

甘南藏区太阳能主被动联合采暖系统性能

李金平, 王 航, 王兆福, 黄娟娟, 王春龙

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点试验室, 兰州 730050; 3. 西北低碳城镇支撑技术创新中心, 兰州 730050
4. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 中国藏区冬季太阳能仍然十分丰富, 太阳能采暖潜力巨大。为了利用太阳能实现清洁供暖, 以甘肃省合作市上浪坎木村 2 座含被动式阳光间建筑面积为 170 m² 的单体建筑为研究对象, 其中一座使用被动式阳光间和太阳能集热器循环加热采暖, 另一座使用被动式阳光间和牛粪直燃炉采暖, 在相同的环境条件下对比研究了室内热环境、系统经济性和环境效益, 研究表明: 在 48 d 的测试期内, 太阳能主被动联合采暖系统中客厅温度 47 d 高于 14 °C, 只有 1 d 室内最低温度为 13.3 °C, 太阳能主被动联合采暖系统很好地满足了建筑采暖需求, 被动式阳光间和牛粪直燃炉联合采暖室内温度不均匀, 温差大, 客厅温度普遍低于 12 °C; 太阳能主被动联合采暖系统比被动式阳光间和牛粪直燃炉联合采暖每个采暖季节省标煤 4.3 t, 可减少 CO₂、粉尘、SO₂、NO_x 排放量依次为 10.7, 2.92, 0.322 和 0.161 t, 动态投资回收期 4.9 a, 证实了系统的可行性、节能性和经济性, 可用于指导不同地区太阳能主被动结合供暖系统的优化设计和推广应用。

关键词: 太阳能; 采暖; 温度; 阳光间; 热舒适性; 热经济性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.001

中图分类号: TU832.1⁺2; S210.43

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-21-0001-07

李金平, 王 航, 王兆福, 黄娟娟, 王春龙. 甘南藏区太阳能主被动联合采暖系统性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 1-7. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.001 http://www.tcsae.org

Li Jinping, Wang Hang, Wang Zhaofu, Huang Juanjuan, Wang Chunlong. Performance of solar active-passive combined heating system in Tibetan areas of southern Gansu[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(21): 1-7. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.001 http://www.tcsae.org

0 引 言

近年来由于全球环境的持续恶化, 节能减排越来越受到世界各国的关注。随着中国新农村建设的推进和人民生活水平的提高, 人们越来越注重舒适的室内生活环境, 但随之而来的是农村建筑能耗的不断增加。据国家部门统计, 中国目前建筑能耗已经占到社会总能耗的 33%, 可以折算成 11 亿 t 标准煤。太阳能以其资源丰富, 无需开采和运输以及清洁性越来越成为人们青睐的可再生能源^[1-3]。中国西北地区因其太阳能资源丰富, 被动式太阳房得到了广泛的应用, 但由于太阳能的不稳定性和不连续性引起太阳能的利用率较低从而导致采用被动式太阳能供暖房间热稳定性和热舒适性不高^[4]。因此, 高效合理地利用太阳能满足当地居民采暖用能和室内舒适度的要求, 对提高居民生活质量和改善自然环境都具有重要的意义。

国内外学者在利用太阳能采暖方面都已做了大量的研究。国外学者 Badescu 等^[5]通过对一栋 2 层的主被动结合的复合式被动式太阳房利用主动式太阳能热水供暖与热水供应 2 种方案的效果进行了研究, 结果表明可实现

整栋建筑 50%~80% 的热需求。并对系统建立数学模型最终得到该系统的太阳能保证率 0.180~0.679。Rekstad 等^[6]通过试验对比研究了被动式采暖建筑的太阳能主动式供暖和空气-水源热泵供暖能耗情况, 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%。Liu 等^[7]研究了在同一座高原地区建筑的条件下, 对比 3 种不同供暖方式的供暖热效果, 结果表明主动式太阳能供暖的效果最好, 其室内平均温度要比被动式供暖条件下的室内平均温度高出 6 °C。Li 等^[8]对比研究了太阳能主动式供暖与传统锅炉供暖室内温度和室内舒适度, 得到在室外最低温度为-16.2 °C 时, 太阳能供暖的室内平均温度和平均辐射温度分别高出对比建筑 5.4 和 3.3 °C。国内学者王武等^[9]提出了一种主、被动结合的太阳能空气采暖模型, 通过借助 TRNSYS 仿真平台得到在白天平均环境温度 3 °C 时, 南北向的房间温度都可达到 20 °C。于涛^[10]在北京地区构建一套主被动结合采暖系统, 利用 DeST 软件分析了太阳房的影响因素、确定了太阳房的最佳运行方式、计算了太阳房采暖季的节能贡献率为 38.9%。郑豪放^[11]将太阳能空气集热墙被动采暖系统与太阳能炕主动采暖系统结合对青海一处民居进行研究, 结果表明: 空气集热器可将日间室内平均气温提高 4~6 °C, 夜间炕表面温度大部分时间可维持在 30 °C 以上, 完全满足睡眠热舒适度的要求。陈明东等^[12]通过对青岛地区附加阳光间型太阳房及相同结构的对比房室内温度及室外温度参数的监测, 研究了寒冷季节室内温度随室外气象条件变化的

收稿日期: 2018-06-12 修订日期: 2018-08-31

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFB0905104); 国家自然科学基金项目(51676094); 甘肃省国际科技合作专项(1604WKCA009); 兰州市人才创新创业项目(2017-RC-34)

作者简介: 李金平, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事先进可再生能源系统方面的研究。Email: lijiping77@163.com

情况。结果表明在室内无热源及辅助热源条件下,附加阳光间型太阳房室内平均空气温度对比房室内平均空气温度高 3.8 °C,最高温差达 7.2 °C,最低温差 1.1 °C。杨婷婷等^[13]对在石河子地区搭建一种浅层地热联合太阳能集热墙系统的被动式太阳房进行了供暖测试研究,得到在晴天时全天温度基本处于 9.4~13 °C,且白天有 5 h 室内温度超过 12 °C。

综上所述,现有的太阳能供暖技术普遍存在运行不稳定、室内温度低、以及成本高等问题。目前在实际工况下针对中国藏区农村建筑的太阳能主被动结合供暖研究还很少,为此,本文以甘肃省合作市藏族地区的一座农村单体建筑为研究对象,搭建了太阳能主被动结合供暖系统,散热末端采用低温地板辐射采暖系统,重点考察了太阳辐射强度、环境温度以及风速等参数对系统供暖性能的影响规律,为太阳能主被动结合供暖在西北农村地区的推广应用提供技术参考。

1 试验对象与方法

1.1 试验对象

本文选取位于甘肃省甘南藏族自治州合作市上浪坎木村(N34°59', E103°4')的2座结构相似的单体建筑为研究对象。该地区海拔3200 m,全年光照充足,热工分区属严寒地区,冷季长,暖季短,年均气温0.5~3.5 °C,年最低气温可达-23 °C,供暖期长达7个月。试验建筑在原有附加阳光间基础上搭建了主动式太阳能采暖系统,建筑结构如图1所示,对比建筑采用附加阳光间与牛粪炉联合采暖。两座建筑的附加阳光间均为单层玻璃,布置在南向和顶部,试验建筑面积170 m²,使用面积为136 m²(含被动式附加阳光间),采暖面积60 m²,建筑高2.8 m,附加阳光间面积41 m²,围护结构组成及面积见表1和表2,室内采用太阳能低温地板采暖,热水盘管分别布置在客厅、卧室地面及炕面。太阳能集热系统有7组全玻璃真空管太阳能集热器,集热面与地面夹角45°,正南放置,每组集热器由30支长1.8 m、直径0.058 m的全玻璃真空管组成,集热面积为20.2 m²,太阳能系统采暖图如图2所示。

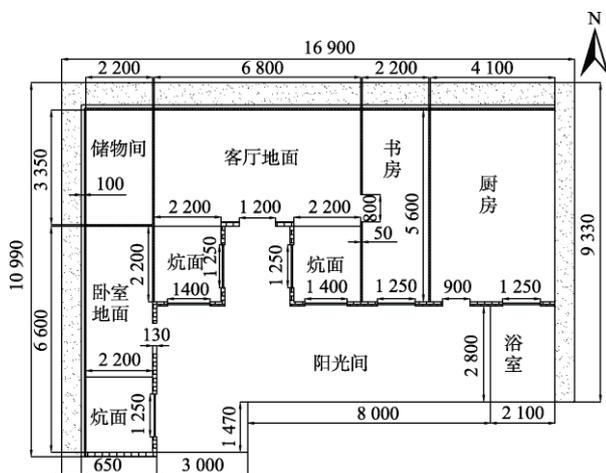


图1 试验建筑平面图
Fig.1 Plane of experimental building

表1 建筑围护结构组成

Table 1 Composition of building envelopes

围护结构 Building envelopes	结构组成 Structural materials
东墙(厨房) East Wall (Kitchen)	65 cm 夯土墙
东墙(卧室) East Wall (bedroom)	11.5 cm 红砖+1.5 cm 水泥抹灰
南墙 South wall	11.5 cm 红砖+1.5 cm 水泥抹灰
西墙 West wall	5 cm 木隔板+10 cm 空气层+65 cm 夯土墙
北墙 North wall	5 cm 木隔板+10 cm 空气层+65 cm 夯土墙
窗 Window	单层玻璃木窗
屋顶 Roof	50 cm 黏土+30 cm 干草+10 cm 木头

表2 建筑围护结构面积及传热系数

Table 2 Area and heat transfer coefficient of building envelopes

围护结构 Building envelopes	面积 Area/m ²	传热系数 Heat transfer coefficient/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
东墙(厨房) East Wall (Kitchen)	18.2	1.17
东墙(卧室) East Wall (bedroom)	8.7	2.26
南墙 South Wall	24.9	2.26
西墙 West Wall	30.5	0.81
北墙 North Wall	47.3	0.81
南窗 South Window	7.4	4.7
东窗 East Window	1.75	4.7
门 Door	6.3	2.5
地面 Floor	60	0.6

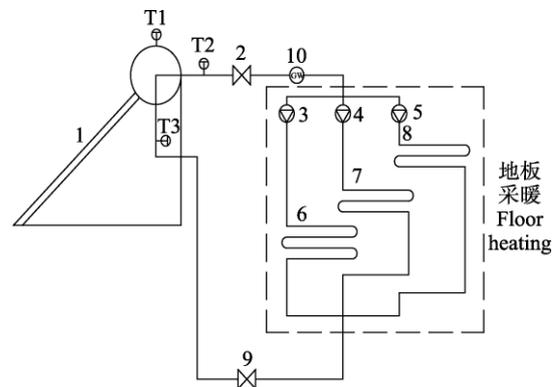


图2 太阳能采暖系统图
1. 太阳能集热器 2、9. 阀门 3、4、5. 供暖循环泵 6、7、8. 地暖盘管 10. 涡轮流量计 T1、T2、T3. 温度传感器
1. Solar collectors 2,9. Valves 3,4,5. Heating circulation pumps 6,7,8. Floor heating coils 10. Turbine flow meters T1,T2,T3. Temperature sensor

图2 太阳能采暖系统图

Fig.2 Schematic diagram of solar heating system

1.2 测试方案及仪器

根据 GB 50785-2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》及 GB/T 15405-2006《被动式太阳房技术与热性能测试方法》的要求测试,测试仪器参数如表3所示。

测试内容:室内外温湿度、室内外风速,太阳辐射强度等参数,具体测点位置:①客厅温度测点布置在客厅对角线上的三等分点处,且分别固定在地板表面和距地面0.1、0.6、1.1、1.7 m处。②太阳辐射仪布置于房顶与水平面夹角45°且没有物体遮挡处。③室外温度测点布置于室外通风处且应避免太阳直接照射。

表 3 测量仪器及参数
Table 3 Measuring instruments and parameters

仪器 Instruments	生产厂家 Manufacturers	型号 Model number	量程 Range	精度 Precision
温度传感器 Temperature sensor	北京威斯特中航科技有限公司	PT100	-50~100 °C	±0.1 °C
湿度传感器 Humidity sensor	北京赛亿凌科技有限公司	STH-TW1-RHT10VP2S0	0~100%RH	±2%RH
太阳辐射仪 Solar radiation meter	辽宁锦州阳光科技有限公司	TBQ-2-B	0~2 000 W·m ⁻²	±2%
热膜风速传感器 Hot film air velocity sensor	广州熙正自动化科技有限公司	YGC-RMFS	0~5 m·s ⁻¹	±0.2%FS
风速传感器 Air velocity sensor	北京飞超风速控制仪器有限公司	FC-2A3	0~30 m·s ⁻¹	±5%
涡轮流量计 Turbine flowmeter	上海帆扬机电有限公司	LWGY-20A	0.4~8 m ³ ·h ⁻¹	±0.5%
数据采集仪 Data acquisition instrument	安捷伦（中国）有限公司	34970A		

测试时间为 2018 年 3 月 20 日至 2018 年 5 月 8 日，以上参数均采用 Agilent 34970A 数据采集仪自动采集和记录，扫描间隔为 10 s。

1.3 计算方法

1.3.1 太阳能采暖系统

蓄热水箱能量平衡关系^[14]

$$Q = Q_1 + Q_2 + \Delta U \quad (1)$$

式中 Q 为每日太阳能集热器吸收的太阳辐射热，J； Q_1 为储热水箱向室内的供热量，J； Q_2 为储热水箱散失的热量，J； ΔU 为储热水箱热水的内能变化量，J。

$$Q_1 = \sum cm'(T_{in} - T_{out})t \quad (2)$$

式中 c 为水的比热容，取 4 200 J/(kg·°C)； m' 为供暖循环水流量，kg/s； T_{in} 为供暖供水温度，°C； T_{out} 为供暖回水温度，°C； t 为数据采集时间间隔，即 $t=10$ s。

$$\Delta U = \sum cm \frac{dT_s}{dt} \quad (3)$$

式中 m 为储热水箱水的质量，kg； T_s 为供暖水箱温度，°C。

1.3.2 建筑耗热量计算

根据《太阳能供热采暖工程技术规范》^[15]计算冬季建筑耗热量，即

$$q_H = q_{HT} + q_{INF} - q_{IN} \quad (4)$$

式中 q_H 、 q_{HT} 、 q_{INF} 、 q_{IN} 分别为某一天的建筑耗热量、建筑围护结构的耗热量、空气渗透耗热量、建筑物内部得热量，W。

$$q_{HT} = (t_i - t_e) \varepsilon FK \quad (5)$$

式中 t_i 、 t_e 分别为在某时刻对应的建筑室内、外温度，°C； ε 为各围护结构的温差修正系数； K 为各围护结构的传热系数，W/(m²·°C)； F 为各围护结构面积，m²。

$$q_{INF} = (t_i - t_e) c_p \rho NV \quad (6)$$

式中 c_p 为空气的比热容，取 1 005 J/(kg·°C)； ρ 为空气的密度，取 1.293 kg/m³； N 为换气次数，取 0.5 次/h； V 为换气体积，按建筑室内体积的 0.6 倍计算^[16]，为 160 m³/次。

建筑物内部得热量一般包括人体散热量、炊事和照明散热量，一般散热量不大且不稳定，故可忽略不计^[17]。

1.3.3 附加阳光间式太阳房所需辅助热量

对于建筑采暖热负荷的计算主要包括建筑物基本传热损失和冷风渗透损失这 2 项，采用 SLR 计算试验房所需的辅助热量 Q_{aux} ^[18]，本文取室内采暖温度 $t_n=14$ °C^[19]，即

$$Q_{aux} = (1 - SHF) \cdot NLC \cdot DD_{14} \quad (7)$$

式中 SHF 为太阳能供暖率；NLC 为太阳房净负荷系数，kJ/(°C·d)； DD_{14} 为采暖度日数，其数值为基础温度 14 °C 和该日室外日平均气温的差值，其单位为 °C·d。

2 结果与分析

2.1 采暖系统供暖稳定性分析

中国藏区冬季气候干燥寒冷，昼夜温差较大，雨雪天气较多。为分析该系统在严寒藏区的供能稳定性，对该建筑采暖热负荷进行计算，参考文献^[15]，其值一般包括基本散热损失和冷风渗透损失^[15]，取该试验建筑冬季采暖室内温度 $t_n=14$ °C^[19]，当地冬季室外计算温度为 -3.4 °C^[20]。根据公式 (7) 计算得试验建筑单位面积供暖辅助热量 $Q_{aux}=39.5$ W/m²。如图 3 所示为全部测试期内连续 48 d 的单位面积太阳能主动式供暖日供热量和日平均辐照强度的变化情况。从图 3 中可以看出：主动式太阳能供暖供热量的最大值 102.6 W/m²，平均值为 57 W/m²，在全部测试期间内除连续 3 d 极端天气外，其余时间供热都能满足需热量要求。

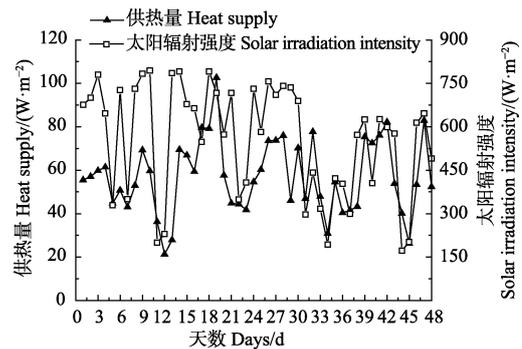


图 3 太阳能主动式采暖系统供热量和平均太阳辐照强度
Fig.3 Heat supply and average solar irradiation intensity of solar active heating system

图 4 为全部测试期间内试验建筑与对比建筑客厅在不同温度范围内的时间相对总测试时间的占比情况，从图 4 中可以看出试验建筑客厅温度在试验期间几乎全部时间都高于 14 °C，占了总时间的 95%，在连续 3 d 极端雨雪天气情况下由于建筑良好的蓄热特性可以减少建筑散热，使得室内温度只有 1 d 不能满足室内温度 $t_n=14$ °C 的要求，最低温度达到 13.3 °C；而对比建筑在测试的大

部分时间里温度都在低于 12 °C 范围, 占总时间的 77.9%, 高于 14 °C 的仅占 8.6%, 由此表明: 除在个别的连续极端天气外, 在极大部分的时间里, 主动式太阳能供暖可以很好的满足建筑供暖需求, 说明该系统有较强的抗干扰性和较好供暖稳定性。

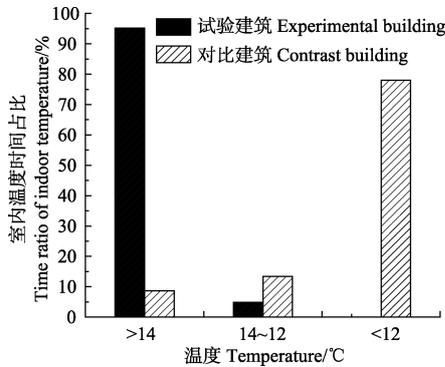


图4 室内温度时间占比

Fig.4 Time ratio of indoor temperature

2.2 室内外温度对比分析

测试采用连续测试方法, 测试时间为 2018 年 3 月 20 日至 2018 年 5 月 8 日。选取 3 月 26、27 日运行情况较好的数据, 以客厅为代表房间对室内温度进行分析, 试验组采用太阳能主动供暖, 供暖时间为 18:00 至次日 08:00, 对照组采用牛粪炉供暖。图 5 是试验建筑和对比建筑室内温度与室外环境温度的变化曲线。

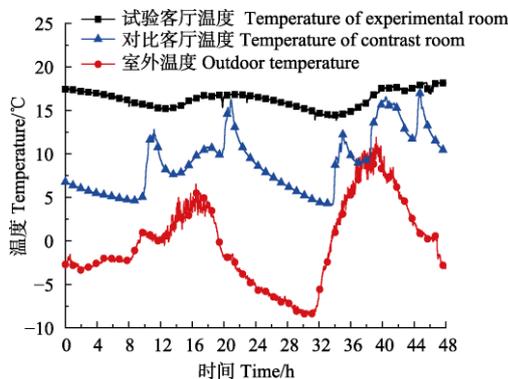


图5 室内与环境温度 (2018-03-26—27)

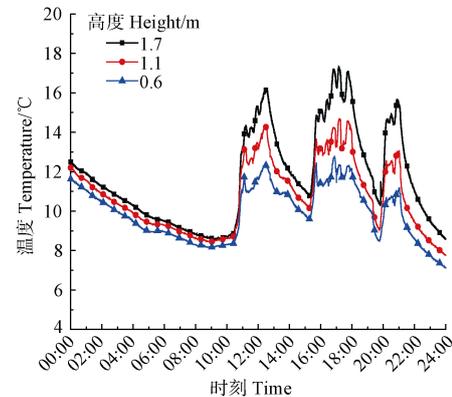
Fig.5 Indoor and ambient temperature (March 26th to 27th 2018)

由图 5 可知室外环境温度在 -8.6~11.9 °C 的范围内波动, 试验建筑客厅平均温度为 16.3 °C, 对比建筑高 7.3 °C, 两座建筑室内最高温差达 11.5 °C, 试验建筑室内最高温度为 18.2 °C, 温度波动幅度为 4.3 °C; 对比建筑室内最高温度为 17.4 °C, 温度波动幅度为 13.2 °C。由此表明, 试验建筑客厅温度达到了 GB50824-2013《农村居住建筑节能设计标准》^[20]规定的 14 °C 的要求, 对于附加阳光间式太阳房采用太阳能主动供暖比采用牛粪炉直燃供暖房室内温度波动性更小, 温度变化更稳定, 极大的改善了藏区民居冬季室内热环境。

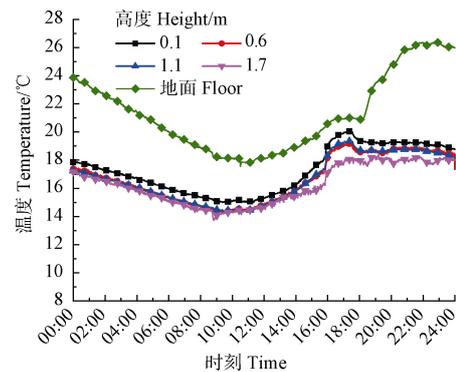
2.3 室内垂直高度方向温度分析

图 6 所示为 2018 年 3 月 30 日两座建筑在垂直方向上不同高度处的温度分布情况。由图 6 可知, 对于采用

牛粪炉直燃采暖的对比建筑, 垂直方向温度分布不均匀, 分层现象明显, 垂直方向温度最大温差为 5.3 °C; 而对于采用地板辐射采暖的试验建筑, 垂直方向温度分布较均匀, 最大温差仅为 1 °C, 空气对流较弱且温度从下至上逐渐降低, 在供暖时地面温度有较明显的温升, 给人一种脚暖头凉的舒适感。相比于传统牛粪炉直燃采暖, 此种采暖方式室内舒适度更高。



a. 对照建筑垂直高度温度
a. Vertical height of contrast building



b. 试验建筑垂直高度温度
b. Vertical height of experimental building

图6 垂直高度温度分布(2018-03-30)

Fig.6 Vertical temperature distribution(2018-03-30)

2.4 水暖炕温度分析

如图 7 所示, 根据藏区农户的生活习惯, 晚上休息时间通常为 20:30 左右, 选择在 2018 年 3 月 27 日晚 19:00 至次日 08:00 的这段时间里对面温度、室内温度、室外环境温度变化曲线进行分析得出: 在睡眠休息期间, 室外环境温度在 -8.6~1.7 °C 范围变化, 水暖炕的炕面平均温度 22.3~34.7 °C 范围内波动, 在 22:00 时到达最大值, 为 34.7 °C。所以当居民在睡眠时人体所处的睡眠环境在夜间睡眠舒适温度 29~34 °C 的范围之间^[21], 因此, 水暖炕在夜间为室内供暖的同时也可以很好地保障人的睡眠舒适度。另外, 该水暖炕是在原有火炕的基础上改造的, 若在炕面下铺设蓄热材料可以使炕有更好的蓄热性能, 温度变化幅度更小。睡眠热舒适度会得到进一步提高。

2.5 太阳能主被动联合供暖系统节能环保效益分析

由于藏区地理环境原因造成当地化石燃料极其缺乏, 当地居民多以畜牧业作为主要经济来源, 这就造成牛粪等牲畜粪便较多且较易获取, 使得当地居民冬季通

常采用牛粪炉来供暖。根据现场统计调查，按该地区采暖季为 210 d 计算，则整个采暖季需要 6 300 kg 牛粪，按牛粪的低位发热量为 $1.53 \times 10^7 \text{ J/kg}$ 计算^[22]折合成标准煤 3 053.2 kg。按当地燃煤的标煤折合系数为 0.714，当地煤炭价格为 1 000 元/t 计算^[23]，则需要煤炭 4.3 t，每个采暖季每户可节省费用 4 300 元。而对于牛粪当地居民通常都是通过捡拾获得，耗费了大量的人力和物力，所以该系统对提升藏区居民的生活品质有着重要的作用。

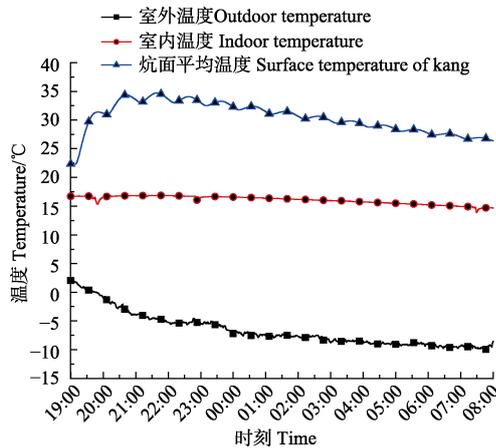


图 7 室内温度、室外环境温度、炕面温度变化 (2018-03-27)
Fig.7 Change in indoor and outdoor temperature, surface temperature of kang (2018-03-27)

根据资料按 1 kg 煤炭燃烧产生 CO_2 为 2.49 kg、粉尘为 0.68 kg、 SO_2 为 0.075 kg、 NO_x 为 0.0375 kg 计算^[24]，每户每个采暖季可少排放 CO_2 、粉尘、 SO_2 、 NO_x 依次分别为 10.7, 2.92, 0.322, 0.161 t，节能减排效益非常显著。

2.6 供暖系统经济性分析

该系统是在原有被动式太阳房基础上进行改造：增加了 7 组太阳能集热器，并在地面铺设了地暖。7 组太阳能集热器价格为 13 650 元，地暖铺设费用为 50 元/ m^2 ，再加上连接管道和阀门等配件，整个系统总投资为 17 875 元，假设系统运行期间每年现金流量相等，净现值 NPV 计算公式为

$$\text{NPV} = (\text{CI} - \text{CO})_i / (1 + R)^i \quad (8)$$

式中 CI、CO 为第 i 年的现金流入、流出； R 为基准折现率，取 5.5%。

动态投资回收期 P_t ，指收回成本所需年数，按下式计算。

$$P_t = A - 1 + \frac{E}{M} \quad (9)$$

式中 A 为累计效益净现值出现正值的年份； E 为第 $A-1$ 年累计效益净现值的绝对值； M 为第 A 年累计效益净现值。

系统每年效益为 4 300 元，系统安装后每年除日常维护外不需要其他额外投入，故第 2 年后成本可计为 0 元，各参数取值如表 4 所示，假设系统的使用寿命为 15 a，通过计算得该系统的净现值 > 0 ，动态投资回收期为 4.9 a，证明了该系统在经济性方面是可行的，收益是可观的。

表 4 太阳能采暖系统经济性分析计算表
Table 4 Economic analysis of solar heating system

年 Year	折现因子 Discounted factor	净现值 Net present value	效益现值 Present value of benefit	净效益现值 Present value of net benefit	累计净效益 Accumulated net benefit
0	1	-17 875	0	-17 875	-17 875
1	0.945	4 550.26	4063.50	4 063.5	-13 811.5
2	0.893	4 815.23	3840.01	3 840.01	-9 971.49
3	0.844	5 094.79	3628.81	3 628.81	-6 342.69
4	0.797	5 395.23	3429.22	3 429.22	-2 913.46
5	0.754	5 702.92	3240.62	3 240.62	327.15
6	0.712	6 039.33	3062.38	3 062.38	3 389.53
7	0.673	6 389.30	2893.95	2 893.95	6 283.48
8	0.636	6 761.01	2734.78	2 734.78	9 018.27

3 结 论

结合甘南藏区民居特点，通过在原有附加阳光间太阳房基础上对其进行主动式太阳能供暖改造，并与对照组进行对比试验研究，测试结果显示系统运行良好，并可以得出以下结论：

1) 在 48 d 的测试期间内，试验建筑温度基本都高于 14 $^{\circ}\text{C}$ ，占总测试时间的 95%，系统的供热量除在个别极端天气外，都可以很好满足建筑的供暖需求，表明系统的供能稳定性较好，抗干扰能力较强。

2) 当室外环境最低温度为 -8.6°C 时，附加阳光间与主动式太阳能结合供暖建筑室内客厅平均温度为 16.3 $^{\circ}\text{C}$ ，比对比建筑高 7.3 $^{\circ}\text{C}$ ，两座建筑室内最高温差达 11.5 $^{\circ}\text{C}$ ，且温度波动较小，竖直高度分布均匀，室内热舒适性好，使藏区建筑室内的热环境和居民生活品质都有了极大改善。

3) 改造后的建筑完全可以通过太阳能主动式供暖使室内温度到达 14 $^{\circ}\text{C}$ ，且水暖炕温度可以在夜间睡眠时维持在 22.3~34.7 $^{\circ}\text{C}$ ，该温度范围属于人体睡眠舒适温度，提高了人们睡眠时的热舒适度。

4) 改造后的建筑每个采暖季可以节省标煤 4.3 t，可少排放 CO_2 为 10.7 t、粉尘为 2.92 t、 SO_2 为 0.322 t、 NO_x 为 0.161 t，系统的动态投资回收期为 4.9 a，节能减排和经济性效益明显，该系统的推广使用对改善藏区环境有着重要的意义。

[参 考 文 献]

[1] 魏蔚, 季杰, 罗成龙, 等. 复合太阳能炕系统运行模式的实验研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 806-812.
Wei Wei, Ji Jie, Luo Chenglong, et al. Experimental study of a combined solar kang system operating mode[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(3): 806-812. (in Chinese with English abstract)

[2] 李金平, 王磊, 李修真, 等. 西北新农村建筑太阳能主动供暖试验研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(11): 1680-1685.
Li Jinping, Wang Lei, Li Xiuzhen, et al. Experimental study on active solar heating for new rural residence in northwest

- China[J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(11): 1680—1685. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王纯, 姜曙光, 程博, 等. 太阳能集热墙与地下室复合系统冬季供暖试验研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(3): 678—683. Wang Chun, Jiang Shuguang, Cheng Bo, et al. Experimental study on heating of the system combined solar wall with basement in winter[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2016, 37(3): 678—683. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吴玉富. 中国建筑节能现状与趋势调研分析[J]. *低碳世界*, 2017(17): 151—152. Wu Yufu. Investigation and analysis on current situation and trend of building energy saving in China[J]. *Low Carbon World*, 2017(17): 151—152. (in Chinese with English abstract)
- [5] Badescu V, Staicovici M D. Renewable energy for passive house heating: Model of the active solar heating system[J]. *Energy & Buildings*, 2006, 38(2): 129—141.
- [6] 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 & Buildings*, 2015, 96: 149—161.
- [7] Liu Z, Wu D, Jiang M, et al. Field Measurement and evaluation of the passive and active solar heating systems for residential building based on the Qinghai-Tibetan Plateau Case[J]. *Energies*, 2017, 10(11): 1706.
- [8] Li J, Li X, Wang N, et al. Experimental research on indoor thermal environment of new rural residence with active solar water heating system and external wall insulation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95: 35—41.
- [9] 王武, 季杰, 于志, 等. 一种主、被动结合的太阳能空气采暖模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(6): 1331—1336. Wang Wu, Ji Jie, Yu Zhi, et al. Simulation study of solar air heating in active and passive mode[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(6): 1331—1336. (in Chinese with English abstract)
- [10] 于涛. 主被动结合式太阳能采暖系统的综合性能研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2015. Yu Tao. Combination of Active and Passive Solar Heating System of Comprehensive Performance[D]. Beijing: North China University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郑豪放. 太阳能炕主被动复合采暖系统在青海的应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016. Zheng Haofang. Experimental Study on Solar Kang System Combing Active and Passive Heating in Qinghai[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈明东, 史宇亮, 刘学兵. 附加阳光间型被动式太阳房供暖实验研究[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(6): 944—947. Chen Mingdong, Shi Yuliang, Liu Xuebing. Heating study of passive solar house with sunspace[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2012, 33(6): 944—947. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨婷婷, 姜曙光, 杨骏, 等. 浅层地热联合太阳能集热墙系统冬季室内供暖试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 183—189. Yang Tingting, Jiang Shuguang, Yang Jun, et al. Experiment on heating system combined shallow geothermal energy with solar wall in winter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(20): 183—189. (in Chinese with English abstract)
- [14] 冯荣, 李金平, 李修真, 等. 太阳能加热的地上式户用沼气生产系统热性能分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 196—200. Feng Rong, Li Jinping, Li Xiuzhen, et al. Thermal performance of over-ground household biogas production system heated by solar energy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(15): 196—200. (in Chinese with English abstract)
- [15] 太阳能供热采暖工程技术规范: GB 50495-2009[S].
- [16] 孙刚, 贺平, 王飞, 等. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 10—11.
- [17] 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ26-2010 [S].
- [18] 李元哲. 被动式太阳房热工设计手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [19] 民用建筑热工设计规范: GB 50176-2016[S].
- [20] 农村居住建筑节能设计标准: GBT50824-2013[S].
- [21] 江清阳, 何伟, 季杰, 等. 太阳能炕的蓄热特性研究及其对睡眠热舒适度的影响[J]. *中国科学技术大学学报*, 2012, 42(4): 335—344. Jiang Qingyang, He Wei, Ji Jie, et al. Study on thermal storage performance of solar Kang and thermal comfort for sleeping environments[J]. *Journal of University of Science & Technology of China*, 2012, 42(4): 335—344. (in Chinese with English abstract)
- [22] 喻斌斌. 畜禽粪便热解特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. Yu Binbin. Study of Pyrolysis Characteristics of Livestock and Poultry Dung[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [23] 包森, 田立新, 王军帅. 中国能源生产与消费趋势预测和碳排放研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(8): 1248—1254. Bao Sen, Tian Lixin, Wang Junshuai. Trend forecast of energy production and consumption in china and research of carbon emissions[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1248—1254. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘睿, 翟相彬. 中国燃煤电厂碳排放量计算及分析[J]. *生态环境学报*, 2014(7): 1164—1169. Liu Rui, Zhai Xiangbin. Calculation and analysis of carbon emissions from coal-fired power plants in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014(7): 1164—1169. (in Chinese with English abstract)

Performance of solar active-passive combined heating system in Tibetan areas of southern Gansu

Li Jinping, Wang Hang, Wang Zhaofu, Huang Juanjuan, Wang Chunlong

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

2. *Key Laboratory of Energy Supply System Drived by Biomass Energy and Solar Energy of Gansu Province, Lanzhou 730050, China;*

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

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

Abstract: The traditional heating methods in winter, in Tibetan areas in China are relatively backward, and the indoor living environment is poor. Owing to the abundant solar energy in the Tibetan areas of China, the potential of solar heating is huge. In order to use solar energy to achieve the clean heating, two single buildings with a passive sunlight area of 170 m² in Shanglangkanmu, a village of Hezuo in Gansu Province, were studied, as research objects, one of which used passive sunspace and cow dung direct-fired furnace for heating, and the other used passive sunspace and solar collectors for heating. The solar collector system has 7 sets of all-glass vacuum tube solar collectors. The collector surface was placed at an angle of 45° to the ground. It was positioned in the south, and the amount of collectors of each group was 30. All-glass vacuum tube was 1.8 m of length, 0.058 m of diameter, and 20.2 m² of heat collection area. Under the same environmental conditions, the theoretical and experimental methods were used to compare the indoor thermal environment, systemic economic and environmental benefits. The test time was from March 20th to May 8th, 2018. The indoor and outdoor temperature, indoor and outdoor wind speed, solar radiation intensity and other parameters were investigated. The data were automatically recorded by computer. The research results show that in the 48 d test period, the days of living temperature higher than 14 °C in experimental building with the solar energy active and passive combined heating system is 47 d, indoor minimum temperature of 13.3 °C is for only 1 day, the heat supply of the system in addition to individual extreme weather, can satisfy the heating needs of the building well, indicating that the system's energy supply stability is well, anti-interference ability is strong. When the outdoor environment minimum temperature is -8.6 °C, the average indoor temperature of experimental building with combined sunspace and active solar heating system is 16.3 °C, which is 7.3 °C higher than that of the contrast building, between the two buildings the highest temperature difference is 11.5 °C, and the temperature fluctuation of the experimental building is small. The temperature in vertical height is evenly distributed, the indoor thermal comfort is well, the temperature of experimental building can completely reach the indoor temperature by 14 °C through the solar active heating, and the temperature of kang can be maintained at 22.3-34.7 °C during night sleep time, it belongs to the human body sleep comfort temperature which improves the comfort of people during sleep. The solar energy active and passive combined heating system satisfies the heating demand of the building well. The temperature in contrast building with the passive sunspace and the cow dung direct combustion furnace is nonuniform, the difference of temperature is distinguished, the living room temperature is generally lower than 12 °C. Compared with the contrast building, the experimental building with solar energy active and passive combined heating system can reduce 4.3 t standard coal in the heating season, which can reduce the CO₂, dust, SO₂, and NO_x emissions by 10.7, 2.92, 0.322 and 0.161 t, respectively. The dynamic investment payback period is 4.9 a. It proves the feasibility, energy saving and economy of the system, and can be utilized to guide the optimal design and popularization of solar energy active and passive combined heating systems in different regions.

Keywords: solar energy; heating; temperature; sunspace; thermal comfort; thermal economy