

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.014



徽州传统民居室内环境及舒适度

黄志甲, 余梦琦, 郑良基, 龚城

(安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:以徽州传统民居为研究对象,通过对当地一幢典型传统民居进行为期一年的室内多项环境参数现场测试以及连续监测,从舒适性角度对民居室内环境进行研究。结果表明:徽州传统民居具有“冬冷夏凉”特性;夏季自然通风、遮阳以及隔热性能良好,其室内热环境较为适宜;冬季防寒保温及密闭性效果不佳,其室内热舒适性差;过渡季(春、秋季)室内热环境较好,人体热舒适性好。徽州传统民居室内具有较好的声环境,但是光环境不佳,大部分时段不能达到现代建筑采光设计标准。

关键词:传统民居;热环境;光环境;声环境;舒适度

中图分类号:TU119.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)01-0097-08

Indoor environment and comfort of Huizhou traditional dwellings

Huang Zhijia, Yu Mengqi, Zheng Liangji, Gong Cheng

(Department of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, Anhui, P. R. China)

Abstract: This study was conducted based on one year field measurement of indoor and outdoor environment parameters in a typical traditional dwelling of Huizhou in China. The indoor comfort was evaluated based on the measured multi-environment parameters. According to the analysis, the characteristic of cold winter and cool summer in Huizhou traditional dwellings is demonstrated by the measured data. It shows that the dwelling has a good indoor environment and thermal comfort in spring and autumn. The indoor thermal comfort is also good during summer due to good natural ventilation and sun shading, etc. While the indoor thermal comfort is not fully satisfactory during winter due to the poor air tightness. In addition, acoustic environment is complying with relevant standards for all the rooms. However, the visual environment can't reach the standards of modern architecture design lighting in the most of time.

Keywords: traditional dwellings; thermal environment; visual environment; acoustic environment; comfort

由于气候、生活习惯、文化等存在差异,导致不同地区的传统民居具有多样性,其传统生态建造经验与价值已得到了广泛认可与重视^[1-3]。但随着经济、技术水平、自然条件和生活方式等因素的影响,对传统民居的保护与更新要适应新的时代要求和变

化,大多数传统民居仍有人在继续居住,所以对传统民居室内舒适度的研究依然是建筑节能领域关注的热点^[4-6]。

目前,对中国西北地区传统民居的研究成果丰硕,研究发现,窑洞的厚壁对维持稳定的室内热环境

收稿日期:2017-04-13

基金项目:国家自然科学基金(51478001)

作者简介:黄志甲(1963-),男,教授,博士,主要从事建筑节能研究,E-mail:hzj@ahut.edu.com。

Received: 2017-04-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51478001)

Author brief: Huang Zhijia(1963-), professor, PhD, main research interest: building energy efficiency, E-mail: hzj@ahut.edu.com.

有重要作用^[7-10]；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环境质量的关键^[11-12]；西南地区传统民居充分利用了当地自然资源，其中，西藏地区传统民居冬季充分利用太阳辐射蓄热这项被动式技术来调节昼夜温差从而抵制严寒，对提高冬季室内热环境有显著作用^[13-14]。上述对传统民居的研究普遍关注室内热环境，而极少关注光环境与声环境对室内舒适度的影响。室内环境是一个综合环境，其舒适度受多个环境参数影响，笔者以徽州传统民居为研究对象，对当地一幢典型传统民居进行了为期近一年室内多项环境参数现场测试以及连续监测，从舒适性角度出发，对民居室内热、光、声环境三方面进行系统分析与研究。

1 研究对象和研究方法

1.1 研究区域概况

徽州地区地处安徽南部，地形上包括山地、丘陵、盆地以及众多的水系，主要以村落的形式聚集。研究对象位于安徽省宣城市，属于典型的亚热带湿润性季风气候。全年气候温和，四季分明，气候湿润，雨量充沛，日照尚足。宣城年平均温度为 15.6℃，最热月平均 28.1℃，最冷月平均 2.7℃。年平均日照时数 1 784.1 h，年平均降水量 1 429.6 mm，年湿度 79%，太阳总辐射量为 2 482 MJ/m²。

研究对象位于安徽省宣城市西南部山区查济村，该村始建于唐武德八年，至今已有 1 380 a 的历史，全村面积 20.7 km²。村落的选址和布局，依山傍水，随坡就势；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，见图 1。



图 1 查济村

Fig. 1 Village of Zhaji

1.2 研究对象简介

为了深入了解徽州传统民居室内环境现状，选取位于村内中部的徐庆堂作为建筑单体实测对象。

徐庆堂建于明末清初，距今 200 多年历史，仍由原居民居住，保留着原始风貌。该建筑坐北朝南（偏西南），南面是下沉的农耕田地，耕田临河；北面为宽约 2 m 的街道，由于建筑外墙高大且互相之间联系紧密，街巷常处于被遮挡状态；东西邻户均为传统民居住宅。

徐庆堂平面布局为东西对称，二进五厢，整体建筑体现出紧凑布局特征。民居外墙为 270 mm 厚空斗砖墙，墙面以白灰粉饰，内墙及厢房南向墙体均为 20 mm 厚木板，屋顶为坡屋顶望板青瓦屋面，厅堂地面铺设青石，厢房地面铺设架空木地板，厢房门洞朝南边，门洞周围布置花格窗，花格窗在门窗关闭的时可补给室内需要的新风。建筑外貌、建筑平面及内部现状见图 2。

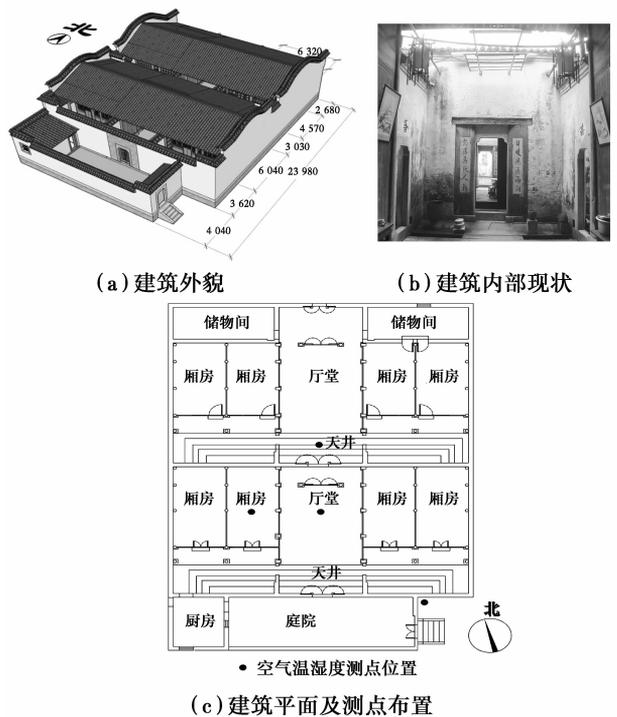


图 2 建筑现状

Fig. 2 Outline of tested building

1.3 测试方案

测试主要针对徐庆堂一层房间（厢房尺寸为 3.2 m×6.0 m，厅堂为 4.7 m×6.0 m，天井为 3.6 m×18.3 m）进行，对声、光及热三方面测试。

民居一层平面图及测点布置如图 2(c) 所示，具体测试参数及仪器如表 1 所示，空气温湿度 4 个测点均距离地面 1.5 m，位于室外测点的温湿度自动记录仪采用铝箔包裹防止太阳辐射的影响，该项测试的周期为 1 a（见表 1），按照气象划分法：3 月—5 月为春季（晴天占比 35%，阴天占比 33%，雨天占比

32%),6月—8月为夏季(晴天占比46%,阴天占比12%,雨天占比42%),9月—11月为秋季(晴天占比40%,阴天占比33%,雨天占比27%),12月—翌年2月为冬季(晴天占比54%,阴天占比24%,雨天占比20%,雨雪天占比2%)。从夏季、过渡季、冬季的季节角度,综合考虑晴天、阴天、雨天等天气的测试结果对民居室内温湿度进行分析;壁面温度测点

布置于厢房6个内表面:东墙、南墙、西墙、北墙(均距离地面1.5m)、地面及吊顶;声压级及照度测点分别于民居各房间、天井及室外均匀分散布置61、18个测点,每个测点均距离地面0.75m。其中,对声环境取一天4个时间(10:00、12:00、14:00及18:00)、光环境取一天3个时间(10:00、14:00及16:00,测试天气为晴天)分别进行数据处理分析。

表 1 测试参数及仪器

Table 1 Measured parameters and instruments

测试参数	仪器名称	测试精度	测试时间	采样	
				方式	间隔/min
空气温湿度	TR-72wf 自动记录仪	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}; \pm 5.0\% \text{ RH}$	2015-09-01—2016-09-01	自动	15
表面温度场	红外热像仪	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	2016-01-22—2016-01-24 2015-07-23—2015-07-25	人工	60
壁面温度	Agilent 数据采集仪(34970A) K型末端贴片式热电偶	$\pm 1.4\%$	2016-01-22—2016-01-24 2016-04-21—2016-04-23	自动	5
声压级	TES-1350A 噪声计	$\pm 2\text{ dB}$	2015-07-14	人工	30
照度	TES-1336A 照度计	$\pm (3\% \text{ rdg} + 5 \text{ dgts})$	2016-01-26(晴天)	人工	30

2 测试结果及分析

2.1 热环境

2.1.1 室内外温度与平均辐射温度 室内环境的舒适与否,很大程度上取决于室内的冷热,也就是取决于热环境的状态。空气温度与平均辐射温度(Mean Radiant Temperature, MRT)均是室内热环境的重要构成要素。根据实测各围护结构内表面温度值和各表面面积的大小,计算出室内平均辐射温度值^[15],如图3所示。

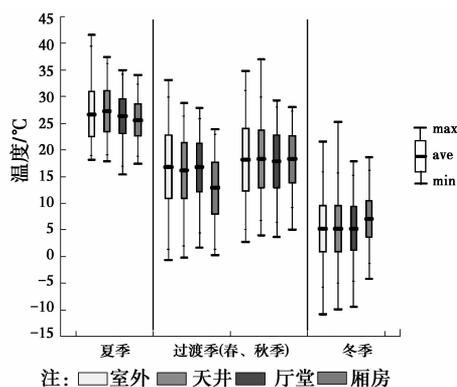


图 3 四季各测点温度

Fig. 3 Temperature of different points during four seasons

从图3的夏季数据可以看出,在夏季徽州地区室外平均温度为 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中峰值为 $41.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,谷值为 $18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,即温度波动的幅度较大。徽州传统民居的天井温度波动幅度略为小于室外,其温度峰值比

室外低 $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;厅堂、厢房温度波动幅度明显小于室外,其温度峰值分别比室外低 6.6 、 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是因为:一方面徽州传统民居的天井作为“过渡空间”,与厅堂、厢房相连,在一定程度上可以削弱室外温度波动对厅堂、厢房的影响,即厅堂的平均温度为 $26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、厢房的平均温度最低为 $25.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有较好的舒适性,表明徽州传统民居具有良好的隔热效果;另一方面,徽州传统民居采取紧凑式单体的密集排列方式,利用高大外墙与天井具有的良好遮阳效果,实现无阳光直射,同时,天井的开口设计得当可以利用热压原理,促进自然通风,实现将凉风带入室内、阻止热风进屋,从而达到徽州传统民居在夏季室外高温时室内温度相对适宜的效果。

图4所示为厢房平均辐射温度与空气温度。从图4(a)可以看出,在夏季厢房MRT略低于厢房气温,但温差较小,即温差范围为 $0.8\sim 2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此,较低的厢房MRT对厢房室内产生冷辐射,从而使人在室内感觉凉爽。同时,结合图3夏季数据,并对测试数据进行统计,可以看出,夏季厅堂与厢房室温保持在 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的时间频率分别占样本总数的 60% 、 64% ,从而进一步说明在夏季徽州传统民居确实有着良好“自然空调”效应。

从图3的冬季数据可以看出,冬季徽州地区室外平均温度为 $5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中峰值为 $25.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,谷值为 $-10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,即温度波动的幅度较大。徽州传统民居的天井、厅堂与室外温度波幅相近,且其温度平均

值、谷值之间相差较小,即温差仅 0.4~1.5 ℃。厅堂平均温度 5.6 ℃,这是由于厅堂与天井相通,气密性较差,受室外温度变化影响较大,导致厅堂温度整体偏低。厢房平均温度 7.1 ℃,温度谷值较室外高 6.7 ℃,说明相对于厅堂,厢房具有较好的保温性能,但是,人体舒适度一般。这是因为徽州传统民居的厢房在南外墙多设置木质花格窗(图 5(a)),冬季花格窗镂空部位及门缝、窗缝处温度较高(图 5(b)),存在热桥现象,室内热量易从该区域散失,导致在冬季厢房的人体舒适度低于夏季。



(a) 厢房花格窗实景 (b) 冬季花格窗外表面温度

图 5 冬季厢房花格窗外表面温度

Fig. 5 Temperature of hollow windows in bedroom during winter

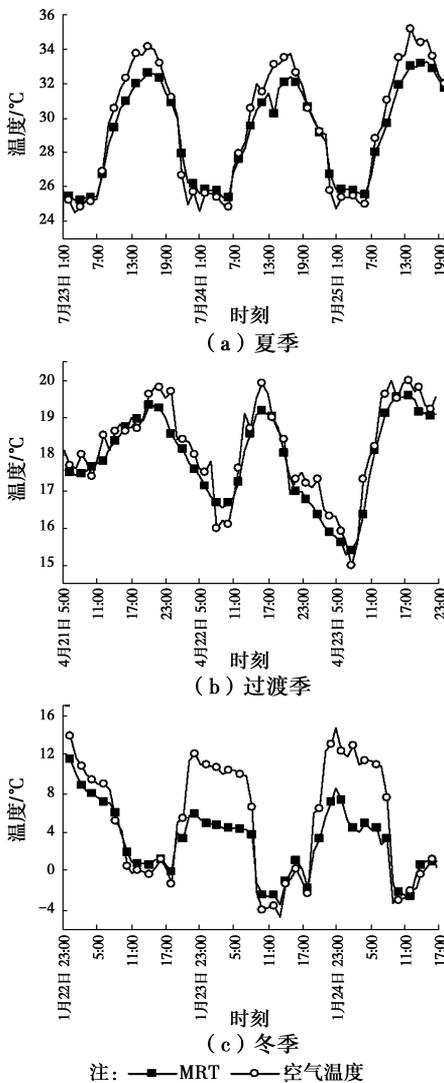


图 4 厢房平均辐射温度与空气温度

Fig. 4 Mean radiant temperature and air temperature of bedroom

从图 4(c)可以看出,冬季测试阶段,在昼间冬季厢房不开空调,MRT 与厢房气温无明显温差,说明房间保温性能较差;在夜间空调开启导致空气升温,空气对流换热使得室内各壁面升温,故夜间厢房空气温度与 MRT 整体高于昼间。由于室内各围护结

构存在一定的热惰性,厢房壁面仍保持相对较低温度,导致厢房 MRT 远低于空气温度,最多比厢房气温低 7.5 ℃。苏联学者研究表明,为保持居住者的热舒适状态,空气温度与平均辐射温度的差值不得超过 7 ℃^[16],因此,较低 MRT 对厢房室内产生冷辐射,易使人体产生冷不舒适感。结合图 3 冬季测试数据,并对测试数据进行统计可以看出,冬季厅堂与厢房室温保持在 10 ℃ 以下的时间频率分别占样本总数的 89%、84%,说明徽州传统民居冬季室内寒冷,人体舒适度较低。

在分析过渡季各测点温度时,综合考虑了春、秋两个季度各测点温度。从图 3 可以看出,在过渡季节,徽州地区室外温度平均温度为 17.5 ℃(春季平均温度 16.8 ℃,秋季平均温度 18.2 ℃),其中,峰值为 34.8 ℃,谷值为 -0.6 ℃,即温度波动幅度最大。天井、厅堂与厢房温度受室外环境的扰动越来越小,即温度波动幅度依次减小,这是因为徽州传统民居温度波动幅度受围护结构阻隔性(通透性)影响较大。厅堂与厢房温度峰值分别比室外低 5.6、6.7 ℃,谷值分别仅比室外低 0.4、2.2 ℃,平均温度为 17.2、16.4 ℃,说明徽州传统民居具有良好的隔热性能、一般的保温性能以及较好的室内热环境,能够满足人体舒适度的要求。

从图 4(b)可以看出,过渡季厢房 MRT 范围与厢房气温波动规律及大小基本一致,无明显温差,表明过渡季节室内 MRT 对厢房室内几乎无冷热辐射,对人体冷热感觉影响较小。同时,结合图 3 的过渡季(春季、秋季)数据可以看出,厅堂与厢房的温度分布主要集中在 12.5~22.1 ℃,进一步说明,在过渡季徽州传统民居室内热环境较好。

2.1.2 室内外相对湿度 图 6 为各测点的相对湿度。从图 6 夏季数据可以看出,在夏季徽州地区室

外相对湿度波动幅度为 30.2%~100%,平均相对湿度为 80.8%,徽州传统民居的天井与厅堂平均相对湿度与室外平均相对湿度基本一致,这是因为在夏季自然通风是调节室内热环境的主要方式,导致天井、厅堂与室外环境密切。厢房相对湿度波动幅度最小,且平均相对湿度最高,这是因为徽州传统民居的厢房,其门窗均设置于南外墙,室内无法形成有效对流通风,导致受室外气候影响较小。

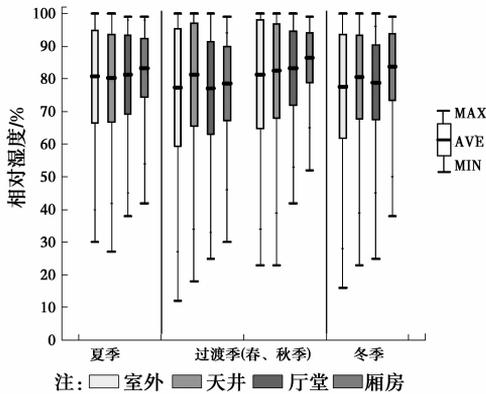


图 6 四季各测点相对湿度

Fig. 6 Relative humidity of different points during four seasons

从图 6 冬季数据可以看出,在冬季徽州地区室外相对湿度波动幅度为 16.2%~100%,平均相对湿度为 77.7%。徽州传统民居的厅堂平均相对湿度与室外平均相对湿度基本一致,天井平均相对湿度高于室外平均相对湿度,这是因为冬季自然通风不畅,导致湿气有可能在天井附近凝滞。厢房相对湿度波动幅度依然最小,且平均相对湿度依然最高,从而进一步说明厢房门窗均设置于南外墙,室内对流通风不畅,导致受室外气候影响较小。

从图 6 春、秋季数据可以看出,以气象划分的过渡季,即春季与秋季,两者的室外相对湿度波动幅度与平均相对湿度均存在较大差异。同时,结合图 6 中夏季数据与冬季数据可以看出,在冬季与春季,徽州传统民居的天井、厅堂与厢房的平均相对湿度变化趋势较为一致;在夏季与秋季徽州传统民居的天井、厅堂与厢房的平均相对湿度变化趋势基本一致。这是因为作为夏热冬冷的徽州地区具有夏、冬季较长,春、秋季较短的特点,从而造成以气象划分的过渡季,在湿环境方面呈现延续前一极端季节湿特性的现象。

表 2 为不同季节的室内外湿度值。从表 2 可看出,四季之中,徽州传统民居室内相对湿度均超过室外,而室外相对湿度波动幅度均最大,室内天井、厅

堂与厢房相对湿度波幅相对依次减小,室内外相对湿度均超过 75%,反映了徽州地区全年高湿的气候特征。与此同时,结合图 6 四季数据可知,厅堂与厢房相对湿度集中分布在 60.0%~95.0%之间,其中,厢房平均相对湿度 83.1%,相对于厅堂 80.0%更为潮湿,均高于室外相对湿度,超出文献[15]给出的推荐值,由此可见,徽州传统民居室内潮湿,是影响当地居民热舒适主要原因之一。

表 2 不同季节室内外湿度值

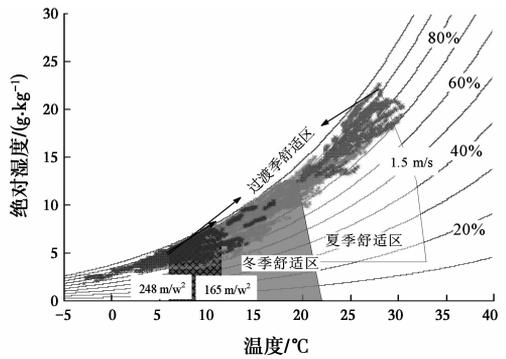
Table 2 Value of relative humidity of different points during four seasons

季节	位置	RH 平均值/%	RH 最大值/%	RH 最小值/%
夏季	室外	80.8	100	30.2
	天井	80.2	100	27.4
	厅堂	81.3	99.0	38.7
	厢房	83.4	99.0	42.0
过渡季	室外	79.4	100	12.0
	天井	81.6	100	18.0
	厅堂	82.3	99.0	25.0
	厢房	82.6	99.0	30.0
冬季	室外	77.7	100	16.0
	天井	80.6	100	23.0
	厅堂	79.0	100	25.0
	厢房	83.7	99.0	38.0

2.1.3 热舒适 徽州传统民居属于非空调房间的室内气候,对地区气候的适应能力和高风速的忍耐性都要高,人们可接受的热舒适区域和空调房间存在很大不同。图 7 为徽州地区各季节舒适区。夏季舒适区是根据文献[17]提出的空气流速与热舒适的关系及文献[18]规定的自然状态下房间风速在 2.0 及 1.5 m/s 以内,通过分析气象数据发现,徽州地区夏季平均风速 1.5 m/s,计算可得,在该风速下夏季舒适区为:温度 21.2~33 ℃、相对湿度上限 90%、绝对湿度下限 4 g/kg。冬季舒适区是根据文献[19]提出的被动式太阳能采暖的有效性区域,即温度与日太阳辐射量的关系,结合徽州地区冬季室内外太阳辐射量的实测数据计算得出,室内外日平均太阳辐射量 165 W/m²,从而得出冬季舒适区:温度为 11.5~22 ℃、相对湿度上限 95%、绝对湿度上限 12 g/kg。过渡季可充分利用被动式太阳能(实测数据计算所得:日平均太阳辐射量为 248 W/m²)与自

然通风(气象数据:过渡季平均风速:1.4 m/s,取1.5 m/s 方便绘图)来调节室内气候,得出过渡季舒适区为:温度 6~22 ℃,相对湿度上限 95%。由此,对徽州传统民居厢房的热舒适进行分析。表 3 为四季厢房处于热舒适区的时段情况。夏季厢房约有 62.2%时段处于热舒适区内,约 6.9%时段由于温度过高而偏离热舒适区,约 30.8%时段湿度过大偏离舒适区(内包括 10.6% 湿热时段);过渡季厢房夜间整体人体舒适度较好,约 89.5%时段处于过渡季舒适区内,1.3%时段因为温度低偏离热舒适区,9.2%时段由于湿度过高而偏离舒适区;冬季厢房仅仅约 8.9%时段分布于冬季热舒适区中,大部分时间段由于温度过低、极少数由于湿度过大偏离冬季热舒适区,表明厢房夜间湿冷,人体舒适性差,建议冬季采

取局部采暖装置。



注: □ 过渡季 ■ 夏季 ▨ 冬季

图 7 四季厢房温湿度图

Fig. 7 Temperature and relative humidity at four seasons in the bedroom

表 3 四季厢房处于热舒适区时段情况

Table 3 Comfortable proportion at four seasons in the bedroom

夏季		过渡季(春秋两季)		冬季	
舒适时段占比	不舒适占比及原因	舒适时段占比	不舒适占比及原因	舒适时段占比	不舒适占比及原因
62.3%	6.9%温度高,30.8%潮湿	89.5%	1.3%温度低,9.2%潮湿	8.9%	85.8%温度低,5.3%湿冷

2.2 光环境

图 8 为室内外照度平面云图。从图 8 可以看出,10:00 时,北门光照度整体最强,天井处光照度达 200 lx,厢房光照度基本小于 50 lx。14:00 时,光照度明显增强,天井处达 600 lx,厅堂达 350 lx,厢房南侧镂空门窗附近照度达 200 lx,但厢房内区光照度增加并不明显。到了 18:00,照度值又有大幅度的下降,除了大门处照度达 80 lx,其它区域均在 30 lx 以下。

堂,靠近天井区域室内照度值较大,远离天井区域室内照度值较小,采光不均匀。起居室(厢房)、客厅(厅堂)、厨房天然光照度标准值为 300 lx^[20],厢房照度基本上没达到该标准。这是因为建筑高墙开小窗或不开窗,导致厢房光环境不佳,徽州传统民居厢房作为古时的阅读书写中国毛笔字的场所,并不需很高的光照度,按现代住宅的相关要求,徽州传统民居的光环境较差,不能达到衡量标准。

2.3 声环境

图 9 为室内外声压级平面云图。从图 9 可以看出,在 10:00—14:00 阶段,徽州传统民居建筑外围北侧声压级最高达 70 dB(A)左右,而室内声压级远小于室外,平均值为 54 dB(A),峰值声压级出现在厅堂为 65 dB(A),这主要是由于室内人员活动频繁所致;16:00 时,建筑外围声压级整体增大,室内声压级维持在 45~60 dB(A);18:00 时,室内外声压级整体削弱,室内平均声压级为 45 dB(A),峰值声压级出现在厅堂 65 dB(A)。

根据《声环境质量标准》(GB 3096—2008)^[20],徽州传统民居执行 1 类标准,昼间的环境噪声限值为 55 dB(A)^[21]。徽州传统民居室内声环境可满足上述标准。这是因为,一方面,徽州传统民居具有高大且无窗的外墙,其隔声效果良好,同时,天井的“声

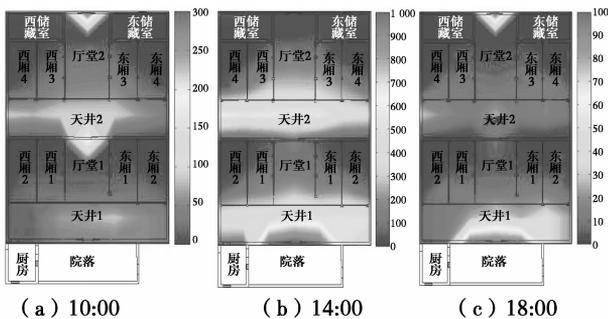


图 8 室内外照度平面云图

Fig. 8 Illumination field cloud of indoor and outdoor

以上 3 个时间段,厢房光照度变化范围都在 20 lx 以下,主要原因是采光途径除了南侧镂空门窗,无其它采光措施;照度变化明显的区域是天井与厅堂,天井与厅堂直接相连,自然光通过天井射入厅

闸”作用,进一步阻隔室外相关噪声;另一方面,徽州传统民居虽然布局密集,但是,个体建筑较为封闭,隔绝了周边生活噪声。

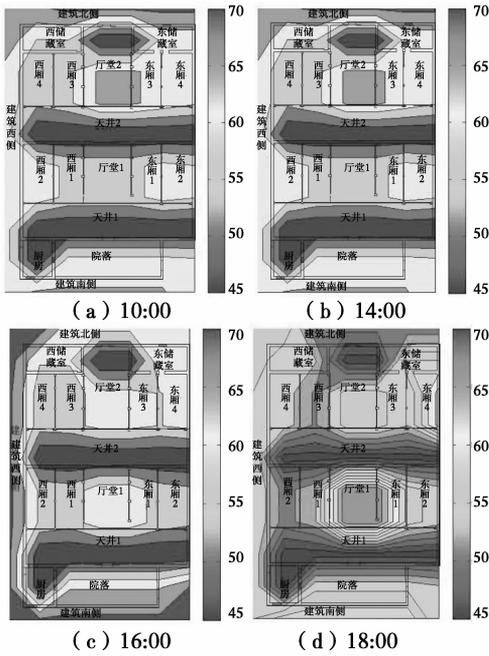


图 9 室内外声压级平面云图

Fig. 9 Sound pressure level field cloud of indoor and outdoor

3 结论

1)徽州地区属于“冬冷夏凉”。民居紧凑式单体的密集排列方式,高大外墙及“过渡空间”——天井形成良好的遮阳与自然通风效果,并结合水体及绿化使得室内“夏凉”,而冬季民居内部木结构保温性能以及气密性差,保暖效果不佳,导致“冬冷”。春秋两过渡季有良好的热环境。

2)徽州传统民居过渡季 85%以上时段处于过渡季热舒适区,人体舒适度高;夏季超过 50%时段处于热舒适区,湿度过大是影响人体舒适度主要原因;冬季极少数时段处于热舒适区,主要是由于温度过低而偏离热舒适区,人体舒适性差。徽州传统民居全年室内平均相对湿度超过 80%,室内潮湿是影响当地居民热舒适的主要原因。

3)徽州传统民居声压级主要来源于室外及室内人员,机器设备带来的声压级很小,民居个体建筑较为封闭,高大且无开窗的外墙隔声效果好,使得民居室内声环境好。

4)徽州传统民居高墙开小窗或不开窗,导致室内光环境不佳,民居室内采光主要依赖于天井,光照度分布不均匀,民居大部分时段不能达到建筑采光设计标准。

参考文献:

[1] PHILOKYPEOU M, MICHAEL A, MALAKTOU E, et al. Environmentally responsive design in Eastern Mediterranean: The case of vernacular architecture in the coastal, lowland and mountainous regions of Cyprus [J]. *Building and Environment*, 2017, 111 (8): 91-109.

[2] HOLMES M J, HACKER J N. Climate change thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century [J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(7): 802-814.

[3] NEMATCHOUA M K, TCHINDA R, OROSA J A. Thermal comfort and energy consumption in modern versus traditional buildings in Cameroon: A questionnaire-based statistical study [J]. *Applied Energy*, 2014, 114(2): 687-699.

[4] CHANDEL S S, SHARMA V, MARWAH B M. Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 459-477.

[5] SANTAMOURIS M, KOLOKOTSA D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: the state of the art [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 57(1): 74-94.

[6] DJONGYANG N, TCHINDA R. An investigation into thermal comfort and residential thermal environment in an intertropical sub-Saharan Africa region: Field study report during the Harmattan season in Cameroon [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51 (7): 1391-1397.

[7] 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 L, LIU J P. Improvements of thermal environment of traditional Yaodong dwellings with solar energy [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2003, 24(5): 605-610. (in Chinese)

[8] ZHU X R, LIU J P, YANG L, et al. Energy performance of a new Yaodong dwelling, in the Loess Plateau of China Xinrong [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 70(1): 159-166.

[9] LIU J P, WANG L J, Yoshino Y, et al. The thermal mechanism of warm in winter and cool in summer in China traditional vernacular dwellings [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(8): 1709-1715.

[10] 胡元冗, 李万鹏, 何文芳, 等. 秦岭山区民居冬季室内热环境测试[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(2): 171-174. HU R R, LI W P, HE W F, et al. Study on indoor

- thermal environment of the folk houses in Qinling mountains [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(2): 171-174. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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(Sup): 84-87.
CHEN X Y, XUE J W, ZHENG B. Field study on thermal environment of Quanzhou traditional Shoujinliao residence in summer [J]. *Architecture Journal*, 2010(Sup): 84-87. (in Chinese)
- [13] HUANG L J, NEVEEN H. Climate-responsive design of traditional dwellings in the cold-arid regions of Tibet and a field investigation of indoor environments in winter [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 128: 697-712.
- [14] WANF R P, CAI Z Y. An ecological assessment of the vernacular architecture and of its embodied energy in Yunnan, China [J]. *Building and Environment*, 2006, 41: 687-697.
- [15] 刘加平, 杨柳. 室内热环境设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 5-12.
LIU J P, YANG L. Construction thermal environment design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 5-12. (in Chinese)
- [16] 纪秀玲, 李国忠, 戴自祝. 室内热环境舒适性的影响因素及预测评价研究进展[J]. *卫生研究*, 2003, 32(3): 295-299.
JI X L, LI G Z, DAI Z. Influencing factors and the research progress on foresting and evaluating indoor thermal comfort [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2003, 32(3): 295-299. (in Chinese)
- [17] ARENS E, ZEREN E, GONZALEZ R, et al. Mcnall: A new bioclimatic chart for environment design [C]// *Building Energy Management, Conventional and Solar Approaches, Proceedings of the International Congress*, Potugal, May, 1980.
- [18] 杨柳. 建筑气候学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 65-66.
YANG L. Bioclimatic architecture [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 65-66. (in Chinese)
- [19] 杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003: 20-21.
YANG L. Climatic Analysis techniques and architectural design strategies for bio-climatic design [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003: 20-21. (in Chinese)
- [20] 声环境质量标准: GB/T 3096—2008 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
Environmental quality standard for noise: GB/T 3096-2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese)
- [21] 建筑采光设计标准: GB/T 50033—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Standard of daylighting design of buildings: GB/T 50033-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)