

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.007



# 缓冲空间对拉萨市居住建筑 冬季采暖能耗的影响

李恩, 刘加平

(西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055)

**摘要:**冬季现场调研与热环境测试表明,拉萨市现有居住建筑的缓冲空间能明显改善室内热环境。但当地非采暖房间冬季热环境仍较差,居住建筑采暖需求明显。当地采暖能耗与环境负荷增长趋势明显。以拉萨市常见的单元式住宅为基础建立了热工计算模型,模拟分析了南北向缓冲空间进深设计对冬季采暖能耗的影响规律。结果表明:南北向缓冲空间均能有效降低模型的采暖能耗,其中,随着南向缓冲进深增大,模型采暖能耗呈递增趋势;随北向缓冲空间进深增大,模型采暖能耗呈先降后增趋势,北向缓冲空间模型之间能耗差很小。缓冲空间优化设计模型与基础模型的能耗对比分析显示,合理设置的南北向缓冲空间能够大幅降低采暖能耗。

**关键词:**缓冲空间;采暖能耗;被动式设计;建筑节能

**中图分类号:**TU118 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)04-0040-08

## Influence of the buffer-space design on winter heating energy consumption in Lhasa

Li En, Liu Jiaping

(School of Architecture, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** Based on the analysis of winter field survey and thermal environment measurement, the buffer-space design can obviously improve indoor thermal environment in the residential buildings of Lhasa. However, the indoor winter thermal environment of non-heating rooms still need to be improved. Local people have strong heating demand for residential buildings. All the clues lead to the fast growing tendency of heating energy consumption and environmental load in Lhasa. The basic simulation models for understanding the buffer-space's effect to heating energy consumption are established from the common residential buildings in Lhasa, and the factors include south and north buffer-space's depth design. Result shows that buffer-space can obviously reduce winter heating energy consumption. Along with the south buffer-space's depth increasing, the heating energy consumption shows the tendency of continuous

**收稿日期:**2016-05-10

**基金项目:**国家自然科学基金(51608426、51590913、51408465);教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留(2014)1685号);西安建筑科技大学校人才科技基金(RC1439);陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JQ5055)

**作者简介:**李恩(1982-),男,博士,主要从事被动式建筑设计与建筑节能研究,(E-mail)lien801@163.com.

**Received:**2016-05-10

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 51608426, 51590913, 51408465); The Project-Sponsored by SRF for ROCS, SEM (No. (2014)1685); Research Foundation for Scholars of XAUAT (No. RC1439); Shaanxi Province NSFRPC (No. 2016JQ5055)

**Author brief:** Li En (1982-), PhD, main research interests: passive design and building energy saving design, (E-mail) lien801@163.com.

increasing; as for the north buffer-space, the tendency is firstly getting decreasing and then increasing, and the energy consumption among models is not large. The heating energy consumption comparison study between common model and optimal buffer-space design model shows that buffer-space design can obviously reduce the heating energy consumption.

**Keywords:** buffer-space; heating energy consumption; passive design; building energy saving

拉萨是中国海拔最高的省会城市,其气候具有典型的高原城市气候特征:空气含氧量低,气压低,太阳辐射强烈,气温日较差大,最热月七月的平均温度为 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最冷月一月的平均温度为 $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。夏季非常凉爽,冬季采暖期长但平均温度并不特别低<sup>[2]</sup>。资料显示<sup>[3-5]</sup>,随着城市化进程的不断推进,拉萨住宅建筑已步入大面积建设阶段。同时,居民生活条件在逐步提高,生活方式逐渐趋同内陆。可以推断,城市建筑采暖能耗将持续增加。为了避免当地采暖能耗爆发性无序增长,对当地居住建筑采用高效被动式太阳能设计,以缓解冬季采暖能耗矛盾是在当地气候条件与自然资源双重约束下,实现可持续发展。

毋庸置疑,在被动式太阳房设计中,建筑围护结构的热工性能对建筑的热环境有重要作用,但现场调研显示,居住建筑是否具备封闭缓冲空间对相邻房间的热环境影响很大。因此,当地的户型对室内热环境的作用不可忽视。笔者从热环境测试和模拟计算两方面讨论缓冲空间对居住建筑采暖能耗的作用和意义。

目前,对以拉萨为代表的高海拔地区居住建筑的冬季采暖节能研究成果基本来自中国学者。文献[6]分析了围护结构热工性能对主动式系统运行的影响,解决了围护结构热工性能与设备系统的匹配问题。文献[7]研究了围护结构在强太阳辐射条件下的动态传热计算方法,讨论了该地区纯被动式采暖的可行性。文献[8-10]通过提出非平衡保温概念,阐述了在太阳辐射作用下,不同朝向围护结构的不同传热现象。给出了传热系数设计方法。文献[11]讨论了强太阳辐射对拉萨市建筑围护结构热工设计与计算中朝向修正系数的影响。综上,在以拉萨为代表的太阳能富集区建筑节能研究中,现有成果的研究对象多为强太阳辐射对围护结构的热作用及在该作用下围护结构的热工设计或传热计算。研究结果有利于拉萨及相似气候区的节能工作。但是,尽管实地测试显示建筑空间设计对室内热环境有重要影响,目前,还没有研究从建筑空间设计角度出发,探讨缓冲空间的设置对居住建筑采暖能耗的

影响。本文以拉萨城镇既有住宅建筑中常见的直接受益户型单元为对象,建立基本模型,通过模拟计算讨论缓冲空间设计对采暖能耗的影响,尝试给当地住宅建筑节能设计提供新思路。

## 1 拉萨居住建筑热环境测试

课题组对以拉萨为代表的高海拔地区的民用建筑节能设计进行了长期研究。近10年来,课题组多次赴藏进行民用建筑冬季热环境调研,包括城镇住宅和农村传统住宅的测绘与热环境测试。在前期的研究中,拉萨的农村住宅和城镇居住建筑均体现了依赖经验的、未量化的被动式太阳能利用特征。热环境测试及热舒适问卷表明,居住建筑冬季热环境尚不能满足居民对热环境的需求。调研与测试内容在文献[3,12-13]发表,测试结论列举如下:1)住宅建筑在户型设计上具有被动式设计特点,如建筑朝南向、住宅层高较低,空间紧凑狭小、部分联排式住宅自发另外设计建造了阳光间等;2)建筑空间的热环境测试结果较差,即使是太阳辐射资源充足的南向房间也无法达到满足人体热舒适的室内温度,同时,北向房间明显过冷,无法满足正常使用要求。3)缓冲空间的设计能够明显改善相邻房间的热环境。例如,使用封闭阳台作为阳光间的住宅,阳光间相邻房间的室内平均温度高于未设计封闭阳台的户型。4)既有居住建筑的户型设计中,缓冲空间的设计多以南向封闭阳台的形式出现。

## 2 缓冲空间设计对城镇集合式住宅冬季采暖能耗的影响分析

以拉萨市典型的城镇集合住宅为例,通过模拟计算的方法讨论城镇居住建筑缓冲空间对冬季采暖能耗的影响。由实地调研可知,当地城镇居住建筑目前以南北通透的户型设计为主。因此,在案例选择上采用在直接受益式太阳房基础上增加密闭缓冲空间方式进行研究。研究案例主要有:直接受益式模型、附加阳光间式模型、北向封闭阳台模型。研究内容有:建筑朝向、太阳房进深、北向封闭阳台进深等关键缓冲空间设计要素对采暖能耗的影响。

### 2.1 计算软件与基本模型

本文是课题组开展西藏建筑节能研究的阶段性工作成果。文中计算模型与模拟软件设置等运算工具与前期研究相同<sup>[14]</sup>，基本模型以拉萨市较常见的既有建筑户型生成。表 1 为建筑模型基本信息。图 1 为模拟建筑的标准层平面图，图中文字标出房间功能的户型为计算户型。除了南北向以外，计算户

型的周边均与其他单元相接。文中如无特殊说明，模型的保温设计和朝向设计均沿用调研的实际情况，即无保温与朝南向。图 2 为 3 种基本模拟户型。表 2 为围护结构的基本构造。该构造形式同样取自当地常见居住建筑，与课题前期研究中模拟对象构造信息一致。

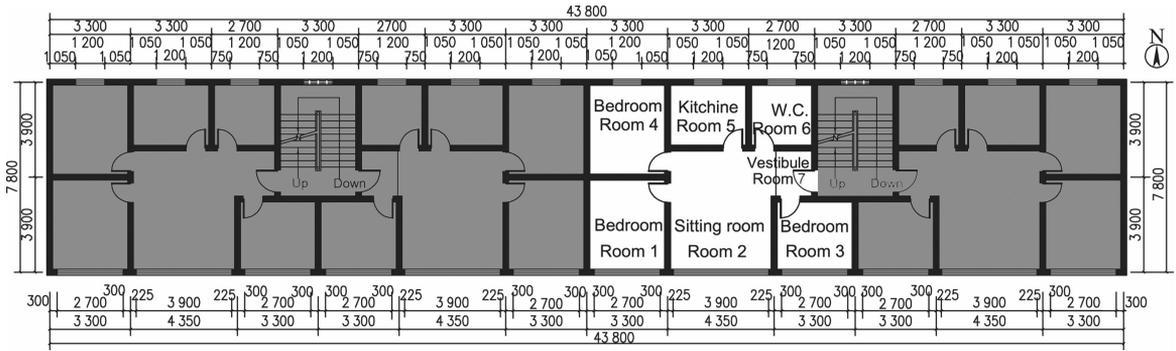
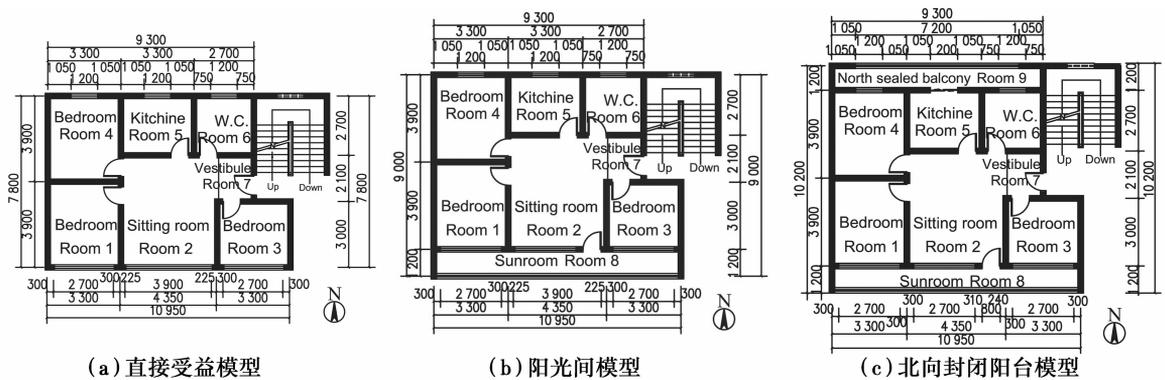


图 1 模拟建筑标准层平面

Fig. 1 Standard floor plan of the simulation building



(a) 直接受益模型

(b) 阳光间模型

(c) 北向封闭阳台模型

图 2 各计算模型户型平面图

Fig. 2 Layout design of basic simulation models

表 1 建筑计算模型基本信息

Table 1 Basic information of the building model

地理位置	计算户型所在 层数/总层数	层高/m	南向/北向 外墙窗墙面积比
拉萨市	3/4	3.0	0.58/0.23

表 2 计算模型建筑基本构造<sup>[14]</sup>

Table 2 Basic configuration of target building

构造形式	材料厚度/ mm	导热系数/ (W · (m · K) <sup>-1</sup> )	比热容/ (J · (kg · K) <sup>-1</sup> )
墙体 (内至 外)	石灰砂浆	0.015 15	0.810
	灰砂砖	0.370	1.100
	水泥砂浆	0.150	0.810
外窗	单玻	0.006	0.760
楼板	钢筋混凝	0.100	1.740
	土现浇		

本文计算工具为 THERB。THERB 是计算热负荷及室内热环境等建筑热工指标的模拟软件，通过了日本政府及建筑协会的认证<sup>[15]</sup>。在模拟分析前，首先对软件的准确性进行实测对比验证。

图 3 为课题组于 2009 年进行拉萨调研时的测试对象之一。建筑外墙采用 240 mm 厚实心混凝土砌块，无保温，外窗为 6 mm 厚单层玻璃窗，楼板为 100 mm 厚钢筋混凝土现浇楼板。南向窗墙面积比 0.59，北向 0.18。户型及尺寸如图 3 所示，测试期间无采暖。

使用 THERB 建立相同的计算模型。计算步长为 3 600 s，各房间与外界通风频率为 0.5 次/h，无采暖。计算参数方面，室外气温使用实测值。其他计算参数，如：太阳辐射相关参数、夜间长波辐射、风

向、风速,等,因缺实地测试气象数据,使用文献[16]相同时间段数据。选取对比分析时间段为 2009 年 11 月 26 日 17:00 到 11 月 27 日 16:00,共 24 h。

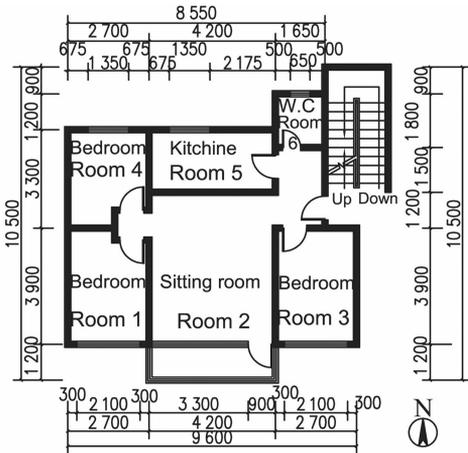
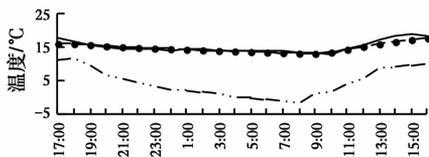


图 3 测试建筑户型图

Fig. 3 Schematic diagram of field measurement layout

图 4 为测试户型中 ROOM3 室内空气温度的实测数据与模拟计算数据对比图。图中,实测值与模拟值变化趋势一致。在 24 h 周期内,实测温度平均值为 14.98 °C,模拟为 14.71 °C。在实测值与模拟值的 24 h 逐时温差方面,最大逐时温差值为 1.67 °C(实测值高于模拟值),最小温差值为 0 °C。从 19:00 至次日 11:00,即受太阳直射辐射影响较弱的时段,实测与模拟的逐时温差平均值为 0.3 °C。其余时间段,该平均值超过 1 °C。数据对比表明,实测值与模拟值之间的差异主要是由太阳辐射照度的区别造成的。计算中,来自标准年气象数据库的太阳辐射照度值小于实测时间段的实际值,造成了在室内 24 h 周期温度波的波峰阶段,模拟计算值小于实测值。另一方面:1)实测与模拟的温度波动趋势一致;2)在室内 24 h 周期温度波的非波峰阶段,实测数据与模拟数据的逐时温差非常小。综上所述, THERB 软件计算结果是可靠的。



注: —●— ROOM3 Measurement Temperature  
 - - - ● - - - ROOM3 Simulation Temperature  
 ····· Outdoor Temperature

图 4 室内温度测试与模拟计算结果对比

Fig. 4 Comparison of field measurement and simulation results

在后面的计算中, THERB 的计算步长、通风状况、内外表面换热系数等设置同验证计算。各模型在采暖期内除了南北阳台外,其他房间均采暖,室内设定温度为 18 °C。

为计算方便,本文按 11 月 1 日到 2 月 28 日之间的整数月作为拉萨的采暖计算周期,采暖期内进行不间断采暖计算。室外气象计算参数采用文献[16]的数据。

### 2.2 基本模型采暖季采暖能耗对比分析

本节针对基本模型之间的采暖能耗进行对比研究。另外,虽然实地调研显示当地建筑基本朝南向,但是考虑到城市的发展与用地情况的变化,未来其他朝向的建筑也有可能出现。本节对 3 种户型在东南西北四个朝向下的不同能耗进行计算分析。表 3 显示了 3 种户型的各朝向模型的围护结构构造、户型平面图与模型的计算数量。

表 3 基本模型信息

Table 3 Basic models information

围护结构构造	模型平面图	朝向模型数量
表 2	图 2	12(每 90°一个)

图 5 为模拟计算结果。如图所示,3 个基本模型中,明显可以看出,不具备缓冲空间的直接受益模型的各朝向采暖能耗均远大于其他户型。以正南向为例,计算显示阳光间模型和北向封闭阳台模型的能耗相差很小,同时,直接受益模型的采暖能耗约为这两种户型的 1.43 倍。结果表明在其他条件不变的情况下,非采暖的缓冲空间不管是南向还是北向均对降低拉萨市的冬季采暖能耗有很大帮助。

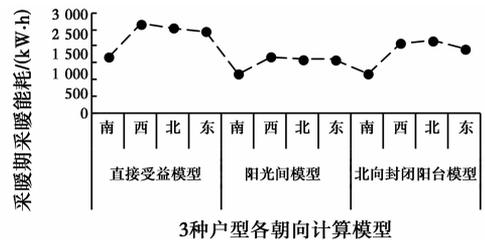


图 5 3 种户型 4 个朝向采暖能耗对比计算结果

Fig. 5 Comparison of 3 models in 4 orientations

3 种户型的 4 个朝向中,南向能耗最小,与其他 3 个朝向相比,能耗差值很大。3 个模型的各朝向最大采暖能耗为其南向能耗的倍数分别为:直接受益窗模型 1.58 倍,阳光间模型 1.43 倍,北向封闭阳台

模型 1.83 倍。计算表明,当建筑朝向为非南向时,建筑的采暖能耗会明显增加。意味着今后随着城市化的发展,在当地土地资源有限的情况下,按一般的户型设计方法出现了朝向受限情况时,则应该通过调整用地规划、改变空间设计思路等方式来尽量保证主要建筑空间朝南向。

需要注意的是,直接受益模型与太阳房模型的正北向案例的能耗并不是 4 个朝向中最大的。这是由于在正北向模型中,原本朝向北侧的外窗变为朝南向,对于上述两个模型中产生采暖负荷的 Room4、Room5、Room6 来说形成了直接受益系统,虽然限于窗墙比的原因,系统效率较低,但是在拉萨强烈的太阳辐射条件下,能耗仍然小于没有该系统的正东正西模型。但同时计算结果显示,对于北阳台模型来说,其北向模型的能耗最大,这是因为原北向封闭阳台 Room9 为非采暖房间,不产生采暖负荷,当其转到正南向时,由于 Room9 的窗墙比很小,新的太阳房系统效率很差,对相邻采暖房间的帮助很小,同时,窗墙比较大的原南向房间转至北向,变成纯失热面。因此,该户型的北向模型在 4 个朝向中能耗最大。当然,如果作为缓冲空间的北向封闭阳台 Room9 采暖,则会出现不同的计算结果。分析表明,非采暖缓冲空间能够显著降低由室内外温差引起的采暖负荷。同时南向缓冲空间也会影响到被动式系统的运行效率,需要恰当的窗墙比来进行被动式设计。在后续研究中会继续进行。

### 2.3 南向阳光间进深对冬季采暖能耗影响

在前期的实地调研与计算分析中,南向阳光间无疑能够对相邻房间的热舒适产生改善作用,不同尺寸的南向阳光间其对应的热环境有所差异。另外,住宅建筑的阳光间还具备具备封闭阳台的建筑功能使用要求。于是,阳光间的进深设计同时影响到室内热环境与建筑功能。在前期的研究中,阳光间进深对建筑采暖能耗的作用的部分案例已经进行过分析。本节结合前期研究<sup>[14]</sup>,从室内热环境与建筑功能两方面分析阳光间进深的适宜设计尺寸。

图 6 为阳光间进深模型的户型设计示意图,其中阳光间进深尺寸用字母  $H$  代表。计算案例中共有 7 个阳光间进深计算模型,分别是进深 0、0.6、1.2、1.8、2.4、3.0、3.6 m。表 4 为模型具体信息。其中模型 0 m 意为无阳光间设计,即户型为直接受

益式太阳房。

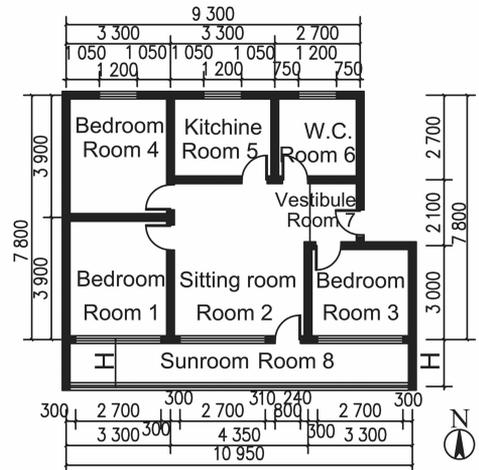


图 6 阳光间进深模型户型示意图

Fig. 6 Schematic layout of different sunroom depth models

表 4 阳光间进深模型设计信息

Table 4 Design information of different sunroom depth models

围护结构构造	南向阳台进深 $H$ / m
表 2	0、0.6、1.2、1.8、2.4、3.0、3.6

在图 7 所示计算结果中,直接受益式模型的冬季采暖能耗明显大于具备阳光间设计的各个模型。在阳光间进深 0.6~3.6 m 的模型中,阳光间进深的逐步增大导致了采暖能耗的逐步增大。其中,从阳光间进深 0.6~3.0 m,模型间采暖能耗增幅基本同步,进深 3.0~3.6 m,能耗增幅趋缓。实际上,在居住建筑设计中,由于空间功能要求,鲜见阳光间进深大于 3.0 m 的情况。当阳光间进深尺寸大于 3.0 m 时,计算就可以视为不采暖南向房间的进深设计对建筑采暖能耗的影响,在今后的研究中将继续深入。

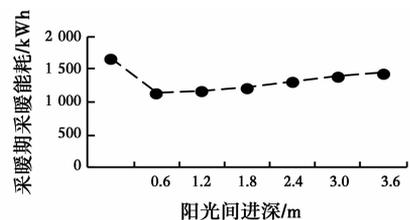


图 7 不同阳光间进深模型采暖能耗计算结果

Fig. 7 Heating energy consumption of sunroom depth models

本节计算中,阳光间进深 0.6 m 的采暖能耗最小。但因为阳光间同时还是一个建筑空间,具备特有的使用功能,如有晾衣、景观等。综合考虑,阳光间进深设计在满足日常功能的同时应采用较小的尺

寸。对于普通的单元式集合住宅,阳光间进深 1.8 m 左右比较合适。当然,如果南向外窗采用构造接近阳光间的内外双层飘窗设计的话,因为飘窗的进深尺寸较小,该设计会更有利于节能。

### 2.4 北向封闭阳台进深对冬季采暖能耗影响

与阳光间一样,在住宅建筑设计中,北向封闭阳台具备建筑学意义上的使用功能,例如服务阳台、仓储等。北向封闭阳台的设计也要满足功能和热工设计的双重需求。

图 8 为北向封闭阳台模型的示意图,其中,字母  $h$  代表北向封闭阳台进深数值。计算案例中共有 7 个北向封闭阳台进深计算模型,分别是进深 0、0.6、1.2、1.8、2.4、3.0、3.6 m。表 5 为模型具体设置。其他计算设置同阳光间进深计算案例。

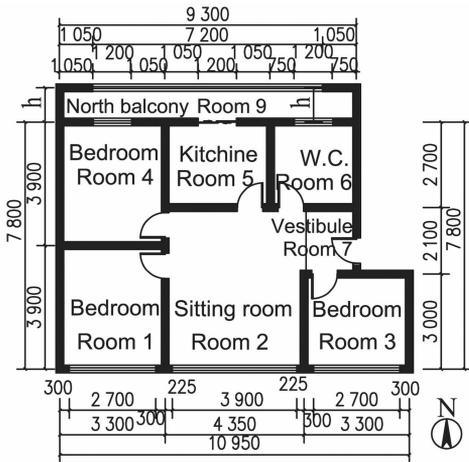


图 8 北向封闭阳台进深模型户型示意图

Fig. 8 Schematic layout of north sealed balcony depth models

表 5 北向阳台进深设计模型信息

Table 5 Design information of north sealed balcony depth models

围护结构构造	北阳台进深 $h$ / m
表 2	0、0.6、1.2、1.8、2.4、3.0、3.6

图 9 为模拟计算结果。明显可以看出,直接受益式模型的采暖能耗大于其他北阳台模型。同时,在北阳台进深模型中,随进深增大,采暖季计算能耗呈现先降后增的趋势,其中,进深 1.2 m 为最小值。同时,北阳台进深模型之间的能耗差非常小,模型间能耗差均小于最小能耗值的 0.6%。因此,在进行户型设计时,首先,应该具备北向封闭阳台设计;然后,具体的进深设计以满足北阳台的使用功能为准。根据实地调研情况,若北向缓冲空间设计为服务阳台的话,建议进深设计选用 1.2~2.4 m 之间。

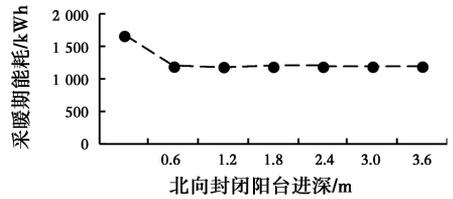


图 9 北向封闭阳台进深模型计算结果

Fig. 9 Heating energy consumption of north sealed balcony depth models

## 3 拉萨市居住建筑缓冲空间的设计建议及效果对比分析

由第 2 节的模拟计算结果可知,非采暖缓冲空间能有效降低建筑采暖能耗。南向阳光间进深的计算分析表明,建筑的采暖季计算能耗随阳光间进深增大而增大。在满足阳光间功能的前提下,应当控制阳光间的进深设计。北向封闭阳台进深案例分析表明,建筑采暖季计算能耗随进深增大,呈现先降后增的趋势,同时模型之间能耗差很小。所以,北向阳台的进深设计应该以满足其使用功能为主要依据。综上,建立一个南北向双阳台计算模型,与当地最常见的直接受益模型进行对比来验证缓冲空间设计的节能效果。

在双阳台模型的设计中,朝向设计方面,建筑朝南向;阳光间进深设计方面,进深设计为 1.2 m;北阳台进深设计方面,进深设计为 1.2 m。图 10 为双阳台模型的户型示意图。

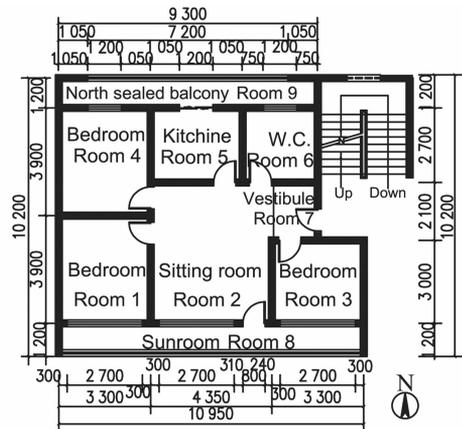


图 10 双阳台模型户型图

Fig. 10 Schematic diagram of double-balcony model

为了得到非采暖的南北向缓冲空间对建筑采暖能耗削减作用的的量化结果,对上述双阳台模型与直接受益模型进行冬季采暖能耗验证计算。各项计

算参数同前。

图 11 为计算结果,如图所示,在计算条件下,采用了缓冲空间设计的优化模型与原始模型相比较,能耗减少了 56.5%。计算结果表明采用了缓冲空间设计的建筑平面设计方案能够大幅降低建筑的采暖能耗。同时,在新住宅建设中采用缓冲空间设计几乎不会增加成本,采用该项设计对于当地的居住建筑节能工作非常有利。

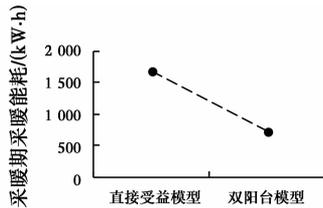


图 11 缓冲空间设计的节能效果计算

Fig. 11 Simulation of buffer-space's energy saving effect

## 4 结论

针对缓冲空间设计对拉萨市居住建筑采暖能耗的节能作用,得出以下结论:

1) 计算分析与节能验证表明:缓冲空间的设置能够明显大幅降低居住建筑的冬季采暖能耗。在居住建筑被动式设计时应设置南北向缓冲空间。

2) 设计南向缓冲空间(阳光间)时,其进深应尽量减小,从而满足能耗控制的要求。设计北向缓冲空间时,由于建筑能耗对北阳台进深并不敏感,所以,应该以北阳台的使用功能为主要设计依据。

3) 南向是当地的住宅建筑节能的最有利朝向,设计时应通过各种手段尽量使得主要使用空间朝南向。

最后,通过数值模拟的方法分析了居住建筑缓冲空间对采暖能耗的作用,提出了缓冲空间的适宜尺寸。同时,需要注意的是,在调研中发现,户型设计的其他空间构成因素也会影响建筑的采暖能耗,围护结构的各项热工性能也会显著影响采暖能耗。对此,课题组将进行持续研究。

### 参考文献:

[1] ZHAO X X, FU H D, JI J, et al. Comparative study on performances of a heat-pipe PV/T system and a heat-pipe solar water heating system [J]. International Journal of Green Energy, 2016, 13(3): 229-240.

[2] LI E, AKASHI Y, LIU J P. Design methodology of energy saving building in developing cities—the

geography, climate, society and indoor environment of Tibet [J]. Journal of Habitat Engineering, 2009, 1(1): 125-134.

- [3] 李恩,刘加平,赤司泰仪. 拉萨市居住建筑热环境测试与家庭能耗模拟研究[J]. 住宅科技, 2011(8): 30-35.  
LI E, LIU J P, AKASHI Y. Study on thermal environment test of residential buildings of Lhasa city and household energy consumption simulation [J]. Housing Science, 2011(8): 30-35. (in Chinese)
- [4] ZHANG J K. Evaluating regional low-carbon tourism strategies using the fuzzy delphi-analytic network process approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141(1): 409-419.
- [5] HUANG L J, HUANG Z D, NEVEEN H, et al. Energy-efficient retrofitting and energy consumption in a historic city centre—an example from Lhasa [J]. Disruptive Planning Re-view, 2014, 50(3): 55-65.
- [6] 王磊,冯雅,曹友传,等. 西藏地区太阳能采暖建筑热工性能优化研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(2): 86-91.  
WANG L, FENG Y, CAO Y Z, et al. Thermal performance optimization of solar heating building envelope in Tibet of China [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(2): 86-91. (in Chinese)
- [7] 肖伟. 藏西南边远地区直接受益式太阳能采暖研究[D]. 北京:清华大学, 2010.  
XIAO W. Study of the direct-gain solar heating in remote southwest Tibet [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [8] 李恩. 太阳能富集地区住宅建筑非平衡保温研究——拉萨市供暖期太阳辐射分析与室内热环境测试[J]. 建筑科学, 2011(4): 36-41.  
LI E. Study on unbalanced insulation of residential building in solar energy abundant area: solar radiation analysis and indoor thermal environment test in Lhasa during heating period [J]. Building Science, 2011(4): 36-41. (in Chinese)
- [9] 李恩. 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(8): 56-60.  
LI E. Study on unbalanced insulation of residential building in solar energy abundant area—analysis on heat transfer coefficient limited value of unbalanced insulation in Lhasa [J]. Building Science, 2011(8): 56-60. (in Chinese)
- [10] 桑国臣. 西藏高原城镇居住建筑围护结构传湿研究[J].

- 太阳能学报,2011(2):175-179.
- SANG G C. Study of Moisture transfer in envelope of city residential buildings in Tibet Altiplano [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011 (2): 175-179. (in Chinese)
- [11] 朱新荣,杨柳,刘加平,等. 西藏自治区城市围护结构传热系数的修正系数[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008(9):1381-1384.
- ZHU X R, YANG L, LIU J P, et al. Correction factor for heat transfer coefficient of city building envelope in Tibet autonomous region [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2008(9): 1381-1384. (in Chinese)
- [12] LI E, AKASHI Y, SUMIYOSHI D. Passive design strategy on residential buildings for sustainable development of Lhasa [J]. Journal of Environmental Engineering, 2013(6):471-480.
- [13] 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(2):27-32.
- LI E, LIU J P, YANG L. Research on the passive design optimization of direct solar gain house for residential buildings in Lhasa [J]. Industrial Construction, 2012 (2):27-32. (in Chinese)
- [14] 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(2):258-264.
- LI E, YANG L, LIU J P. Analysis on the passive design optimization for residential buildings in Lhasa based on the case study of attached sunroom system for apartment buildings [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2016(2):258-264. (in Chinese)
- [15] OZAKI A, WATANABE T, TAKASE S. Simulation soft-ware of the hydrothermal environment of buildings based on detailed thermodynamic models [C]//eSim 2004 of the Canadian Conference on Building Energy Simulation. Vancouver (Canada): CANMET Energy Technology Branch, 2004.
- [16] 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.
- Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)