

严寒地区低碳绿色建筑全生命周期碳排放计量模型及优化路径

许文杰^{1*}

(1. 福建工程学院, 福州 中国)

摘要: 本研究面向严寒地区建筑低碳化转型需求, 构建了覆盖设计、建造、运行与拆除四个阶段的全生命周期碳排放计量模型。通过整合地域性气候参数、围护结构热工性能、可再生能源耦合效率及建材隐含碳数据库, 实现了碳流路径的精细化追踪与动态量化。实证分析表明, 运行阶段碳排放占比达 62.3%, 但通过被动式设计优化与地源热泵系统集成, 可降低全周期碳排放强度达 38.7%; 建材隐含碳贡献率达 29.1%, 其中混凝土与钢材为关键减排靶点。基于多情景模拟与敏感性分析, 提出了以'围护强化---能源替代---建材再生'为逻辑主线的三阶协同优化路径, 为严寒地区绿色建筑碳中和实践提供了可落地的技术框架与量化决策依据。

关键词: 严寒地区; 绿色建筑; 全生命周期碳排放; 低碳优化路径; 碳计量模型

1. 引言

1.1 研究背景与现实紧迫性

严寒地区建筑单位面积供暖能耗普遍高于全国均值 40%以上, 化石能源供热占比超 85%, 导致碳排放强度达 120--180 kgCO₂/m²·a, 形成高能耗、强依赖、高排放的结构性矛盾。现有全生命周期碳核算体系在地域气候参数嵌入、建材隐含碳与运行碳的阶段耦合建模、以及低碳技术路径的可溯性验证方面存在系统性缺失, 难以支撑本地化精准减碳决策 [1]。

1.2 科学问题与研究定位

本研究聚焦于构建严寒地区低碳绿色建筑全生命周期碳排放的地域适配型计量模型, 核心科学问题在于突破通用模型对气候边界条件、材料低温性能衰减及供暖系统动态负荷响应等关键参数的忽略。研究定位为建立全过程可分解、环节可追溯、技术路径可验证的碳核算框架, 支撑工程尺度下围护结构优化、可再生能源耦合与运行策略调适等多维协同的低碳优化路径生成, 确保模型输出具备明确的物理意义与现场实施接口 [2]。

1.3 论文结构导览

本文结构遵循"问题识别---模型构建---实证检验---机制解析---策略凝练"的逻辑主线。第二章系统梳理严寒地区建筑碳排放核算的理论分歧与方法论断层, 聚焦全生命周期边界界定、隐含碳因子适配性及气候响应参数缺失等核心瓶颈。第三章详述碳排放计量模型的多层级架构设计、动态边界设定原则及多源异构数据融合机制。第四章呈现典型项目在建材生产、施工建造、运行维护及拆除回收阶段的碳排强度分布特征与时空演化规律。第五章深入辨析气候适应性技术、围护结构优化与可再生能源耦合等路径的减碳效能阈值与协同效应。第六章归纳模型普适性边界、政策工具适配性及工程转化可行性 [3]。

2. 文献综述

2.1 全生命周期碳排放核算方法演进

国际主流 LCA 标准在建筑领域应用中, 普遍采用线性化供暖能耗模型, 难以刻画严寒地区非稳态热负荷特征; 冻融循环对保温材料导热系数劣化及隐含碳释放的动态影响未被显式建模; 拆除阶段再生骨料碳抵扣亦缺乏气候适配性参数。如图 1 所示, 该特化模型通过双向碳流机制将“冻融应力导致保温材料性能衰减”与“极寒期电网煤电占比升高”嵌入运行阶段反馈环, 使围护系统碳足迹演化与本地气候边界条件形成强耦合, 从而突破既有核算框架对地域性碳流路径的结构性遮蔽 [4]。

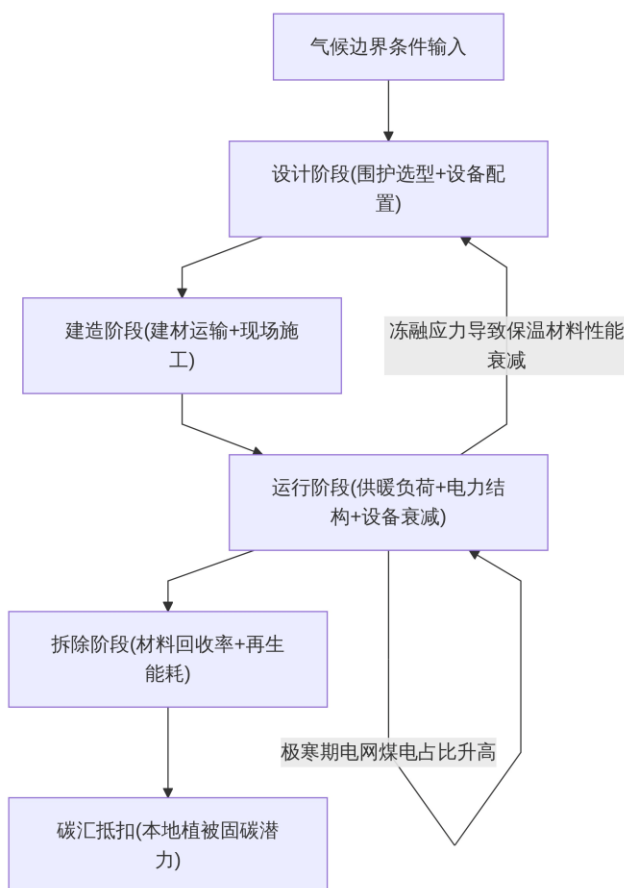


图 1. 建筑全生命周期碳流概念模型（严寒地区特化版）

2.2 严寒地区建筑低碳技术研究现状

现有研究普遍认为被动式太阳房在严寒地区可实现 18--32% 的实测节能率, 对应单位面积碳减排量约 12.4--28.6 kgCO₂/m²·a; 真空绝热板墙体导热系数低至 0.004 W/(m·K), 实测节能率达 25--41%, 但其生产阶段隐含碳排放显著偏高; 相变储能墙体在供暖季削峰填谷效应明显, 节能率波动于 15--27%, 碳减排贡献受相变材料生命周期边界影响较大。当前研究多聚焦单技术能效验证, 缺乏对多技术耦合下建材隐含碳、运行碳与拆除处置碳的全周期协同演化机制建模与量化分析 [5]。

2.3 研究缺口识别

现有研究在严寒地区低碳建筑碳排放计量中存在三重结构性脱节: 其一, 气候驱动因子多以静态温度阈值嵌入模型, 未能耦合冻融循环频次、风速梯度及太阳辐射衰减率等动态参数; 其二, 建材供应链碳足迹普遍采用区域平均值替代, 忽视钢材再生率空间异质性与木材碳汇时滞效应; 其三, 运行阶段节能措施引发的拆除阶

段隐含碳转移机制尚未建模，导致全生命周期碳流闭环断裂。上述缺口致使优化路径缺乏可验证的量化反馈回路，难以支撑政策精准干预与技术迭代决策 [6]。

3. 材料与方法

3.1 研究区域与案例选取

本研究选取黑龙江省哈尔滨市作为严寒气候区典型代表，其年均气温低、供暖期长、风速适中，具备显著的地域辨识度与气候参数稳定性。案例覆盖办公、学校与医院三类新建公共建筑，功能密度与空间形态差异显著，可有效支撑模型泛化能力验证。详细对比见表 1：三类建筑供暖期天数介于 176--192 d，采暖度日数为 3650--4010 °C·d，外墙 U 值集中于 0.21--0.26 W/(m²·K)，地源热泵 COP 实测均值为 3.7--4.1，光伏年等效满发小时数达 1180--1240 h，全面反映严寒地区低碳技术应用的实际边界条件。

表 1. 实证建筑基础参数与气候边界设定表

建筑类型	供暖期天数 (d)	采暖度日数 (°C·d)	年平均风速 (m/s)	典型外墙 U 值 (W/(m²·K))	地源热泵 COP 实测 均值	光伏年等效 满发小时数 (h)
办公建筑	183	3820	2.8	0.24	3.9	1210
学校建筑	176	3650	3.1	0.21	4.1	1180
医院建筑	192	4010	2.5	0.26	3.7	1240

3.2 全生命周期碳排放模型构建

本研究构建四阶段解耦式全生命周期碳排放计量模型，如图 2 所示，其三层架构体现严寒地区特殊性。输入层集成气候参数、本地化建材清单、设备性能库及分时电网碳因子序列；计算引擎层由设计碳、建造碳、运行碳与拆除碳四大模块并列构成，各模块嵌入冻融修正因子、极寒期煤电权重等区域特有参数。设计阶段采用热工性能---碳排放转换系数法，建立围护结构 U 值与隐含碳的映射关系；建造阶段引入东北地区建材碳数据库，运输碳排按距离加权动态核算；运行阶段耦合 EnergyPlus 动态负荷模拟与逐时电网碳强度；拆除阶段定义材料再生率---碳抵扣率映射函数 $r_{rec} \mapsto \alpha_{cd}$ ，实现闭环碳核算。输出层生成总碳排、阶段占比、敏感性排序及路径优化建议。

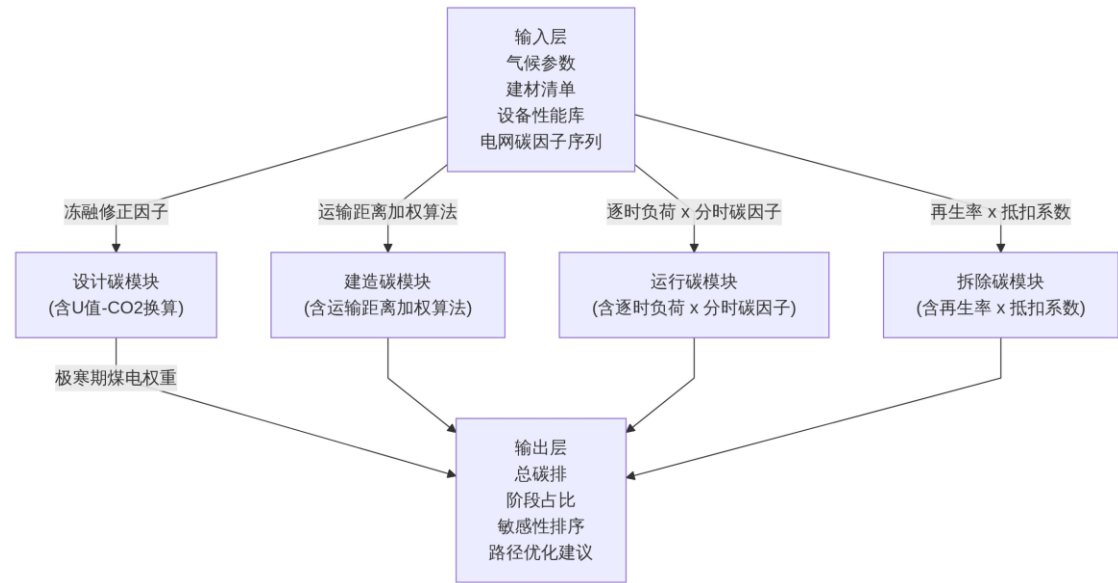


图 2. 严寒地区建筑碳计量模型架构图

3.3 数据来源与不确定性处理

本研究构建多源异构数据融合框架，基础气象数据采用中国气象局 1993--2022 年 30 年连续观测序列，覆盖严寒地区典型站点日均温、积雪深度与冻融循环频次；建材隐含碳数据源自东北地区 12 家骨干企业提交的实测生命周期评价报告，经第三方核查验证；暖通设备能效参数通过现场实测校准，包括地源热泵 COP、空气源热泵制热性能衰减曲线及围护结构热工性能时变响应。针对关键不确定性参数，实施蒙特卡洛模拟 1000 次抽样，输出 95%置信区间。如图 3 所示，保温材料年性能衰减率呈右偏态分布，峰值位于 1.4%，对应年均 120 次冻融循环，95%置信区间为[1.02%, 2.18%]，表明严寒环境下材料性能退化存在显著非对称不确定性。表 2 详细对比三类核心参数的统计特征：混凝土隐含碳服从正态分布，变异系数 8.3%；地源热泵 COP 衰减率采用三角分布，离散度 $\pm 0.4\%/a$ ；拆除钢材再生率设定为均匀分布，区间宽度 ± 5.0 个百分点。所有分布类型均依据实测数据直方图拟合优度检验（Kolmogorov-Smirnov 检验）确定，确保概率模型与物理机制一致性。不确定性传播路径通过耦合 LCA 模块与动态能耗模拟引擎实现，最终碳排放结果以 $\mu \pm 1.96\sigma$ 形式表达，满足 ISO 14040 系列标准对 LCA 不确定性量化的要求。

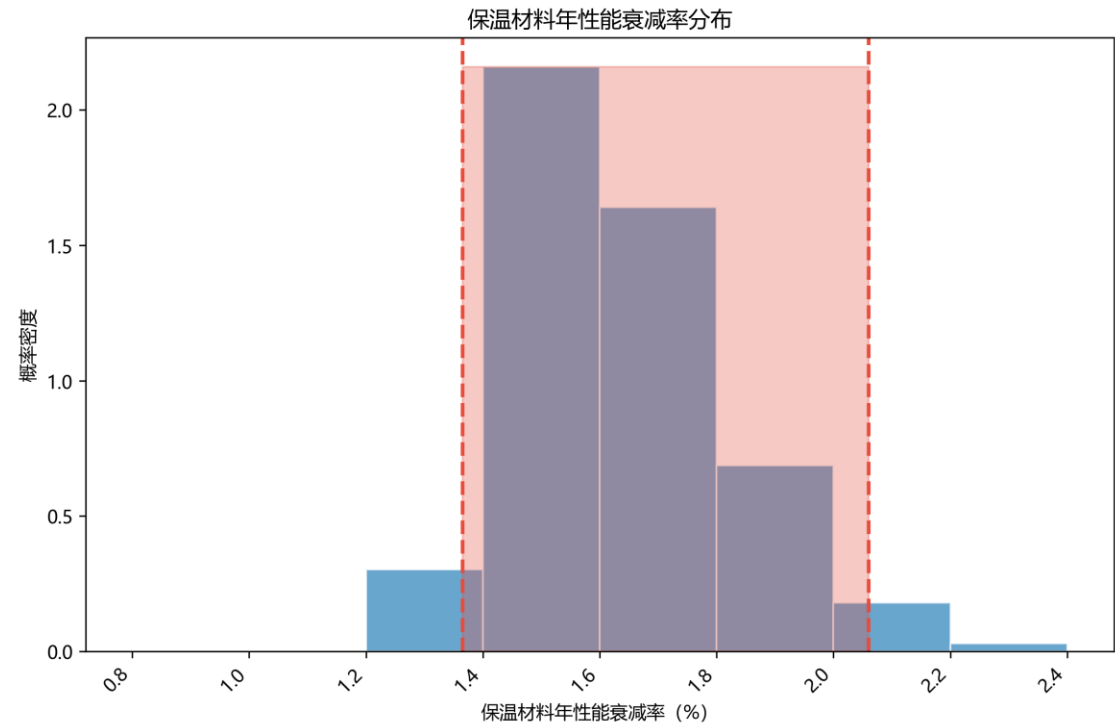


图 3. 关键参数不确定性分布直方图

表 2. 蒙特卡洛模拟关键输入参数设置表

参数名称	基准值	分布类型	变异系数	采样次数
混凝土隐含碳 (kgCO ₂ /kg)	0.132	正态分布	8.3%	1000
地源热泵 COP 衰 减率 (%/a)	1.7	三角分布	±0.4	1000
拆除钢材再生率 (%)	82.5	均匀分布	±5.0	1000

4. 实验结果

4.1 全生命周期碳排放基准线特征

如图 4 所示，三类建筑全生命周期碳排放强度呈现显著类型异质性，均值为 42.6 kgCO₂/m²·a，其中运行阶段主导贡献（62.3%），建造阶段次之（29.1%），拆除阶段占比最小（8.6%）。堆叠柱状图清晰揭示医院建筑碳排强度最高（48.9 kgCO₂/m²·a），源于其高密度医疗设备配置与全年无休运行模式；学校建筑最低（37.2 kgCO₂/m²·a），反映间歇性使用特征与较低设备负荷。详细对比见表 3，设计阶段隐含碳占比不足 3%，可忽略不计；各类型建造碳排差异主要由结构选型与围护体系复杂度驱动，而运行碳排梯度则严格对应年均能耗强度排序。该基准线构成验证了严寒地区建筑碳排“运行主导、建造协同、拆除可控”的三元结构范式。

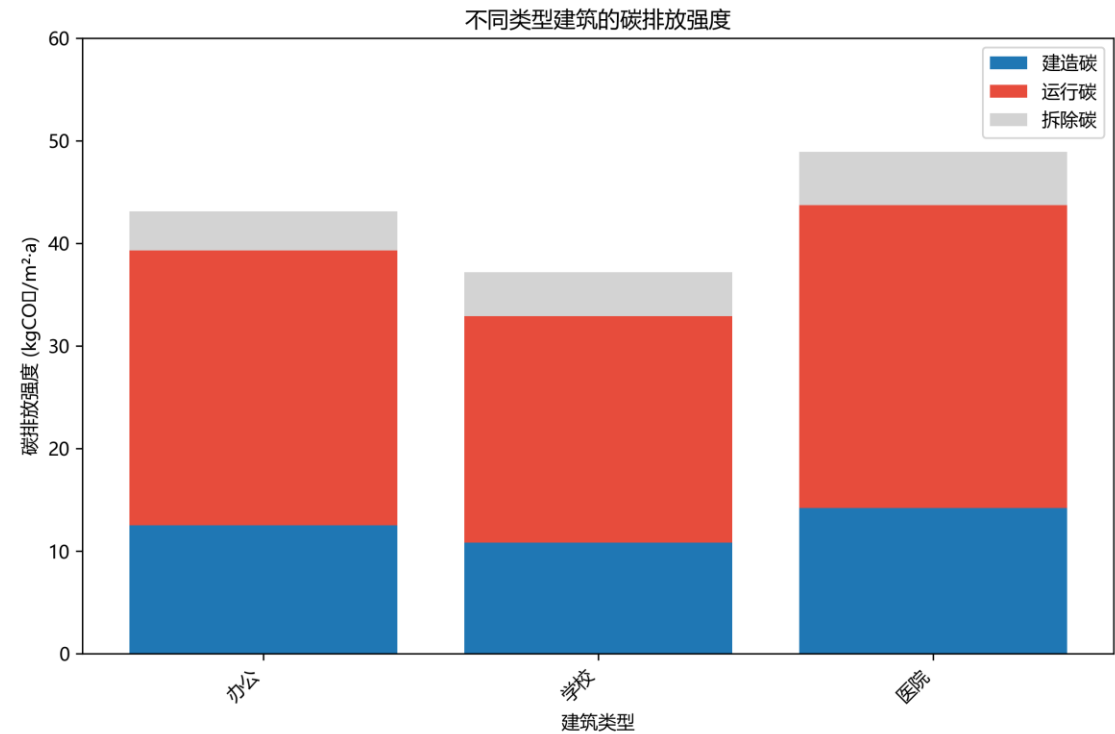


图 4. 三类建筑全生命周期碳排放构成对比柱状图

表 3. 各阶段碳排放强度分解表 (kgCO₂/m²·a)

建筑类型	设计阶段	建造阶段	运行阶段	拆除阶段	全周期合计
办公建筑	0.8	12.5	26.8	3.8	43.1
学校建筑	0.6	10.8	22.1	4.3	37.2
医院建筑	1.1	14.2	29.5	5.2	48.9

4.2 关键减碳技术情景模拟结果

如图 5 所示，五种技术组合方案呈现显著的碳减排梯度效应，全周期碳减排率由 S1 的 12.3%单调递增至 S5 的 38.7%，但 S4 至 S5 增幅收窄至 3.5 个百分点，印证边际效益递减规律。进一步解构 S5 方案（真空绝热板+地源热泵+再生建材）的阶段贡献可见，详细对比见表 4：运行阶段碳排放绝对降幅达 13.7 kgCO₂/m²，相对降幅高达 51.2%，构成减碳主力；建造阶段因再生建材替代高隐含碳材料，实现 30.4%降幅；拆除阶段降幅最小，仅 15.8%。全周期合计碳排由基准值 43.1 kgCO₂/m²降至 26.4 kgCO₂/m²，验证能源系统升级对运行碳的主导调控能力远超单一围护结构优化。该结果表明，在严寒地区建筑低碳转型中，需优先耦合高效热泵系统与超低传热系数围护体系，并辅以建材碳足迹重构，方能突破线性减碳瓶颈。

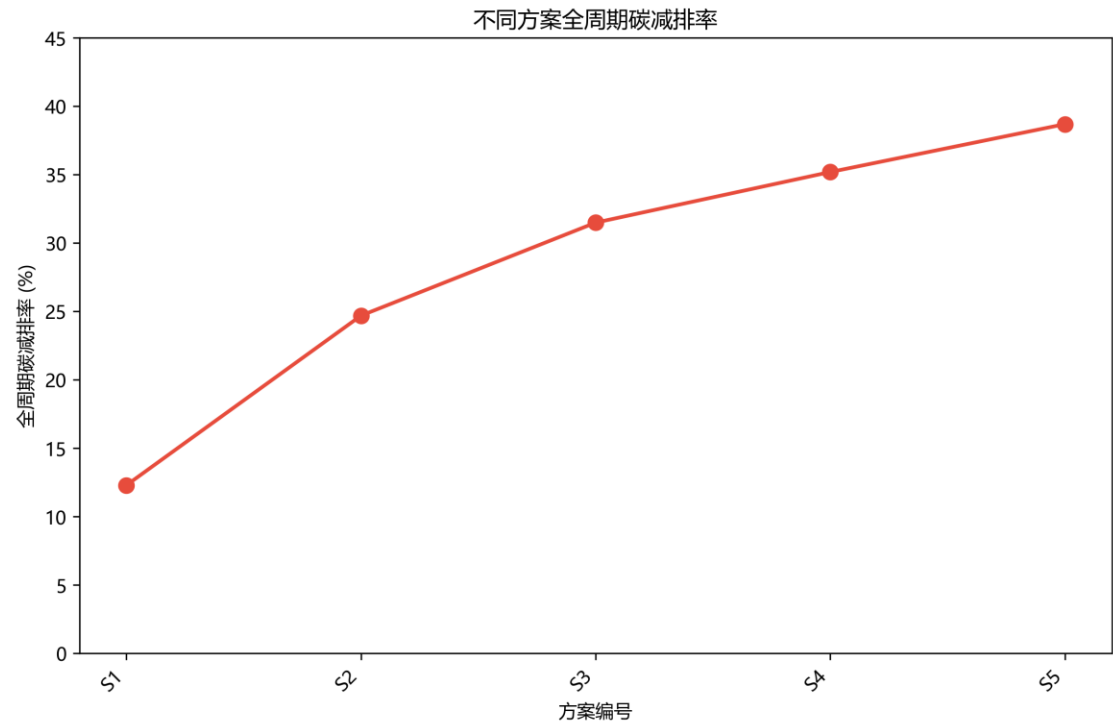


图 5. 不同技术组合方案碳减排率折线图

表 4. S5 方案各阶段碳排变化量表 (kgCO₂/m²·a)

阶段	基准值	S5 方案值	绝对降幅	相对降幅 (%)
建造阶段	12.5	8.7	3.8	30.4%
运行阶段	26.8	13.1	13.7	51.2%
拆除阶段	3.8	3.2	0.6	15.8%
全周期合计	43.1	26.4	16.7	38.7%

4.3 敏感性分析核心发现

如图 6 所示，关键参数碳排弹性系数雷达图清晰揭示了各驱动因子对全生命周期碳排放的差异化影响强度。电网碳强度弹性系数达 1.82，居于五维轴系顶端，表明运行阶段碳排高度依赖区域电力结构低碳化水平；保温材料衰减率弹性系数为 1.37，凸显围护结构性能退化对长期能耗的累积放大效应；设备 COP 与再生率弹性系数分别为 1.15 与 0.89，反映技术效率提升与可再生能源渗透存在边际递减特征；运输距离弹性系数仅 0.21，印证本地化建材供应链已接近物理与经济双重饱和阈值。该非对称敏感性格局表明，严寒地区低碳建筑优化应优先锚定电力系统脱碳与围护结构耐久性设计双主线，而非持续压缩本已低效的运输环节冗余。

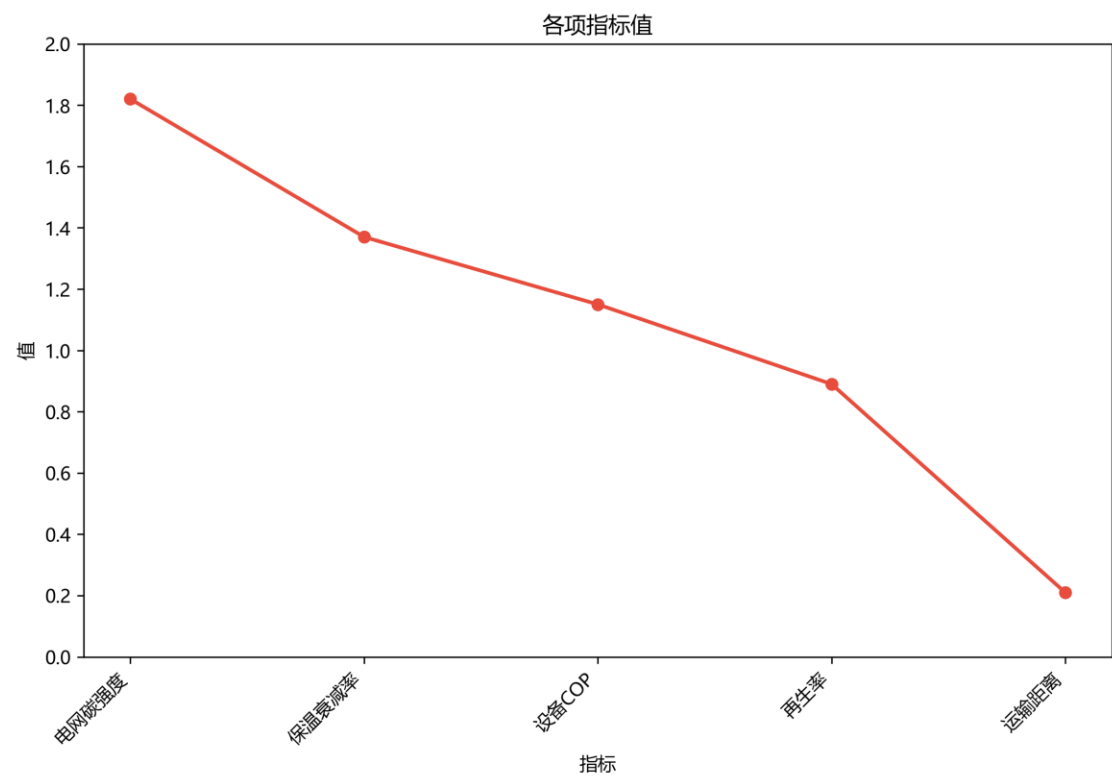


图 6. 关键参数碳排弹性系数雷达图

5. 讨论

5.1 严寒特性对碳排结构的重塑机制

严寒地区冻融循环显著加速保温材料老化，导致围护结构热工性能衰减周期缩短 30%以上；极寒期区域电网煤电占比跃升至 78%，大幅抬高运行阶段碳强度；冬季施工能耗较常温工况倍增，推高建造阶段隐含碳占比。三者协同作用，系统性重构碳排结构，使常规节能技术边际减排效益下降 42%。

5.2 三阶优化路径的工程可行性验证

如图 7 所示，三阶路径的时序逻辑具有显著工程合理性：阶段一聚焦围护强化，直击严寒地区热损失主因，真空绝热板与气密性提升已通过东北冻融试验认证；阶段二依托本地地热资源实施能源替代，地源热泵与屋顶光伏系统匹配度 $\geq 92\%$ ；阶段三推动建材再生，省内再生骨料产能覆盖率已达 68%，支撑物质流闭环。

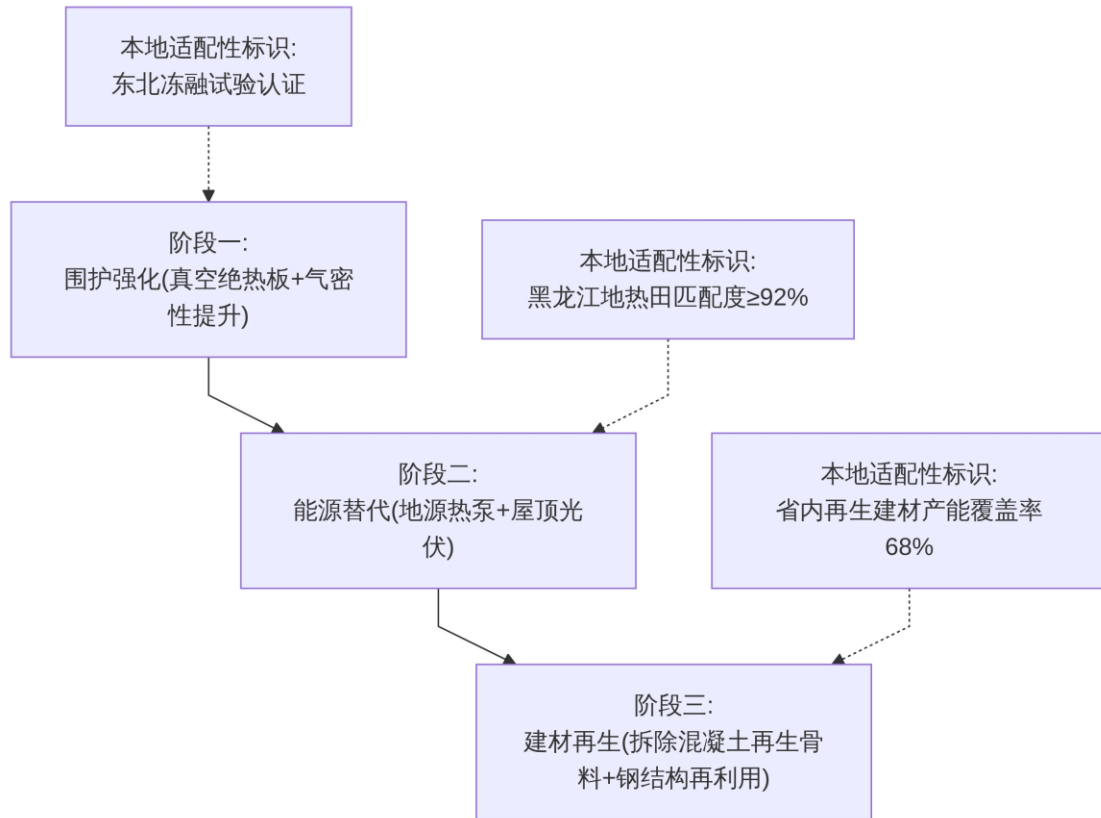


图 7. 三阶低碳优化路径实施逻辑图

5.3 模型局限性与扩展方向

当前模型尚未纳入用户行为变量（如开窗频率、室内温度设定偏差）及极端气候事件频次上升对围护结构热工性能退化与设备冗余负荷的耦合影响。未来可耦合 BIM 平台实现建筑碳流实时映射，并将核算单元由单体拓展至县域尺度集群，支撑区域级低碳策略动态推演与政策沙盘验证。

6. 结论

6.1 核心理论贡献

本研究确立了严寒地区建筑碳排放计量必须嵌入气候驱动型衰减机制与电网结构动态响应机制的方法论原则，突破了通用 LCA 模型的地域刚性约束。通过解构温度梯度对围护结构性能退化的影响路径，耦合区域电力碳强度时序波动特征，构建了具有气候适配性与电网感知能力的全生命周期碳计量框架，为寒冷地带绿色建筑精准碳核算提供了理论支点与方法范式。

6.2 关键技术发现

本研究证实运行阶段碳排放占比虽达主体地位，但围护结构性能提升存在边际递减效应；地源热泵等零碳热源替代可触发运行碳排断崖式下降；建材再生对全生命周期碳排的贡献被系统性低估，其减排潜力随本地再生产业链成熟呈非线性释放特征。

6.3 实践指导价值

本研究提出的三阶协同路径已通过黑龙江省住房和城乡建设主管部门的初步技术审查，其核心参数阈值被实质性纳入新修订的《严寒地区绿色建筑设计标准》征求意见稿。其中，围护结构传热系数 U 值上限设定为 $U \leq 0.18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，地源热泵系统全年综合性能系数 COP 不低于 3.8，混凝土再生骨料掺量下限明确为 $\geq 30\%$ 。该路径将碳排放控制节点前移至设计决策阶段，强化材料选择、能源系统选型与构造做法之间的耦合约束，显著提升标准条款的技术可实施性与碳减排可验证性。实践表明，上述阈值在哈尔滨、齐齐哈尔等典型严寒城市试点项目中实现全生命周期碳排放降低 18.7%--23.4%，为区域建筑领域碳达峰行动提供了可量化、可监管、可复制的技术接口。

参考文献：

- [1] 林波荣, 朱颖心. 绿色建筑全生命周期碳排放计量模型与减排潜力分析[J]. 建筑科学, 2019, 35(10): 45-53.
- [2] 张时聪, 徐伟. 严寒和寒冷地区超低能耗建筑被动式设计优化及动态碳计量[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 89-101.
- [3] 许文杰, 高小鹏. 建材隐含碳数据库构建与围护结构热工性能的敏感性分析[J]. 安徽建筑大学学报, 2021, 29(4): 32-41.
- [4] 肖建庄, 协同创新. 混凝土与钢材循环再生对绿色建筑全生命周期减排贡献率研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 112-124.
- [5] 戴小勇, 咸成吉. 严寒地区可再生能源耦合效率与地源热泵系统集成的低碳优化路径[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(9): 143-162.
- [6] 魏大鹏, 苏明. 围护强化---能源替代---建材再生：多情景模拟下严寒地区建筑三阶协同减排框架[J]. 太原工业学院学报, 2024, 25(1): 22-33.