

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.009



中国南北方男性大学生在可接受冷环境区的生理适应性和主观感受

林宇凡^{a,b}, 杨柳^b, 郑武幸^b, 任艺梅^b

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

摘要:为了研究中国南北方男性大学生在可接受冷环境区生理适应的自主性调节反应和主观感受的差异,选取南北方受试者各16名,遴选生理指标包括皮肤温度、心率(HR)、心率变异性(HRV)、呼吸率、血容量(BVP)、肌电(EMG),填写主观问卷。结果表明:南方受试者主观感受好于北方受试者;平均皮肤温度、EMG均值稍高于北方受试者;北方受试者心率值、LF/HF均值高于南方受试者;南北受试者从中性环境进入可接受冷环境区,南方受试者的主观感受指标差分均值和生理反应指标差分均值出现显著性差异的实验时间段明显少于或晚于北方受试者。结论:北方受试者对偏冷的环境更敏感,冷耐受力比南方受试者弱;冷习服弱,产生了较强的生理调节现象;南方受试者基础代谢和非战栗产热(代谢产热)稍高于北方受试者,产生较小的生理调节,有较好的冷环境忍耐力和较强的冷习服能力。

关键词:冷环境区;生理;适应性;主观感受

中图分类号:TU111.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0055-08

Physiological adaption and subjective sensation in cold acceptable environment zone between male college students of southern and northern of China

Lin Yufan^{a,b}, Yang Liu^b, Zheng Wuxing^b, Ren Yimei^b

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

Abstract: This paper focuses on the physiological adaption and subjective sensation in cold acceptable environment zone between male college students of southern and northern of China. 16 subjects of southern China and 16 subjects of northern China were selected, to test their physiological parameters including skin temperature, heart rate (HR), heart rate variability (HRV), blood volume pulse (BVP) and electromyogram (EMG), and to ask the subjects to fill in questionnaires. The experimental results revealed that: In terms of all subjective questions, southern subjects give a better response than northern subjects; and have a higher average skin temperature and EMG value and a lower HR, LF/HF values than northern subjects; From neutral environment to cold acceptable environment zone, the experimental period of

收稿日期:2017-09-22

基金项目:国家杰出青年科学基金(51325803)

作者简介:林宇凡(1974-),女,副教授,博士生,主要从事人体生理热舒适研究,E-mail:376077580@qq.com.

杨柳(通信作者),女,教授,博士生导师,E-mail:yangliu@xauat.edu.cn.

Received:2017-09-22

Foundation item:National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51325803)

Author brief: Lin Yufan (1974-), associate professor, PhD, main research interest: human thermal comfort, E-mail: 376077580@qq.com.

Yang Liu (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yangliu@xauat.edu.cn.

appearing the significant difference of subjective perception index differential mean and physiological response index differential mean of southern subjects are later or less than northern residents. Conclusions are: 1) north subjects are more sensitive to cold environment, which are weaker to cold tolerance, have weak cold acclimation and have strong physiological regulation phenomenon; 2) Southern subjects have better tolerance to environment, which lead to result of small physiological regulation; they have a strong cold acclimation ability and their basic metabolism and non-shivering thermogenesis (NST) are slightly higher than the northern.

Keywords: cold environment zone; physiology; adaption; subjective sensation

现场研究的热适应模型发现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建立热中性温度与气候要素函数关系,关注的是气候要素对室内热中性温度的影响结果,忽略了二者建立函数关系的生理适应性。因此,学者们开始关注人体生理适应性,大都采用皮肤温度作为生理指标^[1-2],原因是皮肤温度随环境参数变化最敏感,并与 TSV(热感觉投票)和 TCV(热舒适投票)相关程度较高。伯克利团队在实验室模拟不同热环境(包括均匀和不均匀环境、瞬时和稳定环境),研究人体局部热感觉、热舒适和人体整体热感觉、热舒适对环境温度的响应反应^[3-6],发现手指温度和手指与前臂温度梯度差值与整体热感觉的相关性高^[6];其他学者也发现人体的热舒适性在很大程度上是由皮肤温度决定的,额头和躯干保持较高的皮肤温度,但四肢对建筑环境的温度变化反应敏感^[7];当长时间暴露在 20 °C 时,较低的皮肤温度会产生冷感觉,被认定为热舒适低限^[8];人体躯干部分,尤其是腹部和中部,外侧区域明显比内侧区域对环境更敏感^[9];Li 等^[2]发现瞬态热环境下,TSV 发生在温度变化升高和降低阶段;TSV 最大变化发生在温度降低阶段,表明人体对冷更敏感,敏感部位为头、胸、背、腿;此外,皮肤温度的变化率更适合预测 TSV,在温度降低阶段皮温的变化率与 TSV 呈显著线形相关。

但在热环境下,人体是通过自主性调节进行生理适应,有多个生理指标参与生理适应过程。生理自主性调节是指人体皮肤温度感受器感受到环境温度后,神经传入下丘脑经综合分析后,通过神经传出,调节人体产热和散热的生理活动,如寒颤、发汗、血管舒张和收缩等,以保持体温相对恒定的调节过程^[10],皮肤温度不能够全面地解释人体在不同热环境下的生理适应过程,因此,除了关注皮肤温度外,还将关注其他生理指标,包括心率(HR)、心率变异性(HRV)、呼吸率、血容量(BVP)、肌电(EMG),这

是研究背景之一,也是实验设计时进行生理指标遴选依据。

中国南方和北方的地理分界线是秦岭淮河线,其以气候类型、气温和降水量为划分依据。在气候类型上,这是温带季风气候(北方)和亚热带季风气候(南方)的分界线;气温上,这是一月份月平均气温高于 0 °C(南方)和低于 0 °C(北方)的分界线;降水量上,这是年降水量大于 800 mm(南方)和小于 800 mm(北方)的分界线,是南方湿润地区和北方半湿润地区的分界线。中国政府从工程的技术经济合理性考虑,参考秦岭淮河线这条中国南北地理分界线作为中国南方和北方集中采暖的分界线。由于中国南方和北方显著的气候差异和冬季集中采暖经历差异,导致中国南北居民对建筑热环境的生理适应能力不同,这是研究背景之二。

针对这两个研究背景,选取中国南北方男性大学生(简称南北受试者)为研究对象,采用实验研究,人工模拟冷环境,观察南北受试者的生理自主性调节反应和主观感受,研究目标是:1)揭示生理自主性调节反应和主观感受的差异点;2)揭示冷习服表现差异点;3)解释生理自主性调节反应和主观感受差异的原因。

1 实验方法与材料

1.1 受试者

依据中国南北地理分界线秦岭淮河线,分别遴选 16 名来自北方地区的大学三年级学生和 16 名来自南方地区的大学一年级新生,全部为男性。北方组招募出生在中国北方且一直在北方地区生活学习,并有集中采暖经历的受试者;南方组招募出生在中国南方,在南方地区生活学习,目前已在西安生活学习 2 个半月,尚未适应北方气候环境,并且无集中采暖经历的受试者。受试者身体测试数据见表 1。

表 1 受试者统计汇总表

Table 1 Statistic list of participants

组别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI
北方组	20.75±1.2	171.25±10.9	65.56±7.2	22.42±2.8
南方组	18.50±0.8	171.06±7.9	59.18±6.2	20.24±2.2

实验对受试者的要求:受试者身体健康;身体状况和精神状态良好;保持皮肤清洁,避免干扰生理指标数据;测试前,对受试者进行动员,包括阅读实验说明书和主观问卷调查;按照 ASHRAE 标准^[11],要求受试者服装为: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),受试者需衣着宽松;实验阶段保持安静,以坐姿进行测试。

1.2 实验方案设计以及实验流程

图 1 是环境温度影响人体生理适应示意图^[12]。人体对热环境的适应有 3 个区域,分别是舒适温度区、可适应温度区和不适应温度区。在舒适温度区边界线(B 点)与可适应温度区边界线(A 点)之间,存在可接受的冷环境区,南北受试者因为不同的室内外热经历背景导致他们从 B 点到 A 点之间(可接受冷环境区)的生理适应和主观感受表现不同,因此,实验通过人工控制模拟处于中性环境(实验设计为 24℃)进入可接受冷环境区的热环境(实验设计为 20℃、17℃和 14℃),实验流程见图 2。

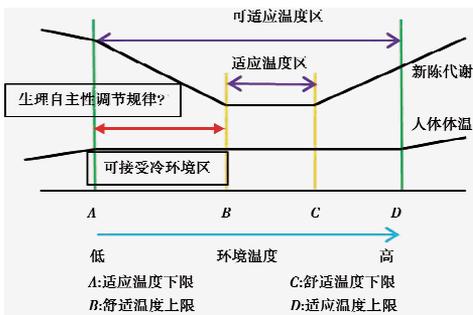


图 1 环境温度影响人体生理适应示意图

Fig. 1 Environment temperature on human physiological influence

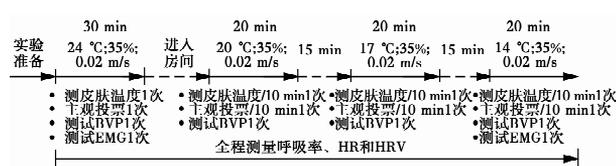


图 2 实验流程图

Fig. 2 Experimental procedures

实验在 2014 年 11 月下旬开始进行,为防止人体生理指标的昼夜生理波动,实验时间全部选择在

白天进行。

1.3 室内热环境测试参数和仪器设备

室内热环境参数的测试方法参照 ISO-7726^[13]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±0.3℃;精度±5%);微风仪(SWA03;手持式;精度±0.03 m/s);黑球温度仪(HQZY-1;自记式;精度±0.3℃)。

1.4 主观问卷设计

问卷内容包括受试者对室内环境参数的主观评价和主观感觉评价两个方面。热舒适(TCV)、热感觉(TSV)投票、气流感投票和潮湿感投票均采用 7 级标尺,可接受程度投票采用 4 级标尺,期望温度采用 3 级标尺。

1.5 生理指标遴选以及测试仪器

依据人体自主性生理适应理论^[10],选取皮肤温度指标观察皮肤温度变化;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;选取呼吸率观察新陈代谢;选取指尖脉搏血容量(BVP)观察皮肤血管的舒张或收缩状态;选取肌电量(EMG)观察骨骼肌放电。皮肤温度测点部位采用 14 点,计算式^[14]为:

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

式中: T_{msk} 为平均皮肤温度,℃。

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^[14],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 。

皮肤温度通过热电偶测出(Pt1000 精度为±0.1℃,测量范围为-100~100℃);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,型号:KF1),生参仪佩戴前需用医用酒精对皮肤进行擦拭,保证信号检测的稳定性,佩戴方式见图 3,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)。其中,BVP 指标通过 BVP 连线,夹住测试者左手食指测出;EMG 指标是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,见图 4。

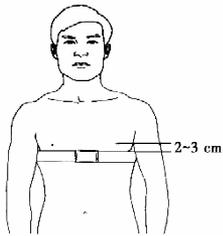


图 3 生理参数检测仪
佩带示意图
Fig. 3 A sketch of wearing
physiological parameters
detector



图 4 生理参数反馈仪
Fig. 4 Physiological parameter
biofeedback instrument

1.6 数据整理和分析方法

采用 SPSS22.0 版数理统计软件对实验数据进行统计学分析。相同环境下南北受试者差异性分析采用独立样本 T 检验,观察南北受试者两组数据均值是否存在显著性差异,目的是发现南北受试者的生理调节反应和主观感受的差异;不同环境下的差异性分析采用配对样本 T 检验,分析南北受试者从中性环境~可接受冷环境区的生理调节反应和主观感受在不同的实验时间段,数据的成对差分均值是否存在显著性差异,目的是发现南北受试者的生理调节反应和主观感受随环境温度变化的不同。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

室内热环境参数测试结果见表 2。表中对环境参数进行了描述性的统计分析,包括测试数据的平均值和标准差。平均辐射温度分别是 19.3、16.7、14.1 $^{\circ}\text{C}$,与室内空气温度接近。

表 2 环境参数测试结果统计表

Table 2 Test results of environment parameter

设计工况/ $^{\circ}\text{C}$	室内温度/ $^{\circ}\text{C}$	室内湿度/%	室内风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
20	19.83 \pm 0.28	34.65 \pm 4.16	0.03 \pm 0.01
17	16.9 \pm 0.23	34.25 \pm 5.18	0.03 \pm 0.01
14	14.1 \pm 0.26	36.38 \pm 6.99	0.02 \pm 0.01

2.2 主观问卷调查结果

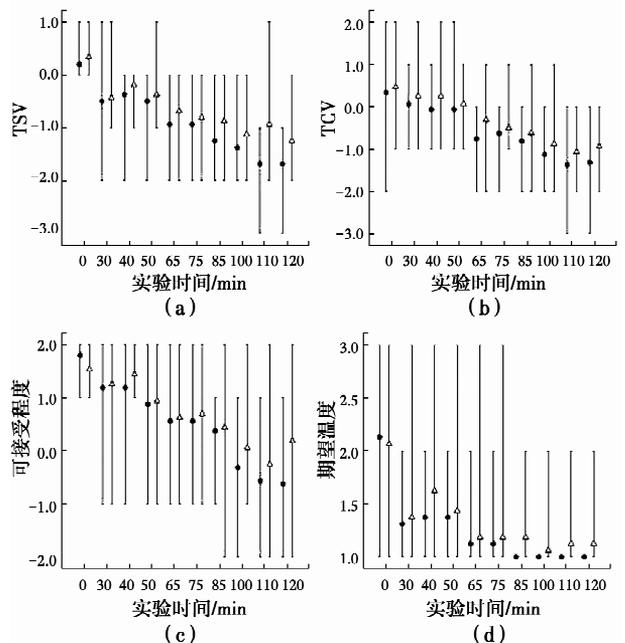
实验 0~30 min 处于中性环境,室内温度设定

为 24 $^{\circ}\text{C}$,30~50 min 处于 20 $^{\circ}\text{C}$,65~85 min 处于 17 $^{\circ}\text{C}$,100~120 min 处于 14 $^{\circ}\text{C}$ 。50~65 min、85~100 min 是温度调整期。

由图 5(a)、(b)看出,南方受试者的热感觉(TSV)和热舒适(TCV)评价均明显好于北方受试者。南方受试者的 TSV 评价指标介于“适中”和“微冷”之间;而北方受试者进入冷环境后,TSV 评价下降斜率明显高于南方受试者,介于“微冷”和“冷”之间;南北受试者的热舒适(TCV)评价均呈下降状态,但南方受试者的评价好于北方受试者。

南北组的 TSV、TVC 主观投票差异性分析的非参数秩和检验结果发现,南方组的秩均值均大于北方组,TSV 主观投票在 17 $^{\circ}\text{C}$ 和 14 $^{\circ}\text{C}$ 环境有显著差异($p = 0.047 < 0.05$; $p = 0.01 < 0.05$),但 TCV 主观投票均无显著性差异。

由图 5(c)、(d)看出,尽管南北受试者均期望室内环境温度稍热一些,但北方组的温度期望更加强烈;同样,南方组对环境的接受程度明显好于北方组,评价指标介于约 1.5~0 之间,表明这个环境是可以接受的,但北方组评价一直呈下降趋势,指标介于约 1.0~-0.5 之间,表明这个环境是介于“刚刚可接受”和“刚刚不可接受”之间,特别在 14 $^{\circ}\text{C}$ 的环境下,评价指标的斜率急剧下降。



注: ● 均值-北方受试者 △ 均值-南方受试者

图 5 南北受试者主观感受

Fig. 5 Subjective sensations between southern
and northern subjects

南方受试者的期望温度评价明显好于北方受试者,尽管南北受试者均期望室内环境温度稍热一些;

同样,南方受试者对环境的接受程度明显好于北方受试者,表明这个环境是可以接受的。

非参数秩和检验结果发现,环境可接受程度评价和期望温度评价在 14 ℃ 时有显著性差异 ($p = 0.034 < 0.05$; $p = 0.022 < 0.05$)。

2.3 生理反应实验结果

由图 6 和表 3 看出,南方受试者平均皮肤温度高于北方受试者,且有显著性差异 ($p = 0 < 0.05$)。

表 3 南北组平均皮肤温度差异性分析

Table 3 Average skin temperature difference analysis

组别	平均皮温/℃		
	20	17	14
北方组	32.64	31.73	30.65
南方组	33.45	32.60	31.69
Sig.	0	0	0

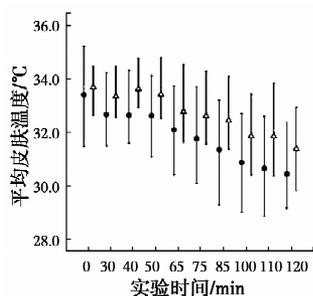


图 6 南北受试者平均皮肤温度
Fig. 6 Average skin temperature between southern and northern subjects

由图 7~10 可知,北方受试者的心率值高于南方受试者,无显著差异 ($p = 0.111 > 0.05$; $p = 0.709 > 0.05$; $p = 0.544 > 0.05$);呼吸率低于南方受试者,有显著差异 ($p = 0.004 < 0.05$; $p = 0 < 0.05$; $p = 0 < 0.05$)。

北方受试者 LFNU(高频标准化)稍高, HFNU(低频标准化)稍低, LF/HF 高于南方受试者,有显著差异 ($p = 0 < 0.05$; $p = 0 < 0.05$; $p = 0 < 0.05$)。根据 HRV 频域分析可知,环境温度降低会导致交感神经活跃,反映为 LFNU 升高, LF/HF 升高。HRV 频域实验结果与主观评价吻合。

北方受试者的 BVP(脉搏血容量)均值低于南方受试者,有显著差异 ($p = 0.006 < 0.05$; $p = 0.006 < 0.05$; $p = 0.05$), BVP 均值降低说明指尖血管都处于收缩状态,北方受试者血管收缩明显高于南方受试者。

南方受试者 EMG(肌电量)均值稍高于北方受试者,分别为 21.40、18.59 μV ,有显著性差异 ($p = 0.003 < 0.05$)。

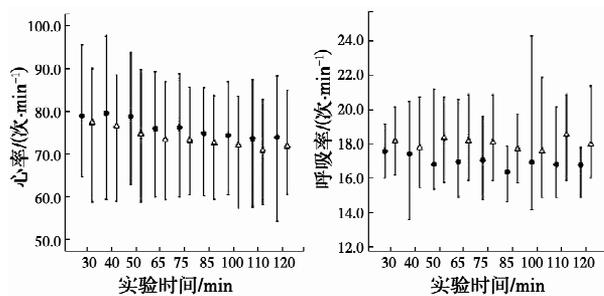


图 7 南北受试者心率

Fig. 7 Heartrate between southern and northern subjects

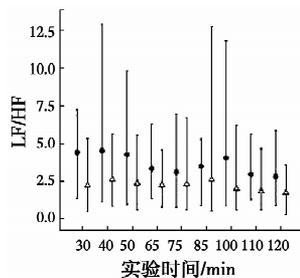
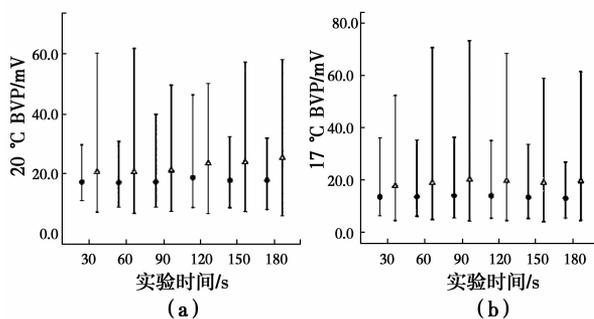
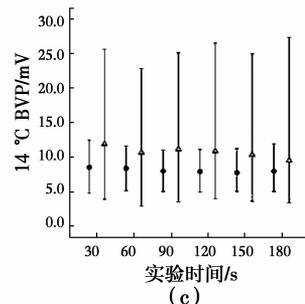


图 8 南北受试者呼吸率

Fig. 8 Respiration between southern and northern subjects



(a) (b)



(c) 图 9 南北受试者 BVP

Fig. 9 BVP between southern and northern subjects

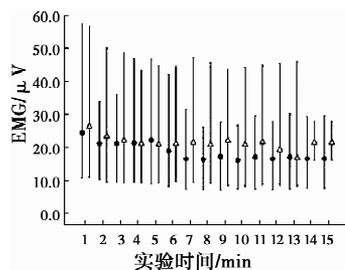


图 10 南北受试者 EMG

Fig. 10 EMG between southern and northern subjects

2.4 南北受试者从 24~14 °C 的主观感受和生理指标差异性分析

由表 4 看出,北方受试者的主观感受指标,其成对差分均值出现显著性差异的实验时间段早于或多于南方受试者,反映了北方受试者对偏冷环境的主观感受更强烈。

表 4 从 24~14 °C 的主观感受差异性分析
Table 4 Difference analysis of subjective sensations from 24~14 °C

指标	北方组		南方组	
	Sig.	实验时间段/min	Sig.	实验时间段/min
TSV	$p=0.001$	0~30	$p=0.004$	0~30
	$p=0.008$	50~65	$p=0.025$	50~65
	$p=0.025$	75~85	$p=0.025$	110~120
TCV	$p=0.008$	50~65	$p=0.046$	85~100
	$p=0.025$	85~100		
可接受程度	$p=0.021$	0~30		
	$p=0.025$	50~65	$p=0.035$	0~30
	$p=0.02$	85~100		
期望温度	$p=0.001$	0~30	$p=0.001$	0~30
	$p=0.046$	50~65	$p=0.046$	50~65

表 5 从 24~14 °C 的生理反应差异性分析
Table 5 Difference analysis of physiological responses from 24~14 °C

指标	北方组		南方组	
	Sig.	实验时间段/min	Sig.	实验时间段/min
平均皮温	$p=0$	0~30	$p=0.002$	40~65
	$p=0$			
	$p=0.003$	50~120	$p=0$	85~100
	$p=0$		$p=0.02$	110~120
左手	$p=0.002$	0~40	0	50~65
	$p=0.034$			
	$p=0$	50~65	0.001	85~100
	$p=0$	70~100	0.016	110~120
	$p=0$			
	$p=0.016$	110~120		
LF/HF	$p=0.011$	50~65		
	$p=0.048$	100~110		

由表 5 看出,北方受试者的平均皮肤温度和左手皮肤温度的成对差分均值出现的显著性差异早于或多于南方组; LF/HF 比值的成对差分均值出现的显著性差异多于南方受试者。

3 讨论

3.1 主观感受差异

分析表 4 和表 6 发现,南方受试者主观感受均好于北方受试者,热感觉(TSV)、期望温度、环境可接受程度有显著性差异;主观感受指标的成对差分均值,出现显著性差异的时间段晚于或少于北方受试者,说明南方受试者对偏冷的环境不敏感,环境冷耐力强。

表 6 主观感受和生理反应实验汇总
Table 6 Summary of subjective sensations and physiological responses

指标	实验结果	差异性分析
TSV	-1(北)-0.74(南)	有 ⁽¹⁾
TCV	-0.66(北)-0.4(南)	无 ⁽²⁾
环境可接受程度	0.3(北)0.6(南)	有
期望温度	1.1(北)1.3(南)	有
平皮/°C	31.67(北)32.58(南)	有
HR/(次·min ⁻¹)	76.2(北)73.7(南)	无
LF/HF	3.5(北)2.3(南)	有
BVP/mV	12.9(北)17.1(南)	有
EMG/μV	18.6(北)21.3(南)	有

注:(1)为无显著差异;(2)为有显著差异。

3.2 生理适应性差异

分析表 5~表 6 发现,南方受试者的皮肤温度高于北方受试者,有显著差异;皮肤温度随环境温度下降幅度低于北方受试者,有文献^[15]发现,体温升高 1 °C,基础代谢水平提高 13%,这表明南方受试者有较高的基础代谢产热,特别是夏热冬冷地区的居民处于湿冷和湿热的环境,冬季没有采暖的现实条件使他们的基础代谢水平和代谢率较高,以应对湿冷的气候条件。张宇峰等^[16]对湿热地区的城市居民和农村居民的热适应性分析发现,农村居民有较高的皮肤温度,认为这与基础代谢水平稍高有关,研究结论与本文结论吻合。

分析表 5~表 6 发现,北方受试者 HR 和 LF/HF 值高于南方受试者,表明其交感神经活动较剧烈,其他学者也发现了类似结果^[17-18]。

分析表 6 发现,北方受试者 BVP 成对差分均值下降显著大于南方受试者,说明手指血管收缩强度高于南方受试者,吕永达^[10]发现,交感神经紧张性增强,会使皮肤小动脉收缩,动-静脉吻合支关闭,血管收缩强烈。学者 Lee 等^[19-20]发现,热带人有延迟高峰血管舒张模式,特点是有明显的第 1 次血管收

缩和一个单一微弱的冷诱发血管舒张,再接微弱的第 2 次血管收缩,反映热带人的手指动静脉吻合有较少响应和较弱血管舒张,与本文结论吻合。

由表 6 分析发现,南方受试者的肌电量(EMG)均值略高于北方受试者,有文献^[10]发现,骨骼肌肉放电可以增加代谢产热,这表明南方受试者的基础代谢产热和非战栗产热(代谢产热)能力较强,因此,使南方受试者的皮肤温度高于北方受试者。

3.3 冷习服表现差异

南北受试者的冷习服表现见表 7。南方受试者皮肤温度高于北方受试者,说明其基础代谢稍高;HR 和 LF/HF 稍低,BVP 和 EMG 稍高,说明北方受试者交感神经活跃导致血管收缩强烈,而南方受试者非战栗产热(代谢产热)能力强于北方受试者,这些表现使南方受试者产生较小的生理调节,有较强地冷习服能力;而北方受试者冷习服弱,产生了较强的生理调节现象。

表 7 冷习服表现

Table 7 Cold acclimation performance summary

生理指标	实验结果	差异性	生理自主性调节分析
平均皮温/℃	$T_{南} > T_{北}$	有	南方组基础代谢稍高
各点皮肤温度/℃	大部分 $T_{南} > T_{北}$	多数有	北方组随环境温度的变化下降显著
呼吸率/(次·min ⁻¹)	呼吸率 _南 > 呼吸率 _北	有	南方组基础代谢稍高
HR/(次·min ⁻¹)	HR _南 < HR _北	无	北方组交感神经较活跃
LF/HF	LF/HF _南 < LF/HF _北	有	北方组交感神经较活跃
BVP/mV	BVP _南 > BVP _北	有	北方组交感神经活跃导致血管收缩强烈
EMG/ μ V	EMG _南 > EMG _北	有	南方组非战栗产热(代谢产热)能力强于北方组

3.4 生理适应调节和主观感受差异的原因

通过实验研究以及分析,建立了生理适应调节和主观感受影响南北受试者的热舒适评价过程,见图 11。由图 11 看出,南北受试者的生理自主性调节和主观感受差异的原因为:南方受试者稍高的皮肤温度导致冷觉感受器放电频率较低,因此,热感觉评价好于北方受试者;室内外热经历背景(较宽的环境忍耐力和较好的冷习服能力)导致热舒适评价好于北方受试者;室内外热经历背景(较好的冷习服能

力)导致有较高的非战栗产热和基础代谢产热,因此,皮肤温度和 EMG 值较高;有较少的生理调节现象,表现为交感神经不活跃,手指血管收缩不强烈,因此 HR、LF/HF 值较低,BVP 值较高。

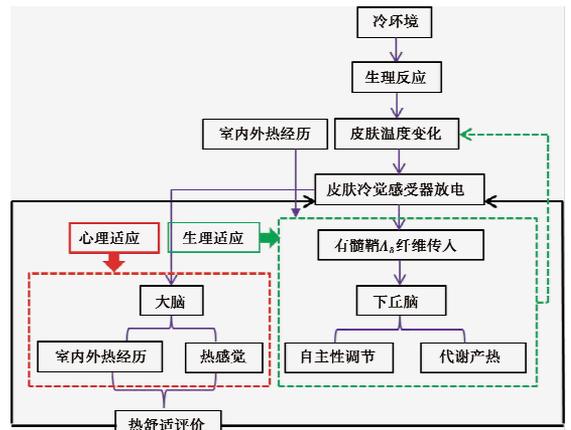


图 11 生理适应和主观感受对热舒适作用框架图

Fig. 11 The influence of physiological adaption and subjective sensations on thermal comfort

4 结论

通过南北方男性大学生可接受冷环境区实验,结合实验结果和数理统计分析,得出以下结论:

- 1)南方受试者主观感受好于北方受试者。
- 2)南方受试者平均皮肤温度、EMG 均值稍高于北方受试者,心率值、LF/HF 均值低于北方受试者。
- 3)从中性环境进入可接受冷环境区,南方受试者的主观感受指标和生理指标的成对差分均值,出现显著性差异的实验段,少于或晚于北方受试者。
- 4)南方受试者有较高的非战栗产热(代谢产热)。在冷环境里交感神经不活跃,手指血管收缩强度弱于北方受试者。
- 5)南方受试者冷习服能力强,对冷环境不敏感和有较强的冷环境耐受力。

参考文献:

[1] LIU H, LIAO J, YANG D. The response of human thermal perception and skin temperature to step-change transient thermal environments [J]. Building and Environment, 2014,73:232-238.

[2] LI B, LI W, LIU H, et al. Physiological expression of human thermal comfort to indoor operative temperature in the non-HVAC environment [J]. International Journal of Indoor and Built Environment, 2010, 19: 221-229.

[3] CHARLIE H, ZHANG H, ARENS E, et al. Skin and core temperature response to partial- and whole-body

- heating and cooling [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2004, 29: 549-558.
- [4] ARENS E, ZHANG H, CHARLIE H. Partial and whole-body thermal sensation and comfort: Part I: Uniform environmental conditions [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2006, 31: 53-59.
- [5] ZHANG H, ARENS E, CHARLIE H, et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments; Part I: Local sensation of individual body parts [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 380-388.
- [6] DANNI W, ZHANG H, ARENS E, et al. Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 3933-3943.
- [7] GARCIA-SOUTO M, DABNICHKI P. Skin temperature distribution and thermoregulatory response during prolonged seating [J]. *Building and Environment*, 2013, 69: 14-21.
- [8] THAM K, WILLEM H. Room air temperature affects occupants' physiology, perceptions and mental alertness [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 40-44.
- [9] OUZZAHRA Y, HAVENITH G, B REDORTIER. Regional distribution of thermal sensitivity to cold at rest and during mild exercise in males [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2012, 37: 517-523.
- [10] 吕永达. 特殊环境生理学[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2003.
LV Y D. Special environment physiology [M]. Beijing: Military Medical Press, 2003. (in Chinese)
- [11] ASHRAE. Thermal environment conditions for Human occupancy; ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 [S]. Atlanta, GA, American Society of Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2011.
- [12] 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)
- [13] Ergonomics of the thermal environment instruments of measuring physical quantities: ISO7726: 1998 [S]. 1998.
- [14] Ergonomics-Evaluation of thermal strain by physiological measurements; ISO9886:2004 [S]. 2004.
- [15] 李百战. 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. Indoor thermal environment and human thermal comfort [M]. Chongqing: Chongqing University Press 2012. (in Chinese)
- [16] 张宇峰, 张仲军, 金玲. 湿热地区农村居民的热舒适研究[C]//第12届全国建筑物理学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 157-160.
ZHANG Y F, ZHANG Z J, JIN L. Thermal comfort of people in rural areas of the hot-humid regions of China [C]// The 12th National Architectural Physics Academic Conference Proceedings. Beijing: Chinese Architecture & Building Press, 2016: 157-160. (in Chinese)
- [17] LUO M, JI W, CAO B, et al. Indoor climate and thermal physiological adaptation: Evidences from migrants with different cold indoor exposures [J]. *Building and Environment*, 2016, 98: 30-38.
- [18] YU J, CAO G, CUI W, et al. People who live in a cold climate: thermal adaptation differences based on availability of heating [J]. *Indoor Air*, 2013, 23: 303-310.
- [19] LEE J, BAKRI I, TORAMOTO S, et al. Cutaneous thermal thresholds of tropical indigenes residing in Japan [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2011, 36: 461-468.
- [20] LEE J, BAKRI I, MATSUO A, et al. Cold-induced vasodilation and vasoconstriction in the finger of tropical and temperate indigenes [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2013, 38: 70-78.

(编辑 胡玲)