

# 气候变化下既有建筑外围护结构改造策略研究

詹韞玮, 谭良斌

(昆明理工大学 建筑与城市规划学院, 云南 昆明 650504)

**摘要:** 以深圳市某住院部为研究案例, 从能源、经济、热舒适三个方面对建筑外围护结构的节能改造策略进行了综合评价, 研究特别考虑了典型气候条件和未来气候条件的影响, 并对对比分析了不同气候条件下改造策略在节能效益、经济效益和热舒适性方面的变化情况。结果表明: 气候变化对建筑性能的影响不容忽视。不同改造策略在不同气候条件下的表现差异显著, 这直接影响了改造策略的潜在经济效益。因此, 在未来的建筑改造策略分析中, 必须充分考虑气候变化的影响。

**关键词:** 建筑外围护; 节能改造策略; 未来气候变化

中图分类号: TU241.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)06-0837-09

## Research on renovation strategy of existing building envelope structure under climate change

ZHAN Yunwei, TAN Liangbin

(School of Architecture and Urban Planning, Kunming Univ. of Sci. & Tech., Kunming 650504, China)

**Abstract:** This article takes a certain inpatient department in Shenzhen as a case study, and comprehensively evaluates the energy-saving renovation strategies of building envelope structures from three aspects: energy, economy, and thermal comfort. The study particularly considers the influence of typical and future climate conditions, and comparatively analyzes the changes in energy-saving benefits, economic benefits, and thermal comfort of renovation strategies under different climate conditions. The results indicate that the impact of climate change on building performance cannot be ignored. The performance of different renovation strategies varies significantly under different climatic conditions, which directly affects the potential economic benefits of the renovation strategies. Therefore, in the analysis of future building renovation strategies, the impact of climate change must be fully considered.

**Key words:** building envelope; energy saving renovation strategy; future climate change

在全球范围内, 建筑业消耗的最终能源占比超过三分之一<sup>[1]</sup>, 而许多既有建筑属于能源密集型建筑, 包括医院、体育馆、商场等大型公共建筑<sup>[2]</sup>。在我国, 大量既有建筑达不到节能标准要求, 且能耗高、室内热环境差, 存在较大的能源浪费<sup>[3]</sup>。鉴于此, 对既有建筑进行节能改造不仅是实现能源节约的有效途径, 也是推动建筑业可持续发展的关键<sup>[4-5]</sup>。然而, 建筑改造是一项长期且重大的投资决策, 因此, 评估其对未来气候变化的适应性至关重要。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第六次评估报告<sup>[6]</sup>, 气候变化引发的气温上升、气候变异性增强以及极端气候事件

频发, 对建筑 and 建筑环境构成了严峻挑战。建筑环境的可持续性在很大程度上取决于其对气候变化的适应能力<sup>[7]</sup>。改造后的建筑不仅要满足当前的能源效率和室内舒适度要求, 还应具备适应未来气候及其长期和短期变化的能力。

建筑改造领域涵盖了多种策略与方法, 早期研究主要集中在技术层面。安装可再生能源系统, 如太阳能光伏板和太阳能集热器, 已被证明是提升建筑能源效率的关键措施<sup>[8-9]</sup>。此外, 建筑围护结构的优化在改造过程中同样至关重要, 其对建筑的热性能和能源消耗具有显著影响<sup>[10-11]</sup>。暖通空调系统的效率提升也备受关注, 因为它直接关

收稿日期: 2024-01-20

修回日期: 2024-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802700)

第一作者: 詹韞玮(1997—), 女, 硕士生, 主要从事建筑节能策略的相关研究。E-mail: 215321875@qq.com

通信作者: 谭良斌(1979—), 女, 博士, 教授, 主要从事绿色建筑及其环境设计和数字化建筑设计的相关研究。E-mail: 51478646@qq.com

系到建筑的能源使用和室内环境质量<sup>[12-13]</sup>。近年来,国内学者开始关注特定地区建筑类型的改造适宜性及节能策略。例如,潮汕地区的传统夯土建筑<sup>[14]</sup>、豫南地区的山地砖木民居<sup>[15]</sup>、内蒙古农村牧区的民居<sup>[16]</sup>以及皖南的徽派民居<sup>[17]</sup>,均被纳入研究范畴。这些研究不仅考虑了地域文化和建筑特色,还探讨了相应的节能改造策略。另一方面,也有部分学者研究节能改造策略的组合优化问题,通过平衡不同目标函数得到一个或一组最优的改造方案(集)。丁志坤<sup>[18]</sup>提出了一种结合BP神经网络和蒙特卡洛-非支配排序遗传算法的多目标优化方法,用于建筑围护结构改造参数的优化设计。高源<sup>[19]</sup>构建了一个多目标优化设计模型,以采暖碳排放、采暖季室内热舒适性和改造成本增量为优化目标,针对河北平原地区的“双替代”农宅进行低碳化改造。邵兆楠<sup>[20]</sup>则利用 Energy-Plus 和 Jeplus+EA 软件进行联合仿真,研究了建筑围护结构和光储系统的协同优化。尽管建筑节能改造的类型与策略多种多样,但其核心目标是为现有建筑带来经济、能源或社会效益。然而,目前的研究在既有建筑节能改造过程中对气候变化影响的关注不足,导致在分析改造方案的能源或经济效益时,往往忽视了气候变化带来的潜在影响。因此,需要更加关注气候变化对既有建筑改造策略的影响情况,尤其是探究不同改造策略在气候变化影响下的建筑能源性能及热舒适性。

本研究旨在深入探讨气候变化对建筑外围护结构改造策略的具体影响,并选取深圳市某住院部作为案例进行分析。首先从能源、经济、热舒适三个维度建立了既有建筑节能改造策略的评价指标体系,以全面科学地评估既有建筑节能改造策略。其次,通过引入典型年和未来年的气候数据,本文模拟并分析了不同改造策略在当前及未来气候条件下的能源效益、经济效益和热舒适性。最后,对比分析不同改造策略在气候变化影响下的表现,旨在识别出在气候变化背景下最具适应性和可行性的外围护结构改造策略。

## 1 研究方法

### 1.1 基于 Ladybug 和 Honeybee 的建筑性能模拟

Ladybug 是支持分析和改进建筑环境性能的开源应用程序和集成工作流程的集合,是基于 3D 建模软件 Rhino 中的 Grasshopper 平台开发的,而 Honeybee 通过将 Grasshopper 链接到 Radiance、EnergyPlus/OpenStudio 等引擎来构建采光与热力

学模型。Ladybug + Honeybee 通过将多个开发的仿真软件程序集成到建筑性能模拟中,从而在同一模型中计算能耗、太阳辐射、风、日照、温度、湿度和热舒适的耦合,克服了传统多平台仿真方法的局限性<sup>[21]</sup>。

本研究选择 Rhino & Grasshopper (GH) 建立模拟分析所需的基准模型,并使用 GH 平台中的 Ladybug 与 Honeybee 插件评估能源性能与热舒适性,已经有大量研究验证了 GH 平台在建筑节能分析的优势,包括简化分析流程、自动化以及减少计算时间等<sup>[22-24]</sup>。建筑负荷信息使用《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015—2021)的计算标准<sup>[25]</sup>。在正式模拟分析前需要对基准模型进行验证,保证模拟结果的准确性。

### 1.2 基于 CCWorldWeatherGen 的未来气象数据生成

在气候科学领域,生成未来气候变化下逐时数据并进行定量的建筑能耗模拟已成为国内外学者研究的重点,并提出了多种预测未来逐时气象数据的方法<sup>[26]</sup>。其中变形方法是一种利用历史气候数据来预测未来气候参数变化的有效手段。该方法通过分析历史气候数据的统计特性,计算当前气候参数在历史平均值附近的变化,从而预测未来的气候趋势<sup>[27]</sup>。目前,常用的气候变形工具包括 CCWorldWeatherGen 和 Weather Shift。CC-WorldWeatherGen 特别适用于生成全球任何位置的气候变化文件,从而支持建筑性能模拟程序的需求。该工具基于 HadCM3 A2 实验集合的政府间气候变化专门委员会(IPCC)第三次评估报告模型汇总数据,能够将现有的 EPW 天气文件转换为与大多数建筑性能模拟程序兼容的气候变化 EPW 或 TMY2023 天气文件。

针对本研究的目的,首先将 EnergyPlus 网站上提供的深圳市典型年的气候文件(.epw)转换为 MS Excel 数据文件。接着,利用 CCWorldWeatherGen 工具对这些数据进行变形处理,生成符合未来情景的深圳市气候数据。最终,导出深圳市 2050 年的气候文件,并用于后续的建筑性能分析过程。

### 1.3 改造策略的评价指标体系

#### 1.3.1 节能率

节能率  $E_c$  的计算公式可以表示为

$$E_c = \frac{E_b - E_a}{E_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E_b$  表示改造前建筑运行一年的总能耗值,

$E_a$  表示改造后建筑运行一年的总能耗值。由于改造措施只涉及建筑的围护结构,因此本研究主要关注对加热与制冷能耗的影响。 $E_a$  或  $E_b$  的计算公式可以表示为

$$E_C = E_{\text{heating}} + E_{\text{cooling}} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{heating}}$  表示改造后建筑全年加热总能耗值, kWh;  $E_{\text{cooling}}$  表示改造后建筑全年制冷总能耗值, kWh。其中  $E_{\text{heating}}$  与  $E_{\text{cooling}}$  依据《建筑节能与可再生能源利用通用规范(GB55015—2021)》<sup>[25]</sup> 的规定进行计算,具体公式如下。

$$E_{\text{heating}} = \frac{Q_{\text{heating}}}{\alpha\beta\gamma} \varphi \quad (3)$$

$$E_{\text{cooling}} = \frac{Q_{\text{cooling}}}{COP} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{heating}}$  与  $Q_{\text{cooling}}$  分别表示建筑全年累计耗热量与耗冷量; $\alpha$  表示热源为燃气锅炉的供暖综合效率,取 0.85; $\beta$  为标准天然气热值,取 9.87 kWh/m<sup>3</sup>; $\gamma$  为综合发电煤耗,取 0.330 kgce/kWh; $\varphi$  表示天然气与标准煤的折算系数,取 1.21 kgce/m<sup>3</sup>; $COP$  表示公共建筑供冷系统综合性能系数,取 3.50。

### 1.3.2 财务净现值

项目的净现值(NPV)是项目在其寿命期内预计创造的全部净效益。本文借鉴 Pazouki 的研究成果<sup>[28]</sup>,将能源价格年增长率引入到净现值的计算中,NPV 的计算公式可以表示为

$$NPV = (P_{\text{tot}} - M_{\text{tot}}) \left[ \frac{\left(1 + \left(\frac{d-\theta}{1+\theta}\right)\right)^T - 1}{\left(\frac{d-\theta}{1+\theta}\right) \left(1 + \left(\frac{d-\theta}{1+\theta}\right)\right)^T} \right] - C_{\text{tot}} + I \quad (5)$$

式中: $P_{\text{tot}}$  和  $M_{\text{tot}}$  分别为使用周期内的年度节能利润总额和年度维护费用总额, $d$  为折现率, $\theta$  为能源价格年增长率, $T$  是服务周期, $C_{\text{tot}}$  是初始总成本, $I$  是政府补贴。

### 1.3.3 全年热舒适时间变化率

热舒适时间指的是在特定时间段内,人们在建筑或空间内感到热舒适的累计时间。该指标基于 Fanger 教授的 PMV-PPD 模型<sup>[29]</sup> 进行计算,一般认为  $PMV_i \in (-0.5, 0.5)$  时被认为是舒适的。具体热舒适时间(TCH)的计算公式如下。

$$TCH = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1, & \text{如果 } PMV_i \in (-0.5, 0.5) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $PMV_i$  是第  $i$  小时的 PMV 值, $n$  是时间段内的小时总数。基于此,全年热舒适时间变化率

$TCH_c$  的计算公式可以表示为:

$$TCH_c = \frac{TCH_b - TCH_a}{TCH_b} \times 100\% \quad (7)$$

## 2 改造案例

### 2.1 案例概述

本研究对某大型综合医院的一栋住院楼进行了调研,该建筑位于夏热冬暖地区(广东省深圳市),4月到10月的干球温度长期保持在 26℃ 以上,需要长时间使用空调保证室内环境的舒适。不同于其他既有建筑,该住院楼在围护结构中使用了大量的玻璃幕墙,尽管选择了隔热性能较好的 Low-E 中空玻璃,但能耗问题依然十分突出,改造前单位面积能耗达 243.7 kWh/m<sup>2</sup>,具有较大的节能潜力。该建筑的层数为 7 层,总建筑面积达 24 483.19 m<sup>2</sup>,如图 1 所示。



图 1 案例建筑

Fig. 1 Photograph of case building

### 2.2 模型建立及参数设置

为保证模拟分析的可靠性,需要在 Grasshopper 的 Honeybee 插件中设置建筑构造集、使用负荷、热舒适分析的边界条件等信息。表 1 展示了基准模型围护结构的热工性能参数,不同功能区域的人员在室率与其他负荷信息由《建筑节能与可再生能源利用通用规范(GB55015—2021)》与 ASHRAE 90.1 共同确定<sup>[25,30]</sup>。在计算热舒适评价指标时,本文根据不同功能空间分别设置了人员活动类型(代谢率),衣服热阻使用 Grasshopper 中的 LB Clothing by Temperature 组件进行自动设置,该组件通过 Schiavon 模型动态调整人体穿衣水平,其原理是利用外部气温来估算人们为保持热舒适所需的穿衣水平<sup>[31]</sup>。除代谢率和衣服热阻外,其他参数的设置思路如下:(1)通过建筑性能模拟的逐时结果去设置每个功能空间的空气温度、平均辐射温度和相对湿度;(2)空气流速设置为

0.1 m/s, 这是暖通空调系统引起的典型房间空气速度; (3) 由于没有考虑剧烈的环境应力, 在计算中忽略了 PMV 模型中使用的有效机械功率  $W$ ; (4) 其余参数根据 ISO 7730—2005<sup>[32]</sup> 中的公式计算获得, 由 Grasshopper 中的 Ladybug PMV Comfort 组件实现. 此外, 模拟地点设置为深圳市, 并输入了深圳市典型年与 2050 年的气候数据.

表 1 围护结构主要参数

Tab. 1 Building envelope information of the case

部位	参数	值	构造信息
屋面	传热系数 $K / W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	0.832	30 mm 厚挤塑聚苯板
外墙	传热系数 $K / W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	1.12	200 mm 厚加气混凝土
外窗 (包含玻璃幕墙)	传热系数 $K / W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ 玻璃透光率 可开启面积	3.0 0.53 31%	LOW-E 中空铝合金窗
地面	热阻 $R / m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	1.234	

### 2.3 模型检验与校准

根据美国采暖、制冷和空调工程师学会

(ASHRAE) 指南 14—2014 的要求, 模型建立后需要使用均方根误差的变异系数  $CV(RMSE)$  和标准化平均偏差误差  $NMBE$  对基准模型进行了检验与校准, 保证模拟分析的可靠性. 具体计算公式如下:

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{(n - p) \times \bar{y}} \quad (8)$$

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - p)}}}{\bar{y}} \quad (9)$$

式中:  $\hat{y}_i$  表示模拟预测的数据,  $\bar{y}$  表示用于校准的效用数据,  $p=1$ .

本研究通过以下三个步骤对模型进行检验与校准: (1) 使用 GH 平台中的 Honeybee-Energy 插件模拟基准模型的全年逐月能耗; (2) 计算其月度数据的均方根误差的变异系数  $CV(RMSE)$  和标准化平均偏差误差  $NMBE$ ; (3) 通过能源审计账单对基准模型的参数进行调整, 重新模拟全年逐月能耗并计算  $CV(RMSE)$  与  $NMBE$ . 具体过程如表 2 所示, 校准后的模型其总能耗的  $NMBE$  与  $CV(RMSE)$  均在接受范围内 ( $\pm 5\%$  和  $15\%$ ), 可以用于后续模拟分析.

表 2 基准模型与校准后的模型

Tab. 2 Calibration process of the benchmark model

仿真模型	变化参数	能源消耗总量	
		$NMBE / \%$	$CV-RMSE / \%$
基准模型	创建基准模型, 设定空调供暖和制冷设定值, 人员占用, 照明和设备时间表.	-26.86	31.05
校准模型(1)	人均占有面积从 25 调整为 30.	-29.66	33.73
校准模型(1+2)	电气设备功率密度从 15 调整至 12.	8.02	11.80
校准模型(1+2+3)	根据实际调研数据更改照明、设备和暖通空调系统时间表.	5.20	10.52
校准模型(1+2+3+4)	根据调研的加热和冷却设定值数据来固定加热和冷却设定值.	-0.83	10.25

## 3 结果与讨论

### 3.1 外墙改造

以 Grasshopper 平台的 Ladybug + Honeybee 为建筑仿真软件, 对校准后的模型进行建筑性能模拟, 其在典型气候条件与未来气候条件的基准模拟数据如表 3 所示.

表 3 基准模型不同气候条件下的能耗值与全年热舒适时间

Tab. 3 Comparison of different periods climate conditions

for the benchmark model's energy consumption and

annual thermal comfort time

	能耗值 / kWh	全年热舒适时间 / h
典型气候条件	3 753 664.76	5 685.00
未来气候条件	4 728 095.72	5 607.00

从表中可以看出未来气候变化会导致建筑全年运行的能耗值增加, 同时降低其热舒适时间, 这是因为案例建筑位于夏热冬暖地区, 全球气候变暖趋势将加剧建筑的制冷需求, 进而增加建筑的制冷能耗, 并降低全年的热舒适时间. 首先对外墙改造策略进行模拟分析, 保温材料选择 EPS 板、XPS 板、RW 板三种, 变量为保温层厚度. 图 2~4 展示了外墙改造后不同保温板类型和气候条件下的节能率、热舒适时间变化率与净现值.

如图 2 所示, 节能率随着保温层厚度的增加而显著提高. 当保温层厚度从 0 增加到 100 mm 时, 在典型气候条件下, RW 板、EPS 板和 XPS 板的节能率分别达到了 0.43%、0.46% 和 0.47%. 而在模拟未来气候条件时, 这些材料的节能率进一

步提升至 0.66%、0.69% 和 0.71%。从保温材料的类型来看, XPS 板在同一厚度下展现出略高于 EPS 板和 RW 板的节能效益, 并且在 0 至 100 mm 的整个厚度范围内始终保持这一优势。从气候变化的角度分析, 同一保温材料类型和厚度在未来气候条件下的节能效益普遍高于典型气候条件。这一发现表明, 如果仅使用典型气候文件进行建筑性能分析, 可能会低估实际的节能效益, 尤其是在考虑到未来气候变化的情况下。

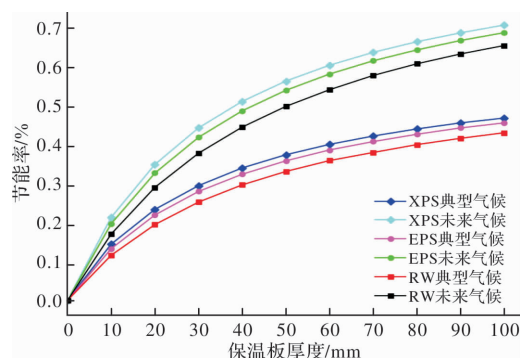


图2 外墙改造不同保温板类型和气候条件下的节能率

Fig. 2 Energy saving rate of exterior wall renovation under different types of insulation panels and climate conditions

图3展示了外墙改造策略对建筑热舒适性的影响情况, 从图中可以看出无论是典型气候条件还是未来气候条件, 外墙改造均会增加案例建筑的全年热舒适时间, 并且典型气候的提升幅度要高于未来气候, 同时当保温板厚度大于 30 mm 时, 全年热舒适时间的提升率就不再有较大变化。此外, 三种保温材料类型的热舒适性能差距较小, 在典型气候条件下, 保温板厚度为 100 mm 时的热舒适时间变化率为 0.65%~0.7%; 而在未来气候条件下, 该值则降低至 0.34%~0.43%。

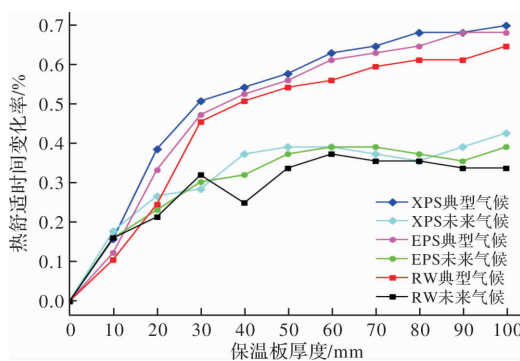


图3 外墙改造不同保温板类型和气候条件下的热舒适时间变化率

Fig. 3 Thermal comfort time rate of exterior wall renovation under different types of insulation panels and climate conditions

图4展示了外墙改造带来的经济效益, 由前文

分析可知, 外墙改造对建筑的节能效益较小, 因此在典型气候条件下几乎不具备经济效益(净现值小于0)。而在未来气候条件下, 三种保温板类型同时呈现了先增长后降低的变化情况, 当保温板厚度为 30 mm 时, 外墙改造带来的经济效益最高。此时 RW、EPS 与 XPS 板的净现值分别为 36 687.22 元、55 854.96 元与 33 096.39 元, 可以发现 EPS 板带来的经济效益要高于 RW 板与 XPS 板。而当保温板厚度大于 60 mm 时, RW 板与 XPS 板则不具备经济效益, EPS 板则在保温板为 90 mm 时出现亏损。

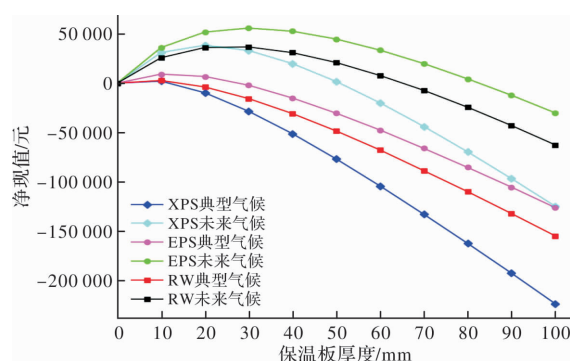


图4 外墙改造不同保温板类型和气候条件下的净现值

Fig. 4 Financial net present value of exterior wall renovation under different types of insulation panels and climate conditions

### 3.2 屋面改造

图5~7展示了屋面改造不同保温板类型和气候条件下的节能效益、热舒适性与经济效益。从图5可以看出气候变化对屋面改造节能率的影响要小于外墙改造, 尽管未来气候条件下, 屋面改造策略的整体节能效益仍要高于典型气候条件, 但并没有较大差距。在保温材料类型上, 节能效益最高的仍为 XPS 板, 其次是 EPS 与 RW 板。此外, 随着保温板厚度的增加, 节能率也均呈上升趋势。XPS、EPS、RW 板的最大节能率分别为 4.34%、4.22% 与 4.03%。

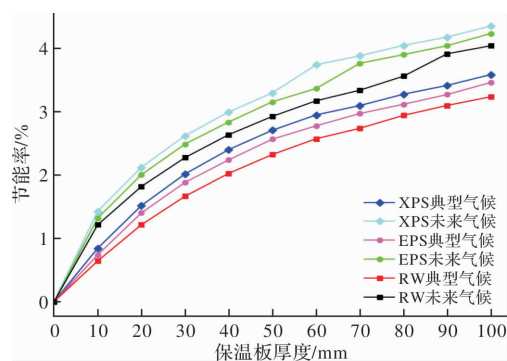


图5 屋面改造不同保温板类型和气候条件下的节能率

Fig. 5 Energy saving rate of roof renovation under different types of insulation panels and climate conditions



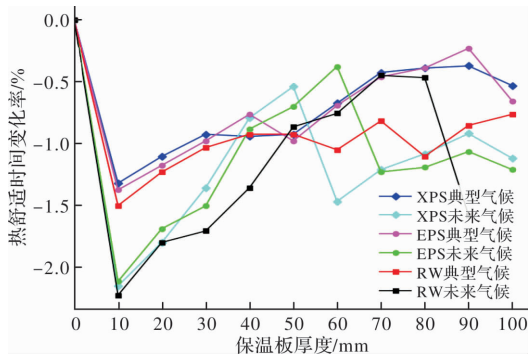


图 6 屋面改造不同保温板类型和气候条件下的热舒适时间变化率

Fig. 6 Thermal comfort time rate of roof renovation under different types of insulation panels and climate conditions

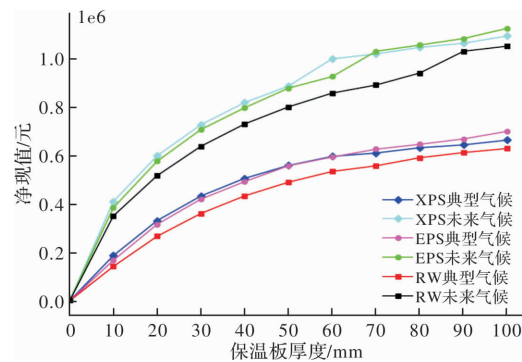


图 7 屋面改造不同保温板类型和气候条件下的净现值

Fig. 7 Financial net present value of roof renovation under different types of insulation panels and climate conditions

图 6 展示了不同气候条件下屋面改造对热舒适时间变化率的影响。与外墙改造相比,屋面改造策略在典型气候条件和未来气候条件下均导致了全年热舒适时间的减少,尤其是在保温板厚度为 10 mm 时,热舒适时间的降低最为显著。这一现象表明,屋面改造对热舒适性的影响可能比外墙改造更为复杂。进一步分析揭示了两种气候条件下热舒适时间变化的不同规律。在典型气候条件下,随着保温板厚度的增加,尤其是当厚度超过 10 mm 时,所有类型的保温材料均显示出厚度与热舒适时间之间的波动上升趋势。这可能与保温层厚度增加导致的热延迟效应有关,从而在一定程度上改善了热舒适性。然而,在模拟未来气候条件时,观察到不同的现象。当 XPS、EPS 和 RW 保温板的厚度分别达到 50 mm、60 mm 和 80 mm 后,热舒适时间会经历一个突然的下降趋势,随后再次上升。这种非线性变化可能与未来气候条件下更为极端的温度波动有关,需要进一步的研究来探究其背后的物理机制。

图 7 展示了屋面改造在两种气候条件下带来的

经济效益,由于屋面改造相较于外墙改造具有更高的节能效益,因此无论是典型气候还是未来气候下,所有改造策略的净现值均大于 0,并且 XPS 与 EPS 板的经济效益差距较小,且均大于 RW 板的经济效益。同样地,从曲线的倾斜程度可以发现典型气候下,当保温板厚度大于 50 mm 后,经济效益的增加便不显著。而在未来气候条件下,净现值与保温板厚度始终呈正相关。这意味着对现有建筑的屋面进行改造可以带来较高的经济效益,尤其是考虑气候变化的影响。当保温板厚度为 100 mm 时,XPS、EPS 与 RW 板的净现值分别为 1 094 365.84 元、1 125 803.61 元与 1 052 175.91 元。

### 3.3 外窗改造

本文选取了 6 种类型的高性能外窗进行案例建筑的节能改造过程,具体信息如表 4 所示。通过模拟不同外窗两种气候条件下的节能率可以发现,外窗改造均具有较高的节能效益,这得益于案例建筑较大的窗墙比,如图 8 所示。同时在典型气候条件下,所有外窗的差距较小,除编号 3 的外窗节能率为 1.47% 外,其余外窗的节能率均大于 2.00%。而在未来气候条件下,节能率的提升则更为显著,编号 3 的外窗节能率也达到了 3.10%,其余外窗的节能率均大于 4.00%。其中节能效益最大的为编号 1、2 的窗户,节能率分别为 4.75% 与 4.74%。

表 4 不同外窗的具体信息

Tab. 4 Exterior windows' configuration

编号	传热系数	SHGC	可见光透射比	单位成本
1	1.00	0.40	0.48	1 448.10
2	1.10	0.40	0.53	932.00
3	1.30	0.48	0.67	643.50
4	1.50	0.43	0.44	591.50
5	1.80	0.43	0.45	559.20
6	2.00	0.42	0.45	530.80

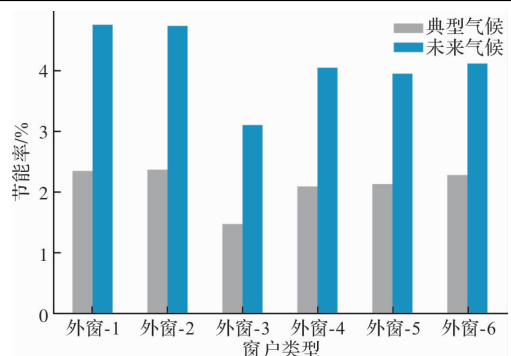


图 8 外窗改造不同玻璃类型的节能率

Fig. 8 Energy saving rate of exterior window renovation for different glass types

图9展示了所有外窗改造后的热舒适时间变化率,与屋面改造类似,外窗改造同样会降低案例建筑的全年热舒适时间,尽管它具有较高的节能效益。在典型气候条件下,降低全年热舒适时间最多的为窗户-6,其次是窗户-5,窗户-1、窗户-2和窗户-4差距较小,对热舒适性影响最小的是外窗-3。而在未来气候条件下,除外窗-3外,所有外窗对案例建筑的全年热舒适时间均降低了10%以上。

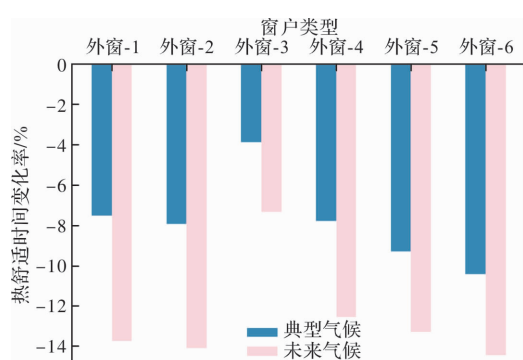


图9 外窗改造不同玻璃类型的热舒适时间变化率

Fig. 9 Thermal comfort time rate of exterior window renovation for different glass types

图10展示了外窗改造在两种气候条件下的经济效益情况,可以发现两种气候条件下外窗改造带来的经济效益具有非常明显的差距。在典型气候条件下,编号1、2、3的外窗均不具备经济效益,同样的,即使编号4、5的外窗净现值大于0,但也可以忽略不计。仅编号6的外窗净现值达到了91 789.58元。而在未来气候条件下,由于节能效益的大幅提升,6种类型的外窗均具有经济效益,其中编号2、4、5、6的净现值较高,达到了606 414.56~776 044.93元。即使是外窗-1,其净现值也达到了146 604.37元,要高于典型气候条件下的外窗6。这表明气候变化对既有建筑节能改造的经济效益分析影响较大,决策者容易忽视改造方案所能带来的经济效益。

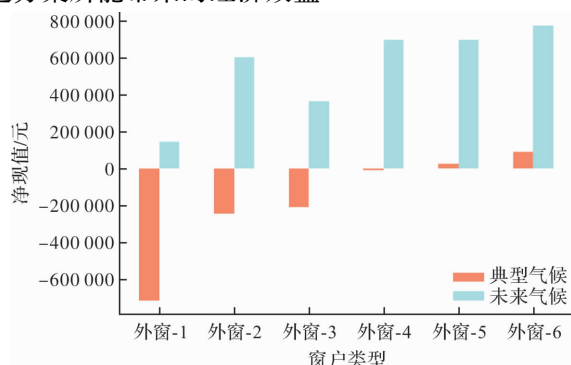


图10 外窗改造不同玻璃类型的净现值

Fig. 10 Financial net present value of exterior window renovation for different glass types

## 4 结论

本研究采用 Ladybug 和 Honeybee 插件,结合 Grasshopper 平台,对深圳市某住院部进行了全面的建筑性能分析。从能源效率、经济效益和热舒适性三个维度出发,对建筑外围护结构的节能改造策略进行了综合评价。研究特别考虑了典型气候条件和未来气候条件的影响,并对比分析了不同气候条件下改造策略在节能效益、经济效益和热舒适性方面的变化情况。目前,建筑能源性能评估和围护结构改造策略评估中往往忽视了气候变化的影响,本研究弥补了这一不足。通过对案例分析以及计算结果可以将对气候变化下的建筑外围护构造改造策略的相关指导性意见总结如下:

(1)屋面改造与外窗改造在节能效益上显著优于外墙改造,但这种改造可能会降低建筑的全年热舒适时间。因此,在制定改造策略时,需要在节能效益和热舒适性之间进行权衡;

(2)从经济效益角度来看,屋面改造带来的经济效益最高。例如,在采用 100 mm EPS 保温板的未来气候条件下,屋面改造的经济效益可达 1 125 803.61元。相比之下,外窗改造的经济效益也较为显著,而外墙改造在两种气候条件下的经济效益几乎可以忽略不计。因此在既有建筑改造中从经济层面出发应首先考虑屋面改造与外窗改造方面;

(3)气候变化对建筑性能的影响不容忽视。不同改造策略在不同气候条件下的表现差异显著,这直接影响了改造策略的潜在经济效益。因此,在未来的建筑改造策略分析中,必须充分考虑气候变化的影响。

本研究的结果强调了在建筑节能改造过程中,综合考虑节能效益、经济效益和热舒适性的重要性,并指出了气候变化对改造策略效果的潜在影响。这一发现为建筑改造决策提供了重要的参考依据,有助于实现更可持续和适应性强的节能改造策略。

## 参考文献 References

- [1] Anonymous. Global Alliance for Buildings and Construction (GABC)[R]. Paris: International Energy Agency, UN Environment, 2024.
- [2] AKSOEZEN M, DANIEL M, HASSLER U, et al. Building age as an indicator for energy consumption [J]. Energy & Buildings, 2015, 87:74-86.

- [3] HUANG B, MAUERHOFER V, GENG Y. Analysis of existing building energy saving policies in Japan and China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 112: 1510-1518.
- [4] LIU G, LI X, TAN Y, et al. Building green retrofit in China: Policies, barriers and recommendations[J]. *Energy Policy*, 2020, 139:111356.
- [5] 魏永成,郭汉丁,王文强,等.既有住区绿色改造业主多层次决策协调机制理论研究综述[J]. *土木工程与管理学报*, 2020, 37(6):158-164,170.
- WEI Yongcheng, GUO Handing, WANG Wenqiang, et al. Review on the theory of multi-level decision-making coordination mechanism of owners in green transformation of existing residential areas[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020, 37(6): 158-164,170.
- [6] MASSON-DELMOTTE P. Contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[C]//IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [7] NIK V M, MATA E, KALAGASIDIS A S. A statistical method for assessing retrofitting measures of buildings and ranking their robustness against climate change[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 88(2): 262-275.
- [8] CHAN H Y, RIFFAT S B, ZHU J. Review of passive solar heating and cooling technologies[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2): 781-789.
- [9] FIASCHI D, BANDINELLI R, CONTI S. A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables[J]. *Applied Energy*, 2012, 97:101-114.
- [10] ASADI E, SILVA M G, ANTUNES C H, et al. Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 44(1):81-87.
- [11] DESMEDT J, VEKEMANS G, MAES D. Ensuring effectiveness of information to influence household behavior[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(4):455-462.
- [12] LUIS Pérez-Lombard, JOSÉ Ortiz, CORONEL J F, et al. A review of HVAC systems requirements in building energy regulations[J]. *Energy & Buildings*, 2011, 43(2-3):255-268.
- [13] 赵娟,周波涛,白艺飞,等.高原寒冷地区既有建筑节能改造适宜性及经济性分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 55(5):774-782.
- ZHAO Juan, ZHOU Botao, BAI Yifei, et al. Suitability and economic analysis of existing building energy saving reconstruction in cold plateau region[J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2023, 55(5):774-782.
- [14] 王美林,李世濠,沈鹏元,等.潮汕传统夯土建筑被动式技术适用性研究[J]. *建筑学报*, 2022(S2):42-48.
- WANG Meilin, LI Shihao, SHEN Pengyuan, et al. Research on the applicability of passive strategies for traditional rammed earth buildings in Chaoshan[J]. *Architectural Journal*, 2022(S2):42-48.
- [15] 毕昕,李成翰,陈伟莹,等.豫南山地传统砖木民居室内热环境分析及被动式优化策略研究[J]. *建筑科学*, 2022, 38(8):23-30.
- BI Xin, LI Chenghan, CHEN Weiyang, et al. Study on thermal environment analysis and passive optimization strategy of traditional brick and wood dwellings in mountainous area of Southern Henan province. [J]. *Building Science*, 2022, 38(8):23-30.
- [16] 李雪平,李京京,秦洛.内蒙古通辽农村牧区民居外围护结构的节能改造研究[J]. *西安理工大学学报*, 2024, 40(2):226-233,241.
- LI Xueping, LI Jingjing, QIN Luo. Study on energy saving reconstruction of the outer protective structure of residential buildings in Tongliao rural pastoral area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2024, 40(2):226-233,241.
- [17] 李雪平,张引.基于能耗模拟的皖南徽派民居节能改造研究[J]. *西安理工大学学报*, 2022, 38(4):500-506.
- LI Xueping, ZHANG Yin. Comprehensive benefit analysis of energy-saving transformation of Hui-style residential buildings in southern Anhui[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2022, 38(4):500-506.
- [18] 丁志坤,王展.既有建筑围护结构节能改造多目标优化设计[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(17):7269-7277.
- DING Zhikun, WANG Zhan. Multi-objective optimization design for envelope energy-saving retrofit of existing building[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(17):7269-7277.
- [19] 高源,胡可,丁淳,等.河北平原地区“双替代”农宅低碳化改造多目标优化设计[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(20):8565-8573.
- GAO Yuan, HU Ke, DING Chun, et al. Multi-objective optimization for low-carbon retrofit of “Double Substitution” rural houses in Hebei plain[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(20):8565-8573.
- [20] 邵兆楠,高岩.基于 EnergyPlus 和 Jeplus+EA 联合模拟的建筑围护结构及光储系统协同优化研究[J]. *西安*



- 建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(2): 292-300.
- SHAO Zhaonan, GAO Yan. Research on collaborative optimization of building envelope and hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage system based on EnergyPlus and Jeplus+EA joint simulation[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2024, 56(2): 292-300.
- [21] ROUDSARI M S, PAK M, SMITH A. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design[C]//Proceedings of the 13th International IBPSA conference, France: Lyon, 2013.
- [22] KHARVARI F. An empirical validation of day lighting tools: Assessing radiance parameters and simulation settings in Ladybug and Honeybee against field measurements[J]. Solar Energy, 2020, 207: 1021-1036.
- [23] YANG Z, L Yuping, C Xingjiang, et al. Parametric optimization procedure for efficient window design of educational buildings in the pearl river delta of China [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2022, 17: 394-410.
- [24] SILVA A C P S E, CALILI R F. New building simulation method to measure the impact of window-integrated organic photovoltaic cells on energy demand[J]. Energy and Buildings, 2021(12): 252.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB55015—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General code for energy efficiency and renewable energy application in buildings: GB55015—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [26] 许馨尹, 李红莲, 杨柳, 等. 气候变化下的建筑能耗预测[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 8.
- XU Xinyi, LI Honglian, YANG Liu, et al. Prediction of building energy consumption under climate change[J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(5): 8.
- [27] TRZASKA S, SCHNARR E. A review of downscaling methods for climate change projections[R]. New-york: African and Latin American Resilience to Climate Change Project (ARCC). 2014, 1-42.
- [28] PAZOUKI M, REZAIE K, BOZORGI—Amiri A. A fuzzy robust multi-objective optimization model for building energy retrofit considering utility function: A university building case study[J]. Energy and Buildings 2021, 241.
- [29] FANGER P O. Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering [J]. Royal Society of Health Journal, 1972(3): 225-240.
- [30] ASHRAE Standard. Energy standard for buildings except low—rise residential buildings: 90.1-2019 [S]. Atlanta: American society of heating, refrigerating and air conditioning engineering, Inc, 2019.
- [31] SCHIAVON S, LEE K H. Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures [J]. Building & Environment, 2013, 59(1): 250-260.
- [32] International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO 7730-2005. [S]. Beijing: China Standards Press, 2005.

(编辑 吴海西)