

严寒地区主被动太阳能协同采暖室内舒适度研究

李金平^{1,2,3,4}, 王兆福^{1,2,3,4}, 王 航^{1,2,3,4}, 黄娟娟^{1,2,3,4}, 王春龙^{1,2,3,4}

(1. 兰州理工大学 西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 甘肃 兰州 730050;

4. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:我国藏区冬季严寒, 采暖主要以煤炭和牛粪直燃为主, 室内舒适度较差。为了利用藏区丰富的太阳能实现清洁采暖, 以甘南州合作市一座 170 m² 附加被动式阳光间的典型单体建筑为研究对象, 利用布置在屋顶的 7 组 30 支竖管式全玻璃真空管太阳能集热器阵列给室内低温地板和水暖炕供暖。参照《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785-2012) 和 Fanger 热舒适评价体系, 在 2018 年 3 月 20 日至 2018 年 5 月 6 日期间试验研究了室内的热环境和热舒适度, 并评价了室内舒适度。研究表明: 测试期内, 当环境温度在 -10.9~15 ℃ 变化时, 未采用其它能源辅助的情况下, 主被动太阳能协同采暖室内温度 48 d 都处在 14 ℃ 以上, 最高达到 22.3 ℃, 仅有 1 d 室内温度最低降到 13 ℃, 48 d 内室内风速和湿度较好, 室内热环境符合国家 I 级标准, 主被动太阳能协同采暖完全可以实现严寒藏区清洁供暖。

关键词: 严寒地区; 被动式阳光间; 主动式采暖; 室内热环境; 室内舒适度

中图分类号: TU114.4⁺5; TK51

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0584-07

Research on indoor comfort of active and passive solar cooperative heating in cold Tibetan region

LI Jinping^{1,2,3,4}, WANG Zhao-fu^{1,2,3,4}, WANG Hang^{1,2,3,4}, HUANG Juanjuan^{1,2,3,4}, WANG Chunlong^{1,2,3,4}

(1. Lanzhou University of Technology, Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou 730050, China;

2. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China;

3. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

4. Lanzhou University of Technology, College of Energy and Power Engineering, Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: China's Tibetan areas are very cold in winter, and heating is dominated by direct combustion of coal and cow dung. Indoor comfort is poor. In order to use the rich solar energy of the Tibetan region to achieve clean heating, the typical single building of a 170m² attached passive sunlight in Hezuo city, Gannan is taken for study and 7 sets of 30 vertical tube-type all-glass vacuum tube solar collectors arranged on the roof were used. The array heats indoor low-temperature floors and heating-water Kang. With reference to "Evaluation Criteria for Indoor Thermal Environment of Civil Buildings" (GB/T 50785-2012) and Fanger Thermal Comfort Evaluation System, the indoor thermal environment and thermal comfort were tested during the period from March 20, 2018 to May 6, 2018, and the indoor comfort was evaluated. Results of the study show that during the test period, when the ambient temperature changes from -10.9 ℃ to 15 ℃, without the use of other energy assistance, the indoor temperature of active and passive solar cooperative heating is more than 14 ℃ for 48 days except one day when the minimum indoor temperature dropped to 13 ℃, with a maximum of 22.3 ℃, and within 48 days of indoor wind speed and humidity is better, the active and passive solar cooperative heating can completely realize the clean heating in cold Tibetan regions.

Key words: cold areas; passive sunlight; active heating; indoor thermal environment; indoor comfort

甘南藏族自治州是中国十个藏族自治州之一, 位于中国甘肃省西南部, 地处青藏高原东北边缘与黄土高原西部过渡地段。该地区常年气温较低, 昼夜温差大, 冬季采暖季长达 7 个月, 但是该地区

日照辐射强烈, 太阳能资源十分丰富。所以高效低成本的利用当地的太阳能, 解决当地建筑的用能需求具有重要意义。

国内外很多学者已经对太阳能采暖建筑的室

内热环境进行了大量的研究. 中国科学技术大学的崔玉清等人^[1]采用数值模拟的方式对大连地区采用太阳能炕和 Trombe 墙相结合的新型太阳能采暖系统进行了研究, 研究发现: 该复合系统在无辅助热源时白天能够满足室内采暖需求, 但夜间室内温度较低. 王登甲等人^[2]对青藏高原地区 Trombe 墙式太阳房进行了测试分析, 发现 Trombe 式太阳房具有较好的集热和蓄热性能; 通风孔在日出后 2~3 h 开启、日落前 1 h 关闭效果最佳; 该地区 Trombe 墙日平均热效率可达 69.7%; 节能率可达 72.8%. 陈明东等人^[3]通过对附加阳光间与节能火墙耦合供暖的房屋及相同结构的对比房室内温度及室外温度的监测, 研究了寒冷季节室内温度随室外气象条件变化情况. 结果表明: 耦合供暖房屋室内平均空气温度对比房室内平均空气温度高 10.1 °C, 最高温差达 13.2 °C, 最低温差 5.4 °C, 节能率为 72.8%, 证明了该地区改造附加阳光间和节能火墙是可行且经济的. 兰州理工大学李金平等人^[4]对位于甘肃省武威市民勤县张麻新村的一座单体建筑进行节能改造, 并通过主动式太阳能低温地板进行冬季采暖, 并在 2 个采暖季分别进行了对比试验, 研究结果表明: 太阳能低温地板采暖效果最好, 在环境最低气温 10 °C 时, 室内平均温度能达到 14 °C, 太阳能保证率为 60.3%, 二氧化碳减排量为 6.22 t, 静态投资回收期 3.34a, 具有良好的经济环保效益. 王岗等人^[5]构造了一套太阳能—热泵复合供能系统, 分别从室内温度、制热量、热泵 COP、集热效率、发电效率等方面对系统进行实验研究与理论分析, 实验结果表明, 该系统基本能满足冬季采暖负荷要求. Shan M 等^[6]建立了包括被动式太阳房、主动式太阳热水和空气源热泵组成的供暖系统. 在寒冷气候区, 对各子系统的详细运行性能进行了对比分析. 研究发现: 该集成系统在冬季可以维持稳定舒适的室内热环境, 建筑消耗电能仅占供暖总能量的三分之一左右. Rekstad J 等^[7]通过试验对比研究了太阳能主动式供暖和空气—水源热泵供暖, 结果表明太阳能主动式供暖能耗比空气—水源热泵供暖低 15%~20%.

综上所述, 太阳能采暖确实能极大的改善室内热舒适, 且国内外学者还未将主动式太阳能低温地板采暖技术, 太阳能水暖炕技术和被动式太阳房结合起来在藏区进行冬季采暖试验研究, 该研究对于改善当地落后采暖方式具有重要意义.

1 试验

1.1 试验对象

测试对象为一座位于甘南藏族自治州合作市佐盖曼玛乡上浪坎木的单层民居建筑. 建筑面积 170 m², 其中采暖面积 60 m². 建筑外墙由三部分组成, 外部由石头与土堆砌而成, 约 650 mm, 内部为厚 50 mm 的木质板, 两者之间为约 100 mm 的空气层, 阳光间内墙体的主体材料为多孔砖, 厚度为 130 mm, 房屋内部用 50 mm 的木板隔开. 阳光间由 3 mm 厚玻璃拼建而成, 高 2.5 m, 面积为 35 m². 测试建筑平面图如图 1 所示. 其中, 客厅、左面卧室以及书房为采暖房间.

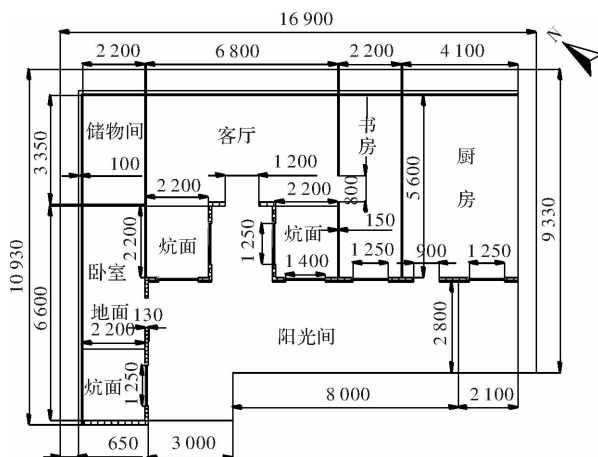


图1 建筑平面布置和尺寸图(单位: mm)

Fig. 1 The layout and size of the building (Unit: mm)

地暖盘管采用管径为 DN20 的 PE-RT 管材, 盘管采用迂回型方式布置, 管道铺设间距 200 mm, 管径 20 mm; 地板采暖的地板构造如图 2 所示, 保温层为聚苯乙烯挤塑板, 保温层上面为凹槽式地暖板复合铝箔导热层地暖模块, 地暖盘管就盘在地暖模块的凹槽里, 填充层为水泥砂浆. 卧室有三张水暖床, 采暖所用的 7 组太阳能集热器选用太阳桥公司生产的太阳能真空管集热器, 真空管管长 1.8 m, 管径为 58 mm, 集热器保温水箱容积为 250 L. 太阳能低温地板与阳光间结合, 共同构成了太阳能主被动式采暖系统, 主动式太阳能采暖系统图如图 3 所示. 太阳能主动式采暖系统采用时间控制策略, 有白天防冻和夜间供暖两种模式. 防冻模式运行时间为 8:00~18:00, 每个小时供暖泵循环 5 min, 如: 8:00~8:05 泵运行, 8:05~9:00 泵停止运行; 供暖模式运行时间为 18:00~8:00, 每个小时泵循环 30 min, 如: 18:00~18:30 泵运行, 18:30~19:00 泵停止运行.

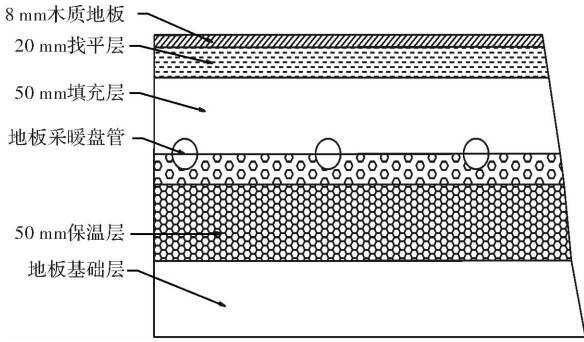
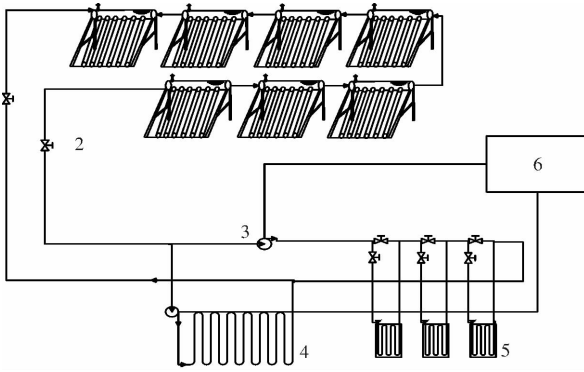


图 2 太阳能地板采暖地板构造示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the floor structure of solar floor heating



1. 真空管太阳能集热器阵列 2. 球阀 3. 供暖循环泵
4. 地暖盘管 5. 水暖床 6. 控制箱
图 3 太阳能的主动测试系统图
Fig. 3 Diagram of the active measurement system for solar energy

1.2 测试方案

由于测试所在地海拔高，昼夜温差大，冬

季采暖季长，所以课题组与 2018 年 3 月 20 日～2018 年 5 月 6 日对试验建筑进行冬季采暖测试。室内热环境测试参数主要分为室内环境参数和室外环境参数。室内环境参数主要包括：室内温湿度、围护结构各内壁面温度、阳光间温度；室外环境参数主要包括：室外温湿度、太阳辐射强度。依据《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785-2012)对室内环境参数测点布置如图 4 所示。测点 A～K 均为温度测点，测点 B 和测点 K 分别为室内空气温度和阳光间温度测点，同时在 B 点 1.7 m 处还布置有室内风速和湿度测点。测点 A 和 C 为地面温度测点，分别位于地面对角线的两个等分点处。测点 D～H 为墙面温度测点，距地面 1.5 m。以上参数采用 Agilent34970A 数据采集仪自动采集和记录，设置扫描间隔为 10 s。

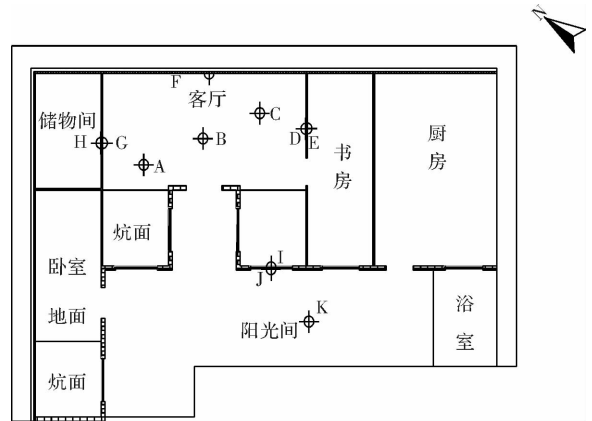


图 4 测试建筑测点图
Fig. 4 Testing point map of building test

表 1 测试参数及仪器

Tab. 1 Testing parameters and instruments

测试参数	测试仪器	技术参数
室内外及壁面温度	四线制 pt100 温度传感器	量程：-50～100 ℃；精度：1/3B 级，±0.1 ℃
室外风速	FC-2A3 风速传感器	量程：0～30 m/s；精度：±3%
室内风速	YGC-RMFS 热膜风速传感器	量程：0～5 m/s；精度：±0.2% FS
太阳辐射强度	TBQ-2-B 总辐射表	量程：0～2 000 W/m ² ；灵敏度：8.963 μV/W·m ⁻²
室内外温湿度	STH-TW1-RHT10VP2S0 温湿度变送器	量程：0～100% RH；精度：±3% RH
流量	LWGY-32A 涡轮流量计	流量范围 0.4～8 m ³ /h；精度 0.5%

2 试验结果与分析

2.1 室外环境测试

2.1.1 太阳辐射强度

测试期间太阳辐射强度峰值为 1 310 W/m²，单天的平均有效太阳辐射强度最高为 796 W/m²，有效太阳辐射时间最长为 10.39 h，最短为 0.49 h，

平均时长为 8.64 h，由表 2 可知，测试期间，62.5%的天数日有效太阳辐射时间为 9 h 以上。单天的太阳辐射量最高为 29.50 MJ/m²，最低为 2.54 MJ/m²，平均每天太阳辐射量为 21.33 MJ/m²。通过测试可以看出，这一地区冬季日照时间长，太阳辐射强度较高，具有良好的太阳能利用条件。

本文选用 4 月 6 日作为代表日进行分析, 太阳辐射强度随时间的变化情况如图 5 所示, 当日的有效太阳辐射时间为 10.25 h, 有效日照从早上 8:11 到下午 18:26, 峰值出现在中午 13:00 左右, 其值约为 $1\,170\text{ W/m}^2$.

表 2 整个测试期间有效太阳辐射时长的分布
Tab. 2 The distribution of effective solar radiation duration during the whole test period

	$\geq 9\text{ h}$	6-9 h	$< 6\text{ h}$
天数	30	11	7
所占比例	62.5%	22.9%	14.6%

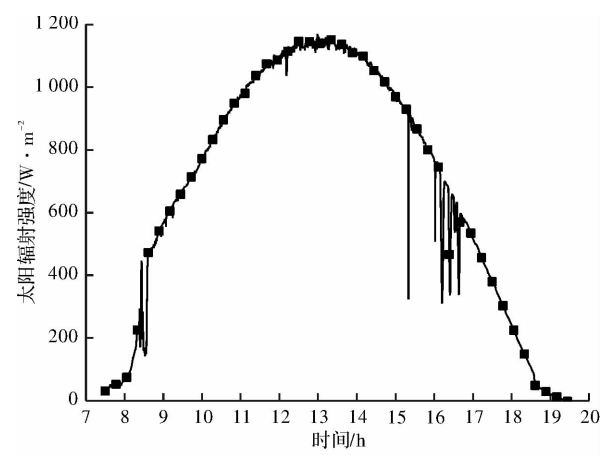


图 5 典型日的太阳辐射强度

Fig. 5 Solar radiation intensity in typical days

2.1.2 室外环境温度和湿度

代表日当天的室外温湿度测试结果如图 6 所示. 可以看出: 测试期间, 室外的平均温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 最低温度为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出现在凌晨 5:17; 最高温度为 $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出现在 15:30; 全天温差为 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

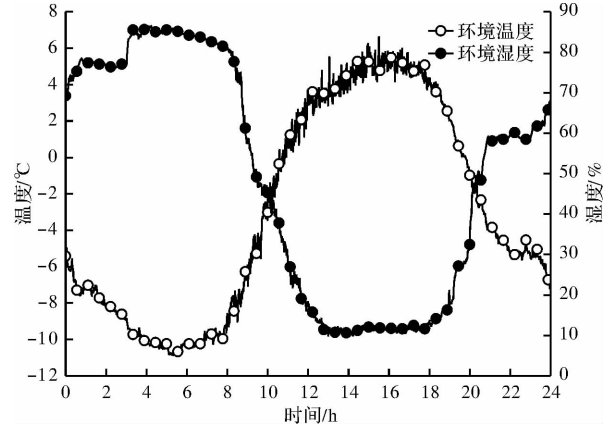


图 6 环境温湿度

Fig. 6 Temperature and humidity in outdoor environment

室外的相对湿度变化幅度很大, 由于早晚的温度低, 雾气较多, 所以湿度较大; 中午的太阳

辐射强烈, 温度较高, 所以湿度较低. 一天内测试得到的室外最高湿度为 86.6% , 最低湿度为 9.8% . 总之, 室外环境在凌晨 0:00~8:00 和 22:00 以后处于湿冷的状态; 在中午 12:00~18:00 处于干冷状态.

2.2 太阳能主被动式采暖系统

2.2.1 太阳能被动式系统供热量计算

被动式阳光间所集热量通过南墙以导热的方式传到室内, 南墙分为两部分, 一部分为 130 mm 红砖, 面积为 27 m^2 ; 一部分为玻璃窗户, 总面积 9 m^2 . 图 7 为 4 月 6 日墙壁和窗户玻璃内外表面的温度. 根据一维稳态传热模型:

$$Q_i = \sum (T_{si} - T_{so}) A_i K_i t \quad (1)$$

式中: Q_i 为通过围护结构的的导热热量, J; T_{si} 为围护结构内壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{so} 为围护结构外壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; A_i 为围护结构面积, m^2 ; K_i 为围护结构的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t 为时间, s.

$$K_i = \frac{\lambda_i}{\delta_i} \quad (2)$$

式中: λ_i 为围护结构材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; δ_i 为各围护结构材料的厚度, m.

计算得当日太阳能被动式阳光间通过砖墙向室内提供 19.6 MJ 热量, 通过窗户玻璃向室内提供 94.1 MJ 热量.

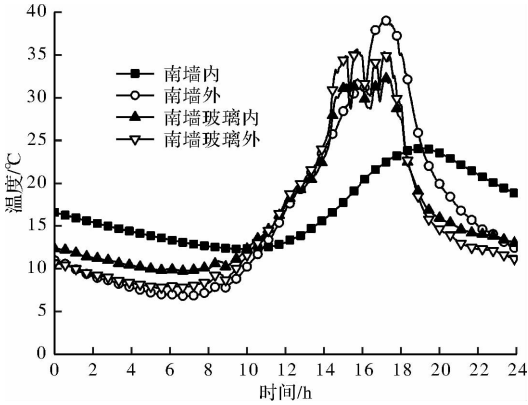


图 7 南墙内外壁面温度

Fig. 7 Temperature of the inner and outer wall of the south wall

2.2.2 太阳能主动式系统供热量计算

太阳能集热阵列向室内的供暖量可以根据公式(3)求得, 地暖的供回水温度及流量如图 8 和图 9 所示.

$$Q = \sum c_p m (T_{in} - T_{out}) t \quad (3)$$

式中: c_p 为水的比热容, 取 $4\,200\text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; m 为供暖循环水流量, kg/s ; T_{in} 为地暖供暖进水温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{out} 为地暖供暖回水温度, $^{\circ}\text{C}$.

计算得当日太阳能主动式采暖系统给室内提供 501 MJ 热量,折合标煤 17.1 kg(标煤的热值为 29.308 MJ/kg)。

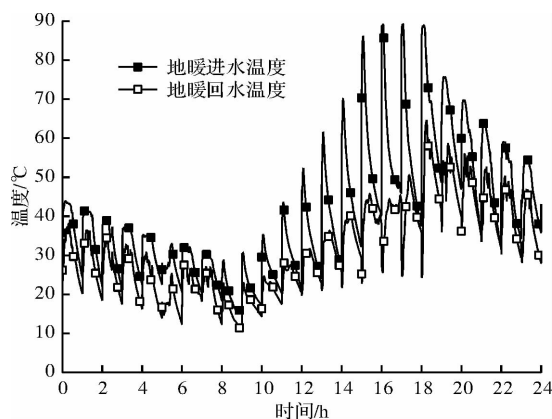


图8 地暖供回水温度图

Fig. 8 The water supply and backwater temperature map of the ground heating

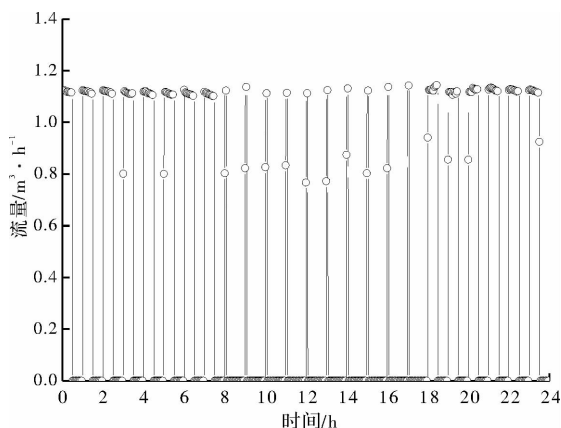


图9 供暖流量图

Fig. 9 Heating flow chart

2.3 室内热环境测试

2.3.1 室内竖直空气温度与阳光间温度

为了描述地暖采暖房间内温度分布的均匀性,根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785-2012),分别测试了竖直方向 0.1、0.6、1.1、1.7 m 处以及地面的温度,测试数据整理如图 10 所示。可以得出:室内温度在竖直方向,由下往上,依次递减。地面温度变化最明显,在 18:30 开始供暖时,地面温度突然升高,最高温度达到 24.5 °C。竖直其他方向没有明显的分层现象,尤其是 0.6 和 1.1 m 处温度几乎重合在一起,相邻高度之间的温度差都小于 1 °C,脚踝和头之间的最大温度差仅为 2 °C 左右,这个温度差能够满足标准 ASHRAE55-2010^[8]的规定,并且根据人工冷热源热湿环境的评价等级规定^[9],该垂直空气温度差(LPD₂)和地板表面温度(LPD₃)均符合 I 级标准。室内空气温度全天都在 14 °C 以上,达到了《农村居

住建筑节能设计标准》(GBT50824-2013)的规定。所以该地板采暖房间的室内温度较高且分布比较均匀,具有良好的热舒适度。

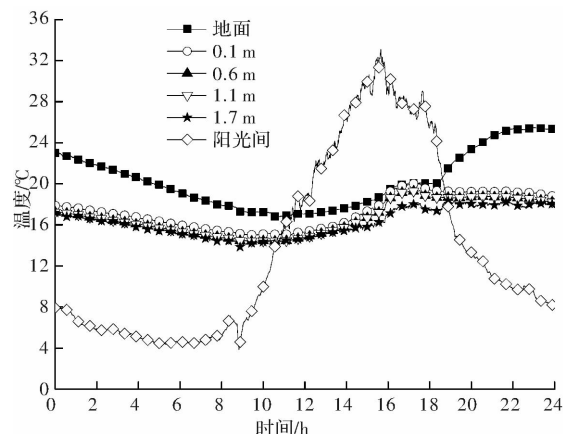


图10 室内竖直方向温度分布与阳光间温度的变化曲线

Fig. 10 Curves of indoor vertical temperature distribution and temperature of sun room

阳光间内的平均温度为 13.5 °C;最高温度达 33 °C;最低温度低至 3.8 °C;温差为 29 °C。阳光间在白天集热能力强,可以通过导热的方式将热量传至室内,在夜间作为室内向室内散热的缓冲区,减少房间热损失。

2.3.2 平均辐射温度 MRT 与体感温度 t_{op}

平均辐射温度的定义为:如果一个封闭空间的内表面为温度一致的黑体表面,对于人体所造成的辐射换热量与所研究的人所处的真实环境相同,那么该黑体表面的温度就是就称为真实环境的平均辐射温度。平均辐射温度 MRT 是研究室内热环境的重要参数,是确定室内采暖需要重点考虑的参数之一^[10]。体感温度 t_{op} 是指人体感觉到的环境温度的高低,在大多数实际情况中体感温度根据测试得到的空气温度与平均辐射温度计算得到^[9]。

对代表日的客厅各壁面温度数据进行整理,采用公式(4)进行计算^[11],估算出客厅室内平均辐射温度 MRT(Mean Radiant Temperature)。

$$MRT = \sum A_n T_n / \sum A_n \quad (4)$$

式中: A_n 为客厅各围护结构内表面面积, m^2 ; T_n 为各围护结构内表面温度, °C。

根据国家标准 GB/T 50785-2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》,当空气流速小于 0.2 m/s 时,体感温度可近似等于平均辐射温度和空气温度的加权平均值,此时 A 取 0.5,按下式计算:

$$t_{op} = A t_a + (1 - A) MRT \quad (5)$$

式中: t_{op} 为体感温度, °C; t_a 为空气温度, °C; A 为

系数, $^{\circ}\text{C}$.

数据整理如图 11 所示, 由图可以看出, 室内空气温度、平均辐射温度以及体感温度的变化趋势完全一致, 平均辐射温度 MRT 变化范围为 $13.8 \sim 22^{\circ}\text{C}$, 体感温度变化范围为 $14.5 \sim 21^{\circ}\text{C}$, 在晚上入睡阶段 ($22:30 \sim 24:00$), 两者都稳定在 $18 \sim 20^{\circ}\text{C}$, 室内舒适度很好.

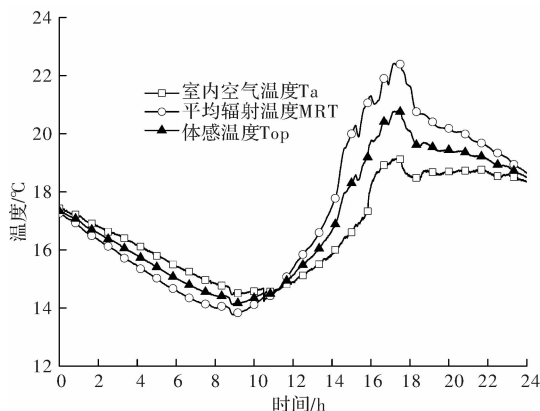


图 11 平均辐射温度以及体感温度随时间变化

Fig. 11 Variation of mean radiation temperature and somatosensory temperature with time

2.3.3 室内风速与室内相对湿度

图 12 为代表日当天室内风速和室内相对湿度随时间的变化曲线, 由图可以看出: 室内相对湿度的波动范围为 $42\% \sim 48\%$, 满足冬季室内相对湿度为 $30\% \sim 60\%$ 的舒适区域^[12]. 室内风速基本维持在 0 附近, 最高风速仅为 0.06 m/s , 基本无风感. 室内相对湿度和室内风速的波动性都很小, 较为稳定, 室内热舒适度较好.

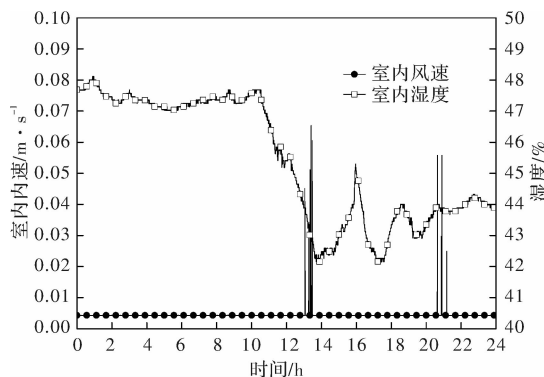


图 12 室内风速和室内外相对湿度

Fig. 12 Indoor wind speed and indoor and outdoor relative humidity

2.4 热舒适度评价

目前国际上常用的建筑室内热环境评价模型是丹麦学者 Fanger 提出的 $PMV-PPD$ 评价指标, 其中, PMV 即预测平均投票数 (Predicted Mean Vote), PPD 即预测不满意百分数 (Predicted Per-

centage of Dissatisfied). $PMV-PPD$ 综合了空气温度、风速、空气相对湿度、平均辐射温度、服装热阻和人体新陈代谢率 6 个因素, 是目前最为全面的热环境评价指标^[13]. 当 $PPD \leq 10\%$ 且 $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ 时, 此时的热环境为 I 级; 当 $10\% < PPD \leq 25\%$ 且 $0.5 \leq |PMV| \leq 1$ 时, 此时的热环境为 II 级; 当 $PPD > 25\%$ 且 $|PMV| > 1$ 时, 此时的热环境为 III 级^[10].

参照标准^[13], 取冬季农民室内活动代谢率为 70 W/m^2 , 做功消耗热量可忽略不计. 经实地调研, 居民的基本着装为: 内裤+背心+毛衣+外套+毛裤+外裤+厚袜+棉拖鞋, 平均服装热阻为 $1.12 \text{ col}(0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W})$. 服装表面温度和对流换热系数由 C++ 编程迭代计算得出, 然后将可将代谢率、服装热阻、空气温度、平均辐射温度、风速以及水蒸气分压代入 $PMV-PPD$ 计算公式^[13], 计算统计结果如图 13 所示.

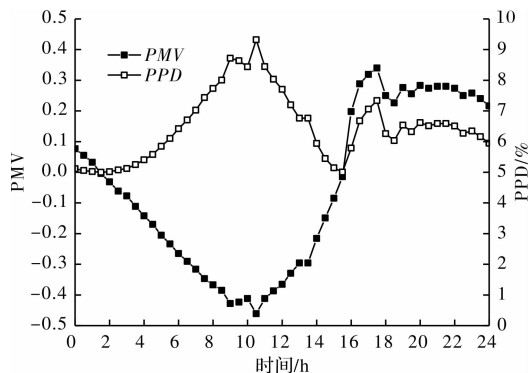


图 13 典型日全天的 $PMV-PPD$ 指标

Fig. 13 $PMV-PPD$ indicators for typical days of a typical day

由图可以看出, 代表日全天的室内 $PPD \leq 10\%$ 且 $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$, 全天室内热环境均符合国家 I 级标准, 人体热感觉很舒适.

3 结论

(1) 甘南藏区太阳能资源丰富, 日照时间长, 测试的 48 d 中, 有 30 d 可以达到日有效太阳辐射时间 9 h 以上, 具备利用太阳能进行冬季采暖的自然条件.

(2) 在室外日平均温度温度为 -3°C , 最低温度为 -11°C 时, 室内温度稳定在 14°C 以上. 在竖直方向, 温度没有明显的分层现象, 室内温度分布比较均匀, 室内风速和湿度均满足国家标准, 室内舒适度良好.

(3) 根据 Fanger 热舒适 $PMV-PPD$ 评价体系, 在室外日平均温度温度为 -3°C , 最低温度为

-11℃时,室内满足 $PPD \leq 10\%$ 且 $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$,热环境等级为I级,人体热感觉很舒适.说明在主被动太阳能协同采暖在该地区具有很好的应用效果.

参考文献 References

- [1] 崔玉清,季杰,何伟,等.太阳能炕和 Trombe 墙相结合的新型太阳能采暖系统的数值研究[J].太阳能学报,2011,32(1):66-71.
CUI Yuqing, JI Jie, HE Wei, et al. Numerical study on a novel solar heating system with coupled solar Kang and Trombe wall[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(1): 66-71.
- [2] 王登甲,刘艳峰,刘加平,等.青藏高原地区 Trombe 墙式太阳房供暖性能测试分析[J].太阳能学报,2013,34(10):1823-1828.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng, LIU Jiaping, et al. Heating performance test and analysis of Trombe wall solar house in Qinghai Tibet Plateau [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34 (10): 1823-1828.
- [3] 陈明东,史宇亮.附加阳光间与节能火墙耦合供暖改善农村室内热环境[J].农业工程学报,2011,27(11):232-235.
CHEN Mingdong, SHI Yuliang. Improvement of indoor thermal environment of rural residences with coupled heating of attached sunspace and energy saving hot-wall[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(11) 232-235.
- [4] 李金平,司泽田,孔莹,等.西北农村单体住宅太阳能主动采暖效果试验[J].农业工程学报,2016,32(21):217-222.
LI Jinping, SI Zetian, KONG Ying, et al. Experiments on solar active heating effect of single-unit residential buildings in northwest rural areas [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (21): 217-222.
- [5] 王岗,全贞花,赵耀华,等.太阳能—热泵复合供能系统[J].化工学报,2017,68(5):2132-2139.
WANG Gang, QUAN Zhenhua, ZHAO Yaohua, et al. Solar energy-heat pump hybrid energy supply system [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2017, 68(5): 2132-2139.
- [6] SHAN M, YU T, YANG X. Assessment of an integrated active solar and airsource heat pump water heating system operated within a passive house in a cold climate zone [J]. Renewable Energy, 2016, 87: 1059-1066.
- [7] REKSTAD J, MEIR M, MURTNES E, et al. A comparison of the energy consumption in two passive houses, one with a solar heating system and one with an air-water heat pump[J]. Energy and Buildings, 2015, 96: 149-161.
- [8] American Society of Heating and Air Conditioning Engineers. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE 55-2017[S]. Atlanta: Standing Standard Project Committee, 2017.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑室内热湿环境评价标准:GB/T 50785-2012[S]北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Evaluation Criteria for Indoor Thermal and Wet Environment of Civil Buildings: GB/T 50785-2012 [S] Beijing: Chinese People's Construction Industry Publishing House, 2012.
- [10] 李静.辐射采暖房间热舒适问题的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001.
LI Jin. Study on Thermal Comfort in Radiant Heating Room[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.
- [11] 胡冗冗,李万鹏,何文芳,等.秦岭山区民居冬季室内热环境测试[J].太阳能学报,2011,32(2):171-174.
HU Rongrong, LI Wanpeng, HE Wenfang, et al. Study on winter indoor thermal environment of the folk houses in Qin Ling Mountains[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(2): 171-174.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736-2012[S]北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for Design of Heating, Ventilation and Air Conditioning for Civil Buildings: GB 50736-2012 [S] Beijing: Chinese People's Construction Industry Publishing House, 2012.
- [13] BSI. Ergonomics of the Thermal Environment Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria: EN/ISO7730-2005[S]. London: BSI, 2006.

(编辑 桂智刚)