCC

条目	碳排放因子	一次能耗因子	初始成本	替换次数
重木结构	-1.09 kgCO ₂ eq/kg	22.46 MJ/kg	80.00 万元/套	0
轻钢结构	3.30 kgCO ₂ eq/kg	-2.71 MJ/kg	10.00 万元/套	0
帕莱斯板	6.56 kgCO ₂ eq/m ²	-121.88 MJ/m ²	0.11 万元/m ²	0
雪松板	-3.66 kgCO ₂ eq/m ²	75.30 MJ/m ²	0.03 万元/m ²	1
铝锰板	2.03 kgCO ₂ eq/m ²	155.96 MJ/m ²	0.02 万元/m ²	2
MDF 板	-0.06 kgCO ₂ eq/m ²	-0.87 MJ/m ²	0.01 万元/m ²	2
石塑地板	16.66 kgCO ₂ eq/m ²	77.84 MJ/m ²	0.02 万元/m ²	1
木地板	-5.61 kgCO ₂ eq/m ²	115.28 MJ/m ²	0.02 万元/m ²	1
相变材料	361.00 kgCO ₂ eq/套	14 562.00 MJ/套	2.00 万元/套	3
钛锌板	15.45 kgCO ₂ eq/m ²	190.58 MJ/m ²	0.10 万元/m ²	0
铝镁锰板	20.88 kgCO ₂ eq/m ²	375.92 MJ/m ²	0.01 万元/m ²	1
智能天窗	950.00 kgCO ₂ eq/樘	43 536.00 MJ/樘	8.00 万元/樘	0
普通天窗	950.00 kgCO ₂ eq/樘	43 536.00 MJ/樘	2.00 万元/樘	0
动态遮阳	107.00 kgCO ₂ eq/套	1 925.00 MJ/套	9.75 万元/套	3
一体新风	138.00 kgCO ₂ eq/套	2 895.00 MJ/套	6.00 万元/套	3
分体新风	138.00 kgCO ₂ eq/套	2 895.00 MJ/套	2.00 万元/套	3
直流改造	—	—	22.60 万元/项	—
智能控制	—	—	13.00 万元/项	—
PV 板	141.47 kgCO ₂ eq/m ²	1 732.34 MJ/m ²	0.07 万元/m ²	1
蓄电池	2 700.00 kgCO ₂ eq/套	46 574.00 MJ/套	13.76 万元/套	3
薄膜光伏	250.79 kgCO ₂ eq/m ²	3 698.70 MJ/m ²	0.16 万元/m ²	1
螺旋风机	73.00 kgCO ₂ eq/台	954.00 MJ/台	0.80 万元/台	1

表 10 减配方案 B 的 LCA 和 LCC 计算结果

Tab.10 LCA and LCC results under Scenario B

阶段	碳排放/(kgCO ₂ eq · (m ² · a) ⁻¹)	一次能耗/(MJ · (m ² · a) ⁻¹)	成本/(万元 · m ²)
生产	30.33	685.16	0.84
建造	0.69	6.70	0.19
替换	3.71	55.80	0.42
运行	-35.45	-474.60	-0.02
处置	4.18	-18.89	0.02
回收	-3.70	-266.47	-0.10
合计	-0.24	-12.30	1.35

4.2.3 不同配置下的建筑 LCA 及 LCC 对比

如图 8 所示,与原方案相比,减配方案 A、B 的运行阶段环境收益分别降低了 69%和 80%;生产阶段减配方案 A 的碳排放降低了 14%,方案 B 提高了 26%,替换阶段分别降低了 33%和 63%,隐含碳排放分别降低了 17%和 1%;减配方案 A、B 生产阶段一次能耗分别降低了 7%和 2%,替换阶段分别降低了 31%和 63%,隐含一次能耗分别降低了 14%和 32%。减配方案运行收益降低约 80%;减配方案 A、B 的初始成本分别降低了 5%和 57%,替换成本降低了 31%和 63%,生命周期成本降低了 6%和 59%。减配方案的隐含碳排放及隐含一次能耗均低于原方案,减配方案 B 的初始成本接近常规独立住宅,短期和长期成本均显著低于原方案。

图 9 为 3 种配置下各构件系统对环境影响和成

本的贡献对比。在碳排放方面,3 种配置下地面和屋顶系统占比均较高;原方案占比最高的是可再生能源系统,为 33%;减配方案 A 中占比最高的是结构系统,为 42%。在一次能耗方面,3 种配置下结构和门窗系统占比均较高;可再生能源系统在原方案中占比 24%,在减配方案 A、B 中占比分别为 12%和 5%。在成本方面,原方案和减配方案 A 中占比最高的是结构和设备系统,减配方案 B 中占比最高的是墙体和门窗系统。



图 8 不同生命周期阶段性能对比

Fig.8 Performance comparison at different life cycle stages

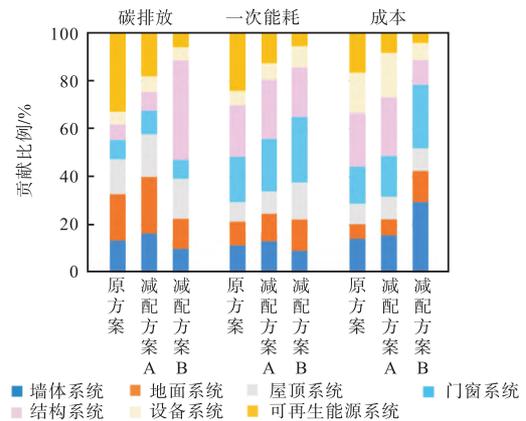


图 9 不同配置下的构件系统贡献对比

Fig.9 Contribution comparison of component systems under different scenarios

图 10 为 3 种配置下的建筑生命周期累积环境影响和成本,其中减配方案 A、B 的碳偿还时间比原方案分别推迟 13 年和 42 年;两种减配方案均在回收阶段才能实现能源偿还,比原方案推迟 35 年;减配方案 B 的初始成本和生命周期成本增量与其他配置相比降低幅度均超过 50%。减配方案 A、B 的环境效益接近,减配方案 B 的经济效益显著优于原方案和减配方案 A。

4.3 讨论

4.3.1 本研究与其他文献对比

基于欧洲案例的综述文献[7]表明,现有高能效住宅的隐含碳排放为 7~13 kgCO₂eq/(m² · a)。R-

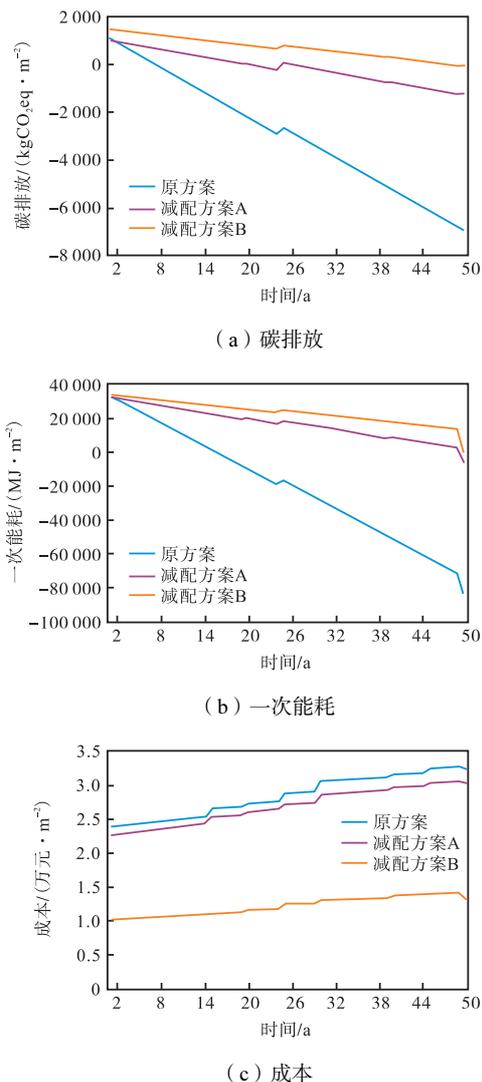


图 10 不同配置下的生命周期累积环境影响及成本对比
 Fig.10 Comparison of accumulative environmental impacts and cost in life cycle under different scenarios

CELLS 隐含碳排放高于这一范围的原因包括: R-CELLS 针对严寒地区设计,用材密集,并使用高配置可再生能源系统,减碳效益显著高于一般零碳建筑,因此其保温材料和光伏等产生的隐含碳排放较高;现有研究中的高效住宅计算隐含碳排放时往往只涉及生产和建造阶段,不包括构件替换、拆除回收等阶段,并将设备系统、可再生能源系统等排除在外;R-CELLS 选用的 LCA 背景数据以本土数据为主,由于生产工艺和能源结构等差异,中国材料生产环境影响高于部分国家^[19],使用中国本土背景数据计算出的隐含碳排放高于用欧洲或全球通用数据对同一案例的计算结果^[20].

建筑预期使用寿命同为 50 年时,国内与 R-CELLS 位于相同地区的零碳独栋住宅^[19]的隐含碳排放为 $60 \text{ kgCO}_2\text{eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,约为 R-CELLS 的 1.6 倍,

体现了 R-CELLS 使用环境友好型材料对降低建筑环境影响的作用. 但 R-CELLS 隐含环境影响仍高于《零碳建筑技术标准(征求意见稿)》^[6]中规定的全过程零碳建筑隐含碳排放限制 $350 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ (即 $7 \text{ kgCO}_2\text{eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$), 原因包括: 文献[6]对不同气候区、不同类型的建筑采取相同的隐含碳排放限值,对严寒地区独栋住宅而言实现难度较大;文献[6]中隐含碳排放计算涉及建筑生产、运输、建造、拆除,但不包含构件替换,且没有规定是否计算设备和可再生能源系统;零碳建筑与普通建筑相比使用更多高性能材料,隐含碳排放通常更高,且中国建筑材料的碳排放因子与欧洲国家相比不具备优势^[27],在这些前提下文献[6]中的零碳建筑隐含碳排放限值仍低于现有研究中的欧洲普通新建建筑隐含碳排放基准值(图 11)^[28]. 因此,建议当中国《零碳建筑技术标准》对隐含碳排放做出规定时,需根据气候区和建筑类型等提出差异化要求,进一步明确计算边界,适当提高限值,或使用参考值替代限值.

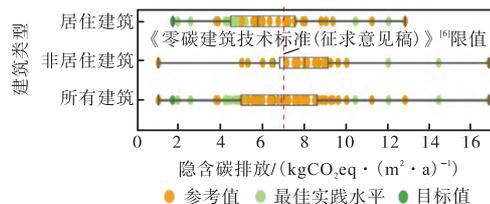


图 11 欧洲普通新建建筑隐含碳排放基准值
 Fig.11 Embodied carbon emission benchmark values of new ordinary buildings in Europe

4.3.2 权衡环境和经济效益的方案比选

LCA 与 LCC 评估产生的多维结果难以直接比较,通过多准则决策(multi criteria decision making, MCDM)可以权衡方案的环境和经济效益. 现有研究尚未就 MCDM 评价标准和最佳方法达成共识^[29],层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和帕累托法(Pareto analysis)是现有研究中应用较为广泛的两类方法: AHP 通过层次结构和专家判断为各评价指标赋予权重,进而计算方案最终得分用于比选^[30];帕累托法不需要将各指标标准化,依托原始数据直观展示方案的哪些性能指标优于其他方案^[31]. 基于 AHP 法的决策结果高度依赖权重设定的准确性,而帕累托法则可通过整合用户关注的重点问题来辅助用户根据偏好进行决策.

为零碳建筑的环境与经济效益准确设置权重对专业性要求较高,因此本研究建议在实践中基于帕累托法选取不同设计目标下的最优方案. 本研究选取了用户较为关心的碳排放回收期、一次能耗回收期和

初始成本这3个指标,基于帕累托法比选前文提出的以 R-CELLS 为原型的方案,见图 12. 3个方案均能实现生命周期零碳排放和零一次能耗,当以实现更高环境效益为设计目标时,碳排放和一次能耗回收期均更短的原方案是最优解;当以更易于市场推广为设计目标时,初始成本显著低于其他方案的减配方案 B 是最优解;在两种设计目标下,减配方案 A 均不具有优势。

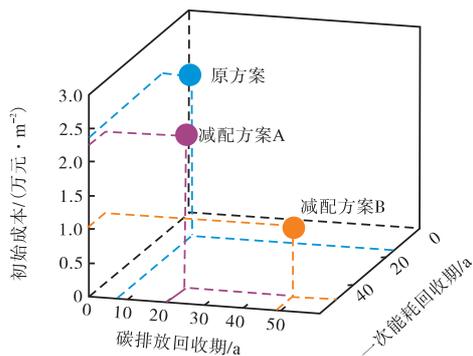


图 12 基于帕累托法的方案比选

Fig.12 Scenario comparison based on Pareto analysis

4.3.3 研究局限

本文所使用的零碳建筑环境和经济效益综合评估及权衡方法可推广至其他研究,但数值性结论出自对单一案例的分析结果,适用范围相对有限,难以与其他类型的建筑案例直接比较. 比如各构件系统对环境影响和成本的贡献排序,在相同原型的不同配置之间尚且存在差异,不能直接套用至其他建筑,应具体案例具体分析或扩大研究范围以获得普适性结论。

此外,本研究没有考虑不确定性^[32]的影响. 图 13 为十项全能竞赛期间 R-CELLS 实测与预测运行性能的对比,其中实测平均发电碳收益为预测值的 94%,平均用电碳排放为预测值的 3.5 倍. 可见建筑投入运行后在发电侧和用电侧均存在不确定性: 发电差异主要由实际气象条件与模拟所用典型气象文件间的不同导致;用能差异则是因为竞赛期间建筑的实际运行情况与模拟时设置的运行时刻表和空间占用率不同. R-CELLS 原方案采取的风光互补发电、储能和韧性管理算法、动态建筑构件等均有利于应对运行不确定性. 本文使用的基于确定性模型的生命周期性能评价方法计算了此类技术的材料和成本投入,但难以评估它们的潜在收益. 与此同时,材料和能源环境影响因子等也会发生变化. 例如电网碳排放因子将随着非化石能源发电量占比的提高而逐渐降低,区域差异也将随着全国统一电力市场体系的建成而缩小^[33]. 根据这些变化趋势,《零碳建筑技术标准(征

求意见稿)》^[6]将电网碳排放因子设置为 $0.50 \text{ kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$,低于本研究依据《建筑碳排放计算标准》^[5]所使用的华北电网平均碳排放因子 $0.88 \text{ kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$. 电网碳排放因子的降低将导致建筑碳偿还年限延长. 在这种情况下, R-CELLS 原方案及减配方案 A 实现生命周期零碳排放的可能性高于减配方案 B. 综上,建议未来基于考虑不确定性的 LCA 方法进一步探讨零碳建筑的稳健性问题。

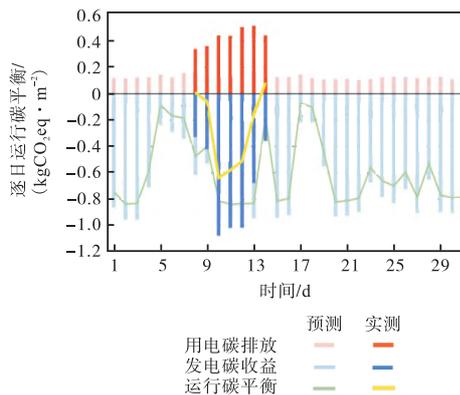


图 13 运行阶段实测与预测碳排放对比

Fig.13 Comparison between observed and predicted operational carbon emissions

5 结语和展望

本文对严寒地区零碳独栋住宅原型 R-CELLS 进行了较为全面的 LCA 和 LCC 综合分析. 结果表明: 被动式设计和环境友好型材料的选用使建筑运行能耗低至 $50 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 生命周期隐含碳排放和一次能源消耗分别为 $36 \text{ kgCO}_2\text{eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $681 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 通过利用可再生能源, 建筑可在运行约 7 年和 15 年后分别偿还碳排放和一次能源消耗, 并最终实现生命周期负碳排放和正能源, 净减碳 $138 \text{ kgCO}_2\text{eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 产能 $1658 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 环境效益突出; 但建筑初始成本为 $2.38 \text{ 万元}/\text{m}^2$, 生命周期成本为 $3.24 \text{ 万元}/\text{m}^2$, 不利于市场推广。

为了平衡建筑的环境与经济效益, 研究以在 50 年建筑参考寿命内实现生命周期零碳排放和零一次能耗为前提, 根据环境影响及成本的构成提出两种减配方案: 减配方案 A 保持建筑主体不变, 降低可再生能源系统配置至原方案的 45%, 建筑初成本 $2.25 \text{ 万元}/\text{m}^2$, 生命周期成本 $3.02 \text{ 万元}/\text{m}^2$, 生命周期净减碳 $24 \text{ kgCO}_2\text{eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 减配方案 B 替换各构件系统中对成本或环境影响贡献突出的构件, 可降低建筑初始成本至 $1.03 \text{ 万元}/\text{m}^2$, 降低生命周期成本至 $1.35 \text{ 万元}/\text{m}^2$, 生命周期净减碳 $0.24 \text{ kgCO}_2\text{eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 减配方

案 B 环境效益略低于减配方案 A, 经济效益显著提升。

本研究建议中国《零碳建筑技术标准》进一步明确隐含碳排放计算边界, 为不同类型建筑设置差异化限值, 或改为设置参考值。建议使用帕累托法权衡环境和经济效益, 供用户在不同设计目标下选择最优零碳建筑方案。本研究基于单一案例和确定性的生命周期评价, 未来可将本文所使用的零碳建筑环境和经济效益综合评估及权衡方法推广至其他案例和建筑类型的研究, 并进一步考虑不确定性对建筑生命周期性能的影响。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Hu S, Guo F, et al. Assessing the potential of decarbonizing China's building construction by 2060 and synergy with industry sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 359: 132086.
- [2] IEA. Buildings: A source of enormous untapped efficiency potential[EB/OL]. <https://www.iea.org/topics/buildings>, 2023-02-10.
- [3] Pan W. System boundaries of zero carbon buildings[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 37: 424-434.
- [4] 张时聪, 刘常平, 王珂, 等. 零碳建筑定义及碳排放计算边界研究[J]. *建筑科学*, 2022, 38(12): 283-290.
Zhang Shicong, Liu Changping, Wang Ke, et al. Research on definition and calculation boundary of zero carbon building[J]. *Building Science*, 2022, 38(12): 283-290 (in Chinese).
- [5] GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GB/T 51366—2019 Standard for Building Carbon Emission Calculation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019 (in Chinese).
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部办公厅关于国家标准《零碳建筑技术标准(征求意见稿)》公开征求意见的通知[EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202307/20230724_773337.html, 2023-08-12.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Soliciting public comments on the national standard *Technical Standard for Zero Carbon Buildings* (exposure draft) [EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202307/20230724_773337.html, 2023-08-12 (in Chinese).
- [7] Röck M, Saade M R M, Balouktsi M, et al. Embodied GHG emissions of buildings—The hidden challenge for effective climate change mitigation[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114107.
- [8] 齐新竹, 史立刚, 卡琳·克罗克福斯, 等. 中芬居住建筑生命周期碳排放测算及环境影响对比研究[J]. *世界建筑*, 2023, 391(1): 104-109.
Qi Xinzhu, Shi Ligang, Krokfors Karin, et al. A comparative study of carbon emission calculations and environmental impacts in the life cycle assessment of residential buildings in China and Finland[J]. *World Architecture*, 2023, 391(1): 104-109 (in Chinese).
- [9] Birgisdottir H, Moncaster A, Wiberg A H, et al. IEA EBC annex 57 'evaluation of embodied energy and CO₂eq for building construction'[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 154: 72-80.
- [10] Valančius K, Vilutienė T, Rogoža A. Analysis of the payback of primary energy and CO₂ emissions in relation to the increase of thermal resistance of a building[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 179: 39-48.
- [11] Grinham J, Fjeldheim H, Yan B, et al. Zero-carbon balance: The case of HouseZero[J]. *Building and Environment*, 2022, 207: 108511.
- [12] Wang Y Y, Yang X Y, Hou Q Y, et al. Quantitative study on the life-cycle carbon emissions of a nearly zero energy building in the severe cold zones of China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1448.
- [13] Pan W, Pan M. Drivers, barriers and strategies for zero carbon buildings in high-rise high-density cities[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 242: 110970.
- [14] CEN-EN 15978 Sustainability of Construction Works—Assessment of Environmental Performance of Buildings—Calculation Method[S]. London, UK: British Standards Institution, 2011.
- [15] Saade M R M, Guest G, Amor B. Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence?[J]. *Building and Environment*, 2020, 167: 106449.
- [16] De Wolf C, Pomponi F, Moncaster A. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 140: 68-80.
- [17] Lu K, Jiang X Y, Yu J Y, et al. Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review[J]. *Journal of*

- Cleaner Production, 2021, 285: 125438.
- [18] Maierhofer D, Röck M, Saade M R M, et al. Critical life cycle assessment of the innovative passive nZEB building concept 'be 2226' in view of net-zero carbon targets[J]. Building and Environment, 2022, 223: 109476.
- [19] 张军军, 张宏, 叶红雨, 等. 全生命周期零碳建筑控碳技术与设计方法研究——以“Solar Ark 3.0”为例[J]. 建筑技艺, 2022, 28(10): 36-39.
Zhang Junjun, Zhang Hong, Ye Hongyu, et al. Research on carbon control technology and design method for zero-carbon buildings in the full life cycle: Taking “Solar Ark 3.0” as an example[J]. Architecture Technique, 2022, 28(10): 36-39(in Chinese).
- [20] Moraveji Z K, Heravi G, Rostami M. Evaluating the economic feasibility of designing zero carbon envelope buildings: A case study of a commercial building in Iran[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022, 46(2): 1723-1736.
- [21] Hajare A, Elwakil E. Integration of life cycle cost analysis and energy simulation for building energy-efficient strategies assessment[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102293.
- [22] Liu Y S, Xue S Q, Guo X H, et al. Towards the goal of zero-carbon building retrofitting with variant application degrees of low-carbon technologies: Mitigation potential and cost-benefit analysis for a kindergarten in Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 393: 136316.
- [23] 杨 崑, 韩晨阳, 杨向群. 零碳太阳能建筑的探索与回顾——以 2022 中国国际太阳能十项全能竞赛作品“R-CELLS”为例[J]. 建筑学报, 2022(12): 11-17.
Yang Wei, Han Chenyang, Yang Xiangqun. Exploration and review of zero carbon solar energy building design: The R-CELLS prototype at Solar Decathlon China 2022[J]. Architectural Journal, 2022(12): 11-17(in Chinese).
- [24] 刘魁星, 王欣, 张嘉睿, 等. 基于“光储直柔”能源系统的建筑智慧能源管理——以 2022 中国国际太阳能十项全能竞赛作品 R-CELLS 为例[J]. 当代建筑, 2023(8): 41-45.
Liu Kuixing, Wang Xin, Zhang Jiarui, et al. Building intelligent energy management based on the “photo-voltaic, energy storage, direct current, flexibility” energy system: Taking R-CELLS of SDC2022 as an example[J]. Contemporary Architecture, 2023(8): 41-45(in Chinese).
- [25] 杨 崑, 黄静雯, 毕雪皎. 考虑关联关系的建筑构件使用寿命预估方法[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(3): 15-23.
Yang Wei, Huang Jingwen, Bi Xuejiao. Estimating building element service life with consideration of related component[J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(3): 15-23(in Chinese).
- [26] Zhang X C, Zheng R Y, Wang F L. Uncertainty in the life cycle assessment of building emissions: A comparative case study of stochastic approaches[J]. Building and Environment, 2019, 147: 121-131.
- [27] Li Q Y, Yang W, Kohler N, et al. A BIM-LCA approach for the whole design process of green buildings in the Chinese context[J]. Sustainability, 2023, 15(4): 3629.
- [28] Trigaux D, Allacker K, Debacker W. Environmental benchmarks for buildings: A critical literature review[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2021, 26(1): 1-21.
- [29] Hu M. Building impact assessment—A combined life cycle assessment and multi-criteria decision analysis framework[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 150: 104410.
- [30] Al-Saggaf A, Nasir H, Hegazy T. An analytical hierarchy process-based system to evaluate the life-cycle performance of buildings at early design stage[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101364.
- [31] Jung Y, Heo Y, Lee H. Multi-objective optimization of the multi-story residential building with passive design strategy in Republic of Korea[J]. Building and Environment, 2021, 203: 108061.
- [32] Li J, Lützkendorf T, Balouktsi M, et al. Identifying uncertainties in the whole life carbon assessment of buildings: Sources, types, and potential actions[J]. Building and Environment, 2023, 244: 110779.
- [33] 张时聪, 王珂, 徐伟. 建筑碳排放标准化计算的电力碳排放因子取值研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(2): 46-57.
Zhang Shicong, Wang Ke, Xu Wei. Study on the value of electricity emission factor for standardized calculation of building carbon emission[J]. Building Science, 2023, 39(2): 46-57(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)