

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.02.001

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:朱轶韵,陈习习,马召熙,余咪咪. 基于多因素正交实验的关中民居节能优化分析[J]. 西安理工大学学报,2024,40(2):151-159.

ZHU Yiyun, CHEN Xixi, MA Zhaoxi, YU Mimi. Energy saving optimization analysis for rural buildings in Guanzhong Area based on multi-factor orthogonal experiment[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2): 151-159.

## 基于多因素正交实验的关中民居节能优化分析

朱轶韵, 陈习习, 马召熙, 余咪咪

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为解决陕西关中地区民居建筑围护结构热工性能不佳、采暖效率低的问题,本文以关中典型民居为研究对象,从建筑外围护结构和窗墙比方面展开关中民居节能优化分析。结合现场测试调研数据,通过 DesignBuilder 软件模拟能耗,探究围护结构构造和窗墙比大小对关中民居建筑热负荷、冷负荷、全生命周期投资收益率的影响,采用多因素正交实验方法耦合分析各优化方案的节能性与经济性,选出最适宜的综合节能策略。结果表明关中民居最佳节能优化策略为外墙加设 80 mm 厚 EPS 保温层、屋顶加设 60 mm 厚 XPS 保温层、外窗改用普通中空 5+9A+5 玻璃、北向窗墙比 0.1、南向窗墙比 0.3。优化后关中典型民居节能 61.98%,冬季典型气象日室内平均温度上升 2.78 °C。

**关键词:** 关中民居; 节能优化; 建筑能耗; 经济性分析; 正交实验

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)02-0151-09

### Energy saving optimization analysis for rural buildings in Guanzhong Area based on multi-factor orthogonal experiment

ZHU Yiyun, CHEN Xixi, MA Zhaoxi, YU Mimi

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To address the issues related to the poor thermal performance and low heating efficiency of residential building envelopes in the Guanzhong area of Shaanxi Province, this study focuses on typical residential buildings in the region and analyzes energy-saving optimizations concerning the building envelope and window-to-wall ratio. Using field test and survey data, the DesignBuilder software simulated energy consumption to investigate the impact of the envelope structure and window-to-wall ratio on the heating load, cooling load, and life-cycle investment return ratio of residential buildings in the Guanzhong area. A multi-factor orthogonal experimental method is employed to analyze the energy conservation and economy of each optimization plan with the most suitable comprehensive energy conservation strategy selected. The results indicate that the optimal energy-saving strategy for residential buildings in the Guanzhong area is to incorporate an 80 mm thick EPS insulation layer on the exterior wall, add a 60 mm thick XPS insulation layer to the roof, use standard hollow 5+9A+5 glass for the exterior windows, and maintain a north-facing window-to-wall ratio of 0.1, along at a south-facing ratio of 0.3. After optimization, typical residential buildings in the Guanzhong area saved 61.98% of energy, with the average indoor temperature increased by 2.78 °C on typical winter days.

**Key words:** Guanzhong Area rural buildings; energy saving optimization; building energy consumption; economic analysis; orthogonal experiment

收稿日期: 2023-02-14; 网络首发日期: 2023-06-01

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230531.1329.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078419)

通信作者: 朱轶韵,女,博士,教授,研究方向为绿色生态建筑。E-mail: zyyun@xaut.edu.cn

随着乡村振兴战略的实施,发展绿色生态宜居民居是当下和未来乡村建筑的主导方向。据2022年中国建筑能耗报告,2020年建筑全生命周期能耗占全国能源消费的45.5%,建筑运行阶段能耗占全国总量的21.3%,农村居住建筑能耗占建筑运行阶段能耗的21.7%,北方地区采暖能耗占比远大于非采暖地区<sup>[1]</sup>。城镇建筑的节能工作已经有比较完善的方式,但我国农村建筑的节能仍在探索阶段,还没有明确的路径<sup>[2]</sup>。我国西北关中平原地区的民居建筑结构形式单一,居民节能意识不强,冬季取暖能效低,室内舒适度满意率不高,民居节能发展缓慢。因此,研究关中民居节能优化策略对环境可持续发展、改善乡村民居宜居性具有一定的意义。

近年来多位学者对民居节能优化进行了研究,张磊等<sup>[3]</sup>综合建筑朝向、窗墙比、遮阳等被动式方案对室内温度的影响,提出了干热干冷地区乡村建筑优化方案。邹彬<sup>[4]</sup>研究建筑体型系数、窗墙比、新材料对建筑能耗与经济的影响,得出环洱海区域新民居的节能优化策略。李雪平等<sup>[5]</sup>通过分析皖南传统民居围护结构保温变化对建筑能耗的影响,结合经济效益提出了皖南民居节能优化策略。

多因素正交实验分析方法被广泛用于民居节能分析中,黄志林等<sup>[6]</sup>基于正交实验节能分析,得到了青海庄廓民居建筑朝向、层高、窗墙比等的最优设计值;王楠玉<sup>[7]</sup>基于多因素正交实验分析,得出了关中民居建筑负荷影响因素的敏感性大小关系;陈璐瑶<sup>[8]</sup>对卫藏民居建筑设计元素进行正交实验分析,得出了一套适用不同地区的节能设计方法。这些研究对关中民居节能优化提供了研究方向,民居优化方案主要分析各因素对建筑能耗的影响,但针对关中地区的节能研究较少,各因素对经济性的影响分析不够全面,导致建筑节能方案可实施性不强。

本研究针对陕西关中地区典型民居建筑,进行实际调研与测试分析,提出关中民居节能优化思路,利用单一因素和多因素正交实验综合分析各因素对建筑节能与经济影响,得出兼顾节能效果与经济性的民居优化措施,为改善关中民居节能性、提高室内舒适度提供改造或设计参考。

## 1 关中民居模型与研究方法

### 1.1 关中民居概况调研

关中平原位于陕西省中部,介于秦岭山脉与陕北高原之间,冬季寒冷,夏季炎热,太阳能资源较丰

富,属于寒冷气候区,在进行建筑热工设计时应注重冬季保暖,兼顾夏季防热<sup>[9]</sup>。现有关中民居二层结构较多,主体建筑部分为三开间,主要功能房间设置在主体建筑中,次要功能房间厨房、储物间设置在两边厢房<sup>[10]</sup>。通过对关中农村地区民居围护结构构造、冬季采暖能源、室内冷热感受现状等走访调查,发现关中民居围护结构构造简单,民居外墙结构多为240 mm厚黏土砖加水泥或石灰饰面,窗户多采用6 mm单层玻璃。外墙和屋顶没有保温措施,房间热稳定性不高;窗户气密性差,冬季冷风渗透现象严重。此外,经调查问卷统计分析,关中农村地区居民对冬季室内热舒适的不满意率为91%。有69%的居民为了经济采用煤炉取暖,31%的居民采用空调、电热毯、电暖器等方式取暖,这导致了关中民居普遍舒适性较差,采暖能耗大,远达不到建筑节能标准。因此,需要在保证舒适的条件下,提出一个既满足节能标准又经济的关中民居节能策略。

### 1.2 典型建筑及现场测试

从以上调研分析民居节能优化的需求出发,本研究选取关中地区典型建筑进行现场测试实验,选取的建筑为近十年内所建的砖混民居,南北朝向,建筑平面图和温度测试点见图1。建筑共两层,层高3.3 m,每层有两间卧室和一个客厅,一层为主要使用区域,客厅旁延伸出厢房,做厨房和储物间使用,建筑面积155.41 m<sup>2</sup>,其南向窗墙比25.12%,北向窗墙比14.41%,建筑围护结构构造见表1。实验选取8个测试点,进行48小时不间断温度测试,使用testo 175 H1 温湿度记录仪测量室内外空气温度,传感器放在每个功能房间中心,距地面1.5 m左右,每10分钟记录一次,测试房间见图1,测试期间卧室2有人居住,其余房间空置。

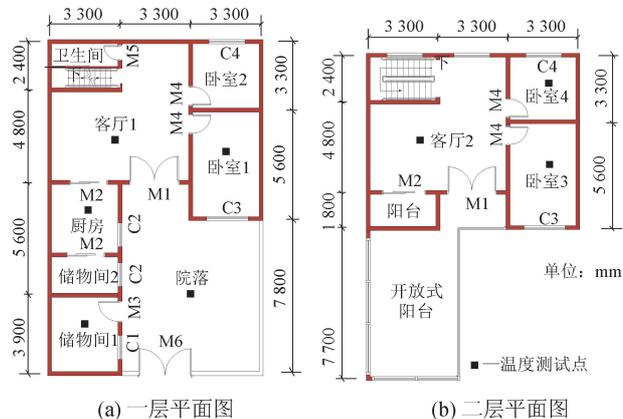


图1 典型建筑平面图  
Fig. 1 Typical building plans

表1 建筑围护结构构造  
Tab.1 Building envelope structure

结构部位	构造形式	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ )	传热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
外墙	贴面瓷砖+20 mm 水泥砂浆+240 mm 实心黏土砖+20 mm 水泥砂浆	0.511	1.956
屋顶	10 mm 防水油毡+20 mm 水泥砂浆+120 mm 预制板+20 mm 水泥砂浆	0.354	2.822
外窗	6 mm 单层铝合金框玻璃	—	5.778

实验结果最终选取 2022 年 1 月 9 日 7:00 至 1 月 10 日 7:00 连续 24 小时现场测试室内外温度数据作为冬季的典型数据,典型民居 24 小时温度变化曲线见图 2。

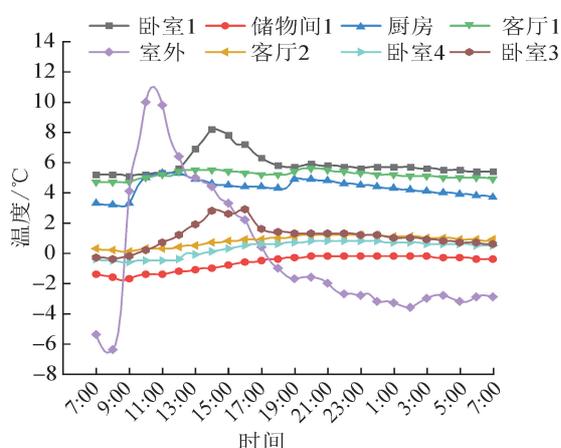


图2 典型建筑室内实测温度

Fig.2 Measured indoor temperature of typical buildings

由图 2 可知,室外平均温度 $-0.12^{\circ}\text{C}$ ,一层各房间平均温度为 $3.69^{\circ}\text{C}$ ,二层各房间平均温度为 $0.76^{\circ}\text{C}$ 。南向卧室 1、卧室 3 受到太阳辐射的影响,14:00~16:00 期间室内温度比其他房间高约 $2^{\circ}\text{C}$ 。一层房间测试期间在客厅中心布置独立式煤炭炉取暖,采用火炉取暖设备的房间平均温度高 $4^{\circ}\text{C}$ 左右,依旧没有达到舒适要求,而房间保温性能差,能耗效率低,若使房间达到舒适温度,采暖能耗将大大增加。因此,在保证室内舒适度的前提下,可通过调整窗墙比利用太阳能资源,增加围护结构的保温性能减少热量损耗,降低建筑能耗。

### 1.3 民居优化思路与研究方法

因此,关中民居节能策略首先考虑对建筑围护结构进行节能优化,研究外墙、屋顶、外窗三者对建筑节能的影响,主要节能优化策略为外墙、屋顶加设保温以降低传热系数,更换传热系数较低的节能窗,调整窗墙比充分利用太阳能资源。针对建筑节能优化问题,建筑能耗最小化是首要目标,本研究采用建筑能耗模拟软件 DesignBuilder 模拟单位面积建筑

总负荷,同时考虑到关中地区居民收入水平,计算改造方案的投资收益比,以此综合判断节能策略的优劣。

全生命周期投资收益比  $M_{\text{SIR}}$  是投资项目全生命周期内未来收益的折现值与项目投资成本的比值,计算公式见式(1)和式(2)。各项节能技术的  $M_{\text{SIR}}$  指标可以直观地反映各项技术的性价比,因此,选用  $M_{\text{SIR}}$  作为关中民居节能技术经济性评价指标。计算过程中假设关中民居制热制冷源均为空调,经济性指标计算中各项材料价格参考陕西省内建材市场价确定,各项材料消耗量计算参考陕西省装饰工程消耗量定额确定,运行当地电费标准 $0.49$ 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,设定折现率为 $4.35\%$ 。

$$M_{\text{SIR}} = \frac{\rho_{\text{NPV}}}{\rho_1} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{NPV}} = \sum_{t=1}^n (\rho_{\text{CI}} - \rho_{\text{CO}}) \cdot (1+i)^{-t} \quad (2)$$

式中: $\rho_{\text{NPV}}$ 为净现值; $\rho_1$ 为项目投资总额; $\rho_{\text{CI}}$ 为年节约费用; $\rho_{\text{CO}}$ 为初始投资费用; $i$ 为折现率; $t$ 为使用年限。

### 1.4 民居建筑能耗模拟

本研究能耗模拟的建筑模型是根据调研测试选取的典型民居实测尺寸构建,使用 DesignBuilder 软件进行能耗模拟,气象参数选择 DesignBuilder 软件自带中国标准气象数据库中西安地区数据。庭院为敞开式,上方未设置遮挡,庭院部分简化为室外,围护结构的材料及传热系数参照表 1 设置。

为了验证现场实验与模拟计算的一致性,本研究选取 2022 年 1 月 9 日 7:00 至 1 月 10 日 7:00 连续 24 小时现场测试温度,对比不设采暖设备下民居室内模拟温度。室内实测温度与模拟温度结果对比见图 3。卧室 3 实测温度平均 $1.13^{\circ}\text{C}$ ,模拟温度平均 $0.97^{\circ}\text{C}$ ;卧室 4 实测温度平均 $0.33^{\circ}\text{C}$ ,模拟温度平均 $-0.08^{\circ}\text{C}$ ;客厅 1 实测温度平均 $5.19^{\circ}\text{C}$ ,模拟温度平均 $1.97^{\circ}\text{C}$ 。实测对比实测与模拟温度变化曲线,无主动采暖设备下的卧室 3、卧室 4 实测温度与模拟温度波动趋势基本一致,温度误差在 $0.5^{\circ}\text{C}$ 以内,在模拟计算误差许可范围内,因此使用

DesignBuilder 软件进行关中民居建筑能耗模拟具有可行性,可在后续各个民居节能优化因素分析中进行具体的模拟实验研究。

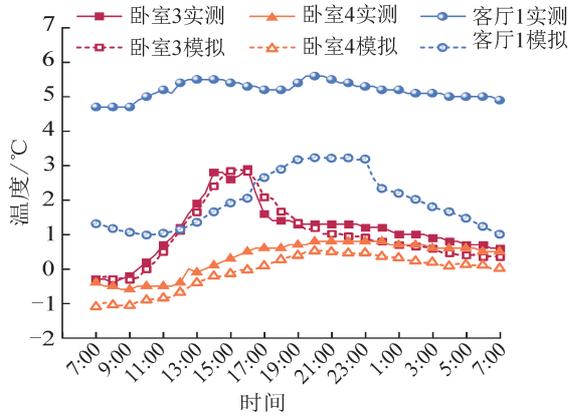


图3 实测与模拟温度对比  
Fig. 3 Comparison of measured and simulated temperatures

图3中采用火炉取暖的客厅1的平均温度比不设取暖设备的模拟温度高 $3.22^{\circ}\text{C}$ ,与舒适温度相差较远,且火炉采暖的方式加剧环境污染,相关政府不提倡使用。因此,本研究更换采暖方式,将空调设为民居能耗模拟的采暖制冷源。《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)和《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824—2013)中规定的寒冷地区居住建筑冬季室内设计温度分别为 $18\sim 24^{\circ}\text{C}$ 、 $14\sim 16^{\circ}\text{C}$ 。相关研究表明,西北地区乡村建筑冬季室内适宜温度为 $15^{\circ}\text{C}$ 左右<sup>[11-12]</sup>。据调研,91%的居民认为冬季室内偏冷,居民对取暖需求较高,以 $16^{\circ}\text{C}$ 为采暖设计温度更合理。相关规范中对夏季室内设计温度未提出要求,据调研,关中民居夏季典型气象日平均温度约为 $28^{\circ}\text{C}$ ,居民对夏季制冷需求不高,制冷设计温度为 $26^{\circ}\text{C}$ 可以满足需求。综合考虑,室内采暖控制温度设置为 $16^{\circ}\text{C}$ ,制冷控制温度设置为 $26^{\circ}\text{C}$ <sup>[13-14]</sup>。将该模型设为基准建筑,通过模拟,基准建筑单位面积冬季采暖负荷为 $135.81\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 、夏季制冷负荷为 $17.73\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。

## 2 关中民居建筑节能优化影响因素

本研究基于关中地区围护结构现状与关中地区太阳能资源较为丰富的气候特点,分析外墙构造、屋顶构造、外窗构造、南向窗墙比、北向窗墙比5个因素对关中民居建筑能耗的影响。

### 2.1 外墙构造

外墙是建筑能耗的主要消耗部位,外墙加设保温层可以有效降低外墙传热系数,提高房间热稳定

性。传统的草木灰、木屑等保温材料耐久性差,维护频率高,乡村地区逐渐不再使用。针对关中地区既有的 $240\text{ mm}$ 厚实心黏土砖墙,可加设保温性能好且耐久性高的材料:聚苯乙烯泡沫板(EPS)、聚苯乙烯挤塑板(XPS)和保温岩棉板对围护结构保温。外墙外保温构造下不同保温板厚度在 $20\sim 120\text{ mm}$ 时对建筑能耗的影响模拟结果见图4。保温材料按最低价格计算,EPS、XPS、岩棉市场价加运输费约在 $260$ 、 $320$ 、 $280\text{ 元}/\text{m}^3$ ,铺板人工费 $20\text{ 元}/\text{m}^2$ ,网格布加抗裂砂浆约 $21\text{ 元}/\text{m}^2$ ,机械及其他费约 $5\text{ 元}/\text{m}^2$ 。使用年限为20年。经济性计算结果见图5。

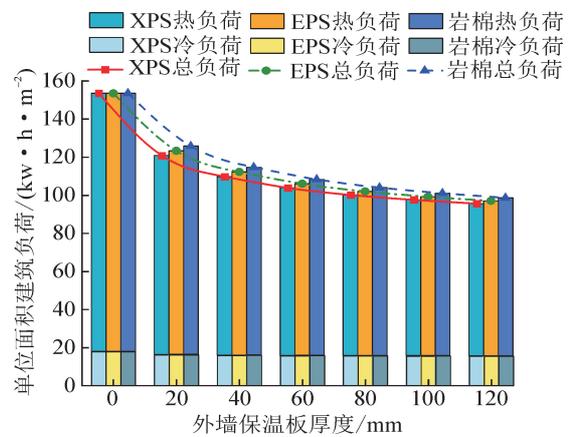


图4 外墙保温层对建筑能耗的影响  
Fig. 4 Influence of exterior wall insulation on building energy consumption

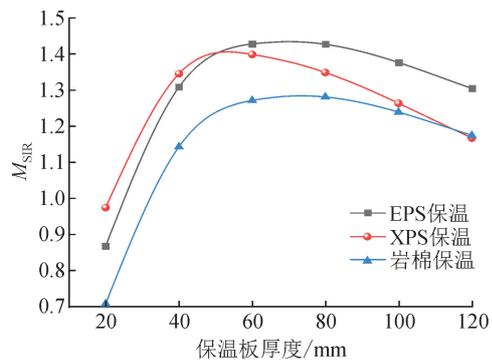


图5 外墙保温板厚度的经济性  
Fig. 5 Economy of thickness of exterior wall insulation board

由图4所示,随着外墙保温板材厚度的增加,建筑热负荷、冷负荷逐渐降低,三种保温材料对建筑能耗的影响均很明显,整体节能效果 $\text{XPS} > \text{EPS} > \text{岩棉}$ ,当保温板的厚度从 $20\text{ mm}$ 增加到 $120\text{ mm}$ 时,XPS板总节能 $21.36\% \sim 37.83\%$ ,EPS板总节能 $19.71\% \sim 36.84\%$ ,岩棉板总节能 $18.12\% \sim 35.8\%$ 。但保温层越厚,能耗降低速率越低,80 mm后能耗曲线趋于平缓,盲目增大保温材料厚度的做

法并不可取。由图 5,80 mm 厚 EPS 板投资收益比最大,随着保温结构层厚度增加, $M_{SIR}$  先增大后减小,经济性  $EPS > XPS >$  岩棉, EPS 板、岩棉板厚度在 80 mm 时经济最优, XPS 板厚度在 40~60 mm 时经济最优。因此,在考虑经济效益与保温效果的前提下,采用 80 mm 厚 EPS 或 60~80 mm 厚 XPS 较为合适。

## 2.2 屋顶构造

关中新建民居屋顶多为现浇混凝土平屋顶,节能优化方案选择在原基础上加设外保温材料 EPS、XPS 和保温岩棉,厚度范围 20~120 mm,能耗模拟结果见图 6。三种屋顶保温材料对民居能耗影响较大,随着屋顶保温板厚度的增加,建筑热负荷、冷负荷逐渐降低,节能效果  $XPS > EPS >$  岩棉,当保温板的厚度从 20 mm 增加到 120 mm 时, XPS 板总节能 12.68%~20.93%, EPS 板总节能 13.6%~21.38%,岩棉板总节能 11.77%~20.46%。能耗变化曲线在 60 mm 后趋于平缓。

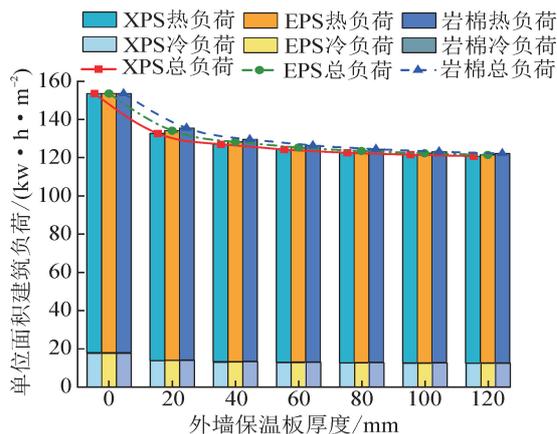


图 6 屋顶保温层对建筑能耗的影响

Fig. 6 Influence of roof insulation on building energy consumption

屋顶部位铺板人工费 10 元/ $m^2$ ,水泥砂浆找平 12 元/ $m^2$ ,机械及其他费约 2 元/ $m^2$ ,经济性计算结

果见图 7。40 mm 厚 EPS 板投资收益比最大,随着保温结构层厚度增加, $M_{SIR}$  先增大后减小,经济性  $EPS > XPS >$  岩棉, EPS 板厚度在 20~60 mm 时经济最优, XPS 板和岩棉板厚度在 40 mm 时经济最优。因此,同时考虑经济效益与保温效果,采用 40~60 mm 厚 EPS 或 XPS 较为合适。

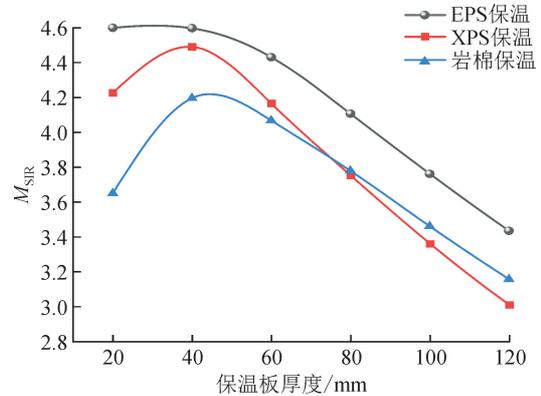


图 7 屋顶保温板厚度的经济性

Fig. 7 Economy of thickness of roof insulation board

## 2.3 外窗构造

关中民居外窗为铝合金框、单层 6 mm 厚玻璃,传热系数大,单层玻璃难以抵抗冬季室外的寒冷气候。因此,选择传热系数低、气密性好的双层玻璃进行节能优化分析,不同玻璃类型对建筑能耗的影响见表 2。随着外窗传热系数的降低,建筑热负荷、冷负荷逐渐降低,建筑整体节能率在 1.78%~3.09%,中空玻璃的空气层越大,建筑能耗越低,相同厚度下 Low-E 玻璃平均比普通中空玻璃的节能率高 0.6 个百分点,但 Low-E 玻璃的造价比普通中空玻璃高很多。通过经济性计算,Low-E 膜 5+9A+5 玻璃的性价比最高,外窗构造  $M_{SIR}$  小于 0,说明外窗改造所创造的价值低于改造的成本,因此在整体节能率影响小的情况下,外窗适宜用最经济的镀膜 Low-E 膜 5+9A+5 玻璃。

表 2 外窗类型对建筑能耗的影响

Tab. 2 Influence of exterior window type on building energy consumption

外窗玻璃类型	热负荷指标/ ( $kWh \cdot m^{-2}$ )	冷负荷指标/ ( $kWh \cdot m^{-2}$ )	总负荷指标/ ( $kWh \cdot m^{-2}$ )	节能率/%	连工带料计/ (元· $m^{-2}$ )	每年节约电 费/元	$M_{SIR}$
中空 5+9A+5	133.00	17.35	150.25	2.09%	379	243.96	-0.67
中空 6+6A+6	133.50	17.32	150.82	1.78%	379	207.64	-0.72
中空 6+9A+6	132.96	17.35	150.31	2.11%	384	246.24	-0.68
中空 6+12A+6	132.63	17.37	150.00	2.31%	389	269.84	-0.65
Low-E 膜 5+9A+5	132.18	17.21	149.39	2.71%	424	316.33	-0.63
Low-E 膜 6+6A+6	133.08	17.16	150.25	2.15%	439	251.12	-0.71
Low-E 膜 6+9A+6	132.16	17.21	149.37	2.72%	449	317.32	-0.65

## 2.4 窗墙比

关中地区太阳能资源丰富,调整窗墙比是利用太阳能资源最直接的方式,建筑南北向受太阳辐射程度差异较大,需分别考虑南向窗墙比和北向窗墙比对建筑能耗的影响,能耗模拟以基准建筑模型为基础,仅改变基准建筑的窗墙比,模拟结果见图8。窗墙比的经济性无法直接计算,通过计算在外墙用60 mm厚EPS板、屋顶用40 mm厚EPS板、外窗使用普通中空5+9A+5玻璃的条件下窗墙比变化对总体经济性的影响来间接得出不同窗墙比的经济性,经济性计算结果见图9。

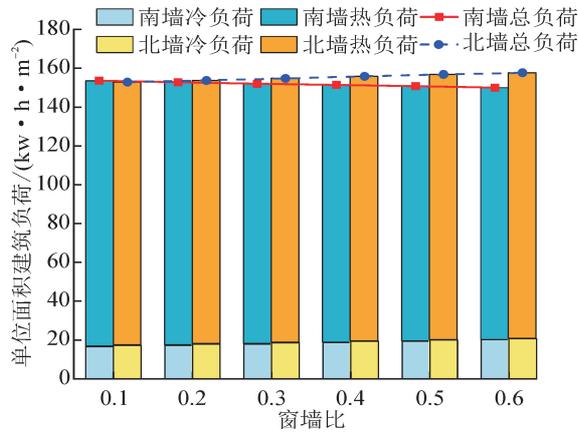


图8 窗墙比对建筑能耗的影响

Fig. 8 Influence of window-to-wall ratio on building energy consumption

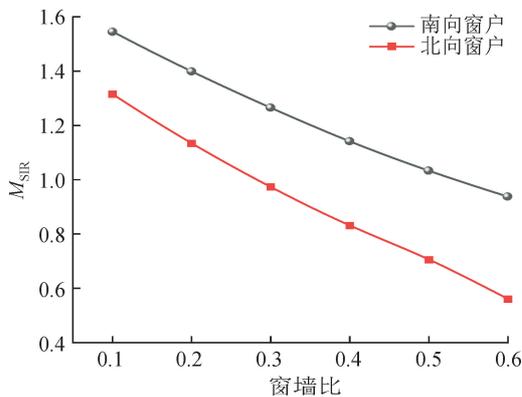


图9 不同窗墙比下的经济性

Fig. 9 Economy at different window-to-wall ratios

依据图8所示,南窗墙比为0.1时,民居单位面积热负荷为 $137.02 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ,冷负荷为 $16.54 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ;南窗墙比加到0.6,单位面积全年热负荷降低到 $128.28 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ,冷负荷增加到 $20.82 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。随着南向窗墙比增大建筑热负荷降低,冷负荷增加,总负荷比基准建筑节能为 $-0.01\% \sim 2.9\%$ ,南向窗墙比增大对降低冬季采暖能耗和建筑节能更有利,南向窗墙比应适当增大。随

着北向窗墙比的增大,建筑全年负荷增大,北向窗墙比为0.1,民居单位面积热负荷为 $135.52 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ,冷负荷为 $17.28 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ;北向窗墙比加到0.6,单位面积全年热负荷增大到 $137.08 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ,冷负荷增加到 $20.58 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。随着北向窗墙比增大建筑热负荷、冷负荷均增加,比原建筑节能 $0.49\% \sim -2.68\%$ ,南向窗墙比增大对降低冬季采暖能耗和建筑节能不利,北向窗墙比应尽量减小。结合图9,随着窗墙比的增大,全寿命周期投资效益比降低,当北向窗墙比为0.1时,建筑节能率最大同时最经济。

## 3 节能方案多因素耦合分析

建筑节能优化分析时,单一因素改变往往无法达到建筑节能要求,需要结合多因素共同考虑,且民居能耗的大小是多种影响因素共同作用的结果,考虑多种因素相互作用下的建筑能耗,相较于单因素分析,结果更准确。因此,取上述5个因素的较优节能方案进行能耗模拟正交实验,探究多因素组合对关中民居建筑负荷与经济性的影响,得到适宜关中民居的建筑节能方案。

### 3.1 多因素耦合正交实验

正交实验是一种基于正交数组的多因素实验设计方法,选取具有代表性的点均匀分布在测试范围内,能够代表整体情况,是一种高效、快速的实验方法<sup>[15]</sup>。

结合第2节单因素分析结果,对5个影响因素各取4个水平值进行组合,外墙选60 mm、80 mm厚EPS和XPS板,屋顶选40 mm、60 mm厚EPS和XPS板,外窗选中空5+9A+5、6+9A+6、6+12A+6、Low-E 6+9A+6四种玻璃,南向窗墙比取0.3~0.6,北向窗墙比取0.1~0.4。得到 $L_{16}$ 型( $5^4$ )正交实验表,16个不同节能优化方案实验结果见表3。

### 3.2 影响因素的主次分析及最优方案

对正交实验结果中5个影响因素的极差进行分析,结果见表4。

在设定条件下,极差 $R$ 越大,表明该因素改变对建筑能耗和投资收益比的影响越大。正交实验结果表明,各因素对建筑能耗敏感度大小关系为:外墙构造>屋顶构造>北窗墙比>外窗构造>南窗墙比;各因素对经济性影响敏感度大小关系为:北窗墙比>南窗墙比>屋顶构造>外墙构造>外窗构造。从敏感性大小分析得出,屋顶和外墙构造的改变对建筑节能性影响较大,对经济性影响较小。在窗墙比难以改变的既有民居中,节能策略可以从外墙热工性能与屋顶热工性能优化方面开展。

表3  $L_{16}(5^4)$ 正交实验结果  
Tab. 3  $L_{16}(5^4)$  orthogonal experimental results

编号	外墙保温	屋顶保温	外窗材料	南窗墙比	北窗墙比	单位面积全年总负荷	基准建筑节能率/%	$M_{SIR}$
1	60EPS	40EPS	5+9A+5	0.3	0.1	67.96	55.67	1.73
2	60EPS	60EPS	6+9A+6	0.4	0.2	65.37	57.35	1.44
3	60EPS	40XPS	6+12A+6	0.5	0.3	67.27	56.11	1.11
4	60EPS	60XPS	Low-E6+9A+6	0.6	0.4	63.00	58.90	0.96
5	80EPS	40EPS	6+9A+6	0.5	0.4	67.36	56.06	0.99
6	80EPS	60EPS	5+9A+5	0.6	0.3	61.89	59.62	1.10
7	80EPS	40XPS	Low-E6+9A+6	0.3	0.2	61.57	59.83	1.56
8	80EPS	60XPS	6+12A+6	0.4	0.1	57.42	62.54	1.64
9	60XPS	40EPS	6+12A+6	0.6	0.2	64.72	57.78	1.13
10	60XPS	60EPS	Low-E6+9A+6	0.5	0.1	59.11	61.44	1.48
11	60XPS	40XPS	5+9A+5	0.4	0.4	68.20	55.51	1.09
12	60XPS	60XPS	6+9A+6	0.3	0.3	63.55	58.54	1.42
13	80XPS	40EPS	Low-E6+9A+6	0.4	0.3	61.60	59.81	1.21
14	80XPS	60EPS	6+12A+6	0.3	0.4	61.66	59.77	1.20
15	80XPS	40XPS	6+9A+6	0.6	0.1	58.29	61.97	1.33
16	80XPS	60XPS	5+9A+5	0.5	0.2	57.17	62.70	1.34

表4 极差分析结果  
Tab. 4 Range analysis results

项	外墙保温	屋顶保温	外窗材料	南窗墙比	北窗墙比
$R$	6.22	5.13	2.49	1.71	4.36
建筑总负荷	最佳方案 80XPS	60XPS	Low-E6+9A+6	0.6	0.1
能耗敏感性	外墙>屋顶>北窗墙比>外窗>南窗墙比				
$R$	0.05	0.07	0.04	0.35	0.48
$M_{SIR}$	最佳方案 80EPS	60XPS	5+9A+5	0.3	0.1
经济敏感性	北窗墙比>南窗墙比>屋顶>外墙>外窗				

外墙选用 120 mm 厚 XPS 保温层、屋顶选用 60 mm 厚 XPS 保温层,外窗选用中空 6+9A+6 厚的 Low-E 玻璃、北向窗墙比 0.1、南向窗墙比 0.6,该组合下关中民居可以达到最佳节能状态。外墙选用 80 mm 厚 EPS 保温层、屋顶选用 60 mm 厚 XPS 保温层,外窗选用普通中空 5+9A+5 玻璃、北向窗墙比 0.1、南向窗墙比 0.3,该组合下关中民居改造方案最经济。最节能与最经济的方案定为节能方案

A 和 B,能耗模拟与经济性计算见表 5。由表 5,方案 A 号节能率为 65.5%,初始投资 41 299 元,投资回收期 5.64 年;方案 B 节能率为 61.98%,初始投资 32 744 元,投资回收期 4.47 年。方案 B 虽然节能性略低于方案 A,但投资回收期短,初始投资低,更容易被居民接受,因此认为该方案在关中民居节能改造中更可行。

表5 最节能与最经济方案对比  
Tab. 5 Comparison of the most energy efficient and the most economical schemes

编号	热负荷指标/ ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ )	冷负荷指标/ ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ )	总负荷/ ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ )	节能率/%	初始投资/元	静态投资回收期/元	$\rho_{NPV}/\text{元}$	$M_{SIR}$
A	42.10	10.79	52.88	65.50%	41 299	5.64	52 859	1.28
B	49.69	8.6	58.28	61.98%	32 744	4.47	61 057	1.86

### 3.3 最优方案效果分析

在最优节能方案 B 下,1 月 9 日至 1 月 10 日典型建筑无主动采暖设备主要功能房间温度变化曲线见图 10。对比无节能措施的建筑室内模拟温度,结果显示,改造后室内温度明显上升。仅依靠被动式节能措施,一层主要功能房间平均温度提高 2.32℃,二层主要功能房间平均温度提高 3.24℃,大大改善了民居建筑室内热舒适性。但仅依靠被动式策略,室内温度与舒适值还有一定差距,需采用主动取暖措施。由表 5,在主动取暖情况下,优化方案 B 相较于未采取优化措施的基准建筑全年可节能 61.98%,采暖热负荷降低 63.41%,夏季冷负荷降低 51.49%,节能效果较好。

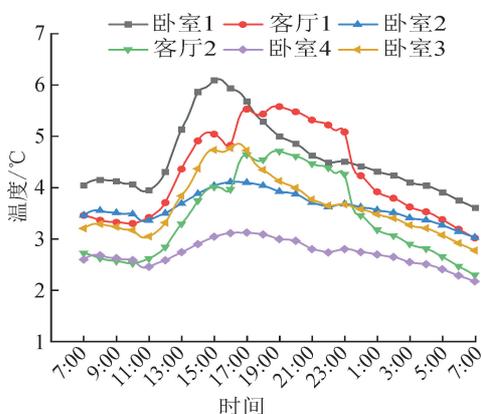


图 10 优化方案下的室内温度

Fig. 10 Indoor temperature in optimization plan

## 4 结论

为了获得适宜关中民居的建筑节能优化策略,本文通过测试调研分析关中地区民居现存问题,设计模拟对比实验,对影响关中民居建筑能耗的 5 大因素进行单因素定量分析与多因素耦合分析,主要结论见如下。

1) 外墙和屋顶保温层厚度越大,建筑能耗越低,中空玻璃的中空层越大,建筑能耗越低。80 mm 厚 EPS 板外墙优化中经济性最高,40 mm 厚 EPS 在屋顶优化中经济性最高,外窗用镀 Low-E 膜 5+9A+5 玻璃最经济。南向窗墙比增大,建筑能耗降低,有利于冬季节能,但不利于夏季节能。北向窗墙比减小建筑冬夏能耗均降低。经济性随窗墙比的增大而降低。

2) 在关中民居节能优化中,对建筑能耗影响最大的因素是外墙构造和屋顶构造,其次是北向窗墙比、外窗构造、南向窗墙比。对建筑节能优化经济性影响最大的因素是北向窗墙比和南向窗墙比,其次

是屋顶构造和外墙构造。对于关中地区既有民居,节能优化的重点应放在外墙热工性能与屋顶热工性能方面。

3) 综合节能性与经济性分析,关中民居最佳综合节能优化方案为:外墙增设 80 mm 厚 EPS 板、屋顶增设 60 mm 厚 XPS 板、外窗中空 5+9A+5 玻璃、北向窗墙比 0.1、南向窗墙比 0.3。在此方案下,关中典型民居节能 61.98%,冬季典型气象日室内平均温度上升 2.78℃,冬季热负荷降低 63.41%,夏季冷负荷降低 51.49%。

### 参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会. 2022 中国城乡建设领域碳排放系列研究报告[EB/OL]. (2022-12-29). [https://mp.weixin.qq.com/s/4bOBkXbp0kL\\_ldaLWyk48g?scene=25#wechat\\_redirect](https://mp.weixin.qq.com/s/4bOBkXbp0kL_ldaLWyk48g?scene=25#wechat_redirect).
- [2] 田宜水. 中国农村能源政策、现状评估和发展方向研究[J]. 中国能源, 2020, 42(5): 25-30.  
TIAN Yishui. Research on rural energy policy, current situation and development direction in China[J]. Energy of China, 2020, 42(5): 25-30.
- [3] ZHANG Lei, SANG Guochen, CUI Xiaoling, et al. Design optimization of rural building in dry-hot and dry-cold area using a back propagation (BP) neural network[J]. Energy and Buildings, 2022, 259: 111899.
- [4] 邹彬. 环洱海区域民居能耗分析及节能改造策略研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.  
ZOU Bin. Analysis of energy consumption and energy-saving renovation strategies of residential houses in the Erhai Rim[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [5] 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, 569.  
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, 569.
- [6] 黄志林. 青海河湟地区庄廓民居节能优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
HUANG Zhilin. Research on energy saving optimization of Zhuangkuo residential buildings in Hehuang region, Qinghai province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [7] 王楠玉. 关中地区农宅节能适应性研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
WANG Nanyu. Study on energy-saving adaptability of

- country house in Guanzhong area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [8] 陈璐瑶. 基于建筑形式的卫藏地区乡村住宅节能设计方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.  
CHEN Luyao. Energy saving design method of rural residence in U-Tsang area based on architectural form [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [9] 刘加平, 何知衡, 杨柳. 寒冷气候类型与建筑热工设计对策[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 309-314.  
LIU Jiaping, HE zhiheng, YANG Liu. Classification of China cold climate and the strategy in architectural thermal design[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 309-314.
- [10] 陈凯. 关中普通乡村住宅空间利用现状及其成因研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
CHEN Kai. Research on the current situation and causes of space utilization of ordinary rural residential buildings in Guanzhong[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [11] 王莹莹, 康文俊, 刘艳峰, 等. 基于居民行为模式的陕西村镇民居采暖策略[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3026-3031.  
WANG Yingying, KANG Wenjun, LIU Yanfeng, et al. A heating strategy for rural residential buildings based on behavior patterns of residents in Shaanxi Province[J]. ActaEnergiae Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3026-3031.
- [12] 范小娜, 朱轶韵, 桑国臣, 等. 基于不同功能房间的宁夏乡村民居冬季室内热舒适研究[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(2): 151-157.  
FAN Xiaona, ZHU Yiyun, SANG Guochen, et al. Research on indoor thermal comfort of Ningxia rural houses in winter based on different functional rooms [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(2): 151-157.
- [13] LI Baiyi, YOU Liyao, ZHENG Min, et al. Energy consumption pattern and indoor thermal environment of residential building in rural China[J]. Energy and Built Environment, 2020, 1(3): 327-336.
- [14] LI Zhu, WANG Binghua, SUN Yong. Multi-objective optimization for energy consumption, daylighting and thermal comfort performance of rural tourism buildings in north China[J]. Building and Environment, 2020, 176: 106841.
- [15] ZHU Jianjun, CHEW D A S, LÜ Sainan, et al. Optimization method for building envelope design to minimize carbon emissions of building operational energy consumption using orthogonal experimental design (OED)[J]. Habitat International, 2013, 37: 148-154.

(责任编辑 王绪迪)