DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.016

拉萨新建多层住宅室内热环境测试与影响因素分析

李冰倩, 张晓静, 王禹晗, 徐 鑫, 谢静超, 陈 光

(北京工业大学 绿色建筑环境与节能技术北京重点实验室,北京 100124)

摘要: 为研究太阳能富集区新建多层民居的室内热环境水平及影响因素,本文选取拉萨市代表住宅开展了环境测试,对比分析不同朝向外窗热工设计、被动式太阳能利用技术以及外墙平衡保温等措施对室内热环境的影响。测试期间,室外平均温度为6.9 ℃,室外综合温度平均值南向较北向高6.3 ℃。由于室外综合温度的朝向差异,室内温度场分布不均匀,南北向房间平均室温最大相差5.7 ℃;外墙采用平衡保温设计导致各朝向外墙失热量不同,北外墙最多;采用双层中空玻璃的北外窗内表面平均温度和波幅最小;太阳能直接受益式房间的室温波动较大,最大为9.5 ℃,与之相比通过南向阳光间间接受益的房间室温日较差仅为2.4 ℃,体现了南向阳光间稳定相邻房间室温的作用。为提高拉萨地区新建住宅室内环境均匀性和稳定性,建议采用非平衡保温,设置附加阳光间。

关键词: 太阳能富集地区; 多层民居; 阳光间; 室内热环境

中图分类号: TU111 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0617-08

Measurement and influencing factor analysis of indoor thermal environment for new multi-storey residential buildings in Lhasa

LI Bingqian, *ZHANG Xiaojing*, *WANG Yuhan*, *XU Xin*, *XIE Jingchao*, *CHEN Guang*

(Beijing Key Laboratory of Green Built Environment and Energy Efficient Technology, Beijing University of Technology, Beijing 10012, China)

Abstract: To investigate the indoor thermal environment level and its influencing factors in newly built multi-story residential buildings in solar-rich areas, this study selected a representative residential building in Lhasa for environmental testing, and comparatively analyzed the effects of different orientation-specific thermal design of external windows, passive solar utilization technologies, and balanced insulation of external walls on the indoor thermal environment. During the test period, the average outdoor temperature was 6.9 ℃, and the average outdoor comprehensive temperature for south-facing orientations was 6.3 ℃ higher than that for north-facing orientations. Due to the orientation difference in outdoor comprehensive temperature, the indoor temperature field was unevenly distributed, with a maximum average room temperature difference of 5.7 ℃ between south- and north-facing rooms. The use of balanced insulation design for external walls led to different heat losses through walls of different orientations, with the north-facing wall losing the most heat. The north-facing external window with double-glazing showed the lowest average inner surface temperature and the smallest temperature fluctuation. The room with direct solar gain experienced large indoor temperature fluctuations, up to 9.5 ℃. In contrast, the room indirectly benefiting from a south-facing sunspace had a diurnal temperature range of only 2.4 ℃, demonstrating the effect of the south-facing sunspace in stabilizing the room temperature of adjacent spaces. To improve the uniformity and stability of the indoor environment in newly built residential buildings in Lhasa, it is recommended to adopt unbalanced insulation and to install an attached sunspace.

Key words: solar energy-rich region; multi-story residential buildings; sunspace; indoor thermal environment

拉萨市位于青藏高原中部,北纬29°40′、东经 91°10′,四面环山,平均海拔3 650 m[1],依照我国

收稿日期: 2024-07-09 **修回日期**: 2026-05-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802702)

第一作者: 李冰倩(2001—),女,硕士生,主要从事建筑热工方面的研究。E-mail:libingqian@emails.bjut.edu.cn

通信作者: 张晓静(1989—),女,副教授,硕士生导师,主要从事热舒适与室内环境营造、建筑气象数据与节能策略等研究。E-mail:xjzhanger@bjut.edu.cn

《民用建筑热工设计规范》GB 50176—2016 属于寒冷 A 区,其年平均气温为 7.8 ℃,最热月(7 月)的平均温度为 15.5 ℃,最冷月(1 月)的平均温度为 −1.6 ℃[2]。由于紧邻喜马拉雅山脉,受到下沉冷气流的影响,拉萨市建筑采暖期长。同时青藏高原地区常规能源匮乏,而太阳能资源丰富,年日照时数达 3 000 h 以上,年总太阳辐射高达 7.2 GJ/m^2[3-5],因此适宜采用被动式太阳能利用技术进行采暖[6]。

目前,针对在藏区民居室内环境实测和模拟研究已有充分基础,大多关注的是低层民居室内热环境状况及其影响因素,如建筑外围护结构和室内空间组织形式等。王芳等[7]选取迪庆藏区典型阳光间围合方式的农宅为研究对象,通过环境测试和软件模拟对当地一层农宅阳光间的围合方式提出了优化措施。索朗白姆等[8]通过对拉萨市传统二层民居进行测绘和室内热环境测试,从建筑朝向、建筑形式、建筑功能和建筑空间等方面对拉萨市传统民居建筑的气候适应性进行研究,得出建筑南向宜采用双层透明玻璃,北向宜采用双层 Low-e 玻璃的结论。黄凌江等[9]从拉萨乡村传统民居与新式民居冬季室内热工性能的角度,对相互毗邻的一栋二层传统民居与一栋二层新式民居进行室内热环境测试,结果发现新式民居在冬季具有比传统民居更高的室内空气温度,但仍未达到室内热舒适标准,在热工性能上,新式民居外围护结构失热较为严重,增强其保温性能是进一步提升室内热环境的重要途径。冯雅等[10]对拉萨两栋四层被动式太阳能办公建筑冬季室内热环境进行了现场测试,并研究了外墙保温性能、外窗热工性能及建筑窗墙面积比对被动式太阳能建筑的影响,建议应加强建筑的集热与蓄热及夜间的保温,外墙传热系数应小于 1.0 W/(m^2·K),外窗传热系数应小于 3.2 W/(m^2·K),同时增大围护结构的热惰性,以有效地控制室内温度波动,提高室内热稳定性和热舒适度。成辉等[11]选取四户不同空间形态和模式的一、二、四和九层民居,对其室内外空气温、湿度及壁面温度进行定量实测和分析,并结合 Design Builder 软件进行模拟验证对其进行实测和模拟,研究建筑空间模式与室内热环境的关系,发现直接受益式房间的进深越小,温度越高,当房间位于东南侧时,该现象尤其明显。

相比之下,针对拉萨市区的现代多层(4~6 层)住宅建筑的探讨尚不多见。然而,此类建筑日益增多,根据拉萨市统计局统计,2022 年全市房地产开发仍以住宅为主,并且新建住宅工程呈现层数增多而单户面积减小的趋势[12]。建筑空间布局和围护结构热工设计直接影响室内热环境和供暖负荷[20-22]。为此,本文选取拉萨市一栋新建多层住宅建筑,调研了围护结构热工性能,分析了室内热环境的特征,测试了南向阳光间和直接受益窗等被动式太阳能利用技术的应用效果。研究结果可为拉萨地区多层民居建筑的围护结构设计及室内热环境营造提供参考。

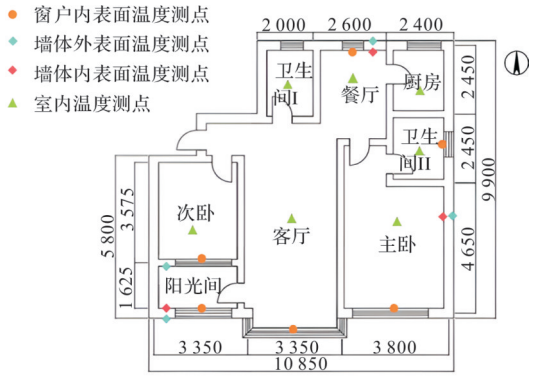
1 研究方法

1.1 实测建筑基本信息

本次实测建筑位于西藏自治区拉萨市区,为 2022 年某新建小区的一栋居民楼,建筑立面图见图 1(a)。建筑共 6 层,层高 3 m;分为 3 个住户单元,每层 2 户。选取 4 层东侧边户作为测试房间,平面图如图 1(b)所示,其主要功能房间包括主卧、次卧和客厅,辅助房间有餐厅、厨房和卫生间。可见,室内空间布局采用现代住宅建筑形式,与传统低层藏居存在较大不同。



(a) 建筑实景立面图



(b) 测试房间平面图及测点布置

图 1 测试建筑图(mm)

Fig 1 Tested building(mm)

被测建筑为典型的现代加气混凝土建筑。体形系数为 0.25、各朝向窗墙比分别为南向 0.71、北向 0.15、东向 0.06、西向 0.06,满足《西藏自治区居住建筑节能设计标准》(DB54/T0275—2023)中对不同朝向窗墙面积比限值的规定[13](南向≥0.5,东

向、西向≤0.25，北向≤0.2）。建筑的围护结构形式及主要热工参数见表1。外墙主体为300 mm厚加气混凝土砌块，采用50 mm厚聚苯版外保温；内墙为250 mm厚加气混凝土砖砌块，加20 mm岩棉板保温；内外窗框均采用铝合金断桥型材，玻璃层数在不同朝向有所差异，北外窗和东外窗采用双层中空玻璃，南外窗和内窗采用单层玻璃；此外，内门为木门，尺寸为2 000 mm×700 mm，厚度为400 mm。

表1　被测户型围护结构基本信息

Tab 1　Basic information of the tested building envelope structure

部位	朝向	构造形式	尺寸	传热系数K/(W/m²·K)
外墙	南向 北向 东向	硅钙板复合无机改性聚苯保温装饰一体板＋加气混凝土砌块＋水泥砂浆	50 mm＋300 mm＋20 mm	0.46
内墙	/	水泥砂浆＋加气混凝土砌块＋岩棉板＋水泥砂浆	20 mm＋200 mm＋20 mm＋20 mm	0.84
外窗	南向	铝合金断桥型材单层玻璃	2.1 m×2.2 m（阳光间） 3 m×2 m（客厅） 2.7 m×2.2 m（主卧）	3.2
	北向	铝合金断桥型材双层中空玻璃	1.5 m×1.2 m（餐厅）	2.5
	东向	铝合金断桥型材双层中空玻璃	0.9 m×1.5 m（卫生间Ⅱ）	2.5
内窗	/	铝合金断桥型材单层玻璃	2.1m×2.2m	3.2

1.2　测量参数及仪器

测试时段为2023年10月17日16:00至19日10:00。测试期间建筑内外门均关闭，房间外窗全天关闭，窗帘开启；室内无人员居住，照明等电力设备保持关闭状态，且无任何内热源。测量参数包括室内外空气温度、墙体内外表面温度和窗户内侧表面温度。室内外空气温度测试采用iButton DS1922L（测量范围：－40 ℃～85 ℃，测量精度：±0.5 ℃），墙体内外表面温度和窗户内侧表面温度测试采用德图testo174H（测量范围：－20 ℃～70 ℃，测量精度：±0.5 ℃）。测点布置如图1(b)所示，室内空气温度测点布置在房间中部距地面约1.2 m处，壁面温度测点选取各向墙壁中心位置，窗户表面温度测点在窗户中心位置，测量间隔均设置为10 min。此外，从拉萨气象台站获取了测试时段内的室外太阳辐射强度。

2　结果与讨论

2.1　室外气象条件

测试期间拉萨室外空气温度与太阳总辐射强度见图2。期间拉萨室外空气温度平均值为6.9 ℃，气温最高值为13.8 ℃，最低值为4.2 ℃，依次出现在10月17日16:30和18日8:00，日较差为9.6 ℃，温度波动较大。全天太阳辐射量平均值为478 W/m²，最大值出现在下午13:00，高达1 148 W/m²；日照时间长达11小时左右，有效辐射时间从早上9:00持续至晚上20:00。室外空气温度与太阳总辐射强度变化趋势相近，呈现明显的昼夜周期性波动；17日下午13:30～14:10、14:50～15:50两个时段发生云层遮挡，致使太阳辐射骤降，室外空气温度也随之短时降低。

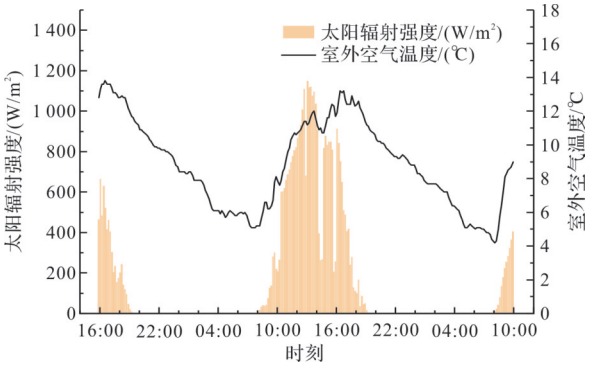


图2　室外空气温度与太阳辐射总强度

Fig 2　Outdoor air temperature and total solar radiation intensity

拉萨地区空气稀薄，太阳辐射和有效长波辐射对外围护结构的传热影响较内陆一般地区显著，所以应该计算不同朝向室外综合温度，以此作为外扰，准确地反映当地的气候特点，室外综合温度的计算公式如下：

$$t_{sa}=t_e+\frac{\rho_s\cdot I}{\alpha_e}-t_{lr} \tag{1}$$

式中：t_e为室外空气温度，℃；ρ_s为围护结构外表面对太阳辐射热的吸收系数，根据规范取0.7[13]；I为围护结构垂直面上的太阳辐射照度，W/m²，计算方法参照文献[14]；α_e为围护结构外壁面换热系数，W/(m²·K)，取18 W/(m²·K)；t_{lr}为围护结构外壁面有效长波辐射温度，℃，根据规范[15]外墙取1.8 ℃。

测试期间各朝向室外综合温度计算结果如图3

所示,由于不同朝向外墙所接收到的太阳辐照差异极大,可以看出室外综合温度存在明显的朝向差异。日间南向受到太阳辐射作用最强,因此室外综合温度最高,由计算结果可知,在太阳辐射强烈的13:00~13:30时段,南向室外综合温度达到了44.1 ℃,但南向室外综合温度的波动也最大,达到了40.9 ℃。东向在9:30~13:00受到的太阳辐射作用最强,室外综合温度最高值为23.9 ℃,波动幅度为20.7 ℃。北向全天无太阳直射辐射,所以室外综合温度最小,最大值为15.8 ℃,仅高于同时刻室外空气温度2.5 ℃,同时北向室外综合温度日较差也最小,为12.6 ℃。

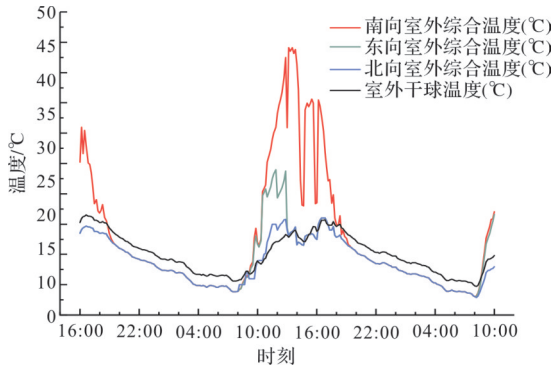


图3 各朝向室外综合温度对比

Fig. 3 Comparison of outdoor sol-air temperature in each direction

2.2 各房间室内温度对比

如图4(a)所示,测试期间各房间的室内温度呈现一致的昼夜波动,并且南向房间的室内温度始终显著高于北向,这直接体现了太阳直射辐射对室温的显著升温作用。统计各房间室温平均值,分别为:阳光间19.5 ℃、客厅17.8 ℃、次卧16.8 ℃、主卧16.5 ℃、卫生间Ⅰ14.6 ℃和厨房13.8 ℃,南北向房间平均室温最大相差5.7 ℃。进一步对比不同朝向的房间室温波动规律,由图4(b)可见,太阳能直接受益式的南向阳光间、客厅和主卧的室温波动幅度最大,日较差依次为9.5 ℃、6.1 ℃和5.8 ℃;而北向的厨房、卫生间Ⅰ的室温日较差相对较小,分别为3.3 ℃和1.4 ℃。依据《民用建筑采暖设计标准-西藏自治区地方标准》(DB54/0015—2007),室内温度符合主要功能房间不低于16 ℃的要求[16]。

对比相同朝向房间室温的测量结果发现,具有单面外墙的空间室温高于两面外墙空间,例如南向客厅室温日均值比主卧高1.2 ℃,北向卫生间Ⅰ室温日均值比厨房高0.8 ℃,这体现了空间位置和外围护结构设计对室温的影响。因此从保证居民热舒适的角度,新建住宅在空间组织上建议将主要功能房间布置在南向,辅助房间布置在北向。例如,厨房为人员短时逗留空间,并且在使用过程中会产生大量内部散热,安排在具有两面外墙且太阳辐射得热较低的东北角是合理的。

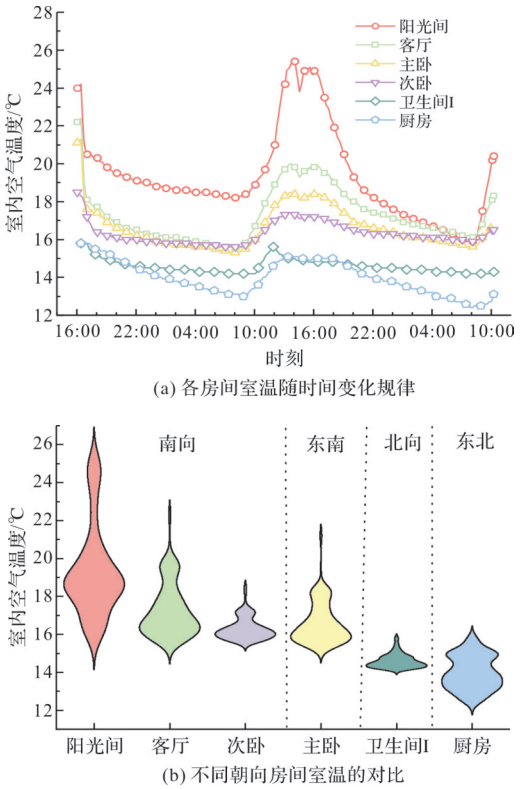


图4 典型房间室温测量结果

Fig. 4 Measurement results of typical room temperature

2.3 阳光间对相邻次卧的热调节作用

由图4还可以发现,与直接受益式阳光间相比,通过南向阳光间间接受益的次卧温度日均值较低,波动幅度较小,日较差为2.4 ℃。其具体室温变化规律可通过与太阳辐射得热相关的透明围护结构和非透明围护结构的传热途径来分析,如图5所示。

对比南向阳光间和次卧的玻璃窗内表面温度(图5(a))可见,阳光间南窗在日出后受到强烈的太阳辐射作用,内表面温度快速升高,于13:30达到最高温度46.0 ℃;次卧南窗接收到穿过阳光间南窗的太阳辐射,表面温度也随之升高,但最高温度仅为26.1 ℃,明显低于阳光间南窗温度,并且峰值时刻延迟15 min。这是因为阳光间外窗对南向太阳辐射进行了削弱,经外窗获得的太阳辐射热一方面对阳光间内的空气进行对流传热,另一方面对相邻次卧的窗和墙体进行辐射传热,所以次卧玻璃窗得热相较于阳光间存在衰减和延迟。在夜间,阳光间玻璃窗与室外冷环境直接接触进行散热,表面温度最低降至9.6 ℃,而次卧窗户表面温度也略有下降但总体高于阳光间外窗,最低温度为15.1 ℃。由此,将

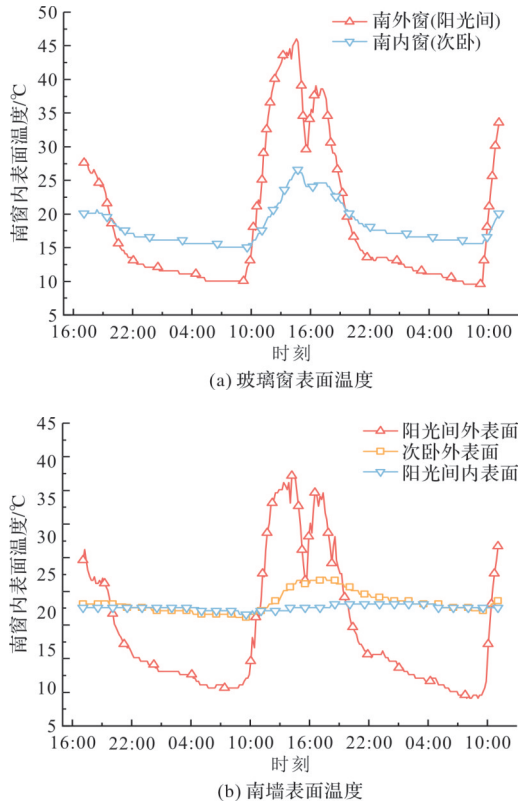


图 5　南向阳光间和次卧的围护结构表面温度对比

Fig. 5　Comparison of envelope surface temperatures between south-facing sunspace and secondary bedroom

次卧玻璃窗的表面温度波动幅度维持在较小的范围。对比南向阳光间和次卧的墙体表面温度(图 5(b))，可以发现与透明围护结构相似的传热规律。阳光间南墙外表面在白天受到强烈的太阳辐射作用，表面温度快速升高，测试期间最高温度达到 37.1 ℃，出现在 10 月 17 日 13:30；阳光间南墙内表面温度波动幅度则很小，仅为 1.6 ℃，这体现了加气混凝土外墙构造在拉萨地区的高保温蓄热性能；次卧南墙外表面温度与阳光间南墙内表面温度接近，只在日间太阳辐射时段受到阳光间空气温度、玻璃表面温度骤升的影响，前者略高于后者 4 ℃左右。可见，附加阳光间具有稳定相邻房间室内温度波动的作用，可调节室内温度在 17.1±1.4 ℃，墙体表面温度 19.1±3 ℃，玻璃窗表面温度 20.8±5.8 ℃。

2.4　不同朝向外围护结构传热对比

2.4.1　非透明围护结构传热过程对比

图 6 所示为不同朝向非透明围护结构的内、外表面温度随时间的变化曲线。可知，不同朝向墙体由于接收太阳直射的时刻、强度、时长不一致，导致各表面的日最高温度及其峰值时刻存在差异。对于东外墙而言，最早接收太阳直射，因此外表面温度峰值时刻出现在 11:04，最大值为 27.1 ℃；内表面温度的峰值时刻延迟至 18:04，峰值衰减为 18.6 ℃；

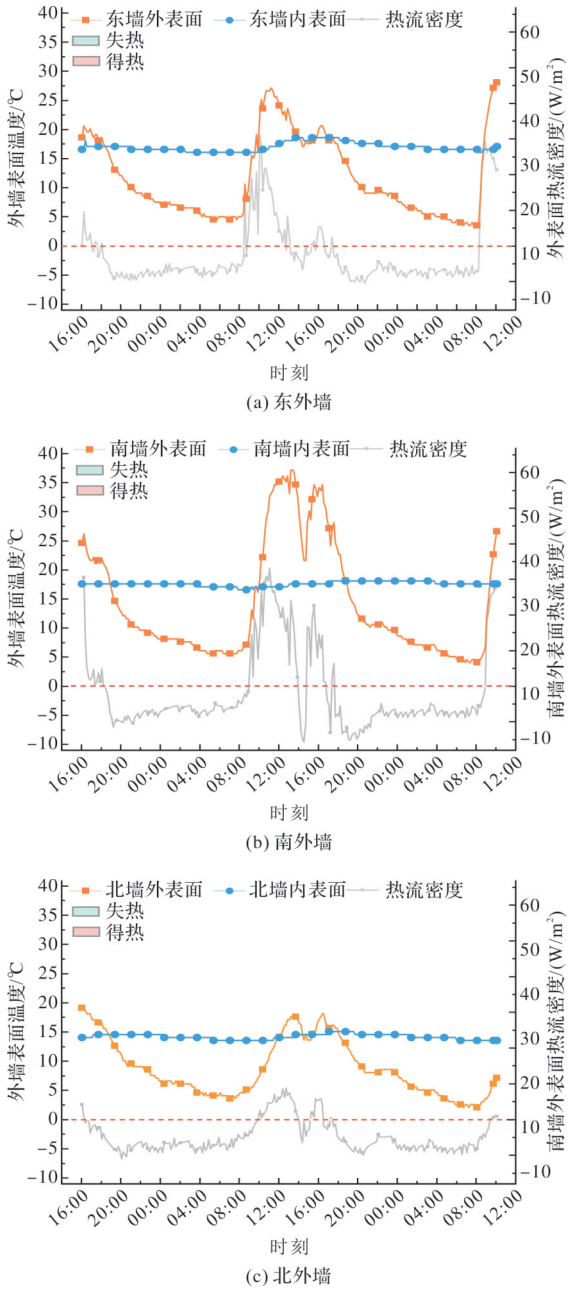


图 6　不同朝向外墙的表面温度与外表面热流密度

Fig. 6　Surface temperature and external surface heat flux density of external walls with different orientations

进一步计算了东墙外表面的逐时热流密度，其峰值出现在 10:04，在 8:44～16:34 的时段内，除云量较大的三个小时热流密度为负值外，其余时间均为正值，这表明该时段内东墙外表面主要从室外环境得热。南外墙的测量结果显示，外表面和内表面的峰值时刻依次为 13:24、18:54，峰值分别为 37.1 ℃、18.1 ℃；南墙外表面的逐时热流密度的计算结果显示，其峰值出现在 11:04，在 8:54 到 17:34 时段外表面热流密度总体为正，表明该时段内南墙外表面主要从室外环境得热，得热量大于东外墙。北外墙外表面温度显著低于东外墙和南外墙，最大值为

17.6 ℃,出现在 13:44;内表面温度最大值为 15.1 ℃,出现的时刻是 18:44;北墙外表面的逐时热流密度峰值出现在 12:24,在 10:24 到 17:14 时段外表面热流密度总体为正,表明该段时间北墙外表面主要从室外环境得热,得热量最小。由此可见,北外墙和东外墙是主要的失热构件,这也更好地解释了图 4 中北向卫生间Ⅰ室内平均温度高于东北向厨房的原因。对于可以接受太阳直射辐射的南向房间,应着重提升其集热性能[17];对于没有太阳直射辐射或者太阳直射辐射较少的房间,应该着重提升其围护结构的保温性能[18]。将平衡保温设计优化为非平衡保温设计,使各朝向外墙的平均失热热流近似相等[19],对太阳辐射进行分朝向利用。

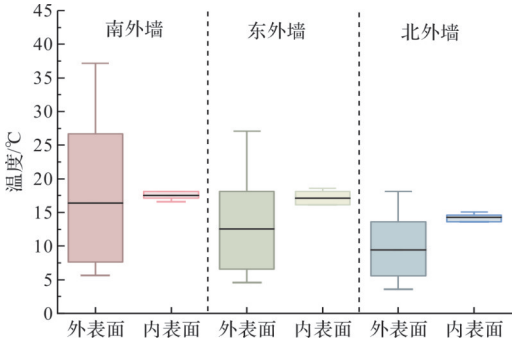


图 7 相同外墙的内外表面温度对比

Fig. 7 Comparison of internal and external surface temperature of the same exterior wall

由图 7 各朝向相同外墙的内外表面温度对比的箱线图可知,就外表面温度变化幅度而言,客厅南墙外表面温度变化幅度最大,介于 5.6 ℃~37.1 ℃,日较差为 31.5 ℃;其次是主卧东墙外表面温度为 4.5 ℃~27.1 ℃,日较差为 22.6 ℃;北墙外表面日较差最小为 14.1 ℃,变化范围为 3.5 ℃~17.6 ℃。这是由于各朝向太阳直射辐射强度不同导致的,南向外墙外表面接收到的太阳直射辐射强度最大,且受到最长时间段的太阳辐射加热作用,所以其日均温度最高,温度变化幅度也最大;东向外墙只有在早上会受到太阳直射辐射,且直射辐射没有南向强,所以其平均温度小于南向外墙;北向外墙全天接受不到太阳直射辐射,太阳辐射对北向的热作用不明显,所以其平均温度和温度变化幅度都最小。将相同外墙的内、外表面温度进行对比,可以看出各朝向外墙内表面温度日较差均小于 2.5 ℃,远低于对应的外墙外表面温度日较差,反映了 300 mm 加气混凝土和 50 mm 聚苯保温板的优良保温性能。

2.4.2 透明围护结构内表面温度对比

如图 8 所示,不同朝向透明围护结构内表面温度随时间的变化规律与非透明围护结构相似。受太阳辐射显著影响,各朝向的透明围护结构表面温度峰值按时间先后顺序依次为 10:50 东向 37.1 ℃、13:30 南向 46.1 ℃、13:30 北向 21.9 ℃。北向外窗接收不到太阳直射辐射,所以其内表面温度的升高不是靠太阳直射辐射的加热作用,而是依靠太阳散射辐射和室温的共同热作用。图中在 14 点左右温度出现一个波谷,是因为实测期间 13:30 开始天气由晴转阴,太阳辐射强度出现一定程度的下降。而在 14:10 左右由阴转晴,太阳辐射强度重新回涨,窗户温度也随之再次升高,这很好得反映出了太阳辐射对建筑的热作用,太阳辐射直接得热对于窗户表面温度的提高在白天尤其明显。

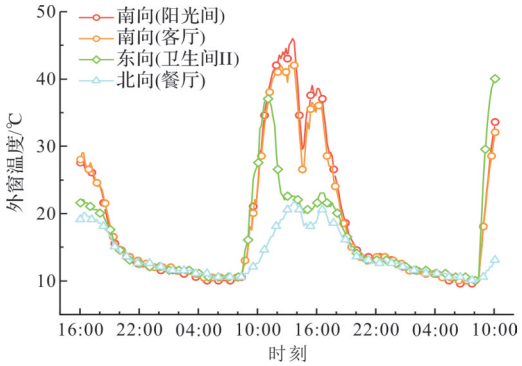


图 8 透明围护结构内表面温度

Fig. 8 Internal surface temperature of transparent envelope

统计各朝向透明围护结构内表面温度平均值可得,由高到低依次为南向 20.6 ℃、东向 17.1 ℃、北向 14.3 ℃。南向阳光间外窗内表面温度日较差为 36 ℃,是所有房间中波动幅度最大的,其次是南向客厅的日较差为 32.6 ℃。南向外窗在日间受到最长时间段的太阳辐射加热作用,因此其内表面平均温度最高且波动幅度最大;东向外窗虽也受到太阳辐射的加热作用,但其作用时间短,且直射辐射没有南向强,所以其平均温度略小于南向外窗;北向外窗一方面全天接受不到太阳直射辐射,而太阳散射辐射的加热作用不明显,另一方面由于北向外窗是铝合金断桥型材双层中空玻璃,传热系数小,保温性能好,对温度波的衰减和延迟作用更加显著,因此其内表面平均温度和波动幅度都是最小的。

本文的结果主要反映了满足西藏现行标准的拉萨新建典型民居在初冬季节的室内热环境定性规律及其影响因素。为了更全面了解全年典型时段的热环境状况,后续研究有必要进一步扩大测试样本并延长测试周期。

3　结论

为研究拉萨地区新建多层民居的室内热环境水平及影响因素，本文选取代表住宅开展了环境测试，掌握了室内热环境的变化特点，对比分析了不同朝向围护结构热工设计、直接受益式太阳能利用技术等措施对室内热环境的影响，得到如下结论：

（1）测试期间，室外空气温度变化范围为4.2 ℃～13.8 ℃，平均值为6.9 ℃；室外综合温度平均值南向最高为14.9 ℃，北向最低为8.6 ℃。由于室外综合温度的朝向差异，不同测试房间室内温度存在显著差异，平均温度最高的为南向阳光间19.5 ℃，最低为东北角厨房13.8 ℃，南北向房间平均室温最大相差5.7 ℃。室内温度场分布不均匀，室内热环境有待提高。

（2）外墙采用平衡保温设计，各朝向均采用300 mm加气混凝土和50 mm聚苯保温板。外墙内表面温度日较差均小于2.5 ℃，表明墙体保温效果良好。而各朝向外墙失热量存在显著差异，北外墙失热量最多。因此，为提高室内环境分布的均匀性，应采用非平衡保温设计。

（3）太阳能直接受益式空间的室温波动幅度较大，日较差由大到小依次为南向阳光间9.5 ℃、客厅6.1 ℃和主卧5.8 ℃，而北向厨房的室温日较差相对较小为3.3 ℃。与之相比，通过南向阳光间间接受益的次卧室温日较差仅为2.4 ℃。可见，附加阳光间具有稳定相邻房间室内温度波动的作用。

参考文献 References

[1] 李峥嵘，谢一建，赵群，等. 拉萨传统民居冬季室内热环境测试与分析[J]. 建筑节能(中英文)，2021，49(2)：57-62，81.
LI Zhengrong，XIE Yijian，ZHAO Qun，et al. Indoor thermal environment test and analysis of traditional houses in Lhasa in winter [J]. Building Eneregy Efficiency，2021，49(2)：57-62，81.

[2] 中国建筑科学研究院. 民用建筑热工设计规范：GB 50176—2016[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.
China Academy of Building Science. Code for Thermal Design of Civil Buildings：GB50176—2016 [S]. Beijing：China Building and Construction Press，1993.

[3] WANG Tianhui，WANG Dengjia，ZHAO yiting，et al. Analysis of factors influencing indoor thermal environment in passive houses in Plateau regions based on regression model [J]. Case Studies in Thermal Engineering，2023，52：1-14.

[4] WANG Yong，YANG Xun，XIONG Teng，et al. Performance evaluation approach for solar heat storage systems using phase change material [J]. Energy and Buildings，2017，155：115－127.

[5] SI Pengfei，FENG Ya，LÜ Yuexia，et al. An Optimization method applied to active solar energy systems for buildings in cold plateau areas：The case of Lhasa[J]. Applied Energy，2017，194：487-498.

[6] 刘艳峰，胡筱雪，周勇，等. 拉萨新民居建筑冬季室内热环境影响因素分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2019，51(1)：109-115.
LIU Yanfeng，HU Youxue，ZHOU Yong，et al. Analysis on influence factors of indoor thermal environment of new residential buildings in winter in Lhasa[J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)，2019，51(1)：109-115.

[7] 王芳，张宏烨. 迪庆藏区阳光间型民居冬季室内热环境分析研究[J]. 工业建筑，2020，50(7)：107-112.
WANG Fang，ZHANG Hongye. Research on the indoor thermal environment of sun room in Diqing Tibetan area in winter [J]. Industrial Construction，2020，50(7)：107-112.

[8] 索朗白姆，常青. 拉萨市传统民居建筑气候适应性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2020，52(3)：416-423.
SONGLANG Baimu，CHANG Qing. Study on climate adaptability of traditional residential buildings in Lhasa[J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)，2020，52(3)：416-423.

[9] 黄凌江，邓传力，兰兵. 拉萨乡村传统民居与新式民居冬季室内热环境对比分析[J]. 建筑科学，2012，28(12)：61-66.
HUANG Lingjiang，DENG Chuanli，LAN Bing. Comparative study on indoor thermal environment in winter of modern and traditional rural dwellings in Lhasa [J]. Building Science，2012，28(12)：61-66

[10] 冯雅，杨旭东，钟辉智. 拉萨被动式太阳能建筑供暖潜力分析[J]. 暖通空调，2013，43(6)：31-34，85.
FENG Ya，YANG Xudong，ZHONG Huizhi. Heating potential of passive solar building in Lhasa[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning，2013，43(6)：31-34，85.

[11] 成辉，肖榆川，李欣等. 拉萨居住建筑空间模式与室内热环境的关系研究[J]. 工业建筑，2020，50(7)：113-119.
CHENG Hui，XIAO Yunchuan，LI Xin，et al. Relationships between spatial patterns of residential buildings and the indoor thermal environment in Lhasa [J]. Industrial Construction，2020，50(7)：113-119.

[12] 拉萨市统计局. 2022年拉萨市房地产运行情况[EB/

OL]. (2023-02-17)[2024-07-01]. https://tjj. lasa. gov. cn/tjj/newtjfx/202302/9b296719d77945d697f7ebed2525253a. shtml.
Lhasa Bureau of Statistics. Real estate operation in Lhasa in 2022 [EB/OL]. (2023-02-17)[2024-07-01]. https://tjj. lasa. gov. cn/tjj/newtjfx/202302/9b296719d77945d697f7ebed2525253a. shtml.

[13] 西藏自治区住房和城乡建设厅. 西藏自治区居住建筑节能设计标准:DB54/T0275—2023[S]. 拉萨:西藏人民出版社,2023.
Department of Housing and Urban-Rural Development, Tibet Autonomous Region. Design standard for energy efficiency of residential buildings in Tibet autonomous region: DB54/T0275—2023 [S]. Lhasa: Tibet People's Publishing House, 2023.

[14] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986.
YAN Qisen, ZHAO Qingzhu. Thermal process of building [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1986.

[15] 西藏自治区建设厅. 西藏自治区地方标准民用建筑采暖设计标准:DB54/0015—2007[S]. 拉萨:西藏人民出版社,2017.
Construction Department of Tibet Autonomous Region. Local standard for heating design of civil buildings in Tibet autonomous region: DB54/0015—2007 [S]. Lhasa: Tibet People's Publishing House, 2017.

[16] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
LIU Jiaping. Architectural physics [M]. Beijing: China Architectural & Industry Press, 2015.

[17] 朱新荣,牛延延,冯伟建,等. 太阳能建筑不同朝向墙体蓄热性能差异分析[J]. 建筑科学,2023,39(2):67-73.
ZHU Xinrong, NIU Yanyan, FENG Weijian, et al. Difference analysis of heat storage performance of walls with different orientations in solar buildings [J]. Building Science, 2023, 39(2): 67-73.

[18] 王朝红,杨阳,魏广龙. 基于效益评价的寒冷地区农宅附加阳光间优化研究[J]. 建筑科学,2023,39(4):130-138.
WANG Chaohong, YANG Yang, WEI Guanglong. Study on the optimization of additional sunspace of rural residences in cold regions based on benefit evaluation [J]. Building Science, 2023, 39(4): 130-138.

[19] 李恩,刘加平,张卫华. 太阳能富集地区居住建筑非平衡保温研究——拉萨市非平衡保温传热系数限值研究[J]. 建筑科学,2011,27(8):56-60,86.
LI En, LIU Jiaping, ZHANG Weihua. Study on non-equilibrium thermal insulation of residential buildings in solar energy enrichment area: Study on non-equilibrium thermal insulation heat transfer coefficient limit in Lhasa [J]. Building science, 2011, 27(8): 56-60, 86.

[20] 杨雯,张祥,文均,等. 西藏地区冬季客房人行为模式导控下的室内热环境评估[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2026,58(1):87-99.
YANG Wen, ZHANG Xiang, WEN Jun, et al. Evaluation of indoor thermal environment under the behavior pattern control of guest rooms in winter in Tibetan area [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2026, 58(1): 87-99.

[21] 傅治国,胡家乐,王莹莹,等. 西藏高原建筑室内湿氧环境营造技术现状与建议[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版). 2026,58(3):428-435.
FU Zhiguo, HU Jiale, WANG Yingying, et al. Current status and suggestions for construction technology of indoor humid-oxygen environment on the Xizang Plateau[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2026, 58(3): 428-435.

[22] 张珊珊,张晓静,刘铁婷,等. 高原太阳辐射对南北朝向建筑空间热舒适影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),(2026-04-11)[2026-05-12]. https://link. cnki. net/urlid/ 61. 1295. TU. 20260409. 1628. 012.
ZHANG Shanshan, ZHANG Xiaojing, LIU Yiting, et al. A study on the influence of solar radiation on thermal comfort of building space with north-south directions in plateau [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), (2026-04-11)[2026-05-12]. https://link. cnki. net/urlid/ 61. 1295. TU. 20260409. 1628. 012.

(编辑 吴海西)