

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-571-06

# 湖北农村自然通风住宅热舒适调查研究

陈敏<sup>1</sup> 余贞贞<sup>2</sup> 周传辉<sup>1</sup>

(1.武汉科技大学城市建设学院 武汉 430081;

2.成都基准方中建筑设计有限公司武汉分公司 武汉 430060)

**【摘要】** 基于入户问卷调研与现场实测,研究了湖北山地及丘陵地区农村自然通风住宅室内热环境及人体热舒适评价。利用统计回归方法分析了实际热感觉 MTS 与预测热感觉 PMV 间的差异,提出了该地区农村自然通风住宅冬、夏季热舒适性指标(热中性温度、可接受温度、舒适空气流速范围)。

**【关键词】** 农村住宅;自然通风;热舒适;问卷调查;现场测试

中图分类号 TU831 文献标识码 A

## Field Investigation of Thermal Comfort of Natural Ventilated Residential Buildings in Rural Areas of Hubei Province

Chen Min<sup>1</sup> Yu Zhenzhen<sup>2</sup> Zhou Chuanhui<sup>1</sup>

(1.School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, 430081;

2.Ji Zhun Fang Zhong Wuhan Architectural Design Co., Ltd., Wuhan, 430060)

**【Abstract】** Based on the questionnaire survey and field measurement in rural residences with natural ventilation in Hubei Province, the subjective evaluation of the residents' thermal environment was researched. The statistical regression analysis was used to compare the differences between the actual thermal sensation MTS and PMV, and proposed the indicators of the winter and summer thermal comfort of natural ventilated residences in rural areas of Hubei Province (thermal neutral temperature, acceptable temperature and comfortable wind speed range).

**【Keywords】** rural residence; natural ventilation; thermal comfort; questionnaire survey; field measurement

基金项目:湖北省自然科学基金项目(编号:2017CFB311)

作者(通讯作者)简介:陈敏(1984-),女,讲师,博士,E-mail:chenminstud@126.com

收稿日期:2020-01-02

## 0 引言

我国南方农村住宅有别于城市及北方农村住宅,大多为自然通风建筑,其室内环境的营造不借助或较少借助人造冷热源。目前针对南方地区热舒适的研究主要集中于城市建筑或是人工气候实验室,关于农村住宅自然通风条件下室内热环境与人体热舒适性之间联系的研究相对匮乏。

现行国际热舒适标准如 ISO7730、CIBSE、EN15251、ASHREA55 等,均是在人工气候实验室

的稳态环境下、针对于欧洲成年男子建立的,忽略了人体的自身调节适应能力与个人身体素质差异,预测自然通风条件下人体实际热感觉时会发生偏离<sup>[1-3]</sup>。我国的《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824-2013)<sup>[4]</sup>以及《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785-2012)<sup>[5]</sup>的部分非人工冷热源条款适用于农村住宅环境,前者针对全国范围的农村住宅,后者仅有部分条款适用于农村自然通风住宅,且均未明确指出不同地域、人口、气候

条件下的农村自然通风住宅热舒适标准。

目前,针对湖北农村地区开展的自然通风热舒适研究较少,农村住宅建造无据可依,使得住宅设计粗糙,建造、施工水平低,室内热环境较差<sup>[6,7]</sup>。为了提高该地区农村住宅室内热舒适性,改善广大农民的居住环境,结合当地气候、建筑、生活方式和人体适应性,开展自然通风热舒适研究,建立适用于湖北农村住宅自然通风环境下的热环境及热舒适评价标准显得尤为重要。本文采用问卷调查与现场实测相结合的方式,客观呈现湖北农村自然通风住宅的热环境现状,在调研与实测数据的基础上建立湖北农村住宅的热舒适评价标准,以期为该地区农村住宅的节能设计提供理论支撑。

### 1 研究方法

#### 1.1 样本选择

湖北属于典型的夏热冬冷气候区,全省总面积中,山地占 56%,丘陵占 24%,平原湖区占 20%,大量农村位于山地与丘陵之中<sup>[8]</sup>。调研地点以丘陵和山地农村为主(见表 1),由于该地区过渡季节短暂,本次调研与实测选择典型季节夏季和冬季进行。夏季有效户数 130 户、有效样本量 383 份,冬季有效户数 136 户、有效样本量 398 份(见表 1)。受访者均为长期生活在当地的居民,已经完全适应了当地的气候。由于当前农村成年男性大多外出务工,女性样本量明显高于男性样本。夏季样本中女性占 71.8% (275 组)、男性占 28.2% (108 组),冬季样本中女性占 69.1% (275 组)、男性占 30.9% (123 组)。受试者年龄跨度较大且总体上中老年比例较高,夏季最小 5 岁(1 人),最大 84 岁,冬季最小 8 岁(1 人),最大 78 岁。受试者年龄分布如图 1 所示。

表 1 调研地点样本分布

Table 1 Samples of Field Investigation

季节	调研地点	户数(户)	样本量(组)
夏季 (2017.7.8~2017.8.18)	恩施市建始县业州镇牛角水村	9	18
	恩施市建始县花坪镇小西湖村	26	80
	宜昌市长阳县资丘镇天河坪村	24	87
	黄冈市蕲春县赤东镇童畈村	45	87
	随州市广水市余店镇唐寨村	26	111
	合计	130	383
冬季 (2018.2.1~2018.2.13)	咸宁市通山县大畈镇白泥村	18	56
	咸宁市通山县大畈镇西泉村	19	50
	咸宁市通山县大畈镇隐水村	19	54
	随州市广水市余店镇唐寨村	80	238
合计	136	398	

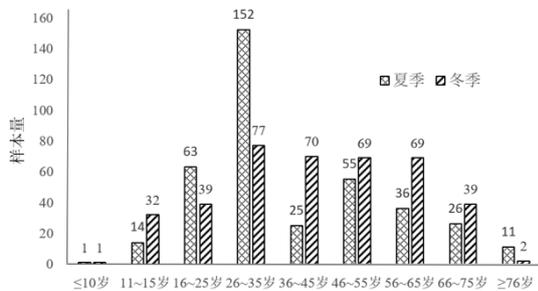


图 1 冬、夏两季受访者的年龄分布

Fig.1 Sample sizes of Respondents in Different Ages

#### 1.2 问卷调查

问卷调查内容包括住宅设计、室内热环境参数

及人体热舒适评价等,具体包括:(1)湖北农村村落聚集形态、农宅选址布局的特点、被动式设计、围护结构(墙体、门窗、屋面等)做法等建筑相关信息;(2)受访者当前的活动状态、着装情况、热感觉、热舒适度、热可接受度以及对室内热环境(温度、通风情况、潮湿状况等)的主观评价;(3)居民改善室内热环境的调节措施,包括开窗、使用辅助设备(如风扇、取暖器、空调等)改善房间热环境的手段以及增减衣物等自身的适应性行为。考虑到受访者的知识水平,问卷均由调研人员填写。调研人员为武汉科技大学建筑环境与能源应用工程专业本科生,入户后通过一对一访谈的形式

获取问卷中的信息, 填写问卷。

### 1.3 现场测试

现场实测的室内热环境参数包括空气干球温度、相对湿度、空气流速、黑球温度、围护结构表面温度等。采用便携式温湿度自记仪连续监测农宅客厅、卧室、室外等处的空气干球温度和相对湿度, 每分钟自动记录一次数据。入户实测时, 测点数量根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785-2012)<sup>[5]</sup>的要求, 选择房间面积 (S) 中心和 0.6m (躯干)、1.1m (头颈部) 测量, 受试者处于坐姿时, 距离地面 0.1m (脚踝)、0.6m (躯干)、1.1m (头颈部) 测量, 受试者处于站姿时, 距离地面 0.1m (脚踝)、1.1m (躯干)、1.7m (头颈部) 测量, 测量值取不同高度的平均值。图 2 为某典型住宅建筑测点分布平面图, 仪器具体

参数见表 2。现场调研采用纵向研究法, 即对选定的受试者在整个调研周期内做重复问卷采访和实测。每次入户时, 测试受试者所在的房间(卧室或客厅), 一人负责访谈填写问卷, 一人负责实测, 记为一组数据。

### 1.4 数据处理

为使多次调研所得的分散的、定量和定性的数据能够反映总体特征, 对原始资料进行了筛选、分类汇总, 使之系统化、条理化和标准化, 以利于统计计算和分析对比。在进行统计分析前, 确定数据是否服从正态分布, 并采用 SPSS 软件对数据的独立性、方差齐性进行了检验。进行自变量与因变量之间的相关分析时, 对自变量进行了共线性诊断级相关性检验。

表 2 测试仪器参数及测量精度要求

Table 2 Parameters of Measuring Instruments

仪器名称	测试参数	测量范围	仪器精度	规范要求最低精度 <sup>[18]</sup>
Poly MI 640	空气干球温度 $t_a$	-40~+60°C	±0.1°C	±0.5°C
热舒适度测量仪	空气相对湿度 $\phi$	0%~100%RH	±0.1%RH	±5%
(JTR)WBGT	空气流速 $v$	0.03~20.00m/s	±0.03m/s	±(0.05+0.05 $v_0$ )m/s
热指数仪	黑球温度 $t_g$	5~120°C	常温段±0.2°C	\
Testo830-S1	空气干球温度 $t_a$	5~60°C	常温段±0.2°C	±0.5°C
红外测温仪	围护结构表面温度 $t$	-30~+350°C	0.1~350°C: ±1.5°C或 1.5%读数 -30~0°C: ±2°C或 2%读数	±1°C
WSZY-1A	空气干球温度 $t_a$	-40~100°C	±0.1°C	±0.5°C
温湿度自记仪	空气相对湿度 $\phi$	0%~100%RH	±0.1%RH	±5%

注: 平均辐射温度  $t_r$  的最低精度要求±2°C, 操作温度  $t_{op}$  的最低精度要求±2°C。

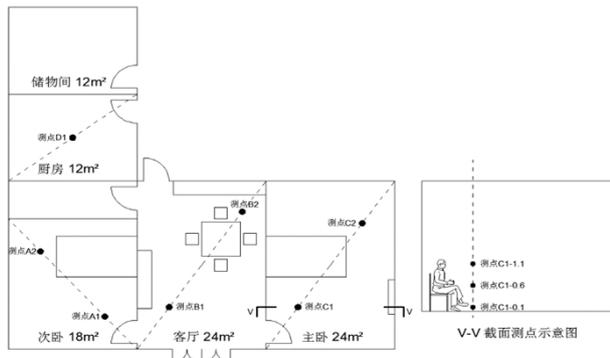


图 2 某典型住宅测点分布图

Fig.2 Layout of Measuring Points in a Typical House

居民对室内热环境的主观评价采用 ASHRAE 的热感觉标尺 (-3 冷, -2 凉, -1 稍凉, 0 适中, 1 稍暖, 2 暖, 3 热)<sup>[9]</sup>。采用 Bin 法对操作温度  $t_{op}$

以 1.0°C 的间隔分组, 若组内样本量小于 5, 则该组样本被剔除, 以免对分析结果造成较大误差。以每组内的平均操作温度作为自变量, 以组内预测和实测平均热感觉投票的均值作为因变量, 通过线性回归的方式进一步计算得到预测、实测的热中性温度和可接受温度范围。对于湿度感觉和吹风感, 数据处理方法与之相同。

## 2 问卷调查与现场测试结果

### 2.1 室内热湿环境

冬夏季室内热湿环境现场入户实测结果见表 3。测试结果表明, 实测期间, 冬季室内风速最小值为 0.05m/s, 最大值为 0.28m/s, 平均值为 0.11m/s; 夏季室内风速最小值为 0.05m/s, 最大值为

0.35m/s，平均值为 0.09m/s。冬夏两季室内风速平均值均低于人对风速的感觉阈 0.25m/s，但 23.2%的农宅冬季室内风速高于 0.25m/s，冷吹风感较为明显。冬季室内干球温度最小值为 2℃，最大值为 16.7℃，平均值为 9℃，32.9%的农宅室内空气干球温度低于《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824-2013) [4]中规定的 8℃温度下限；夏季室内干球温度最小值为 20.1℃，最大值为 33.1℃，平均值为 27.1℃，7.83%的农宅夏季室内温度高于《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824-2013) [4]中规定的 30℃温度上限。冬季相对湿度变化范围为 42.8%~86.7%，平均值为 68.2%；夏季相对湿度变化范围为 62.0%~93.0%，平均值为 80.1%。由此可见，目前湖北农村住宅冬夏两季室内热湿环

境较为恶劣，冬季湿冷、夏季湿热。

### 2.2 人员服装热阻与新陈代谢率

入户调查时，调查人员详细记录受访者的着装与所处状态。服装热阻为《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785-2012) [5]中推荐的单件服装热阻的累加，受访者大多处于站姿放松状态或坐在轻质木椅上，故不考虑附加热阻。夏季服装热阻在 0.08~1.12clo，均值为 0.53clo；冬季服装热阻在 0.97~2.00clo，均值为 1.45clo。受访者在不同热环境下的着装情况体现了其适应热环境的行为特征。冬、夏季居民代谢率均在 0.80~2.00met 之间，均值为 1.41met 左右。典型行为可概括为轻度的体力活动，大多是一个小时内中重度活动与站立、静坐等活动的综合效果。

表 3 冬、夏季室内热湿环境参数

Table 3 Parameters of Indoor Thermal and Humidity Environment in Winter and Summer

测试参数	冬季		夏季	
	范围	均值	范围	均值
空气(干球)温度(℃)	2.0~16.7	9.0	20.1~33.1	27.1
操作温度(℃)	2.8~17.3	9.4	20.5~35.5	27.3
相对湿度(%)	42.8~86.7	68.2	62.0~93.0	80.1
风速(m/s)	0.05~0.28	0.11	0.05~0.35	0.09
服装热阻(clo)	0.97~2.00	1.45	0.08~1.12	0.53
新陈代谢率(met)	0.80~2.00	1.41	0.80~2.00	1.40

### 2.3 室内热舒适与热感觉投票

从图 3 热舒适度投票可看出，冬、夏季投票较为集中且稍不舒适(1)的投票占大多数，而图 4 热感觉投票，夏季投票大多集中在“适中(0)”，即夏季有更多的人认为“稍不舒适(1)”就是“适中(0)”，热舒适与热感觉投票存在分离现象。

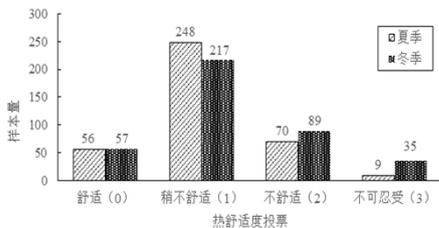


图 3 室内热舒适度评价

Fig.3 TCV in Winter and Summer

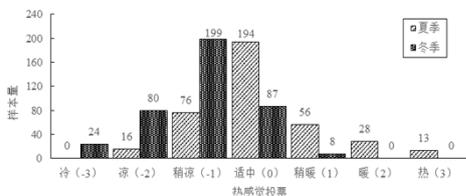


图 4 热感觉投票分布

Fig.4 TSV in Winter and Summer

### 2.4 湿感觉投票

由图 5 可知，冬、夏季的湿感觉投票主要集中在“适中(0)”。虽然表 3 中冬、夏季室内平均相对湿度分别为 68.2%、80.1%，但是受访者湿感觉(HSV)投票集中且较为满意，说明该地区农村居民对于室内相对湿度并不敏感。

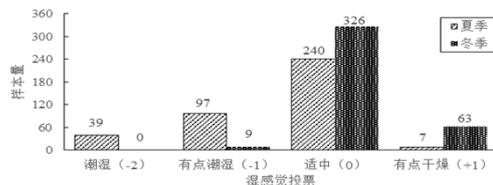


图 5 湿感觉投票分布

Fig.5 HSV in Winter and Summer

## 3 湖北农村自然通风住宅热舒适标准的建立

### 3.1 热感觉 (PMV、MTS)

分别分析实际热感觉 MTS 和预测热感觉 PMV 与操作温度之间的关系, 拟合结果见图 6。由图 6 (a) 可知: 夏季 PMV 预测 (斜率大) 高估了居民对温度变化的敏感程度, 且温度偏离中性温度越多, “剪刀差” 现象越明显。当  $PMV=0$ , 夏季热中性温度  $t_{op}=24.7^{\circ}\text{C}$ ; 当  $MTS=0$ , 实测热中性温度  $t_{op}=24.5^{\circ}\text{C}$ 。夏季实测热中性温度较预测热中性温度低  $0.2^{\circ}\text{C}$ , 且低于常规空调设定温度  $26.0^{\circ}\text{C}$ 。这与其他学者的研究结论有所偏差<sup>[8]</sup>。出现这一结果的原因是, 2017 年夏季阴雨天气频繁, 夏季平均气温比往年正常气温低  $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ , 造成居民热感觉投票值偏低。

从图 6 (b) 冬季热感觉回归曲线可看出: 冬季实测平均热感觉 MTS 的斜率略大于预测平均热感觉 PMV, 且实测 MTS 高于预测 PMV, 即居民对冬季温度变化较夏季敏感。当  $PMV=0$ , 预测热中性温度  $t_{op}=16.1^{\circ}\text{C}$ ; 当  $MTS=0$ , 实测热中性温度  $t_{op}=14.7^{\circ}\text{C}$ 。冬季实测热中性温度比预测热中性温度低  $1.4^{\circ}\text{C}$ , 这表明湖北农村居民对冬季偏冷环境的适应性较强。

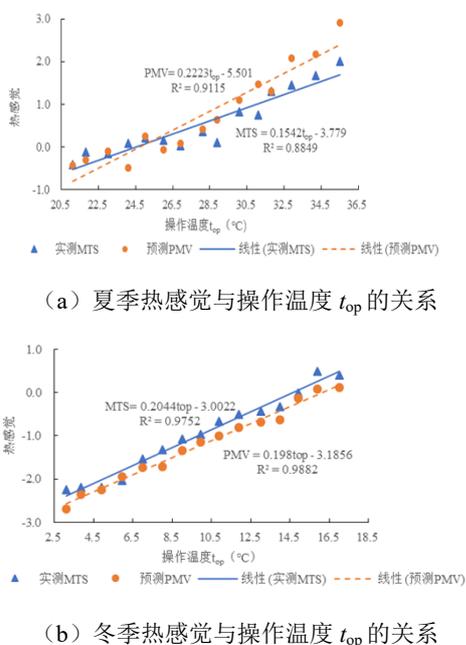


图 6 热感觉与操作温度关系

Fig.6 Relation of PMV and  $t_{op}$

### 3.2 湿感觉 (HSV)

湖北农村住宅夏季室内相对湿度高、冬季室内相对湿度变化大, 但居民湿度感觉投票非常集中。

相关性检验的结果表明, 居民的湿度感与室内相对湿度相关性不高, 说明农村居民对于室内相对湿度的变化不敏感。因此, 已有的热舒适模型用于湖北农村住宅自然通风热舒适研究时, 不需要进行湿度修正, 这点和同样处于夏热冬冷地区的重庆地区的研究结果<sup>[9]</sup>不同, 与湿热地区人群热湿反应的研究结果<sup>[10-13]</sup>也不同。

### 3.3 热不满意率

ASHRAE 标准和 ISO7730 标准中规定热环境不满意率小于或等于 20% 的温度为人们可接受的舒适温度范围。夏季预测热舒适温度范围为  $t_{op}=21.1\sim 27.7^{\circ}\text{C}$ 、夏季实测热舒适温度范围  $t_{op}=19.8\sim 28.7^{\circ}\text{C}$ , 夏季居民实际可接受温度范围较预测值宽, 可接受温度范围上限的提高为建筑节能提供巨大的节能潜力。冬季预测热舒适温度下限  $t_{op}=12.6^{\circ}\text{C}$ , 实测热舒适温度下限  $t_{op}=9.9^{\circ}\text{C}$ , 比预测的可接受温度下限低  $2.7^{\circ}\text{C}$ , 说明居民的极限温度耐受能力比预测的强。

### 3.4 舒适的室内空气流速范围

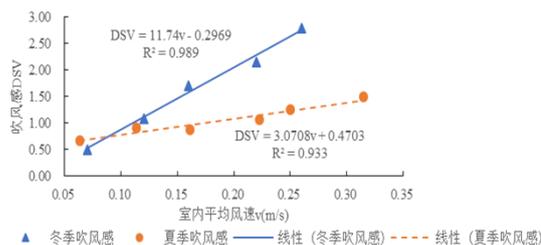


图 7 冬、夏季吹风感与室内空气平均流速关系

Fig.7 Relation of DSV and Air Velocity

由图 7 可知, 夏季室内吹风范围较窄, 而冬季吹风感范围较宽。同等空气流速下, 冬季吹风感投票高于夏季, 且空气流速越高, “剪刀差” 现象越明显, 即湖北农村居民对冬季室内空气流速变化的敏感程度高于夏季。

当吹风感 DSV 分别等于中间两个标度时, 即为可接受的空气流速范围。夏季实测吹风感  $DSV=3.0708v+0.4703$  ( $R^2=0.933$ ),  $DSV=1$  时,  $v=0.17\text{m/s}$ ;  $DSV=2$  时,  $v=0.50\text{m/s}$ , 故夏季舒适的室内空气流速范围为  $0.17\sim 0.50\text{m/s}$ 。而图 7 中居民的吹风感投票均小于 2, 且室内最大空气流速为  $0.35\text{m/s}$ , 说明现有的自然通风住宅室内通风效果未能达到居民的需求。若改善自然通风效果, 舒适的空气流速上限将达到  $0.50\text{m/s}$ , 高于空调供冷工

况规定的 0.3m/s。冬季舒适的室内空气流速范围为 0.11~0.20m/s,且冷吹风感较明显。因此,部分住宅需采取措施抑制冬季室内空气流动以避免造成冷吹风感。

### 3.5 热舒适评价标准的建立

室内热舒适标准是住宅设计的基础,也是营造适宜的室内热环境及实现建筑节能的前提。表 4 为基于调研与实测数据建立的适用于湖北农村自然通风住宅热舒适标准。

表 4 湖北农村自然通风住宅热舒适标准

Table 4 Thermal comfort standard of rural natural ventilation residence in Hubei Province

季节	回归方程	80%可接受舒适温度 (°C)	热中性温度 (°C)	舒适的空气流速范围 m/s
夏季	PMV=0.2223 $t_{op}$ -5.501 (R <sup>2</sup> =0.9115)	21.1~27.7	24.7	0.17~0.50
	MTS=0.1542 $t_{op}$ -3.779 (R <sup>2</sup> =0.8849)	19.8~28.7	24.5	
冬季	PMV=0.198 $t_{op}$ -3.1856 (R <sup>2</sup> =0.9882)	12.6 (下限)	16.1	0.11~0.20
	MTS=0.2044 $t_{op}$ -3.0022 (R <sup>2</sup> =0.9752)	9.9 (下限)	14.7	

## 4 结论

(1) 湖北农村自然通风住宅夏季室内湿热,空气流速低;冬季室内湿冷,相对湿度波动大,易引起冷吹风感,居民对冬季室内空气流速变化的敏感程度远高于夏季。

(2) 对于湖北农村自然通风住宅,采用 PMV 模型预测居民热感觉时,夏季会产生严重的偏离,冬季低于实际热感觉值。

(3) 湖北农村自然通风住宅夏季和冬季实测热中性温度分别为 24.5°C 和 14.7°C。夏季实测热舒适温度范围  $t_{op}$ =19.8~28.7°C,冬季实测热舒适温度下限为  $t_{op}$ =9.9°C。夏季和冬季居民舒适的室内风速范围分别为 0.17~0.50m/s 和 0.11~0.20m/s。

### 参考文献:

[1] Fanger P O, Toftum J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates[J]. Energy & Buildings, 2002,34(6):533-536.

[2] Peeters L, Dear R D, Hensen J, et al. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation[J]. Applied Energy, 2009, 86(5):772-780.

[3] Nicol F, Humphreys M. Derivation of the adaptive

equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251[J]. Building and Environment, 2010,45(1):11-17.

[4] GB/T 50824-2013, 农村居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[5] 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.

[6] 余贞贞,符永正,陈敏.基于自然通风建筑的热舒适模型研究[J].建筑科学,2017,33(10):176-182.

[7] 余贞贞.湖北农村住宅自然通风热舒适研究[D].武汉:武汉科技大学,2018.

[8] 熊燕,张磊.湖北山区农宅热环境及居民热舒适调查研究[J].建筑节能,2016,44(11):52-62.

[9] 张敏飞,张华玲.重庆自然通风热舒适模型的建立及热环境评价[J].暖通空调,2012,42(1):61-64.

[10] 金玲,张宇峰,张仲军.高温高湿对湿热地区人群热湿反应的影响[J].暖通空调,2016,46(6):122-127.

[11] 张宇峰,王进勇,陈慧梅.我国湿热地区自然通风建筑热舒适与热适应现场研究[J].暖通空调,2011,41(9):91-99.

[12] 张剑波.彭州市小渔洞镇农村住宅室内热舒适性研究[D].成都:西南交通大学,2010.

[13] 郭春梅,张宇峰,李胜英.自然通风环境下热舒适性评价与分析[J].暖通空调,2010,40(10):76-80.