

DOI: 10.7672/sgjs2025120034

基于 AHP-PPC 模型的全生命周期绿色建筑增量成本与建筑碳排放影响因素分析*

陈雨婷¹, 孙永宁¹, 冯莞婷¹, 张 良², 高 亮¹

(1. 山东建筑大学, 山东 济南 250000;

2. 山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南 250000)

[摘要] 在“双碳”战略目标驱动下,绿色建筑作为建筑业低碳转型的核心载体,其增量成本与碳减排效益的协同机制亟待厘清。基于全生命周期理论框架,构建 AHP-PPC 混合模型,通过主观赋权与客观投影寻踪聚类的动态耦合,系统识别绿色建筑增量成本与碳排放的关键影响因素。结果表明:施工阶段的环保材料采购成本与节能技术集成成本构成增量成本主要驱动源,运营阶段的可再生能源系统能效与围护结构热工性能对碳减排具有显著杠杆效应。研究创新性地融合静态权重分析与动态数据投影,有效克服传统 AHP 方法的主观局限性,据此提出的四维优化路径,即材料优选、技术适配、能源替代、性能迭代,为绿色建筑的“成本-碳效”双向优化提供了决策框架。成果不仅完善了绿色建筑全生命周期评价方法体系,更为行业践行“双碳”目标提供了兼具理论深度与实践价值的解决方案。

[关键词] 绿色建筑;增量成本;碳排放;减碳;影响因素

[中图分类号] TU201.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)12-0034-07

Analysis of Incremental Costs and Carbon Emission Factors of Green Buildings in the Whole Life Cycle Based on AHP-PPC Model

CHEN Yuting¹, SUN Yongning¹, FENG Wanting¹, ZHANG Liang², GAO Liang¹

(1. Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250000, China;

2. Shandong Rail Transit Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: Under China's carbon neutrality and carbon peaking strategic goals, this study clarifies the synergy between incremental costs and carbon reduction benefits in green buildings. A hybrid AHP-PPC model was developed within a whole-life-cycle framework, integrating subjective weighting with objective projection pursuit to identify key influencing factors. The results show: Construction-phase drivers include eco-material procurement and energy-efficient technology integration costs; Operational leverage effects stem from renewable energy efficiency and building envelope thermal performance. Innovatively combining static-dynamic analysis, this research overcomes traditional AHP limitations and proposes a four-dimensional optimization framework (material selection, technology adaptation, energy substitution, performance iteration) for cost-carbon dual optimization. The results advance life-cycle assessment methodologies and provide actionable solutions for achieving carbon neutrality and carbon peaking in construction.

Keywords: green buildings; incremental costs; carbon emission; carbon reduction; influencing factors

0 引言

“双碳”战略的实施将建筑领域推入低碳化转

型的关键期,绿色建筑作为核心减排载体,其增量成本与碳减排效益的均衡机制亟待破解。尽管既有研究已识别设计、施工等阶段的影响因子,但普遍存在双重局限:①成本-碳效关联分析多采用静态模型,忽视技术迭代与市场波动的动态影响;②评

* 国家级大学生创新创业训练计划项目(202410430001)

[作者简介] 陈雨婷,本科在读,E-mail:2356939247@qq.com

[收稿日期] 2025-03-27

估方法依赖专家经验的层次分析法(AHP),易受主观权重偏差干扰。鉴于此,本文创新集成 AHP 与投影寻踪聚类(PPC)模型,构建主客观协同的混合评估框架,旨在揭示绿色建筑全生命周期中增量成本与碳排放的时空演化规律。通过解构施工阶段材料技术成本敏感性与运营阶段能源系统碳效弹性,提出“动态适配”优化路径“四维优化”,为突破建筑业“降碳-经济”二元悖论提供理论工具与方法论参考。

1 绿色建筑增量成本和碳排放影响因素分析

1.1 AHP 初步筛选

1.1.1 初步识别增量成本和碳排放影响因素

本文通过整理有关“绿色建筑增量成本影响因素”和“绿色建筑碳排放影响因素”的相关文献^[1-8],以 GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》的控制项和评分项细则为依据,从绿色建筑全生命周期角度的建筑能耗、建筑能源利用效率、建筑性能、生命周期、建筑用能结构、碳汇能力、智慧运维、合理规划八大维度进行归纳研究。最终得到如表 1 所示全生命周期绿色建筑增量成本和碳排放的影响因素。

表 1 初步识别影响因素

Table 1 Initial identification of influencing factors

| 类别 | 增量成本影响因素 | 碳排放影响因素 |
|------------|------------------|--------------------|
| 规划设计 A1 | 建设单位绿色发展战略 B1 | 建筑面积 C1 |
| | 绿色建筑的可行性评价 B2 | 地下建筑面积与总用地面积比 C2 |
| | 认证成本 B3 | 绿色建筑星级 C3 |
| | 设计成本 B4 | 绿地率 C4 |
| 施工环节 A2 | 环保材料利用水平 B5 | 建筑材料消耗 C5 |
| | 节水技术 B6 | 机械设备消耗 C6 |
| | 能源利用水平 B7 | 人员消耗 C7 |
| | 室外绿化技术 B8 | 运输能源消耗 C8 |
| 运营环节 A3 | 绿色建筑智能化运用程度 B9 | 绿色建材应用比例 C9 |
| | 绿色建筑相关政策法规影响 B10 | 工业化预制构件比例 C10 |
| | 废弃物资源化利用率 B11 | 外墙传热系数 C11 |
| | 绿色专业人员 B12 | 暖通空调消耗 C12 |
| 改造拆除 A4 | 材料回收与处理成本 B13 | 可再生能源提供生活用热水比例 C13 |
| | 生态修复 B14 | 可再生能源提供电量比例 C14 |
| | 拆除后的用地规划 B15 | 拆除使用机械能耗 C15 |
| | | 废旧建材回收利用 C16 |

1.1.2 绿色建筑增量成本与碳排放影响因素权重判定

本文选取 AHP 模型作为权重分析方法,旨在构建科学的影响因素评估体系。该方法基于专家判断的层级化决策原理,能有效处理全生命周期过程中动态变化的附加成本与碳排放量数据。相较于传统量化方法,该模型通过建立两两比较矩阵的评估方式,既可整合领域专家的实践认知,又能克服多

源异构指标难以统一量纲的技术难点。针对建筑工程全生命周期不同阶段的增量成本特性和碳排放特征,本研究运用层次分析技术分别建立递阶结构模型,通过计算判断矩阵的特征向量实现指标权值的科学分配。这种处理方式在保证研究目标实现的前提下,既维持了指标赋权的严谨性,又简化了多因素权重计算的复杂度,为后续 PPC 模型奠定基础。

1) 构建层次评价模型。绿色建筑增量成本影响因素层次评价模型中将绿色建筑增量成本影响因素权重 S1 作为目标层,将规划设计 A1、施工环节 A2、运维环节 A3、改造拆除 A4 4 阶段作为准则层,将绿色建筑增量成本研究指标(B1, B2, …, B15)的 15 个影响因素作为指标层,如图 1a 所示。

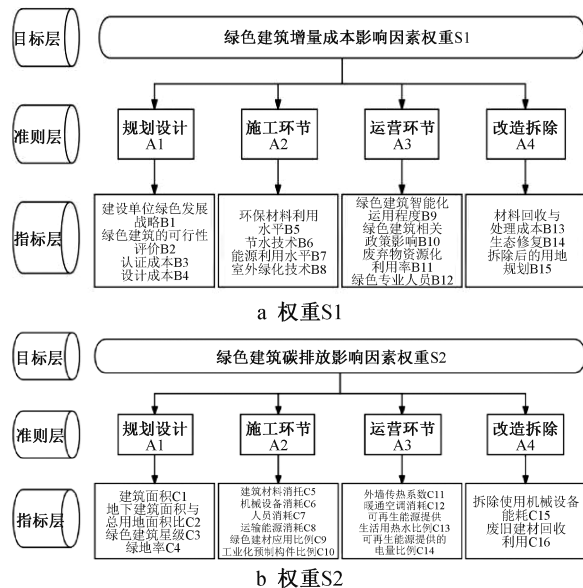


图 1 绿色建筑增量成本影响因素层次评价模型

Fig. 1 Hierarchical evaluation model of influencing factors of incremental cost of green buildings

绿色建筑碳排放影响因素层次评价模型中将绿色建筑碳排放影响因素权重 S2 作为目标层,同样将规划设计 A1、施工环节 A2、运维环节 A3、改造拆除 A4 4 阶段作为准则层,在全生命周期角度下进一步探索绿色建筑增量成本和碳排放影响因素间的关系,将绿色建筑碳排放研究指标(C1, C2, …, C16)的 16 个影响因素作为指标层,如图 1b 所示。

2) 构建判断矩阵。根据构建的绿色建筑增量成本影响因素层次评价模型和绿色建筑碳排放影响因素层次评价模型从上到下逐层按层次结构模型构造判断矩阵,以准则层为例构造两两重要度比较判断矩阵,如表 2 所示。使用 1-9 标度法表示元素间的相对重要性。标度 1 表示 2 个元素同等重要,标度 9 表示一个元素比另一个元素极端重要,中

间标度则表示不同程度的重要性,如表 3 所示。

表 2 判断矩阵

Table 2 Judgment matrix

| A | A1 | A2 | A3 | A4 |
|----|-----|-----|-----|-----|
| A1 | 1 | a12 | a13 | a14 |
| A2 | a21 | 1 | a23 | a24 |
| A3 | a31 | a32 | 1 | a34 |
| A4 | a41 | a42 | a43 | 1 |

表 3 标度标准

Table 3 Scaling standards

| 因素比较 | 量化值 |
|----------------------|---------|
| 两个因素相比,前者与后者同样重要 | 1 |
| 两个因素相比,前者较后者稍微重要 | 3 |
| 两个因素相比,前者较后者明显重要 | 5 |
| 两个因素相比,前者较后者十分重要 | 7 |
| 两个因素相比,前者较后者极其重要 | 9 |
| 分别介于 1~3,3~5,5~7,7~9 | 2,4,6,8 |
| 两个因素相比,后者较前者不重要程度 | 倒数 |

运用 AHP 构建评价模型后,邀请国内有关建筑设计领域、工程总承包领域的 7 位专家及学者对评价模型的判断矩阵进行打分赋值,对专家的意见进行统计、整理和总结后,构建出各级别的判断矩阵。

3) 权重向量计算和一次性检验。

计算判断矩阵每行元素的乘积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

计算 M_i 的 n 次方根 β_i :

$$\beta_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (2)$$

对向量 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)^T$ 归一化:

$$W_j = \frac{\beta_j}{\sum_{j=1}^n \beta_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

计算判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nw_i} \quad (4)$$

计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

计算检验系数 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

通过模型计算,本次研究判断矩阵满足一致性检验,计算所得权重具有一致性。

4) 各层次权重结果分析。通过上述权重向量计算和一致性检验结果数据分析,得到基于 AHP 的绿色建筑增量成本影响因素对应的权重值(见表 4)、绿色建筑碳排放影响因素对应的权重值(见表 5)。

表 4 绿色建筑增量成本影响因素权重值

Table 4 Weight values of the influencing factors of incremental cost of green buildings

| 目标层 S | 准则层 A | 权重 | 指标层 B | 权重 | 综合权重 | 排序 |
|-------------------|---------|-------|------------------|-------|-------|----|
| | 规划设计 A1 | 0.085 | 建设单位绿色发展战略 B1 | 0.191 | 0.016 | 13 |
| | | | 绿色建筑的可行性评价 B2 | 0.107 | 0.009 | 14 |
| | | | 认证成本 B3 | 0.107 | 0.009 | 14 |
| | | | 设计成本 B4 | 0.596 | 0.050 | 8 |
| 绿色建筑增量成本影响因素权重 S1 | 施工环节 A2 | 0.542 | 环保材料利用水平 B5 | 0.220 | 0.120 | 3 |
| | | | 节水技术 B6 | 0.122 | 0.066 | 5 |
| | | | 能源利用水平 B7 | 0.536 | 0.291 | 1 |
| | | | 室外绿化技术 B8 | 0.122 | 0.066 | 5 |
| 运营环节 A3 | 0.140 | | 绿色建筑智能化运用程度 B9 | 0.423 | 0.059 | 7 |
| | | | 绿色建筑相关政策法规影响 B10 | 0.227 | 0.032 | 9 |
| | | | 废弃物资源化利用率 B11 | 0.227 | 0.032 | 9 |
| | | | 绿色专业人员 B12 | 0.123 | 0.017 | 12 |
| | | | 材料回收与处理成本 B13 | 0.557 | 0.130 | 2 |
| 改造拆除 A4 | 0.233 | | 生态修复 B14 | 0.320 | 0.075 | 4 |
| | | | 拆除后的用地规划 B15 | 0.123 | 0.029 | 11 |

表 5 绿色建筑碳排放影响因素权重值

Table 5 Weight values of the influencing factors of carbon emissions of green buildings

| 目标层 S | 准则层 A | 权重 | 指标层 C | 权重 | 综合权重 | 排序 | |
|------------------|---------|-------|--------------------|---------------|-------|-------|----|
| 绿色建筑碳排放影响因素权重 S2 | 规划设计 A1 | 0.085 | 建筑面积 C1 | 0.455 | 0.038 | 7 | |
| | | | 地下建筑面积与总用地面积比 C2 | 0.141 | 0.012 | 14 | |
| | | | 绿色建筑星级 C3 | 0.141 | 0.012 | 14 | |
| | | | 绿地率 C4 | 0.263 | 0.022 | 13 | |
| | 施工环节 A2 | 0.542 | | 建筑材料消耗 C5 | 0.339 | 0.184 | 1 |
| | | | | 机械设备消耗 C6 | 0.069 | 0.038 | 7 |
| | | | | 人员消耗 C7 | 0.069 | 0.038 | 7 |
| | | | | 运输能源消耗 C8 | 0.118 | 0.064 | 6 |
| | | | | 绿色建材应用比例 C9 | 0.202 | 0.028 | 11 |
| | | | | 工业化预制构件比例 C10 | 0.202 | 0.028 | 11 |
| 运营环节 A3 | 0.140 | | 外墙传热系数 C11 | 0.490 | 0.068 | 5 | |
| | | | 暖通空调消耗 C12 | 0.079 | 0.011 | 16 | |
| | | | 可再生能源提供生活用热水比例 C13 | 0.126 | 0.029 | 10 | |
| | | | 可再生能源提供电量比例 C14 | 0.305 | 0.071 | 4 | |
| 改造拆除 A4 | 0.233 | | 拆除使用机械设 备能耗 C15 | 0.667 | 0.156 | 2 | |
| | | | 废旧建材回收利用 C16 | 0.333 | 0.078 | 3 | |

由此可见,绿色建筑增量成本和碳排放在全生命周期各阶段影响因素相比较,由于排名前 10 之后的影响因素占比较小,基于 80/20 筛选法则,研究将重点聚焦于主导性变量,因此筛选权重前 10 的因素,如表 6 所示。

表 6 增量成本与碳排放影响因素权重前 10

Table 6 The top 10 weights of the influencing factors of incremental cost and carbon emissions

| 准则层 A | 指标层 B | 排序 | 指标层 C | 排序 |
|---------|------------------|----|--------------------|----|
| 规划设计 A1 | 设计成本 B4 | 8 | 建筑面积 C1 | 7 |
| 施工环节 A2 | 环保材料利用水平 B5 | 3 | 建筑材料消耗 C5 | 1 |
| | 节水技术 B6 | 5 | 机械设备消耗 C6 | 7 |
| | 能源利用水平 B7 | 1 | 人员消耗 C7 | 7 |
| 运营环节 A3 | 室外绿化技术 B8 | 5 | 运输能源消耗 C8 | 6 |
| | 绿色建筑智能化运用程度 B9 | 7 | 外墙传热系数 C11 | 5 |
| 改造拆除 A4 | 绿色建筑相关政策法规影响 B10 | 9 | 可再生能源提供生活用热水比例 C13 | 10 |
| | 废弃物资源化利用率 B11 | 9 | 可再生能源提供电量比例 C14 | 4 |
| 改造拆除 A4 | 材料回收与处理成本 B13 | 2 | 拆除使用机械设备能耗 C15 | 2 |
| | 生态修复 B14 | 4 | 废旧建材回收利用 C16 | 3 |

1.2 基于加速遗传算法的投影寻踪模型

1.2.1 数据指标构建

依据第 1 节 AHP 的初步筛选得到的增量成本和碳排放的 10 个因素,构建数据指标层,进行动态筛选。数据指标如表 7,8 所示。

1.2.2 模型构建

1) 归一化处理样本评价指标集

设各指标值的样本集为 $x^*(i, j)$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, p$), n, p 分别为样本容量和指标数目,为消除各指标值的量纲,需对数据进行归一化处理。

对于正向指标,无量纲化公式为:

$$X(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (7)$$

对于负向指标,无量纲化公式为:

$$X(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (8)$$

式中: $x_{\max}(j)$, $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个指标的最大值和最小值; $x(i, j)$ 为指标特征值归一化序列。

2) 构造投影指标函数 $Q(a)$

投影寻踪模型就是将 p 维数据 $x(i, j)$ ($j = 1, 2, \dots, p$) 综合成以 $a = \{a(1), a(2), \dots, a(p)\}$ 为投影方向向量的一维投影值 $z(i)$:

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i, j) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

表 7 绿色建筑增量成本影响因素数据指标

Table 7 Data index of the influencing factors of incremental cost of green buildings

| 研究阶段 | 主要因素 | 数据指标 |
|--------|-----------------|--------------------------|
| 规划设计 | 设计成本 | 绿色建筑方案设计费用 X1 |
| | | 咨询成本 |
| | | 设计师薪酬 |
| 施工环节 | 环保材料利用水平 | 回收材料利用率 X2 |
| | | 材料可再生比例 (%) |
| | | 本地采购材料比例 (%) |
| | 节水技术 | 用水器具流量 (L/S) X3 |
| | | 灌溉用水效率 (%) |
| 能源利用水平 | 中水回用率 (%) | |
| | 可再生能源使用率 (%) X4 | |
| | 季度平均能耗标准煤 (亿 t) | |
| 室外绿化技术 | 绿化覆盖率 X5 | |
| | 雨水利用效率 (%) | |
| 运营环节 | 绿色建筑智能化运用程度 | 灌溉节水率 (%) |
| | | 采光自适应调节范围 X6 |
| | 废弃物资源化利用率 | 废弃资源综合利用能源消耗总量 X7 |
| 改造拆除 | 材料回收与处理成本 | 建材类工业生产者购进价格指数 X8 |
| | 生态修复 | 生态保护和环境治理业固定资产投资比上年增长 X9 |

表 8 绿色建筑碳排放影响因素数据指标

Table 8 Data index of the influencing factors of carbon emissions of green buildings

| 研究阶段 | 主要因素 | 数据指标 |
|--------------|------------------------|-----------------------------------|
| 规划设计 | 建筑面积 | 全国绿色建筑的建筑面积 Y1 |
| | | 建筑业煤炭消耗总量 (万 t) |
| | | 建筑业石油消费总量 (万 t) |
| 施工环节 | 机械设备消耗 | 建筑业电力消费总量 (亿 kW·h) |
| | | 建筑业企业自有施工机械设备年末总功率 (万 kW) |
| | | 劳动生产率 (元/人) |
| | 人员消耗 | 就业人口数量 (万人) |
| | | 成品油消耗量 (万 t) |
| 运输能源消耗 | 清洁能源运输比例 (%) | |
| 运营环节 | 外墙传热系数 | 常用外墙保温材料导热系数 (W/(m·K)) |
| | | 常用外墙保温材料含水率 (%) |
| | 可再生能源提供生活用热水比例 | 太阳能热利用集热系统保有量 (万 m ²) |
| | | 可再生能源利用比例 (%) |
| | | 核电新增装机情况 (万 kW) |
| 可再生能源提供的电量比例 | 可再生能源发电装机占全部发电装机比例 (%) | |
| | 全国可再生能源发电量占全部发电量比例 (%) | |
| 改造拆除 | 废旧建材回收利用 | 废弃资源综合利用增长率 (%) |
| | | 建筑垃圾产生量 (亿 t) |

投影指标函数可表达为:

$$Q(a) = S_2 D_2 \quad (10)$$

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - E(z)]^2}{n-1}} \quad (11)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [R - r(i,j)] \cdot u[R - r(i,j)] \quad (12)$$

式中: S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差; D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度; $D(z)$ 为序列 $z(i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$)的平均值; R 为局部密度的窗口半径,根据试验确定; $r(i,j)$ 为样本间距离, $r(i,j) = |z(i) - z(j)|$; $u(t)$ 为一单位阶跃函数,当 $t \geq 0$ 时其值为1,当 $t < 0$ 时其值为0。

3) 优化投影指标函数

给定样本集时,投影指标函数 $Q(\mathbf{a})$ 仅随投影方向向量 \mathbf{a} 的变化而变化。因此,可通过最大化投影指标函数的方法来估计最佳投影方向。该方法可以有效降维。

最大化目标函数:

$$\max Q(\mathbf{a}) = S_z D_z \quad (13)$$

约束条件:

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad (14)$$

4) 计算指标指数

将求得的最佳投影方向向量 \mathbf{a}^* 代入式(9)后,得到各样本点的投影值 $z^*(i)$, $z^*(i)$ 值则为计算出的指标指数值,可根据计算结果对样本进一步分析。

1.2.3 模型结果

增量成本影响因素数据指标中,在满足目标函数 $\max Q(\mathbf{a})$ 和约束条件 $\|\mathbf{a}\| = 1$ 下,经过寻优运算,输出的最优投影方向向量 $\mathbf{a}^* = (0.316\ 2, 0.159\ 6, 0.187\ 1, 0.311\ 3, 0.247\ 8, 0.304\ 5, 0.228\ 8, 0.027\ 1, 0.062\ 2, 0.231\ 2, 0.256\ 4, 0.257\ 2, 0.289\ 1, 0.222\ 8, 0.155\ 5, 0.282\ 2, 0.320\ 4, 0.071\ 4, 0.032\ 3)$ 。

碳排放影响因素数据指标中,在满足目标函数 $\max Q(\mathbf{a})$ 和约束条件 $\|\mathbf{a}\| = 1$ 下,经过寻优运算,输出的最优投影方向向量 $\mathbf{a}^* = (0.275\ 4, 0.056\ 1, 0.163\ 2, 0.361\ 2, 0.076\ 6, 0.249\ 6, 0.076\ 4, 0.211, 0.225\ 8, 0.179\ 3, 0.116\ 6, 0.338\ 2, 0.379\ 8, 0.270\ 3, 0.326\ 9, 0.220\ 5, 0.122\ 5, 0.215\ 7)$ 。

投影寻踪模型中,各指标的最佳投影值大小实质上反映了各因素指标对绿色建筑增量成本和碳排放的影响程度,值越大则对应的影响程度越大。可清晰看出绿色建筑增量成本影响因素数据指标的影响程度排序,在此选取前10个,如表9

所示。

表9 数据指标排序

Table 9 Sort of data metrics

| 排序 | 增量成本数据指标 | 碳排放数据指标 |
|----|----------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 废弃资源综合利用业 能源消耗总量(万t标准煤) | 可再生能源利用比例(%) |
| 2 | 咨询成本(万元/栋) | 建筑业电力消耗 总量(亿kW·h) |
| 3 | 回收材料利用率(%) | 太阳能热利用集热 系统保有量(万m ²) |
| 4 | 本地采购材料比例(%) | 可再生能源发电装机占 全部发电装机比例(%) |
| 5 | 绿化覆盖率(%) | 全国绿色建筑面积(亿m ²) |
| 6 | 采光自适应调节范围(%) | 核电新增装机情况(万kW) |
| 7 | 季度平均能耗标准煤(亿t) | 劳动生产率(元/人) |
| 8 | 可再生能源使用率(%) | 清洁能源运输比例(%) |
| 9 | 材料可再生性比例(%) | 全国可再生能源发电量 占全部发电量比例(%) |
| 10 | 中水回用率(%) | 建筑垃圾产生量(亿t) |

依据上述PPC模型运算结果,整理出各影响因素排序,如表10所示。

表10 影响因素排序

Table 10 Sort of influencing factors

| 排序 | 增量成本影响因素 | 碳排放影响因素 |
|----|-----------------|-------------------|
| 1 | 废弃物资源化综合 利用率 | 可再生能源提供 生活热水比例 |
| 2 | 环保材料利用水平 | 建筑面积 |
| 3 | 绿色智能化运用程度 | 可再生能源提供的电量比例 |
| 4 | 能源利用水平 | 机械设备消耗 |
| 5 | 室外绿化技术 | 运输能源消耗 |
| 6 | 设计成本 | 废旧建材回收利用 |
| 7 | 节水技术 | 人员消耗 |
| 8 | 材料回收与处理成本 | 外墙传热系数 |
| 9 | 生态修复 | 建筑材料消耗 |

由表9、10可看出,在增量成本影响因素指标中,施工阶段指标占据核心影响因素前序排名的60%,运营阶段占比达20%;而在碳排放影响因素指标中,运营阶段指标主导前十大关键因子构成的50%,施工阶段贡献度达30%。在建筑全生命周期中,若要降低增量成本并减少碳排放量,应当聚焦施工阶段和运营阶段,并针对施工环节的环保材料使用和节能技术应用及运营阶段的可再生能源使用和围护结构保温性能采取措施。

2 基于影响因素分析的控制成本和减碳措施

2.1 增量成本控制措施

基于结论分析,影响增量成本的主要因素集中在建筑全生命周期施工阶段的环保材料使用水平和节能技术应用。

2.1.1 环保材料成本控制

可建立环保材料全生命周期成本(LCC)评价体

系^[9],在满足绿色建筑认证标准的前提下,优化选择本地化、可回收、高性价比的环保建材,通过 BIM 技术模拟材料使用场景,优化材料规格与用量,避免因过度设计导致成本冗余。还可与环保材料供应商建立战略合作机制,通过集中采购、长期协议等方式降低采购成本。针对常用环保材料,如低 VOC 涂料、再生混凝土等,推动模块化设计与标准化生产,形成规模经济效益^[10]。还可建立废弃物循环利用补偿机制,建立施工现场废弃物分类回收系统,对拆除阶段的废金属、木材等可再生材料进行二次加工利用,通过“废弃物-材料”闭环管理抵消部分增量成本^[10]。

2.1.2 节能技术应用成本优化

注重技术效益比选,重点评估单位节能量的增量成本。根据项目气候特征与功能需求,优先部署被动式节能技术,如自然通风、遮阳系统,动态匹配主动式技术的安装比例。还可前移介入智能化运维,在施工阶段同步部署能耗监测传感器与 BIM 运维平台,通过施工-运维数据联动优化技术参数设置,避免因调试不足导致后期改造成本增加。

2.1.3 综合成本控制配套措施

绿色施工增量成本控制体系通过技术优化、政策协同与数据驱动实现三重管控:①技术层面集成 5D-BIM 模拟与材料智能监控系统,结合绿色工法专项培训,提升施工效率 25% 并降低返工率;②政策层面构建“审计申报-金融分摊”双机制,系统对接绿色建筑补贴、碳配额及财税优惠政策,创新应用绿色信贷保险工具;③数据层面建立动态成本数据库与智能预测模型,实现材料价格、技术参数与政策标准的数字化预控。三者形成“技术精益化+政策转化力+数据决策力”的协同控制范式,有效平衡绿色施工附加成本。

2.2 减碳措施

基于结论分析,影响绿色建筑碳排放的主要因素集中在建筑全生命周期运营阶段的可再生能源利用和围护结构保温上。

2.2.1 运营阶段可再生能源优化

分布式能源系统集成:采用“光伏建筑一体化(BIPV)+地源热泵+储能电池”的混合供能系统。通过模拟软件 EnergyPlus 优化光伏板倾角与阵列布局,提升单位面积发电效率 15%~20%。

动态负荷匹配技术:建立分时电价响应机制,在电价峰值时段优先调用储能系统供电。

2.2.2 围护结构保温性能提升

采用“真空绝热板(VIP)+气凝胶涂料+Low-E

中空玻璃”3层保温体系,《新型建筑材料》(2024年)^[11]实测数据表明,该组合可使外墙传热系数降低至 0.25。在结构梁柱交接处设置断热桥锚固件,采用聚氨酯发泡填充缝隙。通过红外热成像仪检测实施效果,减少冷热桥导致的能耗损失 12%~18%^[11]。

2.2.3 减碳效能协同增强机制

数字孪生运维平台:构建 BIM+GIS+CIM 多维数据模型,实时监测碳排放强度指标。实施用户行为引导策略,开发碳足迹可视化 APP,向用户反馈实时能耗数据。全产业链碳汇补偿^[12],联合建材供应商实施“产品碳标签”制度,优先采购低碳水泥等负碳材料。

2.3 四维优化

通过上述措施建议,将其总结为“材料优选-技术适配-能源替代-性能迭代”思维优化策略,环保材料成本控制措施对应“材料优选”,节能的技术成本优化对应“技术适配”,运营阶段可再生能源优化对应“能源替代”,围护结构保温性能提升对应“性能迭代”,通过以上 4 个维度共同作用,能向实现成本约束下的碳减排效益最大化靠拢,为绿色建筑全生命周期管理提供了可量化的决策框架^[13]。

3 结语

3.1 结论

本文以绿色建筑为研究对象,对其全生命周期增量成本和碳排放进行影响因素分析,再根据得到的分析结果对应提出降本减碳措施。本文通过构建 AHP-PPC 混合模型,系统揭示了绿色建筑全生命周期中增量成本与碳排放的驱动机制,科学弥补了 AHP 识别因素的主观性。分析得到施工阶段和运营阶段是可降本减碳的主要阶段,并对此关键因素提出对应降本减碳措施。

本文创新性地结合绿色建筑全生命周期增量成本与碳排放影响因素分析,并采用 PPC 模型对因素识别进行优化筛选,使得分析结果更加准确。对分析结果提出“降本减碳”措施与建议,针对关键环节设计发明专利。

3.2 展望

本研究的局限性及未来研究方向包括:①增量成本分析未充分纳入区域性建材价格波动与供应链韧性变量,后续可结合空间计量模型深化地理异质性研究;②碳排放测算基于静态 LCA 数据库,建议开发 BIM 耦合实时监测数据的动态碳核算模型;③优化路径验证需拓展至超低能耗建筑、近零碳社区等新兴场景,并探索机器学习算法在多目标优化中的应用潜力。未来研究应重点关注绿色建筑与

碳交易市场的联动机制,以及光伏建筑一体化(BIPV)、相变储能等颠覆性技术的成本-效益临界点,从而构建更具时空适应性的碳中和实施路径。

在我国,发展绿色建筑已成为一种必然趋势。在国家大力倡导“双碳”的大环境下,绿色建筑如何响应号召后续应当落实。

参考文献:

- [1] 赵萧涵. 基于全寿命周期的绿色建筑增量成本影响因素及控制策略研究[D]. 济南:山东建筑大学,2024.
ZHAO X H. Research on the influencing factors and control strategies of incremental costs of green buildings based on the whole life cycle[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024.
- [2] 孟坤. 绿色建筑增量成本影响因素及控制策略研究[D]. 天津:天津城建大学,2023.
MENG K. Research on the influencing factors and control strategies of incremental cost of green buildings [D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2023.
- [3] 郭振伟,王新雨,罗晓予,等. 绿色公共建筑全寿命期碳排放影响因素研究——以夏热冬冷地区为例[J]. 建筑科学, 2024,40(2):12-18,29.
GUO Z W, WANG X Y, LUO X Y, et al. Study on the influencing factors of carbon emissions of green public buildings in the whole life cycle; a case study in hot summer and cold winter region[J]. Building science, 2024,40(2):12-18,29.
- [4] 林明超,李晓娟,卢家婧. 绿色建筑碳排放核算方法及减排路径研究[J]. 上海节能, 2023(8):1111-1124.
LIN M C, LI X J, LU J J. Research on accounting method and emission reduction path of green building carbon emissions[J]. Shanghai energy saving, 2023(8):1111-1124.
- [5] 马伊利. 基于绿色建筑碳排放分析的绿色建筑评价体系研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.
MA Y L. Research on green building evaluation system based on green building carbon emission analysis [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- [6] 孙玉峰,谢又妍,郭硕,等. 基于 SEM 的绿色建筑增量成本影响因素分析[J]. 山东工商学院学报, 2023,37(5):26-35.
SUN Y F, XIE Y Y, GUO S, et al. Analysis of influencing factors of incremental cost life cycle of green building based on SEM [J]. Journal of Shandong Technology and Business University, 2023,37(5):26-35.
- [7] 杨文安,汤强. 基于 ISM 的绿色建筑增量成本影响因素研究[J]. 工程管理学报, 2020,34(3):120-124.
YANG W A, TANG Q. Research on the influencing factors of green building incremental cost based on ISM [J]. Journal of engineering management, 2020,34(3):120-124.
- [8] 焦祖洋. 基于全寿命周期理论的绿色建筑成本控制[J]. 建材与装饰, 2018(21):140-141.
JIAO Z Y. Cost control of green building based on life cycle theory [J]. Construction materials & decoration, 2018(21):140-141.
- [9] 曾庆林,陈葶葶,李幽铮. 我国绿色建筑增量成本分析[J]. 价值工程, 2014,33(31):108-110.
ZENG Q L, CHEN T T, LI Y Z. Incremental cost analysis of the green building in China [J]. Value engineering, 2014,33(31):108-110.
- [10] 刘杰. 高层绿色建筑材料施工技术中的能源节约策略研究[J]. 佛山陶瓷, 2024,34(8):73-75.
LIU J. Research on energy saving strategy in construction technology of high-rise green building materials [J]. Foshan ceramics, 2024,34(8):73-75.
- [11] 刘卫东,靳海,詹衡,等. 纳米 SiO₂ 气凝胶复合芯材真空绝热板制备与性能研究[J]. 真空, 2025,62(1):49-56.
LIU W D, JIN H, ZHAN H, et al. Preparation and performance studies of nano-SiO₂ aerogel composite core vacuum insulating panels [J]. Vacuum, 2025,62(1):49-56.
- [12] 王栋,任兆胜. 建筑围护结构节能改造技术研究[J]. 砖瓦, 2024(8):83-85,88.
WANG D, REN Z S. Research on energy-saving reconstruction technology of building envelope [J]. Brick-Tile, 2024(8):83-85,88.
- [13] 朱维娜,秦颖,马丁媛,等. 碳交易试点政策发展现状及其对公共建筑的碳减排效应分析[J/OL]. 生态经济, 2025:1-18. (2025-01-14).
ZHU W N, QIN Y, MA D Y, et al. Analysis of the development status and carbon emission reduction effect of carbon trading pilot policy on public buildings [J/OL]. Ecological economy, 2025:1-18. (2025-01-14).