

乡村太阳能采暖建筑的热环境分区营造及特征差异

张锳悦, 桑国臣, 任冠名, 杜梦杰, 崔晓玲, 张磊, 韩玮霄
(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 结合乡村建筑室内空间布局及功能区划特点,构建贯通式(模型 a)和分隔式(模型 b)两种附加日光间太阳能建筑的室内空间分区模型,以榆林、西安和拉萨作为代表性地区,建立多空间热平衡方程,分析两种分区模式中主要房间室内温度特征。结果表明,太阳能建筑主要房间的温度状况受室内空间分区特征和地域气候条件的综合影响。其中,榆林、西安和拉萨地区的模型 a 南向房间采暖期室内温度分别比客厅高出 4%、2%和 4%,达到 7.6℃、10.1℃和 12.2℃;对应的模型 b 南向房间采暖期平均温度比次卧高出 47%、19%和 37%,达到 7.8℃、10.2℃和 12.6℃。结合地域气候特征合理进行室内空间功能区划,可以有效提升室内热环境质量。

关键词: 乡村建筑; 西北地区; 空间分区; 附加日光间; 室内平均温度

中图分类号: TK512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2022)03-0386-08

Partition construction and characteristic difference of thermal environment in rural solar heating buildings

ZHANG Kaiyue, SANG Guochen, REN Guanming, DU Mengjie, CUI Xiaoling, ZHANG Lei, HAN Weixiao

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Combined with the characteristics of indoor space layout and functional zoning of rural buildings, the indoor space zoning models for two additional solar energy buildings with through type (Model a) and separated type (Model b) are established; taking Yulin, Xi'an and Lhasa as representative areas, by establishing the multi space heat balance equation, the indoor temperature characteristics of the main rooms in the two zoning models are analyzed. The results show that the temperature of the main rooms of solar buildings is affected by the characteristics of indoor space zoning and regional climate conditions. Among them, the indoor temperature of Model a southward room in Yulin, Xi'an and Lhasa is 4%, 2% and 4% higher than that in the living room respectively during the heating period, reaching 7.6℃, 10.1℃ and 12.2℃; the average temperature of the south facing room of Model b is 47%, 19% and 37% higher than that of the second bedroom during the heating period, reaching 7.8℃, 10.2℃ and 12.6℃. The indoor thermal environment quality can be effectively improved by reasonably dividing the indoor space function according to the regional climate characteristics.

Key words: rural buildings; northwest region; space partition; additional sunroom; indoor average temperature

我国西部地区太阳能资源丰富,因地制宜发展太阳能采暖建筑是改善乡村建筑冬季室内热环境和降低采暖能耗的有效途径,但由于太阳能的能流密度较低,仅依靠建筑被动式集热难以充分满足室内

热能需求。在增大建筑被动式集热量的同时,结合建筑室内空间功能差异进行热能的差异化分配,是提升太阳能热利用效率的关键^[1-4]。

相比直接受益式和集热蓄热墙式太阳能建筑,附加日光间式建筑因具有集热率高、构造简单等优势,正逐渐成为西北地区乡村建筑的重要发展形式。对于附加日光间被动式建筑的研究,目前主要聚焦于阳光间的类型、进深及外窗材质等构造措施对室内温度的影响,对于室内不同空间的热环境特征及其形成机理的研究则较为有限^[5-7]。虽然,传统乡村建筑对空间功能与朝向布局协同设计的思想有所体现^[8,9],但基于经验传承的营建技术范式,无法阐明在室外热环境、集热部件、室内空间布局、围护结构构造措施及热工参数等多因素综合作用下的室内热环境影响机制。基于被动式太阳能建筑的热能供需特征,分析不同室外气候条件下室内空间分区模式对不同功能空间热环境的影响规律,是结合不同空间室内热需求差异提升太阳能热利用效益及热环境

质量的基础。然而,对于室内热环境分区营造模式与热环境区划差异特征内在作用规律的研究,目前仍非常有限。

西部地区太阳能资源总体比较丰富,但不同区间仍存在一定差异。为此,根据被动式太阳能采暖气候分区选择位于最佳气候 A 区的拉萨、适宜气候 A 区的榆林及适宜气候 C 区的西安作为代表性地区,进行附加日光间式建筑室内热环境分区营造机理的研究^[10,11],探索空间分区模式对室内主要房间温度变化的影响规律,为乡村太阳能采暖建筑的发展提供设计思路。

1 基础建筑模型与室外气象参数

1.1 基础建筑模型

结合课题组近几年对西部乡村建筑的 actual 调研,参考文献^{[11]、[12]}确定基础建筑模型及节能构造关键参数,见表 1。

表 1 基础建筑模型及热工参数
Tab. 1 Typical building model and thermal parameters

建筑面积/m ²	层高/m	南向窗墙面积比	平面尺寸/m		围护结构传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)				
			东西轴线	南北轴线	外墙	隔墙	外窗	屋顶	地面
135.7	3.3	0.4	15.6	8.7	0.59	2	2.3	0.85	0.5

1.2 采暖期室外热边界条件

由于我国西部地区太阳能资源丰富,太阳辐射热作用对建筑室内外传热的影响远大于一般地区,故采用“室外综合温度 t_{sa} ”作为围护结构传热分析的外边界条件^[3,4]。根据式(1)结合典型气象年数据^[13]计算采暖期不同朝向室外综合温度,结果见表 2。

$$t_{sa} = t_e + \frac{q_s + q_R}{\alpha_e} - \frac{q_e}{\alpha_e}$$

(1)

式中: q_e 为外表面有效长波辐射量; q_s 为围护结构外表面吸收的地面反射辐射热量; q_R 为太阳辐射热量; α_e 为外表面换热系数,取 23.0 W/(m²·K); t_e 为室外平均温度。

表 2 各地区采暖期室外气象参数
Tab. 2 Outdoor meteorological parameters in heating period of each region

地区	南立面日平均太阳辐照强度/(W·m ⁻²)	室外综合温度平均值/℃					室外气温平均值/℃
		水平面	南向	东向	西向	北向	
西安	104.2	6.2	6.6	5.1	5.2	4.6	3.3
榆林	160.7	1.7	4.3	1.2	1.5	0.4	-1.0
拉萨	220.6	6.7	6.0	4.5	3.9	2.1	0.9

2 不同空间分区模式下的室内热环境

乡村建筑多数为普通开间模式,室内热能均匀分配致使冬季室内热环境质量较差,利用室内空间分区实现热量差异化利用是改善建筑室内热环境的

有效途径。
2.1 典型空间分区模式
随着人们生活习惯的改变和对建筑室内热环境质量需求的提升,现代民居建筑内部已经基本包含有主要房间、次要房间及辅助用房等功能房间^[14]。

根据调研测试中实际建筑各空间功能和面积的要求,整理得到西北乡村建筑的基本尺寸信息,见表 3,这与文献[1]、[2]、[14]中对乡村建筑面积的要求一致;结合建筑空间布局发现,人们对各功能房间的需求、使用频率及使用时段存在差异,通过对建筑室内进行合理功能分区,能够有效实现热能的差异化分配,这和文献[15]~[17]中对西北乡村建筑进行分区研究所得的结论一致。结合调研测试及相关研究,得到两种典型的乡村建筑室内空间分区模式,其房间尺寸及平面图分别见表 4 和图 1。

两种典型的分区模式总建筑面积相等,且保证客厅面积、总卧室面积(各主卧室面积基本相等)、辅助房间总面积相等。模型 a 的室内空间分区表现为主要功能房间都能接受太阳辐射,且将辅助房间统一放置于卧室北侧作为缓冲区,形成客厅南北贯通,卧室朝南的室内分区(贯通式);通过对人们生活习惯的调查,发现人们在白天时段对客厅的需求频率较高,夜间则更注重卧室的使用^[14]。模型 b 在客厅北侧设置缓冲区,形成主卧朝南,次卧朝北的室内分区(分隔式),以保证客厅和主卧的室内热环境。

表 3 西北乡村建筑基本信息

Tab. 3 Basic information on northwest rural buildings

层数	总面积/ m ²	客厅			卧室			主要房间/个
		面积/m ²	开间/m	进深/m	面积/m ²	开间/m	进深/m	
一层居多	110~140	23~40	3.9~8.1	4.2~8.7	16~26	3.9~6	4.2~7.8	2~3
层数	房间朝向	有无空 间划分	客厅是否 南北贯通	层高/ m	辅助房间			辅助房间/个
					面积/m ²	开间/m	进深/m	
一层居多	坐北朝南	有	都有	3.3	9~24	2.7~6	1.2~6	2~3

表 4 典型空间分区建筑详情

Tab. 4 Building details of typical space zones

典型分区	层数	总面积/ m ²	客厅			卧室			主要房间/个
			面积/m ²	开间/m	进深/m	总面积/m ²	开间/m	进深/m	
模型 a	一层	135.72	34	3.9	8.7	73.71	3.9	6.3	4
模型 b				4.2	7.3		5.7	4.8	
典型分区	层数	房间朝向	有无空 间划分	客厅是否 南北贯通	层高/ m	辅助房间			辅助房间/个
						面积/m ²	开间/m	进深/m	
模型 a	一层	坐北朝南	有	是	3.3	9.36	3.9	2.4	3
模型 b				否		11.12	2.7	3.9	

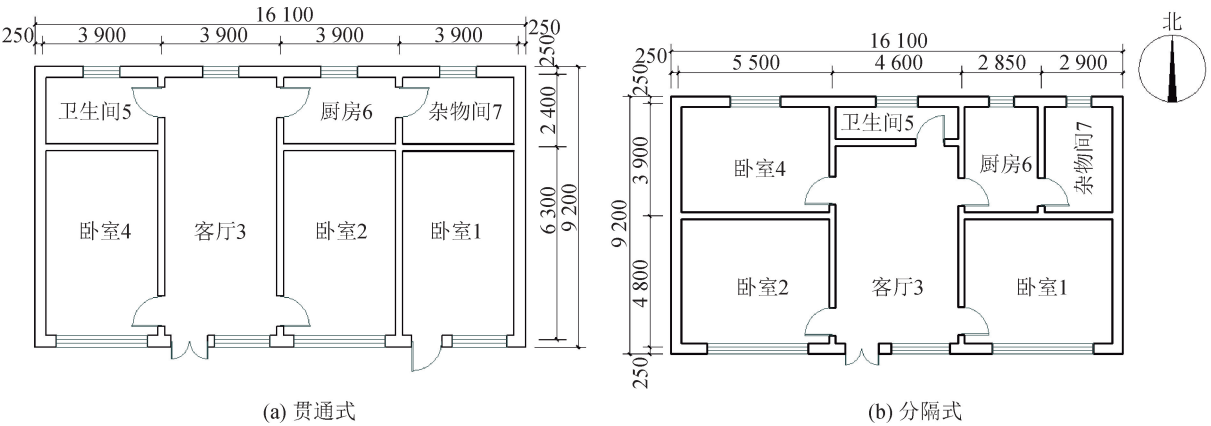


图 1 典型空间分区(单位:mm)
Fig. 1 Typical space zoning(unit: mm)

2.2 集热方式差异对室内温度的影响

建筑采用日光间集热时,受各朝向综合温度的影响,室内房间温度变化有所不同^[3]。结合前文分析,选择简化的贯通式模型进行计算,如图2所示,对比分析设置附加日光间对室内房间温度的影响。

在建筑南墙设置附加日光间,基于空间使用功能的需求,日光间进深取 1.8 m^[12]。除建筑南墙

外,其余均为透明围护结构组成。计算时基于最不利情况提出假设:①日光间仅通过南立面与水平面透明围护结构集热(不计入东西向透明围护结构的集热量,但考虑失热量);②对日光间进行建筑热平衡分析时,忽略日光间与室内各空间之间的冷风渗透,仅考虑通过公共窗和公共墙进行热量传递;③计算各室内温度时,假设各空间室内空气混合均匀,温度相等。

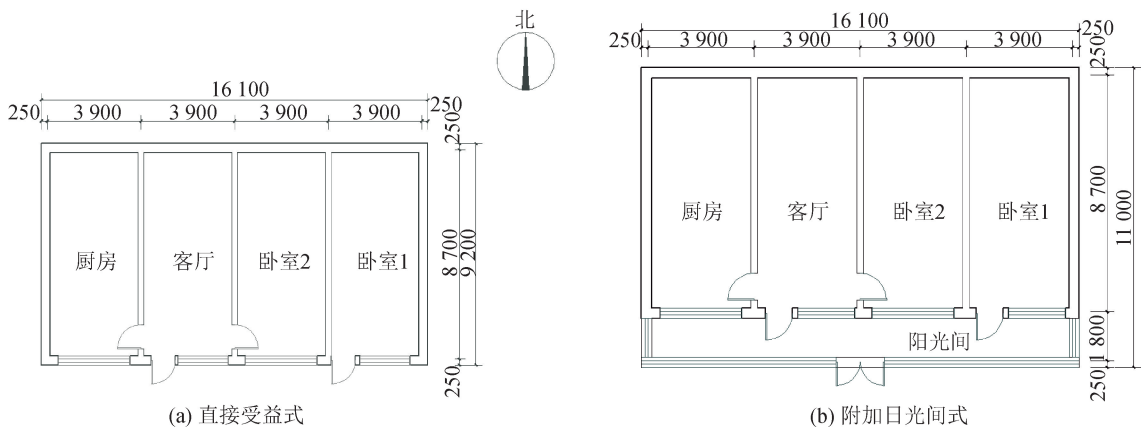


图2 两种集热方式对比(单位:mm)

Fig. 2 Comparison of two heat collection methods(unit: mm)

进行空间分区模式下的建筑热平衡分析,太阳能建筑稳态热平衡方程为:

$$q_{cc} + q_{1H} = q_{HT} + q_{1NF} \quad (2)$$

式中: q_{cc} 为单位建筑面积直接受益窗集热量, W/m^2 ; q_{1H} 为单位建筑面积的建筑物内部得热(包括炊事、照明、家电和人体散热),住宅建筑取 $3.8 W/m^2$; q_{HT} 为单位建筑面积通过围护结构的传热耗热量, W/m^2 ; q_{1NF} 为单位建筑面积的空气渗透耗热量, W/m^2 。

$$q_{cc} = I_{mvs} \cdot \tau_{mvs} \cdot \alpha_a \cdot A_g \cdot X_m \quad (3)$$

$$\alpha_a = \frac{A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 \times 1.0 + A_3 \alpha_3 \times 0.5 + A_4 \alpha_4 \times 0.2 + A_5 \alpha_5 \times 0.1}{A_1 + A_2 \times 1.0 + A_3 \times 0.5 + A_4 \times 0.2 + A_5 \times 0.1} \quad (4)$$

式中: A_1 为公共墙上开孔面积, m^2 ; A_2 为公共墙体面积, m^2 ; A_3 为阳光间地面积, m^2 ; A_4 为阳光间端墙面积, m^2 ; A_5 为阳光间顶部面积, m^2 ; α_1 为孔的吸收系数,取 $0.95^{[18]}$; α_2 为公共墙的吸收系数,取 $0.73^{[18]}$; α_3 为阳光间地面的吸收系数,取 $0.65^{[18]}$; α_4 为阳光

式中: I_{mvs} 为南立面日平均总辐照量, W/m^2 ; τ_{mvs} 为通过玻璃和投射在南立面上的日平均辐照量的比值,直接受益式建筑取 0.74 (日光间通过玻璃和投射在水平面上的日平均辐照量的比值,取 0.72)^[18]; A_g 为玻璃窗的面积, m^2 ; X_m 为玻璃窗的有效透光面积系数,取 $0.8^{[18]}$; α_a 为透过玻璃后被集热系统吸收的和透过玻璃的日平均辐照量的比值,直接受益式建筑取 $0.95^{[18]}$,附加日光间式建筑取 $0.76^{[18]}$;

间端墙的吸收系数,取 $0.73^{[18]}$; α_5 为阳光间顶部的吸收系数,取 $0.65^{[18]}$ 。

由于空间分区不同,各房间外边界传热条件及相邻房间传热存在差异,整理得到任一房间 i 的稳态热平衡方程及日光间的热平衡方程:

$$q_{cc,i} + 3.8A_{0,i} + \left[\sum K_{gq} F_{gq} + \sum K_{gc} F_{gc} \right] (\bar{t}_r - \bar{t}_i) - \left[\sum K_{d,i} F_{d,i} + \sum K_{mc,i} F_{mc,i} + C_p \rho N V_i \right] (\bar{t}_i - \bar{t}_e) - \left[\sum K_{q,i} F_{q,i} + \sum K_{w,i} F_{w,i} \right] (\bar{t}_i - \bar{t}_{sa}) = 0 \quad (5)$$

$$q_{cc,i} + q_{ccl} + 3.8A_{0,i} = \left[\sum K_{gq} F_{gq} + \sum K_{gc} F_{gc} \right] (\bar{t}_r - \bar{t}_i) + \left[\sum K_{d,i} F_{d,i} + \sum K_{mc,i} F_{mc,i} + \sum K_{q,i} F_{q,i} + \sum K_{w,i} F_{w,i} \right] (\bar{t}_i - \bar{t}_e) \quad (6)$$

式中: $q_{cc,i}$ 为任一房间 i 单位建筑面积南向集热量, W/m^2 ; q_{ccl} 为日光间单位建筑面积水平面集热量, W/m^2 ; $A_{0,i}$ 为对应房间建筑面积, m^2 ; $K_{gq} F_{gq}$ 、

$K_{gc} F_{gc}$ 、 $K_{d,i} F_{d,i}$ 、 $K_{mc,i} F_{mc,i}$ 、 $K_{w,i} F_{w,i}$ 和 $K_{q,i} F_{q,i}$ 为公共墙体、公共窗、地面、门窗、屋顶及墙体传热系数与其对应面积的乘积; C_p 为干空气的定压比热

容,取 $0.28\text{Wh}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; 依据严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准, N 为换气次数,取 0.5h^{-1} [1]; V_i 为换气体积 m^3 ; t_i 、 t_r 、 t_e 、 t_{sa} 为采暖期内 i 房间室内平均温度、日光间平均温度、

$$16.94(t_i - t_{\text{saw}}) + 16.94(t_i - t_{\text{sae}}) + 30.36(t_i - t_{\text{sas}}) + 30.36(t_i - t_{\text{san}}) + 115.36(t_i - t_{\text{sal}}) + 195.34(t_i - t_e) = 11.58I_{\text{mvs}} + 515.74 \tag{7}$$

$$\left(224.34 + \left(\frac{4579.45}{t_e + 273}\right)\right) \times (t_r - t_e) + 16.94(t_i - t_{\text{saw}}) + 16.94(t_i - t_{\text{sae}}) + 30.36(t_i - t_{\text{san}}) + 115.36(t_i - t_{\text{sal}}) + 67.88(t_i - t_e) = 23.16I_{\text{mvs}} + 12.29I'_{\text{mvs}} + 622.4 \tag{8}$$

式中: t_{saw} 为 i 房间西向垂直面对应的室外综合温度采暖期平均值, $^{\circ}\text{C}$; t_{sae} 为 i 房间东向垂直面对应的室外综合温度采暖期平均值, $^{\circ}\text{C}$; t_{sas} 为 i 房间南向垂直面对应的室外综合温度采暖期平均值, $^{\circ}\text{C}$; t_{san} 为 i 房间北向垂直面对应的室外综合温度采暖期平均值, $^{\circ}\text{C}$; t_{sal} 为 i 房间水平面室外综合温度采暖期平均值, $^{\circ}\text{C}$; I'_{mvs} 为水平面日平均总辐照量, W/m^2 。

2.3 不同集热方式下室内热平衡分析

利用 MATLAB 软件求解线性方程组, 得到采暖期各地区两种集热方式下各房间室内平均温度, 见图 3。

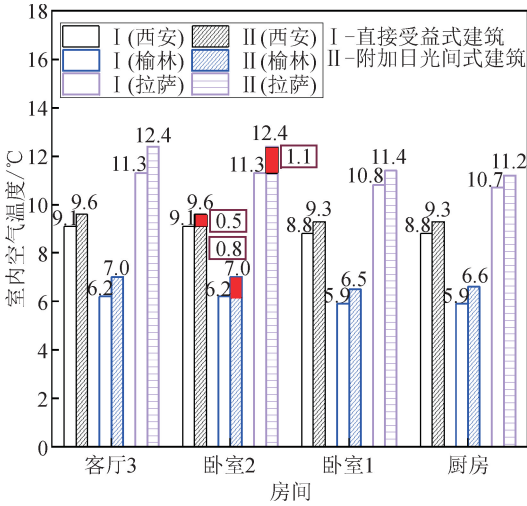


图 3 各地区采暖期两种集热方式下的房间温度
Fig. 3 Room temperature by two heat collection modes in heating period of each region

由图 3 可以看出, 在日光间的作用下, 拉萨、榆林和西安地区卧室 2 的室内平均温度分别提高 1.1°C 、 0.8°C 和 0.5°C 。由此可见, 设置南向日光间可以作为集热空间增加集热量, 从而达到提升室内温度的效果。

3 附加日光间式建筑室内温度分析

3.1 附加日光间式建筑室内空间分区

基于模型 a(贯通式)和模型 b(分隔式)的分区模式, 分别增设日光间, 建立两种附加日光间式建筑

室外平均温度及室外综合温度平均值。

利用式(1)~(6)参照表 1 和表 2 的参数列热平衡方程, 整理得到直接受益式与附加日光间式建筑的热平衡表达式:

的室内空间分区模型, 见图 4, 分析采暖期各模型室内主要房间温度变化规律及影响因素, 进一步探索乡村建筑室内空间分区营造机理。

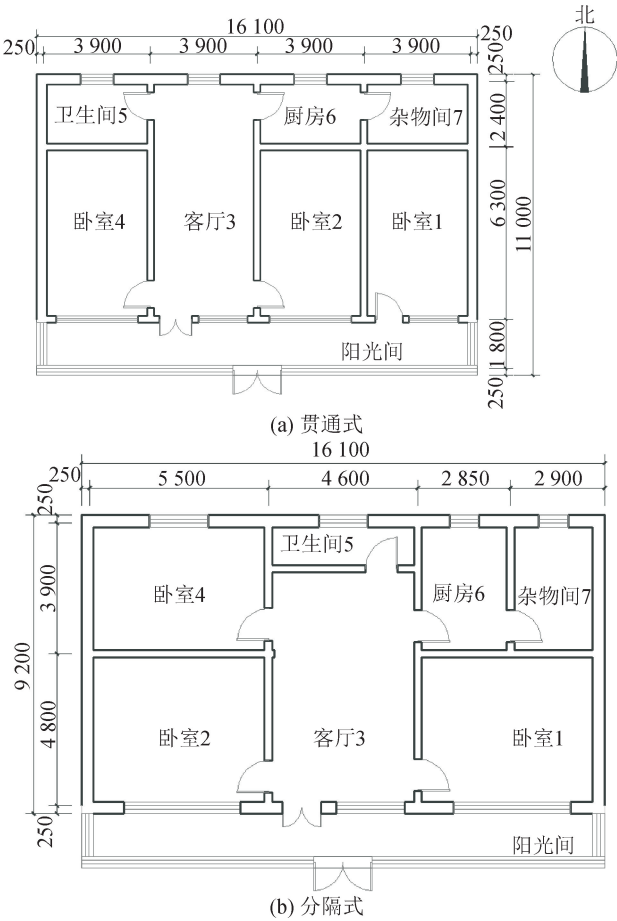


图 4 附加日光间式建筑室内空间分区模式(单位: mm)
Fig. 4 Indoor space zoning mode for additional daylight room building(unit: mm)

采用式(1)~(6)参照表 1 和表 2 的参数列热平衡方程, 解线性方程组得到三个地区采暖期两种空间模式下各房间室内平均温度, 见表 5。

从表 5 可以看出, 同一地区的两种分区模式均表现为位于南向的房间采暖期室内平均温度高于北向, 且南向各房间室内温度呈现出差异化特征。其中, 榆林地区模型 a 卧室 1、卧室 2 及次卧 4 的室内

温度分别比客厅 3 高出 3%、8%和 1%;模型 b 卧室 1、卧室 2 及客厅 3 的平均温度比次卧 4 高出 45%、53%和 43%。

总体来说,模型 a 中南向房间平均温度与客厅 3、次卧 4、卧室 1、卧室 2 的温度相差不大,其中客厅

3 温度低于卧室 1、2(主卧)及次卧 4 的室内温度。模型 b 中南向房间平均温度与客厅 3 和卧室 1、卧室 2 的室内温度相差较小,但次卧 4 的室内温度明显降低,且空间分区模式对主要房间室内温度的作用随地区差异而有所不同。

表 5 各地区两种空间模式下各房间采暖期平均温度
Tab. 5 Average temperature of each room during heating period in two spatial modes in each region

地区	室内分区	t_1 (卧室 1)/ ℃	t_2 (卧室 2)/ ℃	t_3 (客厅 3)/ ℃	t_4 (次卧 4)/ ℃	t_5 (卫生间 5)/ ℃	t_6 (厨房 6)/ ℃	t_7 (杂物间 7)/ ℃
榆林	模型 a	7.5	7.9	7.3	7.4	5.4	5.7	4.9
	模型 b	7.7	8.1	7.6	5.3	4.8	3.9	4.2
西安	模型 a	10.0	10.4	9.9	10.0	8.6	8.9	8.4
	模型 b	10.0	10.4	10.1	8.6	7.7	6.5	7.3
拉萨	模型 a	12.1	12.7	11.7	11.9	9.3	9.8	9.0
	模型 b	12.6	12.8	12.3	9.2	8.3	6.9	7.6

由图 5 可得采暖期两种分区模式下三个地区南向房间平均温度和卧室 1、客厅 3 及次卧 4 的室内温度变化规律。南向房间平均温度即指各模型客厅与南向卧室的平均温度,主卧即指卧室 1 与卧室 2,以卧室 1 为主卧代表进行说明。模型 a 在榆林、西安和拉萨地区均表现为客厅、主卧与次卧室内温度较高,且各卧室室内温度相近,南向房间平均温度达到 7.6℃、10.1℃及 12.2℃,但客厅温度略低于卧室,分别低 0.2℃、0.1℃和 0.4℃。模型 b 则表现为建筑室内客厅与主卧温度较高,且显著高于次卧室内温度。在榆林、西安和拉萨地区,次卧温度分别低于南向房间平均温度 2.5℃、1.6℃和 3.4℃,室内温度仅为 5.3℃、8.6℃和 9.2℃。相较于模型 a,模型 b 客厅室内温度分别提升 0.3℃、0.2℃和 0.6℃。

两种建筑分区模式中主要房间(主卧、次卧和客厅)室内温度特征分别表现为:模型 a 呈现为各卧室的温度高于客厅,且室内主要房间温度整体较高;模型 b 表现为客厅与主卧室室内温度较高,且显著高于次卧温度。此外,空间分区模式对室内温度的影响还会随地区差异而有所不同,在拉萨地区主要房间室内温度提升最为显著,其次为榆林和西安地区。

3.2 室内温度影响因素分析

图 5 中的室内温度差异表明,太阳能采暖建筑的室内温度除了受建筑构造方式、热工参数等因素影响外,还会因不同地区室外气象条件的差异,受太阳辐射和室外空气温度的综合影响。分析当年 11 月至次年 2 月期间,南向太阳辐射和室外空气温度

对两种空间分区模式下客厅室内空气温度的影响,见图 6,探索于客厅北向设置缓冲区对客厅室内热环境的影响规律。

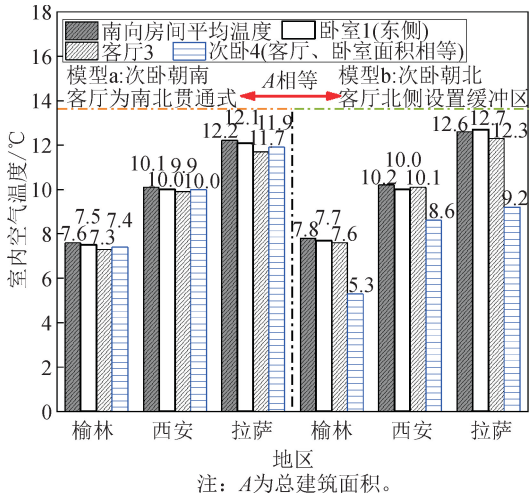


图 5 不同分区模式下各地区采暖期主要房间的室内温度差异
Fig. 5 Indoor temperature difference of main rooms in different regions during heating period in different zoning modes

由图 6 可以看出,当年 11 月至次年 2 月期间,同一地区不同空间分区模式下,客厅室内温度变化趋势与室外空气温度变化趋势基本相同,且客厅室内温度变化趋势基本一致,主要表现为模型 b 客厅温度高于模型 a。但不同地区的南向太阳辐射强度与室外空气温度存在差异,因此对各地区各模型客厅室内温度的提升效果有所不同。分别表现为:在榆林地区,模型 a 和模型 b 客厅温度分别为 6.5℃、

6.9℃;在西安地区,模型 a 和模型 b 客厅温度分别为 9.8℃、10.0℃;在拉萨地区,模型 a 和模型 b 客厅温度分别为 12.4℃、13.1℃。由此可见,于客厅北向设置温度缓冲区,可以有效提高客厅的室内温度,并且提升主卧的室内温度。南向太阳辐射和室外空气温度的地区差异强化了不同空间分区模式对建筑室内温度的影响,拉萨地区空间分区模式不同时,客厅室内温度差异显著,其次是榆林和西安地区,尤其是西安地区,室内空间分区模式对主要房间室内温度的提升有限。

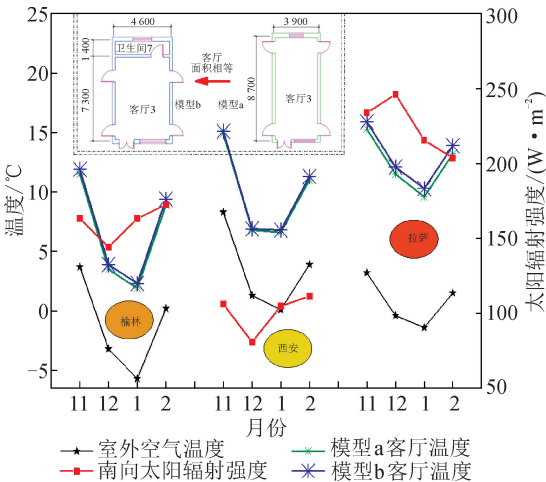


图 6 两种分区模式下客厅温度与室外气象参数的逐月变化情况

Fig. 6 Monthly variation of living room temperature and outdoor meteorological parameters in two zoning modes

4 结 论

1) 乡村建筑的贯通式(模型 a)与分隔式(模型 b)分区模型均表现出主要房间室内温度高于辅助房间。其中,模型 a 各卧室的温度高于客厅,且室内主要房间温度整体较高;模型 b 则表现为客厅与主卧温度较高,且显著高于次卧温度。随地区差异,主要房间室内温度提升效果有所不同。

2) 在日光间的作用下,拉萨、榆林和西安地区卧室 2 的室内平均温度分别提升 1.1℃、0.8℃和 0.5℃。日光间的集热效果表现为在拉萨地区效果最好,其次是榆林、西安地区。

3) 针对榆林、西安、拉萨地区,模型 a 南向房间室内平均温度达到 7.6℃、10.1℃和 12.2℃,分别比客厅温度高出 4%、2%和 4%;模型 b 南向房间平均温度为 7.8℃、10.2℃和 12.6℃,分别比次卧温度高出 47%、19%和 37%。

4) 在南向太阳辐射和室外空气温度的综合影响下,于客厅北向设置温度缓冲区,在西安、榆林、拉萨

地区,客厅温度分别提升 2%、6%、6%,达到 10.0℃、6.9℃、13.1℃。

参考文献:

[1] 韩艳. 太阳能采暖乡村建筑室内热环境差异化设计研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
HAN Yan. Research on differentiated design of indoor thermal environment of solar heating rural buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.

[2] 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.

[3] 桑国臣,韩艳,朱铁韵,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. Influence of space division on indoor temperature difference of solar buildings[J]. Journal of Solar Energy, 2016, 37(11): 2902-2908.

[4] 桑国臣,韩艳,朱铁韵,等. 自然运行下乡村太阳能建筑热工参数对室内空气温度的影响[J]. 西安理工大学学报,2016,32(1):30-34.
SANG Guochen, HAN Yan, ZHU Yiyun, et al. Influence of thermal parameters of rural solar buildings on indoor air temperature under natural operation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 30-34.

[5] 殷双喜. 附加阳光间式被动太阳房热负荷特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
YIN Shuangxi. Study on heat load characteristics of passive solar house with additional sunlight[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.

[6] 戴亚威. 寒冷地区阳光间对农宅室内热环境舒适度的影响研究[D]. 济南:山东建筑大学,2019.
DAI Yawei. Study on the influence of sunshine room on the indoor thermal environment comfort of rural houses in cold areas[D]. Jinan: Shandong University of Architecture, 2019.

[7] 李清,陈思羽,马令勇,等. 严寒地区农宅附加阳光间能耗及效益评价分析[J]. 热科学与技术,2020,19(3): 262-269.
LI Qing, CHEN Siyu, MA Lingyong, et al. Analysis on energy consumption and benefit evaluation of additional sunshine room for rural houses in severe cold area [J]. Thermal Science and Technology, 2020, 19(3): 262-269.

[8] 杨柳,刘加平. 利用被动式太阳能改善窑居建筑室内热

- 环境[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 605-610.
- YANG Liu, LIU Jiaping. Using passive solar energy to improve the indoor thermal environment of kiln buildings[J]. Journal of Solar Energy, 2003, 24(5): 605-610.
- [9] 李恩, 杨柳, 刘加平. 拉萨市附加阳光间式住宅建筑被动式优化设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(2): 258-264.
- LI En, YANG Liu, LIU Jiaping. Study on passive optimization design of additional sunshine room residential buildings in Lhasa[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2016, 48(2): 258-264.
- [10] 杨婧, 刘艳峰, 陈耀文, 等. 用于被动太阳能采暖适用技术选择的气候分区研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 234-242.
- YANG Jing, LIU Yanfeng, CHEN Yaowen, et al. Study on climate zoning for the selection of applicable technologies for passive solar heating[J]. Journal of Solar Energy, 2021, 42(6): 234-242.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 被动式太阳能建筑技术规范: JGJ/T 267—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 农村居住建筑节能设计标准: GB/T 50824—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 张晴元, 杨洪兴. 建筑用标准气象数据手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 倪思嘉. 赣中现代民居建筑空间布局的气候适应性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- NI Sijia. Study on climate adaptability of spatial layout of modern residential buildings in central Jiangxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [15] 刘艳峰, 王莹莹, 王登甲, 等. 西北村镇建筑热环境提升与能源高效利用关键技术及应用[J]. 暖通空调, 2021, 51(8), 1-6, 43.
- LIU Yanfeng, WANG Yingying, WANG Dengjia, et al. Key technologies and applications of building thermal environment improvement and energy efficient utilization in Northwest villages and towns[J]. HVAC, 2021, 51(8), 1-6, 43.
- [16] 李涛, 王志帆, 毛前军, 等. 分时分区供暖需求下的被动太阳能建筑适宜性研究[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(2): 22-28.
- LI Tao, WANG Zhifan, MAO Qianjun, et al. Study on the suitability of passive solar buildings under the demand of time-sharing and district heating[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2021, 35(2): 22-28.
- [17] 宋聪, 刘艳峰, 王登甲, 等. 西北居住建筑分时分区热环境设计参数研究[J]. 暖通空调, 2020, 50(2): 29-34.
- SONG Cong, LIU Yanfeng, WANG Dengjia, et al. Study on time-sharing and zoning thermal environment design parameters of residential buildings in Northwest China[J]. HVAC, 2020, 50(2): 29-34.
- [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.

(责任编辑 周 蓓)