

Journal of HV&AC

ISSN 1002-8501
CN 11-2832/TU
CODEN NUKOE7



暖通空调

9

2019

HEATING VENTILATING & AIR CONDITIONING

主办 亚太建设科技信息研究院 中国建筑设计研究院 中国建筑学会



VOL 49

HITACHI

日立全直流变频中央空调

SET-FREE A 系列

冬不惧寒，夏不畏热！日立SET-FREE A系列采用日立高效喷气增焓直流变频涡旋压缩机，冬季制热运行最低环温-25℃；采用高效的360°冷媒冷却散热技术，夏季制冷运行最高环温54℃。



青岛海信日立空调系统有限公司

营业地址：中国青岛市东海西路17号海信大厦

全国客户服务热线：400-860-1111

技术交流

空气温度与辐射温度不同时对人体散热的影响

王丽娟 刘艳峰 刘加平 张 领 (78)

垃圾焚烧厂的恶臭污染控制

黄求诚 陆新生 王 锋 (82)

重庆市某办公建筑节能改造方案与节能量分析

徐 欣 雒秦光 杨文杰 艾为学 (86)

基于改进内模解耦控制的空调系统优化

梁芯萌 张九根 谢金鑫 陈 哲 (91)

专题研究

严寒地区火炕农宅冬季睡眠环境热舒适研究

王昭俊 张 腾 (97)

基于 ORC 的太阳能热电联产系统优化设计

由世俊 夏军宝 李雯青萍 张 欢

高鑫磊 叶天震 郑雪晶 郑万冬 (103)

多点进出城市地下道路通风模型实验研究

李 琼 陈 超 袁浩庭 刘宏伟 朱鸿梅 王野驰 (111)

空调开启后的人体生理热反应研究

简毅文 侯雨晨 常小艳 (118)

基于可拓学的热力站运行效果评价方法研究

刘益民 曹 勇 刘 辉 李 冉 孙 鹏 (124)

多热源双螺旋管水箱换热性能研究及优化

张泓铭 张 欢 由世俊 马 骁 (128)

贵州苗族吊脚楼居住建筑冬季室内热舒适现场调研

吴崇山 单 军 孔德荣 (135)

单元式直接蒸发冷却空调在西安某交通岗亭的应用

严 政 黄 翔 黄凯新 安苗苗 (142)

设备开发

风阀传统工艺原理改进

刘勋兵 孙 妙 熊 斌 钟星灿 (146)

简讯 2019年中国北京世界园艺博览会中国馆等3个场馆绿色建筑评价标识通过评审(42) 第十八届西南地区暖通热能动力及空调制冷学术年会召开(67) 领袖行业 主导未来——第27届“人环奖”颁奖典礼在京举行(90) “以精细化设计,辅以创新发展”——第3届中国地铁建设暖通空调技术发展高端论坛召开(96) 2019首届中国清洁供热蓄热技术应用和发展论坛在北京举行(127)

《暖通空调》编审委员会

(以姓名笔画为序)

名誉主任委员:吴元炜

主任委员:江 亿

副主任委员:罗继杰 徐 伟 潘云钢

顾 问:王唯国 许文发 许钟麟 李娥飞

吴德绳 宋宏光 张永铨 郑纯友

胡仰耆

委 员:丁力行 于松波 于晓明 马伟骏

王 钊 王昭俊 王清勤 王随林

王曙明 车轮飞 方修睦 石文星

龙惟定 叶 鸣 叶大法 由世俊

付 林 冯国会 戎向阳 朱建章

朱颖心 伍小亭 刘 东 刘 鸣

刘 猛 刘明生 刘承军 刘俊杰

刘艳峰 刘晓华 关文吉 寿炜炜

李玉国 李永安 李百战 季先庭

李兆坚 李安桂 李国庆 李国繁

李著萱 李景广 李德英 杨国荣

杨昌智 杨爱丽 吴大农 邹 瑜

邹平华 沈恒根 沈晋明 宋孝春

宋高举 张 旭 张 杰 张吉礼

张宇峰 张建中 张铁辉 张寅平

陈 超 陈友明 陈建新 陈焕新

陈清焰 林向阳 林波荣 季 伟

金丽娜 房 磊 赵 鉴 赵旭东

赵建成 胡松涛 姚 杨 姚国梁

姚润明 夏令操 夏卓平 徐 明

徐文华 徐宏庆 徐稳龙 黄 翔

曹 阳 龚延凤 崔 跃 路 宾

裴清清 翟志强 冀兆良

《暖通空调》杂志社

社长/主编:刘承军

副社长:刘学民 姜燕梅

名誉主编:王曙明 杨爱丽

执行主编:于松波

副主编:胡竹萍

编辑部主任:李丽萍

编辑:杨爱丽 刘学民 于松波

胡竹萍 李丽萍 龚 雪

郭晓芳 张 静 陈晓梅

经营部主任:姜燕梅

事业发展部主任:龚 雪

本期责任编辑:胡竹萍



声 明

1 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网(<http://www.chinajournal.net.cn>)、超星期刊域出版平台(<http://www.chaoxing.com>)和万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群。本刊支付给作者的稿酬中包括上述电子版和网络版的作者著作权使用费。如作者不同意将文章收入此类数据库,请在来稿首页的显著位置作出书面声明,本刊将作相应处理。

2 本刊商请投稿作者给予本刊自稿件发表之日起为期一年的专有出版权,如投稿作者未作特别声明,则视为同意此项授权。

《暖通空调》杂志社

Operational optimization of large-scale district CCHP system with complex influence factors
 *Shi Shengbo, Zhuang Jian, Mao Chunjun, Zhang Leishen, Gu Jialei and Gao Wenzhong* (72)

TECHNOLOGY EXCHANGE

Effects of temperature differences between air and radiation on human thermal losses
 *Wang Lijuan, Liu Yanfeng, Liu Jiaping and Zhang Ling* (78)

Odor control measures in waste incineration plants
 *Huang Qiucheng, Lu Xinsheng and Wang Feng* (82)

Energy saving retrofit scheme and energy saving rate of an office building in Chongqing
 *Xu Xin, Luo Qinguang, Yang Wenjie and Ai Weizue* (86)

Air conditioning system optimization based on improved internal model decoupling control
 *Liang Xinmeng, Zhang Jiugen, Xie Jinxin and Chen Zhe* (91)

FEATURES

Thermal comfort in winter sleeping environment of rural houses with heated kang in severe cold zone
 *Wang Zhaojun and Zhang Teng* (97)

Optimal design of solar CHP system based on ORC
 *You Shijun, Xia Junbao, Li Wenqingping, Zhang Huan, Gao Xinlei, Ye Tianzhen, Zheng Xuejing and Zheng Wandong* (103)

Scale experiment on ventilation in urban bifurcate tunnels
 *Li Qiong, Chen Chao, Yuan Haoting, Liu Hongwei, Zhu Hongmei and Wang Yechi* (111)

Physiological thermal response of human body in air conditioning environment
 *Jian Yixen, Hou Yuchen and Chang Xiaoyan* (118)

Operation effect evaluation method of heat supply stations based on extension theory
 *Liu Yimin, Cao Yong, Liu Hui, Li Ran and Sun Peng* (124)

Study and optimization of heat transfer performance of multi-heat source water tank with double helical tubes
 *Zhang Ruming, Zhang Huan, You Shijun and Ma Xiao* (128)

Field study on winter indoor thermal comfort of stilted buildings of Miao nationality in Guizhou
 *Wu Chongshan, Shan Jun and Kong Derong* (135)

Application of unitary direct evaporative cooling air conditioner to a traffic control booth in Xi'an
 *Yan Zheng, Huang Xiang, Huang Kaixin and An Miaomiao* (142)

EQUIPMENT DEVELOPMENT

Improvement of traditional process principle for air dampers
 *Liu Xunbing, Sun Miao, Xiong Bin and Zhong Xingcan* (146)

Reviewing and Consulting Board

Honorary Chairman: Wu Yuanwei
 Chairman: Jiang Yi
 Vice Chairman: Luo Jijie, Xu Wei, Pan Yungang
 Adviser: Wang Weiguo, Xu Wenfa, Xu Zhonglin, Li Efei, Wu Desheng, Song Hongguang, Zhang Yongquan, Zheng Chunyou, Hu Yangqi
 Member: Ding Lixing, Yu Songbo, Yu Xiaoming, Ma Weijun, Wang Zhao, Wang Zhaojun, Wang Qingqin, Wang Suilin, Wang Shuming, Che Lunfei, Fang Xiumu, Shi Wenxing, Long Weiding, Ye Ming, Ye Dafa, You Shijun, Fu Lin, Feng Guohui, Rong Xiangyang, Zhu Jianzhang, Zhu Yingxin, Wu Xiaoting, Liu Dong, Liu Ming, Liu Meng, Liu Mingsheng, Liu Chengjun, Liu Junjie, Liu Yanfeng, Liu Xiaohua, Guan Wenji, Shou Weiwei, Li Yuguo, Li Yongan, Li Baizhan, Li Xianting, Li Zhaojian, Li Angui, Li Guoqing, Li Guofan, Li Zhuxuan, Li Jingguang, Li Deying, Yang Guorong, Yang Changzhi, Yang Aili, Wu Danong, Zou Yu, Zou Pinghua, Shen Henggen, Shen Jinming, Song Xiaochun, Song Gaoju, Zhang Xu, Zhang Jie, Zhang Jili, Zhang Yufeng, Zhang Jianzhong, Zhang Tiehui, Zhang Yinping, Chen Chao, Chen Youming, Chen Jianxin, Chen Huanxin, Chen Qingyan, Lin Xiangyang, Lin Borong, Ji Wei, Jin Lina, Fang Lei, Zhao Jian, Zhao Xudong, Zhao Jiancheng, Hu Songtao, Yao Yang, Yao Guoliang, Yao Runming, Xia Lingcao, Xia Zhuoping, Xu Ming, Xu Wenhua, Xu Hongqing, Xu Wenlong, Huang Xiang, Cao Yang, Gong Yanfeng, Cui Yue, Lu Bin, Pei Qingqing, Zhai Zhiqiang, Ji Zhaoliang

Editorial Staff

Publisher/Chief Editor: Liu Chengjun
 Assistant Publisher: Liu Xuemin, Jiang Yanmei
 Honorary Chief Editor: Wang Shuming, Yang Aili
 Executive Chief Editor: Yu Songbo
 Assistant Chief Editor: Hu Zhuping
 Editorial Manager: Li Liping
 Editor: Yang Aili, Liu Xuemin, Yu Songbo, Hu Zhuping, Li Liping, Gong Xue, Guo Xiaofang, Zhang Jing, Chen Xiaomei
 Advertising Manager: Jiang Yanmei
 Business Development Manager: Gong Xue
 Responsible editor for this issue: Hu Zhuping

贵州苗族吊脚楼居住建筑冬季室内热舒适现场调研*

清华大学 吴崇山[☆] 单 军[△] 孔德荣

摘要 对贵州台江登鲁村 75 户苗族吊脚楼居住建筑冬季室内热环境参数进行了现场测试,同时对 145 名居民的热感觉、热舒适等主观感受展开了问卷调查,并对测试及调查结果进行了统计回归分析。结果表明:贵州台江苗族吊脚楼民居冬季实测热中性温度为 14.3 °C,预测热中性温度为 18.5 °C,两者相差 4.2 °C;居民期望温度为 16.5 °C;80%可接受温度范围为 6.5~21.2 °C。研究表明,相较于夏热冬冷地区相似纬度的汉族农村,贵州台江苗族吊脚楼居民拥有较低的热中性温度及 80%可接受温度下限,针对其原因进行了分析。

关键词 苗族吊脚楼 现场研究 热舒适 热感觉 热中性温度 期望温度

Field study on winter indoor thermal comfort of stilted buildings of Miao nationality in Guizhou

By Wu Chongshan[☆], Shan Jun and Kong Derong

Abstract Investigates the indoor thermal environment parameters of 75 stilted buildings of the Miao nationality in Denglu village, Taijiang, Guizhou in winter. At the same time, conducts a questionnaire survey to 145 residents on thermal sensation, thermal comfort and other subjective feelings, and analyses the test and investigation data by the statistical regression method. The results show that the measured thermal neutral temperature in winter is 14.3 °C, the predicted thermal neutral temperature is 18.5 °C and the difference between them is 4.2 °C, the preferred temperature of residents is 16.5 °C, and the accepted temperature scope for 80% is 6.5 to 21.2 °C. The research results show that compared with those who live in the rural area of the Han nationality with similar latitude in hot summer and cold winter zone, the residents of the Miao nationality in Taijiang, Guizhou have lower measured thermal neutral temperature and floor level of accepted temperature scope for 80%. Analyses the cause of the phenomenon.

Keywords stilted building of Miao nationality, field study, thermal comfort, thermal sensation, thermal neutral temperature, preferred temperature

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

目前,我国对农村住宅热舒适现场研究愈发重视,研究成果显著。闫海燕等人通过对南阳、岳阳农村住宅与南阳市区住宅的热舒适对比研究,发现了相同操作温度下其各自不同的热感觉投票规律,指出相较于北方寒冷和南方温热气候,秦岭-淮河附近的过渡气候区居民具有最低的实测热中性温度和耐寒能力^[1];王昭俊等人通过对哈尔滨近郊 10 户农宅的冬季室内热环境与热舒适调查得到当地农民的热中性作业温度及 90%可接受作业温度

下限,并分析了当地农民具有较低热中性温度、可接受温度的原因^[2];任艺梅等人借用 Yao 等人提出的 $aPMV$ 模型量化计算出吐鲁番民居冬、夏两季人体自适应水平,并与《民用建筑室内热湿环境评价标准》中提出的自适应系数 λ 值进行了比较分析^[3-5]。

☆ 吴崇山,男,1989 年 7 月生,在读博士研究生
△ 单军(通信作者)
100084 北京市海淀区清华大学建筑馆南 222
E-mail: shanjun@mail. tsinghua. edu. cn

收稿日期:2018-07-27

一次修回:2018-11-06

二次修回:2019-08-08

* “十三五”国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0702401)

相比于汉族聚居区普通农村住宅,我国热舒适现场研究较少触及少数民族乡村地区及其传统居住形式,至今成果相对匮乏。Brager 等人提出的适应性热舒适模型,否定了环境参数对人体热舒适的单一影响作用,认为人体自身随时与所处环境进行着交互作用,通过生理习服、心理适应及行为调节 3 种主要方式主动适应环境^[6]。纪文杰等人^[7]、曹彬等人^[8]的研究也印证了这一理论。少数民族乡村地区拥有不同于汉族农村地区的居住形式、生活习惯、民族心理及舒适度认知,甚至其冬季供暖措施和能源配比也与汉族农村不尽相同。根据 Brager 的理论,其居民对居住空间热环境的要求和期望必然有所不同。将其居民剥离生活环境运用实验室法求解其热中性温度或仅仅套用相似气候区汉族农村热舒适指标都会造成最终结果偏差,为少数民族乡村地区建筑室内环境品质提升及能源优化带来困扰。因此,对少数民族乡村居住建筑采用热舒适现场调查的方法尤为重要,也颇具理论和实践价值。

1 研究背景

研究地点为贵州省黔东南苗族侗族自治州台江县下辖的登鲁(上、下)村。台江县位于云贵高原东部苗岭主峰雷公山北麓、清水江中游南岸,属亚热带季风湿润气候区。年平均气温 18.5℃,年平均日较差 9℃,最冷月平均气温 2.6~5.2℃;无霜期 265 d 左右;年平均降水量 1 050~1 120 mm;年平均日照时数 1 030~1 500 h,年总太阳辐射量 5.75 GJ/m²。台江县属于我国建筑热工设计分区 III 区,即夏热冬冷地区。西面紧邻温和地区,因而相比于典型夏热冬冷地区其气候相对温和,但冬季湿冷的气候特征较为明显。台江县有 97% 以上的苗族人口,被誉为“天下苗族第一县”。

登鲁(上、下)村位于台江县台拱镇东南部,中心村距县城 10 km,是典型的传统苗族山地聚落。村中除个别新建砖木结构住宅外,95% 以上的居住建筑都属于干栏式木构吊脚楼。木质吊脚楼住宅依山就势,层叠而上,其主体一半搁置于山崖边,另一半凌空出挑,紧靠木柱支撑于山壁之上。总平面多呈“一”字型布置,且建筑主体多分为上、中、下 3 层:中间层为主要居住空间;底层木吊脚柱与山壁夹持部分作为牲畜蓄养及杂物堆放场所;顶层青瓦人字坡屋面下多有夹层,用以储藏粮食。典型苗族

吊脚楼建筑外观、建筑剖面及居住层平面如图 1 所示。外围护结构由 15~40 mm 厚度不等的杉木企口板拼合而成,镶嵌于两端木柱中缝间。由于木板壁接口处拼缝的存在,其围护结构气密性较差。

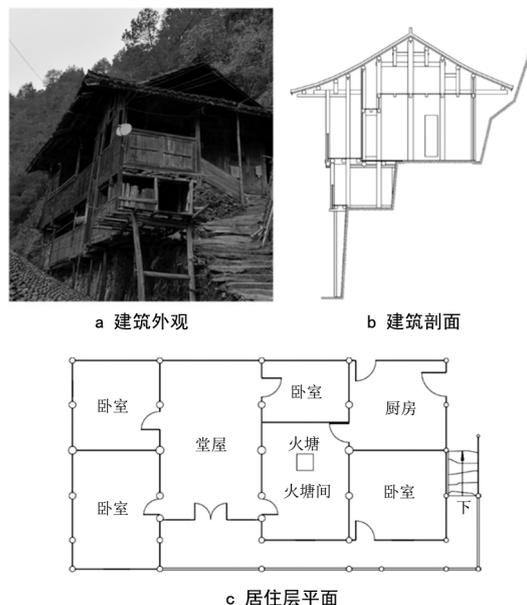


图 1 典型苗族吊脚楼建筑外观、建筑剖面及居住层平面

2 研究方法

2.1 研究样本选择

课题组于 2018 年 2 月 2—7 日对所选的 75 户吊脚楼民居室内热环境进行了现场测试。共调查了居民 145 人,其中男性 68 人(占 46.9%),女性 77 人(占 53.1%),获得有效样本 421 份。受试者概况见表 1。由表 1 可以看出,受试者在村子里的居住年限平均值为 34.06 a,可认为基本适应了当地的气候。

表 1 受试者概况

	最小值	最大值	平均值	标准差
年龄/岁	10	87	40.88	19.28
服装热阻/clo	0.94	2.33	1.58	0.26
居住年限/a	3	80	34.06	18.80

2.2 现场研究

1) 调研时间、地点和当地供暖方式。

调研适逢冬季农闲期间,除务工未归或去县城采买年货的部分村民外,大多数村民都在家中准备过年事宜。当地苗族居民习惯于夜间在卧室休息,而白天绝大部分时间多活动于自家火塘间、堂屋及厨房等。调研时间选取为 08:00—21:00,课题组在入户访谈过程中,以村民即时所处位置为准,就地开展调研,以保证结果的真实性。调研地点位置

分布频率如图 2 所示。

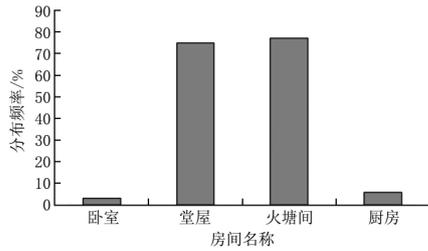


图 2 调研地点位置分布频率

苗岭冬季以生物质柴薪局部间歇热源供暖为主,较少使用商品能源。具体形式有火塘、炭火盆等。其中,火塘常见于我国南方少数民族地区,其做法为:在室内地面挖出 $0.3 \sim 1 \text{ m}^2$ 不等、深约 0.10 m 的小坑,四周垒砖石,中间生火取暖,其所在房间称为火塘间。调研期间,供暖方式分布频率如图 3 所示。

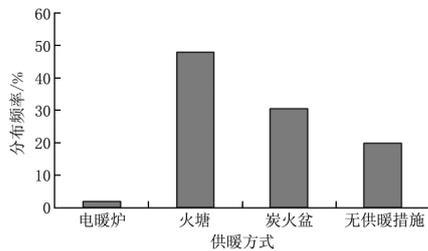


图 3 供暖方式分布频率

2) 调研内容。

调研内容包括室内外主要环境参数测量及对室内受试者的热舒适主观问卷调查,两者同时进行。其中,室外环境参数包括空气温度、相对湿度,采用 WSZY-1A 型温湿度记录仪直接测量;采用 WSZY-1A 型温湿度自计仪、HWZY-1 黑球温度自计仪及 FB-1 手持式风速表分别测量受试现场室内环境参数(空气温度、相对湿度、黑球温度及风速)。

受试者主观感觉包括热感觉、湿感觉、吹风感、热舒适度等。其中热感觉、湿感觉投票采用 ASHRAE 7 点标度: -3(冷), -2(凉), -1(稍凉), 0(适中), 1(稍暖), 2(暖), 3(热)^[9];热舒适度投票采用 5 点标度: 0(舒适), 1(稍不舒适), 2(不舒适), 3(很不舒适), 4(不可忍受)。

为确保受试者填写问卷时对周边热环境主观判断的客观真实性,测试时要求每位受试者在调查开始前先静坐 20 min ,其新陈代谢率取 1.2 met (坐姿、轻微活动所具有的新陈代谢水平)。

由于受试者大多坐在低矮木质板凳上填写问

卷,其与人体接触面积较小,本研究忽略其对受试者服装热阻的影响。

3 测试结果与分析

3.1 热舒适指标选取及统计学分析

测试样本中室内相对湿度大多在 $30\% \sim 70\%$ 区间内,室内空气流速平均值为 0.08 m/s 。当室内相对湿度普遍处于人体热舒适范围内、且气流速度较低时,选取操作温度 t_{op} 作为热舒适指标较为适宜^[10]。同时,苗岭居民冬季普遍采用局部间歇式火源供暖方式,加之吊脚楼民居的轻质、低蓄热木板壁围护结构及较差的气密效果,通常供暖房间内空气干球温度 t_a 与平均辐射温度 t_r 会有不同程度偏离。以操作温度 t_{op} 作为热舒适指标,可综合考虑空气温度、平均辐射温度 t_r 的叠加影响,使研究成果更客观。

平均辐射温度 t_r 可利用现场测试得到的空气干球温度 t_a 、黑球温度 t_g 、风速 v ,通过式(1)求得^[11]。

$$t_r = t_g + 2.44v^{0.5}(t_g - t_a) \quad (1)$$

操作温度 t_{op} 为空气干球温度 t_a 和平均辐射温度 t_r 的平均值。

运用 Excel 对调查所得温度、相对湿度、服装热阻及平均热感觉投票值 MTS (mean thermal sensation vote) 等数据进行统计学分析。为了规避单一测试样本较大的随机性特征,后期处理数据时,将因变量(操作温度 t_{op})以 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 为间隔进行分组,并将其与影响热感觉的相关因素进行回归分析^[12]。最后,将测试所得室内空气温度、相对湿度、风速及饱和水蒸气分压力等参数代入 MATLAB,计算得出相应的预计平均热感觉指数 PMV (predicted mean vote) 及预计不满意者的百分数 PPD (predicted percentage of dissatisfied) 等指标。

3.2 室内外热环境参数

测试期间室内外环境参数见表 2。由表 2 可以看出:局部间歇式火源供暖使测试房间平均操作温度较室外平均空气温度高 $7.22 \text{ }^\circ\text{C}$,其效果较为

表 2 室内外环境参数

	最小值	最大值	平均值	标准差
室内 空气温度/ $^\circ\text{C}$	3.20	18.50	10.58	4.15
相对湿度/%	37.40	82.50	53.60	7.97
风速/(m/s)	0.01	1.00	0.08	0.13
操作温度/ $^\circ\text{C}$	3.12	18.40	10.69	4.21
室外 空气温度/ $^\circ\text{C}$	-0.50	9.80	3.47	2.47
相对湿度/%	32.50	91.90	55.55	13.61

显著。但仅比 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》中规定的夏热冬冷地区农村居住建筑无供暖措施下的卧室、起居室计算温度(8℃)高 2.69℃,热环境品质仍然有待提升。提高围护结构保温、蓄热性能,并加强气密性,有效提高室内空气温度并减小室温波动,是改善吊脚楼冬季热环境的有效途径。

3.3 服装热阻

图 4 显示了受试者冬季室内服装热阻分布频率。由表 1、图 4 可以看出,该地区冬季居民服装

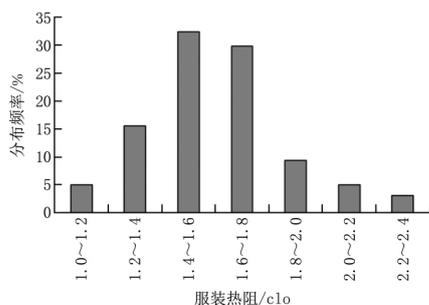


图 4 冬季室内服装热阻分布频率

热阻平均值为 1.58 clo,高于 ASHRAE 55-2013 规定的居民冬季服装热阻值(1 clo),并集中分布在 1.2~2.0 clo 范围内。

居民服装热阻与室内操作温度及平均热感觉的线性回归关系如图 5、6 所示。由图 5、6 可以看

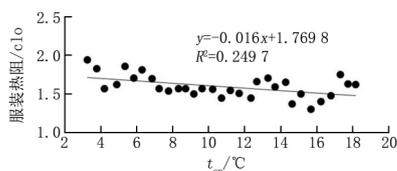


图 5 服装热阻与室内操作温度回归关系

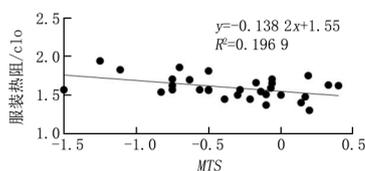


图 6 服装热阻与平均热感觉回归关系

出,随着室内操作温度和平均热感觉投票值的升高,受试者服装热阻呈微弱下降趋势,但其线性关系并不明显(R^2 分别只有 0.2497 和 0.1969)。这是由于当地居民白天大多出入频繁,经常活动于室内外和不同房间之间,其所处的环境温度变化频繁且较为剧烈,居民并未养成因环境温度不同而增减

衣物的习惯,因此其服装热阻与其所处环境温度及其即时热感觉均无太明显的负相关性,这与城市居民的穿衣习惯有很大不同。当地居民增减衣物只能使其处于可接受热感觉区间,并不能保证其获得最佳热舒适体验。

3.4 平均热感觉和热中性温度

图 7 显示了该地区居民冬季主观热感觉调查统计结果。由图 7 可以看出,62.70%的受试者热

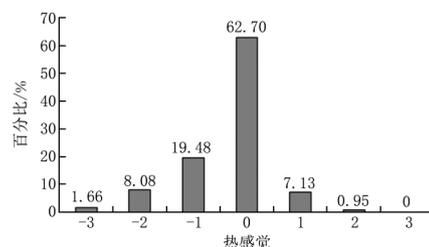


图 7 居民冬季主观热感觉调查统计结果

感觉为适中(0),19.48%的受试者热感觉为稍凉(-1),仅有 9.74%的受试者认为所处环境凉(-2)或冷(-3),仅有 8.08%的受试者热感觉为正值。

运用温度频率法,将测试现场室内操作温度以 0.5℃为间隔,划分为若干温度区间,以各温度区间中心温度 t_{op} 为自变量,受试者各区间内 MTS 为因变量,通过线性回归拟合得到关系式: $MTS = at_{op} + b$ (其中 a, b 为常数)^[10]。同时,根据 Fanger 的 PMV 方程式,利用测试所得热舒适参数及 MATLAB,分别计算出理论 PMV 和 PPD。取各温度区间 PMV 平均值与区间中心温度 t_{op} 进行线性拟合,得到回归方程,并将其与 MTS 和 t_{op} 的回归方程进行对比(见图 8)。

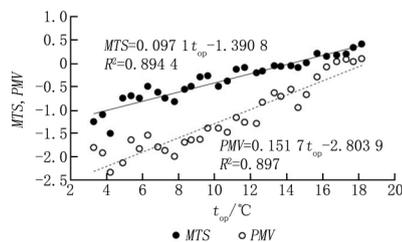


图 8 t_{op} 与 MTS, PMV 的回归曲线

热中性温度表示人体在热中性状态(热感觉最适中)时所对应的环境温度。分别令 $MTS = 0$, $PMV = 0$,可计算出实测热中性温度和预测热中性温度分别为 14.3, 18.5℃。实测热中性温度比预测热中性温度低 4.2℃,但比室内平均操作温度仍

高出 3.61 °C。可以看出,该地区苗族居民已在一定程度上适应了当地气候,这使其冬季实测热中性温度较理论值偏低,但较低的室内平均操作温度与实测热中性温度仍有一定差距。居民对当地气候的适应性特征同时反映在曲线斜率方面。由图 8 可知,MTS 曲线的斜率明显小于 PMV 曲线的斜率, t_{op} 每变化 1 °C, PMV 值会有 0.15 的改变,而 MTS 的变化幅度仅为 0.10,表明当地居民对温度变化的敏感程度比预测值小。

3.5 期望温度

分别统计总体调研样本中期望环境温度“暖一些”及“冷一些”的问卷数量百分比,并将 t_{op} 作为自变量,百分比作为因变量,进行线性回归,其结果见图 9。2 条拟合曲线的交点所对应的温度即为所求

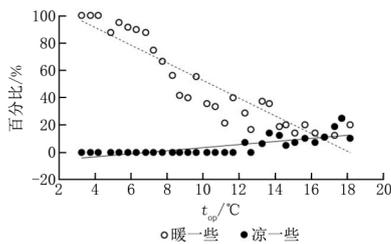


图 9 期望温度分析结果

期望温度(16.5 °C)。相较于实测热中性温度(14.3 °C),期望温度高 2.2 °C。这表明,在寒冷冬季,当地居民倾向于比舒适温度更高的环境温度。

3.6 可接受温度范围、热不满意百分比及热舒适

以各温度区间(0.5 °C 为间隔)中热感觉投票值为-2,-3,2,3 的问卷数量占该区间问卷总数的百分比作为实测热不满意百分比 PD,将各温度区间中心温度作为自变量、热不满意百分比作为因变量,进行回归分析,其结果见图 10。令 PD 分

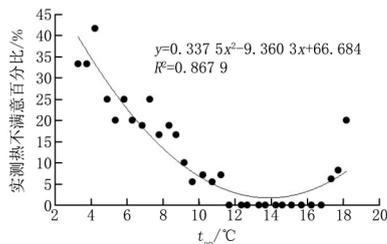


图 10 可接受温度分析结果

别为 10%,20%,可分别求得 90%居民可接受的室内操作温度范围为 8.9~18.8 °C,80%居民可接受的室内操作温度范围为 6.5~21.2 °C。80%居民所能接受的环境温度即为热舒适温度,可以看出,

冬季当地居民拥有较宽的温度接受区间和较低的可接受温度下限(较热中性温度低 7.8 °C),这再次表明,久居该地的居民已对当地环境产生了心理和生理的双重适应。

对计算出的 PMV,PPD,MTS 及 PD 进行分析比较(见图 11)。其中拟合所得 PMV-PPD 和

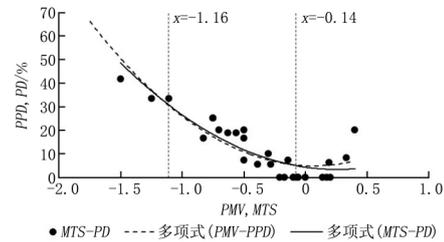


图 11 热感觉与热不满意百分比分析比较

MTS-PD 公式分别为

$$PPD = 18.65PMV^2 - 2.3746PMV + 4.9435 \quad (R^2 = 0.999) \quad (2)$$

$$PD = 14.687MTS^2 - 7.5162MTS + 4.2957 \quad (R^2 = 0.7778) \quad (3)$$

经计算,PMV-PPD 曲线顶点坐标为(0.06, 4.87),与理论模型的顶点坐标(0,5)接近。同时,MTS-PD 曲线顶点横坐标值为 0.26,即当 MTS=0.26 时所对应的 PD 最小,此时实测热不满意百分比最小值 PD_{min} 为 3.33%。相较于基于实验室和稳态热平衡方程所得到的经典理论模型,居民实际最佳的热感觉更偏向于稍暖一侧,此时热不满意百分比达到最低,并较理论最低值 5%低 1.67% (见图 11)。

由图 11 可以看出:当 $MTS > -0.14$ 和 $MTS < -1.16$ 时,PD 小于 PPD,说明在该热感觉区间内居民对环境的适应性较强;而当 $-1.16 < MTS < -0.14$ 时,PD 比 PPD 稍高,说明在该热感觉区间内居民的适应性水平稍低。

通过对问卷中“当前所处热环境是否感觉舒适”回答结果的统计,分别得出实际热舒适投票 TCV(thermal comfort vote)在总样本中的占比情况(见图 12)。从图 12 可以看出,77.67%的居民对所处热环境感觉舒适,17.82%的居民感觉稍不舒适,仅有 4.51%的居民感觉不舒适或很不舒适,同时没有居民感觉极不舒适。将选择 0(舒适)和 1(稍不舒适)的受试者统一视作处于热舒适状态,就有 95.49%的居民有舒适的环境冷热

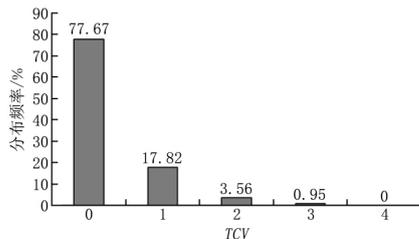


图 12 居民热舒适分布频率

体验。同时,将热感觉投票值 TSV (thermal sensation vote) 为 $-1, 0, 1$ 时所对应的温度范围认为是人体热舒适范围,即热感觉投票为 $-1, 0, 1$ 的受试者处于热舒适状态。由图 7 可知,该投票区间人数占总样本的 89.31% ,以热感觉投票 TSV 为量度的热舒适人数比率(热环境可接受率) 89.31% 比实际热舒适投票 TCV 所得的热舒适人数比率 95.49% 低 6.18% 。说明相较于舒适感,当地居民对环境冷暖具有更敏锐的辨别力和更深刻的主观感受,舒适的概念相较于冷热感觉更为宽泛和模糊。

将各温度区间内的热舒适投票平均值 MTC 与热感觉投票平均值 MTS 进行回归分析,回归曲线见图 13。从图 13 可以看出,当 $MTS=0.18$ 时,热舒适投票平均值达到最小,此时最小热舒适平均值为 0.08 。与热感觉相似,最佳热舒适投票依然偏向稍暖一侧。

表 3 本文研究成果与夏热冬冷、夏热冬暖地区其他农宅的比较

地区	热中性温度/ ℃	80%可接受温度范围/ ℃	室内操作温度 平均值/℃	室外温度 平均值/℃	平均服装 热阻/clo	新陈代谢率/ met
夏热冬冷						
台江	14.3	6.5~21.2	10.69	3.47	1.58	1.2
南阳 ^[1]	9.8	下限 6.6	6	3.2	1.80	1.2
上海 ^[13]	12.5	9.85~15.5	5.7	-0.4	1.87	1.2
岳阳 ^[14]	15.7	8.4~15.6	8.7	5.3	2.10	1.5
夏热冬暖						
粤东 ^[15]	19.1	下限 12.0	15.5	13.2	1.30	1.3

由表 3 可以看出,贵州台江居民拥有 80% 可接受下限温度的最低值,相较于其他地区,该温度与热中性温度差值最大。与此同时,台江居民 80% 可接受温度范围跨度最大,上下限温度差值达到 14.7℃ ,分别是上海和岳阳的 2.6 倍和 2.04 倍。

综上,无论是较低的热中性温度,还是较宽的可接受温度范围,都反映出贵州台江农村居民较强的环境适应能力。其原因有如下几点。

1) 台江苗族居民久居深山,其经济发展水平长期落后于城市和同纬度的汉族农村,这迫使其居民更多依靠调节自身行为来主动接纳环境。长此

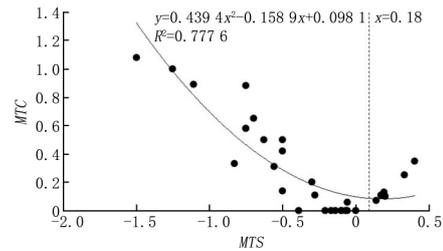


图 13 平均热感觉与平均热舒适的回归曲线

4 讨论

4.1 吊脚楼民居与夏热冬冷、夏热冬暖地区其他农宅的比较

在夏热冬冷和夏热冬暖农村地区,随着纬度的降低,居民热中性温度呈现升高趋势^[1]。南阳居民热中性温度为 9.8℃ ,上海为 12.5℃ ^[13],纬度更低的岳阳^[14]和粤东^[15]则分别为 $15.7, 19.1\text{℃}$ 。贵州台江地区纬度介于岳阳与粤东之间,测试期间室内平均操作温度(10.7℃)也介于岳阳的 8.7℃ 及粤东的 15.5℃ 之间,其居民热中性温度理论上也应介于 $15.7\sim 19.1\text{℃}$ 之间。但计算结果表明,贵州台江农村地区居民热中性温度仅为 14.3℃ ,甚至比更高纬度的岳阳还低 1.4℃ 。可以看出,相较于国内夏热冬冷地区相似纬度的汉族农村,台江苗族居民具有更低的热中性温度。表 3 给出了本文研究成果与夏热冬冷、夏热冬暖地区其他农宅的比较。

以往,苗族居民逐渐适应了气候,并表现出对周围环境较低的心理预期,相较于同纬度汉族农村居民其热舒适感更易得到满足。具体表现为其居民较高的热环境可接受率(89.31%)及热舒适度(95.49%)。

2) 以轻质木板壁拼接墙面、冷摊瓦屋面为主要特征的苗居吊脚楼有良好的通风条件,较好应对了夏季湿热多雨的气候特征,但也导致其冬季室内环境较为阴冷。不同于北方以冬季防寒保暖为目的而营造出的厚重围护结构体系,吊脚楼民居围护结构保温及蓄热性能差、气密性差,对环境相对开放,致使其在无供暖措施情况下,室内外空气温度

接近。久居此地的苗族居民通过生理、心理及行为方式上的调节,逐渐适应了这种热环境状况,体现出对寒冷气温的较高忍耐力。具体表现为较低的80%可接受温度下限(6.5℃)和热中性温度(14.3℃)。

3) 以局部间歇式火源供暖为主的冬季取暖方式,一定程度上提升了居民的热舒适感。其主要依靠增加迎火面平均辐射温度获得可接受的实感温度体验。相较于北方集中供暖或以火炕、火墙为主的供暖方式,贵州台江地区间歇式火源供暖方式具有更高的灵活性和不稳定性。居民可根据需要灵活增减燃料,并以较少的能源消耗在局部获得较高的室内操作温度。因此在生火供暖与无供暖2种工况下,供暖区域内与供暖区域外,其室内操作温度相差较大。苗族居民长期生活在这种不稳定且温度浮动较大的室内环境中,其热包容力较强。具体表现为其较宽的80%可接受温度范围(6.5~21.2℃)。

4.2 吊脚楼民居与普通砖混农宅比较

4.2.1 优势

1) 吊脚楼民居的居住层空间由轻质木板壁结构围合而成,其材料蓄热性能及围护结构整体热稳定性均低于砖混农宅的封闭重质围护结构。在局部间歇式火源供暖工况下,吊脚楼民居室内壁面温度上升速率及稳定后的平均温度均高于砖混农宅,而较高的壁面温度会减小壁面对人体表面的冷辐射作用,使供暖效果更加显著。综上,吊脚楼民居更适合苗族居民以局部间歇式火源供暖为主的冬季供暖模式,其室内体感温度及热辐射均匀性均优于砖混农宅。相比之下,对流传热增加室内空气温度的供暖方式更适合保温、蓄热性能较好的砖混农宅。

2) 吊脚楼民居外围护结构相对开放,其整体气密性较差,无形中增加了房间单位时间内的被动换气次数,有利于室内沉积湿气和污染物及时排出,并使室内相对湿度接近于人体热舒适范围,更适应于冬季湿冷的西南山地。在寒冷冬季,大部分居民不愿意主动开窗换气,气密性更好的砖混农宅缺乏其他换气渠道,其室内相对湿度及污染物浓度都高于吊脚楼民居。

4.2.2 劣势

相较于保温、蓄热及气密性较好的砖混农宅,

吊脚楼民居冬季室内平均空气温度较低且浮动较大。在无供暖工况下,其室内空气温度受室外温度的影响程度较砖混农宅更剧烈。在局部间歇式火源供暖工况下,吊脚楼住户在供暖时段内虽可获得更高体感温度,但熄火后室温下降迅速,相比之下,砖混农宅在熄火后维持较高室温的时间更长。

5 结论

1) 调查期间,贵州台江苗族吊脚楼民居室内平均操作温度为10.69℃。居民服装热阻平均值为1.58 clo,随着室内操作温度和平均热感觉投票值的升高,受试者服装热阻呈微弱下降趋势,但其线性关系并不明显。

2) 居民实测热中性温度为14.3℃,预测热中性温度为18.5℃,两者相差4.2℃。

3) 居民期望温度为16.5℃,较实测热中性温度高2.2℃。90%可接受温度范围为8.9~18.8℃,80%可接受温度范围为6.5~21.2℃。预测不满意百分比最小值为4.87%,实测不满意百分比最小值为1.67%,且实测不满意百分比最小值出现在热感觉偏暖一侧。

4) 相较于夏热冬冷地区相似纬度的汉族农宅,贵州台江苗族吊脚楼居民拥有较低的热中性温度及80%可接受温度下限,这与其室内热环境特点及生活方式有关。

参考文献:

- [1] 闫海燕,李道一,李洪瑞,等. 南阳农村居住建筑冬季室内人体热舒适现场研究[J]. 暖通空调,2018,48(3):91-95
- [2] 王昭俊,绳晓会,任静,等. 哈尔滨地区冬季农宅热舒适现场调查[J]. 暖通空调,2014,44(12):71-75
- [3] 任艺梅,杨柳,郑武幸. 吐鲁番地区民居人体适应性热舒适评价研究[J]. 暖通空调,2017,47(8):109-115
- [4] YAO R M, LI B Z, LIU J. A theoretical adaptive model of thermal comfort—adaptive predicted mean vote(aPMV)[J]. Building and Environment,2009,44(10):2089-2096
- [5] 李百战,景胜蓝,王清勤,等. 国家标准《民用建筑室内热湿环境评价标准》介绍[J]. 暖通空调,2013,43(3):1-6
- [6] BRAGER G, DE DEAR R. Thermal adaptation in the built environment: a literature review[J]. Energy and Buildings,1998,27(1):83-96

(下转第117页)

3) 分流匝道对主隧道污染物浓度减小作用凸显。支隧道夹角越大,污染物浓度比也越大,说明支隧道局部阻力增大对降低隧道污染物浓度水平不利。

4) 分流匝道对减小下游主隧道污染物浓度水平同样起到了积极作用。当风速增大为 2.6 m/s (30 Hz)时,支隧道分流作用使得污染物浓度与直隧道相比平均降低了 29.9%。主隧道交通风速越大,支隧道分流作用越显著。

参考文献:

- [1] LI Q, CHEN C, DENG Y, et al. Influence of traffic force on pollutant dispersion of CO, NO and particle matter (PM 2.5) measured in an urban tunnel in Changsha, China[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2015, 49(6):400-407
- [2] DENG Y, CHEN C, LI Q, et al. Measurements of real-world vehicle CO and NO_x fleet average emissions in urban tunnels of two cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2015, 122(12):417-426
- [3] 李琼,陈超,袁浩庭,等. 多点进出城市地下道路 CO 排放特性实测研究[J]. 华北科技学院学报, 2017, 14(2):66-71
- [4] 李永林. 降低二郎山隧道运营通风费用的设计方案[J]. 世界隧道, 1999, 10(5):28-32
- [5] 孟伟. 雪峰山隧道通风系统模型实验[D]. 武汉:华中科技大学, 2004:44-56
- [6] STAEBLIN J, SCHLAPFER K. Emission factors from road traffic from a tunnel study—part 1 concept and first result [J]. Science of the Total Environment, 1991, 69(1):141-147
- *****
- (上接第 141 页)
- [7] 纪文杰,罗茂辉,曹彬,等. 长期热经历对热舒适评价的影响研究及热适应性探讨[J]. 暖通空调, 2018, 48(1):78-82
- [8] 曹彬,朱颖心,欧阳沁,等. 不同气候区住宅建筑冬季室内热环境及人体热适应性对比[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4):499-503
- [9] ASHRAE. Thermal environment conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 [S]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2010:5
- [10] 王昭俊. 现场研究中热舒适指标的选取问题[J]. 暖通空调, 2004, 34(12):39-42
- [7] CUI S, COHEN M, STABAT P, et al. CO₂, tracer gas concentration decay method for measuring air change rate [J]. Building and Environment, 2015, 84:162-169
- [8] 于燕玲. 污水隧道纵向通风 CFD 仿真模拟与试验研究[D]. 天津:天津大学, 2006:62-94
- [9] 王同宾. 倾斜式微压计示值误差测量结果不确定度评定[J]. 品牌与标准化, 2016(8):89-91
- [10] CHAO C Y, WAN M P, LAW A K. Ventilation performance measurement using constant concentration dosing strategy [J]. Building and Environment, 2004, 39(11):1277-1288
- [11] NIKOLOPOULOS N, NIKOLOPOULOS A, LARSEN T S, et al. Experimental and numerical investigation of the tracer gas methodology in the case of a naturally cross-ventilated building [J]. Building and Environment, 2012, 56:379-388
- [12] ŠTÁVOVÁ P. Experimental evaluation of ventilation in dwellings by tracer gas CO₂ [J]. End of Life Journal, 2012, 16(3):225-230
- [13] 齐美薇,李晓锋,黄河. 示踪气体法利用人体作为 CO₂ 释放源测量宿舍换气次数的方法探究[J]. 建筑科学, 2013, 29(6):52-57
- [14] REID R C, PRAUSNITZ J M. The properties of gases and liquids [M]. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 1977:628-632
- [15] 袁浩庭,陈超,李琼,等. 城市地下道路分(合)流匝道通风阻力特性[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(11):1409-1416
- [16] 李琼. 多点进出城市地下道路污染物扩散机理及浓度预测研究[D]. 北京:北京工业大学, 2017:75-83
- *****
- [11] 朱颖心,张寅平,李先庭,等. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010:90
- [12] 闫海燕,杨柳,周书兵,等. 焦作市冬季居住建筑室内人体热舒适现场研究[J]. 暖通空调, 2011, 41(11):119-125
- [13] 张齐,张其林. 上海地区村镇住宅热环境与热舒适度研究[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(5):297-301
- [14] 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(自然科学版), 2009, 36(6):13-17
- [15] 金玲. 潮汕地区农村住宅气候适应性研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014:78