

夏热冬冷地区某办公楼低碳改造模拟研究

鞠文华, 苑翔

北方工业大学土木工程学院, 北京

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

以夏热冬冷地区典型城市武汉的一栋中小型办公建筑为对象, 基于“被动式技术优先、主动式技术优化、可再生能源补充”的递进式改造策略, 系统分析了不同技术路径对建筑运行阶段能耗与碳排放的影响。利用EnergyPlus软件模拟了围护结构改造、地源热泵空调系统应用所对应的降碳率, 以及可再生能源技术的碳排放替代率。

关键词

夏热冬冷地区, 建筑碳排放, 低碳改造

Simulation Study on Low-Carbon Renovation of an Office Building in a Region with Hot Summers and Cold Winters

Wenhua Ju, Xiang Yuan

School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing

Received: May 25, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

Focusing on a medium-sized office building in Wuhan—a typical city in regions with hot summers and cold winters—the study systematically analyzed the impact of various technical approaches on energy consumption and carbon emissions during the building's operational phase, employing a progressive renovation strategy that prioritizes passive technologies, optimizes active technologies, and supplements them with renewable energy. Using EnergyPlus software, the study simulated the corresponding carbon reduction rates from envelope renovations and ground-source heat pump air conditioning systems, as well as the carbon emission substitution rates achieved through renewable energy technologies.

Keywords

Regions with Hot Summers and Cold Winters, Building Carbon Emissions, Low-Carbon Renovation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

《中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)》^[1]中显示:2021年全国房屋建筑全过程碳排放总量为40.7亿tCO₂,占全国能源相关碳排放的比重为38.2%。其中,建筑运行阶段碳排放23.0亿tCO₂,占全国能源相关碳排放总量的比重为21.6%,占全过程能源碳排放的56.6%。能耗与碳排放的增长幅度相近公共建筑以仅21%的面积(150亿m²)占比消耗了42%的能源(4.8亿tce)并贡献了41%的碳排放(9.5亿tCO₂),是建筑运行能耗和碳排放的最主要来源^[1]。因此,对既有建筑进行零碳改造,降低其建筑运行能耗对于保护生态环境,实现“双碳”目标非常有意义。我国建筑领域碳中和目标的实现,离不开零碳建筑的规模化发展,建造零碳建筑是推动建筑领域碳减排、达成碳中和的核心手段。

通过统计分析夏热冬冷地区由某电力部门及住建部门所提供的815个办公建筑的数据,根据《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB 55015-2021^[2]对夏热冬冷地区甲类公共建筑的强制性规定,建立一个具有代表性的基准中小型办公建筑。通过被动式技术优先、主动式技术优化和可再生能源补充的改造策略验证其对建筑碳排放的影响,判断建筑是否能够达到零碳建筑标准。

2. 建筑概况

2.1. 办公建筑数据分析

本文为建立有效的基准办公建筑模型,以夏热冬冷地区代表城市之一的湖北省武汉市为例,通过湖北某电力部门所提供的有关于湖北省各地的办公建筑的数据,依据其办公建筑各项基础数据,建立基准办公建筑模型。

《民用建筑设计统一标准》GB 50352-2019^[3]明确按建筑面积和高度将民用建筑(包括公共建筑)划分为大型、中型和小型,在高度确定的基础上大型建筑面积大于20,000m²或高度大于24m;中型建筑面积5000m²~20,000m²,且高度不大于24m;小型建筑面积不大于5000m²,且高度不大于24m。根据湖北电网以及湖北住建厅所提供建筑面积汇总数据显示:湖北地区,面积不大于5000m²的建筑占52%,代表湖北地区多数办公建筑为小型公共建筑。面积5000m²~20,000m²的建筑占27%,属于中型公共建筑;面积大于20,000m²的建筑仅占21%,属于大型公共建筑,如图1所示。

根据《办公建筑设计标准》JGJ/T 67-2019^[4],普通办公室人均使用面积指标≥6m²/人,中、小会议室通用标准≥2.0m²/人,一般办公人员的人均使用面积工程常用值为6m²/人(含工位基础辅助面积),是开放式办公区的主流设计值。通过分析湖北地区办公建筑建筑面积与人数的关系,可以得出建筑内人数与建筑面积呈显著正相关关系,建筑面积是影响建筑内人员数量的核心变量,同时受建筑功能、使用场景等因素影响存在一定离散性,如图2所示。

¹https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=tjV0JOkNcjDwd7Y4HKmF3n2UK7PVWVGGCtA5IPrxL7TTsYlt47uKdWyzHfth-NeGjj_Bsf2GeD3Yjmyg4Uefhre3q-xb9UMKnrHySCHvX08fgpKPO0cYHBJGpcPWKWNRNhsMvZhhK7FB_u36Kd4mAT_xGpNrpAd-gtTleaAwQ2A3I51FBjDtbA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS

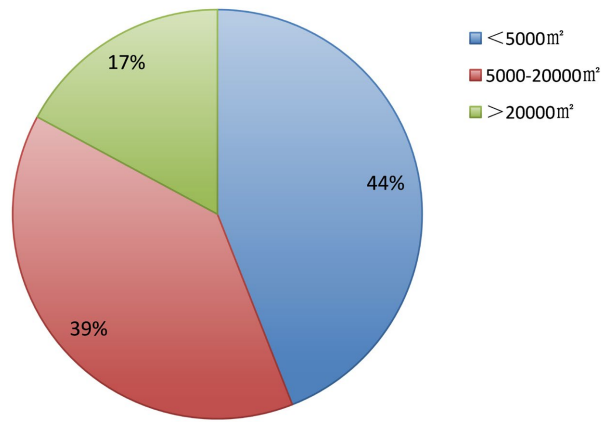


Figure 1. Distribution map of office building area in Hubei province
图 1. 湖北地区办公建筑面积分布图

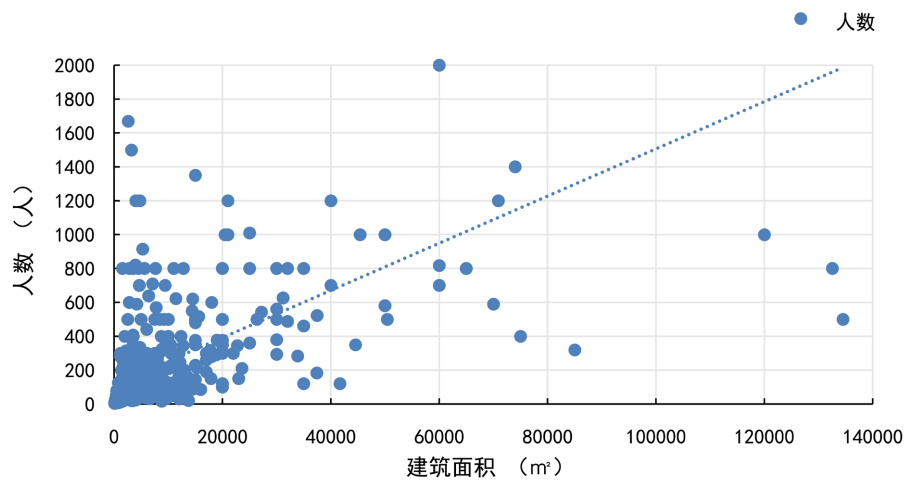


Figure 2. Graph showing the relationship between the number of people and the building area
图 2. 人数与建筑面积关系图

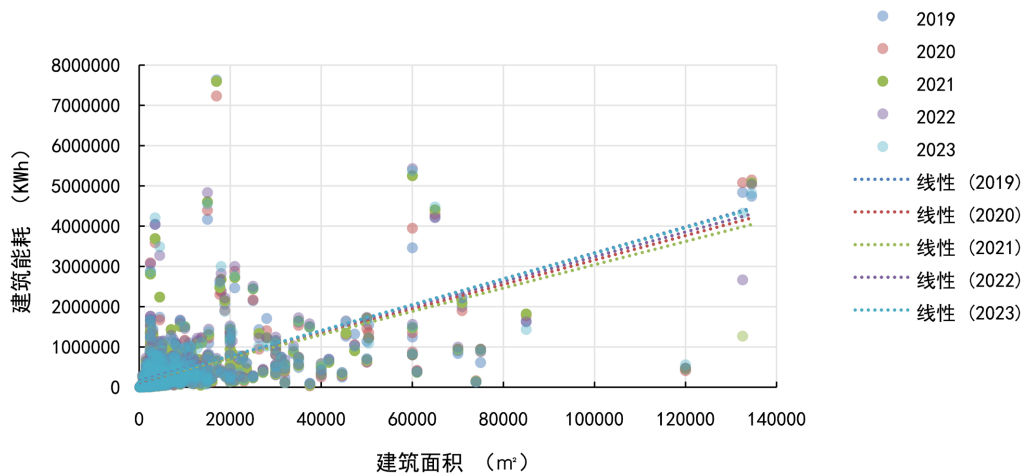


Figure 3. Graph showing the relationship between building energy consumption and floor area
图 3. 建筑能耗与建筑面积关系图

办公建筑能耗与建筑面积也存在显著正相关关系: 建筑面积越大, 建筑能耗总量整体呈上升趋势。中小型办公建筑($\leq 20,000 \text{ m}^2$)能耗集中在 10 万~30 万 kWh, 数据分布密集, 能耗水平相对稳定; 大型建筑($20,000\sim 80,000 \text{ m}^2$)能耗线性增长, 覆盖 20 万~60 万 kWh 区间, 体现核心增长态势; 少数的超大建筑($>100,000 \text{ m}^2$)能耗突破 40 万 kWh, 最高接近 60 万 kWh, 验证了大体积建筑的能耗基数效应, 如图 3 所示。这一关系是建筑设计、能耗统计、节能改造的核心逻辑基础。在实际工程中, 需结合建筑功能、系统形式、使用强度进行精细化修正, 以实现建筑能耗的精准预测与控制。

2.2. 基准办公建筑模型能耗模拟

基于前文对湖北地区办公建筑数据的分析, 结合前文对湖北地区既有办公建筑的分析, 选取某位于湖北省武汉市(属于夏热冬冷地区)的中小型办公建筑作为研究基准建筑, 基准办公建筑位于湖北省武汉市, 建筑面积 4950 m^2 , 建筑层数为 9 层, 建筑单层面积 550 m^2 , 建筑尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 $44 \text{ m} \times 12.5 \text{ m} \times 27 \text{ m}$, 建筑长宽比为 3.52, 体形系数为 0.24, 建筑窗墙比为 40.56%。通过利用 SketchUp 建立模型建立与表数据相一致的模型, 如图 4 所示。

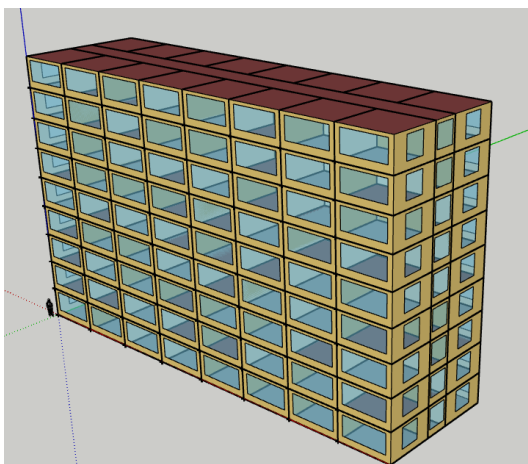


Figure 4. Reference office building model
图 4. 基准办公建筑模型

建筑能耗模拟与节能诊断的准确性, 高度依赖于输入参数的质量。建筑设计参数架起“调研数据”与“能耗分析”之间的桥梁, 为后续建筑模型数据的定量分析提供支撑保障, 其准确性对后续能耗模拟结果的可靠性、科学性以及工程时间价值有重要作用。

结合本论文前期调研得到的信息, 深入建筑内部, 对其内部围护结构、能源系统等全面进行调研。为掌握建筑实际运行能耗基础, 对建筑内部主要用能设备进行现场参数采集: 通过查阅并数字化处理原始设计图纸得到建筑总面积、建筑层数、建筑占地面积以及建筑外墙、屋顶、外窗结构材质与构造; 进而通过模型计算得到建筑尺寸、建筑长宽比; 并依据《民用建筑热工设计规范》GB 50176-2016 [5] 计算得出建筑体形系数及建筑外墙、屋顶、外窗传热系数; 通过记录建筑内部电气设备铭牌参数, 得到建筑照明功率、电气设备功率、电梯系统的基本规格参数以及空调类型及其 COP。

基准办公建筑模型的参数如表 1 所示。

由于 EnergyPlus 不能准确模拟出电梯等设备, 这类设备的能耗占比通常根据具体建筑的使用情况和设备性能而定, 本文的两栋基准建筑均设置一部电梯, 根据《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019 [6], 电梯系统能耗按公式(2-1)计算。

$$E_e = \frac{3.6 \times P \times t_a \times V \times W + E_{standby} \times t_s}{1000} \quad (2-1)$$

式中: E_e ——年电梯能耗, kWh·a;

P ——特定能量消耗, mW·h/(kg·m);

t_a ——电梯年平均运行小时数, h;

V ——电梯速度, m/s;

W ——电梯额定载重量, kg;

$E_{standby}$ ——电梯待机时能耗, W;

t_s ——电梯年平均待机小时数, h。

基准建筑选择电梯的特定能量消耗为 1.62 mWh/(kg·m), 只在工作日运行, 电梯速度为 1.6 m/s, 基准建筑电梯额定载重量为 800 kg, 待机时能耗为 0.4 kWh。

Table 1. Parameters of the benchmark office building model

表 1. 基准办公建筑模型的参数

名称	设置
建筑墙体	水泥砂浆 + 混凝土 + 保温层 + 石膏板
建筑屋顶	屋顶膜材 + 屋顶保温层 + 金属甲板
建筑外窗	3 mm 厚普通玻璃窗户
每人所需空间面积(办公室)	8 m ² /人
每人所需空间面积(走廊)	50 m ² /人
照明功率(办公室)	8.0 W/m ²
照明功率(走廊)	4.0 W/m ²
末端形式	风机盘管 + 新风
冷源形式	空气源热泵, COP = 3.2
热源形式	空气源热泵, COP = 3.2

Table 2. Reference energy consumption levels for office buildings

表 2. 基准办公建筑能耗情况

名称	能耗	占比
总能耗	1116.37 GJ	100%
制冷	612.75 GJ	55%
制热	196.95 GJ	17%
内部设备	164.13 GJ	15%
灯光	120.36 GJ	11%
电梯	22.18 GJ	2%
总能耗	1116.37 GJ	100%

通过 EnergyPlus 模拟计算得出, 基准办公建筑用电能耗结果如表 2 所示, 各项占比如图 5 所示。

湖北省位于夏热冬冷地区无集中供暖, 办公建筑冬季制热采用空气源热泵分体式空调系统, 且办公建筑不使用燃气, 建筑 100%使用电力。碳排放因子采用 0.5257 tCO₂/MWh (来源: 生态环境部《2022 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》)。通过模拟计算得出, 基准办公建筑各项数值如表 3 所示。

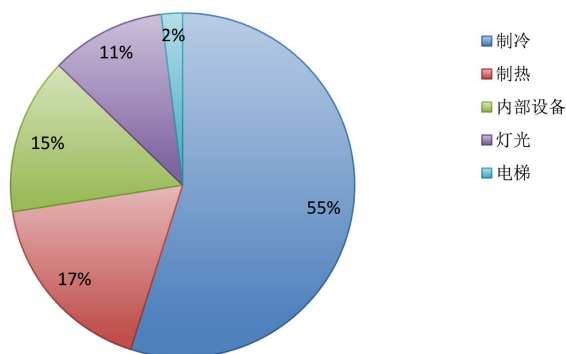


Figure 5. Proportion of various energy consumption sources within the building
图 5. 建筑内各项能耗占比

Table 3. Reference basic values for office building foundations
表 3. 基准办公建筑基础数值

名称	数值	标准
外墙传热系数 W/m ² K	0.75	≤0.80
屋顶传热系数 W/m ² K	0.40	≤0.40
外窗传热系数 W/m ² K	1.60	≤2.20
平均能耗强度·a	62.65	70 (约束值)/55 (引导值)
平均碳排放强度(kWh/m ² ·a)	32.93	

3. 降碳技术验证及降碳量计算

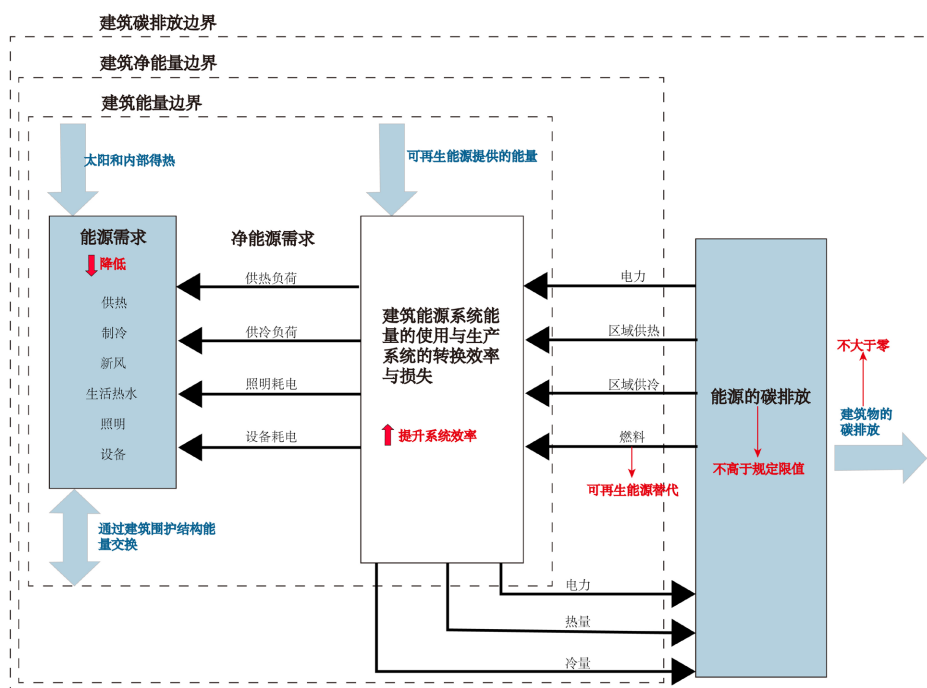


Figure 6. Boundaries for calculating carbon emissions during the operational phase of buildings
图 6. 建筑物运行阶段碳排放计算边界

通过分析近年来国内有关夏热冬冷地区零碳建筑[7]以及低碳建筑[8]的实现路径研究,对于夏热冬冷地区的既有建筑零碳改造应以结合气候设计的被动式技术为基础,实现建筑零碳目标需遵循递进式技术路径:首先,最大限度提升围护结构热工性能,从源头上削减建筑能源需求;其次,配置高效主动式设备,提升系统运行效率并缩短运行时长;最终,以可再生能源替代化石能源供给,达成建筑运行阶段的零碳排放。如图6所示。

3.1. 建筑降碳量计算公式

根据《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019 [6]建筑运行阶段碳排放的计算边界:位于建设工程规划许可证确定的建筑红线范围内,为该建筑提供服务的能量转换与输送系统(如发电、集中供热、集中供冷等系统)所消耗的各类一次能源及可再生能源对应的碳排放。具体能源种类包括燃煤、燃油、燃气、生物质能、风能、太阳能等。

建筑运行阶段碳排放量由各系统能源消耗量及对应碳排放因子确定。单位建筑面积总碳排放量(CM)按下列公式(3-1)、(3-2)计算。

$$C_M = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (E_i EF_i) - C_p \right] y}{A} \quad (3-1)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (3-2)$$

式中: C_M ——建筑运行阶段单位建筑面积碳排放量, kgCO_2/m^2 ;

E_i ——建筑第 i 类能源年消耗量, 单位·a;

EF_i ——第 i 类能源的碳排放因子;

$E_{i,j}$ —— j 类系统的第 i 类能源消耗量, 单位·a;

$ER_{i,j}$ —— j 类系统由可再生能源系统提供的第 i 类能源量, 单位·a;

i ——建筑消耗终端能源类型, 包括电力、燃气、石油、市政热力等;

j ——建筑用能系统类型, 包括暖通空调、照明、生活热水系统等;

C_p ——建筑绿地碳汇系统年减碳量, $\text{kgCO}_2\cdot\text{a}$;

y ——建筑设计寿命, a;

A ——建筑面积, m^2 。

根据《公共建筑节能改造技术规范》JGJ 176-2009 [9], 改造后的节能量应该按公式(3-3)计算。

$$E_{con} = E_{baseline} - E_{pre} + E_{cal} \quad (3-3)$$

式中: E_{con} ——节能措施的节能量, $\text{kWh}\cdot\text{a}$;

$E_{baseline}$ ——基准能耗, 即节能改造前, 1 年内设备或系统的能耗, 也就是改造前的能耗;

E_{pre} ——当前能耗, 即改造后的能耗, $\text{kWh}\cdot\text{a}$;

E_{cal} ——调整量, $\text{kWh}\cdot\text{a}$ 。

同理, 改造后的降碳量应该按公式(3-4)计算。

$$C_{con} = \sum_{i=1}^n \left[(E_{baseline,i} - E_{pre,i} + E_{cal,i}) \times EF_i \right] \quad (3-4)$$

式中: C_{con} ——建筑减碳量, $\text{kgCO}_2\cdot\text{a}$;

$E_{baseline}$ ——基准能耗, 即节能改造前, 1 年内设备或系统的能耗, 也就是改造前的能耗;

E_{pre} ——当前能耗, 即改造后的能耗, kWh·a;

E_{cat} ——调整量, kWh·a;

EF_i ——第 i 类能源的碳排放因子。

3.2. 建筑降碳技术验证

(1) 被动式降碳技术

该建筑位于湖北省武汉市, 属于夏热冬冷典型气候区, 在该气候条件下, 围护结构的能耗占比会随建筑类型、窗墙比、保温水平以及研究侧重而发生较大变化。根据采用反应系数法分析了夏季典型气候条件下各围护结构对夏热冬冷地区建筑房间得热量的影响, 影响从大到小依次为: 外窗太阳辐射、外窗传热、屋顶传热、东西墙传热、南墙传热[10]。基于上述分析思路, 本文将从外墙传热系数、屋顶传热系数、外窗传热系数及其玻璃类型四个维度, 探讨各类围护结构构件对建筑能耗的影响规律。

外墙保温层厚度由 50 mm 增加到 80 mm, 屋顶保温层由 110 mm 增加到 140 mm, 外窗由普通玻璃变为 Low-E 玻璃, 建筑制冷能耗、制热能耗及降碳率如表 4 所示。

Table 4. Passive technology corresponds to a carbon reduction rate

表 4. 被动式技术对应降碳率

名称	外墙传热系数 (W/(m ² ·K))	屋顶传热系数 (W/(m ² ·K))	外窗传热系数 (W/(m ² ·K))	制热能耗 (GJ)	制冷能耗(GJ)	单位碳排放量 (kgCO ₂ /m ²)	降碳率(%)
基准建筑	0.75	0.4	1.6	196.95	612.75	32.93	0
设计建筑	0.55	0.33	1.1	157.56	563.73	30.32	7.92

通过提升围护结构的保温隔热性能, 设计建筑在制热和制冷能耗上均有下降, 其中制热节能更显著, 综合降碳率达到 7.92%。围护结构改造对建筑制冷能耗、制热能耗的影响如图 7 所示。

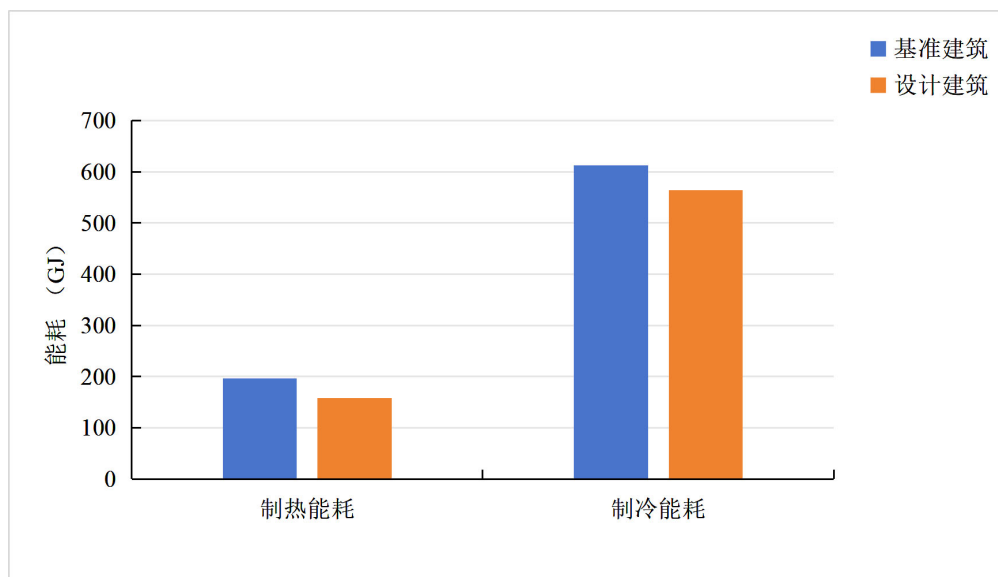


Figure 7. The impact of enclosure structure renovation on building energy consumption

图 7. 围护结构改造对建筑能耗的影响

(2) 主动式降碳技术

建筑节能降碳是一项系统性工程, 核心遵循“先降低建筑负荷, 再提升能源系统效率”的递进逻辑, 先通过优化外围护结构、依托被动节能技术削减建筑基础冷热负荷, 从源头降低能源消耗需求, 再通过高效设备与智能调控技术提升能源利用效率, 双管齐下实现全周期降碳目标, 兼顾节能效益、人居舒适度与长期运营经济性。

提升建筑空调系统能效, 将原来的空气源热泵空调系统改造为地源热泵空调系统。地源热泵系统性能参数如下: 制冷工况下 COP 取值为 3.8, 制热工况下 COP 取值为 4.0。系统仅在工作日运行, 建筑内部负荷及其他边界条件与基准建筑保持一致。地源热泵方案对应的建筑能耗及碳排放模拟结果如表 5 所示。

Table 5. Active technology corresponds to a carbon reduction rate

表 5. 主动式技术对应降碳率

名称	制热能耗(GJ)	制冷能耗(GJ)	单位碳排放量(kgCO ₂ /m ²)	降碳率(%)
基准建筑	196.95	612.75	32.93	0
设计建筑	123.09	435.38	25.52	22.52

地源热泵空调系统节能效果显著, 综合降碳率达 22.52%, 证明提升建筑空调系统能效对建筑碳排放有显著影响。空气源热泵的性能高度依赖于室外环境温度, 而地源热泵则受益于土壤温度的相对稳定[11]。地源热泵比空气源热泵节省 30%~50%的季节平均能源消耗。实验研究表明, 地源热泵在 20 年生命周期内比空气源热泵节省 46%的运行成本[12]。空调系统改造对建筑制冷能耗、制热能耗的影响如图 8 所示。

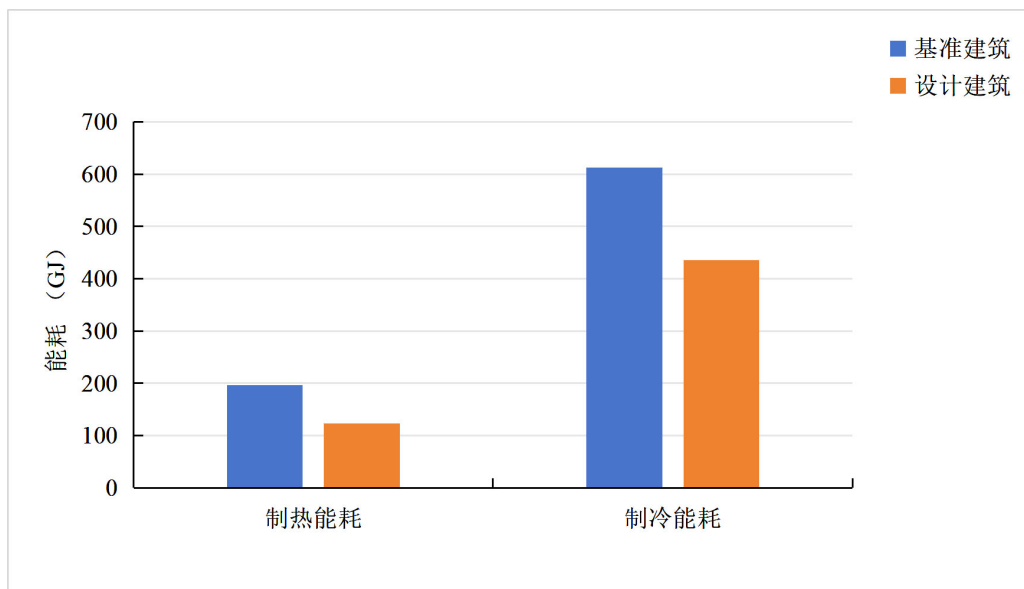


Figure 8. The impact of air conditioning system renovation on building energy consumption

图 8. 空调系统改造对建筑能耗的影响

(3) 可再生能源技术

为验证分布式太阳能光伏系统的发电效率, 在基准建筑屋顶布置光伏组件。光伏铺设面积为 550 m², 组件安装倾角设定为 15°。光伏组件选用 TOPCon 单晶硅类型, 其光电转换效率为 23%, 并配套效率为 98%的逆变器。发电模拟情况如表 6 所示。

Table 6. Power generation simulation scenario**表 6.** 发电模拟情况

年发电量(GJ)	电力碳排放因子(kgCO ₂ /kWh)	减碳量(kgCO ₂)	单位减排碳量(kgCO ₂ /m ²)	碳替代强度(%)
245.56	0.53	36,152	65.73	22

增加太阳能光伏发电系统后,年发电量 245.56 GJ,年减碳量 36,152 kgCO₂,碳替代强度 35.40%。光伏发电替代电网购电,减少建筑运行碳排放,提高建筑能源自给率,降低对外部电网依赖[13]。

4. 结论

以夏热冬冷地区典型城市武汉的一栋中小型办公建筑为对象,基于“被动式技术优先、主动式技术优化、可再生能源补充”的递进式改造策略,系统分析了不同技术路径对建筑运行阶段能耗与碳排放的影响。被动式技术的应用有一定的降碳效果,主动式技术对建筑降碳贡献更为显著,同时可再生能源技术可进一步替代建筑用能。

综上所述,对于夏热冬冷地区的既有办公建筑,优先提升围护结构热工性能可奠定降碳基础,主动式高效空调系统改造是实现深度降碳的核心环节,而可再生能源的应用则有助于进一步逼近零碳目标。三者协同作用,可在保障建筑使用舒适性的同时,显著降低建筑运行阶段碳排放,为同类地区既有公共建筑的低碳改造提供可参考的技术路径与数据支撑。

参考文献

- [1] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J]. 建筑, 2024(2): 46-59.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 55015-2021 建筑节能与可再生能源利用通用规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50352-2019 民用建筑设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 67-2019 办公建筑设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50176-2016 民用建筑热工设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [7] 杨飞宇, 孙宇, 李磊, 等. 主被动技术有机协同下的建筑绿色低碳路径探析——以成都市某绿色三星公共建筑为例[J]. 建筑节能(中英文), 2025(9): 65-74.
- [8] 龙毅湘, 易子涵, 欧鹏飞, 等. 近零能耗建筑设计及节能降碳技术应用分析——以岳麓山实验室集聚区农科院片区 B2 栋为例[J]. 绿色建筑, 2025, 17(4): 27-32+48.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 176-2009 公共建筑节能改造技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] 金斯科, 龚延风. 夏热冬冷地区居住建筑房间得热量分布及节能方向[J]. 暖通空调, 2012, 42(4): 86-90.
- [11] Sun, J., Li, Y., Kashif, N., Liu, X., Lian, J., Pagnotti, A., *et al.* (2025) Comparative Performance Assessment of Air-Source and Ground-Source Heat Pumps Using CO₂ and R-410A with Water Well Integration: A Simulation Study. *Journal of Building Engineering*, **114**, Article ID: 114453. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114453>
- [12] Anees, F., Shen, B., Anand, J. and Liu, X. (2026) An Economic and Technical Feasibility Analysis of a Dual-Source Heat Pump Using Both the Air and the Ground. *Energy and Buildings*, **351**, Article ID: 116713. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116713>
- [13] Jiang, H., Yao, L., Qin, J., *et al.* (2026) Building Façade Photovoltaics Enhance Global Climate Resilience. *Nature Climate Change*, **16**, 566-574.