



# 巴渝地区夯土民居室内热环境

杨真静, 田瀚元

(重庆大学建筑城规学院, 山地城镇建设新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**传统民居的传统生态建造经验与价值已得到广泛认可, 巴渝地区因特殊的地形与气候, 传统民居在热环境的营造上有自身的特点。以重庆江津区龙塘村夯土民居为研究对象, 以实地测量的冬季室内热工参数为基础, 运用软件模拟分析, 对民居全年室内热环境进行评价, 发现夯土墙对改善夏季热环境更为有利, 夯土民居冬季室内热环境远比夏季差; 民居建筑中阁楼空间在调节室内热环境方面作用显著, 具有冬季保温, 夏季隔热的作用。

**关键词:**民居; 热环境; 保温; 隔热

**中图分类号:** TU111.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)06-0141-06

## Analysis of indoor thermal environment of traditional earth dwellings in Bayu region

Yang Zhenjing, Tian Hanyuan

(College of Architecture and Urban Planning; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Ecological construction experience of traditional dwellings has been widely recognized. The construction technology of traditional houses on thermal environment has unique characteristics in Bayu region because of its special topography and climate. A rural earth building in Jiangjin district, Chongqing was used as the research object. Field measurement was carried out to record the residential indoor thermal environment throughout the year, and the data was adopted in numerical simulation analysis to evaluate indoor thermal conditions. The results showed that the earth wall was more effective to for improve thermal environment in summer and indoor thermal environment in winter was far worse than that in summer. The attic space in earth building had significantly positive affect on indoor thermal environment because of its heat preservation in winter and heat insulation in summer.

**Key words:** dwellings; thermal environment; heat preservation; heat insulation

由于气候、民族、生活习惯、文化等不同, 带来了传统民居的多样性, 其传统生态建造经验与价值已得到了广泛认可与重视<sup>[1]</sup>。传统民居热环境营造技术也逐渐成为建筑领域关注的焦点, 但受到经济、技

**收稿日期:** 2015-10-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(51508048); 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2014jcyjA90024); 中央高校基本科研业务费(106112014CDJZR190008)。

**作者简介:** 杨真静(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要从事建筑热工与节能研究, (E-mail) young30331@163.com。

**Received:** 2015-10-27

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51508048); Fundamental and Frontier Science Foundation of Chongqing (No. cstc2014jcyjA90024); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 106112014CDJZR190008)

**Author brief:** Yang Zhenjing (1975-), PhD, associate professor, main research interests: building thermal environment and energy efficiency, (E-mail) young30331@163.com.

术水平、自然条件和生活方式等因素的影响,民居的发展与更新不可避免动态的过程。对于这些富含历史与文化,且使用传统材料、传统工艺的建筑,应辩证对待,保护和优化更新并行。目前,对传统民居热环境已有一定的研究成果,Martin 等<sup>[2]</sup>在西班牙一农村进行了研究,对当地不同的几种材料建造的民居进行了测量和分析,发现用木头新建造的民居热工性能远不如之前的生土民居和石质民居,Ooka<sup>[3]</sup>对日本寒冷地区民居进行了研究,通过对典型民居冬季和夏季的测量,发现了土墙和芦苇屋顶对于室内热环境有很大的影响,而且土墙和生土地面对室内热湿环境的维持有一定的作用。在中国,对西北地区传统民居研究的成果丰硕<sup>[4-6]</sup>,华南地区传统民居具有强烈的地方特性,研究发现组织好自然通风是湿热地区提高室内热舒适性的关键<sup>[7-8]</sup>;对夏热冬冷地区传统民居的研究主要集中在江西、浙江等地<sup>[9-11]</sup>,对巴渝地区,因为气候与地形的特殊性,热环境相较其他地区有很大不同,而目前对该地区传统民居热环境的研究还较少。

笔者以巴渝地区常见的夯土民居为研究对象,进行室内热环境测量,通过实测与模拟分析巴渝地区夯土民居全年的热环境状况。

### 1 地域气候特点和研究对象

重庆地处四川盆地东南,地形以山地丘陵为主,坡地面积比较大,有山城之称。选择的研究点

位于重庆市江津区,属北半球亚热带季风气候,全年气候温和,四季分明,雨量充沛,日照尚足。江津城区年平均气温 18.4℃,冬季平均气温 7.7℃,夏季平均气温 28.5℃。年日照时数 1 273.6 h,年降雨量 1 030.7 mm,年湿度 81%,太阳总辐射量 3 050 MJ/m<sup>2</sup>。全年水蒸发量小于降雨量,气候湿润。南部山区受地形影响,气候的垂直变化明显,地势越高,气温越低,降水越多,冬季有雨雪天气。

研究对象位于江津区南部山区——中山镇龙塘村,村庄在中山古镇老街南面的山上,全镇面积 156 km<sup>2</sup>,耕地面积 20 528 亩。龙塘村属于山地农村,海拔 318.1 m。村庄民宅均沿山等高线排列布置,建筑依山而建,平面布局多“一”字型或“L”型,建筑多为土木结构,是一个具有典型代表性的以传统土木结构建筑为主,砖、石等其他材料为辅的村落。

### 2 实测与数据分析

#### 2.1 实测建筑简介

在村中选取一户居住者充分使用、且具有典型代表性的传统民居作为研究对象。该建筑有 80 多年历史,朝向为南偏西 65°。据考证是全村最老的建筑,5 开间,坡屋顶,木门窗,夯土墙,保存相对完好。建筑风格质朴,属于典型的巴渝民居,建筑平面功能简单,除堂屋外,其他房间均设有阁楼。建筑平面、剖面以及立面风貌见图 1。

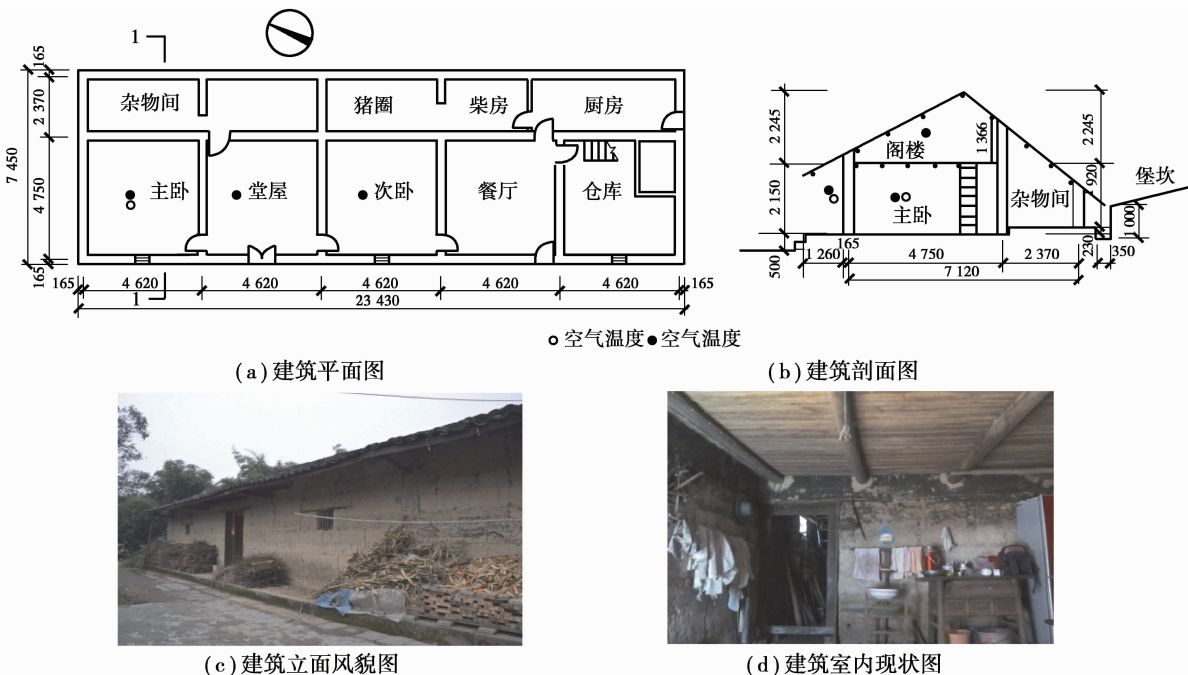


图 1 建筑现状图

Fig. 1 The tested building outline

建筑主要围护结构做法为:室内外墙体均采用 350 mm 厚夯土墙,墙体为就地取土,加上秸秆段人工夯筑而成,见图 2(a);地面素土夯实;屋顶采用传统木结构屋顶,上覆盖小青瓦,采用亮瓦顶部采光;见图 2(d);建筑门窗均为木质,窗仅为木格栅洞口。见图 2(b)、(c)。

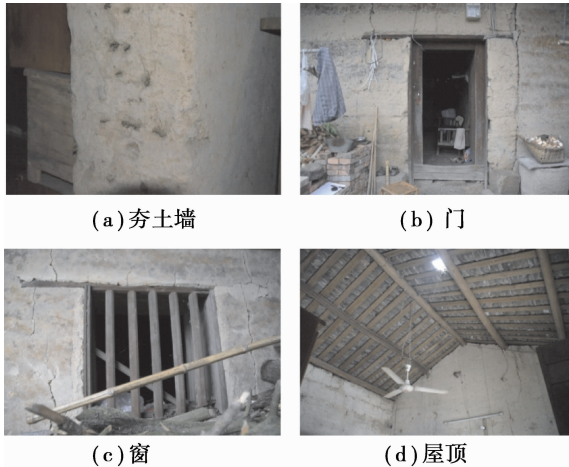


图 2 建筑围护结构做法

Fig. 2 Construction of the building envelope

### 2.2 实测方案

重庆属于湿冷湿热气候区,建筑热工设计不仅要满足夏季防热,还要兼顾冬季保温。一直以来的研究较多关注夏季室内热环境,对于冬季的研究较少,但是该地区冬季室内热环境问题尤为突出<sup>[12-13]</sup>。因此,选择冬季测量,测量时间为 2013-12-31—2014-02-09 日,共 40 d。测点具体位置见图 1(a)、(b)。测量参数为室内外温度,测量仪器采用 HOBO 温度自记仪,量程为 -20~70 °C,温度精度为 ±0.21 °C (0~50 °C),仪器每 30 min 自动记录一次。

### 2.3 测试结果分析

实测建筑功能房间类型主要分为堂屋和卧室,各自空间特点为:堂屋空间高,卧室均设有阁楼。

测试期间为重庆最冷月份,室外气温较低,平均温度为 8.5 °C(见图 3),晴天和阴天基本各占一半,最高温为 18.3 °C,最低温 1.1 °C。

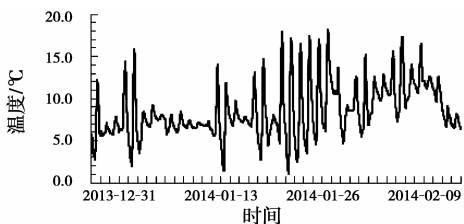


图 3 测试期间室外气候

Fig. 3 Outdoor meteorological parameter

建筑内各部位温度变化见图 4,可以看出,堂屋和次卧的平均气温基本相当,为 10.5 °C,高于室外平均温度 2 °C,阁楼次之,为 10 °C,平均温度最低的是主卧,比其他房间低 1.4 °C,比室外气温高 0.6 °C。比较主次卧室,空间特点一样,差别在于主卧为端部房间,尽管有西墙,但冬季太阳平均辐射较低,散热明显。从温度波动范围来看,两卧室基本相当,阁楼和堂屋的温度波动明显大于卧室,尤其是阁楼,平均日较差达到 14 °C 以上,分析堂屋和次卧的空间特点可以发现,差别在于有无阁楼,阁楼成为了室外气候的缓冲空间,使下部空间温度更为稳定。这一点也反映在阁楼的温度峰值和室外温度峰值相近,分析建筑特点可知,轻薄的小青瓦屋面热阻小,室外气候透过瓦直接作用到室内,没有阁楼的堂屋温度随室外波动,而卧室因为阁楼的缓冲作用,温度相对稳定。

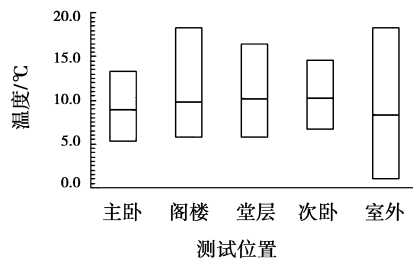
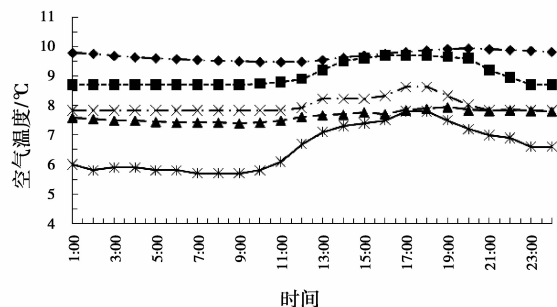


图 4 室外及各房间室内温度变化

Fig. 4 Temperature of outdoor and different rooms

为了逐时分析一天中室内气温的变化,选择测试时间段中室外平均温度最低且较稳定的 1 月 2 日作为典型天进行分析,典型天温度变化见图 5。该天室外日平均气温为 6.6 °C,昼夜温差为 2.2 °C。建筑内部空间中,热环境最好的是次卧,平均温度 9.7 °C,其次是与之位置相似的堂屋 9.1 °C,最低是主卧 7.7 °C,阁楼略高于主卧。



注:—\*—室外空气 —▲—主卧 —■—堂屋 —×—阁楼 —◆—次卧

图 5 典型天室内外空气温度变化

Fig. 5 Temperature of indoor and outdoor in typical day

从全天室内温度变化来看,因该日为阴天,太阳辐射较小,室内温度变化更多受到室内人员活动的影响,从 11:00 到 21:00,堂屋日间升温最为明显,这主要得益于住户的生活习惯,在重庆乡村,即使在冬季,堂屋大门在日间也会一直大开,且人员活动也在堂屋,室外温度的逐渐上升叠加人员活动带来了堂屋的升温,夜间人员转移到了卧室,从图中可见,在 19:00 后室外温度已经下行,卧室温度却出现了上行稳定状态,但堂屋温度却逐渐下降,这反映出冬季夯土民居室内温度的变化不但受围护结构的影响,还与住户的日常生活习惯和作息规律紧密相关,是多因素共同叠加作用的结果。

阁楼与室外空气紧密相接,瓦层轻薄,紧随室外温度变化而变化,但变化幅度明显小于堂屋。这主要是因为典型日为阴天,这也是重庆冬季主要的天气类型,太阳辐射较小,日较差小。另外,堂屋与卧室测点位置相较于阁楼要低很多,靠近人员的活动区域,其室内温度更多受到内热源的影响。而阁楼远离人员活动区域,比较阁楼和下部的卧室,在日间受室外影响,阁楼温度高于下部;在夜间,下部温度上升,阁楼温度下降,上下空间温度趋同。

热惰性方面,阁楼处于外层,瓦层轻薄多缝隙,温度变化和室外基本同步,基本没有峰值延迟,温度延迟最明显的是次卧,延迟约 2 h,反映出次卧因处于中间位置和阁楼的缓冲具有较好的热惰性。

### 3 模拟分析

为进一步研究夯土民居全年室内热环境,采用软件 DesignBuilder 对该建筑进行模拟研究。

### 3.1 模型验证

数值模型按照实际尺寸建立,各项参数均按照实际情况设置。模型见图 6。

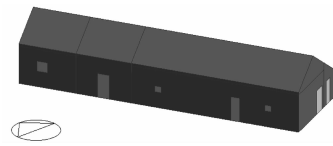


图 6 模型透视图

Fig. 6 The building mock-up

气象数据采用重庆标准气象年数据,围护结构做法及热阻值见表 1,根据民居实际使用情况设置室内相关热工:所有机械设备全部关闭,外窗设置为洞口,室内人员设置 2 人,堂屋活动时间为 8:00—19:00,轻微劳作,卧室为 19:00—8:00,灯光按照低照明水平设置。

表 1 围护结构构造做法

Table 1 Construction of the envelope

位置	构造做法	热阻/(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )
墙体	夯土夹秸秆段	0.94*
屋顶	瓦加部分松木板	0.10
地面	素土夯实	0.43
外窗	仅为洞口	
阁楼地面	松木	0.21

注: \* 墙体热阻数据来源于实际测试结果计算而得<sup>[14]</sup>

选择室外温度与选取的典型气象参数最为接近的一天进行模拟,将模拟结果和测试结果进行对比,结果见图 7。从模拟结果可以看出,各建筑部位温度模拟与实测的平均值误差在 2% 以内,最大误差也不超过 5%,曲线走势也基本相同,模拟的结果比较满意,可以证明模型比较接近真实情况。

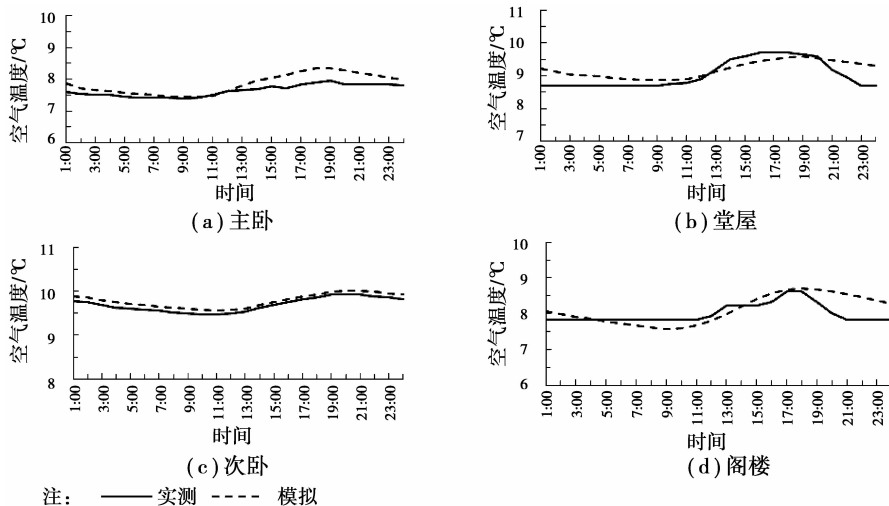


图 7 各功能房间实测值与模拟值对比

Fig. 7 The comparison of simulated and measured data

### 3.2 模拟结果分析

利用验证的模型,选取典型气象年中夏季典型气象日进行模拟,堂屋、主卧、次卧、室外温度变化见图8。

结果显示:室外平均温度为31.1℃,堂屋平均温度较室外降低了1.2℃,与堂屋空间位置类似的次卧则降低了2.5℃,出现1.3℃差值的主要原因是次卧在结构上比堂屋多了阁楼。而位于端头位置的主卧室内平均温度则比室外降低了1.5℃,虽然有西晒的不利影响,但是,因为夯土墙热阻大和阁楼的作用,使其室内热环境仍然可接受。分析3条曲线可以发现,室内外温度走势相近,但是因为夯土墙蓄热系数较大,3个房间基本都有1~2h的峰值延迟。从波动范围来看,堂屋的波动最大,主卧次之,次卧最小,主要还是与作为缓冲空间的阁楼和热稳定性好的夯土墙有关。在川渝地区,夯土民居卧室习惯设置阁楼,结合冬夏两季来看,不仅仅有储物的作用,还有隔热保温的作用。

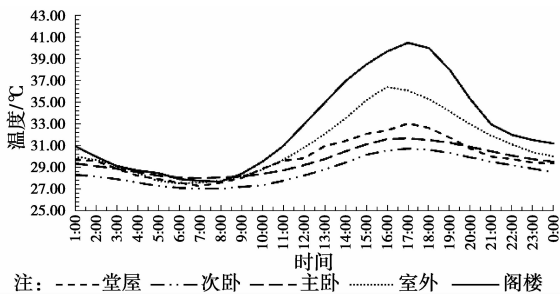


图8 典型天夏季室内外温度变化

Fig.8 Temperature of indoor and outdoor in typical day in summer

### 3.3 室内热环境评价

选择2012年颁布的《民用建筑室内热湿环境标准》<sup>[15]</sup>对夯土民居进行评价,标准中将室内热环境分为3级:I级为90%人可以接受的热环境,II级为75%的人可以接受,III级为少于75%的人可以接受,显然II级作为达标标准才有意义。其中,对于没有人工冷热源的民居,根据图表法室内温度达到II级标准给出的范围是16~30℃,从曲线整体看,夏季夯土民居室内3个主要房间除下午超过30℃,其他时段均满足要求。平均温度都达到II级标准,计算当日超过30℃的小时数,次卧为5h,主卧、堂屋均为8h,基本都处于下午室外温度最高的时段。而冬季差距较大,任何时段都达不到这个最低要求。

对于居住者主观感受而言,用标准中计算法的适应性平均热感觉指标(Adaptive Predicted Mean Vote, APMV)对其室内热环境进行评价较为合理。APMV是在非人工冷热源热湿环境中,考虑了人们

心理、生理以及行为适应性等因素后的热感觉投票预计值。当APMV在±0.5以内为I级,在±1和±0.5之间为II级,超出±1为III级标准。

APMV是在PMV基础上用自适应系数修正后得到的适应性指标,用式(1)进行计算。

$$APMV = PMV / (1 + \lambda \cdot PMV) \quad (1)$$

式中:PMV为预计平均热感觉指标;APMV为预计适应性热感觉指标; $\lambda$ 为自适应系数,根据不同建筑类型和PMV的值确定取值,居住建筑夏季取0.21,冬季取-0.49。根据调研的实际着装和生活习惯参考《民用建筑室内热湿环境标准》进行PMV的取值,夏季:服装热阻0.3clo,室内风速0.2m/s,代谢率取1.2met;冬季:服装热阻1.5clo,室内风速0.1m/s,代谢率1.2met。

选择最能代表重庆夏季的7、8两月计算室内主要房间的APMV,各功能房间达到不同等级的比例见图9。

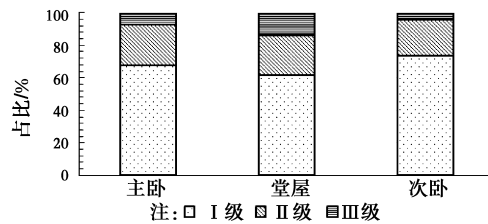


图9 夏季室内APMV统计结果

Fig.9 Estatistical results of APMV in summer

从图9可以发现,夯土建筑夏季室内热舒适性较好,85%~90%时间段能达到II级以上,且60%~75%时段达到I级标准。分析各房间冬季热舒适性,选择12、1月进行计算,发现研究时间段内冬季室内3个房间APMV均处于-1~-0.5之间,即达到II级标准,而没有达到I级标准的时间段。

由此看来,人们对夯土民居夏季的热环境满意度更高,结合刘晶等<sup>[13]</sup>对重庆地区农村做的问卷调研可以确定,夯土民居与其他农村建筑刚好相反<sup>[16]</sup>,夏季室内热环境较好,而冬季欠佳。这一结论与应丹华<sup>[11]</sup>的结论类似,即浙南山区的夯土民居冬季室内缺乏热源,同时,夯土墙在日照不强的气象条件下升温较慢,导致室内热环境不好。

## 4 结论

通过对龙塘村夯土民居的冬夏两季的室内热环境研究,可以得到以下结论:

1)对于夯土民居,冬季的室内热环境远比夏季差,冬季室内温度较低亟待改善,夯土墙的热惰性对于冬季提高室内温度不利。

2)民居室内热环境不但受围护结构的影响,还

与住户的日常生活习惯和作息规律紧密相关,是多因素共同叠加作用的结果。

3) 夯土民居建筑中阁楼在调节室内热环境方面作用显著,具有冬季保温,夏季隔热的作用。

#### 参考文献:

- [1] 汪之力. 中国传统民居概论(上)[J]. 建筑学报, 1994(11):52-59.
- [2] Martín S, Mazarrón F R, Cañas I. Study of thermal environment inside rural houses of Nava Palos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 666-676.
- [3] Ooka R. Field study on sustainable indoor climate design of a Japanese traditional folk house in cold climate area [J]. Building and Environment, 2002, 37(3):319-329.
- [4] 何文芳, 胡冗冗, 刘加平. 秦岭典型乡土民居冬季热环境研究[J]. 建筑技术, 2011(6):83-85.  
He W F, Hu R R, Liu J P. Study on winter indoor thermal environment of typical rural houses in Qinling mountain area [J]. Architectural Technology, 2011(6): 83-85. (in Chinese)
- [5] 赵西平, 刘元, 刘加平. 秦岭山地传统民居冬季热工性能分析[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(5):565-567.  
Zhao X P, Liu Y, Liu J P. The thermal property of traditional residential architecture in Qinling mountain [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(5):565-567. (in Chinese)
- [6] 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):605-609.  
Yang L, Liu J P. Improvements of thermal environment of traditional yaodong dwellings with solar energy [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2003, 24(5): 605-609. (in Chinese)
- [7] 金玲, 赵立华, 张宇峰, 等. 潮汕传统农村住宅热环境实测研究及其现代启示[J]. 建筑科学, 2014, 30(6): 27-31.  
Jin L, Zhao L H, Zhang Y F, et al. Field study and modern enlightenment on thermal environment of traditional vernacular dwellings in Chaoshan area [J]. Building Science, 2014, 30(6): 27-31. (in Chinese)
- [8] 陈晓扬, 薛家薇, 郑彬. 泉州手巾寮民居夏季热环境实测分析[J]. 建筑学报, 2010(学术论文专刊):85-87  
Chen X Y, Xue J W, Zheng B. Field study on thermal environment of Quanzhou traditional shoujinliao residence in summer [J]. Architecture Journal, 2010 (Academic Article Issue):85-87. (in Chinese)
- [9] 何韶瑶, 毛国辉. 湘西传统石砌民居热环境分析及节能措施[J]. 新建筑, 2012(6):98-101.  
He S Y, Mao G H. Analysis of the thermal environment of Xiangxi traditional stone houses and energy saving measures [J]. New Architecture, 2012(6): 98-101. (in Chinese)
- [10] 李峥嵘, 王文静, 赵群, 等. 浙中传统民居夏季室内热环境实测研究[J]. 暖通空调, 2012, 31(5): 32-36.  
Li Z R, Wang W J, Zhao J, et al. Field study on indoor thermal environment of traditional folk house in Central Zhejiang Province [J]. HV & AC, 2012, 31(5):32-36. (in Chinese)
- [11] 应丹华. 浙江南部山区传统民居适宜性节能技术提炼与优化[D]. 杭州:浙江大学, 2013.  
Ying D H. Extraction and optimization of suitable energy-saving technologies in traditional houses among Southern Zhejiang's Mountain Area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [12] 曹珍荣, 龚光彩, 徐春雯. 夏热冬冷地区农村居住建筑冬季室内热环境测试[J]. 暖通空调, 2013(Sup1): 279-282.  
Cao Z R, Gong G C, Xu C W. Field study on indoor thermal environment of rural resident in hot summer and cold winter climate zone [J]. HV & AC, 2013(Sup1): 279-282. (in Chinese)
- [13] 韩杰, 张国强, 周晋. 夏热冬冷地区村镇住宅热环境与热舒适研究[J]. 湖南大学学报, 2009(6):13-17.  
Han J, Zhang G Q, Zhou J. Research on the rural residential thermal environment and thermal comfort in hot summer and cold winter climate zone [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009(6): 13-17. (in Chinese)
- [14] 田瀚元, 杨真静. 川渝地区夯土民居夏季室内热环境分析与改善[J]. 云南建筑, 2014(11):237-240.  
Tian H Y, Yang Z J. Analysis and improvement of internal thermal environment of tamed-soil dwelling in Sichuan and Chongqing in summer [J]. Yunnan Architecture, 2014(11):237-240. (in Chinese)
- [15] GB/T 50785—2012 民用建筑室内热湿环境评价标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012: 9-12.  
GB/T 50785—2012 Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 9-12. (in Chinese)
- [16] 刘晶, 丁勇, 李爱旗. 重庆市江津白沙镇室内热环境问卷调查分析[J]. 重庆建筑, 2006(5):19-23.  
Liu J, Ding Y, Li A Q. Analysis report of indoors thermal environment a questionnaire investigation in Baisha Town of Jiangjin of Chongqing [J]. Chongqing Architecture, 2006(5):19-23. (in Chinese)