

基于近零能耗目标的喀什农村住宅 多阶段改造策略与经济性研究

杨瑞¹,李春澳¹,王蒙¹,李刚¹,王玉山^{1,2*}

(1 石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832003;

2 石河子大学寒区城镇化建设与新技术重点实验室,新疆 石河子 832003)

摘要:在国家“双碳”目标与乡村振兴战略的双重推动下,降低寒冷地区农村住宅的采暖能耗已成为研究问题之一。本研究针对喀什地区常见既有农村住宅围护结构热工性能差、冬季采暖能耗高等问题,基于 Rhino-Grasshopper 平台构建参数化模型,采用被动、主动与可再生能源系统三阶段改造路径,对该地区农宅进行了系统的参数化仿真与优化分析,结果显示:被动改造可将基准建筑年综合能耗由 $264.0 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 降低 39.5%,采用被动和高效热源主动改造可将综合能耗进一步减少 26.6%,采用被动、主动与光伏可再生能源系统三阶段改造,综合能耗降至 $50.8 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,累计节能率约 80.8%,达到近零能耗要求。进一步经济性分析表明:既有农村住宅实施被动、主动与可再生能源系统的综合改造方案静态回收期最短,在节能与经济上均具有优越性。研究结果可为喀什及类似高采暖地区既有农村住宅的改造提供可量化的技术路径及其能耗与回收期指标,为具体的改造设计与策略制定提供直接依据。

关键词:近零能耗;农村住宅改造;光伏可再生能源;静态回收期

中图分类号:TU111.195;

文献标志码:A

Research on multi-stage renovation strategy and economy of rural housing in Kashgar based on near-zero energy consumption target

YANG Rui¹, LI Chunao¹, WANG Meng¹, LI Gang¹, WANG Yushan^{1,2*}

(1 College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2 Key Laboratory of Urbanization Construction and New Technology in Cold Regions, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Under the dual promotion of the national "double carbon" goal and the rural revitalization strategy, reducing the heating energy consumption of rural houses in cold regions has become a key problem. This study aimed at the problems of poor thermal performance of existing rural residential building envelopes and high heating energy consumption in winter in Kashgar, based on the Rhino-Grasshopper platform, a parametric model was constructed, and a three-stage transformation path of passive, active and renewable energy systems was adopted. The parametric simulation and optimization analysis of rural houses in this area were systematically carried out. The results show that the passive retrofit strategies, the annual comprehensive energy consumption of the benchmark building can be reduced by 39.5% from its original value of $264.0 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. By implementing a combined approach of passive measures and an efficient heat source system, the total energy consumption can be further reduced by an additional 26.6%. With the three-stage transformation of passive, active and photovoltaic renewable energy systems, the comprehensive energy consumption was reduced to $50.8 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, and the cumulative energy saving rate was about 80.8%, which meets the near-zero energy consumption requirements. Further economic analysis show that the static payback period of the comprehensive renovation scheme of passive, active and renewable energy systems in existing rural houses was the shortest, and it has advantages in energy saving and economy. The research results can provide a quantifiable technical path and energy consumption and payback period indicators for the transformation of existing rural houses in Kashgar and similar high-heating areas, and provide a direct basis for

收稿日期:2025-11-03

基金项目:新疆生产建设兵团科技计划项目(2023AB013-04),国家自然科学基金项目(52568031)

作者简介:杨瑞(2002—),女,硕士研究生,专业方向为土木水利,e-mail:1493155981@qq.com。

*通信作者:王玉山(1979—),男,教授,从事能源设施结构与建筑新材料方向的研究,e-mail:wysbgxn@shzu.edu.cn。

specific transformation design and strategy formulation.

Key words: near-zero energy;rural housing retrofit;photovoltaic renewable energy;static payback period

随着“双碳”目标的推进与 GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》的公布及实施,发展近零能耗建筑^[1]已成为我国建筑领域节能与低碳转型的核心方向。基于对喀什地区的实地调研与问卷采样,本研究发现当地典型民居普遍存在围护结构热工性能薄弱^[2-3]、屋面与外墙缺乏有效保温、外窗热工性能与气密性差、细部热桥与缝隙较多和采暖仍以燃煤与柴薪为主、设备效率低下等问题。另外,通过现场测量、问卷调研与典型样本房的温湿度监测证实了上述问题,并且导致冬季采暖成为年度能耗的主导项^[4],表明依靠单一技术路径难以在该类高采暖比重区域实现近零能耗目标。

目前,相关研究多聚焦于城市建筑或温带地区的建筑节能改造策略^[5-6],而对高采暖比重、昼夜温差大、且能源使用模式具有区域特征的农村民居样本,开展系统化、多阶段协同优化^[7]的研究仍较缺乏。国内外研究与工程实践表明,被动措施决定基

线能耗的规模,设备效率决定剩余负荷的运行成本,而可再生能源的系统集成则直接影响近零能耗目标的可实现性与经济性^[4]。

综上所述,本研究以喀什典型农村住宅为对象,通过参数化建模与被动-主动-可再生能源三阶段改造的仿真分析,量化了各阶段改造能耗的单项与累积贡献,旨在为喀什及高采暖负荷地区近零能耗农村住宅的改造路径提供数据支持与技术建议。

1 喀什地区气候及农宅现状

1.1 喀什地区气候参数

喀什地区气候参数(图 1a)显示:逐月干球温度曲线显示冬季持续低温,长时段需采暖,且夏季高温持续期短于冬季持续期;气候特征决定该地区采暖主导的能耗剖面。因此,被动保温与提升采暖系统效率对年度能耗影响更为关键,光伏虽在冬季发电较低,但仍能显著替代剩余负荷。

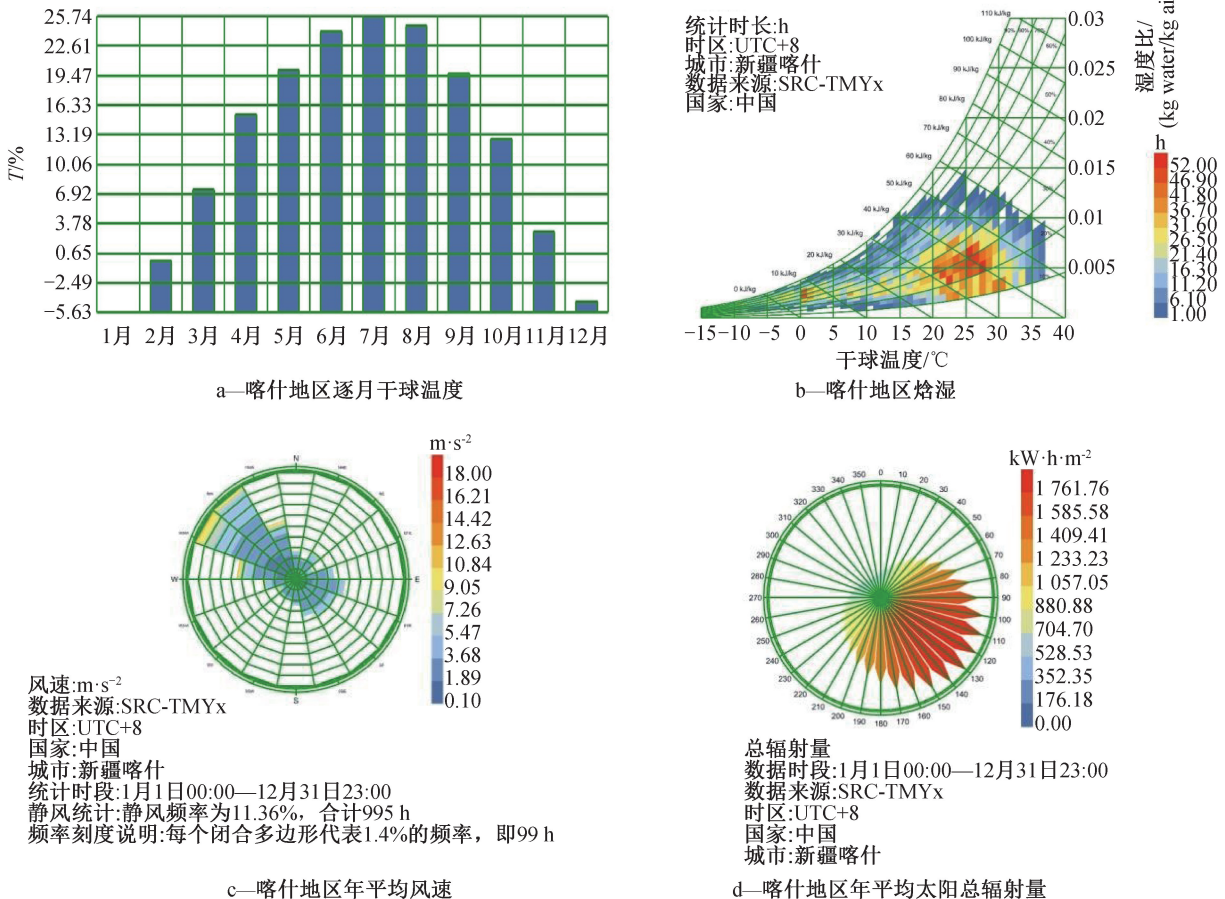


图 1 喀什地区综合气候参数

Figure 1 Comprehensive climate parameters in Kashgar region

喀什地区湿度参数曲线(图 1b)显示:曲线呈相对偏低的整体湿度特征,全年多月处于干旱/半干旱区间,这有利于提高直接辐照量并减少云遮挡导致的发电波动。低湿低云的气候背景有利于光伏系统全年高效运行,进一步支持可再生能源阶段的高替代潜力。

喀什地区平均风速(图 1c)显示:喀什地区静风频率较高,有效风资源有限,且在静风频率高的时段,往往也可能伴随多云或夜间,建筑负荷依赖电网或储能。这为量化储能系统容量的需求,并凸显优化“光伏+储能”配置和减少对不稳定电网依赖的重要性提供了重要依据。

喀什地区平均太阳总辐射量(图 1d)显示:当地太阳辐射资源丰富且高度集中于南向,最高辐射值达 $1761.76 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ 。南向持续的高辐射有利于光伏发电,且发电输出曲线相对平缓、可预测性强,这对于解决喀什地区冬季高采暖能耗问题具有重要的价值。

1.2 喀什地区农宅现状与围护结构特征分析

根据课题组在南疆多地的实地调研,喀什地区农宅建筑年代如下:2000 年以前、2000—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年、2020 年以后建成的农宅占比分别为 17%、18%、31%、25%、9%,其中以 2010 年后建成的砖混与砖木结构房屋为主,占比超过 70%,其平面形式多采用一字型与 L 型布局,整体构造简易。

该地区农村住宅围护结构各部位传热系数普遍不满足现行节能设计标准的要求,热工性能方面存在显著问题。具体而言,喀什地区墙体保温类型(图 2a)显示:既有农宅屋顶多采用木梁、苇草与泥浆复合构造,且缺乏专用保温层;屋顶构造类型(图 2b)显示:外墙主体多为砖木或砖混结构,绝大多数未进行保温处理,导致其热阻明显偏低。外窗系统则普遍存在数量与窗墙比不合理、气密性差、材料隔热性能不足等问题。上述围护结构整体热工缺陷,直接造成冬季室内热量大量散失,建筑整体热损失显著。与此同时,农户采暖方式以燃煤和生物质燃料为主,辅助以局部电供暖,能源利用效率低下。围护结

构性能不良与供暖系统能效偏低共同作用,不仅导致建筑冬季实际能耗偏高,也严重制约了室内热舒适水平的提升,反映出当前喀什地区农村住宅在建筑物理性能与用能模式方面均存在系统性改进需求。

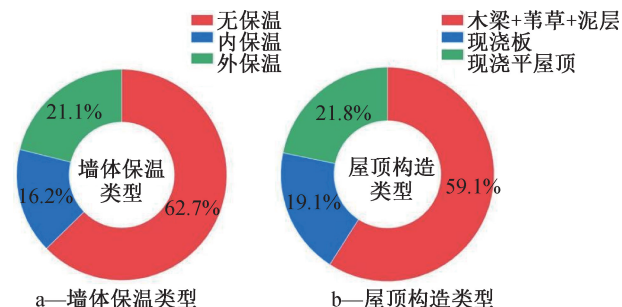


图 2 喀什地区农宅样本特征与围护结构类型分布
Figure 2 The sample characteristics of rural houses and the distribution of enclosure structure types in Kashgar area

2 基准模型的建立与校验

2.1 围护结构参数设置

对喀什地区典型农宅的实际测量结果(图 3a)如下:单层农村住宅,总使用面积 84 m^2 ;围护结构基准:烧结实心粘土砖 240 mm ,不设置保温层;南向窗户、厨房窗户: $1.8 \text{ m}\times 1.2 \text{ m}$,西向和北向以及卧室小窗: $0.8 \text{ m}\times 0.5 \text{ m}$ 。

利用 Rhino8+Grasshopper 平台进行建模,其中,使用的 Grasshopper 版本为 Rhino8 内置版本。输入围护结构的相关参数(表 1),绘制的建筑模型如图 3b 所示。

表 1 基准建筑围护结构参数

Table 1 Base building envelope parameters

围护结构	构造层次 (由外至内)	厚度/ mm	导热系数 λ / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	传热系数 K / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
外墙	水泥砂浆	20	0.93	2.95
	烧结实心粘土砖	240	0.81	
	水泥砂浆	20	0.93	
内墙	水泥砂浆	20	0.93	2.95
	烧结实心粘土砖	240	0.81	
	水泥砂浆	20	0.93	

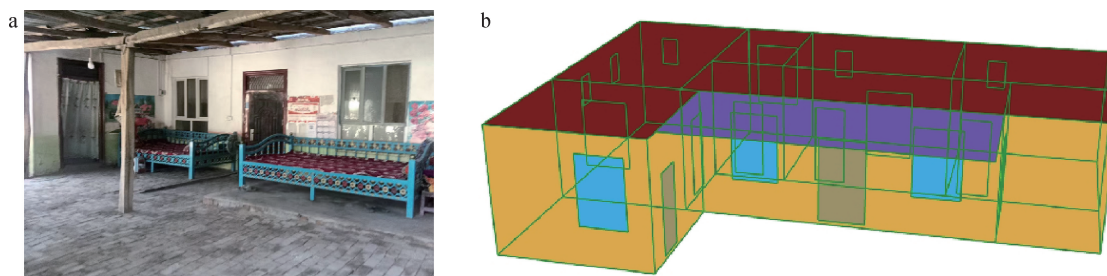


图 3 基准建筑(a)及其模型(b)

Figure 3 Base building (a) and model (b)

表1(续)

围护结构	构造层次 (由外至内)	厚度/mm	导热系数 $\lambda / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	传热系数 $K / (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
屋顶	木板	10	0.14	0.4
	稻草垫	10	0.06	
	干草	10	0.047	
	土壤	100	0.76	
	土壤泥浆	30	1.2	
外窗	单层普通玻璃	6	0.76	5.8

2.2 气候数据设置及建筑内部相关参数

气象数据与内部参数设置:本研究采用喀什地区的 TMY_x(典型年气象)小时序列作为边界条件,输入包含逐小时的干球温度、相对湿度、太阳辐射与风速,用于全年能耗动态仿真;建筑内部负荷与控制参数基于现场问卷与现行国家/行业节能设计标准确定,具体包括居住人员 3 人、照明与电器功率密度按 JGJ 26—2010《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》标准取值;室内温度设定点为冬季采暖 18 °C,夏季制冷 26 °C。

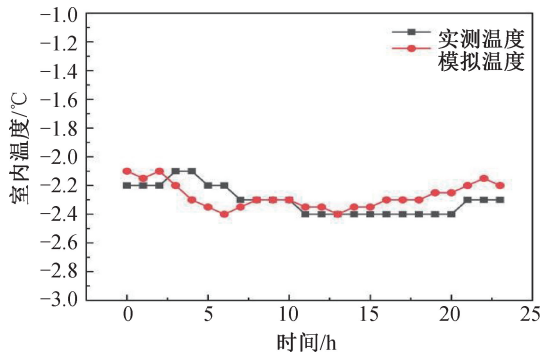


图 4 模拟验证
Figure 4 Simulation verification

2.3 模型验证以及能耗敏感性分析

为验证模型的可靠性与模拟结果的准确性,本研究选取喀什地区典型农宅的室内温度实测数据,与模拟结果进行对比分析。结果(图 4)显示:在相同气象条件与运行工况下,模型预测逐月采暖期平均室温偏差控制在 ± 0.7 °C 以内,均在 JGJ/T 449—2018《建筑能耗模拟技术标准》推荐的误差允许范围内 ($\pm 10\%$)。这表明该模型具有良好的可用性与可靠性,可作为后续被动、主动及可再生能源优化分析的有效基础。

基于调研结果,采用 PRCC 敏感性分析方法对可能对能耗产生影响的被动式改造策略进行了能耗敏感性分析^[8],结果(图 5)显示:基于喀什地区农宅优化设计变量对总能耗,制冷制热能耗的影响按绝对值大小排名,数值越大对能耗的影响权重越大。

根据结果选出权重较大的策略进行后续研究,依次为:外墙保温厚度>阳光间进深>外窗类型>屋顶保温厚度>北窗墙比;根据以上能耗敏感性分析排名,对优化设计变量进行了确定,结果见表 2。

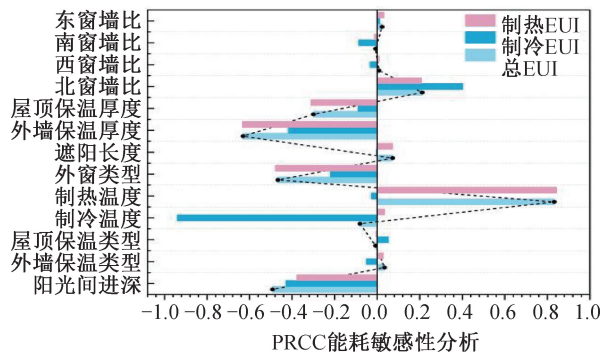


图 5 PRCC 能耗敏感性分析
Figure 5 Energy consumption sensitivity analysis

表 2 优化变量参数

Table 2 Optimize variable parameters

策略	种类	变量	范围	步长/mm	
被动	保温材料	类型	EPS	0.037	—
			XPS	0.030	
			PU	0.024	
			岩棉	0.044	
	厚度/mm	外墙/屋顶	10~300	20	
			0		单层普通
			1		单层 Low-E
	外窗材料	类型	2	双层普通	—
			3	6Low-E+12 空气+6 普通	
			4	6Low-E+12 氩气+6 普通	
5			三层 Low-E 绿色		
窗墙比	方向	6	6Low-E+12 空气+6 普通+12 空气+6 普通	—	
		7	6Low-E+12 氩气+6 普通+12 氩气+6 普通		
		南北	0.1~0.6		
阳光间	进深/m	0.1~2	0.1	—	

表2(续)

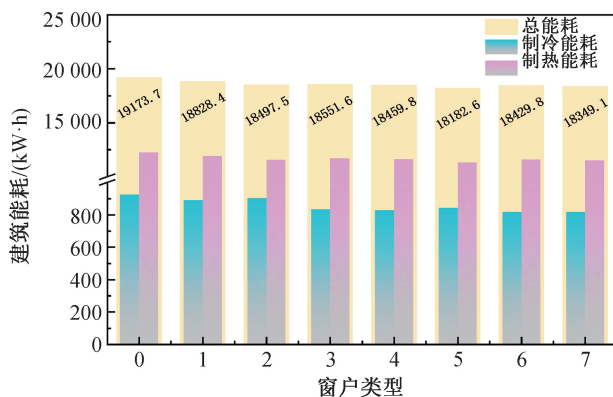
策略	种类	变量	范围	步长/mm	
主动	空调系统	类型	0	燃煤炉和无制冷设备	
			1	电暖气加空调	
			2	天然气加空调	
			3	空气源热泵	
可再生 能源	光伏板	制热温度	温度/°C	16~20	1
		板数		1~36	1
		水平夹角		0~90°	5°
		方位角		-90°~90°	5°
		间距/m		0.1~1	0.1

3 南疆近零能耗农村住宅改造策略

基于表 2,对已确定的优化改造变量参数,采用分阶段单因素模拟方法,系统性地分析各变量对建筑能耗的影响,并通过严格控制其他参数,依次对单项关键因素进行孤立变量的能耗模拟,从而为后续多参数协同优化提供依据与方向。

3.1 被动式策略对能耗的影响

结果(图 6)显示:从单层普通玻璃 19 173.7 kW·h,到采用绿色 3 层 Low-E 玻璃时,总能耗降至 18 182.6 kW·h,下降了 5.2%;其中制热减少约 908.8 kW·h,下降了 7.4%,制冷减少约 82.3 kW·h,



图中横坐标的数值分别与表 2 中外窗材料的类型代号一一对应。

图 6 不同窗户类型对能耗的影响

Figure 6 The influence of different window types on energy consumption

结果(图 8、图 9)显示:随北侧窗墙比从 0.10~0.45,总能耗由 19 226.6 kW·h 增加至 19 997.3 kW·h,上升了 4.0%。在冬冷为主地区增大北窗墙比会增加热损失并提升采暖负荷,说明北向窗墙比应谨慎提高。

南向窗墙比从 0.30 增至 0.70 时,由于南向窗户外侧普遍设置的“阳光房”,导致敏感性分析中表现出较低的灵敏度。年总能耗出现小幅下降,减少

下降了 9.0%。以上结果与房涛等^[9]研究的结果“窗性能提升在冬季采暖与夏季透过增/削热方面都有贡献”和孙翔宇等^[10]研究的结果“Low-E 玻璃具有显著的节能效果”一致,共同证实了改善外窗热工性能是跨建筑类型的有效节能途径。

结果(图 7)显示:浅层阳光间,0.1 m 能够最大化被动太阳得热并降低能耗,但过大进深会降低有效太阳捕获并引入额外传热与体积增大带来的热负担^[11],存在最优深度窗口,本研究选择 1.5 m 进深^[12]。这一趋势与贺龙等^[13]的研究结论“空间进深越大,全年综合能耗越大”相吻合,共同验证了控制空间进深对节能的普遍意义。

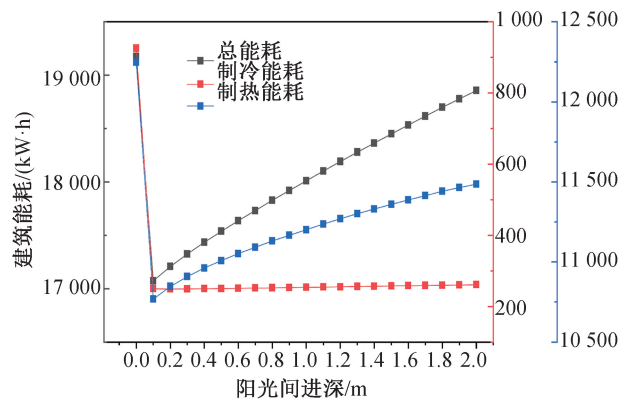


图 7 不同阳光间进深对能耗的影响

Figure 7 The influence of different sunspace depth on energy consumption

367 kW·h,下降 1.9%,说明在喀什以采暖为主的气候下,适度增大南窗能通过被动太阳增益净降低全年能耗,但应配合高性能窗与遮阳策略以控制夏季增热与舒适性问题。上述分析表明,调整南、北向窗墙比对农宅能耗有明显影响,这与范征宇等^[14]研究的结论“不同窗墙比区段下功能布局变化对建筑能耗影响较大”一致,均证实了窗墙比作为关键设计参数的普适重要性。

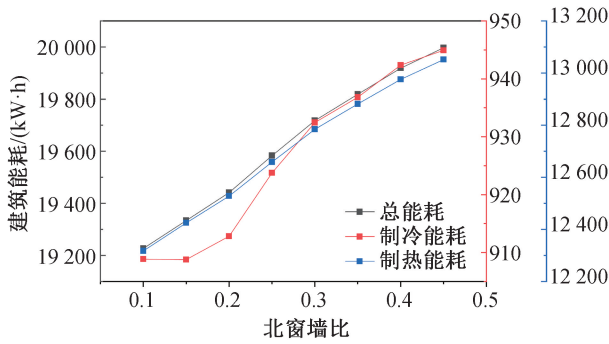


图 8 不同北窗墙比对能耗的影响

Figure 8 The influence of different north window wall ratio on energy consumption

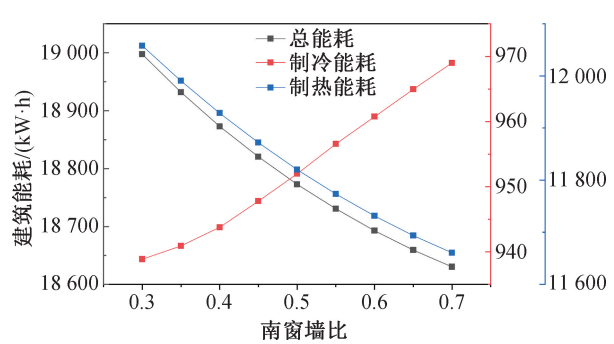


图 9 不同南窗墙比对能耗的影响

Figure 9 The influence of different south window wall ratio on energy consumption

结果(图 10)显示:墙体保温厚度,在不设置保温层时年总能耗 19 173.7 kW·h;采用 PU 保温厚度为 100 mm 时总能耗降至 13 409.3 kW·h,下降了 30.0%,墙体保温对采暖削减贡献最大,且不同材料排序稳定,PU 最优。

结果(图 11)显示:屋顶保温对年总能耗影响明显小于外墙,以 PU 为例,0 mm~100 mm 总能耗由

19 173.7 kW·h 降低至 18 434.2 kW·h,减少 739.5 kW·h,可见屋顶保温能降低上下方向的传热,但对整年能耗的绝对贡献低于外墙。这一规律与张垚等^[15]的研究结论“建筑保温存在确定的‘经济最优厚度’,超越此厚度后增量效益显著降低”一致,也证实了保温措施是本地多项被动式策略中的关键权重之一。

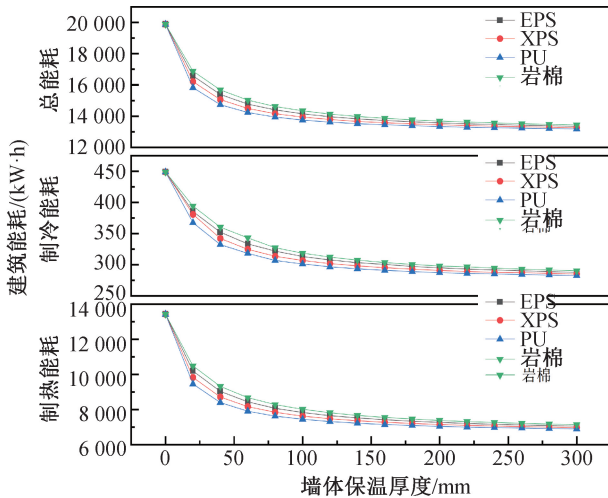


图 10 不同墙体保温厚度对能耗的影响

Figure 10 The influence of different wall insulation thickness on energy consumption

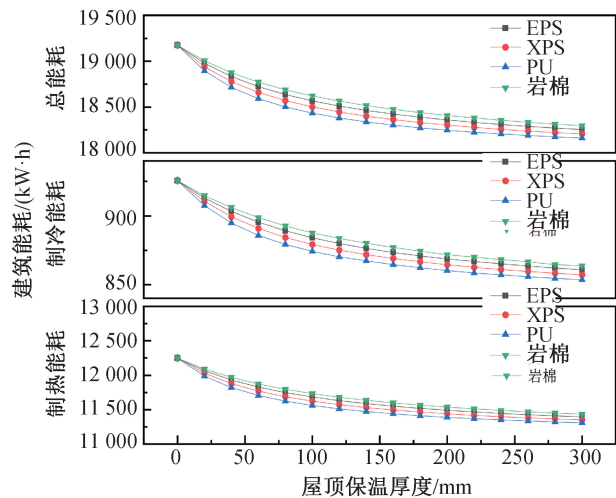


图 11 不同屋顶保温厚度对能耗的影响

Figure 11 The influence of different roof insulation thickness on energy consumption

3.2 主动式策略对能耗的影响

结果(图 12a)显示:基线燃煤炉年能耗为 19 173.7 kW·h;电暖气+空调能耗为 17 146.2 kW·h,减少 2 027.4 kW·h,下降了 10.6%;天然气+空调能耗为 20 070.4 kW·h,增加 896.7 kW·h,上升了 4.7%;空气源热泵(ASHP)能耗为 10 182.0 kW·h,减少 8 991.7 kW·h,下降了 46.9%。在同一围护条件下,ASHP 以其高效率对最终能耗影响最大,可将年终端能耗显著降低一半;选择空气源热泵设备是主动阶段优先方向^[16]。

结果(图 12b)显示:随着供暖设定温度由 16℃ 升至 20℃,建筑年能耗明显上升而热舒适指标 PPD 显著下降,呈现典型的能耗-舒适权衡关系:能耗约由 232 kW·h·m⁻²·a⁻¹ 上升至 296 kW·h·m⁻²·a⁻¹,增加了约 64 kW·h·m⁻²·a⁻¹,增加了约 27.6%;PPD 由约 99% 下降至 78%,能耗降低了约 21%。

由以上结果可知:16~20℃ 之间,18℃ 时能耗与舒适度较为平衡,既显著改善了舒适性,又避免了进一步升温带来的过大能耗增量。因此,将 18℃ 作为本研究对象的推荐供暖设定温度。

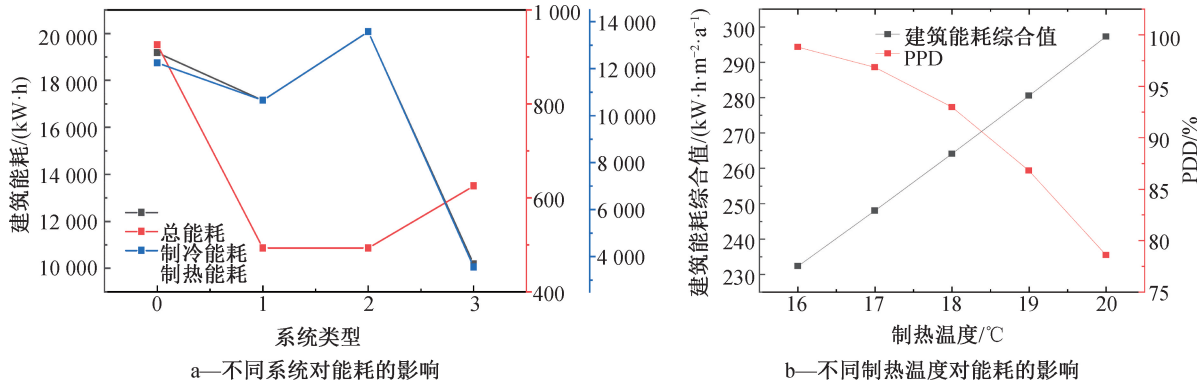


图 12 主动策略对能耗的影响

Figure 12 Impact of proactive strategies on energy consumption

3.3 可再生能源策略对能耗的影响

结果(图 13)显示:单块光伏组件随水平夹角 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 变化,年发电量总值区间为 $360.1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 至 $484.1 \text{ kW}\cdot\text{h}$,光伏组件夹角为 45° 时发电量达到峰值,较最低值增加了 34.4% ,表明在喀什所在纬度

与气候条件下,光伏组件夹角在 45° 左右可较大化获取全年辐照。

结果(图 14)显示:进一步通过对比不同水平夹角光伏逐月发电量,水平夹角为 45° 时相对收益最明显。

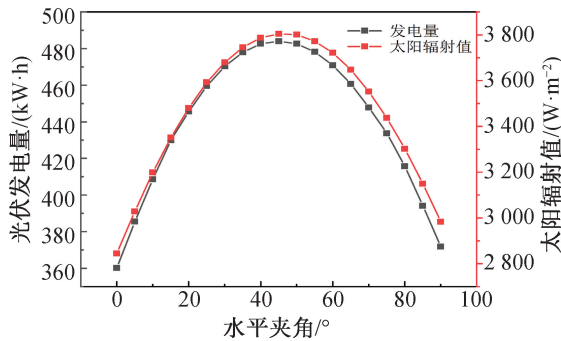


图 13 不同水平夹角的发电量与太阳辐射值

Figure 13 Power generation and solar radiation values at different horizontal angles

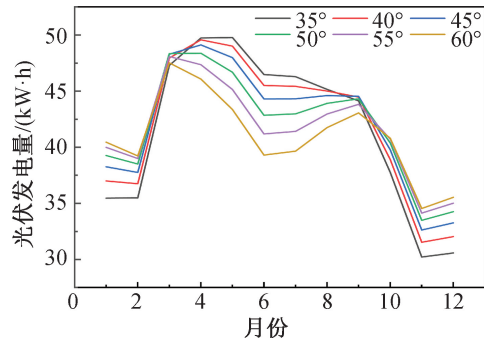


图 14 不同水平夹角光伏逐月发电量

Figure 14 Monthly photovoltaic power generation at different horizontal angles

结果(图 15、图 16)显示:方位角对光伏组件年发电量影响极大,方位角从 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 变化时,年发电量最大值可达 $485.1 \text{ kW}\cdot\text{h}$,此时方位角为

40° ,该方位角有助于在全年范围内均衡发电,尤其在春夏段提升幅度明显,有利于实现全年替代率最大化。

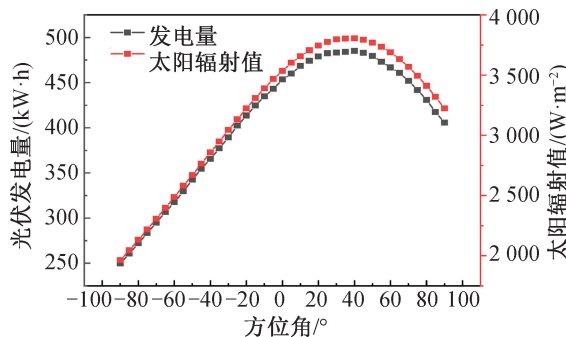


图 15 不同方位角的发电量与太阳辐射值

Figure 15 Power generation and solar radiation values at different azimuth angles

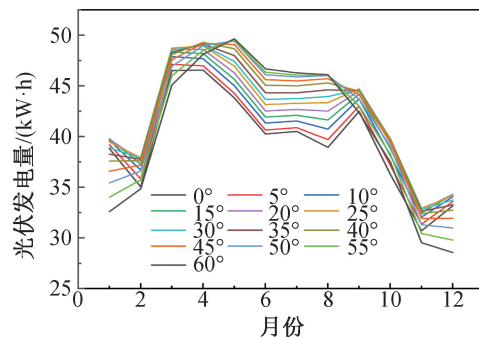


图 16 不同方位角光伏逐月发电量

Figure 16 Monthly photovoltaic power generation at different azimuth angles

结果(图 17)显示:光伏组件横向间距在 $0.1 \sim 1 \text{ m}$ 时,屋面光伏年发电量由 $6055.0 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 增加至

$6371.4 \text{ kW}\cdot\text{h}$,上升了 5.2% ,间距在 $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ 时,系统发电量达到最优,且间距在此范围内变化时

对发电量的影响不大,但在有限屋顶面积约束下,通过合理布局、适度增加横向间距可显著消除阵列间的遮挡与互遮损失,从而最大化提升屋顶光伏系统的总体发电量。

结果(图 18)显示:光伏组件纵向间距在 0.4 m 及以上时,屋面光伏年发电量达到最优值

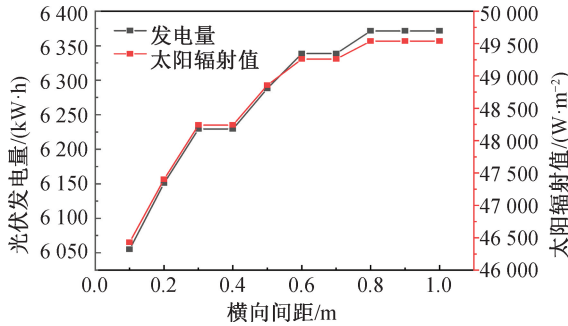


图 17 不同横向间距的发电量与太阳辐射值

Figure 17 Power generation and solar radiation value at different transverse spacing

6 371.4 kW·h,但纵向间距过大将导致屋面光伏板密度降低。

基于以上综合分析结果,该农宅屋面设置光伏板倾角 45°、方位角 40°、阵列横/纵间距取 1 m 时,最多可布置 14 块光伏板(图 19)显示,年发电量约 6 371.4 kW·h。

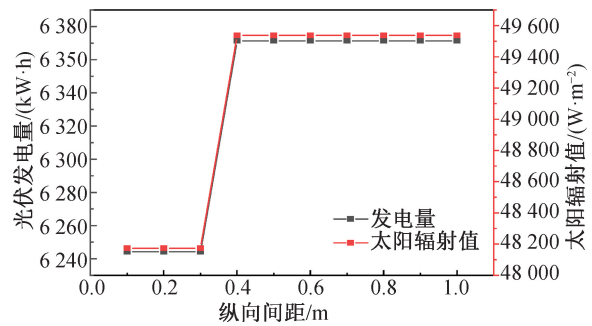


图 18 不同纵向间距的发电量与太阳辐射值

Figure 18 Power generation and solar radiation value at different longitudinal spacing

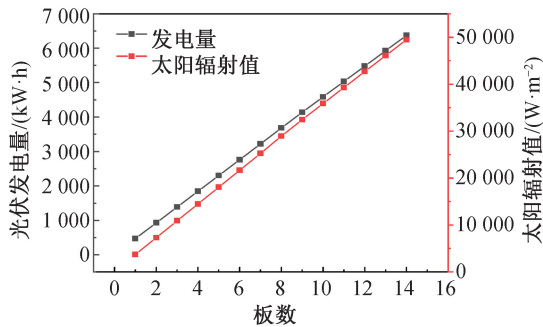


图 19 不同板数发电量与太阳辐射值

Figure 19 Power generation and solar radiation value at different number of plate

3.4 近零能耗验证与经济性评估

基于上述模拟分析,并参考 Ahmed 等^[17]的结合高效隔热、高性能门窗、太阳能光伏系统等对住宅进行深度节能改造的措施,进一步确定了关键优化策略(表 3),并据此构建了综合性能仿真模型;进而通过对建筑能耗综合值及经济性指标的深入模拟,最终量化评估并验证了实现近零能耗的技术路径及其静态投资回收期。

近零能耗建筑应依据当地气候与场地条件,优先采用被动设计措施以最大限度降低供暖、制冷与照明等末端能耗;在此基础上采用主动技术(高效热源、能效控制与热回收等)提升系统效率,并充分利用现场可再生能源以补偿剩余用能,从而以最少的一次能源满足室内舒适性要求;此外,按现行 GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》规范,近零能耗住宅相较于国家与行业节能设

表 3 优化改造策略的确定

Table 3 Determination of optimization transformation strategy

策略	种类	变量	范围
被动	保温材料	类型	PU
	外窗	厚度/mm	外墙/屋顶 100
	北窗墙比	材料	3层 Low-E 绿色
		比例	0.1
主动	空调系统	类型	空气源热泵
	制热温度	温度	18 °C
		板数	14
可再生能源	光伏板	水平夹角	45°
		方位角	40°
	间距/m	1	

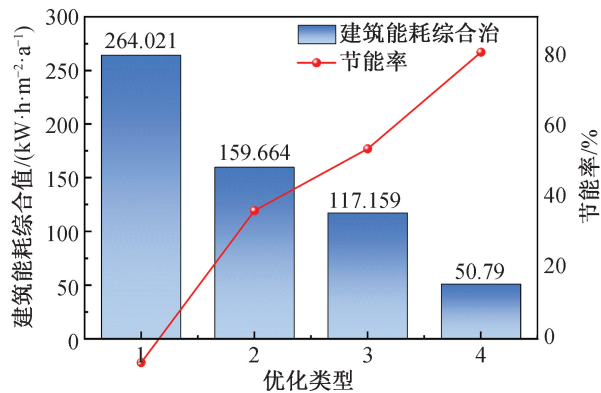
计标准应实现约 60%~75%的能耗降低,其绩效指标宜满足:建筑能耗综合值 $<55 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 或 $<6.8 \text{ kgce}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,并强调可再生能源利用度的达标(可再生能源利用率建议 $>10\%$)。结果见表 4、图 20,可以看出:该建筑通过“被动-主动-可再生能源”三阶段的递进优化,最终实现了综合节能率 80.8%的近零能耗目标。对静态回收期的分析显示,各阶段投资相对于初始基准建筑均表现出良好的经济性,且呈现出先略增后回落的趋势。

首先,被动策略优化通过提升围护结构热阻,将能耗从基准的 $264.0 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 降至 $159.7 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其相对于基准方案的静态回收期为 7.2 年。随后,主动策略优化采用高效热泵等设备,

表 4 三阶段不同策略下优化值

Table 4 Optimization values under three-stage different strategies

优化类型	优化策略	建筑能耗综合/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	节能率/%	改造费用/元	静态回收期/年
1	基准建筑	264.0	0.0	—	—
2	被动	159.7	39.5	38 509.6	7.2
3	被动+主动	117.2	55.6	58 509.6	7.8
4	被动+主动+可再生能源	50.8	80.8	72 192.1	7.18



注:图中横坐标分别为1:基准建筑、2:被动、3:被动+主动、4 被动+主动+可再生能源,其详细内容见表4 节能率/%。

图 20 不同策略下近零能耗验证

Figure 20 Near-zero energy consumption verification under different strategies

在被动优化基础上进一步降低能耗,其整体方案,即高效设备+被动措施,相对于基准建筑的静态回收期为 7.8 年,略长于纯被动方案。

尤为值得注意的是,可再生能源策略在整合前两阶段措施的基础上,通过光伏等系统最终将能耗强度降至 $50.8 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,尽管系统集成度高,但该方案相对于基准建筑的静态回收期为 7.18 年,较前两个阶段回收期反而缩短了。这表明:在当前条件下一步到位直接采用“被动+主动+可再生能源”的综合方案,其投资效率最高,整体经济性优于分步实施的中间阶段。

综上所述,在喀什地区通过先降负荷、再提效率、最终绿色补给的路径,不仅能将能耗强度降低到 $55 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的临界值之下,可实现近零能耗要求^[18-19],而且从全生命周期投资角度看,直接建设高性能的近零能耗建筑具备显著优势。

4 结论

本研究围绕喀什典型农村住宅,采用被动-主动-可再生能源三阶段逐步叠加的优化路径,对其年终端能耗进行了系统模拟与量化评估,研究表明:

(1)在高采暖比重气候区,应以被动改造作为改造序列的首要步骤,因其对年度采暖基数的压减

最为直接且效率最高,本研究中被动阶段贡献了 39.5% 初始能耗降幅。在各项被动改造措施中,外窗性能改造在此过程中贡献了 5.2% 的节能量,这表明提升玻璃及外窗性能对抑制采暖负荷具有明显的绝对贡献。

(2)在通过被动措施降低基础负荷后,优先推广高性能热源(如 ASHP),可在剩余负荷上发挥更大的边际节能效益,能耗相对于基线累计下降约 55.6%,是提高系统性能能源利用效率的关键手段。

(3)可再生能源在被动+主动措施降负荷后的替代效率显著提升,通过优化其倾角、方位与阵列布置,可实现高度替代率,使建筑综合能耗进一步降至 $50.8 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,达到近零能耗要求。

(4)实施被动、主动与可再生能源的三阶段综合方案静态回收期最短(7.18 年),而被动+主动组合方案的回收期最长,三阶段综合改造投资效率最高。

参考文献 (References)

- [1] 张时聪,王珂,吕燕捷,等.近零能耗建筑评价的研究与实践[J].城市建筑,2020,17(35):61-67.
ZHANG S C, WANG K, LYU Y J, et al. Research and practice on evaluation of nearly zero energy buildings [J]. Urbanism and Architecture, 2020, 17(35): 61-67.
- [3] 王力.新疆寒冷地区农村居住建筑围护结构节能指标体系研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2024.
- [3] AHMED W, ASIF M. Life cycle cost analysis of residential energy Retrofits: achieving near-zero energy homes in desert climates[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113316.
- [4] 郑涛.喀什地区低层住宅的太阳能利用设计模式研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
- [5] 陈玢晶,李德智,李启明.夏热冬冷地区既有居住建筑节能改造综合效益分析[J].建筑科学,2017,33(8):42-48.
CHEN B J, LI D Z, LI Q M. Comprehensive benefit analysis of energy-saving retrofitting for existing residential buildings in hot summer and cold winter zone [J]. Building Science, 2017, 33(8): 42-48.
- [6] 向俊米,刘宏成,李晓俊.夏热冬冷地区居住建筑人

- 员用能行为模型研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(8): 15-23.
- XIANG J M, LIU H C, LI X J. Study on occupant energy-use behavior model of residential buildings in hot summer and cold winter zone [J]. Building Science, 2024, 40(8): 15-23.
- [7] 沈亚倩,姜曙光. 新疆严寒C区住宅三步节能与四步节能的经济性分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(6): 740-745.
- SHEN Y Q, JIANG S G. Economic analysis of three-step and four-step energy efficiency in residential buildings in severe cold zone C of Xinjiang[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2018, 36(6): 740-745.
- [8] 王亮,王超. 严寒地区近零能耗建筑围护结构技术创新研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(23): 89-92.
- WANG L, WANG C. Study on technological innovation of envelope structures for nearly zero-energy buildings in severe cold regions[J]. Technology Innovation and Application, 2025, 15(23): 89-92.
- [9] 房涛,刘锐捷,王衍争,等. 基于近零能耗目标的寒冷地区办公建筑设计参数综合寻优和实证[J]. 工业建筑, 2023, 53(7): 16-24, 78.
- FANG T, LIU R J, WANG Y Z, et al. Comprehensive optimization and demonstration of design parameters for office buildings in cold regions based on nearly zero-energy target[J]. Industrial Construction, 2023, 53(7): 16-24, 78.
- [10] 孙翔宇. 不同玻璃类型对住宅空调供暖能耗影响的简析[J]. 发电与空调, 2015, 36(3): 71-75.
- SUN X Y. Brief analysis on influence of different glass types on energy consumption of residential air conditioning and heating[J]. Power Generation & Air Conditioning, 2015, 36(3): 71-75.
- [11] 秦力,刘佳楠,史巍. 寒冷地区村镇附加阳光间住宅围护结构能耗实测分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 264-270.
- QIN L, LIU J N, SHI W. Measured analysis on energy consumption of envelope for village houses with attached sunspace in cold region[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 264-270.
- [12] 金国辉,张凯歌. 基于热舒适性与经济性的内蒙古西部近零能耗农宅构建[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 881-888.
- JIN G H, ZHANG K G. Construction of nearly zero-energy farmhouses in western Inner Mongolia based on thermal comfort and economy[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 55(6): 881-888.
- [13] 贺龙,张雯琪. 基于多因素影响建筑空间进深与能耗关系研究[J]. 绿色建筑, 2024(4): 108-116.
- HE L, ZHANG W Q. Relationship between building space depth and energy consumption based on multi-factor influence[J]. Green Building, 2024(4): 108-116.
- [14] 范征宇,肖子一,刘加平. 多气候区不同窗墙比下功能布局对办公建筑能耗的影响[J]. 建筑节能, 2023, 51(6): 18-23, 31.
- FAN Z Y, XIAO Z Y, LIU J P. Influence of functional layout on energy consumption of office buildings under different window-to-wall ratios in multiple climate zones [J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(6): 18-23, 31.
- [15] 张垚,牛建刚,金国辉. 建筑保温材料节能性能及经济厚度优化研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(10): 149-156.
- ZHANG Y, NIU J G, JIN G H. Research on energy-saving performance and economic thickness optimization of building insulation materials [J]. Building Science, 2017, 33(10): 149-156.
- [16] 刘馨,耿秀,冯国会,等. 严寒地区空气源热泵供热系统改造优化研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 124-130.
- LIU X, GENG X, FENG G H, et al. Research on transformation optimization of air source heat pump heating system in severe cold region [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(11): 124-130.
- [17] AHMED W, ASIF M. Life cycle cost analysis of residential energy Retrofits: achieving near-zero energy homes in desert climates [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113316.
- [18] 何玥儿,徐明蕊,钟鸿峰,等. 基于更新全过程碳排放评估的既有住区层级改造策略研究——以夏热冬暖地区典型城市为例[J]. 西部人居环境学刊, 2025, 40(5): 1-8.
- HE Y E, XU M R, ZHONG H F, et al. Research on hierarchical retrofitting strategy for existing residential districts based on whole-process carbon emission assessment: a case study of typical cities in hot summer and warm winter zone [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2025, 40(5): 1-8.
- [19] 徐伟,孙德宇,路菲,等. 近零能耗建筑定义及指标体系研究进展[J]. 建筑科学, 2018, 34(4): 1-9.
- XU W, SUN D Y, LU F, et al. Research progress on definition and indicator system of nearly zero energy buildings [J]. Building Science, 2018, 34(4): 1-9.

(责任编辑:张忠)