西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·能源资源的绿色低碳转化与高效利用·

基于数值模拟的西安地区农村住宅低碳优化设计

甄　蒙[1],谢金珉[2],夏伟杰[3],卞广萌[4]

1. 陕西地建－西安交通大学 人居环境与建筑工程学院/西安交大土地工程与人居环境技术创新中心,陕西 西安　710049;
2. 西安交通大学 能源与动力工程学院,陕西 西安　710049;3. 河北建筑工程学院 建筑与艺术学院,河北 张家口　075000;
4. 天津大学 建筑学院,天津　300072

摘要　我国农村地区自建住宅的设计差异较大,且科学性相对欠缺。针对西安地区农村住宅能耗高的问题,本研究首先通过实地测试获取目标住宅的结构参数和热工性能数据,利用 Rhino 软件进行建模还原;接着,应用 Ladybug 和 Honeybee 插件模拟住宅运行时的能耗和碳排放情况,并从保温层等围护结构方面对建筑进行优化,最终对比优化前后的能耗情况。研究结果显示,目标住宅在运行阶段的能耗和碳排放量较高,但通过优化围护结构可以改善这一情况。如三月份采暖能耗从 1.66 kWh/m^2 降至 1.05 kWh/m^2,碳排放量从 1.52 kg CO_2e 降至 0.94 kg CO_2e;四月份采暖能耗从 0.30 kWh/m^2 降至 0.09 kWh/m^2,碳排放量从 0.27 kg CO_2e 降至 0.08 kg CO_2e。这表明数值模拟方法可以为降低住宅的碳排放和能耗提供更节能的解决方案,同时也为未来西安地区及相似气候区的农村自建住宅设计提供了有效的参考。

关键词　农村住宅;低碳住宅;数值模拟;建筑节能优化

中图分类号:TU241;TU201.5　　**DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-05-006

The low-carbon optimization design of rural residential buildings in Xi'an area based on numerical simulation

Zhen Meng[1], Xie Jinmin[2], Xia Weijie[3], Bian Guangmeng[4]

1. Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd. -Xi'an Jiaotong University, School of Human Settlements and Civil Engineering, Land Engineering and Human Settlements Technology Innovation Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Architecture and Art, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;
4. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract　In rural areas of China, the design of self-built houses varies significantly and lacks scientific rigor. To address the high energy consumption issues of rural residences in the Xi'an region, this study first conducted field tests to obtain structural parameters and thermal performance data of the target house, and then utilized Rhino soft-

收稿日期:2026-02-08　　修回日期:2026-03-26

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51808440);陕西地建－西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金(201912131-D10)。

第一作者:甄蒙,男,副教授,博士生导师,从事近零碳建筑、热舒适与健康、城市热岛效应及其缓解措施等研究,zhenmeng@xjtu.edu.cn。

通信作者:卞广萌,男,副教授,博士,从事乡村人居环境设计及空间优化、乡村旅游与乡村振兴等研究,bian_guangmeng81@tju.edu.cn。

ware for modeling. Next, the Ladybug and Honeybee plugins were applied to simulate the energy consumption and carbon emissions during the house's operation, followed by optimization of the building's envelope, including insulation layers, and a comparison of energy consumption before and after optimization. The results indicated that the energy consumption and carbon emissions of the target house during operation were relatively high. However, after optimizing the envelope structure, the heating energy consumption in March decreased from 1.66 kWh/m^2 to 1.05 kWh/m^2, and carbon emissions dropped from 1.52 kg CO_2e to 0.94 kg CO_2e. In April, heating energy consumption reduced from 0.30 kWh/m^2 to 0.09 kWh/m^2, and carbon emissions fell from 0.27 kg CO_2e to 0.08 kg CO_2e. The optimization significantly reduced the house's energy consumption and carbon emissions, providing effective strategies for future self-built house designs in Xi'an and similar climate zones.

Keywords rural residence; low-carbon housing; numerical simulation; building energy-saving optimization

建筑行业作为能源消耗和碳排放的主要来源,其低碳化问题亟待解决,这与中国当前推进的生态文明战略和节能减排目标高度契合。随着经济的快速发展,中国的现代化进程大幅提升,但随之而来的能源和环境问题日益凸显[1]。建筑行业已成为全国碳排放和能源消耗的重要组成部分,需要在国家"双碳"目标(2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和)中承担关键角色[2]。据统计,自 2021 年以来,中国的建筑总面积约为 678 亿 m^2,其中农村住宅建筑面积约为 230 亿 m^2,占总量的三分之一[3]。建筑总能耗达到 11.1 亿 t 标准煤,占全国总能耗的 21%[4]。特别是在农村地区,住宅能源使用方式较为粗放,导致了严重的能源浪费,与可持续发展理念背道而驰[5]。因此,推动农村地区的低碳建筑发展势在必行。

近年来,随着环保意识的普及和太阳能光伏、光热等技术日趋成熟,学者们对低碳建筑的研究也更加深入。许多学者使用实地调研、软件模拟的方法对住宅的室内热舒适情况、能耗以及碳排放进行实地测量和模拟计算,再通过现代建筑方法对住宅进行优化设计,对各地住宅的改建或新建提出优化策略[6-7]。例如,Liu 等人在青藏高原上建造了一座配备集成供暖系统的低能耗建筑。通过现场测量和动态 TRNSYS 仿真对低能耗建筑的性能进行了定量评估。其研究发现,采暖季温湿度在 20 ℃以上,湿度在 40% 以上,符合规范的低能耗建筑标准[8]。Song 等人以吐鲁番的居民楼为例,提出了一种考虑热舒适性的生命周期优化框架,有利于提高干旱气候区居民低碳改造的积极性。通过利用深度神经网络(DNN)结合 NSGA-II,摆脱了传统机器学习模型预测准确率低的困境,提高决策分析的客观性和科学性[9]。Shao 等人采用适当的被动式设计策略,以期在热舒适性的前提下,为农村居民提供一种低能耗、低成本的设计模式。通过实地调查建立基准模型,并结合 EnergyPlus 仿真软件、MOBO 优化引擎和加权求和法,构建了优化过程[10]。Garriga 等人研究了西班牙巴塞罗那住宅社区实现碳中和的最佳改造解决方案。将最具成本效益的能源效率措施(EEM)应用于社区的所有建筑物,以减少其总体能源需求[11]。Pellegrino 等人提出并比较了低成本策略,以提高现有建筑存量的质量,特别关注印度普遍存在的住宅类型。使用 Energy Plus 软件模拟了这种特定局部建筑类型的动态能源模型,并通过将其与一些原始建筑进行比较验证[12]。

除了针对某个地区单个住宅的低碳优化研究,也有学者在宏观层面研究了大范围建筑的低碳优化方法。Langevin 等人在美国国家层面上,通过名为"Scout"的美国建筑能源可复制颗粒模型,利用电气化和高可再生能源渗透率等措施,得出相对于 2005 年的水平,二氧化碳排放量可以减少 72% ~78% 的结论[13]。Koo 等人开发一种综合多目标优化(iMOO)模型,用于建立 2020 年低碳情景,以实现韩国住宅建筑行业的国家碳减排目标(CERT)(27.0%)[14]。Cassen 等人使用了一种名为 IMACLIM-R 的 E3(环境 - 能源 - 经济)模型,允许整合城市形态、交通动态、环境政策和行为。在对整个欧盟(EU)的一系列当地低碳实验的研究的基础上,探讨了欧洲低碳转型的两种对比鲜明的程式化情景[15]。Li 研究了中国实施建筑节能政策在节能和温室气体减排方面的潜力,分析了关于长期能源需求和二氧化碳(CO_2)排放预测情景。直到 2030 年,与一切照旧(BAU)情景相比,建筑物的能源消耗可以减少 1 ~3亿 t 油当量(mtoe),这意味着在适当的制度框架内实施适当的能源政策,可以节省 6 ~7 亿 t

的二氧化碳排放[16]。

由此可见,目前的研究虽然在建筑舒适度、能耗与碳排放领域取得了一些进展,但仍存在以下不足:首先,大多数研究集中于城市地区,对农村住宅的低碳优化研究相对较少,尚未充分考虑农村地区的气候特性、能源使用模式以及居民生活习惯的复杂性。其次,现有研究方法多以传统的实地测量为主,缺乏结合现代智能算法和多目标优化模型的系统性研究。这些不足使得现有研究在应对复杂的农村建筑低碳化挑战时效果有限。

因此,本文针对西安地区农村住宅在结构无序、功能单一、热舒适性差、采暖成本高和碳排放量大等问题,采用了新型的研究方法和系统分析框架,致力于探索农村住宅的低碳优化路径。通过使用问卷调查、实测数据与动态模拟分析的方法,为优化农村居民的居住环境提供理论支撑。同时,本研究建立全年能耗预测模型,并在此基础上构建农村住宅的碳排放模型,全面评估减碳潜力。基于这些数据分析与模型计算结果,本文进一步提出农村住宅的节能减碳设计策略,为推动农村地区的绿色发展提供科学依据与实践参考。具体研究目标如下:

1) 从人居环境和建筑结构两个维度出发,通过问卷调查与实测数据分析,研究基于太阳能的农村住宅室内热舒适性,为提升热舒适度提供理论依据;

2) 建立农村住宅的全年能耗预测模型,基于实测与模拟数据,进行运行阶段的能耗分析,并通过回归分析提供数据支持,为碳排放模型构建奠定基础;

3) 构建农村住宅碳排放模型,结合能耗数据与碳排放因子,分析农村住宅的减碳潜力,并提出具有可操作性的节能减碳设计优化策略。

1 研究方法

1.1 研究对象

西安市位于半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 13.1 ℃,全年温度适中,雨热同期。春季干旱多风,夏季旱涝相间,秋季温凉湿润,冬季偏寒冷,雨雪较少、灰霾较多[17]。年平均降水天数为 107.4 d,降水主要集中在七月到九月,平均日照时数 2 077.1 ~ 1 845.1 h。光照资源较为充足,有利于太阳能光伏板的发电[18]。本研究对象隶属于西安市蓝田县代家寨村,经度 109.32°,纬度 34.15°;位于西安市以东偏南 2.5 km 的白鹿原上。代家寨村毗邻汤峪湖森林公园,受惠于汤峪旅游度假区带来的游客经济,整村情况良好,面貌干净整洁,风景优美,村民安居乐业。实地调研发现,代家寨村现有农村自建住宅在建筑层数、朝向、平面布局、砖混结构形式及屋顶光伏板布置等方面具有较高相似性,居民楼设计基本一致。因此,本研究在综合考虑建筑形态、围护结构、采光条件及使用功能的基础上,选取其中一户具有典型特征的民居作为研究对象,以反映该类农村住宅在热环境、能耗及碳排放方面的共性问题。

本研究所选取的住宅位于代家寨村北部(见图 1),宅基地周围有大片农田,光照良好。住宅坐北朝南,东、西侧紧邻邻户,北侧与邻栋住宅有一米之隔,南侧较为开阔,为主入口方向,紧邻主要交通干道。研究住宅为当前常见的砖混结构二层楼房,天台装有太阳能光伏板。住宅面积约为 220 m^2,二层南侧有阳台面积约 45 m^2,其他结构参数如表 1 所示。

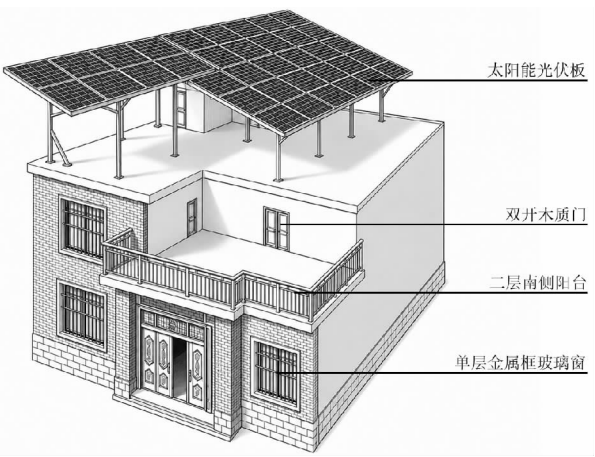


图 1 研究选取的住宅

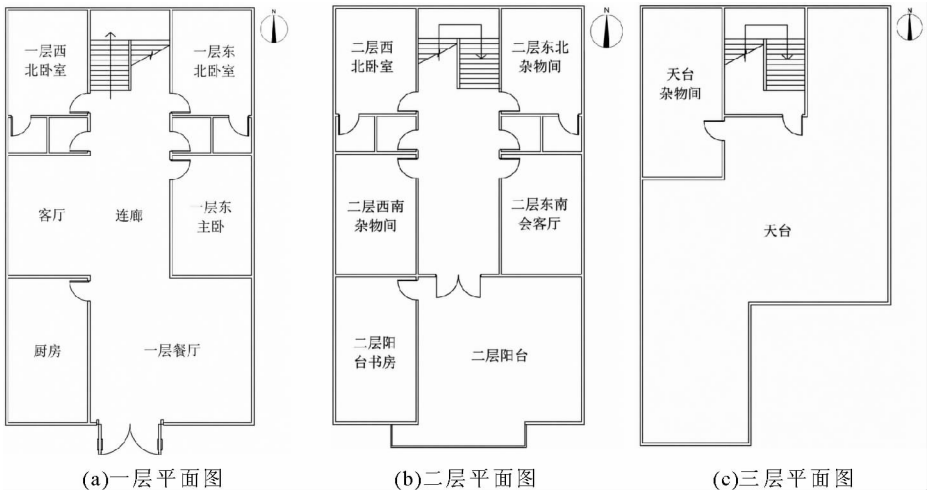
Fig. 1 Residences selected for the study

表 1 住宅建筑结构参数

Tab. 1 Structural parameters of residential buildings

结构	材质	规格
外墙	黏土砖	砖厚 370 mm
内墙	黏土砖	砖厚 240 mm
一层正大门	木材(双开)	高宽 2.7 m × 2.6 m
二层天台门	木材(双开)	高宽 2.7 m × 1.4 m
房间门	木材(单开)	高宽 2.0 m × 0.9 m
一层南侧窗户	金属框、单层玻璃	高宽 2.2 m × 2.4 m
楼梯窗户	金属框、单层玻璃	高宽 1.5 m × 1.2 m
其余窗户	金属框、单层玻璃	高宽 1.9 m × 2.4 m
楼梯	混凝土、木材	宽 3 m

该住宅的内部功能布置合理。一层西南角为厨房,厨房以东为餐厅。一层西侧为客厅,东侧为一个主卧,中间是一条较宽的走廊,东北、西北侧为两个次卧,并分别配置卫生间。楼梯间布置在两间卧室之间。二层南侧为阳台,并配置了阳台书房。二层西侧与东北角均设置了杂物间;东侧采光较好,设置了会客厅。楼梯间西侧为卧室,配有独立卫浴。三层则是由大面积的天台和附属杂物间组成(见图 2)。



(a)一层平面图　(b)二层平面图　(c)三层平面图

图 2　住宅平面

Fig. 2　Residential floor plan

1.2　研究流程

本研究采用实地测试与软件模拟的方法,将数值模拟与住宅实际热环境状况相结合对比,筛选出住宅最佳优化方案,为西安地区农村住宅的新建或改建提供参考和建议。实地测试所得的有效数据的时间跨度为 2024 年 3 月 13 日至 2024 年 4 月 2 日,彼时正值春分节气前后,西安春意渐浓,天气转暖。

研究首先对住宅的各房间进行实地测试,使用 GM1365 温湿度自动记录仪测量各房间热环境物理参数,以分析住宅在测量期间实地热环境情况。并在此期间,测量住宅结构数据,以便后续对住宅进行建模还原并模拟分析。

之后,通过模拟软件对住宅进行日照分析,得到住宅自然采光数据。通过对天台太阳能光伏板发电量监测、计算,得到住宅太阳能光伏板的发电情况。并使用 Ladybug + Honeybee 计算出住宅运行阶段的模拟能耗,结合碳排放因子模拟计算出住宅测试期间的碳排放量,综合分析出住宅在运行阶段的能耗和碳排放情况。最后优化住宅模型中的围护结构,综合模拟分析出住宅运行阶段关于能耗和碳排放的优解。整个研究流程如图 4 所示。

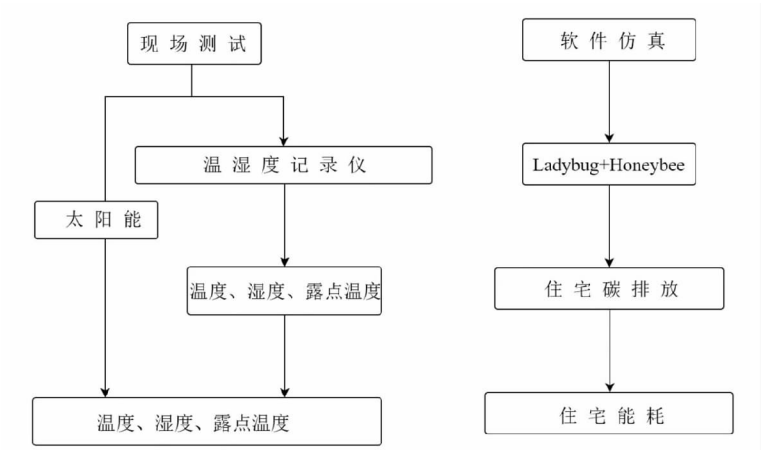


图 3　研究流程

Fig. 3　Flow of the study

1.2.1 实地测试

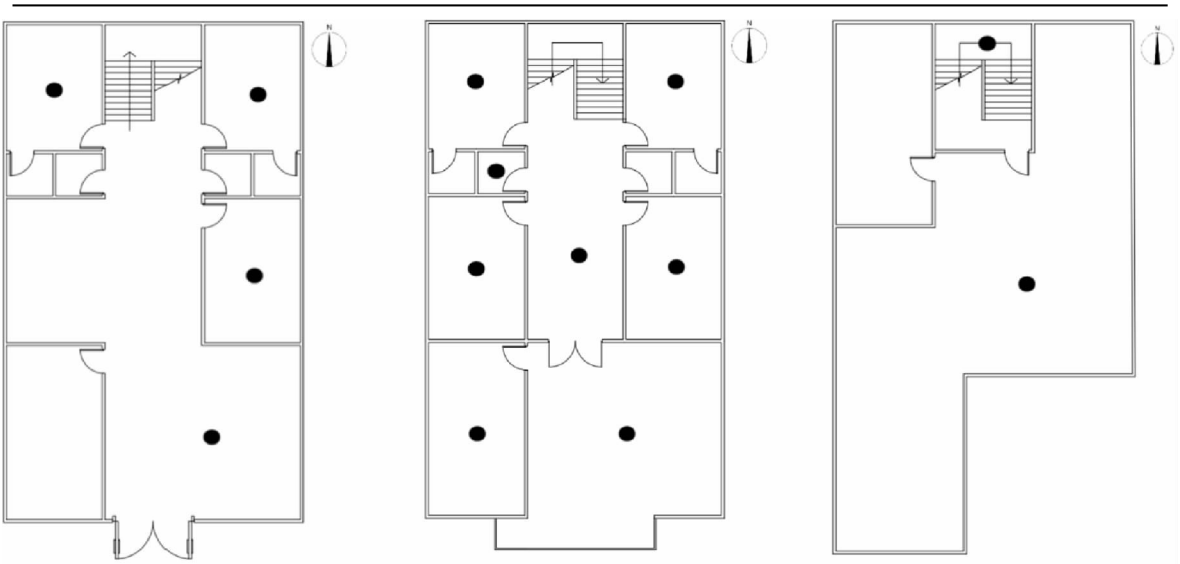
为得到研究住宅在 2024 年 3 月 13 日至 2024 年 4 月 3 日之间的热环境物理参数,研究者将 13 个 GM1365 温湿度自动记录仪(见表 2)布置于各功能房间与楼梯间(见图 4),将 1 个温度计布置在天台以得到室外热环境参数作为对照组。其中,位于室外的温度计固定在天台太阳能板下方,以监测太阳能板所暴露的环境热环境参数。测试期间 GM1365 温湿度自动记录仪每隔 10 min 自动收集并记录一次温度、湿度和露点温度。根据试验标准将温湿度记录仪布置于各功能房间的中央且阴凉的位置,室外的温湿度记录仪不作此要求,各记录仪放置高度为 1.5 m。为增加数据可信度,剔除 3 月 13 日和 4 月 3 日两天的数据;有效数据取自 2024 年 3 月 14 日 0 点至 2024 年 4 月 2 日 24 点,一共 19 d。测试期间,住户自然产生的生活活动不干扰温度计的记录,各功能房间在无住户居住活动的情况下门窗均为紧闭状态。通过上述流程得到各功能房间的热工性能相关数据。

与此同时,研究者会对住宅结构进行记录,使用激光测距仪、卷尺测量出住宅总体外观、内部各功能房间的长宽高等数据,激光测距仪的测量范围为 0 ~ 100 m,测试精度为 ±2 mm,卷尺的量程为 5 m。咨询相关技术人员得到建筑内墙、外墙的结构,将各数据利用 Rhino 软件对住宅进行建模还原,得到住宅的模型,便于下一步对住宅进行日照、能耗、碳排放等分析。

表 2 GM1365 温湿度自动记录仪参数

Tab. 2 GM1365 temperature and humidity automatic recorder parameters

测量参数	测量范围	测量分辨率	测量误差
温度	−30 ℃ ~80 ℃	±0.1 ℃	±0.2 ℃
湿度	0 ~100% RH	±0.1%	±0.2%
露点温度	−30 ℃ ~80 ℃	±0.1 ℃	±0.2 ℃



(a)一层测点 (b)二层测点 (c)三层测点

图 4 温湿度自动记录仪分布测点

Fig. 4 Temperature and humidity automatic recorder distribution measurement point

1.2.2 软件模拟

通过实地测试阶段对目标研究住宅结构的记录,利用 Rhino 软件对住宅进行建模还原。本研究应用 Ladybug + Honeybee 软件对目标研究住宅运行阶段的能耗和碳排放进行模拟计算。Ladybug + Honeybee 是基于 Rhino 和 Grasshopper 平台的插件(见图 5),它允许用户可视化和分析气象数据,进行建筑能源模拟和热舒适性分析,并能通过参数化编程的方式,调用多种算法实现耦合计算。Ladybug 可以生成多种图表,例如太阳路径图、风向图等,并可以进行几何学方面的研究,如辐射分析、阴影研究和视角分析等,可以用于环境信息化设计。Honeybee 是 Grasshopper 的仿真引擎的插件,可以用于建筑能源、暖通空调大小、热

舒适评价等模拟研究[18]。Ladybug + Honeybee 可以通过将住宅模型参数化,将住宅模型转化成数据模型,利用接口编程,对住宅模型设置不同参数,在同一住宅模型的基础上进行多方面优化,也可以通过调整住宅模型的参数,如门窗的长宽和材料等、墙体或者保温层的材料和厚度等建筑要素,对住宅进一步寻优设计。Ladybug + Honeybee 能够通过创建住宅模型,建立电池模型,设定建筑参数、气候数据对建筑进行能耗模拟计算,并结合相应的碳排放因子,对住宅的碳排放进行模拟计算。再以低碳节能为优化目标,从保温层等围护结构方面对建筑进行优化。

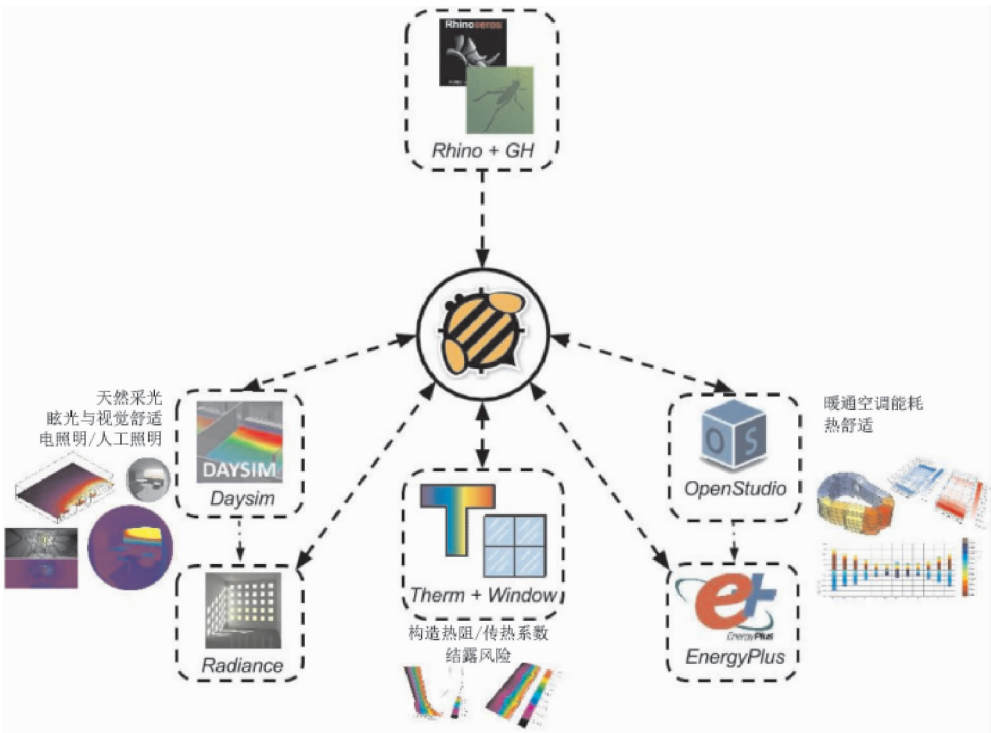


图 5　Ladybug + Honeybee 计算平台

Fig. 5　Ladybug + Honeybee Computing Platform

2　结果

2.1　实地测试结果

2.1.1　温度

研究者将所测得的温度数据按各功能房间的最高温度、平均温度、最低温度分类分析,将所有温度数据整合至表 3。并对比各功能房间测试期间(共 19 d)的温度变化,以及 2024 年 3 月 29 日(典型温度日期)全天的温度变化。值得一提的是,太阳能板下测点受太阳能板本身运行散热和天气影响较大,因此最高温度达到 49.1 ℃,最低温度为 4.3 ℃。这些数据反映了太阳能光伏板工作时的温度。

就温度而言,室外温差较大,记录的最高温度为 35.5 ℃,出现在 3 月 29 日,最低温度为 6.6 ℃,出现在 3 月 17 日,最大温差达到 28.9 ℃。由图 6(a)的日照模拟可以看出,由于住宅坐北朝南,东边西边均紧邻邻户,且北边与邻户仅有 1 m 间距,故大多数房间受阳光直射较少,采暖效果较差。例如,一层东北卧室测试期间记录最高温度仅为 17.3 ℃,一层东主卧最高温度为 17.2 ℃,二层西北卧室最高温度为 18.4 ℃。二层阳台书房、二层东南会客厅、二层阳台、楼梯间均是受遮挡较少、受光充足的测试地点,二层阳台书房记录最高温度为 34.3 ℃,二层东南会客厅最高温度为 28.2 ℃,这些功能房间易采热也易散热,由图 6(b)可以看出,白天温度相对较高的房间在夜间也和其他功能房间的温度相近,且测试期间记录的最低温度低于 10 ℃,故与其他功能房间的均温相差不大。由图 6(b)和表 3 可以看出,尽管有住宅围护结构的保护,住宅各功能房间的温度波动较小,但室内和室外的平均温度相差不大,所有功能房间的平均温度均处在 18 ℃以下。此温度是西安市冬季集中供暖房间内要求的最低温度,说明总体上目标研究住宅室内热舒适性欠佳。

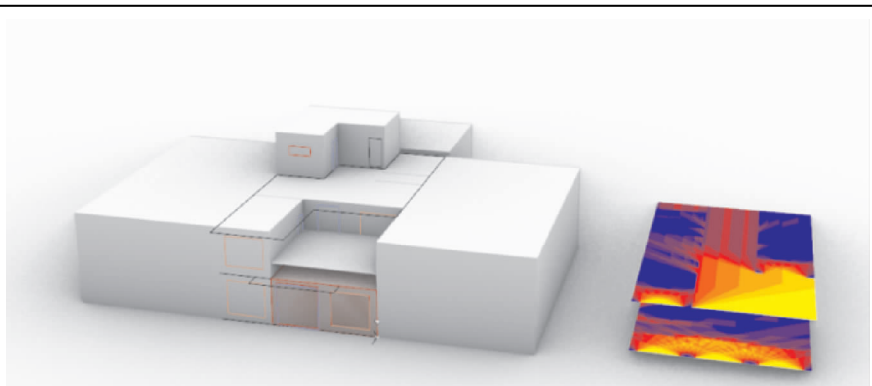
通过初步筛选,本研究选取 2024 年 3 月 29 日(西安天气晴,云量低)作为典型温度日期进行重点分析。图 6(c)将该日所有功能房间的温度数据变化进行对比。由于全天天气晴朗,故受阳光照射较少的一层东主卧、一层东北卧室、二层西卫生间等全天的温度较低,且因受到住宅围护结构的保护,这些功能房间的温度波动很小,全天温差大约为 2 ℃。楼梯间测点是最早出现最高温的位置,受日照位置影响,室外的记录仪 10: 30 左右开始快速升温,并在接近 12: 00 时到达最高温 34 ℃,随后温度开始下降。二层阳台书房有着充足的光照,其从早晨开始升温,并在 15: 30 左右到达最高温 34 ℃,由于有墙体等围护结构的保护,二层阳台书房降温较为缓慢。室外测点在 3 月 19 日这一天从早晨开始升温,18: 00 前快速升温,18: 30 左右到达最高温 35. 5 ℃,随后开始入夜、降温。其余功能房间的升温、降温趋势和室外测点相同,但具有一定的滞后性,且受光照较弱,最高温度也相对较低,温度波动也较小,这与对住宅的日照分析结果密切相关。

室内各功能房间的温度实地测试结果表明,目标研究住宅的室内热舒适度欠佳,围护结构的保温性较差,住宅关于热舒适方面的优化设计尚有提升空间。

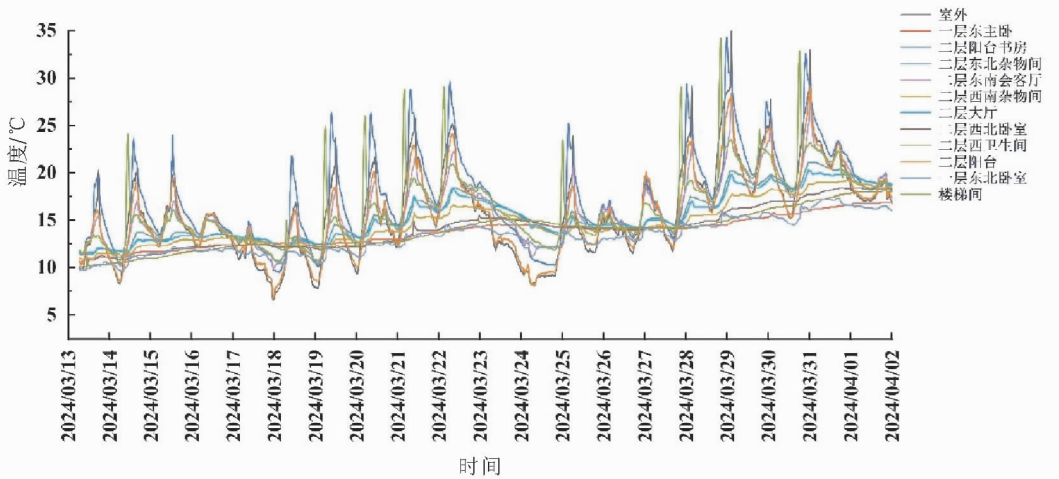
表 3 各功能房间实测温度数据

Tab. 3 Measured temperature for each functional room

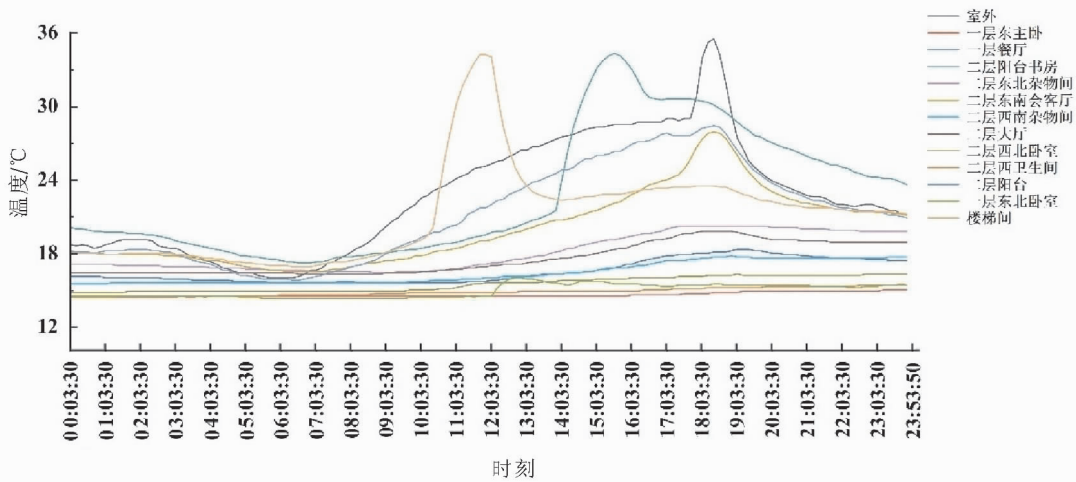
功能房间	最高温度/℃	平均温度/℃	最低温度/℃
室外	35. 5	15. 8	6. 6
一层东主卧	17. 2	13. 7	10. 6
一层餐厅	19. 4	15. 1	11. 9
二层阳台书房	34. 3	17. 2	9. 5
二层东北杂物间	21. 1	15. 5	11. 2
二层东南会客厅	28. 2	16. 0	9. 8
二层西南杂物间	19. 2	14. 6	10. 9
二层大厅	20. 3	15. 2	11. 5
二层西北卧室	18. 4	14. 1	10. 0
二层西卫生间	18. 1	13. 8	9. 6
二层阳台	29. 1	15. 6	6. 8
一层东北卧室	17. 3	13. 2	9. 6
天台太阳能板下	49. 1	17. 5	4. 3



(a)住宅光照模拟



(b)实地测试期间各房间温度变化趋势



(c)3月29日各房间温度变化趋势

图 6　实地测试中的各类温度数据

Fig. 6　Various types of temperature from field tests

2.1.2　相对湿度

通过监测发现,天台太阳能板下温湿度自动记录仪所测得相对湿度数据最大值为 93.7%,最小值为 11.8%。将实地测试所得各功能房间的相对湿度按照最大湿度、平均湿度、最小湿度分类对比,如表 4、图 7(a)所示。图 7(a)按照《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2022)[19] 规定的冬季室内相对湿度范围,作出了 30% 与 60% 的虚线,冬季室内相对湿度处于该范围内则符合上述标准。相对湿度的最大值出现在二层阳台,为 99%,最小值出现在室外这一测点,为 21.7%,二层阳台的相对湿度差最大为 75.6%,这可能是由于室外环境多变,这两个测点受自然天气影响较大,并缺乏住宅围护结构保护。受阳光直射较少的一层东主卧和一层东北卧室相对湿度的最大值分别为 74.0% 和 84.5%,最小值分别为 60.8% 和 61.5%,均大于上述标准规定的 60%,这说明采光较差的功能房间的室内湿度情况也欠佳,可能是由于目标研究住宅围护结构的气密性和隔湿性较差,导致室外的湿气入侵。一层东主卧和一层东北卧室的最大湿度差分别为 13.2% 和 23%,相比二层阳台和室外两个测点,这两个差值显著更小,这可能是因为相比于室外,室内各功能房间受到了围护结构的保护,使室内的湿度波动较小。由表 4 可知,尽管二层阳台书房和二层东南会客厅的相对湿度最大值分别为 77.1% 和 75.7%,最小值分别为 24.6% 和 38.7%,最大相对湿度差值分别为 52.5% 和 37%,但是由图 7(a)可知这两个功能房间在实地测试期间大部分时间的相对湿度均处于 30% ~60% 这一范围内,室内湿度情况

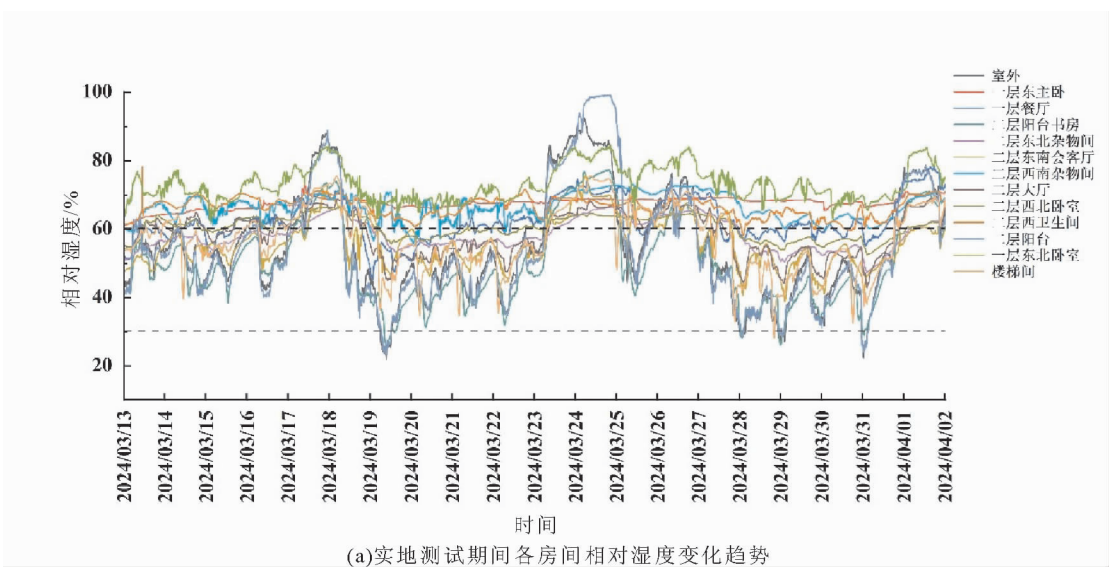
优于一层东主卧和一层东北卧室。二层阳台书房和二层东南会客厅室内湿度情况较好的原因可能是受光照效果较好,湿度差值较大的原因可能是这两个功能房间的围护结构较一层东主卧和一层东北卧室差一些。

图 7(b)可以看出,3 月 29 日这天室外、二层阳台书房、二层阳台等受光充足的测点相对湿度较低,但是全天的湿度波动较大,可能是由于这些测点缺乏住宅围护结构的保护或者围护结构的保护效果较差。一层东北卧室、一层东主卧、二层西卫生间、二层西南杂物间等受光较弱的功能房间的相对湿度较高,且均超出《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2022)[19]所规定 30% ~60% 这一范围,说明这些功能房间该日的室内湿度情况较差。尽管位于住宅的北部,但是住宅与北边邻居相隔一米,二层东北杂物间相较一层东主卧等房间受光照更充足一些,该日相对湿度最大值为 55%,最小值为 50%,相对稳定,且均处于上述标准所规定的 30% ~60% 这一范围,说明二层东北杂物间该日的室内湿度情况较好。

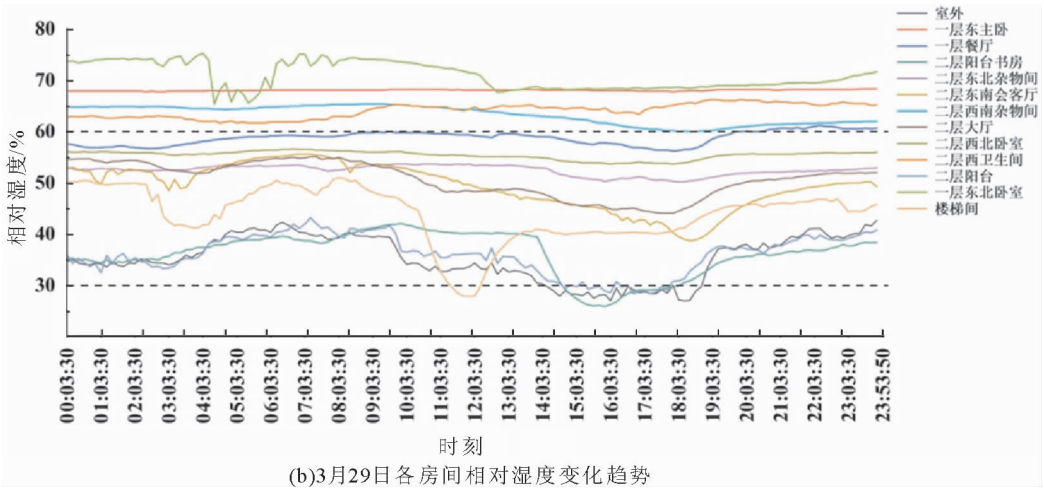
表 4 各功能房间实测相对湿度数据

Tab. 4 Measured relative humidity for each functional room

功能房间	最大湿度/%	平均湿度/%	最小湿度/%
室外	92. 4	54. 4	21. 7
一层东主卧	74. 0	67. 4	60. 8
一层餐厅	78. 4	62. 7	45. 1
二层阳台书房	77. 1	50. 1	24. 6
二层东北杂物间	66. 4	58. 2	47. 2
二层东南会客厅	75. 7	56. 1	38. 7
二层西南杂物间	72. 8	66. 3	55. 4
二层大厅	69. 5	58. 6	42. 7
二层西北卧室	66. 2	60. 4	52. 3
二层西卫生间	78. 0	66. 4	57. 9
二层阳台	99. 0	54. 2	23. 4
一层东北卧室	84. 5	73. 1	61. 5
天台太阳能板下	93. 7	50. 4	11. 8



(a)实地测试期间各房间相对湿度变化趋势



(b)3月29日各房间相对湿度变化趋势

图 7　实地测试中的各类相对湿度数据

Fig. 7　Various types of relative humidity from field tests

2.1.3　露点温度

本研究的露点温度测试结果如表 5、图 8 所示。

露点温度是指空气中的水蒸气达到饱和并开始凝结成液态水时的温度,它与人体的舒适度有关但非直接关系[20]。人体舒适度受多种气象因素影响,包括气温、湿度、风速等。露点温度通常与相对湿度有关,当相对湿度较高时,露点温度也会较高,相对湿度较低时,露点温度也会较低[21]。各测点温湿度记录仪所测得的露点温度均在 16 ℃以下。在所测湿度范围下,该露点温度处于人体舒适范围,不会令人体感到燥热。

总体而言,目标研究住宅的室内热舒适度欠佳。目前西安农村地区住宅的优化设计需要考虑对住宅围护结构进行优化,在增加室内热舒适度的前提下,降低住宅运行阶段的能耗和碳排放。

表 5　各功能房间实测露点温度数据

Tab. 5　Measured dew point temperature for each functional room

功能房间	最高露点温度/℃	平均露点温度/℃	最低露点温度/℃
室外	14.6	6.0	1.0
一层东主卧	12.3	7.2	2.3
一层餐厅	14.3	7.4	1.0
二层阳台书房	15.1	6.2	1.0
二层东北杂物间	11.6	6.6	1.0
二层东南会客厅	14.2	6.6	1.2
二层西南杂物间	13.1	7.8	2.2
二层大厅	13.0	6.4	1.0
二层西北卧室	10.8	6.0	1.0
二层西卫生间	12.7	7.1	1.4
二层阳台	14.5	5.9	1.0
一层东北卧室	13.3	7.9	2.8
天台太阳能板下	146	6.0	1.0

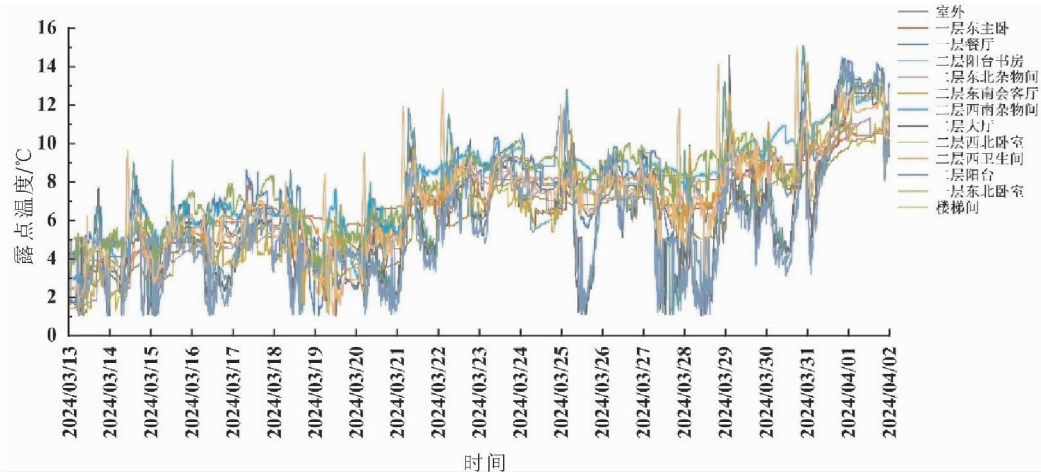


图 8 实地测试期间各房间露点温度变化趋势

Fig. 8 Dew point temperature trends in each room during the field tests

2.1.4 太阳能光伏板的发电量

研究选取的住宅天台装有正泰型号为 CHSM78M(DG)/F-BH Bifacial Series(182)的太阳能光伏板 56 块,额定功率为 580 ~598 W,发电效率为 20%,其机械规格如表 6 所示。

向村民了解得知,代家寨村各户楼顶的太阳能光伏板所产的电并不直接供给住户使用,而是输送回供电所。供电所或者太阳能光伏公司以租赁的形式获得户主天台的使用权,将太阳能光伏板安装在楼顶。据了解,每户村民每年得到的租赁费用是 35 元/块太阳能光伏板。该住宅户主每年可得到 56 × 35 = 1 960(元)的费用。

蓝田县年日照时长约为 2 000 h。经向户主了解,并通过太阳能光伏板参数计算,目标研究住宅天台太阳能光伏板每年发电量约为 56 × 580 × 2 000 × 0.2 × 0.8 = 10 393 600(Wh),约为 1 万 kWh。陕西省电网实行阶梯电价标准,即第一阶梯为 0 ~ 2 160 kWh,每度电 0.498 3 元,第二阶梯为 2 161 ~ 4 200 kWh,每度电 0.548 3 元,第三阶梯为≥4 201 kWh,每度电 0.798 3 元。即使算上电能运输损耗,该住宅天台太阳能光伏板每年的总发电量也能出售 5 000 元左右。

表 6 住宅太阳能光伏板机械规格

Tab. 6 Mechanical specifications for residential solar PV panels

Outer dimensions (L × W × H)(外部尺寸长 × 宽 × 高)	2 465 mm × 1 134 mm × 30 mm
Cell type(元件类型)	P type mono-crystalline(P 型单晶)
No. of cells(元件数量)	156(6 × 26)
Frame technology(框架技术)	Aluminum, silver anodized(铝、银阳极氧化)
Front/Back glass(前/后玻璃)	2.0 + 2.0(mm)
Cable length (Including connector)(电缆长度含连接器)	Portrait: (+)350 mm,(-)250 mm;Customized length(定制长度)
Cable diameter (IEC/UL)(电缆直径)	4 mm^2/12 AWG
Maximum mechanical test load(最大机械试验负荷)	5 400 Pa (front)/2 400 Pa (back)
Connector type (IEC/UL)(连接器类型)	HCB40 (Standard)/MC4-EVO2A (Optional) HCB40 标准/MC4-EVO2A 可选
Module weight(模块重量)	34.7 kg
Packing unit(组件)	36 pcs/box
Weight of packing unit (for 40′HQcontainer)(包装装置重量 40 集装箱)	1 304 kg
Modules per 40′ HQ container(每个 40 集装箱的模块)	576 pcs (Subject to sales contract)(576 件以销售合同为准)

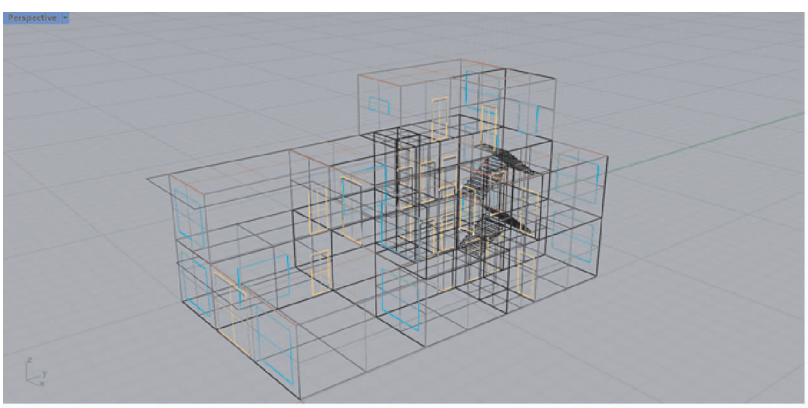
2.2　软件模拟结果

2.2.1　创建模型

前期对目标研究住宅实地测试阶段,利用激光测距仪和卷尺对住宅的平面结构,如住宅及各功能房间的长、宽以及楼高等数据进行了测量并绘制草图。利用 Rhino 软件对目标研究住宅进行建模,简单还原住宅外观及结构〔见图 9(a)〕。

通过 Grasshopper 将住宅的形态模型转化为由数据集组成的模型,同时将其参数化。对每个功能房间及其要素区分开后,利用 Honeybee 对墙体、门窗、地面、天花板、楼板等建筑要素进行自动识别,并查阅《民用建筑热工设计规范》(GB/T 50176—2016)给每类建筑要素设置其各种材料以及材料的厚度、导热率、密度、比热容[22]。比如窗户为单层玻璃窗,外墙为 20 mm 水泥砂浆加 370 mm 红砖加 20 mm 水泥砂浆,内墙为 20 mm 水泥砂浆加 240 mm 红砖加 20 mm 水泥砂浆,水泥砂浆导热率为 0.93 W/(m·K),密度为 1 800 kg/m^3,比热容为 1 050 J/(kg·K),红砖导热率为 0.81 W/(m·K),密度为 1 800 kg/m^3,比热容为 1 050 J/(kg·K)〔见图 9(b)〕。Honeybee 将闭合的各功能房间的 3D 形态模型转化为 Zone 模型,利用 EnergyPlus 对其边界界定并进行合并。通过编程对 Zone 模型的热区属性进行赋值,EnergyPlus 会匹配各 Zone 模型并生成 IDF 文件。

EnergyPlus 还提供了世界各地主要地区的 EPW 文件,即 EnergyPlus Weather Data File,EPW 文件包含了对应地区地理位置的详细气候信息,可以被 EnergyPlus 软件直接读取,用于进行建筑能效分析和模拟。再输入西安市的 EPW 文件后,EnergyPlus 能对模型添加西安市的地理位置信息和气候信息。



(a)住宅模型框架

(b)住宅外墙构造及材料

图 9　构建模型流程示意

Fig. 9　Schematic diagram of the modeling process

2.2.2 能耗模拟计算

Ladybug + Honeybee 以 EnergyPlus 为能耗计算内核,通过房间热平衡法进行能耗模拟计算,房间空气热平衡方程式[23]如公式(1)所示。

$$q_{add} = q_{CE} + q_{IV} + \sum q_{conv} + q_{VE} + q_{AC} \quad (1)$$

式中:q_{add} 为单位时间内房间空气中显热量的增量(W);q_{CE} 为来自照明、人体显热和设备显热等的对流散热量(W);q_{IV} 为空气渗透耗热量(W);$\sum q_{conv}$ 为室内空气与各壁面的对流换热量(W);q_{VE} 为室内通风换气交换的热量(W);q_{AC} 为空调系统显热除热量(W)。

单位时间内通过建筑围护结构的传热量方程式如公式(2) 所示。

$$q_H = \sum q_{Hi} = \sum \varepsilon_{qi} K_{mqi} F_{qi} (t_n - t_e) \quad (2)$$

式中:q_H 为单位时间内通过围护结构的传热量(W/m^2);t_n 为室内计算温度;ε_{qi} 为围护结构传热系数的修正系数;t_e 为采暖期室外平均温度(℃);K_{mqi} 为围护结构平均传热系数 $W/(m^2 \cdot K)$;F_{qi} 为围护结构的面积(m^2)。

在 Ladybug + Honeybee 中设置好各项参数后,将各数据接入电池组件接口,软件将根据前期设置的参数在 EnergyPlus 中进行能耗模拟计算,调用 EnergyPlus 计算内核。在运行模拟之前,检查此前 EnergyPlus 生成的 IDF 文件并确保所有必要的信息都已正确输入,没有遗漏或错误,并根据需要,配置输出变量以监控建筑的能耗和其他性能指标,EnergyPlus 通过 EP-Launch 界面或命令行启动模拟,加载包含建筑模型和模拟设置的 IDF 文件。

模拟运行期间,须关注 EnergyPlus 生成的日志文件即 ERR 文件,查看警告或报错信息。如果模拟过程中出现警告或报错信息,需要根据其中的提示进行调整和修正。由于模拟时间较长并且资源消耗较大,模拟运行期间,需监控计算机的 CPU 和内存使用情况,可能需要根据模拟运行情况调整模拟的时间步长或减少输出变量的数量。模拟过程中,出现了数次 EnergyPlus 运行中断的问题,需要重新启动模拟。

根据上述步骤,最终可以得到研究住宅的逐月模拟能耗(见图 10)。

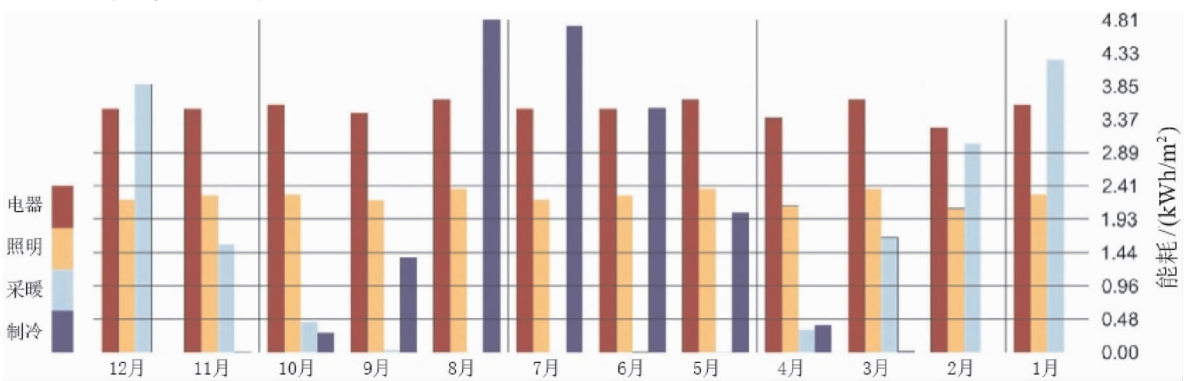


图 10 研究住宅的逐月模拟能耗

Fig. 10 Month-by-month simulated energy consumption of the study dwellings

建筑在运行阶段主要的能耗来源包括采暖、制冷、照明和其他家用电器等,全年各月的照明和其他家用电器的能耗接近,但研究主要针对目标研究住宅的热环境,故仅考虑建筑主体本体,暂不考虑照明能耗和其他家用电器能耗等。目标研究住宅全年采暖能耗当中一月份的采暖能耗最高,每平方米采暖能耗达到 4.20 kWh,其次是十二月份,每平方米采暖能耗为 3.80 kWh。这与一月份为全年的最冷月,十二月为全年的次冷月相关。实地测试期间西安市的气温已逐渐变暖,三月份的每平方米采暖能耗为 1.66 kWh,并且随着温度的升高,四月份的采暖能耗进一步降低,每平方米采暖能耗为 0.30 kWh。七八月是西安市最炎热的季节,八月份的制冷能耗最高,每平方米制冷能耗为 4.81 kWh,其次是七月份,每平方米制冷能耗为 4.70 kWh。实地测试期间,三月份的每平方米制冷能耗为 0.03 kWh,随着温度升高,四月份的每平方米制冷能耗已达到 0.37 kWh。全年采暖制冷总能耗为每平方米 32.14 kWh。目标研究住宅现行的运行阶段各月的能耗较高,尚有较大的低碳优化空间。

2.2.3　碳排放模拟计算

Ladybug + Honeybee 以 EnergyPlus 为能耗计算内核,通过房间热平衡法进行能耗模拟计算,房间空气热平衡方程式[24]如式(3)、式(4)所示。

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

$$E_i = \sum_{j=1}^{n}(E_{i,j} - ER_{i,j}) \tag{4}$$

式中:C_M 为建筑运行阶段单位建筑面积 CO_2 排放量(kg/m^2);E_i 为建筑第 i 类能源年消耗量(单位/a);EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子;$ER_{i,j}$ 为 j 类系统的第 i 类能源消耗量(单位/a);i 为建筑消耗终端能源类型,包括电力、燃气、石油等;j 为建筑用能系统类型,包括供暖空调、照明、生活热水系统等;C_p 为建筑绿地碳汇系统年减 CO_2 量(kg/a);y 为建筑设计寿命(a);A 为建筑面积(m^2)。

由于目标研究住宅大部分能耗来自采暖、制冷、照明和其他家用电器等,故研究将用电量转化为碳排放量,能够更直观地呈现目标研究住宅的能耗和碳排放量的关系[25],且研究主要针对目标研究住宅的建筑本体,暂不考虑照明能耗和其他家用电器能耗等带来的碳排放量,故计算的碳排放系数法简化为如式(5) 所示。

$$C_M = \frac{E_e \times EF_e}{A} \tag{5}$$

式中:C_M 为建筑运行阶段的总碳排放量;E_e 为运行阶段的建筑用电消耗量(kWh/a);EF_e 为电力能源的碳排放因子;A 为建筑面积(m^2)。

本研究使用的碳排放因子为 2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子,陕西省所属的西北区域电网的 CO_2 排放因子为 0.892 2 kg/kWh[23]。经计算,目标研究住宅一月份采暖带来的碳排放量为 3.75 kg CO_2e,十二月份采暖带来的碳排放量为 3.40 kg CO_2e。实地测试期间三月份采暖带来的碳排放量为 1.52 kg CO_2e,四月份采暖带来的碳排放量为 0.27 kg CO_2e。八月份制冷带来的碳排放量为 4.29 kg CO_2e, 其次是七月份制冷带来的碳排放量为 4.19 kg CO_2e。实地测试期间三月份制冷带来的碳排放量为 0.03 kg CO_2e, 四月份为 0.33 kg CO_2e。全年采暖制冷碳排放量为 28.68 kg CO_2e。

由此可见该住宅现运行阶段各月的碳排放量较高,有较大的低碳优化空间。

3　讨论

3.1　住宅优化设计

从先前研究中可以发现,住宅围护结构的材料对住宅室内热舒适情况有较大的影响,特别是保温层和窗户的材料选择[26]。

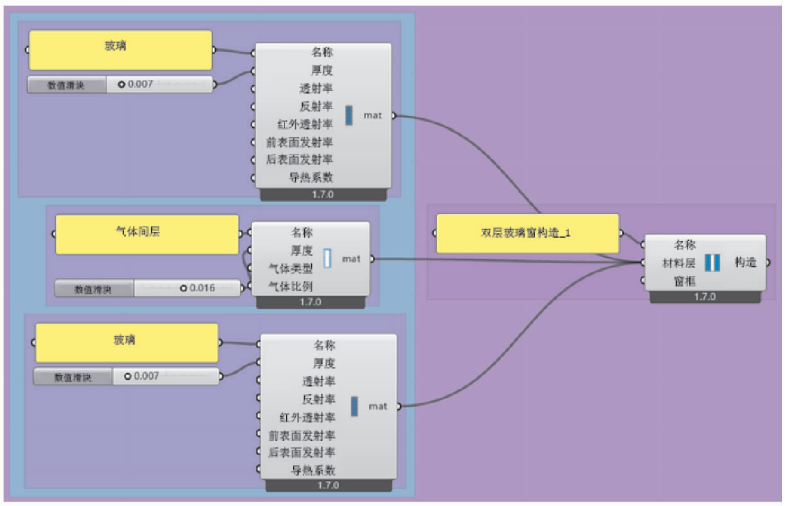
XPS 保温板是目前建筑领域常用的保温层材料,全称为挤塑聚苯乙烯泡沫保温板,XPS 保温板具有很低的导热系数,这是其能作为保温层材料的最基本特性。XPS 板的低导热系数主要得益于其闭孔结构,这种结构有效限制了热量通过空气对流和辐射的方式传递。XPS 质量较轻,并且 XPS 板在保持轻质的同时,还具有较高的抗压强度。这意味着它们不仅便于搬运和施工,而且能够在承受一定负荷的情况下保持结构稳定。XPS 板具有闭孔结构使得水分难以渗透,因此具有很好的防潮性能。这种特性对于防止水分侵入建筑结构非常重要,可以避免因潮湿引起的材料退化和霉菌生长。由于闭孔结构,XPS 板的吸水率极低,这有助于维持其隔热性能,因为吸水会降低材料的隔热效果。低吸水率也有助于防止因水分引起的膨胀和收缩,从而保持材料的尺寸稳定性。XPS 保温板还是一种环保型建材,其化学性能稳定,不挥发有害物质,对人体无害,故研究选择挤塑聚苯乙烯泡沫保温板(XPS)对住宅进行优化设计与能耗和碳排放模拟[27]〔见图 11(a)〕。

另外,窗户也是住宅重要的组成部分,合适的窗户可以在冬季对住宅形成有效的保护,减少冷风入侵,保证室内热舒适环境,减少住宅能耗[28]。单层玻璃窗户和双层玻璃窗户是目前两种常见的窗户类型,单层玻璃窗户由单片玻璃构成,玻璃两边直接与窗框接触。双层玻璃窗户由两片玻璃构成,中间通常有空气层或惰性气体填充,玻璃之间通过间隔条连接。单层玻璃窗户由于只有一层玻璃,隔热性能相对较差,双层玻璃窗户的隔热性能较好,中间的空气层或惰性气体可以有效减缓热量的传递。故单层玻璃窗户的节能效果相对双层玻璃窗户不佳,因为其不能很好地阻止热量的流失或进入。双层玻璃窗户由于其隔热和隔音的特性,有助于减少室内外热量交换,从而减少采热或制冷能耗。由于目标研究住宅所使用的窗户均为单层玻璃金属框窗户,故研究使用双层玻璃窗户进行能耗和碳排放模拟〔见图 11(b)〕。

经过与 XPS 保温板厂家沟通,考虑到施工难度等因素,厂家能提供 30 ~60 mm 厚度的 XPS 保温板,价格为 200 元/m^3,研究选择 30、40、50、60、70、80 mm 厚度的 XPS 保温板分别进行能耗模拟,选取最优的保温板厚度。



(a)挤塑聚苯乙烯泡沫保温板性质



(b)双层玻璃窗户性质

图 11 住宅围护结构的材料性质

Fig. 11 Material Properties of the Residential Envelope

3.2 优化住宅的能耗模拟

重新调用前期对研究住宅进行能耗模拟计算的 Ladybug + Honeybee,将各功能房间的外墙和外层窗户的材料电池进行修改。前期所设置的外墙和天花板材料为 20 mm 水泥砂浆加 370 mm 红砖加 20 mm 水泥砂浆,在此基础上添加一层 60 mm 的挤塑聚苯乙烯泡沫保温板,该 XPS 保温板的导热率为 0.04 W/(m · K),密度为 30 kg/m^3,比热容为 1 500 J/(kg · K)。此外,将住宅的外层窗户,由单层玻璃窗户更换为双层玻璃窗户,即两层玻璃之间增加一层 16 mm 厚度的空隙。随后,再次进行能耗模拟计算(见图 12)。

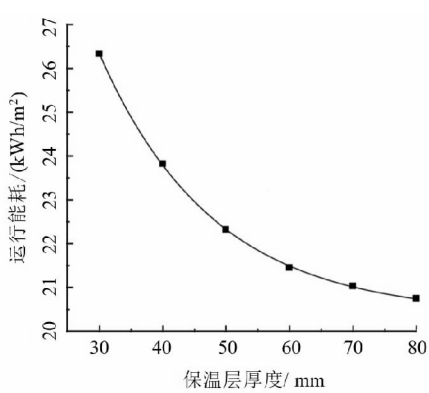


图 12 XPS 保温板不同厚度与住宅全年运行能耗的关系

Fig. 12 Relationship between thicknesses of XPS insulation boards and the annual operational energy consumption of the house

由图 12 可以看出,随着保温板厚度的增加,住宅全年运行阶段采暖制冷总能耗降低。但是随着厚度的进一步增加,总能耗降低幅度越来越小,保温层厚度和运行能耗大致呈现出一个凹函数的图形。增加的 XPS 保温板厚度为 50 mm 的建筑运行能耗为 22.32 kWh/m^2,XPS 保温板厚度为 60 mm 时运行能耗为 21.45 kWh/m^2,比 50 mm 时的能耗低了 3.90%,厚度为 70 mm 时能耗为 21.03 kWh/m^2,仅比 60 mm 时的能耗低了 1.96%,考虑到节能性与经济性,研究选择 60 mm 厚度的 XPS 保温板来对住宅进行低碳优化设计。

给外墙、天花板的材料增加 60 mm 厚度的 XPS 保温板,将外窗由单层玻璃窗户替换成双层玻璃窗户后,模拟住宅运行阶段能耗,最终,关于目标研究住宅优化后的逐月模拟能耗如图 13 所示。

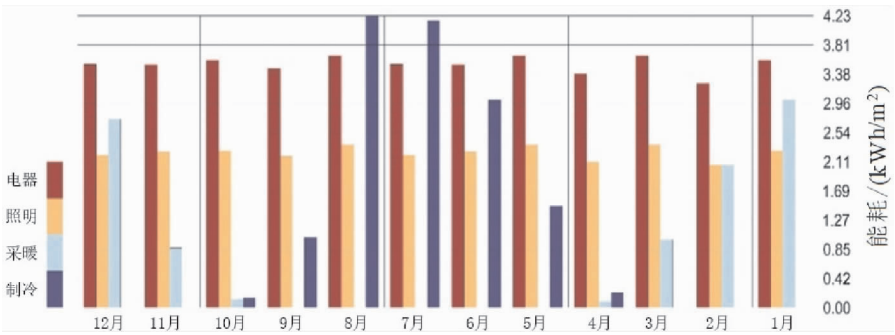


图 13　优化后住宅的逐月模拟能耗

Fig. 13　Month-by-month simulated energy consumption of optimized dwellings

优化后的目标研究住宅全年采暖能耗当中仍然是一月份的采暖能耗最高,但每平方米采暖能耗已降至 3.15 kWh,其次是十二月份,每平方米采暖能耗已降至 2.78 kWh。实地测试期间的三月份每平方米采暖能耗降至 1.05 kWh,四月份的每平方米采暖能耗降至 0.09 kWh。八月份的制冷能耗降至每平方米 4.23 kWh,七月份每平方米制冷能耗降至 4.15 kWh。实地测试期间的三月份的制冷能耗降至 0,四月份的每平方米制冷能耗降至 0.22 kWh(见表 7)。全年采暖制冷总能耗降至每平方米 21.45 kWh,全年降低每平方米 10.69 kWh 的能耗,降幅为 33.3%。目标研究住宅面积大约为 220 m^2,每年大约能减少 2 000 kWh 电,节省千余元的电费。模拟结果说明对外墙和天花板增加 60 mm 厚的 XPS 保温板,并将外层窗户由单层玻璃窗户优化成双层玻璃窗户,目标研究住宅运行阶段的能耗得到了显著的降低。

表 7　住宅优化前后逐月能耗对比

Tab. 7　Comparison of month-by-month energy consumption before and after residential optimization

时间	优化前采暖能耗 /(kWh/m^2)	优化后采暖能耗 /(kWh/m^2)	降低比例 /%	优化前制冷能耗 /(kWh/m^2)	优化后制冷能耗 /(kWh/m^2)	降低比例 /%
1 月	4.20	3.15	25.0	0	–	–
2 月	3.05	2.08	31.8	–	–	–
3 月	1.66	1.05	36.7	0.03	0	100.0
4 月	0.30	0.09	63.6	0.30	0.22	26.7
5 月	–	–	–	2.03	1.51	25.6
6 月	–	–	–	3.54	3.08	13.0
7 月	–	–	–	4.70	4.15	11.7
8 月	–	–	–	4.81	4.23	12.1
9 月	–	–	–	1.38	1.08	21.7
10 月	0.43	0.13	69.8	0.30	0.11	63.3
11 月	1.54	0.88	42.9	–	–	–
12 月	3.80	2.78	26.8	–	–	–
全年	14.98	10.16	32.2	17.09	14.38	15.9

3.3 优化住宅的碳排放计算

利用之前的碳排放系数法的计算公式,计算得优化后目标研究住宅的二氧化碳排放量。经计算,目标研究住宅一月份的采暖带来的碳排放量为 2.81 kg CO_2e,十二月份采暖带来的碳排放量为 2.48 kg CO_2e。实地测试期间的三月份采暖带来的碳排放量为 0.94 kg CO_2e,四月份的采暖带来的碳排放量为 0.08 kg CO_2e。八月份的制冷带来的碳排放量为 3.77 kg CO_2e,其次是七月份制冷能耗带来的碳排放量为 3.70 kg CO_2e。实地测试期间的四月份制冷能耗为 0.20 kg CO_2e(见表 8)。全年采暖制冷碳排放量降至 19.14 kg CO_2e。

对目标研究住宅的外墙和天花板添加 XPS 保温板、将外窗由单层玻璃窗户优化成双层玻璃窗户后,目标研究住宅的碳排放量得到了显著地降低。说明研究对住宅的低碳优化设计有效。

表 8 住宅优化前后逐月碳排放对比

Tab. 8 Comparison of monthly carbon emissions before and after residential optimization

	优化前采暖碳排放 /kg CO_2e	优化后采暖碳排放 /kg CO_2e	降低比例 /%	优化前制冷碳排放 /kg CO_2e	优化后制冷碳排放 /kg CO_2e	降低比例 /%
1 月	3.75	2.81	25.0	0	–	–
2 月	2.72	1.86	31.8	–	–	–
3 月	1.52	0.94	36.7	0.03	–	100.0
4 月	0.27	0.08	63.6	0.27	0.20	26.7
5 月	–	–	–	1.81	1.35	25.6
6 月	–	–	–	3.16	2.75	13.0
7 月	–	–	–	4.19	3.70	11.7
8 月	–	–	–	4.29	3.77	12.1
9 月	–	–	–	1.23	0.96	21.7
10 月	0.38	0.12	69.8	0.27	0.10	63.3
11 月	1.37	0.79	42.9	–	–	–
12 月	3.40	2.48	26.8	–	–	–
全年	13.37	9.06	32.2	15.25	12.83	15.9

4 结论

本研究针对西安地区农村住宅热舒适度差、采暖成本高、碳排放量大的现状问题,以西安市蓝田县汤峪镇代家寨村一户农村自建住宅为对象,采用数值模拟技术,优化了住宅的围护结构,并通过模拟验证了低碳优化设计的有效性。

1)通过实地测试与模拟分析发现,现有农村住宅运行阶段的采暖与制冷碳排放较高,但通过优化房间布局和提高采光利用率,能显著改善能效与热舒适度。例如,将高频率使用的房间集中于南侧,有助于降低采暖需求。并且,当下西安农村自建住宅安装太阳能板的住户不多,鼓励村民安装太阳能板,能够在节省能源的同时产生不菲的经济收益。

2)利用 Ladybug + Honeybee 软件模拟结果显示,优化后的方案显著降低了运行阶段的能耗与碳排放。如三月份采暖能耗从 1.66 kWh/m^2 降至 1.05 kWh/m^2,碳排放量从 1.52 kg CO_2e 降至 0.94 kg CO_2e;四月份采暖能耗从 0.30 kWh/m^2 降至 0.09 kWh/m^2,碳排放量从 0.27 kg CO_2e 降至 0.08 kg CO_2e。七月份制冷能耗从 4.70 kWh/m^2 降至 4.15 kWh/m^2,碳排放量从 4.19 kg CO_2e 降至 3.70 kg CO_2e;八月份制冷能耗从 4.81 kWh/m^2 降至 4.23 kWh/m^2,碳排放量从 4.29 kg

CO_2e 降至 3.77 kg CO_2e。全年采暖制冷总能耗为 21.45 kWh/m^2,排放量为 19.14 kg CO_2e,降幅为 33.3%。

3)研究表明,数值模拟不仅是一种有效的分析手段,更为绿色住宅设计提供了可行的优化路径。通过增加保温层及更换双层玻璃窗等围护结构优化手段,减少了住宅在采暖与制冷方面的碳排放。此优化策略可为西安及类似气候区的农村住宅改建或新建提供参考方案。

诚然,本研究还存在一些不足之处。

1)本研究仅选取一户典型农村自建住宅作为研究对象,样本量相对有限。虽然调研区域内居民楼在建筑层数、朝向、结构形式、空间布局和屋顶光伏板布置等方面具有较高相似性,所选住宅能够反映该类民居的基本特征,但不同住户的使用习惯、围护结构维护状况和室内设备使用方式仍可能对能耗与碳排放结果产生影响。后续研究应进一步扩大样本范围,选取不同建造年代、不同朝向和不同使用状态的农村住宅进行对比分析,以增强研究结论的普适性。

2)本研究主要围绕外墙保温、屋面保温和外窗形式等围护结构优化措施展开模拟,低碳优化策略的类型仍相对有限。除围护结构改造外,阳光间、遮阳构件、自然通风组织、被动式太阳能利用等措施也可能对农村住宅能耗和碳排放产生影响[29-30]。未来可在现有模拟框架基础上,进一步比较不同低碳改造措施及其组合方案的节能减碳效果,从而形成更加系统的农村住宅低碳优化策略。

3)本研究主要从能耗和碳排放角度评价优化效果,对实际改造过程中的经济成本、施工可行性、住户接受度以及地方生活习惯等因素考虑仍不充分。未来研究应结合住户实际需求、当地住宅建造传统、居民生活习俗和市场材料价格等因素,进一步开展低碳改造方案的综合评价,使研究结果更好地服务于西安及相似气候区农村住宅的新建与改造实践。

未来,随着低碳建筑材料的发展,低碳建筑还有很大的发展空间。除了现有的低碳设计方法,研究者可以探索更多创新的技术和策略,例如智能家居系统、可再生能源的集成(如太阳能、风能等),以及绿色屋顶和垂直花园等设计,进一步降低住宅能耗和碳排放。也可以深入分析住户的实际需求和行为模式,探讨如何通过设计和技术干预来促进低碳生活方式的形成。例如,研究家庭用电习惯与节能设备的结合,以提高低碳居住的实际效果。

参考文献

[1] Nematchoua M K, Sadeghi M, Reiter S. Strategies and scenarios to reduce energy consumption and CO_2 emission in the urban, rural and sustainable neighbourhoods[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 103053.

[2] Hong L X, Zhou N, Feng W, et al. Building stock dynamics and its impacts on materials and energy demand in China[J]. Energy Policy, 2016, 94: 47-55.

[3] Jiang Y, Hu S, Liu X H, et al. China's building energy use and GHG emissions[M]//Decarbonize Public and Commercial Buildings: China Building Energy and Emission Yearbook 2022. Singapore: Springer, 2022: 3-43.

[4] Jia X P, Zhang Y M, Tan R R, et al. Multi-objective energy planning for China's dual carbon goals[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 34: 552-564.

[5] Yang X J, Hu H J, Tan T W, et al. China's renewable energy goals by 2050[J]. Environmental Development, 2016, 20: 83-90.

[6] Delzendeh E, Wu S, Lee A, et al. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1061-1071.

[7] Almindeel T, Spentzou E, Eftekhari M. Energy, thermal comfort, and indoor air quality: Multi-objective optimization review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 202: 114682.

[8] Liu Z J, Wu D, Liu Y W, et al. Performance and feasibility study of low energy building for pleasant indoor comfort: A case study on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101691.

[9] Song J K, Wang W J, Ni P G, et al. Framework on low-carbon retrofit of rural residential buildings in arid areas of northwest China: A case study of Turpan residential buildings[C]//Proceedings of Building Simulation. Cham: Springer, 2023.

[10] Shao T, Zheng W X, Cheng Z. Passive energy-saving optimal design for rural residences of Hanzhong region in northwest China based on performance simulation and optimization algorithm[J]. Buildings, 2021, 11(9): 421.

[11] Garriga S M, Dabbagh M, Krarti M. Optimal carbon-

neutral retrofit of residential communities in Barcelona, Spain [J]. Energy and Buildings, 2020, 208: 109651.

[12] Pellegrino M, Simonetti M, Chiesa G. Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings: Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions[J]. Energy and Buildings, 2016, 113: 145-158.

[13] Langevin J, Harris C B, Reyna J L. Assessing the potential to reduce US building CO_2 emissions 80% by 2050[J]. Joule, 2019, 3(10): 2403-2424.

[14] Koo C, Hong T, Kim J, et al. An integrated multi-objective optimization model for establishing the low-carbon scenario 2020 to achieve the national carbon emissions reduction target for residential buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 410-425.

[15] Cassen C, Hamdi-chérif M, Cotella G, et al. Low carbon scenarios for Europe: An evaluation of upscaling low carbon experiments[J]. Sustainability, 2018, 10(3): 848.

[16] Li J. Towards a low-carbon future in China's building sector: A review of energy and climate models forecast [J]. Energy Policy, 2008, 36(5): 1736-1747.

[17] Peel M C, Finlayson B L, Mcmahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(5): 1633-1644.

[18] Berger C. Approaches to occupant-centric building performance computing [D]. Vienna: Technische Universität Wien, 2021.

[19] GB/T 18883—2022 室内空气质量标准[S].

[20] Sarkar M. A new theoretical formulation of dew point temperatures applicable for comfort air-cooling systems [J]. Energy and Buildings, 2015, 86: 243-256.

[21] Lawrence M G. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(2): 225-234.

[22] GB 50176—2016 民用建筑热工设计规范[S].

[23] Han Y C, Zhou Z N, Li W W, et al. Exploring building component thermal storage performance for optimizing indoor thermal environment: A case study in Beijing[J]. Energy and Buildings, 2024, 304: 113834.

[24] GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S].

[25] Pan W T, Mei H Y. A design strategy for energy-efficient rural houses in severe cold regions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(18): 6481.

[26] Elghamry R, Hassan H. Impact of window parameters on the building envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment[J]. International Journal of Ventilation, 2020, 19(4): 233-259.

[27] Yang Y, Chen S. Thermal insulation solutions for opaque envelope of low-energy buildings: A systematic review of methods and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112738.

[28] Wang F, Yang W J, Sun W F. Heat transfer and energy consumption of passive house in a severely cold area: Simulation analyses[J]. Energies, 2020, 13(3): 626.

[29] Liu Q. Optimization design of solar-assisted heating for typical rural houses in northern China[J]. Renewable Energy, 2020, 38(4): 447-452.

[30] Liu C P, Xu W, Li A G, et al. Analysis and optimization of load matching in photovoltaic systems for zero energy buildings in different climate zones of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 238: 117914.

(编 辑 张 欢)