



Study on Indoor Thermal Environment of Traditional Dwellings in the Watery Town in Suzhou in Winter

Li Xueping, Liu Jiao

Architectural and Civil Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China

Email address:

142550891@qq.com (Li Xueping), 372305621@qq.com (Liu Jiao)

To cite this article:

Li Xueping, Liu Jiao. Study on Indoor Thermal Environment of Traditional Dwellings in the Watery Town in Suzhou in Winter. *Science Discovery*. Vol. 9, No. 6, 2021, pp. 354-359. doi: 10.11648/j.sd.20210906.23

Received: October 9, 2021; **Accepted:** November 15, 2021; **Published:** November 17, 2021

Abstract: Traditional dwellings have their own characteristics and values in the construction of indoor thermal environment. In order to analyze the current situation of thermal environment of dwellings in Southern Region of the Yangze River. This paper takes traditional dwellings in the watery town in Suzhou as the research object, and studies the indoor thermal environment in winter through field measurement of indoor and outdoor temperature and relative humidity of dwellings in winter, questionnaire survey and PMV-PPD thermal evaluation system. The results show that the average indoor temperature is 7.5°C, humidity of residential is 72%, the average predicted thermal sensation vote is -2.79, the predicted dissatisfaction is over 90%, and the indoor thermal environment dissatisfaction in public questionnaire survey is 20.83%, which is far from the predicted dissatisfaction PPD. It shows that the vote of hot feeling underestimates the residents' tolerance for the environment, and corrects the deviation of PMV value through adaptive coefficient. The revised aPMV value is greater than PMV value, but the thermal and humidity environment level is still Class III, which does not meet the living conditions. Water source heat pump can be used as a heating method in winter to improve the thermal environment, which can provide reference for improving indoor thermal environment of residential buildings in water towns.

Keywords: Ancient Dwellings in Suzhou, Indoor Thermal Environment, PMV-PPD thermal Evaluation, Thermal Comfort

苏州水乡传统民居冬季室内热环境研究

李雪平, 刘姣

建筑与土木工程学院西安科技大学, 西安, 中国

邮箱

1142550891@qq.com (李雪平), 372305621@qq.com (刘姣)

摘要: 传统民居在室内热环境的营造上有自身特点与价值, 为分析江南水乡民居热环境现状, 以苏州水乡传统民居为研究对象, 通过对民居冬季室内外温度以及相对湿度现场实测, 发放问卷调查及采用PMV-PPD热评价体系对冬季室内热环境进行研究。结果表明: 民居冬季室内平均温度为7.5°C, 平均湿度为72%, 预测热感觉投票平均为-2.79, 预测不满意度为90%以上, 民众问卷调查室内热环境不满意度为20.83%, 与投票预测不满意度PPD相差甚远, 表明热感觉投票低估了居民对环境的忍耐度, 通过适应性系数修正PMV值偏差, 修正后aPMV值大于PMV值, 但热湿环境等级仍属III级, 不满足居住条件, 可通过水源热泵作为冬季采暖方式, 改善热环境, 为水乡民居室内热环境改善提供参考。

关键词: 苏州古民居, 室内热环境, PMV-PPD热评价, 热舒适

1. 引言

苏州水乡传统民居夏季室内凉爽,天井通风良好,温度适宜。因墙体遮挡室内日照不足,墙体无保温层,室内温度低,人体感觉冷。随着南方冬季温度逐渐降低以及人们对生活品质的提高,民居冬季室内环境存在一定问题。王金莉[1]等研究得出夏热冬冷地区将单层玻璃改成双层玻璃窗可有效提高冬季室内温度,改善热环境。王雪[2]等对陕南山地民居进行夏季热环境实测及能耗分析,发现民居一层与二层热环境良好,顶层较差可设置隔热及空调进行改善。彭小洪[3]等对湘中地区传统民居三种类型进行实测调研,发现民居冬季热湿环境较好,可增加人工照度提高居住舒适性。郝俊红[4]等利用Design Builder研究发现民居底层架空并在东侧设置天井能够有效促进通风。郝石盟[5]等对苏南地区民居进行室内冬季物理环境实测,提出采用间歇式采暖、选择可利用热源能改善冬季热环境。H.B.Rijal[6]等对日本关东地区住宅进行热测量、热舒适度调查和居民行为调查,普遍热舒适满意度较高,根据结果建立住宅的自适应模型,量化了热温度的季节差异。Islam Rezuana[7]建立了传统木屋室内热环境与居民行为模式的解释图,有效帮助居民提高热舒适感。Tang Lei、Ai Zhengtao[8]等提出改变窗口启动因子的控制新策略,并利用Energyplus对5种气候区典型建筑进行室内温度和能耗预测,得出该种策略有效提升室内热环境并具节能性能。Adegbie M.O.、Islam Rezuana[9,10]等结合居住者行为与窗玻璃类型分析热带地区房屋热环境,建立舒适模型便于提高居住者幸福感。以上学者对各地区住宅室内热环境进行广泛研究,对于夏热冬冷地区民居研究主要位于浙江、湖南等地,针对苏州水乡传统民居研究较少。

本文以苏州传统水乡民居为研究对象,在冬季最冷月进行室内外温度、湿度实测,利用PMV-PPD热评价体系得到民居室内热环境等级,为民居改善室内热环境做参考。

2. 测试区域概况

苏州位于淮河以南,江苏省东南部,属于长江三角洲地带。京杭运河、长江流经苏州,故城内水系发达,湖泊、河流较多,占比比例为42.5%,平原占54.8%,丘陵占2.7%,海拔为4米左右,总体地势平坦。苏州为亚热带季风海洋性气候,四季分明,温暖潮湿,冬夏两季长,春秋两季短,属于典型的夏热冬冷地区。苏州夏季平均温度为33℃,冬季平均温度为2.5℃,降雨量大,年平均降水量为1100毫米,平均日太阳辐射量为12497KJJ/m²。

研究对象位于苏州平江区东花桥巷,始建于康熙54年,街巷长400m,宽2.2m。民居选址位于河岸,多为一层或两层,以梁柱承重体系为主,材料大多以石、木、砖为主其他为辅,是一条具有苏州水乡特色的街巷,见图1。



(a) 民居内部



(b) 东花桥巷

图1 东花桥巷民居现状。

3. 测试对象及方案

3.1. 测试对象

测试地点位于苏州市平江区东花桥巷,属于夏热冬冷地区,夏季炎热潮湿,冬季阴湿寒冷,常年降雨量大。民居坐北朝南,三落三进,占地面积为4000平方米,面阔三间13m,进深七檩9m,整体呈现狭长幽深。内外墙均用石块为基础,向上逐渐为空斗墙。门窗均为木制与单层玻璃,屋顶为坡屋顶,采取椽子-望砖-底瓦-盖瓦的结构,屋檐伸出墙面以防止雨水侵蚀。天井长8m,宽5m,地面采用石砌,室内地面为木板或石板。时间久远,外墙有部分老化破损,室内光线昏暗,平面图见图2。

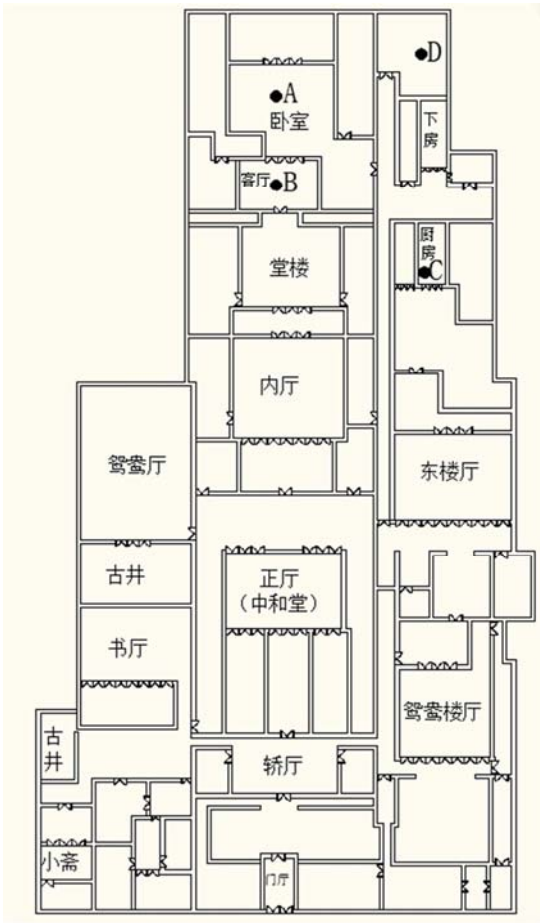


图2 测试户型平面图及测点布置。

3.2. 测点布置及测试方案

本次测试天气晴, 测试时间为2021年1月29日10: 30至2021年1月30日10: 30, 24h不间断测量该民居室内及室外温度及相对湿度, 每隔30分钟记录一次数据。共设置4处测点, 分别为房间A、房间B、房间C、及室外测点D, 房间A、B、C功能分别为卧室、客厅、厨房, 室内测试仪器放置于距地面1.0m处, 室外放置于距地面1.5m处, 符合《居住建筑节能检测标准》[11]室内距地面高度1.0m、室外距地面1.5m的要求。

4. 冬季室内热环境测试及分析

4.1. 空气温度

由图3的测试结果可得: 室外温度在29日下午14: 30最高, 为21.4℃, 最低温出现在30日早上6: 40左右, 为1.3℃, 平均温度为6.9℃, 日幅温差为20.1℃, 温度波动较大。房间A室内平均温度为7.5℃, 最高温为8.6℃, 最低温为6.8℃, 日幅温差为0.8℃, 浮动小。房间B温度浮动幅度大于房间A, 最高温度为12.3℃, 最低温度为9.2℃, 日幅温差为3.1℃, 平均温度为8.9℃。房间C为厨房, 在做饭期间温度会大幅上升, 其余时间温度较为稳定, 平均温度为9.6℃, 最高温度为12.8℃, 最低温度为8.3℃, 日幅温差为4.5℃。

通过测试发现, 传统民居室内温度较低, 为7.5℃, 冬季夏热冬冷地区被动采暖建筑室内平均温度不低于12℃ [12], 民居平均温度均低于标准要求, 不满足人们热舒适要求。传统民居室内客厅温度最高, 卧室温度最低。由于卧室夹在廊道与右落之间, 冬季太阳高度角为44°左右较小, 太阳辐射难以进入卧室, 窗户朝东西向, 白天开窗通风时寒风入侵温度低, 夜晚门窗紧闭, 温度稳定。客厅门朝南且常开, 在下午受太阳辐射温度高, 居民大部分时间处于室外, 客厅温度稳定, 在吃饭时温度有小幅升高。厨房在做饭期间温度迅速升高, 窗户朝北日常时间温度小于客厅。室内温度较平稳, 因传统民居外墙为青砖空斗墙, 传热系数为0.741较小, 有一定的保温性能, 但整体室内温度仍然不满足居住要求。

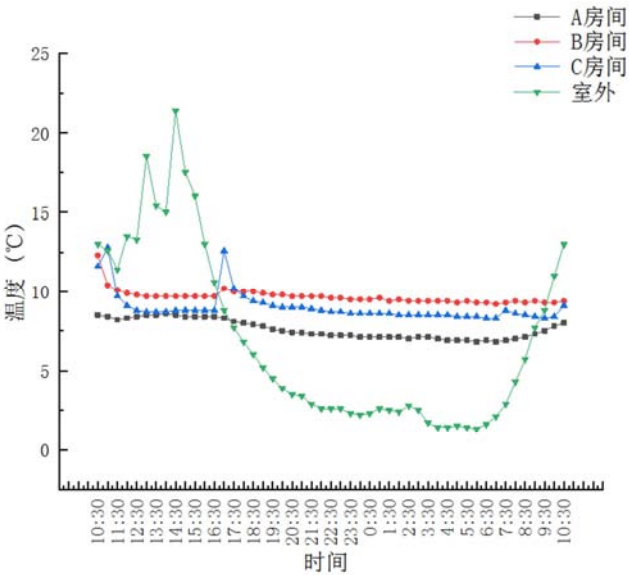


图3 冬季室外及各房间温度。

4.2. 相对湿度

由图4测试结果可得: 室外湿度波动幅度大, 与温度走向趋势相反。在29日下午14: 30左右太阳辐射最大, 湿度最小, 为16.5%, 夜间至凌晨湿度持续上升, 最大湿度出现在30日6: 30左右, 为81.9%, 之后湿度随太阳辐射强度增大而下降。室内湿度在夜间相对平稳, 白天湿度随人们活动有小幅波动。房间A最大湿度72%, 最低58.8%, 平均65%; 房间B最大湿度71.3%, 最低45.6%, 平均64%; 房间C最大湿度80.3%, 最低44.7%, 平均64%。三个房间均朝北, 平均湿度相近, 均大于60%, 室内通风不良, 空气交换少、效率低, 太阳辐射难以进入室内, 导致室内湿度大, 居住舒适感不良。

通过对传统民居冬季相对湿度测试发现, 传统民居相对湿度偏高, 超过人体舒适湿度区域值, 因苏州气候潮湿多雨, 木制门窗老化变形产生缝隙、密闭性变差, 室内湿度与室外湿度变化趋势一致。正午太阳辐射最强, 空气中水分蒸发, 室内门窗均处于开启状态, 受室外相对湿度影响大, 均降低至最小; 夜间至凌晨室外空气水分饱和, 湿度小幅上升, 室内门窗关闭, 受室外湿度影响小, 趋于稳定; 早晨水汽重, 太阳辐射小, 水蒸气蒸发缓慢, 空气相

对湿度较大。厨房在做饭期间用水多，湿度小幅上升，与室外湿度变化相反。

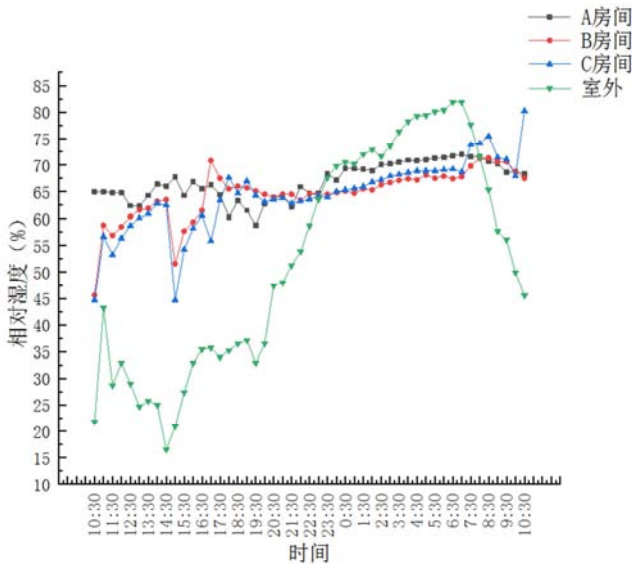


图4 冬季室外及各房间相对湿度。

4.3. 问卷调查

除对民居进行现场仪器测试之外，还对现居住在民居内的居民进行室内舒适度问卷调查，问卷包含三大部分，第一部分是受访者的年龄、性别、职业、居住时长等基本信息；第二部分是居民对于现住民居的冬、夏季温度、湿度、采光和通风的主观感受；第三部分是居民对于室内环境的其他意见，以此了解居民的主观舒适感以及民居的热环境现状。

民居室内无空调，无集中采暖，且外围护结构未作保温层，门窗气密性差，室内整体热环境不良。因不同年龄层次、性别的人对室内热环境的忍耐程度不同，为更加精确了解传统民居室内热环境状况，对居住在内的居民做了针对性的问卷调查。本次问卷总共80份，得到有效问卷72份，其中60岁以上老人占比约70%，男女比例约为1.2:1，结果如下：

表1 冬季室内人体冷热感受统计情况。

人体冷热感受	寒冷	较寒冷	适中	较暖和	暖和
户数	6	20	25	12	9
所占比例	8.3%	27.8%	34.7%	16.7%	12.5%

表2 冬季室内湿度调研统计情况。

湿度	潮湿	较潮湿	适中	较干燥	干燥
户数	18	25	16	7	6
所占比例	25%	34.7%	22.3%	9.7%	8.3%

表3 室内采光度调研统计情况。

采光效果	明亮	较明亮	适中	较暗	暗
户数	5	12	14	22	19
所占比例	6.9%	16.6%	19.4%	30.5%	26.6%

表4室内热舒适度调研统计情况。

热舒适度	舒服	适中	不适
户数	19	38	15
所占比例	26.4%	52.8%	20.8%

由表1数据可得：约8.33%的居民感觉冬季室内寒冷，27.78%的居民感觉冬季室内较寒冷，满意度不高，安装空调的户数较少，大部分居民会使用电热毯与电暖器进行采暖；由表2可知，约25%的居民感觉室内潮湿，34.72%的居民感觉室内较潮湿，仅不到一成的居民感觉室内干燥，增强了刺骨的冷感；表3可得，30.56%的居民感觉室内光线较暗，26.39%的居民感觉室内暗，由于冬季太阳高度角小，屋檐较长，遮挡了大部分阳光使得室内光线昏暗，因此大多居民日间常在室外走动；由表4得，约80%的居民对室内热舒适度表示满意，因居住者大多为老人，对居住环境的要求稍低，从而使得满意度较高。

4.4. 水饱和蒸汽压

水饱和蒸汽压是影响PMV值的一项参数，随着温度的升高呈指数性升高，通常用Antoine公式表示温度与水饱和蒸汽压之间的函数关系。根据该公式获取传统民居卧室不同温度下的水饱和蒸汽压，所得水饱和蒸汽压与时间关系曲线见图5。

Antoine公式：

$$\ln P = 9.3876 - 3826.36 / (T - 45.47) \quad (1)$$

式中：P为水饱和蒸汽压；T为温度，单位为K， $290 \leq T \leq 500$

由图5可得，房间A的水蒸汽压力处于0.9~1.1kPa之间，平均为1.02kPa，波动幅度较小。在29日17:30至30日5:30室内温度有小幅降低，从而水饱和蒸汽压持续下降。

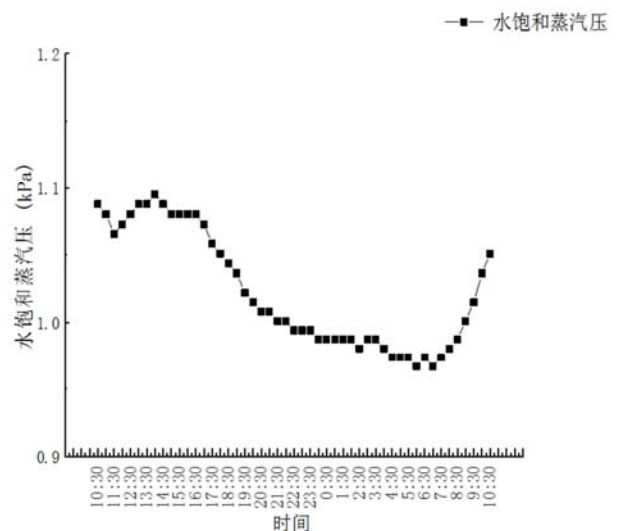


图5 房间A水饱和蒸汽压。

4.5. 热舒适性评价指标

热舒适性评价指标是表示人们对室内热环境满意程度，影响因素包括环境参数和人体参数，环境参数为室内

温度、风速、湿度、平均辐射温度、及水饱和蒸汽压, 人体参数为人的衣着热阻以及新陈代谢率。

PMV-PPD热评价体系是Fanger教授提出的一种公认最合理的热评价方法,通过预测平均投票值PMV和预测不满意百分数PPD反映人们对室内热环境的满意度。PMV热舒适共有7个等级,当PMV=0时,室内热环境最佳。当PMV为0时,不一定代表所有人均认为室内热环境最佳,为避免单一数据过于片面,教授又提出PPD,即预测人们对热环境不满意百分数,能够避免PMV值过于绝对,不符合实际状况。综合六个影响因素,根据拟合曲线得出对应的PMV和PPD值,当PMV处于-0.5~+0.5之间[13,14],表明人们对室内热环境满意度较高。冬季测试期间门窗关闭,风速取0m/s,选择静坐时的新陈代谢率1.0met[15],衣着热阻根据测试期间人们的穿着所得,为1.45clo,利用所测得的温度、相对湿度、水饱和蒸汽压以及风速、代谢率和衣着热阻计算PMV值与PPD值,所得结果与时间曲线见图6。

图6数据可得: PMV值均低于-2.58, PPD值均高于为90%,两者曲线呈正相关,夜晚与凌晨温度低从而PMV也低, PPD高,表明人体在无采暖的室内感觉冷,室内热舒适差。PMV-PPD热评价体系所得结果表明该传统民居室内热环境较差,不足以满足人们对居住环境的要求,室内热环境需要进行相应措施来改善。预测不满意度PPD值高达90%以上,实际进行问卷调查时的居民热舒适不满意度为20.83%,两者结果有较大出入,这表明预测体系低估了居民对居住环境的忍耐度与适应性。

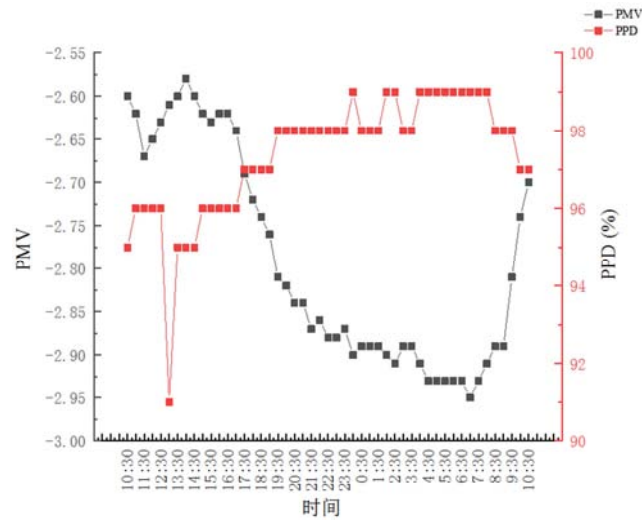


图6 房间A的PMV和PPD值曲线。

4.6. 适应性热评价指标

由前所述, PMV-PPD评价体系与居民主观感受出入较大,居民会对热环境变化产生不自主的行为调整,如穿上衣服、打开空调等,为减少因适应性带来的差异,Yao R、Li B[16]提出适应性预测投票aPMV,该模型引入自适应系数λ,对PMV方法进行参数修正, aPMV公式为:

$$aPMV = \frac{PMV}{1+\lambda PMV}$$
 (2)

式中: λ为自适应系数

根据《民用建筑室内热湿环境标准》[17],夏热冬冷地区居住建筑冬季修正参数λ取-0.49, 根据上式计算修正后aPMV值, 结果见表5。由表5可知, 室内房间PMV值经修正后虽大于原先数值,但仍处于不舒适III级,室内热舒适性差, 需改善传统民居室内热环境。

表5 各房间aPMV值及标准等级。

	房间A	房间B	房间C
PMV	-2.79	-2.35	-2.5
aPMV	-1.18	-1.09	-1.12
GB/T50785—2012规定	aPMV<-1	aPMV<-1	aPMV<-1
等级	III级	III级	III级

4.7. 改进措施

苏州水乡传统民居临河而建,可充分利用河流进行室内热环境的改善, 冬季河流温度可达到12-22℃, 通过水源热泵空调进行冬季采暖, 有效提高冬季室内温度, 相比北方集中供暖费用低、节约能源、保护环境。

5. 结论

本文通过对苏州水乡传统民居室内热环境进行温度、相对湿度实测、问卷调查, 分析数据以及利用PMV-PPD热评价体系理论对民居室内热环境进行分析研究, 并针对热环境差的问题, 提出地域性的改善办法, 得出以下三点结论。

- 1) 传统民居空斗墙有一定的保温隔热性能,室内相对湿度均值为72%, 室内外通风次数少, 采光差, 室内阴暗潮湿。
- 2) 民居室内热感觉投票PMV值均低于-2. 58, 预测不满意程度均大于90%, 人体舒适感差; 实际不满意度为20. 83%, 预测评价体系低估了人体对环境的忍耐度。
- 3) 根据修正系数得出传统民居室内热湿环境等级为III级, 室内舒适度差, 可通过水源热泵提高室温, 节能同时改善热环境, 推动水资源生态发展。

参考文献

[1] 王金莉,邹钺.夏热冬冷地区农村建筑冬季热环境测试与改善[J].建筑热能通风空调,2018,37(10):64-66+35。
[2] 王雪,杨柳,刘加平等.陕南山地民居夏季室内热环境与能耗特性[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(04):563-568。
[3] 彭小洪,伍国正,任雯等.湘中传统民居冬季室内热环境测试与分析[J].室内设计与装修,2020(08):16-18。
[4] 郝俊红,张鹏,王曦溪等.夏热冬冷地区居住建筑被动降耗技术模拟研究[J].建筑热能通风空调,2016,35(09):9-13。
[5] 郝石盟,宋皓峰,李珺杰,等.苏南民居室内物理环境实测研究[J].动感(生态城市与绿色建筑),2016(01):97-104。

- [6] H. B. Rijal, M. A. Humphreys, J. F. Nicol. Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings [J]. *Energy & Buildings*, 2019, 202.
- [7] Islam Rezuana and Ahmed Khandaker Shabbir. Indoor Thermal Environment and Occupant's Living Pattern of Traditional Timber Houses in Tropics [J]. *Designs*, 2021, 5 (1): 10-10.
- [8] Tang Lei et al. A Strategy to Maximally Utilize Outdoor Air for Indoor Thermal Environment [J]. *Energies*, 2021, 14 (13): 3987-3987.
- [9] Li Xinyi, Tingley Danielle Densley. Solid wall insulation of the Victorian house stock in England: A whole life carbon perspective [J]. *Building and Environment*, 2021 (prepublish).
- [10] Adegbe M. O. Improvement on Window Glassing for an Enhanced Indoor Thermal Environment of Tropical Office Buildings [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1107 (1).
- [11] 住房和城乡建设部. 居住建筑节能检测标准: JGJ/T132-2009. [S]. 中国建筑工业出版社, 2009.
- [12] 江苏省建筑科学研究院有限公司. 江苏省居住建筑热环境和节能设计标准: DGJ32/J71-2014. [S]. 江苏: 凤凰科学技术出版社, 2014.
- [13] 朱颖心. 建筑环境学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [14] IOS. Moderate Thermal Environments, Determination of the PMV and PPD indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort: ISO Standard 7730 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1984.
- [15] 刘抚英, 厉天数, 赵军. 绿色建筑设计的原则与目标 [J]. *建筑技术*, 2013(3): 212-215.
- [16] Yao R, Li B, Liu J. A theoretical adaptive model of thermal comfort Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV) [J]. *Build Environment* 2009, 44: 2089-96.
- [17] 中国建设部. 民用建筑室内热湿环境标准: GB/T50785—2012. [S]. 中国计划出版社, 2012.