

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.004

# 不同朝向外墙传热阻变化对多空间 太阳房室内操作温度的影响

崔晓玲<sup>1</sup>, 桑国臣<sup>1</sup>, 崔宏志<sup>2</sup>, 王文康<sup>1</sup>, 朱轶韵<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广州 深圳 518060)

**摘要:** 结合对拉萨地区太阳房的实地调研与室内温度测试, 建立典型建筑模型和多空间直接受益式太阳房热平衡方程, 分析不同朝向外墙传热阻变化对主次房间室内操作温度的影响规律。研究表明: 增大南墙传热阻可使各房间室内操作温度略有提高, 增大北墙传热阻对南向房间的温度提升作用不明显, 但增大东、西墙传热阻可显著提高南向房间的操作温度; 当东、西墙传热阻由  $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  增大至  $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  时, 可使南向中间和两侧主要房间的操作温度分别由  $8.67^\circ\text{C}$ 、 $7.76^\circ\text{C}$  升高至  $9.31^\circ\text{C}$ 、 $9.06^\circ\text{C}$ , 操作温度升高幅度分别是等量增加南、北墙传热阻时的 145.5%、104.9% 和 371.4%、254.9%; 此外, 不同朝向外墙传热阻变化对主次房间操作温度差的影响存在明显差异, 增大东、西墙和南墙传热阻会提高主次房间温度差, 增大北墙传热阻则会降低主次房间温度差。

**关键词:** 直接受益式太阳房; 多空间; 墙体传热阻; 操作温度

**中图分类号:** TK512

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2020)01-0025-08

## Influence of external wall thermal resistance changes in different orientations at indoor operating temperature of multi-space solar house

CUI Xiaoling<sup>1</sup>, SANG Guochen<sup>1</sup>, CUI Hongzhi<sup>2</sup>, WANG Wenkang<sup>1</sup>, ZHU Yiyun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Based on the field investigation and indoor temperature test of solar building in Lhasa area, the typical building models were built. The thermal balance equation of multi-space direct-gain passive solar house was established, with the influences of the heat transfer resistance change of the exterior walls in different orientations at the operating temperature of the primary and secondary room in a multi-space solar house analyzed. The results show that increasing the heat transfer resistance of the south wall, the operating temperature of each room increased only slightly. However, increasing the heat transfer resistance of the north wall by the same amount has no obvious effect on the indoor operating temperature of the main room located in the south direction. Moreover, the equivalent increase of the thermal resistance of east and west wall significantly improves the operating temperature of the main rooms in the south direction. When the thermal resistance of east and west wall is increased from  $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  to  $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ , the operating temperature of the southern primary rooms in the middle and both sides increases from  $8.67^\circ\text{C}$  and  $7.76^\circ\text{C}$  to  $9.31^\circ\text{C}$  and  $9.06^\circ\text{C}$ , respectively. The growth of operating temperatures of the primary rooms in the middle and both sides is 145.5% and 104.9%, 371.4% and 254.9% of the equivalent increase of the south and north wall thermal resistance, respectively. In addition, the influence of different orientation wall thermal resistances on the temperature difference

收稿日期: 2020-01-03; 网络出版日期: 2020-04-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200421.0743.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678482); 陕西省重点产业创新链(群)资助项目(2020ZDLNY06-05)

第一作者: 崔晓玲, 女, 讲师, 博士, 研究方向为新型结构与节能构造体系。E-mail: hongbeibei@xaut.edu.cn

通信作者: 桑国臣, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为建筑节能与节能材料。E-mail: sangguochen@xaut.edu.cn

between the primary and secondary room is of difference. Increasing the thermal resistance of the eastern, western and southern wall can increase the temperature difference between the primary and secondary room, while increasing the thermal resistance of the north wall can decrease the temperature difference between the primary and secondary rooms.

**Key words:** direct-gain passive solar house; multi-space; wall thermal resistance; operating temperature

西藏高原生态脆弱、冬季寒冷,但太阳能资源丰富,年平均日照时数 3 005 h,年太阳辐射总量  $8\,160\text{ MJ/m}^2$  [1]。因地制宜地发展太阳能采暖建筑对提高西藏高原人居环境质量和生态环境保护具有积极作用。直接受益式太阳房因其构造简单、造价低,是西藏高原地区备受关注的乡村居住建筑发展形式 [2-5]。但太阳辐射能是低密度能源,建筑被动式集热总量有限,冬季室内温度偏低仍是该类建筑亟待解决的问题。尽管乡村太阳房冬季室内热环境较城镇居住建筑要求低 [6],但西藏高原乡村居住建筑的围护结构传热系数偏大,仅靠传统的被动式集热设计,难以获得预期的冬季室内热环境质量 [7-9]。依据房间使用功能的差异进行主次房间合理组织,目前已成为当地乡村居住建筑提升太阳能热利用效益的常规技术手段 [10]。但多空间直接受益式太阳房的热过程较为复杂,建筑的得热和失热过程受多朝向、非对称的复杂边界条件影响,故不同朝向外墙的传热阻变化对室内热环境影响不尽相同 [7-8,11]。与室内空间合理组织相结合,优化墙体热工性能是提高直接受益式太阳房冬季室内热环境的有效措施。

本文结合拉萨冬季气候特征和乡村居住建筑特点,分析不同朝向外墙传热阻变化对多空间太阳房主次房间室内操作温度的影响规律,为改善当地直接受益式太阳房的室内热环境质量提供参考。

## 1 室外气象参数与建筑分析模型

### 1.1 采暖期室外气象参数

直接受益式太阳房的室内热状况与建筑参数、太阳辐射强度、室外空气温度密切相关。采暖期拉萨地区太阳房南立面日平均太阳辐射强度为  $220.6\text{ W/m}^2$ ,室外空气温度平均值为  $0.9^\circ\text{C}$ ,水平面、南、东、西、北向垂直面的室外综合温度平均值分别为  $1.3^\circ\text{C}$ 、 $5.0^\circ\text{C}$ 、 $1.8^\circ\text{C}$ 、 $1.2^\circ\text{C}$ 、 $-0.5^\circ\text{C}$  [12]。可见,拉萨地区南向太阳辐射强度较高,不同朝向的室外综合温度相差较大。这导致该地区直接受益式太阳房不同朝向围护结构传热过程中的边界条件存在显著差异。

### 1.2 太阳能建筑实地调研

课题组于 2016 年 12 月 26 日至 30 日对拉萨地

区直接受益式太阳房的特点与现状进行了实地调研,选取其中一栋代表性建筑,如图 1 所示,对墙体构造、空间组织等建筑特征参数进行了测绘,采用 175-H1 型自记式高精度温湿度计(测量精度  $0.1^\circ\text{C}$ )对该建筑的室内热环境进行测试。



图 1 测试建筑的实景图

Fig. 1 Real view of passive solar building being tested

测试建筑(图 1)为直接受益式太阳房,南北朝向,南向开大窗、北向开小窗,具备当地乡村建筑的典型特征。该建筑平面图如图 2 所示。主要房间位于南侧,次要房间位于北侧。除客厅与厨房之间的墙体是薄板外,其余围护墙体均为 500 mm 厚的土坯墙;房间门为木门,窗户为铝合金单层玻璃窗,南、东、北向窗墙比分别为 0.42、0.2、0.1。仅客厅和厨房设有炉灶,可进行间歇性采暖。测试期间的室内平均风速为  $0.14\text{ m/s}$ ,平均室内逐时空气温度如图 3 所示。

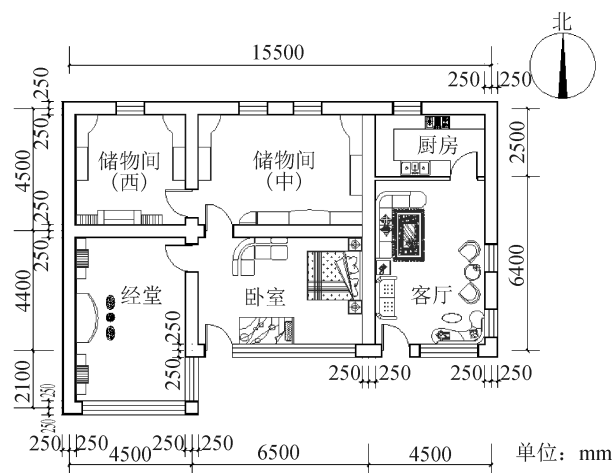


图 2 测试建筑的平面图

Fig. 2 Plan of passive solar building being tested

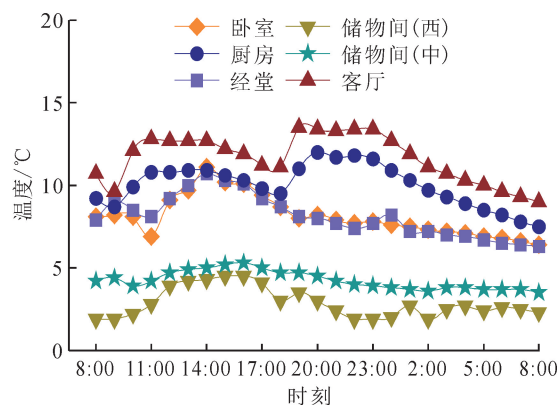


图3 室内温度测试值

Fig. 3 Test values of indoor air temperature

由图3可知,南向主要房间(经堂、卧室、客厅)的平均温度为 $8.1^{\circ}\text{C}$ ,北向次要房间(两个储物间)的平均温度为 $3.6^{\circ}\text{C}$ 。

测试结果表明,室外传热边界条件的不同导致了多空间太阳房主次房间的温度存在显著差异,但室内整体温度水平较低。

### 1.3 建筑分析模型

在对拉萨乡村居住建筑现状和发展趋势的实地调研及乡村居住建筑热工性能相关研究的基础上<sup>[6,13-15]</sup>,确定建筑分析模型的特征参数,如表1所示。

表1 建筑分析模型的特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of building analysis model

| 建筑<br>面积/ $\text{m}^2$ | 层高/<br>m | 南向窗墙<br>面积比 | 平面尺寸/m |      | 构件传热阻/ $(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$ |      |      |      |      |      |
|------------------------|----------|-------------|--------|------|----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                        |          |             | 东西轴线   | 南北轴线 | 外墙                                                       | 内隔墙  | 屋顶   | 外窗   | 户门   | 地面   |
| 143.6                  | 3.3      | 0.25        | 16.2   | 8.1  | 0.53~2.33                                                | 0.37 | 1.25 | 0.43 | 0.40 | 3.33 |

基于对拉萨地区既有乡村直接受益式太阳房空间组织特点及其室内空间模式演变趋势的调研<sup>[7-8,16]</sup>,结合当地居民对建筑室内空间的功能划分需求,确定出多空间建筑分析模型如图4所示。模

型中南向主要房间(经堂、卧室和起居室)的开间和进深均为 $5.4\text{ m}$ ;北向次要房间(厨房和两个储物间)的进深为 $2.7\text{ m}$ ,开间 $5.4\text{ m}$ 。

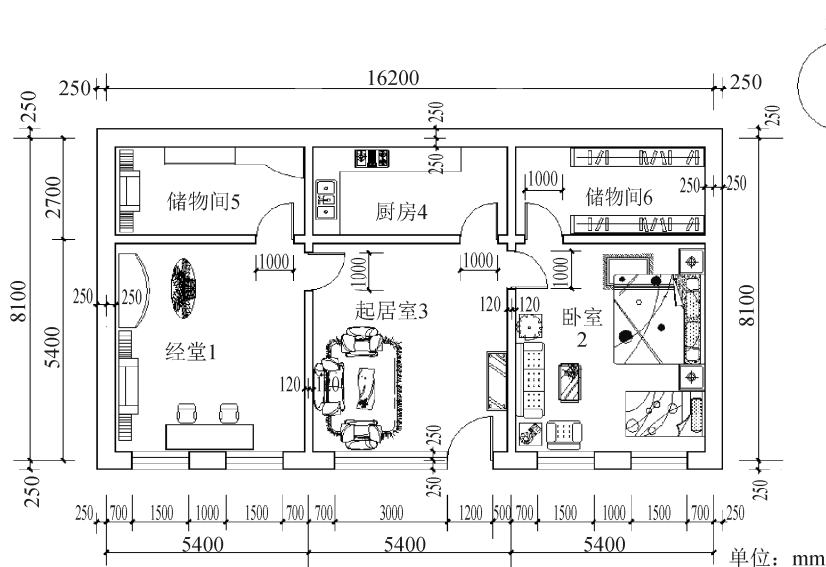


图4 建筑分析模型的室内空间组织

Fig. 4 Space arrangement of building analysis model

## 2 室内热环境评价参数的确定

由于直接受益式太阳房的室内热能主要源自太阳辐射能,其室内热环境受太阳辐射强度的周期性作用影响,因此室内空气温度和壁面辐射温度的非同步特征显著。为综合考虑室内空气温度和壁面辐射温度对热环境的影响,本文选用室内操作温度作

为热环境评价参数<sup>[17-20]</sup>。

### 2.1 室内操作温度

采暖期内多空间直接受益式太阳房中的任意房间(第 $j$ 房间)的室内操作温度平均值 $\overline{t_{o,j}}$ 为:

$$\overline{t_{o,j}} = (\overline{t_{r,j}}\alpha_r + \overline{t_{i,j}}\alpha_c) / (\alpha_r + \alpha_c) \quad (1)$$

式中: $\overline{t_{i,j}}$ 为室内空气温度平均值, $^{\circ}\text{C}$ ;  $\overline{t_{r,j}}$ 为室内平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_c$ 为对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} / \text{K}$ ;  $\alpha_r$

为辐射换热系数,  $W \cdot m^{-2}/K$ 。由于测试建筑的室内风速低于  $0.2 m/s$ , 故取辐射换热系数和对流换热系数近似相等<sup>[21]</sup>, 由式(1)得:

$$\overline{t_{0,j}} = 0.5 \overline{t_{r,j}} + 0.5 \overline{t_{i,j}} \quad (2)$$

$$\overline{t_{r,j}} = \frac{\overline{\theta_{i,S,j}} \cdot S_{S,j} + \overline{\theta_{i,E,j}} \cdot S_{E,j} + \overline{\theta_{i,W,j}} \cdot S_{W,j} + \overline{\theta_{i,N,j}} \cdot S_{N,j} + \overline{\theta_{i,R,j}} \cdot S_{R,j}}{S_{S,j} + S_{E,j} + S_{W,j} + S_{N,j} + S_{R,j}} \quad (3)$$

式中:  $\overline{\theta_{i,S,j}}$ 、 $\overline{\theta_{i,E,j}}$ 、 $\overline{\theta_{i,W,j}}$ 、 $\overline{\theta_{i,N,j}}$ 、 $\overline{\theta_{i,R,j}}$  为第  $j$  房间所对应的南墙、东墙、西墙、北墙及屋顶内表面温度平均值,  $^{\circ}C$ ;  $S_{S,j}$ 、 $S_{E,j}$ 、 $S_{W,j}$ 、 $S_{N,j}$ 、 $S_{R,j}$  为第  $j$  房间所对应的南墙、东墙、西墙、北墙及屋顶内表面面积,  $m^2$ 。

第  $j$  房间的内表面温度<sup>[23]</sup>为:

对于外墙或屋顶:

$$\overline{\theta_{i,x,j}} = \overline{t_{i,j}} - \frac{R_i}{R_{0,x}} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_e}) \quad (4)$$

对于相邻房间的隔墙:

$$\overline{\theta_{i,y,j}} = \overline{t_{i,j}} - \frac{R_i}{R_{0,y}} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_{i,y}}) \quad (5)$$

式中:  $\overline{t_e}$  为采暖期室外空气温度平均值,  $^{\circ}C$ ;  $\overline{t_{i,y}}$  为

$$q_{cc,j} \cdot A_{0,j} + 3.8A_{0,j} + \sum_{y=1}^m \frac{1}{R_{0,W,y,j}} F_{W,y,j} \overline{\Delta t_{yy}} - \sum_{x=1}^n \frac{1}{R_{0,W,x,j}} F_{W,x,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_{sa,x,j}}) - \sum_{z=1}^l \frac{1}{R_{0,dw,z,j}} F_{dw,z,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_e}) - \frac{1}{R_{0,R,j}} F_{R,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_{sa,R,j}}) - \frac{1}{R_{0,G,j}} F_{G,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_e}) - (c_p \rho N V_j) (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_e}) = 0 \quad (6)$$

式中:  $q_{cc,j}$  为单位建筑面积集热量,  $W/m^2$ ;  $A_{0,j}$  为第  $j$  房间的建筑面积,  $m^2$ ;  $R_{0,W,y,j}$  为与邻室  $y$  之间隔墙传热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $R_{0,W,x,j}$ 、 $R_{0,R,j}$ 、 $R_{0,G,j}$ 、 $R_{0,dw,z,j}$  分别为  $x$  外墙、屋顶、地面及门窗的传热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $F_{W,y,j}$  为与邻室  $y$  之间隔墙面积,  $m^2$ ;  $F_{W,x,j}$ 、 $F_{R,j}$ 、 $F_{G,j}$ 、 $F_{dw,z,j}$  分别为  $x$  外墙、屋顶、地面及门窗的面积,  $m^2$ ;  $\overline{\Delta t_{yy}}$  为与邻室  $y$  的温度差,  $^{\circ}C$ ;  $\overline{t_{sa,x,j}}$ 、 $\overline{t_{sa,R,j}}$  分别为  $x$  外墙和屋顶所对应的采暖期室外综合温度平均值,  $^{\circ}C$ ;  $c_p$  为空气定压质量比热容, 取  $0.28^{[23]}$ ,  $W \cdot h/(kg \cdot K)$ ;  $\rho$  为空气密度,  $kg/m^3$ ;  $N$  为换气次数, 取  $0.5 h^{-1}$ <sup>[24]</sup>;  $V_j$  为换气体积,  $m^3$ ;  $m$ 、 $n$ 、 $l$  分别为与邻室  $y$  之间隔墙的数量、 $x$  外墙的数量以及门窗的数量。

由式(6)建立各房间的热平衡方程, 进而推导出以室内空气温度为自变量的一次线性热平衡方程组, 代入建筑参数与采暖期室外热环境参数, 可得到各房间室内空气温度。

由此, 可根据式(3)和式(6)计算出多空间太阳房各房间的壁面辐射温度和空气温度, 进而利用式(2)得出各房间的操作温度平均值。

## 2.2 各房间室内辐射温度

直接受益式太阳房是由多个房间组合而成, 其中, 第  $j$  房间室内平均辐射温度<sup>[22]</sup>为:

与  $j$  房间相邻的  $y$  房间室内空气温度平均值,  $^{\circ}C$ ;  $R_{0,x}$  为外墙或屋顶传热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $R_{0,y}$  为室内隔墙传热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $R_i$  为第  $j$  房间墙体内表面换热阻, 取  $0.11, m^2 \cdot K/W$ <sup>[23]</sup>。

## 2.3 各房间室内空气温度

多空间直接受益式太阳房在自然运行条件下, 各房间由于所处位置不同, 其得、失热量不同, 从而导致其室内空气温度不同。因此, 多空间太阳房不仅存在室内外传热现象, 同时还存在邻室传热现象。多空间太阳房室内任一房间( $j$  房间)的热平衡方程为:

## 3 外墙传热阻对室内操作温度的影响

结合建筑接收太阳辐射能的朝向差异性特点, 对太阳房室内空间进行合理组织有利于提高主要房间的热环境质量。但不同朝向外墙传热阻变化对主要房间室内操作温度的影响却不尽相同。

### 3.1 不同朝向墙体传热阻变化对室内操作温度的影响

多空间太阳房各房间温度存在的差异, 使得建筑内部房间均同时存在室内外传热及邻室间传热多个热传递过程, 因而不同朝向外墙传热阻变化对各房间热环境的影响也不同。对外墙传热阻由  $0.53 m^2 \cdot K/W$  增加至  $2.33 m^2 \cdot K/W$  时的室内操作温度变化情况进行分析, 各主要房间操作温度随不同朝向外墙传热阻增加的变化情况如图 5 所示。

由图 5 中的操作温度差异可知, 增加任意朝向外墙传热阻都能提高主要房间室内热环境指标, 但提高的幅度却并不相同。

不同朝向外墙传热阻增加引起的各房间室内操作温度变化情况如图 6 所示。

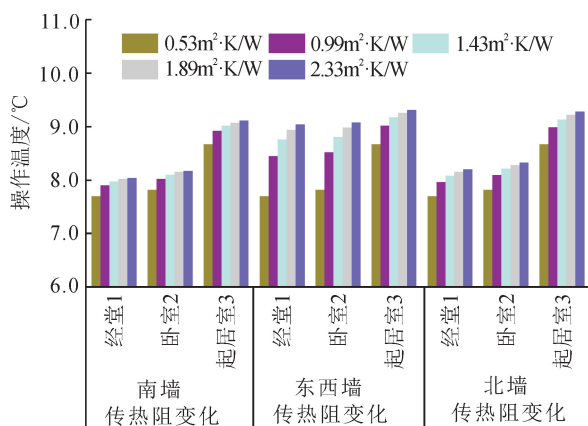


图5 不同朝向墙体传热阻对应的室内操作温度  
Fig. 5 Influence of different orientation wall thermal resistances on operating temperature

由图 6(a)可见,当南墙传热阻由  $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  增加到  $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  时,各房间室内操作温度略有提高,且位于南向的主要房间的操作温度比北向次要房间的操作温度提高幅度略大。其中,位于南向中间的起居室的室内操作温度和位于两侧的经堂、卧室的操作温度平均值分别提高了  $0.44^\circ\text{C}$  和  $0.35^\circ\text{C}$ ,而位于北向的次要房间的操作温度提高值小于  $0.2^\circ\text{C}$ 。

图 6(b)表明,等量增加北墙传热阻对位于北向的次要房间操作温度提高较为明显,但对位于南向的主要房间室内操作温度提高幅度较小。当北墙传热阻由  $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  增加到  $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  时,南向起居室操作温度和经堂、卧室平均操作温度分别提高了  $0.61^\circ\text{C}$  和  $0.51^\circ\text{C}$ ,但北侧次要房间操作温度平均值却提高了  $1.69^\circ\text{C}$ 。

从图 6(c)可见,等量增加东、西墙传热阻对主要房间操作温度的提高幅度明显优于南墙和北墙,当传热阻由  $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  增加到  $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  时,中间起居室操作温度和两侧经堂、卧室操作温度平均值分别提高了  $0.64^\circ\text{C}$  和  $1.30^\circ\text{C}$ ,次要房间操作温度平均值提高了  $0.7^\circ\text{C}$ 。其中,起居室操作温度提高幅度分别是南墙和北墙传热阻增加时的  $145.5\%$  和  $104.9\%$ ;经堂、卧室操作温度平均值提高幅度更为显著,分别是南墙和北墙传热阻增加时的  $371.4\%$  和  $254.9\%$ 。外墙传热阻变化对室内操作温度影响规律表明,等量增加东、西墙传热阻对主要房间室内热环境改善作用最大,北墙次之,而南墙最小。

上述分析表明,直接受益式太阳房在自然运行状态下,不同房间室内操作温度的差异既与太阳能作用的朝向差异性有关,又与不同朝向墙体的传热阻变化密切相关。

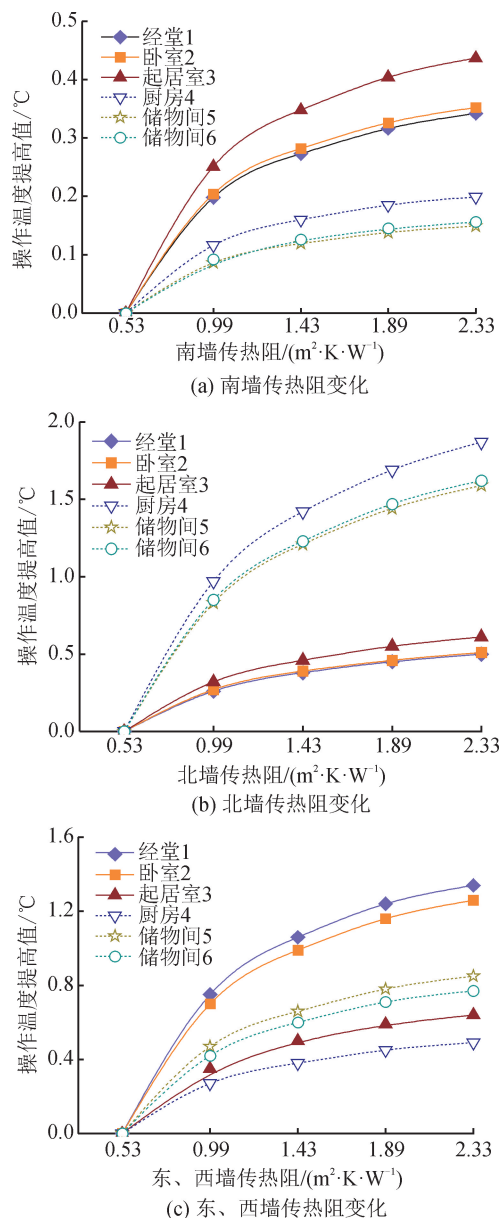


图6 不同朝向外墙传热阻增加引起的各房间操作温度变化  
Fig. 6 Operating temperature changes caused by thermal resistance increase of different orientation external walls

### 3.2 不同朝向墙体传热阻变化对主次房间室内操作温度差的影响

前文分析表明,各房间温度均随墙体传热阻增加而提高,但不同朝向外墙传热阻等量变化时,主次房间温度的提高幅度却并不相同。为了优化多空间太阳房墙体热工设计,有必要进一步对主次房间的操作温度差随不同朝向外墙传热阻增加的变化规律进行分析。

图 7 为墙体传热阻变化对主次房间操作温度差的影响(以经堂、卧室和起居室操作温度的平均值作为“主要房间操作温度”,以储物间 5、储物间 6 和厨房 4 的操作温度的平均值作为“次要房间操作温度”)。

图8是不同朝向外墙传热阻最大( $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ )时主次房间操作温度状况。

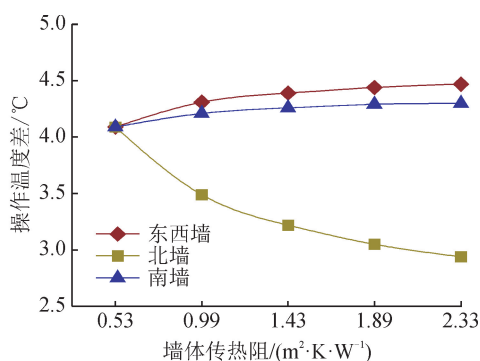


图7 墙体传热阻变化对主次房间操作温度差的影响  
Fig. 7 Influence of exterior wall heat transfer resistance on change of operating temperature difference between primary and secondary rooms

由图7可见,不同朝向外墙传热阻变化对主次房间操作温度差的影响差异显著,主次房间温度差会随东、西墙和南墙传热阻增大而增大,随北墙传热阻增大而减小。

北墙传热阻由  $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  增加到  $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  时,主次房间操作温度差由  $4.1^\circ\text{C}$  降低至  $2.9^\circ\text{C}$ ,降低了29.3%,其原因主要在于北墙传热阻的增加,提升了北侧次要房间的温度。同时,由于北向室外综合温度较低,北墙传热阻增加也有利于降低建筑传热失热量,从而使建筑整体室内热环境有所改善。结合图8可以发现,当北墙传热阻最大时,次要房间温度为  $5.7^\circ\text{C}$ ,分别比南墙和东、西墙传热阻最大时高出了39.0%和21.3%,且其主要房间温度也高于南墙传热阻最大时的情况。由此说明,增加北墙传热阻弱化了室内热能在主次房间内的分配差异,但对整体建筑的热环境却有所改善。

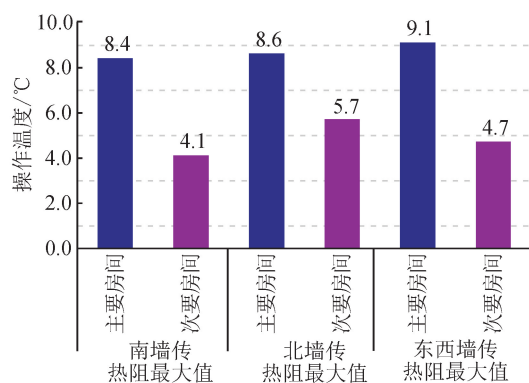


图8 不同朝向外墙传热阻最大时的主次房间操作温度  
Fig. 8 Operating temperatures of the primary and secondary rooms under the maximum thermal resistance of external walls

南墙传热阻增大时,主次房间温度差略有提高

(见图7),其原因是南墙传热阻增加减小了南墙失热量,但由于南向室外综合温度高,建筑净得热量的增加幅度并不大。因此,当南墙传热阻为最大值时,其主次房间的温度均较低(见图8)。由此说明,虽然增加南墙传热阻会提高室内热能在主要房间内的分配比例,但建筑的整体热环境改善不明显。

东、西墙传热阻增加使主次房间温差加大(见图7),其原因是随着东、西墙传热阻增大,建筑经东、西墙由室内向室外的传热失热量减少,从而使主要房间(特别是位于两侧的经堂、卧室)温度显著提高,辅助房间温度也略有提高。结合图8中的主次房间温度状况可以发现,当东、西墙传热阻为最大值时,主要房间温度为  $9.1^\circ\text{C}$ ,分别比南墙和北墙传热阻最大值时高出了8.3%和5.8%,次要房间温度( $4.7^\circ\text{C}$ )比南墙传热阻最大值时高14.6%。由此说明,东、西墙传热阻增加不仅可以提高建筑的净得热量,而且也能够优化室内的热能分配。

## 4 结 论

1) 增加任意朝向外墙体传热阻,都能提高多空间直接受益式太阳房各房间的室内操作温度,但提高的幅度不同。

2) 等量增加东、西墙传热阻对主要房间热环境改善作用最大,北墙次之,南墙最小。当东、西墙传热阻由  $0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  增加到  $2.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  时,起居室操作温度从  $8.67^\circ\text{C}$  提高到  $9.31^\circ\text{C}$ ,提高幅度分别是等量增加南墙和北墙传热阻时的145.5%和104.9%;而经堂、卧室操作温度平均值由  $7.76^\circ\text{C}$  提高到  $9.06^\circ\text{C}$ ,提高幅度更为显著,分别是等量增加南墙和北墙传热阻时的371.4%和254.9%。

3) 多空间直接受益式太阳房主次房间的温度差可以反映出室内热能的差异化分配特点。不同朝向外墙传热阻变化对主次房间温度差的影响规律不同。其中,东、西墙和南墙传热阻增加会引起主次房间温度差增大,而北墙传热阻增加会引起主次房间温度差降低。

## 参考文献:

- [1] 西安建筑科技大学,西藏自治区建筑勘测设计院. 西藏自治区居住建筑节能设计标准: DB54/0016-2007 [S]. 拉萨: 西藏人民出版社,2008.
- [2] 桑国臣,刘加平. 太阳能富集地区采暖居住建筑节能构造研究[J]. 太阳能学报,2011,32(3): 416-422.  
SANG Guochen, LIU Jiaping. Study of energy efficiency envelope configuration of heating residential buildings in solar radiation zone [J]. Acta Energetica Solaris Sinica

- ca, 2011, 32(3): 416-422.
- [3] 李恩,刘加平,杨柳. 拉萨市直接受益式太阳房居住建筑被动式设计优化研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(2): 27-32.
- LI En, LIU Jiaping, YANG Liu. Research on the passive design optimization of direct solar gain house for residential buildings in Lhasa [J]. Industrial Construction, 2012, 42(2): 27-32.
- [4] 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.
- [5] 刘大龙,赵辉辉,桑国臣. 被动式太阳房的热作用优化[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(9): 95-97.
- LIU Dalong, ZHAO Huihui, SANG Guochen. Optimization of thermal effects of passive solar house[J]. New Building Materials, 2016, 43(9): 95-97.
- [6] 中国建筑科学研究院, 中国建筑设计研究院. 农村居住建筑节能设计标准: GB/T50824-2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [7] 王登甲,刘艳峰,王怡,等. 拉萨市住宅建筑冬季室内热环境测试评价[J]. 建筑科学, 2011, 27(12): 20-24.
- WANG Dengjia, LIU Yanfeng, WANG Yi, et al. Measurement and evaluation of indoor thermal environment of residential buildings in Lhasa in winter [J]. Building Science, 2011, 27(12): 20-24.
- [8] 聂倩,张群,桑国臣,等. 拉萨乡村碉房民居冬季室内热环境测试研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(10): 21-25, 44.
- NIE Qian, ZHANG Qun, SANG Guochen, et al. Research on interior thermal environment of rural block-houses in Lhasa in winter[J]. Building Science, 2017, 33(10): 21-25, 44.
- [9] 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 Xiaoxue, ZHOU Yong, et al. Analysis on influence factors of indoor thermal environment of new residential buildings in winter in Lhasa [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(1): 109-115.
- [10] 桑国臣,韩艳,朱轶韵,等. 空间划分对太阳能建筑室内温度差异化影响[J]. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2902-2908.
- SANG Guochen, HAN Yan, ZHU Yiyun, et al. Study of the non-uniform effect of space division on passive solar house indoor temperature[J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2016, 37(11): 2902-2908.
- [11] 王文康. 室内分区太阳能采暖建筑的热工设计及节能构造研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- WANG Wenkang. Study on thermal design and energy saving structure of indoor partition solar heating building [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [12] 桑国臣,王文康,朱轶韵,等. 多空间被动式太阳能采暖建筑热工设计[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(2): 141-146, 171.
- SANG Guochen, WANG Wenkang, ZHU Yiyun, et al. Study of thermal design of multi space passive solar heating building [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(2): 141-146, 171.
- [13] 中国建筑设计研究院, 山东建筑大学. 被动式太阳能建筑技术规范: JGJ/T267-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 桑鹏飞,谢静超,刘加平,等. 青海地区农村土坯墙体保温改造热工性能研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 928-935.
- SANG Pengfei, XIE Jingchao, LIU Jiaping, et al. Study on thermal performance of insulation renovation for adobe wall in Qinghai region of China [J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2019, 40(4): 928-935.
- [15] 马超,刘艳峰,王登甲,等. 西北农村住宅建筑热工性能及节能策略分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3): 427-432.
- MA Chao, LIU Yanfeng, WANG Dengjia, et al. Analysis of thermal performance and energy saving strategy of rural residence building in northwest China [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(3): 427-432.
- [16] LI E. Analyses of influence of residential buildings' space organization on heating energy consumption in Lhasa[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2017, 33(4): 457-465.
- [17] 郭铁明. 室内人体综合舒适度及评价模型研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- GUO Tieming. Study on the indoor human body overall comfort and evaluation model [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [18] 王昭俊,廉乐明. 住宅室内热环境中影响人体热感觉特征选择[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(8): 1011-1013.
- WANG Zhaojun, LIAN Leming. Selection on characteristic of thermal sensation for occupants[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(8): 1011-1013.
- [19] 杨柳,杨茜,闫海燕,等. 陕西关中农村冬季住宅室内热舒适调查研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科

- 学版), 2011, 43(4): 551-556.
- YANG Liu, YANG Qian, YAN Haiyan, et al. Field study on thermal comfort of rural houses in winter in the Guanzhong region, Shaanxi province [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(4): 551-556.
- [20] 桑国臣, 陈得勇, 韩艳, 等. 双热扰下节能墙体对室内热环境的动态影响[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 164-171.
- SANG Guochen, CHEN Deyong, HAN Yan, et al. Influence of energy-saving wall on indoor thermal environment under the condition of bilateral thermal disturbance [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(1): 164-171.
- [21] 邵腾. 东北严寒地区乡村民居节能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- SHAO Teng. The energy-saving optimization for rural house in northeast severe cold regions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [22] 李金平, 王磊, 黄娟娟, 等. 太阳能地板采暖与散热器采暖室内热环境试验研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(7): 1849-1855.
- LI Jinping, WANG Lei, HUANG Juanjuan, et al. Comparative research on indoor thermal environment of solar floor heating and radiator heating [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(7): 1849-1855.
- [23] 刘加平. 建筑物理[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [24] 中国建筑科学研究院有限公司. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ26-2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- (责任编辑 周 蓓)

(上接第16页)

- [17] HAO Jiaqi, WANG Qiufeng, ZHAO Zhenbo. Synthesis and characterization of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiNbO<sub>4</sub> composite materials with visible light photocatalytic activity [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2017, 335: 94-101.
- [18] LI Nan, MIAO Shengchao, ZHENG Xiaoni, et al. Construction of Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/BiNbO<sub>4</sub> heterojunction photocatalysts with high activity for Rhodamine B removal under simulated sunlight irradiation [J]. Ceramics International, 2019, 45(18A): 24260-24268.
- [19] LEBEDEV A, ANARIBA F, LI Xu, et al. Ag/Ag<sub>2</sub>O/BiNbO<sub>4</sub> structure for simultaneous photocatalytic degradation of mixed cationic and anionic dyes [J]. Solar Energy, 2019, 178: 257-267.
- [20] ZHAO Jie, HE Qiang, ZHANG Xiaolong, et al. Fabrication of CQDs/Bi<sub>5</sub>Nb<sub>3</sub>O<sub>15</sub> nanocomposites for photocatalytic degradation of veterinary pharmaceutical sarafloxacin [J]. Catalysis Today, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.05.006>.
- (责任编辑 王绪迪)