

城市更新背景下既有工业厂房低碳改造的多目标优化研究

董文秀^{1,2,*}, 曾里峰¹, 李欣雨¹

1. 内蒙古科技大学, 土木工程学院, 内蒙古 包头, 014000

2. 内蒙古自治区高校智能建造与运维工程研究中心, 内蒙古 包头, 014000

摘要: 城市更新与“双碳”目标下, 既有工业厂房低碳改造需统筹碳排放、投资回收与室内舒适度。本文以西安市某工厂厂房为对象, 构建 EnergyPlus 仿真、Morris 敏感性分析、多元线性回归 (MLR) 代理模型、权重法与熵权-TOPSIS 相结合的多目标决策框架。结果表明, 光伏面积、墙体保温、屋顶保温和窗户类型为关键参数; HLCCE 与 IDH 代理模型测试集 R^2 均大于 0.94, IPP 模型 R^2 为 0.824。不同偏好下方案差异显著: 环保优先方案碳排最低, 经济优先方案回收最快, TOPSIS 方案热舒适最优但碳排放与经济性均非最优。研究表明, 在本文设定的目标体系和候选方案范围内, 既有厂房改造难以形成同时兼顾低碳、经济与舒适目标的单一最优方案, 应结合主体偏好开展多方案比选。

关键词: 既有建筑改造; 低碳改造; 多目标优化; 半生命周期碳排放; 城市更新

Multi-Objective Optimization of Low-Carbon Retrofitting for Existing Industrial Buildings under Urban Renewal

Wenxiu Dong^{1,2,*}, Lifeng Zeng¹, Xinyu Li¹

1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, Inner Mongolia, China

2. Engineering Research Center for Intelligent Construction and Operation and Maintenance of Universities in Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014000, Inner Mongolia, China

Abstract: Under the goals of urban renewal and “dual carbon”, low-carbon retrofitting of existing industrial buildings needs to coordinate carbon emissions, investment payback, and indoor comfort. Taking a factory building in Xi'an as the research object, this study develops a multi-objective decision-making framework integrating EnergyPlus simulation, Morris sensitivity analysis, multiple linear regression (MLR) surrogate modeling, the weighting method, and entropy-weighted TOPSIS. The results show that photovoltaic area, wall insulation, roof insulation, and window type are the key parameters. The test-set R^2 values of the HLCCE and IDH surrogate models are both higher than 0.94, while the R^2 value of the IPP model is 0.824. Significant differences are observed among schemes under different preference orientations: the environmental-priority scheme achieves the lowest carbon emissions, the economic-priority scheme has the shortest payback period, and the TOPSIS scheme provides the best thermal comfort but is not optimal in terms of carbon emissions or economic performance. The results indicate that, within the objective system and candidate scheme range defined in this study, it is difficult to obtain a single optimal solution that simultaneously balances low carbon, economic performance, and comfort in the retrofitting of existing industrial buildings. Therefore, multi-scheme comparison should be conducted according to stakeholder preferences.

Keywords: Existing building retrofitting; Low-carbon retrofitting; Multi-objective optimization; Half-life-cycle carbon emissions; Urban renewal

在“双碳”目标持续推进背景下,建筑领域节能降碳已成为我国低碳转型的重要任务。建筑运行能耗占全社会总能耗的 20%以上,大量既有老旧建筑受建成标准、围护结构性能和设备效率限制,普遍存在能耗高、碳排放强度大等问题。随着我国城市发展由增量扩张转向存量优化,相关研究指出,城市更新已成为推动存量空间提质、功能更新与低碳转型协同的重要路径^[1]。老旧工业厂房具有空间体量大、围护结构薄弱、运行能耗高等特点^[2],其改造不仅要降低碳排放,还需兼顾投资回收和室内舒适度,因而具有典型的多目标权衡特征。

现有研究从生命周期评价、经济性分析和多目标优化等方面开展探索。生命周期碳排放评价能揭示改造隐含碳与运行减碳效益之间的关系,但不同技术路径的环境收益和经济代价往往并不一致^[3];多目标优化可用于比较方案综合表现^[4],但计算成本较高;敏感性分析和代理模型虽可降低变量维度与仿真成本,但与主客观决策方法的集成仍不充分^[5,6]。总体来看,已有成果多集中于住宅和公共建筑,对老旧工业厂房关注不足;同时,不同决策偏好下方案差异及其形成原因仍缺少系统揭示。

本文以西安市某既有工业厂房为对象,面向低碳、经济与舒适目标之间的权衡问题,构建融合 EnergyPlus 仿真、Morris 敏感性分析、多元线性回归代理模型、权重法与熵权-TOPSIS 法的低碳改造决策框架。研究重点包括:识别改造效果的关键参数,比较不同决策偏好下的方案差异,并确定兼顾多目标表现的推荐方案,为城市更新背景下工业建筑低碳改造提供可量化、可解释的决策参考。

1 研究框架与模型

1.1 研究框架

既有老旧厂房低碳改造需要在碳排放、经济回收与室内舒适度之间进行综合权衡。为保证方案评价既能反映建筑物理运行特征,又能支撑不同决策偏好下的方案比选,本文构建“基础数据收集—基准模型建立—关键参数筛选—代理模型预测—多目标决策”的研究框架。

首先,收集目标厂房的建筑几何信息、围护结构热工参数、窗户类型、HVAC 系统参数、人员与设备运行时间表、西安典型气象年数据、材料价格及碳排放因子,建立 EnergyPlus 基准模型,获得改造前运行能耗和室内热舒适状态。其次,以墙体保温厚度、屋顶保温厚度、窗户类型、光伏面积及部分运行参数为初选变量,采用 Morris 敏感性分析识别影响半生命周期碳排放、投资回收期 and 室内不舒适小时数的关键参数。再次,在关键参数空间内采用拉丁超立方采样生成 300 组样本,逐组运行 EnergyPlus,计算各方案的 HLCCE、IPP 和 IDH,并构建多元线性回归代理模型。最后,采用权重法比较环保优先、经济优先、舒适优先和均衡考虑四类情景下的最优方案,并基于代理模型生成 1000 组候选方案,利用熵权-TOPSIS 法进行综合排序,确定推荐改造方案。由此形成从建筑基础数据到优化决策结果的完整分析闭环。

1.2 评价指标模型

本文所称半生命周期碳排放是指既有建筑从改造实施时点至剩余使用寿命结束期间产生的碳排放,包括改造阶段隐含碳排放和改造后运行阶段碳排放。以半生命周期碳排放、投资回收期和室内不舒适小时数作为核心评价指标,分别表征环境效益、经济性和热舒适水平。三类指标均为成本型指标,数值越小表示方案越优。

半生命周期碳排放用于衡量建筑从改造实施到剩余寿命结束期间的总碳影响,由改造后运行碳排放和改造阶段隐含碳排放组成:

$$\text{HLCCE} = E_o(T_0 - T_u) + E_R, \quad E_R = \sum_{i=1}^m A_i E F_i \quad (1)$$

式中, E_o 为改造后年运行单位面积碳排放; T_0 为建筑设计寿命; T_u 为已使用年限; E_R 为改造阶

段单位面积隐含碳排放； A_i 为第*i*类材料、能源、运输或施工活动量； EF_i 为对应碳排放因子。该模型将建材生产、运输、施工、拆除及运行阶段纳入统一边界，可避免仅关注运行节能而忽略改造隐含碳的问题。

投资回收期反映改造投入通过节能收益回收所需年限，计算式为：

$$IPP=I/CF \quad (2)$$

式中， I 为初始投资， CF 为年节能收益。室内不舒适小时数基于 EnergyPlus 全年 8760 h 逐时模拟结果统计：

$$IDH=\sum_{t=1}^{8760} S_t \quad (3)$$

式中，若第*t*小时室内热环境不满足舒适条件，则 $S_t=1$ ，否则 $S_t=0$ 。空调运行时段采用 PMV-PPD 模型判定，自然通风时段采用适应性热舒适模型判定。HLCCE、IPP 和 IDH 共同构成后续方案优化与排序的评价基础。

1.3 关键参数与代理模型

既有厂房改造涉及围护结构、设备运行、内部热源和可再生能源配置等多类参数。若直接对所有变量进行优化，容易导致计算量过大且结果解释性不足。因此，本文采用 Morris 全局敏感性分析对 13 个初选参数进行筛选，识别对 HLCCE、IPP 和 IDH 影响显著的变量，并将不敏感参数固定为基准值。

敏感性分析后，选取墙体保温厚度、屋顶保温厚度、窗户类型和光伏面积作为核心优化变量。其取值范围为：墙体 EPS 保温厚度 2~20 cm，屋顶 XPS 保温厚度 0~30 cm，窗户类型为双层或三层玻璃，并在回归建模中采用 0-1 哑变量编码；光伏面积为 0~420 m²。设核心变量向量为：

$$X=(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (4)$$

其中， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别表示墙体保温厚度、屋顶保温厚度、窗户类型和光伏面积。

在此基础上，采用拉丁超立方采样生成 300 组参数组合，并通过 EnergyPlus 获得各样本对应的 HLCCE、IPP 和 IDH。为降低后续大规模方案评价的计算成本，构建多元线性回归代理模型：

$$Y_k=\beta_{0k}+\sum_{r=1}^4 \beta_{rk} x_r+\varepsilon_k, k=1,2,3 \quad (5)$$

式中， Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别对应 HLCCE、IPP 和 IDH； β_{0k} 和 β_{rk} 为回归系数； ε_k 为误差项。300 组样本用于代理模型训练与验证，后续 1000 组候选方案由代理模型快速预测，不再逐一运行 EnergyPlus，从而提高方案筛选效率。

1.4 多目标优化与综合决策

在获得候选方案的 HLCCE、IPP 和 IDH 后，采用极值法对三个成本型指标进行归一化处理：

$$f_{ij}=\frac{T_{ij}-T_{j,\min}}{T_{j,\max}-T_{j,\min}} \quad (6)$$

式中， T_{ij} 为第*i*个方案在第*j*个目标上的原始值， $T_{j,\min}$ 和 $T_{j,\max}$ 分别为第*j*个目标的最小值和最大值， f_{ij} 为归一化后的指标值。

为分析不同决策偏好对方案选择的影响，采用权重法构建综合目标函数：

$$\min F_i=\sum_{j=1}^3 w_j f_{ij} \quad (7)$$

式中， w_j 为第*j*个目标的权重。本文设置环保优先、经济优先、舒适优先和均衡考虑四类情景，

分别求解不同偏好下的最优改造方案,用于揭示降碳、经济和舒适目标之间的权衡关系。

为减少主观权重对最终排序的影响,进一步采用熵权-TOPSIS法对1000组候选方案进行客观排序。熵权法依据指标离散程度确定权重,可表示为:

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{i=1}^n f_{ij}} \quad (8)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (9)$$

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^3 (1-e_j)} \quad (10)$$

式中, p_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个方案的贡献度, e_j 为熵值, w_j 为客观权重。指标差异越大,熵值越小,其权重越高。

在获得客观权重后,采用TOPSIS法计算各方案与正、负理想解的相对距离,并得到贴近度:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

式中, D_i^+ 和 D_i^- 分别为方案到正理想解和负理想解的距离; $C_i \in [0,1]$ 。 C_i 越接近1,说明方案越接近综合理想状态。由此形成“目标计算-参数筛选-代理预测-权重优化-TOPSIS排序”的决策闭环,并最终确定兼顾碳排放、经济性与热舒适的推荐改造方案。

2 案例分析

2.1 案例概况与关键参数识别

以西安市某工业厂房为研究对象,如**错误!不能识别的开关参数**。所示,占地 3636.26 m²,人员约 200 人,剩余使用寿命 30 年,围护热工性能弱、能耗高,具改造典型性。基于建筑几何信息、围护结构参数、人员与设备运行时间表及西安典型气象年数据,本文在 EnergyPlus 中建立基准模型,得到基准方案 HLCCE 为 176.5 kg/m²、IPP 为 10.0 年、IDH 为 3406 h,作为后续方案对比依据。

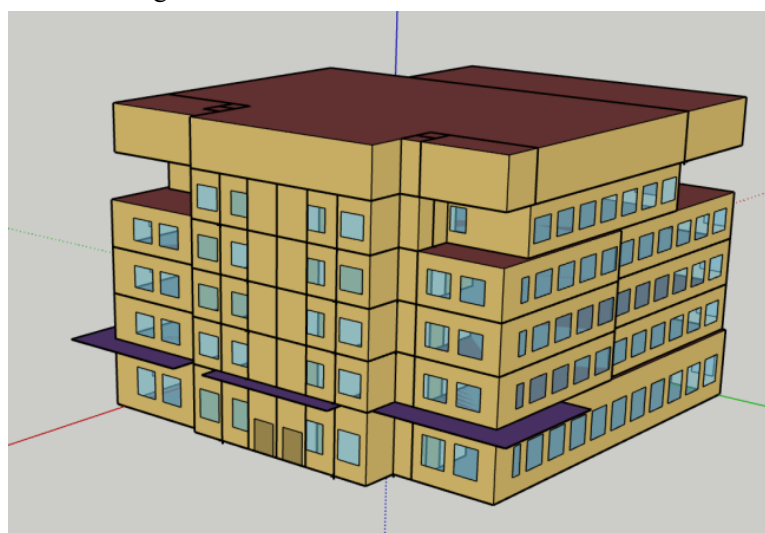


图 1 三维建筑模型

Fig. 1 Three-dimensional building model

为降低优化维度,采用 Morris 敏感性分析对 13 个初选参数进行筛选。鉴于篇幅限制,仅列示建筑能耗与半生命周期碳排放的 Morris 敏感性结果;IPP 和 IDH 的筛选结果在参数选择过程中同步考虑。如**错误!不能识别的开关参数**。所示,光伏面积对建筑能耗和半生命周期碳排放影响最大,平均绝对效应分别为 44100 和 473.3;墙体保温厚度次之,对节能与减排均具有明显作用;屋顶保温厚度

主要影响能耗目标；结合未列示的 IDH 敏感性结果，窗户类型对室内热舒适指标影响较明显。相比之下，风机效率、制冷送风温度、设备功率和照明功率等参数敏感性较低，可固定为基准值。因此，本文选取墙体保温厚度、屋顶保温厚度、窗户类型和光伏面积作为后续代理建模与优化决策的核心变量。

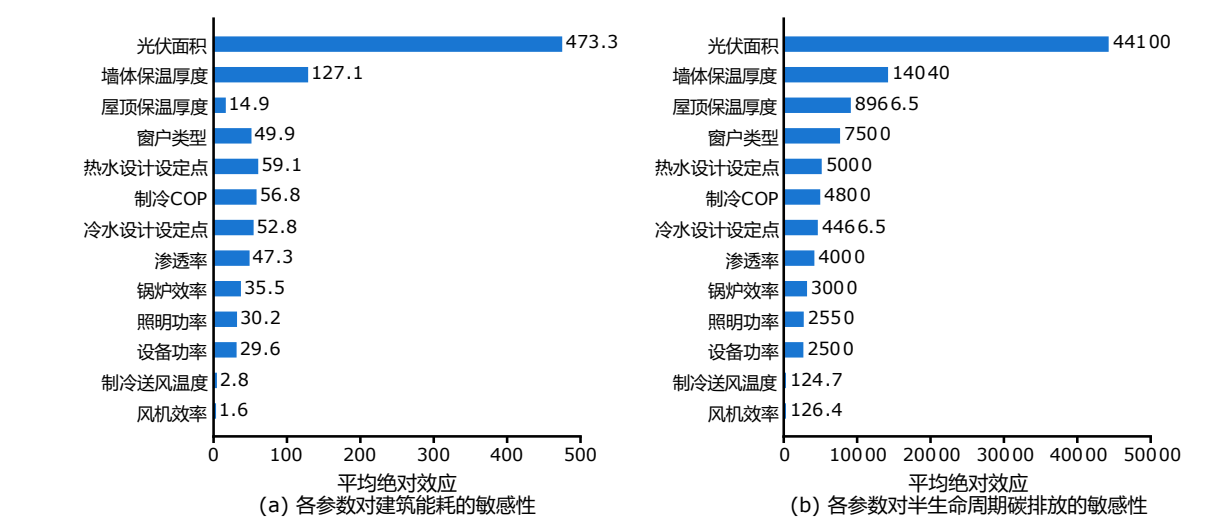


图 2 敏感性分析结果
Fig. 2 Results of sensitivity analysis

2.2 代理模型验证

在关键变量确定后，采用拉丁超立方采样生成参数组合，并通过 EnergyPlus 获得 HLCCE、IPP 和 IDH。为检验代理模型可靠性，将 300 组样本按 8:2 随机划分为训练集和测试集，其中 240 组用于训练，60 组用于测试。如错误!不能识别的开关参数。所示，HLCCE 模型测试集 R^2 为 0.9432、MAE 为 35.65；IPP 模型测试集 R^2 为 0.8235、MAE 为 0.35；IDH 模型测试集 R^2 为 0.9591、MAE 为 22.97。总体来看，HLCCE 和 IDH 模型拟合精度较高；IPP 模型拟合精度低于前两者，但测试集 R^2 仍达到 0.8235，可用于候选方案的快速初步筛选。对于最终推荐方案，仍需结合详细仿真或工程校核进一步确认。上述结果说明，所选四个关键参数能够较好解释目标变化，可用于后续 1000 组候选方案的快速预测与排序。

表 1 多元线性回归代理模型性能指标
Table 1 Performance metrics of the multiple linear regression surrogate model

模型	数据集	R^2	MAE
HLCCE	训练集	0.9469	37.32
	测试集	0.9432	35.65
IPP	训练集	0.7786	0.31
	测试集	0.8235	0.35
IDH	训练集	0.9709	22.75
	测试集	0.9591	22.97

2.3 多目标优化结果与讨论

为揭示不同决策偏好对改造方案的影响，本文设置环保优先、经济优先、舒适优先和均衡考虑四类情景，并进一步采用熵权-TOPSIS 法从 1000 组候选方案中确定综合推荐方案。如错误!不能识别的开关参数。所示，不同偏好下方案参数与目标表现差异明显。

不同方案对比分析如错误!未找到引用源。所示，环保优先方案 A 采用 20.0 cm 墙体保温、30.0 cm 屋顶保温、三层玻璃和 378 m²光伏面积，HLCCE 降至 142.6 kg/m²，较基准降低 19.2%，为所有方案中最低，但 IPP 为 3.6 年，说明低碳目标强化会带来一定投资回收压力。经济优先方案 B 将光伏面积降至 49 m²，IPP 缩短至 2.0 年，但 HLCCE 升至 162.8 kg/m²、IDH 达到 2883 h，表明短期经济性提升会削弱环境和舒适收益。舒适优先方案 C 的 IDH 为 2595 h，优于经济优先方案，但并非全局最优，说明权重法得到的是综合目标下的偏好解，而不是单项目标最优解。均衡方案 D 各指标处于中间水平，体现了等权情景下的折中结果。

表 2 不同偏好下改造方案对比
Table 2 Comparison of retrofitting schemes under different preferences

参数	环保优先 A	经济优先 B	舒适优先 C	均衡考虑 D	TOPSIS E
墙体保温/cm	20.0	18.2	18.0	18.0	17.2
屋顶保温/cm	30.0	23.0	27.0	27.0	18.4
窗户类型	三层	双层	三层	三层	三层
光伏面积/m ²	378	49	271	150	418.1
HLCCE/kg·m ⁻²	142.6	162.8	148.0	150.7	167.1
IPP/年	3.6	2.0	3.4	3.0	5.7
IDH/h	2553	2883	2595	2582	2408

熵权法测算得 HLCCE、IPP、IDH 的客观权重依次为 40.58%、32.80%、26.62%，其中 HLCCE 对候选方案的区分度最高。经熵权-TOPSIS 排序得到的方案 E 配置为：墙体保温厚度 17.2 cm、屋顶保温厚度 18.4 cm、三层玻璃、光伏面积 418.1 m²；对应 HLCCE 为 167.1 kg/m²，IPP 为 5.7 年，IDH 为 2408 h。该方案热舒适表现最优，IDH 较基准工况降低 29.3%，但碳排放改善幅度有限，且投资回收期最长。从参数组合看，方案 E 采用较大光伏面积和三层玻璃配置，有利于改善室内热环境，但也可能增加初始投资和改造阶段隐含碳排放，因此其经济性与碳排放指标未达到最优。综上，既有厂房低碳改造不存在绝对最优方案，需结合业主投资能力、低碳目标与舒适需求开展多方案比选；方案 E 仅为综合排序规则下的推荐结果，其适用性仍需结合实际改造目标判定。

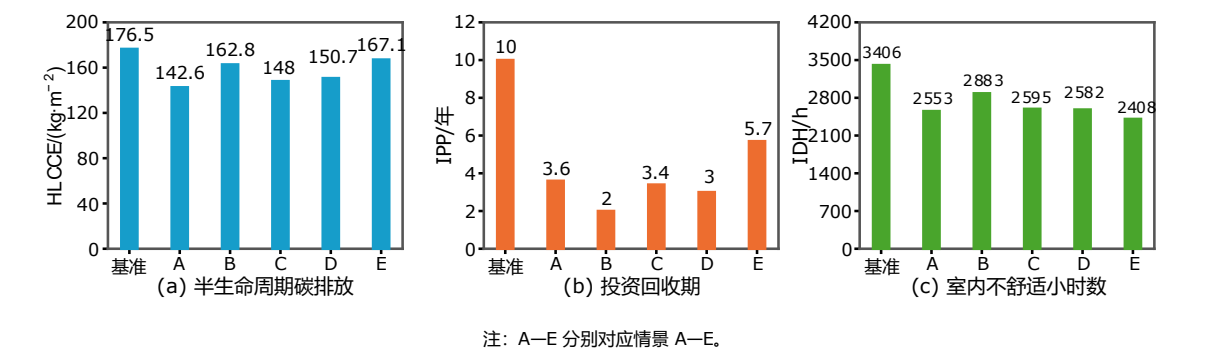


图 3 不同方案目标值对比
Fig. 3 Comparison of Objective Values Among Different Retrofitting Schemes

3 结论

(1) 本文构建了“EnergyPlus 仿真—Morris 筛选—MLR 预测—权重法/熵权-TOPSIS 决策”的既有工业厂房低碳改造框架，将 HLCCE、IPP 和 IDH 纳入统一评价，实现了环境、经济与舒适目标的协同分析。

(2) Morris 分析表明, 光伏面积、墙体保温厚度、屋顶保温厚度和窗户类型是主要敏感变量; MLR 代理模型对 HLCCE、IPP 和 IDH 的测试集 R^2 分别为 0.9432、0.8235 和 0.9591, 可满足候选方案初步筛选需求。

(3) 多情景优化表明, 低碳、经济和舒适目标存在显著权衡: A 方案碳排最低, B 方案回收最快, E 方案热舒适最优但碳排和经济性均非最优。因此, 在本文设定的目标体系和候选方案范围内, 既有厂房改造应结合主体偏好开展多方案比选, 而非简单追求单一指标最优。

参考文献

- [1] 黄耿志, 李郇, 张文忠, 等. 高质量发展转型背景下的中国城市更新: 挑战与路径[J]. 自然资源学报, 2025, 40(1): 1-19.
- [2] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告 (2023 年) [J]. 建筑, 2024, (2): 46-59.
- [3] Mohammadpourkarbasi H, Riddle B, Liu C, et al. Life cycle carbon assessment of decarbonising UK's hard-to-treat homes: a comparative study of conventional retrofit vs EnerPHit, heat pump first vs fabric first and ecological vs petrochemical retrofit approaches[J]. Energy and Buildings, 2023, 296: 113353.
- [4] Arbulu M, Oregi X, Etxepare L. Environmental and economic optimization and prioritization tool-kit for residential building renovation strategies with life cycle approach[J]. Building and Environment, 2023, 228: 109813.
- [5] Zhou Y, Tam V W Y, Le K N. Sensitivity analysis of design variables in life-cycle environmental impacts of buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 65: 105749.
- [6] Luo S L, Shi X, Yang F. A review of data-driven methods in building retrofit and performance optimization: from the perspective of carbon emission reductions[J]. Energies, 2024, 17(18): 4641.

基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目 (2024QNJS083), 内蒙古科技大学创新基金 (2019QDW-S07)。

^{1,*}第 1 作者&通讯作者简介: 董文秀 (1993-), 女, 讲师, 研究方向: 低碳项目管理与智能建造。
E-mail: dongwenxiu@imust.edu.cn。