

Journal of HV&AC

ISSN 1002-8501

CN 11-2832/TU

CODEN NUKOE7



暖通空调

12
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

GREE 格力
[格力中央空调]

格力冷水机组 全面实现永磁同步变频化

格力中央空调始终坚持节能创新，不断实现技术突破，将大功率永磁同步变频技术应用于离心式冷水机组，攻破技术壁垒，实现磁悬浮变频技术国产化，全面实现从多联式风冷冷（热）水机组、模块式风冷冷（热）水机组到风冷螺杆机组、水冷螺杆机组、离心式冷水机组的永磁同步变频化。

全系列搭载永磁同步电机



高效
行业原创大功率高速永磁同步电机，最高效率达97.5%



低损
永磁体转子，无励磁系统损失，发热量小，电机损耗小



可靠
H级电机，绝缘等级高，可靠性强

全直流变频户式风冷冷（热）水机组（分体式）

永磁同步变频风冷螺杆机组

永磁同步变频离心机

永磁同步变频水冷螺杆机组

全直流变频模块式风冷冷（热）水机组

服务热线 4008-365-315

格力中央空调

搜索

让世界爱上中国造
www.gree.com

中国出版政府奖获奖期刊
国家期刊奖获奖期刊
百强报刊
中国期刊方阵期刊
建设部优秀期刊
中国建筑科学类核心期刊
中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)
中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊
中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊
中国期刊全文数据库收录期刊
国际建筑文献数据库 ICONDA 收录期刊
国际制冷学会 Fricoc 数据库收录期刊
RCCSE 中国核心学术期刊

暖通空调

(月刊)
NUANTONG KONGTIAO

第 49 卷第 12 期
(总第 366 期)
2019 年 12 月 15 日出版
(卷终)

创刊年份:1971 年
主管单位:住房和城乡建设部
主办单位: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
协办单位:中国勘察设计协会建筑环境与能源应用分会
主 编:刘承军
编辑出版:《暖通空调》杂志社
100120 北京市西城区德胜门外大街 36 号
凯旋大厦 A 座 4 层
电话:(010)88361727(社长/主编)
68316357(编辑)
88362746(查询)
68363186(广告)
68362755(邮购)
传真:(010)88373572
投稿网址: <http://www.hvacjournal.cn>
电子信箱:hvac@cadg.cn(编辑部)
ntkt@cadg.cn(经营部)

印 刷:北京墨阁印刷有限公司
国内总发行:北京报刊发行局
订阅处:全国各邮电局
邮发代号:2-758
定 价:20.00 元
国外总发行:中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱)
国外发行代号:4708M
中国标准连续出版物号:ISSN 1002-8501
CN 11-2832/TU
广告经营许可证号:京西工商广字 0423 号
中国科学技术期刊编辑学会会员编号:113bj013500
如发现本刊印刷装订质量问题,请与本刊联系调换。



杂志微信公众号



杂志订阅

目 次

学 术 探 讨

全国 9 座城市住宅主观睡眠热舒适及人员适应性行为
长期监测研究

洪伟萍 刘俊杰 赖达祯 (1)

直接与露点间接蒸发冷却空调技术在我国各地区适用性
研究

刘艳峰 李 娟 王莹莹 周 勇 (8)

黔东南地区典型乡村与城镇住宅冬季适应性热舒适比较

吴崇山 单 军 孔德荣 (15)

再议德国手术室感染控制措施的讨论——关于层流
手术室感染率的问题

于奎华 (24)

大庆地区地埋管地源热泵对土壤温度场的累年影响

宫克勤 张 楠 杨子昱 (29)

组合式空调机组噪声限值 and 漏风率的应用与探讨

石宇立 张天坤 王慧中

张 芳 吴 佳 楼 锋 (34)

济宁市医疗机构洁净工程运维管理与相关感染情况分析

郝学安 郑文柱 张书岭

宋克玉 李玉森 冯 燕 郑艳华 (39)

工 程 设 计

数据中心冷却系统降噪工程案例

韩武松 汤 娅 (43)

北京大兴国际机场制冷站系统设计

徐 伟 (49)

东方医院洁净手术部净化空调设计关键问题分析

刘慧敏 刘小健 张艳新 (54)

调 适 运 维

我国北方地区中小学校热泵供暖系统典型问题分析

何 适 魏庆尧 邓杰文 张 辉 (61)

A Chinese Core Journal in
Building Technology Field
published monthly

HV & AC

Heating, Ventilating & Air Conditioning
December 2019, Vol. 49, No. 366



Address:

HV & AC Editorial Department
Floor 4, Building A, 36 Dewai St.
Beijing, 100120
China

Tel: 8610-88361727

Fax: 8610-88373572

E-mail: hvac@cadg.cn

<http://www.hvacjournal.cn>

CONTENTS

ACADEMIC FORUM

- Long-term monitoring of subjective sleep thermal comfort
and adaptive behavior in nine cities of China
..... *Hong Weiping, Liu Junjie and Lai Dayi* (1)
- Regional applicability of direct and dew-point indirect
evaporative cooling air conditioning technologies in
China *Liu Yanfeng, Li Juan,*
Wang Yingying and Zhou Yong (8)
- Comparison of adaptive thermal comfort between typical
rural and town residential houses in southeast Guizhou
in winter
..... *Wu Chongshan, Shan Jun and Kong Derong* (15)
- Further discussion on measures of infection control in
operating room in Germany: Questions about infection
rate of laminar flow operating rooms
..... *Yu Xihua* (24)
- Influence of ground-source heat pumps on soil temperature
field in Daqing
..... *Gong Kegin, Zhang Nan and Yang Ziyu* (29)
- Application and discussion of noise limit and air leakage
rate of modular air handling units
..... *Shi Yuli, Zhang Tiankun, Wang Huizhong,*
Zhang Fang, Wu Jia and Lou Feng (34)
- Analysis on maintenance, management and related
infections of clean project in hospitals of Jining city
..... *Hao Xuean, Zheng Wenzhu, Zhang Shuling,*
Song Keyu, Li Yusen, Feng Yan and Zheng Yanhua (39)

ENGINEERING DESIGN

- Case study on noise reduction of cooling system in data
centers
..... *Han Wusong and Tang Ya* (43)
- Refrigeration station system design for Beijing Daxing
International Airport
..... *Xu Wei* (49)
- Air conditioning design for clean operating department
of Dongfang Hospital
..... *Liu Huimin, Liu Xiaojian and Zhang Yanxin* (54)

黔东南地区典型乡村与城镇住宅 冬季适应性热舒适比较^{*}

清华大学 吴崇山[☆] 单 军[△] 孔德荣

摘要 为揭示我国乡村与城镇住宅冬季室内热舒适特征的差异,采取现场调研的方法,对黔东南地区 83 户 178 名城镇居民及 75 户 145 名乡村居民开展了热舒适问卷调查,并利用适应性 PMV 模型(aPMV 模型)中提出的自适应系数 λ 来量化计算人体自适应水平。结果表明:城镇居民冬季实测热中性温度及 80% 可接受温度下限均高于乡村居民;城镇及乡村居民人体自适应系数($PMV < 0$)分别为 -0.39 及 -0.46 ,乡村居民人体自适应水平高于城镇居民。研究认为,服装热阻差异是造成城镇及乡村居民热中性温度差异的重要原因,同时行为调节、心理适应等也对热舒适产生影响。

关键词 夏热冬冷地区 乡村住宅 城镇住宅 热舒适 热中性温度 自适应水平 自适应系数

Comparison of adaptive thermal comfort between typical rural and town residential houses in southeast Guizhou in winter

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

Abstract In order to reveal the discrepancy of indoor thermal comfort between rural and town residential houses in winter, conducts a questionnaire survey among 178 town residents of 83 families and 145 rural residents of 75 families in southeastern area of Guizhou. At the same time, uses the adaptive coefficient λ proposed in the adaptive PMV model (aPMV model) to quantitatively calculate the adaptive levels of human body. The result shows that the measured thermal neutral temperature and 80% acceptable temperature limit of town residents in winter are higher than those of rural residents. The adaptive coefficient λ value of town and rural residents is -0.39 and -0.46 , respectively. The adaptive level of rural residents is higher than that of town residents. The research suggests that the difference in thermal resistance of clothing is an important reason for the difference of thermal neutral temperature between town and rural residents. At the same time, behavioral adjustment and psychological adaption also have an impact on their thermal comfort.

Keywords hot summer and cold winter zone, rural residential house, town residential house, thermal comfort, thermal neutral temperature, adaptive level, adaptive coefficient

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

乡村与城镇(介于城市与乡村之间的聚落形式,以县、镇为代表。常住人口以非农业人员为主,但其用地规模、人口数量及经济水平均低于城市)是我国高速城镇化进程中的 2 个重要节点。对于乡村与城镇住宅,如何使其高品质、低能耗地服务于居住者日常生活,是城镇化与新农村建设过程中

的核心问题,其关键在于建筑与人及周边环境的相互适应关系,其重要评价标准则是居民的舒适性问题。乡村与城镇地区有着不同的建筑类型、文化背

[☆] 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

E-mail: shan jun@mail. tsinghua. edu. cn

收稿日期:2018-11-21

一次修回:2019-03-25

二次修回:2019-10-28

* “十三五”国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0702401)

景、经济水平及居民生活方式,乡村与城镇居民所经历的长期热环境特点及自身气候、环境应对策略必然不同,其自身行为调节、生理习服及心理适应(Brager 等人^[1]、Humphreys 等人^[2-3]、Fanger 等人^[4]的研究都印证了如下观点:人们通过行为调节、生理习服和心理适应 3 种方式主动适应周围环境,这使得其可接受热环境范围较理论值更宽泛)在环境适应过程中所起的作用及产生的效果也必然有所差异,因此即使同一地区的城镇与乡村居民也存在着不同的室内热舒适预期及热环境要求。本研究旨在揭示乡村与城镇居民各自热适应特征及其适应水平的差异,显然热舒适模型的选择与合理利用成为研究的关键。

研究表明,基于人工气候室及稳态热平衡理论建立的 PMV 模型^[5-6]更适用于空调建筑室内热舒适的研究,应用于自然通风建筑则结果往往有较大偏差^[7-9],其原因正是忽略了受试者的主观适应性。而依靠热舒适现场调研所得到的适应性热舒适模型虽然反映了人体自身适应性调节参与下的实际热舒适状态,但其计算过程未考虑新陈代谢率、服装热阻等客观人体参数^[8]。同时,在缺乏参照样本的情况下,很难从适应性模型中直观看出受试者的自适应水平,因此其并不适宜单独应用于不同热舒适样本的对比研究中。

鉴于以上原因,Brager 等人认为,2 种模型虽本质不同,但并不应互相排斥^[1],二者的有效结合能帮助研究者找到热适应的内在因果机制^[10-11]。Fanger 等人提出的带有期望因子 e 的 PMV 模型^[4],正是上述思想启发下的有益尝试。 $PMVe$ 模型对原有 PMV 模型进行了改进,承认在非热中性环境中受试者的主观热反应会有差别,由此形成不同的热可接受或可耐受范围,在此条件下可通过期望因子 e 与 PMV 相乘得到修正后的 $PMVe$ 值。但该理论坚持在所有条件下 PMV 为 0 的环境中热感觉都是热中性的,亦即并不完全否定 PMV 模型的普适性价值,因此 $PMVe$ 模型无法完全解释所有热舒适现场研究中 PMV 与 AMV (实际平均热感觉投票)之间的差异。

Yao 等人提出的 $aPMV$ 模型^[12]则是对 $PMVe$ 模型的继承与发展。Yao 等人将诸如文化、气候、社会、心理等影响人体热舒适的因素考虑在内,基于“黑箱”原理及工程控制理论的部分观点,运用最

小二乘的数学方法,以自适应系数 λ 揭示 PMV 与 AMV 二者之间的深层量化关系,并在此基础上建立了适应性 PMV 模型($aPMV$ 模型)。其核心参数自适应系数 λ 直观反映出人体对周边热环境的适应性水平,这使得 $aPMV$ 模型在热舒适现场研究中得到广泛运用。郑武幸等人根据热舒适现场调研所得数据,依据 $aPMV$ 模型的相关原理及算法,量化计算出寒冷气候区典型城市西安一年四季的人体自适应水平^[13];任艺梅等人则利用同样方法,揭示了干热干冷气候区典型代表城市吐鲁番冬、夏两季的人体自适应情况^[14];王晗旭^[15]和 Wang 等人^[16]以陕西、甘肃、青海等西北地区乡域中小学教室及学生为研究对象,分别针对其冬季室内热环境及人体热适应特点开展调研,建立了三地中小冬季人体 $aPMV$ 模型,并以自适应系数 λ 为标尺衡量其冬季对冷、热环境的不同适应性水平及差异。综上所述,适应性 PMV 模型($aPMV$ 模型)适用于同一样本不同季节的自适应水平动态分析,也同样适用于不同地域相同时间段、同类样本自适应水平的静态对比。也正因如此, $aPMV$ 模型被作为非人工冷热源建筑室内热舒适评价依据写入 GB/T 50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》^[17]。 $aPMV$ 模型对基于现场调研的热舒适研究及人体适应性水平对比研究都有启发意义。

我国在居住建筑室内热舒适研究领域已积累较多成果,研究范围基本涵盖各个气候区,尤以城市住宅居多^[18-21]。而相较于起步较早的城市住宅热舒适研究,我国学者对农村住宅的关注则相对滞后,并紧随地域主义研究及新农村建设的浪潮,至今已渐成规模^[22-26]。在国内众多居住建筑人体热舒适研究案例中,以县城为代表的小城镇人体热舒适样本相对稀缺,并常常被研究者列入农村序列而未引起单独重视。以县城为代表的小城镇地区不同于城市,其经济发展水平相对滞后,服务于农民及农业生产的职责更重,其人口组成、产业结构、消费水平、能源利用方式都有别于城市,是农村与城市间的中间形态,在城镇化进程中占有举足轻重的地位。了解其居民热舒适特点能够帮助设计人员有的放矢地制定其室内热环境标准,避免因不合理参数预设而造成的能源浪费、环境污染或人体不适。

本文选取黔东南典型城镇与乡村住宅为研究样本,不同于以往以城市或乡村为单一目标的热舒

适研究,本文侧重于乡村与小城镇居民人体热舒适的比较分析。将长期被学界归入乡村序列的小城镇单独提出,指出其与城市间的差异,并视其为独立人体热舒适样本与乡村样本展开适应性热舒适比较,在人体热舒适研究领域具有创新性。同时,通过不同热舒适模型的综合运用揭示同一地区小城镇与乡村居民自适应水平的差异及其深层原因,对今后人体热舒适的比较研究有一定参考价值。针对小城镇地区典型代表——县城的研究对于丰富热舒适样本库具有积极意义。

1 调研方法及结果统计

研究地点选择为贵州省黔东南苗族侗族自治州台江县城及其下辖登鲁村,二者中心距离为 10 km。县域内 97% 的人口为苗族,是典型的少数民族聚居区。台江县属亚热带季风湿润气候及建筑热工设计分区Ⅲ区——夏热冬冷地区,年平均气温 18.5℃,最冷月平均气温 2.6~5.2℃,年日照百分率较低。

台江县城以 6~12 层单元式砖混及混凝土板式住宅楼为主要居住形式,而登鲁村 95% 以上的农宅为独栋式木板壁吊脚楼(其主要居住层多为 1 层)。选取县城中心区某单位家属院 7 栋砖混式住宅楼及登鲁村全部木结构吊脚楼分别作为调研对象开展比较研究。在外围护结构方面:县城样本中除建于 2012 年的 2 栋 7 层砖混住宅带有外保温层外,其余 5 栋 20 世纪 90 年代的 6 层砖混楼均未做任何保温处理;乡村样本中吊脚楼农宅以 15~40 mm 杉木企口板嵌套于木柱间拼缝围合成其外立面,屋顶为双坡落水的冷摊瓦屋面。相较于县城砖混住宅,吊脚楼农宅缝隙较多、气密性较低,属开放性围护体系。二者典型外观如图 1 所示。

笔者所在课题组于 2018 年 1 月 24—30 日、2 月 2—7 日对台江县城及登鲁村展开调研,访问了



a 城镇建筑

b 乡村建筑

图 1 城镇与乡村建筑样本典型外观

县城 83 户 178 位居民(男性 83 人、女性 95 人)及登鲁村 75 户 145 位居民(男性 68 人、女性 77 人),分别获得有效问卷 409 份(县城)及 421 份(登鲁村)。调研于每天 08:00—21:00 进行,除问卷调查外,室内外环境参数测试工作也同时开展,调研地点多集中在餐客厅、主卧(县城)及堂屋、火塘间(登鲁村),且保证每户至少连续测试 2 d。

主观问卷内容包括:受试者基本情况(年龄、身高、体质量、本地居住时间、衣着状况等)、人体热感觉及热舒适度、受试者改善室内热环境的措施(如添减衣物、开关门窗等)及对室内热环境的满意度。其结果统计如表 1 所示。

表 1 受试者基本资料比较

	台江县城	登鲁村
年龄/岁	37.00	40.88
身高/cm	160.85	161.44
体质量/kg	61.7	63.4
本地居住时间/a	23.15	34.06
新陈代谢率/met	1.2	1.2
服装热阻/clo	1.35	1.58

注:现场调研要求每位受试者在填写问卷前静坐 20 min,其新陈代谢率取坐姿、轻微活动(书写)时的人体新陈代谢水平 1.2 met。

现场测试所用仪器、采集环境参数类型、热感觉投票标度选择及回归分析方法详见文献[27]。

调研期间室内外环境参数如表 2 所示。

表 2 室内外环境参数

参数	台江县城			登鲁村		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
室内	空气温度/℃	5.40	20.50	12.74	3.20	18.50
	相对湿度/%	40.7	97.2	55.8	37.4	82.5
	风速/(m/s)	0	0.30	0.03	0.01	1.00
	操作温度/℃	5.25	19.90	12.73	3.10	18.40
室外	空气温度/℃	-1.90	7.30	0.50	-0.50	9.80
	相对湿度/%	43.2	90.9	73.4	32.5	91.9

研究采用显著性检验的方法来判定某两组投票数据间是否存在差异,以及该种差异的显著程

度,进而判定两组投票的趋势是否一致。

鉴于调查对象选择的随机性,统计数据分布

形态未知,因而选择 t 检验进行显著性分析,以 P 值(即样本间的差异由抽样误差所致的概率)描述两组数据间显著性差异水平。在统计学中: $P < 0.05$ 表示差异显著,当 $P < 0.01$ 时为差异非常显著; $P > 0.05$ 表示差异不显著。

2 数据分析及结果

2.1 服装热阻

县城及登鲁村受试者服装热阻与室内操作温度、平均热感觉的回归关系如图 2,3 所示。可以看出:随着室内操作温度和平均热感觉投票值的逐渐

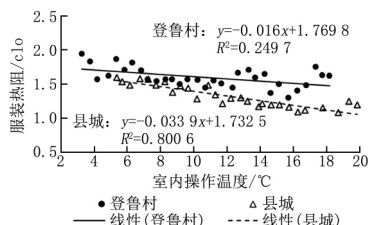


图2 县城及登鲁村受试者服装热阻与室内操作温度的回归关系

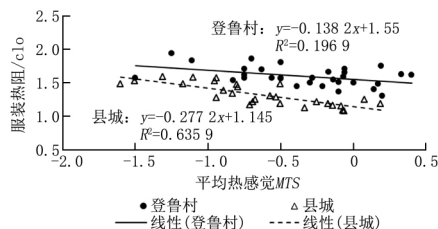


图3 县城及登鲁村受试者服装热阻与平均热感觉的回归关系

升高,县城及乡村居民服装热阻均呈下降趋势;相较于乡村居民,县城居民服装热阻的下降速率更快(斜率绝对值更大)。登鲁村受试者拟合曲线的确定系数(R^2)远小于县城受试者拟合曲线,说明登鲁村居民服装热阻水平与室内操作温度及平均热感觉的相互关系较弱,亦即室内操作温度、热感觉的升高或降低对居民服装选择的影响程度较低。进一步分析可以发现,当室内操作温度或平均热感觉投票值相同时,乡村居民的服装热阻总大于县城居民。经统计计算,登鲁村受试者服装热阻平均值为 1.58 clo,县城受试者为 1.35 clo,两者相差 0.23 clo。上述现象可解释为:乡村居民频繁出入于室内外,其背景温度变化较剧烈且转换频率高,因此并不习惯于经常换衣,其冬季室内外衣着差异不大;而县城居民待在室内的时间较长,其背景温度相对稳定且明显有别于室外,有利于其通过有规律增减衣物适应室内环境周期性变化,同时其室内外衣着差异相对明显。

2.2 热感觉与热中性温度

县城及登鲁村受试者热感觉投票分布频率如图 4 所示。经 t 检验,县城及登鲁村受试者投票数

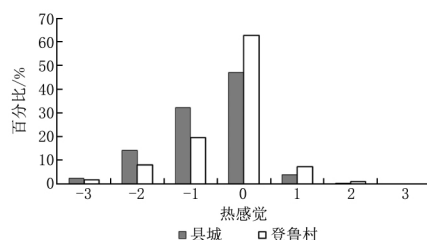


图4 县城及登鲁村受试者热感觉分布频率

据间 $P < 0.01$,两组数据间差异非常显著。由图 4 并结合表 2 可以看出,在县城测试样本室内操作温度 t_{op} 最小值、平均值、最大值分别比登鲁村样本高 2.15、2.04、1.50 $^{\circ}\text{C}$ 的情况下,县城受试者热感觉偏冷(-3,-2,-1)百分比比较登鲁村高,而热感觉适中(0)及偏热(1,2)百分比比较登鲁村低。经统计,县城及登鲁村热感觉投票为 -1,0,1 的样本占比分别为 32.27%、46.94%、3.91%(合计 83.12%)及 19.48%、62.70%、7.13%(合计 89.31%),即县城及登鲁村受试者热接受率分别为 83.12% 及 89.31%,登鲁村样本高出 6.19%。综上,可以得出结论:在环境温度相对较低的情况下,登鲁村受试者热接受率仍然高于县城受试者;县城受试者更倾向于较暖的环境温度。

采用温度频率法,回归分析得到县城及登鲁村受试者实测、预测平均热感觉投票值(MTS, PMV)随室内操作温度 t_{op} 变化的关系,如图 5 所示。令 $MTS=0$, $PMV=0$,可分别求得:县城受试

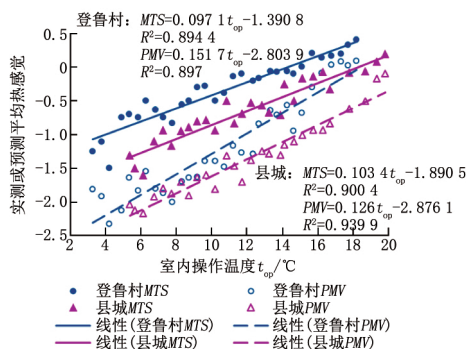


图5 室内操作温度与平均热感觉的回归曲线

者实测及理论热中性温度为 18.3 $^{\circ}\text{C}$ 及 22.8 $^{\circ}\text{C}$,登鲁村受试者实测及理论热中性温度为 14.3 $^{\circ}\text{C}$ 及 18.5 $^{\circ}\text{C}$ 。二者实测热中性温度分别比理论热中性

温度低 4.5°C 及 4.2°C , 说明县城及登鲁村居民对于寒冷天气都有一定适应能力。县城居民实测热中性温度比登鲁村居民高 4.0°C , 同时, 县城居民实测平均热感觉随室内操作温度的变化曲线的斜率比登鲁村稍高, 说明县城居民对温度变化更敏感且更喜欢稍暖的环境。

2.3 期望温度

统计调研问卷中期望环境温度比当时状态“暖一些”和“凉一些”的人数百分比, 并按温度区间取其平均值与区间平均操作温度进行线性回归, 结果如图 6 所示, 图中上升曲线与下降曲线

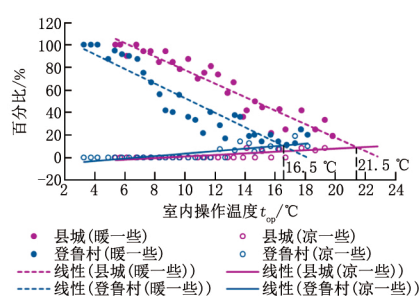


图 6 县城及登鲁村期望温度

的交点所对应横坐标值即为期望温度值。可以看出, 县城及登鲁村受试者期望温度分别为 21.5°C 及 16.5°C , 分别比各自的实测热中性温度高 3.2°C 及 2.2°C 。同时, 在相同操作温度下, 县城受试者期望环境温度“暖一些”的人数百分比明显高于登鲁村受试者, 并伴随温度升高趋势更加明显。说明当环境温度较高, 甚至趋向或接近热中性温度时, 县城居民较登鲁村居民更加期待较温暖的室内环境, 从侧面反映出冬季县城居民对热环境的预期比乡村居民高。

图 7 为县城及登鲁村受试者不同热感觉区间内的热期望投票分布频率图, 其不同数据组间 t 检验结果如表 3 所示。

由图 7 可以看出: 当热感觉投票值为 $-2, -1, 0, 1$ 时, 县城受试者中期望当前温度“暖一些”的人数百分比均高于登鲁村受试者; 而当热感觉投票值为 $-2, -1, 0, 1, 2$ 时, 县城受试者中期望温度保持“不变”的人数百分比均低于登鲁村受试者。以上现象说明: 县城居民对环境温度的期望水平高于登鲁村居民。

2.4 热不满意率、可接受温度范围

以各温度区间内投票值为 $-3, -2, 2, 3$ 的问

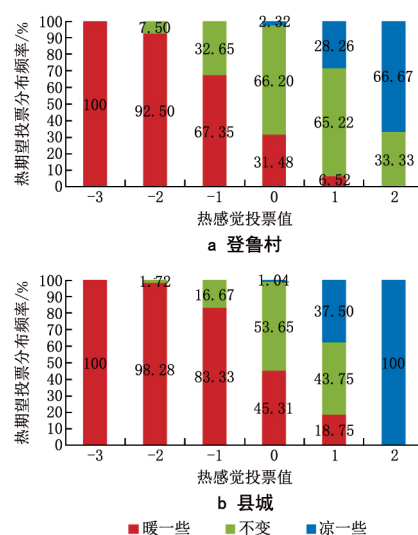


图 7 县城及登鲁村受试者不同热感觉区间热期望投票分布频率图

表 3 县城及登鲁村受试者不同热感觉区间热期望投票数据间的差异显著性分析

	TSV=-3	TSV=-2	TSV=-1	TSV=0	TSV=1	TSV=2
P 值	>0.05	<0.01	<0.01	>0.05	>0.05	>0.05
显著性	不显著	非常显著	非常显著	不显著	不显著	不显著

卷数量占该区间问卷总数的百分比作为实测热不满意率, 并将其作为因变量, 将各区间中心温度作为自变量进行回归分析, 结果如图 8 所示。令拟合

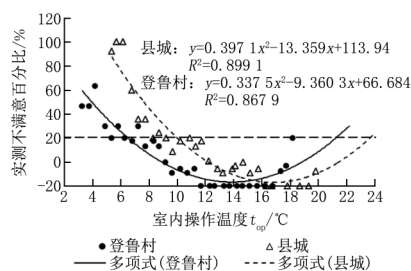


图 8 县城及登鲁村受试者可接受温度范围

所得一元二次方程中 $y=20$, 可分别求得县城及登鲁村居民 80% 可接受温度范围为 $10.0 \sim 23.6^{\circ}\text{C}$ 及 $6.5 \sim 21.2^{\circ}\text{C}$, 其区间跨度分别为 13.6°C 及 14.7°C 。相较于登鲁村居民, 县城居民可接受温度区间较窄。

2.5 热舒适

热舒适调查采用 5 级分度指标, 即 0 舒适、1 稍不舒适、2 不舒适、3 很不舒适、4 极不舒适。同样利用温度频率法, 将各温度区间平均热感觉投票值作为自变量, 各区间平均热舒适投票值作为因变量进行回归分析, 结果如图 9 所示。可以看出, 当热感觉投票值相同时, 县城居民热舒适投票值总高

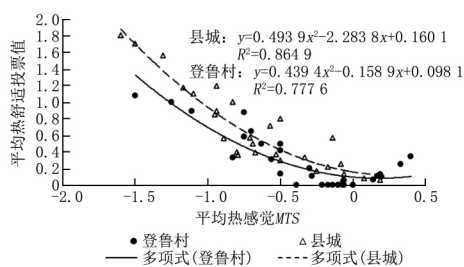


图9 县城及登鲁村受试者平均热感觉与平均热舒适的回归曲线

于登鲁村居民,即舒适程度更低,并随着热感觉投票向负值(冷感)方向移动,二者差值增大。这说明偏冷的室内环境对县城居民热舒适感的影响大于登鲁村居民,且随着人体冷感觉的加强,其差异愈发明显。计算可知拟合所得一元二次方程顶点坐标分别为:县城(0.29,0.12);登鲁村(0.18,0.08)。可以看出,县城居民最舒适热感觉较登鲁村居民偏暖。

图10为县城及登鲁村受试者不同热感觉区间内热舒适投票的分布频率图,其不同数据组间 t 检验结果如表4所示。

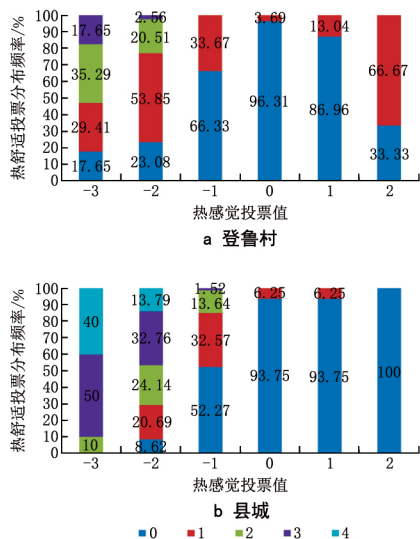


图10 县城及登鲁村受试者不同热感觉区间热舒适投票分布频率图

表4 县城及登鲁村受试者不同热感觉区间热舒适投票数据间的差异显著性分析

	TSV=-3	TSV=-2	TSV=-1	TSV=0	TSV=1	TSV=2
P值	<0.01	<0.01	<0.01	>0.05	>0.05	<0.05
显著性	非常显著	非常显著	非常显著	不显著	不显著	显著

对比图10a, b不难发现,当热感觉投票值为-3, -2, -1, 0时,县城居民感觉舒适(热舒适投票值为0)的人数百分比均较登鲁村低,而当热感

觉投票值为1, 2时则正好相反,这再次印证了县城居民最舒适热感觉较登鲁村居民偏暖这一事实。

2.6 人体自适应水平

运用Yao等人提出的 $aPMV$ 模型相关原理及算法分别计算出县城及登鲁村受试者自适应系数 λ 。

$aPMV$ 与 PMV 的关系如下式所示:

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

令 $x = \frac{1}{PMV}$, $y = \frac{1}{aPMV}$, 则式(1)可以表示为

$$y = x + \lambda \quad (2)$$

为与给定的一组数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ (n 为数据组数)接近,根据最小二乘法相关原理,最佳拟合曲线 $f(x)$ 应具有最小方差 Π ,即

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (x_i + \lambda)]^2 \quad (3)$$

为使其方差最小,依据微分学的求极限方法得

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \lambda} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - x_i - \lambda) = 0 \quad (4)$$

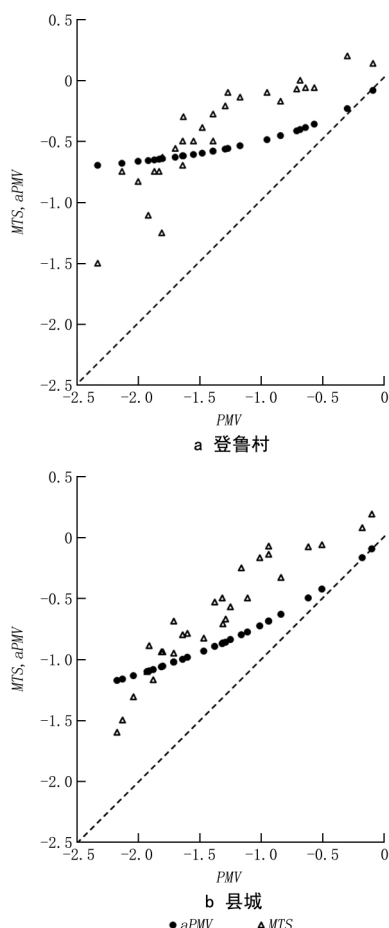
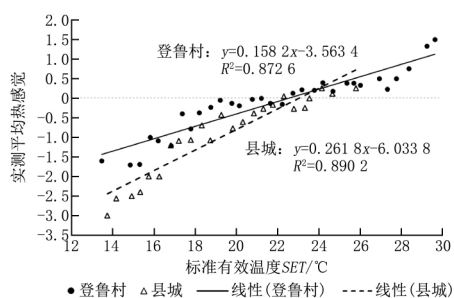
那么

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (5)$$

根据上述方法,并运用MATLAB进行计算,可分别求得县城及登鲁村居民冬季人体自适应系数 λ 分别为-0.39 ($PMV < 0$)和-0.46 ($PMV < 0$)。可以看出,登鲁村居民冬季人体自适应水平高于县城居民。 $aPMV$, MTS 与 PMV 的关系如图11所示。图中虚线表示 $PMV = aPMV$,即 $\lambda = 0$,此时人体对气候没有适应性。

3 人体热适应差异分析

本研究要求每位受试者在填写问卷前先静坐20 min,以保证其接受测试时拥有相同人体新陈代谢水平,此时受试者服装热阻成为影响其热舒适的最重要显性因素。为排除不同服装热阻对热舒适结果的干扰作用,研究引入标准有效温度(SET)以衡量“标准”测试条件下县城与乡村居民的不同热舒适反映,结果如图12所示。当纵坐标值 $y=0$ 时,可分别求得县城及登鲁村居民热中性标准有效温度 SET 分别为23.0℃及22.5℃,仅相差0.5

图 11 县城及登鲁村受试者 $aPMV$, MTS 与 PMV 的关系图 12 标准有效温度 SET 与平均热感觉回归曲线

$^{\circ}\text{C}$ (而其实测热中性操作温度相差 4.0°C)。这说明不同服装热阻分布是造成县城及登鲁村居民热中性操作温度差异的重要原因。同时,由图 12 及计算可以看出,“标准”测试条件下,县城居民热中性温度仍高于登鲁村居民,其深层原因分述如下。

3.1 行为调节

如前所述,行为调节是人体主动适应所处热环境的方式之一。对县城及登鲁村受试者常采用的改善热环境及提升热舒适的措施的调查结果如图

13 所示。可以看出:“使用小型电供暖设备(电暖炉、电热扇等)”是县城居民改善室内热环境、提升

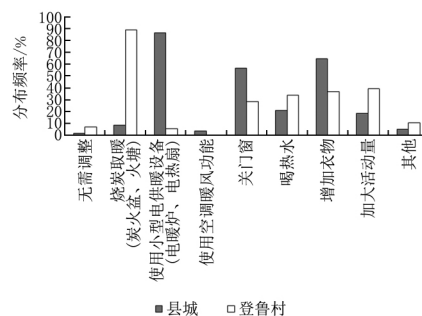


图 13 县城及登鲁村受试者改善室内热环境的措施分布频率

热舒适感的最主要措施,紧随其后的是“增加衣物”及“关门窗”,其他措施的分布频率均低于 25%,县城居民热舒适调节措施的选择相对集中;“烧炭取暖(炭火盆、火塘等)”是登鲁村居民最常采用的热舒适调节手段,其分布频率高达 88.97%,分列其后的调节措施依次是“加大活动量”“增加衣物”“喝热水”及“关门窗”,其分布频率相差不大,均处于 25%~40% 的区间范围内。以上现象说明,登鲁村居民常用热舒适调节手段较县城居民更为多样且分布更加均匀。Humphreys 等人认为,建筑环境中人们进行主动调节的机会越多,其对周围环境的适应能力越强^[28]。县城居民热舒适调节手段较登鲁村居民单调,这是其人体适应能力低于登鲁村居民的原因之一。

3.2 心理适应

心理适应能力的强弱主要取决于人体对热环境的心理期望。当人们对周边热环境的期望较高时,其心理适应能力较弱;反之亦然。而人体对周边热环境的心理期望又受其长期热经历影响,Ning 等人^[29]、纪文杰等人^[30]的研究都从不同侧面印证了这一点。对于分别以台江县城及登鲁村为代表的夏热冬冷地区城镇与乡村,其长期存在的建筑类型、文化背景、经济水平及生活方式上的差异造成了其居民长期热经历的不同,进而影响人们对热环境的心理预期及心理适应。其具体影响分述如下:

1) 建筑类型。砖混结构的县城住宅在保温、蓄热及气密性方面的性能均优于木板壁结构的乡村吊脚楼,其室内温度变化幅度相对较小,室内热环境相对稳定。长期处于较温暖且气温变化相对稳定的室内环境,县城居民对周边热环境的期望水平高于乡村居民,这导致其热中性温度及 80% 可

接受温度下限分别比乡村居民高 4.0°C 及 3.5°C 。同时,县城居民期望温度与热中性温度的差值也大于乡村居民。

2) 文化背景、经济水平。文化背景、经济水平共同决定了县城及乡村不同的冬季取暖方式。由图 13 可知,县城居民主要使用电热设备取暖,而乡村居民则主要依靠燃烧生物质柴薪、煤炭能源的炭火盆、火塘取暖。电热设备对室内空气温度和平均辐射温度都有一定的提升作用,热效率较高;而开放火源通过其强辐射传热作用使取暖者获得较满意的实际热感觉。由表 2 可知,调研期间乡村住宅室内操作温度区间范围(最高操作温度减去最低操作温度)较县城住宅更宽,这与其供暖方式密不可分。乡村居民长期居住于室温跨度较大的环境中,其所期望的室内温度区间自然比县城居民更宽泛,表现为其拥有更宽的 80% 可接受温度范围,其心理适应能力也得到体现。

3) 生活方式。日常生活中,县城居民长期待在室内,大多数时间处于静止状态,其所处环境温度相对稳定,并更富周期性;而乡村居民经常出入于室内外,其背景温度变化频繁、剧烈,且更具随机性。较稳定的室内温度导致县城居民对环境品质的预期更高,也因此比乡村居民对环境更挑剔、更难满足。表现为在冬季偏冷环境中,相同热感觉下县城居民比乡村居民感觉更不舒适。也因此导致其心理适应能力弱于乡村居民。

4 结论

1) 2018 年 1 月 24 日至 2 月 7 日冬季调研测试期间城镇住宅室外空气平均温度为 0.5°C ,较乡村住宅低 2.97°C ;城镇住宅室内平均操作温度为 12.73°C ,较乡村住宅高 2.04°C 。尽管城镇住宅室内平均操作温度较高,但城镇居民 83.12% 的热环境可接受率仍比乡村居民 89.31% 的可接受率低 6.19%。

2) 当室内操作温度或平均热感觉投票值相同时,乡村居民的服装热阻值总高于城镇居民。这与其所处热环境特点及生活方式有关。

3) 城镇居民冬季热中性温度为 18.3°C ,乡村居民冬季热中性温度为 14.3°C ,二者相差 4.0°C 。城镇居民冬季期望温度为 21.5°C ,乡村居民冬季期望温度为 16.5°C ,二者分别比热中性温度高 3.2°C 及 2.2°C ,可以看出城镇居民热期望水平高

于乡村居民。

4) 城镇居民 80% 可接受温度范围为 $10.0\sim 23.6^{\circ}\text{C}$,乡村居民 80% 可接受温度范围为 $6.5\sim 21.2^{\circ}\text{C}$ 。县城居民 80% 可接受温度下限高于乡村居民,且其可接受温度范围较乡村居民窄。这与其长期所处热环境特征及其较高预期有关。

5) 当热感觉投票值相同时,城镇居民舒适感较乡村居民低,并随着热感觉投票向负值(冷感)方向偏移,二者差异越发明显。

6) 城镇居民冬季人体自适应系数为 -0.39 ,乡村居民冬季人体自适应系数为 -0.46 。乡村居民人体自适应水平高于城镇居民。

7) 服装热阻差异是造成城镇及乡村居民实测热中性温度差异的重要原因。

8) 行为调节方式及心理适应水平同样对城镇及乡村居民不同的人体自适应特征产生影响。相较于城镇居民,乡村居民改善室内热环境、提升人体热舒适的措施更加丰富。而不同的建筑类型、文化背景、经济水平及生活方式也造成了城镇居民高于乡村居民的热环境心理预期水平。

参考文献:

- [1] BRAGER G S, DE DEAR R J. Thermal adaptation in the built environment: a literature review [J]. Energy and Buildings, 1998, 27(1): 83-96
- [2] HUMPHREYS M A. Field studies of thermal comfort compared and applied [J]. The Building Services Engineer, 1976, 44(1): 5-27
- [3] NICOL J F, HUMPHREYS M A. Thermal comfort as part of a self-regulating system [J]. Building Research and Practice, 1973, 6(3): 191-197
- [4] FANGER P O, TOFTUM J. Thermal comfort in the future-excellence and expectation [C] // Conference Proceedings on Moving Thermal Comfort Standards into 21st Century, 2001:11-19
- [5] ISO. Moderate thermal environment-determination of PMV and PPD indices and specifications of the conditions for thermal comfort; ISO 7730:1994 [S]. Geneva: ISO, 1994:3
- [6] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy; ASHRAE Standard 55-2004 [S]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2004:16
- [7] SCHILLER G E. A comparison of measured and predicted comfort in office buildings [G] // ASHRAE Trans, 1990, 96(1): 609-622

- [8] FANGER P O, TOFTUM J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm and humid climates [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34 (6): 533-536
- [9] PEETERS L, DE DEAR R J, 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
- [10] DE DEAR R J, BRAGER G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [G]//ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 145-167
- [11] DE DEAR R J, BRAGER G S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55 [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34 (6): 549-561
- [12] 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
- [13] 郑武幸,杨柳,宋晓吉,等. 寒冷地区人体自适应水平的气候季节性变化[J]. *暖通空调*, 2015, 45 (11): 80-85
- [14] 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
- [15] 王晗旭. 西北乡域中小学教学建筑冬季室内热环境研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016: 45-46
- [16] WANG D J, JIANG J, LIU Y F, et, al. Student responses to classroom thermal environments in rural primary and secondary schools in winter [J]. *Building and Environment*, 2017, 115: 104-117
- [17] 中国建筑科学研究院. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T 50785—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 9-10
- [18] 曹彬,朱颖心,欧阳沁. 北京地区冬季室内人体热舒适性及热适应性调查[J]. *暖通空调*, 2010, 40 (5): 98-100
- [19] 王昭俊,方修睦,廉乐明. 哈尔滨市冬季居民热舒适现场研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, 34 (4): 500-504
- [20] 叶晓江,连之伟,文远高,等. 上海地区适应性热舒适研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2007, 26(5): 86-88
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 杨柳,杜晓磊,郑武幸,等. 吐鲁番地区夏季农村住宅热舒适研究[J]. *暖通空调*, 2014, 44(4): 132-136
- [24] 葛翠玉,杨柳. 吐鲁番农村住宅冬季室内热舒适调查研究[J]. *暖通空调*, 2014, 44(11): 94-99
- [25] 闫海燕,李道一,李洪瑞,等. 南阳农村民居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
- [26] 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
- [27] 吴崇山,单军,孔德荣. 贵州苗族吊脚楼居住建筑冬季室内热舒适现场调研[J]. *暖通空调*, 2019, 49 (9): 135-141
- [28] HUMPHREYS M A, NICOL J F. Understanding the adaptive approach to thermal comfort [G] //ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 991-1004
- [29] NING H R, WANG Z J, JI Y C. Thermal history and adaptation: does a long-term indoor thermal exposure impact human thermal adaptability? [J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 22-30
- [30] 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

(上接第 48 页)

参考文献:

- [1] 中国环境科学研究院,北京市环境保护监测中心,广州市环境监测中心站. 声环境质量标准: GB 3096—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 2-3
- [2] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 113-117
- [3] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 26-28
- [4] MERKEL F V S. Zeitschrift des vereines deutscher Ingenieure VDI[M]. Berlin: [s. n.], 1925
- [5] 闫全英,刘迎云. 热质交换原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 18-135
- [6] FISENKO S P, PETRUCHIK A I, SOLODUKHIN A D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(23): 653-694
- [7] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 90-106