

# 川西高原藏族民居室内热环境测试研究

何 泉<sup>1,2,3</sup>, 刘大龙<sup>1,2,3</sup>, 朱新荣<sup>1,2,3</sup>, 杨 柳<sup>1,2,3</sup>, 刘加平<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省西部绿色建筑协同创新中心, 陕西 西安 710055;

3. 陕西省(西部)绿色建筑重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 由于严酷气候和地理环境的影响, 川西高原的藏族民居室内热环境质量低下, 当前落后的采暖方式对当地生态造成了极大的损害. 为了改善室内热环境和降低建筑能耗, 在冬夏两季对甘孜州康定县塔公乡夏马龙村民居进行了室内热环境测试, 根据测试结果提出了以下建议: (1) 当地民居的冬季采暖问题应采取主动、被动太阳能利用相结合来解决; (2) 引入聚苯板、双层塑钢窗等现代保温材料, 提高围护结构的保温性能; (3) 加大南向窗户, 并增设夜间保温板, 同时其他朝向尽量避免开窗或开窗面积尽可能小; (4) 南向设置附加阳光间作为间歇式使用房间, 对内侧房间能起到很好的集热和气候缓冲的作用, 使其在夏季可以全天保持舒适稳定的温度; (5) 冬季需要在直接受益式房间内增湿来提高舒适度.

**关键词:** 川西高原; 藏族民居; 室内热环境; 太阳能利用

**中图分类号:** TU111.3 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)03-0402-05

## Study on measuring the indoor thermal environment of Tibetan vernacular houses on the Chuanxi Plateau

HE Quan<sup>1,2,3</sup>, LIU Dalong<sup>1,2,3</sup>, ZHU Xinrong<sup>1,2,3</sup>, YANG Liu<sup>1,2,3</sup>, LIU Jiaping<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Province Collaborative Innovation Center for Western Green Building, Xi'an 710055, China;

3. Shaanxi Province Key Laboratory of Western Green Building, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Due to the severe climate and geography, indoor thermal environment of Tibetan vernacular houses on Chuanxi Plateau is poor, and besides, the outdated heating mode there has greatly harmed its ecological environment. In order to improve the indoor thermal environment and reduce the building energy consumption, measuring studies of Tibetan vernacular houses were conducted in Xiamalong Village, Tagong, Kangding in both winter and summer, and accordingly suggestions are given as follows: (1) Heating of vernacular houses in winter should be solved by both active and passive solar use; (2) Modern insulation materials such as polystyrene boards and double-glazed plastic-steel windows should be introduced into vernacular houses for improving insulation performance of their envelope; (3) Windows on south should be enlarged with night insulation, but windows on other orientations should be avoided or as small as possible; (4) South-attached sunspace as an intermittent room could be a good heat-collector and climatic buffer of its inner room; and, (5) Direct-gain room should be humidified in winter to enhance its indoor comfort.

**Key words:** Chuanxi Plateau; Tibetan vernacular houses; indoor thermal environment; solar energy use

川西高原上的藏区包括了四川省甘孜藏族自治州全部、阿坝藏族羌族自治州的一部分、凉山彝族自治州一部分<sup>[1]</sup>, 属于文化意义上的康巴藏区. 这里是生存环境最恶劣、最艰苦的藏区, 地处横断山区, 在地形、地貌上的突出特点是高原型的高山深谷区, 地形跌宕起伏<sup>[2]</sup>, 生态环境极为脆弱, 地质灾害频发. 当地大部分居民至今仍依赖燃烧薪柴作为采暖能源, 高寒缺氧的气候条件下薪柴燃烧很不充分, 为了获取燃料而过度砍挖植被的行为已造成严重的水土流失. 区内生态环境日趋恶化已成为诱发地质灾害的主要原因<sup>[3]</sup>.

2013—2014 年, 本课题组在四川省甘孜藏族自治州康定县塔公乡进行了藏族民居冬夏两季的热环境测试研究, 期望寻找优化当地民居设计的思路, 以降低采暖能耗, 改善居住条件.

## 1 研究对象

### 1.1 川西高原气候特征

康定县位于四川省西部、甘孜藏族自治州东部, 海拔高度约 2 616 m. 虽然纬度较低, 但深处内陆形成了它独特的高原型大陆性季风气候, 年平均气温 7.1 °C 左右, 极端最低温度 -14 °C, 最高 29 °C, 年日照时数 1 689.9 h, 年总辐射量约 470.3 kJ/cm<sup>2</sup>, 年降水量 832 mm, 无霜期 177 d<sup>[4]</sup>. 因地形复杂, 当地气候特点出现明显的垂直差异. 测试点塔公乡夏马龙村距康定县城约 110 km, 海拔高度约 3 800 m. 与康定县城相比, 塔公乡由于海拔高, 热量资源更少, 冬季漫长, 春秋季短, 基本无夏, 但太阳辐射资源更丰富, 根据文献[4]粗略估计, 塔公乡的年日照时数约 2 400 ~ 2 700 h, 年总辐射量约 627 ~ 668.8 kJ/cm<sup>2</sup>.

收稿日期: 2015-01-22

修改稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208420); 国家杰出青年科学基金项目(51325803); 住建部 2015 年科学技术项目(2015-K1-014)

作者简介: 何泉 (1976-), 女, 博士, 副教授, 主要研究绿色建筑设计及建筑节能. E-mail: 76634259@qq.com

## 1.2 测试对象

当地民居均为藏式碉房,石木混合承重结构,外墙为大约 700 mm 厚石墙,略有收分,内部由木柱支撑,木梁放置在柱头的横木上或搭入外墙,梁上铺椽子、木板,再夯实粘土,形成楼面和屋面。为防止雨水侵袭,在覆土平屋面上还架空了歇山式的瓦屋面。内墙皆为木板隔墙。窗户为单玻塑钢窗。

冬季测试的民居 A(图 1)为 2010 年建成的二层建筑,一层为出租客房,二层为主人家日常用房。除了客厅生有火炉燃烧木柴间歇式采暖,其他房间均无采暖设施。夏季测试的民居 B(图 2)与民居 A 同处于夏马龙村,一墙之隔,年代相近,建筑朝向接近,属于同种结构形式,所用建筑材料相同。与民居 A 的不同之处在于,建筑为三层,顶层南向局部加盖了附加阳光间,顶部为半透明的 PC 阳光板。



图 1 冬季测试民居 A 南向外观

Fig.1 Southern appearance of House A measured in winter



图 2 夏季测试民居 B 南向外观

Fig.2 Southern aspect of House B measured in summer

## 2 测试方案

冬季测试时间为 2013 年 12 月 24 日 10:30 至 12 月 25 日 10:00,测试过程为晴转多云,测试房间包括二层的卧室 A1、A2、A3 和客厅 A4(测点布置如图 3)。夏季测试时间为 2014 年 7 月 23 日 07:00 至 7 月 24 日 07:00,测试过程为晴天,测试房间包括一层房间 B1、三层房间 B2、B3 和附加阳光间 B4(测点布置如图 4)。

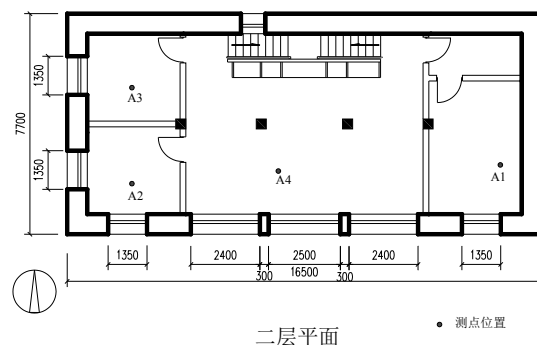


图 3 被测民居 A 室内测点位置

Fig.3 The indoor measured spots of House A

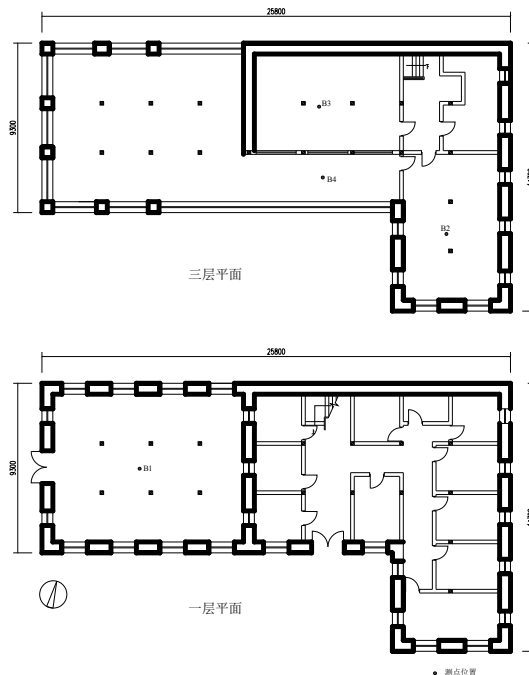


图 4 被测民居 B 室内测点位置

Fig.4 The indoor measured spots of House B

测试内容包括太阳辐射直射强度和散射强度、室外空气温湿度、主要房间的室内空气温湿度。太阳辐射仪为国产 TBD-1 型辐射仪,仪器灵敏度为  $8.789 \mu V/(W \cdot m^{-2})$ ,水平置于其他建筑的平屋面上,周围无遮挡物。室内外参数采集间隔都为 30 min。空气温度测试采用日本 T&D 公司 TR7xU140E 自记式温/湿度计,温度测量精度  $0.2^{\circ}C$ 。室外温度测点均置于民居屋顶平台背阴处,并以锡箔遮蔽。

测试目的是通过对比不同平面布局和开窗方式的各房间温湿度,掌握建筑设计对室内热环境的影响,寻找科学设计当地民居的方法。

## 3 测试结果及分析

### 3.1 冬季测试结果及分析

#### 3.1.1 室外气象条件

测试期间记录到的有效日照时间为 9:30~15:30,日照时间内太阳总辐射平均强度约为  $285 W/m^2$ ,最高值出现在 24 日 11:00 前后,约为

491.52 W/m<sup>2</sup>(图5), 太阳直射辐射强度约占总辐射强度的67%。室外空气温度范围在-10.8~8.4℃, 最高温度出现在24日17:00, 最低气温出现在25日07:00, 平均气温为-2.5℃。室外空气相对湿度随之在13%~61%, 15:00~15:30达到最低值, 凌晨5:00~6:30达到最高值, 平均湿度为42%(图6)。从测试数据可以看出, 当地气候冬季严寒、干燥, 太阳辐射资源较丰富。

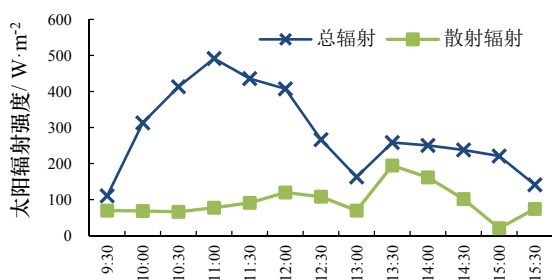


图5 冬季室外水平面的太阳辐射强度曲线

Fig.5 Solar radiation intensity on outdoor horizontal plane in winter

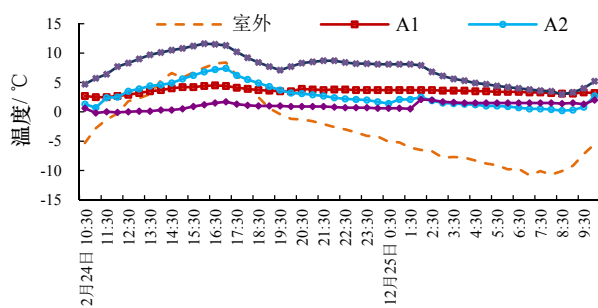


图6(a) 冬季测试期间民居A室内温度曲线

Fig.6(a) Outdoor and indoor air temperature curves of House A in winter

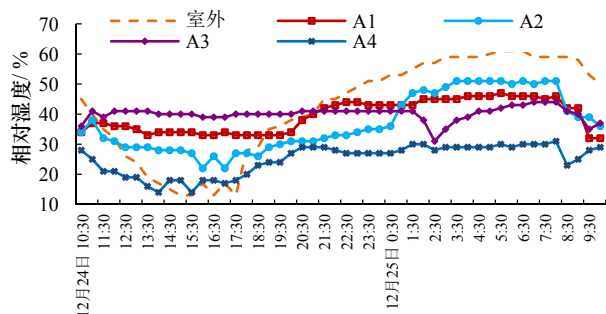


图6(b) 冬季测试期间民居A室内湿度曲线

Fig. 6(b) Outdoor and indoor relative humidity curves of House A in winter

### 3.1.2 室内空气温度

由图6(a)可知, 东南角房间A1温度在2.5~4.5℃, 平均温度为3.6℃; 西南角房间A2温度在0.2~7.4℃, 平均温度为2.8℃; 西北角房间A3温度在-0.2~2.1℃, 平均气温为1.0℃; 客厅A4温度在3.0~11.6℃, 平均温度为7.3℃。

在室外昼夜温差接近20℃的情况下, 各房间的温度比较平稳, 表明房间蓄热能力充足, 厚重外围护结构有效平抑了温度波动。以位于西北方向的卧室A3为例, 气温主要受室外气温影响, 最高室温比室外气温延迟9h, 最低室温比室外气温延迟4h, 说明厚重石墙的热惰性很大。但是各房间室内空气平均温度都没有超过3.6℃, 间歇采暖的客厅A4最高温度也未达到人体舒适要求, 室内温度整体偏低, 热环境质量低下, 说明外围护结构的保温能力不足。

二楼卧室A1和A2同为非采暖房间。A2除了南向窗口, 还增设了西向窗口, 其最高室温比A1略高, 分析是由于西向开窗延长了下午太阳辐射得热的时间, 然而, 增大了开窗面积也增加了夜间的热损失, 使得A2的最低温度和平均温度均低于A1。由此可见, 增设西向窗口能略提高房间最高温度, 但会降低最低温度和平均温度, 对于使用时段主要在夜间的卧室是不利的。

客厅A4为直接受益式房间, 南向窗墙面积比约0.6, 平均温度比其他各南向房间高出3.7~4.5℃, 最高温度比其他南向房间高出4.2~7.3℃, 但最低温度接近于其他南向房间。这反映出直接受益窗的矛盾: 在白天由太阳辐射造成升温现象虽然明显, 窗户夜间散热也非常严重。

### 3.1.3 室内相对湿度

由图6(b)可知, 房间A1相对湿度在32%~47%, 平均湿度为39.4%; 房间A2相对湿度在22%~51%, 平均湿度为36.9%; 房间A3相对湿度在31%~44%, 平均湿度为40.1%; 客厅A4相对湿度最低, 在14%~31%之间波动, 平均湿度为25%。

A2和A4在白天的相对湿度基本在30%之下。文献[5]指出, 舒适的相对湿度在30%~70%之间, 因此A2和A4都需要增湿措施来提高舒适度, 尤其是A4, 湿度最低。通过分析可知, 室内各房间的空气相对湿度受开窗面积的影响明显。一方面, 窗户的密闭性差, 所以隔湿能力差; 另一方面, 窗户面积大受到太阳辐射和玻璃夜间散热的影响也大。A4窗墙面积比超过0.6, 白天受太阳辐射影响温度较高, 而且住户用火炉间歇式采暖, 造成空气极为干燥。

## 3.2 夏季测试结果及分析

### 3.2.1 室外气象条件

测试期间记录到的有效日照时间为7:00~19:30, 日照时间内太阳总辐射平均强度约为759.72 W/m<sup>2</sup>, 最高值出现在13:30, 约为970 W/m<sup>2</sup>(图7), 太阳直射辐射强度约占总辐射强度的86%。在夏季测试时段, 室外空气温度范围在10~18.8℃, 平均温度为13.9℃, 最低温度出现在23日7:00, 最高



温度出现在 16:00(图 9)。室外空气相对湿度随之在 45.2%~79.9%, 15:00 达到最低值, 凌晨 7:00 达到最高值(图 8), 平均湿度为 66.3%。

由测试数据可知, 当地夏季气候凉温, 湿度适宜, 太阳辐射资源丰富。当地没有人工制冷的需求, 反而在夜晚至清晨会有采暖需求, 在进行调查的 45 户民居中, 有 69% 的住户采用取暖设备, 其中 26% 的住户采用电暖器取暖, 74% 的住户采用煤炉取暖。

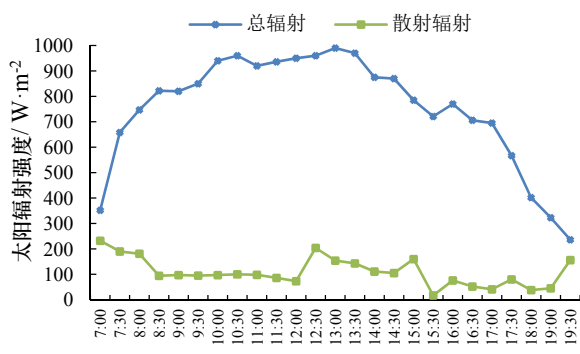


图7 夏季室外水平面的太阳辐射强度曲线

Fig.7 Solar radiation intensity on outdoor horizontal plane in summer

### 3.2.2 室内空气温度

由图 8(a)可知, 西、南、北向同时开窗的一层房间 B1 温度在 10.9~15 °C, 平均温度最低, 为 13.5 °C; 屋顶附加阳光间 B4 在 10.6~33.6 °C, 平均温度最高, 为 18.5 °C; 东、南、西三面开窗的房间 B2 温度在 15.5~17.6 °C, 平均温度为 15.9 °C; 阳光间内侧的房间 B3 在 15.3~18.7 °C, 平均温度为 16.5 °C。

可见, 北向开窗降低了房间的平均温度, 东、西、南向开窗均有利于提高夏季室内平均温度。

附加阳光间 B4 温度波动剧烈, 16:00 出现超过 30 °C 的高温, 7:00 室温则降至 10 °C 左右, 接近室外气温, 因此仅适合于间歇式使用, 适用时段大约在 9:00~12:00 以及 18:00~23:00。除了阳光间 B4 外, 其他各房间均没有出现过热现象, 且室温均比较平稳, 这反映出厚重围护结构具有良好的热惰性。借助于阳光间所起到的集热和气候缓冲的作用, 房间 B3 全天温度都较为舒适。

### 3.2.3 室内相对湿度

由图 8(b)可知, 房间 B1 相对湿度在 61.2%~74.9%, 平均湿度为 67.6%; 房间 B2 相对湿度在 50.9%~57.8%, 平均湿度为 54.8%; 房间 B3 相对湿度在 52.3%~59.6%, 平均湿度为 56.7%; 屋顶的附加阳光间 B4 相对湿度在 28.9%~69%, 平均湿度为 52.3%。

可以看出, 当地民居有较好的夏季室内湿环境: 阳光间 B4 相对湿度随着室外空气湿度的波动起伏明显, 波幅在 40.1%, 其他房间相对湿度均处于 50%~75% 之间波动, 基本可以满足舒适要求。与

冬季状况相似, 夏季室内空气湿度同样体现出受开窗面积的影响较大。

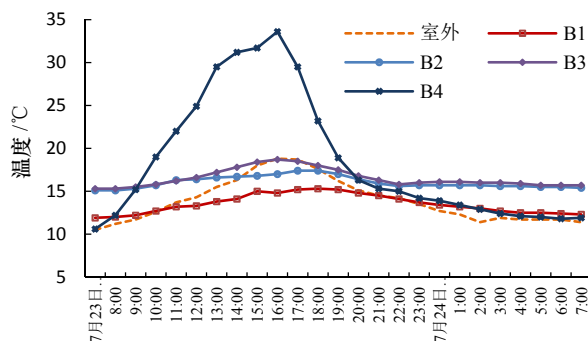


图8(a) 夏季测试期间民居B室内外温度曲线

Fig.8(a) Outdoor and indoor air temperature curves of House B in summer

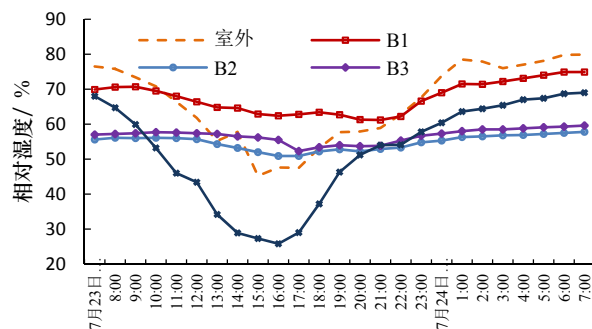


图8(b) 夏季测试期间民居B室内外湿度曲线

Fig.8(b) Outdoor and indoor relative humidity curves of House B in summer

## 4 结论

根据对康定县塔公乡夏马龙村民居的冬夏季测试研究, 得到了以下结论:

(1) 川西高原冬季严寒、夏季温凉, 热量资源明显不足, 全年均有采暖需求, 这样整年的采暖能耗累积起来就会很大。由于地处高海拔地区, 当地太阳辐射资源非常丰富, 属被动式太阳能利用的适宜气候区<sup>[6]</sup>, 通过太阳能利用可有效地提高民居的室温, 减少对薪柴的过度消耗。在夏季利用被动式方法, 完全可以不设置辅助热源。但在冬季气候条件下, 必须采用辅助热源, 建议在条件允许的地区考虑主动式和被动式相结合的太阳能利用方式。

(2) 传统民居厚重石墙具有较好的蓄热性能, 但其保温能力不足, 是造成冬季室内寒冷的主要原因; 单玻塑钢窗保温密闭性能差, 夜间散热和冷风渗透也是造成传热损失的重要途径。为增强围护结构的保温能力, 建议引入一些高效的现代保温材料, 以弥补地方材料之不足, 例如, 墙体和屋面可增设聚苯板等保温层, 窗户更换为保温密闭性更好的双层塑钢窗。

(3) 无论冬夏, 大面积南向窗户均可以显著提高房间的最高温度和平均温度, 使室温接近舒适温度; 北向开窗会降低室内温度, 使得室内更寒冷;

在南向开窗的房间增设东、西向窗户,夏季有利于提高室温至舒适温度,但冬季会降低房间的平均温度和最低温度.因川西高原冬季的热环境问题更突出,权衡利弊,民居应优先考虑冬季的得热和保温,因此宜增加南向窗墙面积比,而其他三个朝向在满足采光和通风需求的前提下,尽量不开窗或减少开窗面积.当地民居窗户普遍没有采取夜间保温措施,造成了直接受益窗冬季夜间散热明显.这需要在当地大力普及被动式太阳房知识,指导居民自行安装保温窗帘或保温窗板.

(4) 夏季,直接受益式房间没有出现过热现象,

#### 参考文献 References

- [1] 石硕. 关于“康巴学”概念的提出及相关问题: 兼论康巴文化的特点、内涵与研究价值[J]. 西藏研究, 2006(3): 92.  
SHI Shuo. Concept of Kham-ba Study and its concerned problems: including features, connotations and values[J]. Tibetan Research, 2006(3): 92.
- [2] 杨勤业, 郑度. 西藏地理[M]. 北京: 五洲传播出版社, 2001: 37.  
YANG Qinye, ZHENG Du. Tibetan Geography[M]. Beijing: Wuzhou Communication Press, 2001: 37.
- [3] 尹江涛. 四川甘孜地质环境特征研究及其防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(3): 266.  
YIN Jiangtao. Study on geological features and prevention of Ganzi, Sichuan[J]. Geological Disasters and Environment Protection, 2005, 16(3): 266.

但附加阳光间在午后会出现过热, 凌晨又出现低温, 所以只可作为间歇式利用的空间. 不过阳光间内侧房间可全天保持较为舒适稳定的温度, 在夏季完全不需要设置辅助热源, 这种房间布局是川西高原民居应推广的形式.

(5) 冬季各房间普遍湿度偏低, 特别是客厅, 相对湿度基本维持在 30% 之下, 非常有必要采取增湿措施; 夏季各房间湿度较为适宜, 只有阳光间平均湿度较低, 考虑到阳光间为间歇式利用, 在温度适宜的时段内也能满足湿度舒适的要求, 所以不需额外的增湿措施.

- [4] 胡继华, 曾皓. 川西高原立体气候资源开发利用的初步分析[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 55.  
HU Jihua, ZENG Hao. Preliminary Analysis on Development and Utility of three-dimensional Climatic Resource on Chuanxi Plateau[J]. China Agricultural Meteorology, 2003, 24(1): 55.
- [5] 杨柳. 建筑气候学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 17.  
YANG Liu. Bioclimatic Architecture[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 17.
- [6] JGJ/T 267-2012 被动式太阳能建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 4.  
JGJ/T267-2012 Passive Solar Building Technical Codes[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012: 4.

(编辑 桂智刚)

(上接第 401 页)

实质上也是对历史文化的一种伤害, 成为了聚居区结构形态可持续发展的桎梏<sup>[7-8]</sup>. 其四, 鼓楼回族聚居区自成体系的空间发展模式尽管通过个别城市轴线的延伸渗透与城市空间协同发展, 但是近年来聚居区内部与外部城市空间联系的弱化, 已难以掩

#### 参考文献 References

- [1] HILLIER B. Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture.[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996: 187-200.
- [2] BAFNA S. Space syntax: a brief introduction to its logic and analytical techniques[J]. Environment and Behavior, 2003, 35(1): 17-29.
- [3] 朱东风. 城市空间发展的拓扑分析: 以苏州为例[M]. 南京: 东南大学出版社, 2007.  
ZHU Dongfeng. A case study of city Suzhou on topological analysis of urban space development. Nanjing: Southeast University Press, 2007.
- [4] HILLIER B. A theory of the city as object: or, how spatial laws mediate the social construction of urban space[C]//3rd International space syntax symposium. Atlanta, Georgia, USA, 2001: 1-228.
- [5] 王静文, 毛其智, 党安荣. 居住区公共空间社会维度的句法释义: 以北京传统胡同空间中社会交往模式的探讨为例[J]. 华中建筑, 2007, 25(11): 166-169.  
WANG Jingwen, MAO Qizhi, DANG Anrong. Syntax paraphrase for social dimension of residential public

盖聚居区空间发展低效的客观事实. 由此可见, 无论是聚居区内部网络系统的空间运行还是外部城市网络的结构影响, 鼓楼回族聚居区的形态演进都存在着严峻的发展问题. 欲探寻鼓楼回族聚居区可持续发展的途经必须同时关注城市整体空间的变动和聚居区自身空间的生长需求, 两者不可偏废.

- space: the case study of social communication pattern in Beijing traditional hutong space[J]. Huazhong Architecture, 2007, 25(11): 166-169.
- [6] 杨滔. 空间句法: 从图论的角度看中微观城市形态[J]. 国外城市规划, 2006, 21(3): 48-52.  
YANG Tao. Space syntax: meso-and micro-urban morphology under the view of graph theory[J]. Urban Planning International, 2006, 21(3): 48-52.
- [7] 夏南凯, 宋海瑜. 大规模城市开发风险研究的思路与方法[J]. 城市规划学刊, 2007(6): 84-89.  
XIA Nankai, SONG Haiyu. Trains of thoughts and methods of study on risk issues for large scale urban development projects[J]. Urban Planning Forum, 2007, (6): 84-89.
- [8] 张松. 历史城市保护学导论: 文化遗产和历史环境保护的一种整体性方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.  
ZHANG Song. An introduction to integrated conservation: a way for the protection of culture heritage and historic environment[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2001.

(编辑 桂智刚)