

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.017



中国南北人群在中性环境下的生理适应性和主观评价

林宇凡^{a,b}, 杨柳^b, 任艺梅^b, 郑武幸^b

(西安建筑科技大学 a. 土木学院; b. 建筑学院, 西安 710055)

摘要:研究中国南北人群在中性环境下,生理适应的自主神经调节和主观评价差异。采用实验设计,遴选16名南方大学生和16名北方大学生,测试生理参数,包括皮肤温度、心率、心率变异性(HRV)、血容量(BVP)、肌电(EMG),填写主观问卷。实验结果发现:1)中性环境,北方人群感觉是舒适的,各项评价指标接近中性和适中,数据较集中;南方人群感觉稍热,评价数据较离散,但热舒适(TCV)($p=0.106>0.05$)、可接受程度($p=0.838>0.05$)等几个主观评价与北方人群相比没有显著差异,说明南方人群有较宽的热中性温度区和较好的环境忍耐力;2)南北人群在中性环境下,平均皮肤温度有显著差异($p=0.006<0.05$),且身体躯干部位的皮肤温度显著高于四肢皮肤温度($p=0.009<0.05$; $p=0.043<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0.002<0.05$),四肢皮肤温度差异不显著,肌电无显著差异($p=0.961>0.05$)。心率和心率变异性的LF/HF比值,均值有差异,但不显著(($p=0.265>0.05$; $p=0.618>0.05$),但BVP有显著差异($p=0<0.05$)。

关键词:地域; 中性环境; 生理适应性; 主观评价

中图分类号:TU111.3 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2016)05-0130-08

Physiological adaptability and subjective evaluation between different regions residents in neutral environment

Lin Yufan^{1,2}, Yang Liu², Ren Yimei², Zheng Wuxing²

(a. School of Civil Engineering; b. School of Architecture,
Xian University of Architecture and Technology University, Xian 710055, P. R. China)

Abstract: The difference on physiological adaptation of autonomic nervous regulation and subjective evaluation between residents of southern and northern in a neutral environment in China were studied. Using the experimental design, selection of 16 south college students and 16 north of the college students, the physiological parameters test including skin temperature, heart rate, heart rate variability (HRV), blood volume pulse(BVP), electromyography(EMG), Filling in the subjective questionnaire. The results showed that: 1) the north crowd feeling was comfortable, evaluation index was near to neutral and

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家杰出青年科学基金(51325803);住建部软科学项目(2015-R1-007)

作者简介:林宇凡(1974-),女,副教授,博士生,主要从事建筑气候与节能研究,(E-mail)376077580@qq.com。

杨柳(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)626224056@qq.com。

Received:2015-12-21

Foundation item: National Outstanding Youth Science Fund of China (No. 51325803); Soft Science Research Project of Mohurd (No. 2015-R1-007).

Author brief: Lin Yufan(1974-), associate professor, PhD condidate, main research interests: bioclimatic building and energy saving, (E-mail)376077580@qq.com.

Yang Liu(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail)626224056@qq.com.

moderate, data was relatively concentrated compared with the south people feeling was a bit hot, evaluation data was discrete in neutral environment, but thermal comfort (TCV) ($p = 0.106 > 0.05$), an acceptable level ($p = 0.838 > 0.05$) were no significant differences compared with the north people; 2) The average skin temperature had significant difference ($p = 0.006 < 0.05$), and the body skin temperature was significantly higher than limb skin temperature ($p = 0.009 < 0.05$; $p = 0.043 < 0.05$; $p = 0 < 0.05$; $p = 0 < 0.05$; $p = 0.002 < 0.05$), limb skin temperature difference was not significant, electromyography was not significant difference ($p = 0.961 > 0.05$). Heart rate value and LF/HF value of heart rate variability were both differences, but not significance ($p = 0.265 > 0.05$; $p = 0.618 > 0.05$). But BVP was significant difference ($p = 0 < 0.05$).

Keywords: region; neutral environment; physiological adaptability; subjective evaluation

基于现场研究的热适应模型发现了室内热中性温度与室外气候有紧密的联系,但热适应模型研究思路是关注热中性温度与气候要素建立函数关系,关注的是结果,忽略了二者建立函数关系的生理适应机理的揭示。因此,有学者开始关注生理热适应,更多地关注人体在偏冷和偏热环境下的生理反应,包括寒冷季节体温调节规律^[1-3];人体皮肤温度差异与热感觉(TSV)、热舒适(TCV)^[4-6];人体的耐受生理指标及耐受性^[7-9];人体电生理参数研究^[10-11]。上述研究虽然揭示了生理热适应对热舒适的影响机理,但现场热舒适研究发现中国南北人群的热中性温度区有明显差异。在中国,秦岭淮河线是中国南北分界线,它是以气候、温度和降水量为划分依据。在气候上,秦岭淮河线是南方亚热带季风气候和北方温带季风气候的分界线;在气温上,秦岭淮河线是1月平均温度南方地区0℃以上和北方地区0℃以下的分界线;在降水上,秦岭淮河线是水量800 mm以上(南方地区)和800 mm以下(北方地区)的分界线。气候、温度和降水量的差异使中国南北人群的生活方式、饮食习惯等有显著差异,这条分界线也是中国冬季采暖和非采暖的分界线,导致南北人群对气候的适应能力有显著差异^[12-14],但从生理适应性的角度揭示这个差异的文献很少,特别是还没有文献从人体生理适应的自主性调节来解释这个差异。人体在适应环境时,除了行为性体温调节外,还有自主性体温调节,即通过调节其产热和散热的生理活动,如寒颤、发汗、血管舒张收缩等,以保持体温相对恒定的调节过程。这个调节过程主要由自主性神经调节完成。因此,论文以北方地区人群和南方地区人群为研究对象,采用实验研究,目的是发现我国南北人群生理适应的自主性调节和主观感受的差异,揭示人体在中性环境下的生理适应机理,完善热适

应模型。

1 实验方法与材料

1.1 测试者

分别遴选16名来自北方地区的大学三年级学生和南方地区的大学一年级新生。北方地区学生全部选择出生在北方且一直在北方地区生活学习,已适应的北方气候环境;南方地区学生全部选择出生在南方,在南方地区生活学习,测试时已在西安生活学习2个半月,尚未适应北方气候环境。南北人群的体重均值、身高均值和年龄均值分别是59.18 kg、171.06 cm、18.5岁和65.56 kg、171.25 cm、20.75岁。实验对测试者的要求有:测试者身体健康;测试者应确保实验当天身体状况和精神状态均良好;实验前保持皮肤清洁,避免干扰生理指标的正常测试;测试前,对测试者进行动员,包括阅读实验说明书和主观问卷调查;按照ASHRAE标准^[15],要求测试者服装为:内衣裤(0.04 clo)、普通秋衣秋裤(0.2 clo+0.15 clo)、薄外衣和薄外裤(0.22 clo+0.28 clo)、普通短袜(0.03 clo)、单鞋(0.04 clo),测试者需衣着宽松,禁穿紧身衣服;实验阶段保持安静,保持坐姿进行测试。

1.2 人工气候室

气候室平面尺寸4.2 m×2.6 m,高度3.3 m。气候室内设空调,调节空气温度。空调型号KFR-26GW(26556)FNc-3;制热面积10~15 m²,制热量3 500 W,制热功率1 075 W。循环风量610 m³/h。

1.3 室内热环境测试参数和仪器设备

室内热环境参数(室内空气温度、室内空气湿度、室内风速)的测试方法参照ISO-7726^[16]标准进行,在进行测试之前,对测试仪器进行了调试和校

核。测试仪器距离测试者 50 cm 以内处。环境参数测试仪器是温湿度计(RT-72ui; 自记式; 精度士 0.3 ℃; 精度士 5%); 微风仪(SWA03; 手持式; 精度士 0.03 m/s)。

1.4 主观问卷设计

问卷内容涉及测试者对室内环境参数的主观评价、主观感觉的评价和主观生理感觉的评价 3 个方面。

1.5 生理参数及仪器设备

人体适应性的自主性调节是通过神经中枢下丘脑综合分析后,由交感神经和迷走神经的活跃或低迷变化导致皮肤血液流量、皮肤温度、骨骼肌放电等发生变化,调整人体的产热和散热,保持人体体温相对稳定。因此,生理参数选取心率、心率变异性(HRV)(采用频域分析法)观察交感神经和迷走神经的变化、指尖脉搏血容量(BVP)观察皮肤血液流量来判断血管舒张或收缩状态、皮肤温度指标观察皮肤温度变化、肌电量(EMG)观察骨骼肌放电。

皮肤温度通过热电偶测出(Pt1000 精度士 0.1 ℃); 心率变异性(HRV)、心率、通过生理参数检测仪测出(天津京津医疗器械厂),生参仪见图 1 和图 2,数据通过生参仪软件读取; 指尖脉搏血容量(BVP)、肌电(EMG)通过生理参数反馈仪测出(荷兰 Spirit-Mind 生物反馈技术公司); EMG 指标选择人体背部斜方肌,贴附一次性肌电电极片(可用一次性心电电极片代替),然后连接肌电电极连线,与测试软件连接测出。



图 1 生理参数记录检测仪

Fig 1 Physiological parameters detector

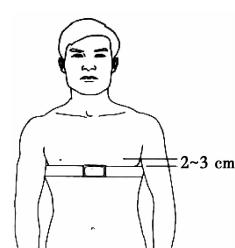


图 2 生参仪佩带示意图

Fig 2 A sketch of wearing physiological parameters detector

1.6 实验流程

实验在西安建筑科技大学绿色建筑研究中心气候室进行,考虑南方人群在西安居住时间越长,对北方气候产生生理适应性可能性会增强,虽然有文献发现^[8]居住在日本的热带人居住时间长达 61 个月,热带人的生理适应特点依旧有保留,但考虑到实验

的准确性,实验在 2014 年 12 月进行,这时南方人群在西安居住较短,尚未形成对北方气候的生理适应。实验时间全部选择在白天进行。实验流程见表 1。

表 1 实验流程表

Table 1 Experimental process table

| 实验时间/min | 实验环境 | 实验内容 |
|----------|-------------------------------------|--|
| 0~30 | 准备间 | 更换统一服装; 布置热电偶 (采用 16 点测试)测试皮肤温度; 布置生理参数记录检测仪、生理参数反馈仪; |
| 30~60 | 气候室(温度 24 ℃; 相对湿度 35%; 风速 0.02 m/s) | 适应 30 min, 测试 16 点皮肤温度, 记录心率、心率变异性数据; 测试指尖脉搏血容量; 测试肌电; 填写主观问卷 1 份; |
| 60 | | 停止生理参数检测仪记录, 实验结束 |

1.7 数据整理和分析方法

室内环境参数、测试者基本信息、主观问卷调查、皮肤温度数据通过人工录入,在 EXCEL 里汇总成表。心率、心率变异性(HRV)通过生理参数记录检测仪数据分析软件(北京保迈科技有限公司)读取。指尖脉搏血容量(BVP)和肌电(EMG)数据通过 16 通道认知神经生物反馈测试仪软件读取。

平均皮肤温度采用不同部位测得的皮肤温度乘以该部位占体表面积的百分比再相加^[17],计算式为

$$T_{msk} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

式中: T_{msk} 为平均皮肤温度, ℃; T_i 为各区域皮肤温度, ℃; S_i 为对应区域面积, m^2 。

皮肤各部位测点温度采用 14 点,此外,再增加测试了左手指和左脚指两点。14 点平均皮肤温度计算公式为

$$T_{msk} = \frac{1}{14} (T_{前额} + T_{颈部} + T_{左肩胛} + T_{左上胸} + T_{左上臂} + T_{左下臂} + T_{左手} + T_{左腹} + T_{左腰} + T_{左前大腿} + T_{左后大腿} + T_{左前小腿} + T_{左后小腿} + T_{左脚面} + T_{左上脚})$$

心率、心率变异性(HRV)数据通过生参仪分析软件进行,可通过分析处理和结果回顾得到信号波形,分析后的数据可以导出并在 EXCEL 里汇总成表。指尖脉搏血容量(BVP)和肌电(EMG)数据通过生物反馈仪软件进行,通过分析界面看到信号波形,分析数据后导出在 EXCEL 里成表。见图 3 和图 4。



图3 BVP 波形图

Fig 3 BVP Waveform figure



图4 EMG 波形图

Fig 4 EMG Waveform figure

采用 SPSS22.0 版数理统计软件对实验数据进行统计学分析。中性环境下南北人群的差异性分析采用独立样本 T 检验。数据分析前,先分析数据是否符合正态分布,采用 3 种方法分析,分别是直方图分析、Q-Q 图分析和非参数 K-S 检验,检验结果符合正态分布,采用上述方法,不符合正态分布,采用非参数秩和检验。上述统计分析方法均以 $P < 0.05$ 为差异,有统计学意义。

2 实验结果

2.1 环境参数测试结果

室内热环境参数的测试结果见表 2。表中对中性环境的环境参数进行了描述性统计分析,包括测试数据的统计量及总和、数据极大值、极小值、平均值、标准差的统计量。通过统计分析表明,室内热环境参数的测试均控制良好。

表2 中性环境测试结果统计表

Table 2 Statistics table of neutral environment test results

| 热环境参数 | 极小值 | 极大值 | 均值 | 标准差 |
|-------------------------------|------|------|-------|-------|
| 室内温度/℃ | 22.4 | 24.7 | 23.83 | 0.413 |
| 室内湿度/% | 31 | 44 | 35.34 | 2.778 |
| 室内风速/ (m·s ⁻¹) | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.008 |

2.2 主观问卷调查结果

图 5 描述了南北人群在 24 ℃ 的中性环境下的主观问卷调查结果。包括 6 个问题,分别是对 24 ℃ 环境下的潮湿感、气流感、热感觉 (TSV)、热舒适 (TCV)、期望温度和对环境可接受程度的主观评价。由图 5(a)(b)看出,南北人群对室内湿度和室内风速的评价均接近于适中,但北方人群的评价要好于南方人群;由图 5(c)看出北方人群的热感觉 (TSV) 好于南方人群,评价指标约为 0.2,而南方人群的评价指标约为 0.6,说明这个中性环境对于南方人群来说是稍热的;但从图 5(d)看出,虽然南北人群的热感觉 (TSV) 有少许差异,但热舒适 (TCV) 差异不大,评价指标均接近中性;图 5(e)看出,北方

人群对这个环境温度是满意的,因此评价指标约为 2,既希望温度保持不变,而南方人群却认为稍热,评价指标约为 2.4;但从图 5(f)看出,南北人群对这个环境的可接受程度评价差异不大,指标均约为 1.5,这个指标介于“刚刚可接受”和“完全可接受”之间。

主观问卷调查另外 3 个问题,分别是出现什么生理反应、与上次比较出现什么生理症状和说出环境不太舒适的原因。研究发现,北方人群在中性环境下没有生理反应,93.75% 的人没有生理症状,12.5% 的人表示环境舒适,提出环境不舒适的原因较多,主要集中表示空气闷;南方人群有 12.5% 人出现排汗生理反应,12.5% 的人出现手冷和脚冷症状,提出环境不舒适的原因也主要集中表示空气闷,占 68.75%。被测试人员的上述反应与实验设计的风速有关,还有本次实验在 2014 年 12 月进行,室外的环境温度也会影响测试者出现局部手冷脚冷症状。

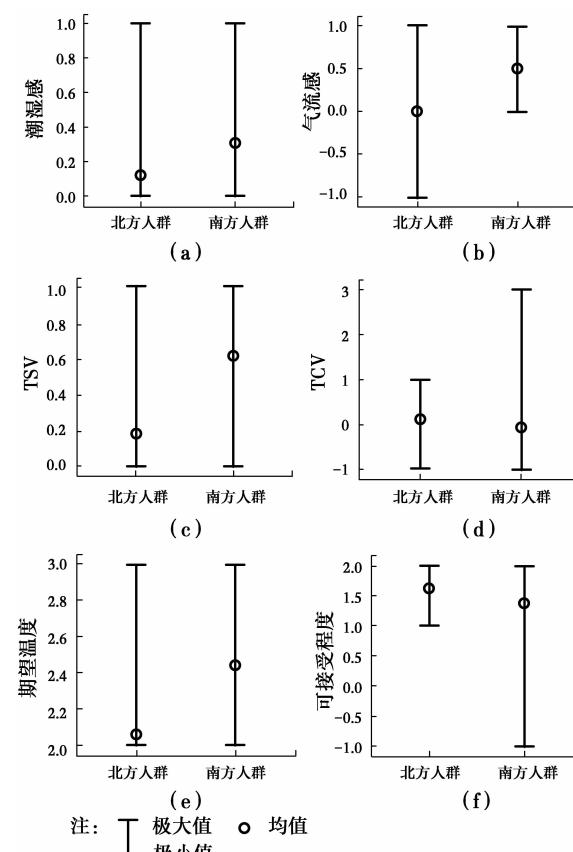


图5 主观问卷调查高低图

Fig 5 high and low figure of subjective questionnaire survey

综上所述,本次实验设计的中性环境,北方人群感觉是舒适的,各项评价指标接近中性和适中,数据较集中;南方人群感觉稍热,评价数据较离散,但热

舒适(TCV)、可接受程度、出现的生理症状、评价环境不舒适的原因这几个主观评价与北方人群相比没有显著差异,数据均较集中,说明南方人群有较宽的热中性温度区和较好的环境忍耐力。

2.3 生理反应实验结果

由图6看出,南方人群平均皮温高于北方人群。由图7看出,除左手外,身体各部位皮温均高于北方人群,特别是躯干部位的皮温显著高于北方人群。南方人群左手皮温低于北方人群,是因为实验在冬季进行,实验前,作者调查发现,南方人群衣着量普遍少于北方人群,通过咨询得知南方人群认为北方冬季不冷,故无需穿太多衣服,加之左手暴露于寒冷环境中,影响了左手温度,作者在随后的指尖脉搏血容量(BVP)测试中,通过对左手指的测试,也印证了这个结论。

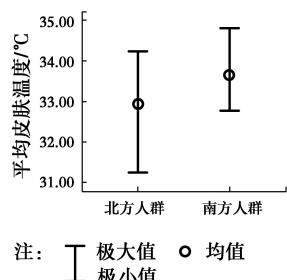


图6 南北人群平均皮肤温度

Fig 6 Average skin temperature between residents of southern and northern

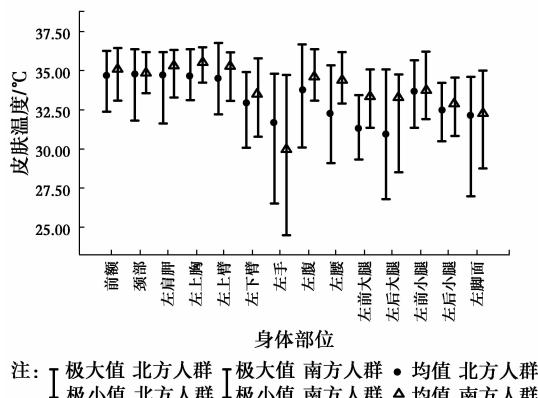


图7 南北人群各点皮肤温度

Fig 7 skin temperature between residents of southern and northern

由图8~9看出,中性环境下,南北人群心率没有明显差异,心率值约为82~85次/min。南北人群的心率变异性(HRV)有少许差异。北方人群LFNU稍高,HFNU稍低,LF/HF稍高。根据心率变异性(HRV)频域分析方法可知^[18-19],LFNU和

HFNU分别反映交感神经和迷走神经对心率调控的一个相对水平,LF/HF比值反映交感神经和迷走神经活动的平衡状态。中性环境下,南方人群的LF/HF比值稍小于北方人群,反映交感神经和迷走神经活动的平衡状态稍弱于北方人群,实验结果印证了前面对南北人群的主观问卷调查得知,南方人群认为这个环境稍热,因此,交感神经和迷走神经活动的平衡状态稍弱于北方人群。

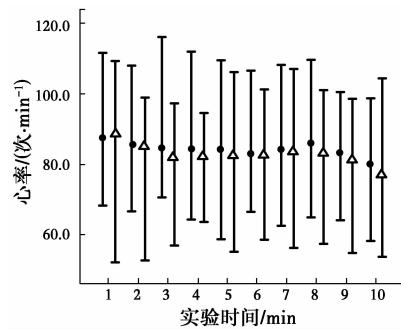


图8 南北人群心率

Fig 8 Heard rate between residents of southern and northern

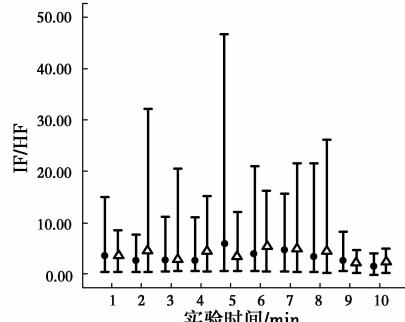


图9 南北人群心率变异性

Fig 9 HRV between residents of southern and northern

生理参数反馈仪的指尖脉搏血容量通过传感器测量指尖血液流量。每次心跳过程中,血液流过动脉和皮肤血管,血流量最大时,血容量信号最强,即波峰,见图3。波峰的高度表示此时手指血流量与血管舒张或血管收缩之间的关系。信号波通过软件分析转换成数据,通过数据大小判断手指血管的舒张和收缩。由图10看出,北方人群的BVP显著高于南方人群。北方人群的BVP值约为40~50 mV,南方人群的BVP值约为20 mV,作者在论述中性环境下南北人群左手及左手指皮肤温度差异时已经阐述。由图11看出,中性环境下,南北人群的肌电量(EMG)均值差异不大,约为16.7 uV。南北人群肌电数据离散程度差异也不大,数据中位数有少许差异,南方人群中位数稍低于北方人群。

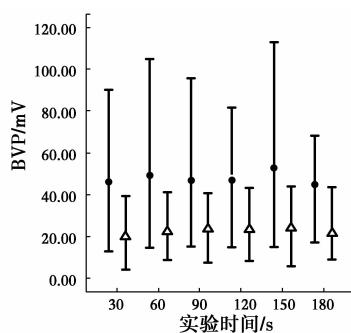
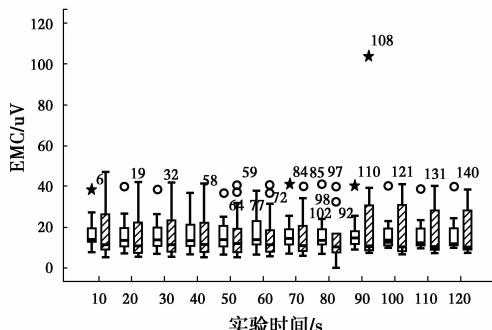


图 10 南北人群指尖脉搏血容量

Fig 10 BVP between residents of southern and northern



注: □ 北方人群 ▨ 南方人群

图 11 南北人群肌电图

Fig 11 EMG between residents of southern and northern

3 中性环境下南北人群的差异性分析

3.1 主观评价差异性分析

表 3~4 是南北人群在中性环境下的 TSV 和 TCV 主观投票差异性分析的非参数秩和检验结果。秩均值是秩和除以样本量得出。南方人群的 TSV 秩均值大于北方人群,且差异显著($p=0.013<0.05$)。但 TCV 的秩均值差异不显著($p=0.106>0.05$)。

表 3 秩

Table 3 Rank

| TSV | 地域 | 秩均值 | TCV | 秩均值 |
|-------|----|-----|-------|-------|
| 24 °C | 南 | 20 | 24 °C | 18.81 |
| | 北 | 13 | | 14.19 |

表 4 检验统计量

Table 4 Statistic test

| 统计量 | TSV 24 °C | TCV 24 °C |
|----------------|-----------|-----------|
| Mann-Whitney U | 72 | 91 |
| Wilcoxon W | 208 | 227 |
| Z | -2.480 | -1.615 |
| 渐近显著性(双侧) | 0.013 | 0.106 |

其它主观评价差异性分析发现,南北人群的潮湿感评价和环境可接受程度评价无显著差异($p=0.381>0.05$; $p=0.838>0.05$);气流感评价和期望温度评价有显著差异($p=0.03<0.05$, $p=0.016<0.05$)。

3.2 生理参数结果差异性分析

表 5~6 是南北人群的平均皮肤温度的差异性分析结果。分析发现,中性环境下,南方人群平均皮肤温度均高于北方人群。

表 5 检验统计量

Table 5 Statistic test

| 地域 | N | 均值(中性环境平均皮温) | 标准差 | 均值的标准误 |
|------|----|--------------|-------|--------|
| 北方人群 | 16 | 32.96 | 0.770 | 0.192 |
| 南方人群 | 16 | 33.69 | 0.603 | 0.150 |

表 6 独立样本检验

Table 6 Independent sample test

| 平均 皮温 | 方差 Levene 检验 | | <i>t</i> | df | Sig. 双侧 |
|----------|--------------------|-------|----------|----|---------|
| | F | Sig. | | | |
| 假设方差相等 | 0.373 | 0.546 | -2.9 | 30 | 0.006 |
| 假设方差不相等 | | | -2.9 | 28 | 0.006 |

表 6 是南北人群在相同环境下的平均皮肤温度独立样本 T 检验分析结果。中性环境下, $F=0.373$, $p=0.546>0.05$, 说明满足假设方差相等。则 $t=-2.964$, $p=0.006<0.05$; 说明南北人群平均皮肤温度有显著性差异。

除左手和左手指外,南方人群皮肤温度均值均高于北方人群,但只有胸、腹、腰、大腿前侧、大腿后侧、左手指有显著差异($p=0.009<0.05$; $p=0.043<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0.002<0.05$; $p=0.017<0.05$)。南方人群在中性环境下心率值低于北方人群,分别为 82.99 次/min(南)和 84.52 次/min(北),但无显著差异($p=0.265>0.05$)。北方人群的 LF/HF 秩和和秩均值比南方人群稍高,但差异不显著($p=0.618>0.05$)。同样,心率变异性(HRV)的低频(LFNU)和高频(HFNU)也呈上述结果,中性环境下差异不显著($p=0.365>0.05$; $p=0.368>0.05$)。北方人群在中性环境下的 BVP 均值均高于南方人群,且均有显著性差异($p=0<0.05$),但南北人群在中性环境下

的肌电均值有少许差异,肌电均值分别为 $16.7\text{ }\mu\text{V}$ 和 $16.76\text{ }\mu\text{V}$,但无显著性差异($p=0.961>0.05$)。

综上所述,南北人群在中性环境下,平均皮肤温度有显著差异($p=0.006<0.05$),并且,身体躯干部位的皮肤温度显著高于四肢皮肤温度($p=0.009<0.05$; $p=0.043<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0.002<0.05$),四肢皮肤温度差异不显著。心率、心率变异性LF/HF比值和肌电量均值有差异,但不显著($p=0.265>0.05$; $p=0.618>0.05$; $p=0.961>0.05$),但BVP有显著差异($p=0<0.05$)。

4 结 论

通过对人体在中性环境的生理适应性机理实验研究,结合实验结果和数理统计分析,得出以下结论。

1) 在中性环境中,北方人群感觉是舒适的,各项评价指标接近中性和适中,数据较集中;南方人群感觉稍热,评价数据较离散,表现为气流感($p=0.03<0.05$)、热感觉(TSV)($p=0.013<0.05$)、期望温度($p=0.016<0.05$)有显著差异,但热舒适(TCV)($p=0.106>0.05$)、可接受程度($p=0.838>0.05$)、出现的生理症状、评价环境不舒适的原因这几个主观评价与北方人群相比没有显著差异,数据均较集中,说明南方人群有较宽的热中性温度区和较好的环境忍耐力。

2) 在中性环境下,平均皮肤温度有显著差异($p=0.006<0.05$),并且,身体躯干部位的皮肤温度显著高于四肢皮肤温度($p=0.009<0.05$; $p=0.043<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0<0.05$; $p=0.002<0.05$),四肢皮肤温度差异不显著。心率、心率变异性LF/HF比值和肌电量均值有差异,但不显著($p=0.265>0.05$; $p=0.618>0.05$; $p=0.961>0.05$),但BVP有显著差异($p=0<0.05$)。

参考文献:

- [1] MARIE-ANDRÉE I, OLIVIER L. Shivering modulation in humans: effects of rapid changes in environmental temperature [J]. Journal of Thermal Biology, 2013, 38(8):582-587.
- [2] DAMIEN F, LINDSEY R, THOMAS V, et al. Body mapping of thermoregulatory and perceptual responses of males and females running in the cold [J]. Journal of Thermal Biology, 2013, 38(6):339-344.
- [3] WOUTER D, MARGRIET S, PASCALE V. Individual variation in the relation between body temperature and energy expenditure in response to elevated ambient temperature [J]. Physiology & Behavior, 2001, 73(1/2):235-242.
- [4] 刘蔚巍. 人体热舒适客观评价指标研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- LIU W W. Study on objective evaluation index of human thermal comfort [D]. Shanghai: Transportation University, 2007. (in Chinese)
- [5] LISJE S, MARCEL G, MARTIN H, et al. Effects of different cooling principles on thermal sensation and physiological responses [J]. Energy and Buildings, 2013, 62:116-125.
- [6] JOÃO C B M, ALEX A F, SERGIO P C, et al. Thermal body patterns for healthy Brazilian adults (male and female) [J]. Journal of Thermal Biology, 2014, 42(1):1-8.
- [7] 余娟. 不同室内热经历下人体生理热适应对热反应的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- YU J. Studies on the effects of physiological acclimatization on thermal response of people accustomed to different thermal indoor environment [D]. Shanghai: Donghua University, 2011. (in Chinese)
- [8] JOOYOUNG L, MOHAMED S, CHOU C M. Cutaneous warm and cool sensation thresholds and the inter-threshold zone in Malaysian and Japanese males [J]. Journal of Thermal Biology, 2010, 35(2):70-76.
- [9] JOOYOUNG L, BAKRI L, MATSOU A, et al. Cold-induced vasodilation and vasoconstriction in the finger of tropical and temperate indigenes [J]. Journal of Thermal Biology, 2013, 38(2):70-78.
- [10] 刘红. 重庆地区建筑室内动态环境热舒适研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- LIU H. Thermal Comfort in Indoor Dynamic Environment in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- [11] 李文杰. 建筑室内自然环境下基于生理-心理的人体热舒适研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- Human Thermal Comfort Based on Physiology and Psychology in Naturally Indoor and Built Environment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [12] 杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- YANG L. Climatic analysis and architectural design strategies for bio-climatic design [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003. (in Chinese)

- Chinese)
- [13] 茅艳. 人体热舒适的气候适应模型[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.
- MAO Y. Study on climate adaptability of human being to thermal comfort in China [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] 闫海燕. 基于地域气候的适应性热舒适研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2013.
- YAN H Y. Study on adaptive thermal comfort on the basis of regions and climates of China [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal environment conditions for human occupancy [S]. Atlanta, GA, American Society of Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2011.
- [16] 1998. Ergonomics of the thermal environment instruments of measuring physical quantities: ISO7726 [S]. 1998.
- [17] Ergonomics-evaluation of thermal strain by physiological measurements: ISO9886:2004 [S]. 2004.
- [18] 杨永录. 体温和体温调节生理学[M]. 北京:人民军医出版社. 2015.
- YANG Y L. Temperature and temperature regulating physiology [M]. Beijing: People's Military Medical Press. 2015. (in Chinese)
- [19] 李百战,郑洁,姚润明,等. 室内热环境与人体热舒适 [M]. 重庆:重庆大学出版社,2012.
- LI B Z, ZHENG J, YAO R M, et al. Indoor thermal environment and human thermal comfort [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 胡玲)