

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.02.017



## 徽州民居冬季室内湿环境

黄志甲, 刘晶晶, 张恒, 董亚萌, 鲁月红

(安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

**摘要:**对徽州地区两栋典型民居冬季室内温度、湿度进行连续测试,通过对比徽州传统民居与现代民居室内热湿条件,考察了不同功能区域室内湿环境及热舒适性。结果表明,传统民居冬季室内处于潮湿及非常潮湿等级,相对湿度值高于现代民居,但传统民居室内湿度日较差小于现代民居,室内湿环境稳定性良好;传统民居与现代民居室内外含湿量相关性系数均高于0.8,室内湿环境对室外湿环境响应明显;在自然通风条件下,传统民居厅堂、厢房热舒适时间段占比分别为7.36%、8.77%,冬季室内热舒适性差,建议采用局部采暖设施。

**关键词:**徽州传统民居;室内湿环境;自然通风;热舒适

**中图分类号:**TU111.3   **文献标志码:**A   **文章编号:**1674-4764(2018)02-0109-07

## Indoor humidity environment of Huizhou vernacular dwellings in winter

Huang Zhijia, Liu Jingjing, Zhang Heng, Dong Yameng, Lu Yuehong

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, P. R. China)

**Abstract:** Temperature and humidity were measured in two typical Huizhou dwellings in winter in order to compare the indoor thermal and humidity conditions in the Huizhou traditional vernacular dwelling with that in the modern dwelling. The indoor humidity environment and thermal comfort in different zones were also studied. The results show that the level of the humidity environment is at 'wet' and 'very wet' in the Huizhou traditional vernacular dwelling in which the relative humidity is higher than that in the modern dwelling. The daily amplitude of humidity is smaller in the traditional vernacular dwelling than that in the modern dwelling, which is considered that the indoor humidity environment is stable well. There is a strong correlation between the outdoor humidity ratio and the indoor humidity ratio with a correlation coefficient over 0.8 both in the traditional vernacular dwelling and the modern dwelling. However, only 7.36% time in the hall and 8.77% time in the wing-room are comfortable with natural ventilation in the traditional vernacular dwelling, that means that the thermal comfort is unsatisfied. To improve the indoor thermal comfort, it is supposed to apply local heating equipment.

**Keywords:** Huizhou traditional vernacular dwelling; indoor humidity environment; natural ventilation; thermal comfort

**收稿日期:**2017-05-20

**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,主要从事建筑节能和绿色建筑研究,E-mail:hjz@ahut.edu.cn.

**Received:**2017-05-20

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

**Author brief:** Huang Zhijia (1963-), professor, PhD, main research interests: building energy efficiency, heat & mass transfer, E-mail:hjz@ahut.edu.cn.

空气温度、湿度是室内物理环境两个重要参数。室内空气温度与人体热舒适以及建筑能耗等息息相关,学者们已经对室内热物理环境的研究做了大量工作。Yoshino等<sup>[1-2]</sup>对中国住宅建筑室内热环境进行了大规模调查,旨在预测室内温度对热舒适以及供暖/空调能耗的影响。Han等<sup>[3]</sup>通过对热湿地区住宅居民热舒适调查,旨在得出当地居民热中性温度,为南方地区低能耗系统设计提供理论依据。李峥嵘等<sup>[4-5]</sup>通过研究发现,浙江中部传统民居的建筑选址、朝向、室内空间布局以及建筑开口设计均有良好的气候适应性,且“过渡空间”及轻质围护结构的均有较好的隔热效果,营造良好的室内热环境。事实上,室内物理环境由热湿耦合共同作用,忽视室内湿物理环境会影响对人体热舒适、建筑能耗、建筑使用寿命等方面的准确评估。室内湿度过低会引起眼睛、鼻腔、呼吸道粘膜、皮肤等部位干燥的不适症状,Fanger<sup>[6]</sup>通过实验得出室内相对湿度值应不低于20%。室内空气湿度过高易滋生霉菌,影响室内空气品质,同时,湿组分在建筑材料中的迁移和积累将严重降低围护结构热工性能,进而增大建筑能耗<sup>[7]</sup>。当环境温度较高时,较高的相对湿度会增加人体热感<sup>[8]</sup>。Kalamees等<sup>[9]</sup>对芬兰170户独立式住宅进行为期两年的室内温湿度实测,研究得出通风系统较围护结构材料对室内温湿度变化的影响更大。张会波等<sup>[10]</sup>对中国9个城市的76栋住宅室内湿环境现状进行实测,研究发现,冬季集中采暖地区的住宅室内空气干燥,夏季南方城市住宅室内湿度过高,超过ASHRAE规定的上限值,中国住宅室内湿环境问题严峻。室内湿度除了和室外湿度有关外,与采暖/制冷系统、人员活动、建筑气密性等因素密切相关。

徽州地区属于亚热带季风气候,年降水量达到1500~2000mm,夏季湿热、冬季湿冷。徽州传统民居建筑开口尺寸小、建筑布局紧凑、通风不畅等特点造成室内湿环境条件较差。中国学者多关注徽州传统民居室内热物理环境特点,研究民居被动式设计技术以及其对室内温度的影响。林波荣等<sup>[11-12]</sup>得出徽州传统民居夏季优先考虑遮阳,并辅助自然通

风以改善室内热环境。宋冰等<sup>[13-14]</sup>结合实测和主观问卷调查的方法,得出徽州传统民居夏季温度在居民可接受范围内,主要问题是室内潮湿,冬季温度低、湿度大,室内热舒适性较差。陈晓扬等<sup>[15]</sup>通过研究得出在过渡季徽州传统民居室内整体热环境较好,但夜间温度低、湿度大,影响室内热舒适性。因此,对徽州传统民居室内湿环境现状及其影响因素仍需进一步探索。

本文以徽州民居室内湿环境为研究重点,结合实地考察、测绘、现场实测的方法,对位于安徽省宣城市泾县查济村的两栋典型民居冬季室内外温度、湿度进行测试,对比传统民居与现代民居热湿条件,旨在定量描述徽州民居室内湿环境现状,为当地民居室内湿环境的改善提供理论资料。

## 1 实验

### 1.1 实验设备

TR-71Ui/TR-72Ui 温湿度计(北京易购安科技有限公司),HI9065 便携式温湿度测定仪(杭州汇尔仪器设备有限公司)。

### 1.2 实验方法

测试徽州传统民居为典型清代民居,坐北朝南,内含狭长的“一字型”天井,屋顶采用望砖结构,外围护结构为青砖砌筑的空斗砖墙,内围护结构为木构架体系,1层为生活区,2层为储藏区。徽州现代民居距离传统民居约500m,建筑为砖混结构,平面方正,屋顶具有加装玻璃顶棚的天窗,1、2层为生活区,3层为储藏区,具有现代新建民居的典型代表性。

选取民居主要功能区进行测试,传统民居厅堂(H)与天井连接,直接与室外相通;厢房(WR)属于单开口空间,镂空的花格窗朝向天井,兼具采光和通风作用,为防止地下潮气,厢房地面采用架空铺设的木板结构;测试的厅堂及厢房均未安装空调等设备。现代民居客厅(LR)铺设地板砖,卧室(BR)铺设木地板且无架空结构;测试的客厅及卧室配置空调。测试建筑具体特点如表1所示。

表1 测试建筑特点

Table 1 Properties of measurement buildings

建筑名称	建成年代	建筑朝向	功能区域	墙体	地面	开口	设备
徽州传统建筑	清代	坐北朝南	厅堂(H)	空斗砖外墙/木质内墙	三合土	天井	无
			厢房(WR)	空斗砖外墙/木质内墙	架空木板结构	花格窗	无
徽州现代建筑	2012年	坐南朝北	客厅(LR)	砖混结构	瓷砖	玻璃窗	空调
			卧室(BR)	砖混结构	木地板	玻璃窗	空调

2015年12月至2016年2月进行为期3个月自动测试,测试间隔为15 min。室外测点(O)位于传统民居庭院内,为防止太阳辐射影响温湿度计采用铝箔包裹。在进行自动测试前,对各功能区空气温湿度进行均匀性测试,各功能区域布置5个平面测点如图1所示。利用便携式温湿度测定仪在每个平面测点垂直高度0.5、1.5、2.0 m处进行人工测量,测量结果表明,各测点温湿度值差值均小于 $\pm 5\%$ ,说明室内外空气温湿度分布均匀,可用中间测点1.5 m处测量数值代表该功能区域全局测量数值进行长期连续测试。

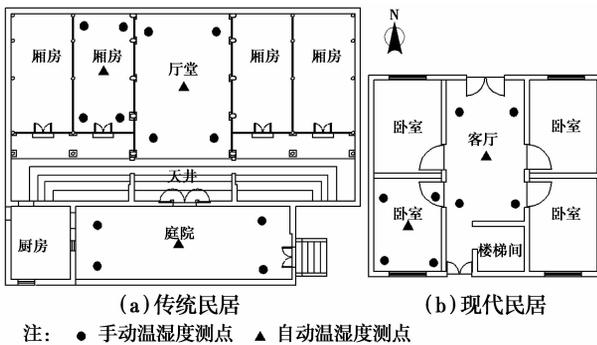


图 1 徽州民居首层平面示意图及测点布置

Fig. 1 Plan view and measurement points of Huizhou dwellings

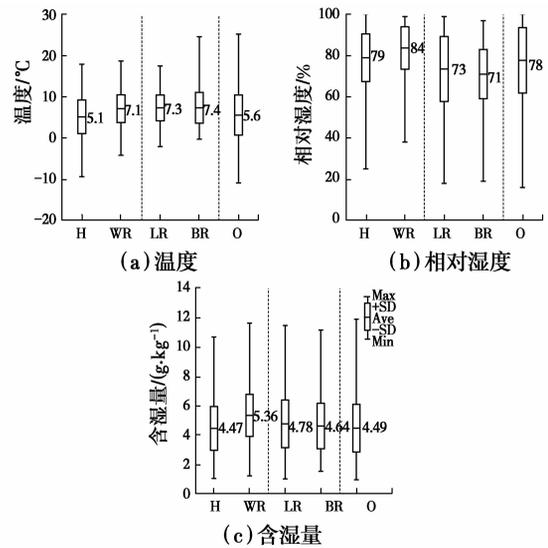
## 2 结果与讨论

### 2.1 传统民居与现代民居室内热湿条件对比

徽州民居冬季室内温湿度测量结果如图2所示,包括温度、相对湿度、含湿量3组参数的最小值、最大值、平均值和标准差。厢房相对湿度水平最高,平均值为84%,且数据分布集中。厢房平均温度与客厅、卧室平均温度相差较小,平均含湿量高于其他房间约1 g/kg。分析形成原因,厢房为单开口空间,建筑体量紧凑,在冬季散热量小,使得温度相对厅堂温度较高,但这也造成了厢房内通风效果差湿气无法及时排除。厅堂内平均相对湿度为79%,与室外平均相对湿度相差较小。由于厅堂属于半开放空间,通过天井与室外环境直接连通,厅堂内热湿环境受室外环境变化影响明显,使得室内温度较低,相对湿度较高。现代民居中客厅、卧室平均相对湿度在70%左右,数据分布离散程度大,客厅、卧室平均温度均高于厅堂平均温度 $2^{\circ}\text{C}$ 左右。现代民居保温性能较传统民居好,但室内湿度波动较大。

为进一步分析图2,选取2016年2月6日至2月8日连续3天数据进行典型日温湿度分析。选取

时间段日平均温度在 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,温低湿重,且无极端天气,属于夏热冬冷地区的冬季典型气候。



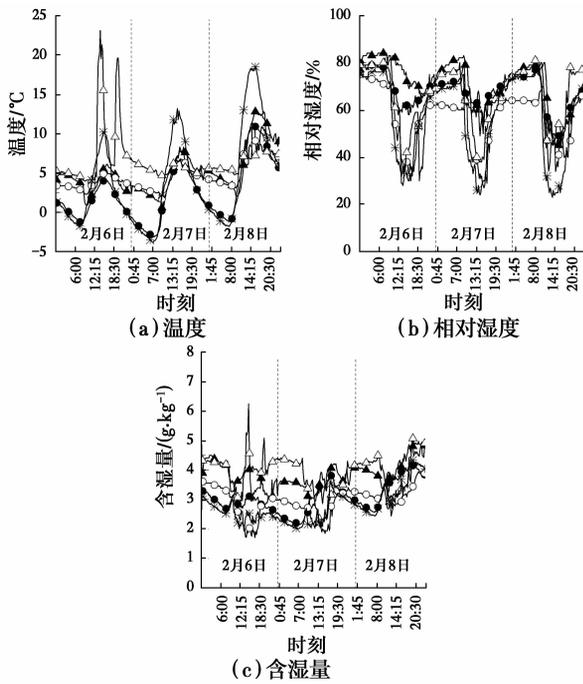
注: H-厅堂; WR-厢房; LR-客厅; BR-卧室; O-室外

图 2 传统民居与现代民居室内温湿度值

Fig. 2 Temperature and humidity conditions in Huizhou dwelling

典型日传统民居与现代民居温湿度逐时变化如图3所示,相对湿度变化规律与温度变化规律相反。夜间,各测点相对湿度中,厢房、卧室相对湿度水平较高,客厅相对湿度最低且低于室外相对湿度,原因是,夜间居民休息,厢房、卧室门窗关闭,主要湿源为人员散湿,导致厢房、卧室含湿量高于厅堂、客厅含湿量。白天,现代民居室内相对湿度大幅下降至接近室外相对湿度水平,传统民居室内相对湿度下降幅度较小,仍保持较高水平,原因是,厅堂、厢房通过天井、花格窗等开口与室外环境保持连通,含湿量全天波动幅度小。客厅、卧室夜间门窗紧闭湿气聚集,白天开窗通风湿气排出造成含湿量大幅下降。

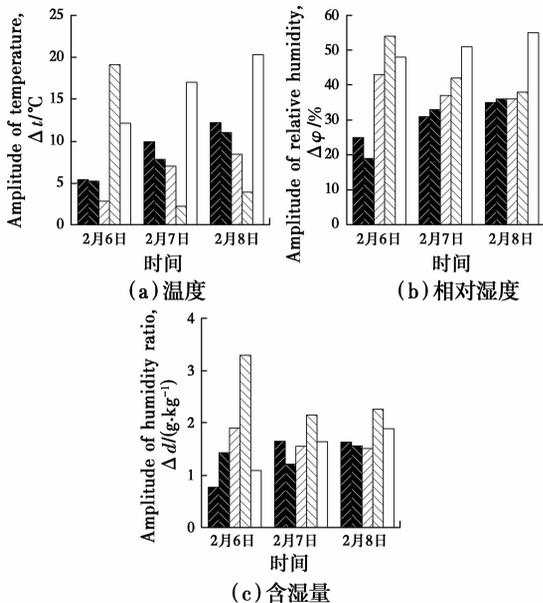
典型日传统民居与现代民居温湿度日较差如图4所示。相对湿度波动受温度波动、含湿量波动影响,相对湿度日较差达到20%会影响某些合成材料性能,达到40%会破坏大部分有机材料强度<sup>[16]</sup>。各功能区相对湿度日较差均超过20%,其中,客厅、卧室相对湿度日较差最大,个别天数超过40%。除2月6日卧室空调开启导致温度日较差较大,其他时间段现代民居温度日较差均小于传统民居温度日较差。说明造成现代民居室内相对湿度日较差较大的主要原因是现代民居室内含湿量日较差相对较大。分析形成原因,现代民居气密性良好,且墙体砖混材料较传统民居内墙木质材料调湿性能弱,导致现代民居室内湿环境稳定性较传统民居室内湿环境稳定性差。



注：●—H厅堂 ▲—WR厢房 ○—LR客厅 △—BR卧室 \*—O室外  
图 3 传统民居与现代民居典型日温湿度逐时变化

Fig. 3 Hourly temperature and humidity profiles in Huizhou dwellings

进一步分析图 3、图 4，将卧室 2 月 6 日空调开启工况与 2 月 7 日、8 日空调不开工况进行对比，空调开启有效提高室内温度，并降低空气相对湿度，舒适性相对提高；但造成室内温度日较差大，相对湿度日较差达到 55%，长期较大的室内温、湿度波动会对建筑材料造成破坏。



注：■—H厅堂 ■—WR厢房 ▨—LR客厅 ▩—BR卧室 □—O室外  
图 4 传统民居与现代民居温湿度日较差对比

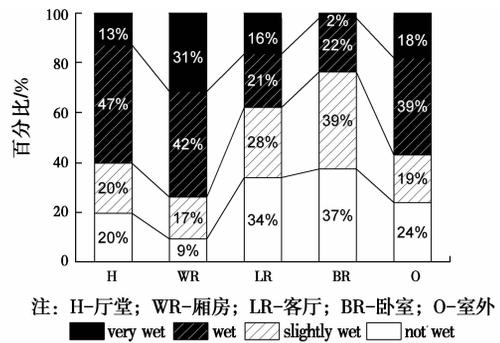
Fig. 4 Daily amplitude of temperature, relative humidity and humidity ratio in Huizhou dwellings

### 2.2 不同功能区域湿度特点

相对湿度是影响人体舒适度的一项重要参数，室内相对湿度应设定在 30%~70%<sup>[17]</sup>。将湿环境分为 4 个等级：不潮湿 ( $RH \leq 70\%$ )、稍微潮湿 ( $70\% < RH \leq 80\%$ )、潮湿 ( $80\% < RH \leq 90\%$ )、非常潮湿 ( $RH > 90\%$ )。

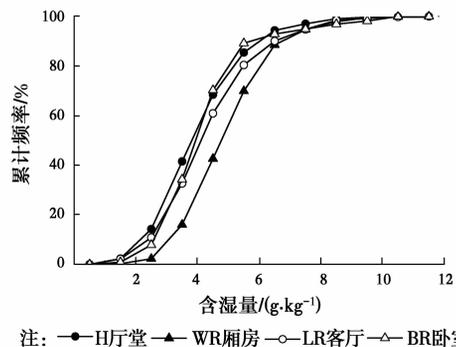
各功能区域相对湿度等级占比如图 5 所示。传统民居超过 60% 时间段处于潮湿及非常潮湿等级，厢房有 31% 时间段分布在非常潮湿等级，占比时间段高于其他房间。现代民居超过 60% 时间段属于不潮湿及稍微潮湿等级，卧室仅 2% 时间段位于非常潮湿等级。传统民居相对湿度水平高于现代民居相对湿度水平，厢房相对湿度水平最高，卧室相对湿度水平最低。

各功能区域含湿量累计频率如图 6 所示。各功能区域室内含湿量均在 12 g/kg 以下，满足 ASHRAE<sup>[18]</sup> 含湿量上限为 12 g/kg 且无下限的规定。厢房累计 80% 时间段含湿量在 6.35 g/kg 以下，客厅累计 80% 时间段含湿量在 5.95 g/kg 以下，卧室、厅堂累计 80% 时间段含湿量分别在 5.45 g/kg 以下及 5.65 g/kg 以下。厢房含湿量水平最高，卧室含湿量水平最低。



注：H-厅堂；WR-厢房；LR-客厅；BR-卧室；O-室外  
■—very wet ■—wet ▨—slightly wet □—not wet  
图 5 各功能区域相对湿度等级占比

Fig. 5 Proportion of humidity levels in each zone



注：●—H厅堂 ▲—WR厢房 ○—LR客厅 △—BR卧室

图 6 各功能区域含湿量累计频率

Fig. 6 Cumulative frequency of humidity ratio in each zone

### 2.3 室内外湿度相关性

各功能区域室内外含湿量相关性如图 7 所示。传统民居及现代民居室内含湿量均随室外含湿量升高而增大,且相关性系数在 0.8 以上。反映了夏热冬冷地区居民在冬季有开窗通风的行为习惯,良好的通风造成室内外含湿量的相关性较强。厅堂室内外含湿量相关性系数超过 0.96,客厅室内外含湿量相关性系数在 0.91 左右,均高于厢房/卧室室内外含湿量相关性系数。分析形成原因,厅堂/客厅为居民社交场所,开放性较强,与室外气流交换现象明显,厢房/卧室开口较小,注重居民隐私性,室内外气流交换现象较弱。厢房的镂空花格窗在门窗关闭情况下仍具有一定的室内外气流交换的作用,而卧室气密性较好且个别时段使用空调,导致厢房室内外含湿量相关性系数略高于卧室室内外含湿量相关性系数。

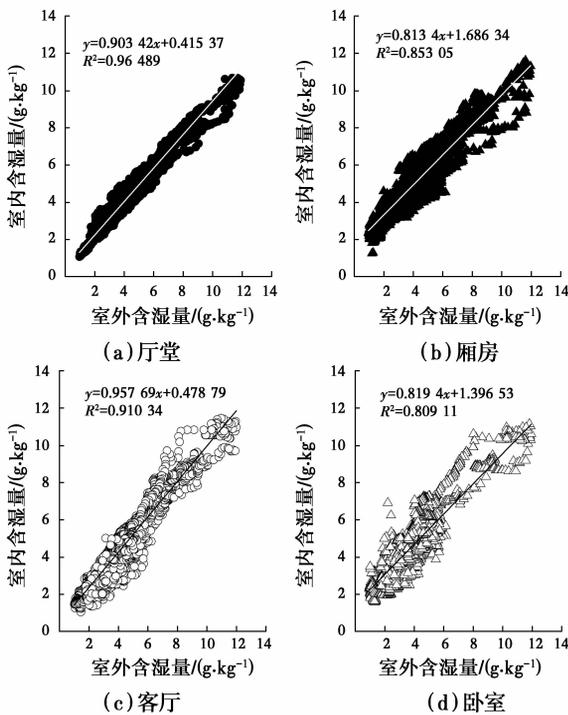


图 7 各功能区域室内外空气含湿量相关性

Fig. 7 Correlation between indoor humidity ratio and outdoor humidity ratio in each zone

### 2.4 室内湿环境的热舒适性评价

各功能区域温湿度状态如图 8 所示,图中五边形区域内为测试地区冬季热舒适区。根据文献[19]提供的夏热冬冷地区气候适应性模型  $t_n = 0.607t_o + 10.092$  ( $R^2 = 0.829\ 5$ ) ( $t_n$  为热中性温度,  $t_o$  为室外平均温度),计算得到测试地区冬季热中性温度为  $13.9\ ^\circ\text{C}$ 。ASHRAE<sup>[18]</sup>规定 80%接受率的热舒适区

范围为热中性温度  $\pm 3.5\ ^\circ\text{C}$ ,则测试地区冬季热舒适温度范围为  $10.4\sim 17.4\ ^\circ\text{C}$ 。相对湿度下限值为 20%<sup>[6]</sup>,自然通风建筑且室内平均风速在  $0\sim 0.5\ \text{m/s}$  左右,相对湿度上限值可达到 90%<sup>[18]</sup>。据此标准对测试建筑室内舒适度进行评价,厅堂、厢房、客厅、卧室分别有 6.51%、7.42%、7.67%、14.52% 时间段在热舒适区内。冬季人体可接受的空气温度上限可进行拓展,厅堂、厢房、客厅、卧室由于温度高于舒适温度上限而偏离舒适区的时间段占比分别为 0.85%、1.35%、0.65%、2.12%。厅堂、厢房、客厅、卧室室内总热舒适时间段占比分别为 7.36%、8.77%、8.32%、16.64%。冬季,厅堂热舒适性最差,卧室热舒适性相对较好。

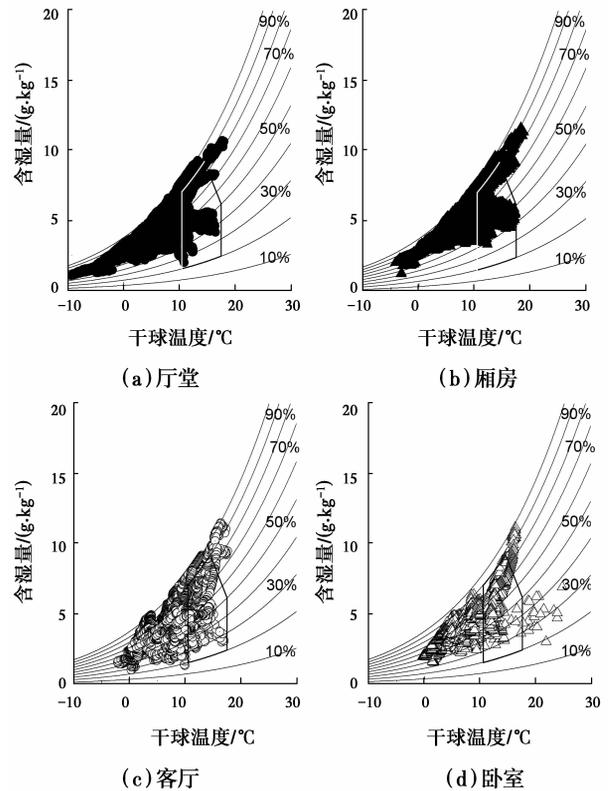


图 8 各功能区域温湿度状态

Fig. 8 Plot of temperature and humidity of psychrometric chart in each zone

传统民居冬季室内湿冷,进一步分析造成热不舒适的主要原因为室内温度远低于舒适温度范围,且相对湿度过高。建议传统民居冬季采用局部采暖设施,计算可知保持室内含湿量不变,将传统民居室内温度由平均温度  $6.1\ ^\circ\text{C}$  提高至热中性温度  $13.9\ ^\circ\text{C}$ ,则相对湿度可由 80%降低至 50%,满足人体舒适的相对湿度要求。现代民居个别时段使用空调采暖,但冬季室内温度仍无法完全满足舒适温度范围,

需加强采暖设备效率。

### 3 结论

1) 徽州传统民居冬季室内相对湿度主要分布在潮湿及非常潮湿水平, 平均相对湿度在 80% 左右; 徽州现代民居冬季室内相对湿度主要分布在不潮湿及稍微潮湿水平, 平均相对湿度在 70% 左右。

2) 徽州传统民居室内温度日较差大于现代民居, 但徽州传统民居室内湿度日较差小于现代民居室内湿度日较差, 室内湿环境稳定性良好。

3) 徽州传统民居与现代民居冬季室内外含湿量相关性系数均超过 0.8, 室内湿环境对室外湿环境变化响应明显。厅堂作为半开放空间室内外含湿量响应现象显著, 相关性系数达到 0.96。

4) 冬季, 徽州传统民居冬季厅堂、厢房热舒适的时间占比分别为 7.36%、8.77%, 室内热舒适性低于现代民居。造成徽州传统民居冬季热不舒适的主要原因为室内湿冷, 建议冬季采取局部采暖装置。

#### 参考文献:

- [1] YOSHINO H, GUAN S, LUN Y F, et al. Indoor thermal environment of urban residential buildings in China: Winter investigation in five major cities [J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36: 1227-1233.
- [2] YOSHINO H, YOSHINO Y, ZHANG Q Y, et al. Indoor thermal environment and energy saving for urban residential buildings in China [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38: 1308-1319.
- [3] HAN J, ZHANG G Q, ZHANG Q, et al. Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 4043-4050.
- [4] 李峥嵘, 王文静, 赵群, 等. 浙中传统民居夏季热环境实测研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2012, 31(5): 32-36.  
LI Z R, WANG W J, ZHAO Q, et al. Field study on indoor thermal environment of traditional folk house in Central Zhejiang Province [J]. *Building Energy & Environment*, 2012, 31(5): 32-36. (in Chinese)
- [5] GUO S Q, LI Z R, ZHAO Q, et al. Climate responsive strategies of traditional dwellings located in ancient village in hot summer and cold winter region of China [J]. *Building and Environment*, 2015, 86: 151-165.
- [6] TOFTUM J, JØRGENSEN A S, FANGER P O. Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort [J]. *Energy and Buildings*, 1998, 28: 15-23.
- [7] 王莹莹, 刘艳峰, 王登甲, 等. 湿传递对墙体热传递的影响关系研究 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(7): 1151-1157.  
WANG Y Y, LIU Y F, WANG D J, et al. Study on the influence of moisture transfer on the wall heat transfer [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2014, 35(7): 1151-1157. (in Chinese)
- [8] 王杨睿. 杭州地区住宅建筑湿环境测试及除湿对策 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013: 2-10.  
WANG Y R. Humid environment test and dehumidity strategy of residential architecture in Hangzhou [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013: 2-10. (in Chinese)
- [9] KALAMEES T, KORPI M, VINHA J, et al. The effects of ventilation systems and building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in finnish detached houses [J]. *Building and Environment*, 2009, 44: 1643-1650.
- [10] ZHANG H B, YOSHINO H. Analysis of indoor humidity environment in Chinese residential buildings [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 2132-2140.
- [11] LIN B R, TAN G, WANG P, et al. Study on the thermal performance of the Chinese traditional vernacular dwellings in summer [J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36: 73-79.
- [12] 宋凌, 林波荣, 朱颖心. 安徽传统民居夏季室内热环境模拟 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(6): 826-828.  
SONG L, LIN B R, ZHU Y X. Simulation of the summer indoor thermal condition of a traditional chinese residential building in Anhui [J]. *Journal of Tsinghua University(Science & Technology)*, 2003, 43(6): 826-828. (in Chinese)
- [13] 宋冰, 白鲁建, 杨柳, 等. 徽州传统民居夏季室内热环境研究 [J]. *建筑节能*, 2015(4): 69-73.  
SONG B, BAI L J, YANG L, et al. Indoor thermal environment of Huizhou traditional residence in summer [J]. *Building Energy Efficiency*, 2015(4): 69-73. (in Chinese)
- [14] 宋冰, 杨柳, 刘大龙, 等. 西递徽州民居冬季室内热环境测试研究 [J]. *建筑技术*, 2014, 45(11): 1033-1036.  
SONG B, YANG L, LIU D L, et al. Field study on indoor thermal environment in Huizhou traditional residence in Xidi in winter [J]. *Architecture Technology*, 2014, 45(11): 1033-1036. (in Chinese)

- [15] 陈晓扬,仲德崑.宏村徽州传统民居过渡季节室内环境分析[J].建筑学报,2009(Sup2):68-70.  
CHEN X Y, ZHONG D K. Interior environment analysis of Huizhou traditional residence of Hongcun Village in mild season [J]. Architectural Journal, 2009 (Sup2): 68-70. (in Chinese)
- [16] BROWN S K, COLE I, DANIEL V, et al. Guidelines for environmental control in cultural institutions [R]. Canberra: Heritage Collections Council, 2002.
- [17] 中等环境中PMV和PPD指数的测定及热舒适条件的规定:GB/T 18049—2000 [S].北京:中国标准出版社,2000.  
Measurement of PMV and PPD in neutral environment and conditions of thermal comfort: GB/T 18049-2000 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2000. (in Chinese)
- [18] Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE 55-2013 [S]. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers Inc., 2013.
- [19] 李俊鸽,杨柳,刘加平.夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[J].暖通空调,2008,38(7):20-24.  
LI J G, YANG L, LIU J P. Adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter zone [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(7): 20-24. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)