

温度阶跃下不同年龄群体生理与 主观热响应实验研究

司笑萌¹, 张九红¹, 安江¹, 马鸣霄²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要: 以沈阳市商场为研究对象, 探讨温度阶跃变化且适度活动状态时, 不同年龄群体的生理参数和主观评价随时间变化的规律. 共招募60名受试者, 设定冷暴露温度为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 室内温度工况为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, 经历热-冷-热3个阶段进行实验研究. 结果表明, 冷暴露后人体需要约18 min达到新的生理稳定状态, 其中儿童组恢复时间更短; 血压值在温度阶跃变化时存在显著性差异, 儿童组血压变化幅度约为中年组的2.5倍; LF/HF(低频/高频)在不同年龄组间差异明显. LF/HF值受不同年龄人群和环境温度条件的影响较为显著, 可作为评价不同环境条件下人体热舒适的潜在指标.

关键词: 温度阶跃变化; 年龄分组; 生理参数; 热舒适; 热感觉

中图分类号: TU 111.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)11-0154-09

Experimental Study on Physiological and Subjective Thermal Responses of Different Age Groups Under Stepwise Temperature Changes

SI Xiao-meng¹, ZHANG Jiu-hong¹, AN Jiang¹, MA Ming-xiao²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Automation Science & Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China. Corresponding author: ZHANG Jiu-hong, E-mail: zhangjiuhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Taking Shenyang shopping malls as the research subject, this study investigated the temporal variations in physiological parameters and subjective evaluations among different age groups under stepwise temperature changes during moderate activity. A total of 60 participants were recruited. The experiment involved cold exposure at $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ and indoor exposures at $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Participants underwent three successive phases for experimental research: hot, cold, and hot exposure. The results show that it takes approximately 18 minutes for the human body to reach a new physiological steady state after cold exposure, with children demonstrating quicker recovery time. Blood pressure varies significantly under stepwise temperature changes, with the variation range in the children group approximately 2.5 times that of the middle-aged group. LF/HF (low frequency/high frequency) shows significant differences among different age groups. The LF/HF value is significantly influenced by different age groups and environmental temperature conditions and can be used as a potential indicator for evaluating thermal comfort of the human body under various environmental conditions.

Key words: stepwise temperature change; age group; physiological parameter; thermal comfort; thermal sensation

沈阳属于严寒地区,冬季室内外温差大,供暖周期较长.通过前期调研分析发现,商场的空调设置温度往往高于标准上限,仅注重控制室内温度,而忽视了不同年龄阶段群体的热舒适性,导致室内外温度阶跃变化的温差可达 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上.建筑物的室内温度每增加或减少 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,能源消耗将改变 $5\%\sim 10\%$ ^[1].消费者在商场这种公共场所中,对自身衣物调节和开关窗等行为受到限制,且处于短期逗留并大部分时间保持适度步行活动状态,室温过高带来的不舒适更加明显.商场建筑内人员密集,且年龄层次多样,如何提升不同消费群体的热舒适性成为亟需研究的问题.

环境参数的变化不仅影响人们的主观感受,还会引起生理刺激,从而影响生理指标.目前,越来越多瞬态热环境研究利用生理参数探讨热舒适^[2].这些研究认为,通过生理机制探讨温度变化对人体健康的影响,可以为客观事实提供理论依据.本文探讨了与热舒适和健康相关的生理参数,包括皮肤温度、心率变异性(heart rate variability, HRV)和血压.

皮肤是人体与环境保持热平衡的介质,对空气温度的变化非常敏感^[3].当环境温度升高时,皮肤温度也会相应升高且变得更加均匀,使各局部部位的温度差距减小;反之,当处于寒冷环境中,流向四肢的血流量减少,使局部温差增大.因此,皮肤温度常被认为是研究人工环境热舒适的重要生理指标之一^[4].心率变异性是指窦性心律在一定时间内周期性改变的现象,是反映自主神经功能的重要指标^[5].采用频域分析法将心电图(electrocardiogram, ECG)分成 5 min 短程分析,计算 HRV 指标,包括低频(low frequency, LF: $0.04\sim 0.15\text{ Hz}$)、高频(high frequency, HF: $0.15\sim 0.40\text{ Hz}$)和 LF/HF 比值^[6].其中 LF 成分主要反映交感神经活动,而 HF 成分则与副交感神经(迷走神经)活动密切相关.人体神经系统对温度变化十分敏感^[7-8],因此环境温度的变化会影响心血管系统的运作^[9].研究证实,人体热舒适与心率变异性之间存在紧密联系^[10].LF/HF 比值通过表征交感神经与副交感神经活动的动态平衡,能够反映体温调节情况,被认为是评价热舒适水平的有效生理指标^[11-12].因此,选取心率变异性作为探究冬季温度阶跃变化热环境的生理指标之一.血压与人体体温调节和健康密切相关,冷热刺激可引起血压的突然变化,导致身体不适甚至心肌梗塞或中风等.血压由收缩压(systolic blood pressure, SBP)

和舒张压(diastolic blood pressure, DBP)两个指标衡量.

以往关于人体热舒适的研究主要集中在办公室、住宅、教室等单一功能建筑中,参与实验的受试者通常处于静态或极低活动状态,且年龄构成相对单一,处于适度步行活动状态的公共场所的热舒适研究较少^[13].针对以上研究的不足,本文采用实验研究的方法,主要研究目的:1) 通过划分不同年龄阶段,分析各年龄群体在热环境下的生理响应差异;2) 量化严寒地区冬季温度阶跃变化下,较大温差对客观生理参数和主观感受随时间变化的规律;3) 为评估活动状态下的室内热环境及提升人体热舒适性提供理论依据和参考.

1 实验方案

1.1 实验设计及工况

辽宁省沈阳市位于严寒气候区.实验开展于2022年和2023年冬季,实验室位于东北大学,平面布置如图1所示.我国民用建筑供暖通风与空气调节设计规范(GB/T 50736—2012)规定商场冬季设计参数设置范围为 $18\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[14],实验期间,室外日最低和最高气温分别为 $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$,月平均气温为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.因此,初始温度设定为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷暴露温度设定为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.考虑到现场实际情况,相对湿度分别设定为 28% ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况)、 20% ($24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况),同时为了保证热房间在测试过程中气流均匀,空气流速控制在 $<0.1\text{ m/s}$,无明显气流扰动.实验所用检测仪器详情见表1,测量的环境参数包括空气温度、黑球温度、相对湿度和空气流速,测点位置距地面 1.1 m ^[15].

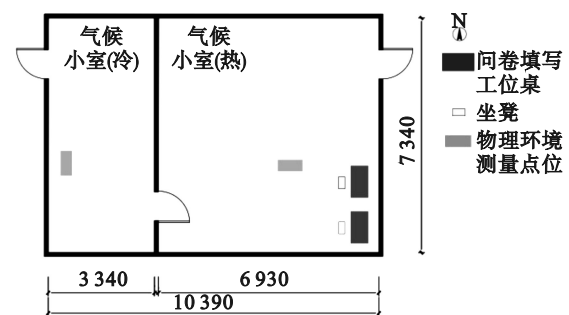


图1 平面布置图(单位:mm)

Fig. 1 Layout (unit:mm)

1.2 受试者信息及着装

实验共招募60名受试者,根据世界卫生组织标准进行年龄组划分^[16]: $6\sim 12$ 岁(儿童)、 $13\sim 18$ 岁(青少年)、 $19\sim 44$ 岁(青年)、 $45\sim 59$ 岁(中年).由

于冷暴露及行走时间较长,出于人身安全考虑,此次实验排除老年组.所有受试者均在沈阳地区生活至少1年以上,适应严寒地区冬季室外寒冷和干燥的气候条件,且身体健康,具体信息如表2所示.

表1 热环境测量仪器参数
Table 1 Thermal environment measuring instrument parameters

测量参数	设备型号	量程	精度
空气温度/°C	JT2180	-20~85	±0.5
黑球温度/°C	JT2180	-20~85	±0.5
空气流速/(m·s ⁻¹)	JT2180	0.05~2.0	±(0.05+2%)
		2.0~5.0	±(0.10±2%)
相对湿度/%	JTR08	0~100	±1.5

表2 受试者信息统计(均值±标准差)
Table 2 Subject information statistics (mean±standard deviation)

年龄组	年龄/岁	总计人数	身高/cm	体重/kg
儿童	6~12	15	128.4±12.6	28.5±7.6
青少年	13~18	15	158.8±8.6	58.2±4.4
青年	19~44	15	167.9±9.5	69.2±10.3
中年	45~59	15	165.7±8.6	58.9±11.2

实验要求受试者统一着装:内衣裤、毛衣、保暖裤、外裤、羽绒服、鞋.因实验对象涉及儿童及青少年,因此室外增加帽子、手套.Havenith^[17]通过对儿童体重、皮肤表面积及服装覆盖皮肤表面积的实际测量和计算,发现在同一季节中,儿童与成人的服装热阻值差异非常小,因此本次实验中儿童服装热阻计算与成人一致.根据人类居住热环境条件标准(ASHRAE 55-2023)推荐的组合服装热阻(式(1))^[18]推算,本实验的服装热阻值为1.5 clo,步行活动时的服装热阻值为1.3 clo(式(2))^[18].实验方案经东北大学生物与医学伦理委员会批准,并获得受试者书面知情同意.

$$I_{cl} \approx 0.82 \sum I_{cli} + 0.161. \quad (1)$$

式中: I_{cl} 为整套服装的热阻,clo; I_{cli} 为单件服装的热阻,clo.

$$I_{cl \text{ active}} = I_{cl} \times \left(0.6 + \frac{0.4}{M} \right), \quad (2)$$

$$1.2 \text{ met} < M < 2.0 \text{ met}.$$

式中: $I_{cl \text{ active}}$ 为步行活动时的服装热阻,clo; M 为代谢率,met.

1.3 参数选定和数据处理

皮肤温度采集选用纽扣高精度温度记录器探头(DS1922L),心率传感器(HeaLink R211A),

便携式血压测量手环.皮肤温度测量部位依次为前额、后背、前臂、手背和小腿,所有测点均位于受试者身体的左侧,以每2 s采集一次的频率连续采集数据.平均皮肤温度采用加权法计算(见式(3))^[19].ECG通过频域分析法,分成5 min/次计算HRV指标,得到LF, HF及LF/HF比值.根据GB/T 18048-2008^[20]标准提供的代谢热产出确定方法,活动类别为低新陈代谢率:1.7 met,(即100 W·m⁻²).所有数据采用IBM SPSS 26软件进行统计分析,显著性水平设为0.05($p < 0.05$).

$$t_{sk} = 0.20t_f + 0.50t_b + 0.18t_a + 0.05t_h + 0.07t_c. \quad (3)$$

式中: t_{sk} 为平均皮肤温度,°C; t_f 为前额皮肤温度,°C; t_b 为后背皮肤温度,°C; t_a 为前臂皮肤温度,°C; t_h 为手背皮肤温度,°C; t_c 为小腿皮肤温度,°C.

问卷设置了热感觉投票(thermal sensation vote, TSV)和热舒适投票(thermal comfort vote, TCV),标尺划分等级如图2所示.

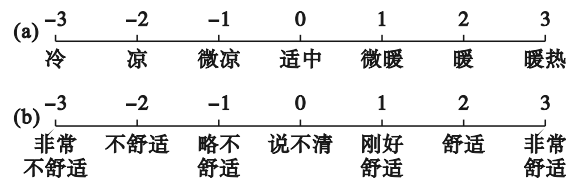


图2 主观问卷评价标尺

Fig. 2 Subjective questionnaire evaluation scales

(a)—热感觉;(b)—热舒适.

1.4 实验流程

实验开始之前,由实验人员将环境参数调节至实验设计工况.受试者进入房间后,将测量人体生理参数的传感器通过医用防水透明胶带贴伏在待测部位,确保传感器与皮肤接触良好,同时,为受试者佩戴血压测量手环.阶段1:初始阶段(18 °C/24 °C),静坐稳定10 min,并讲解实验过程和填写问卷的要求;阶段2:冷暴露阶段,持续30 min;阶段3:热适应阶段,持续30 min,受试者每10 min需填写一次主观问卷,实验流程如图3所示.整个实验过程中,除阶段1和填写问卷时间外,受试者均保持适度活动状态.

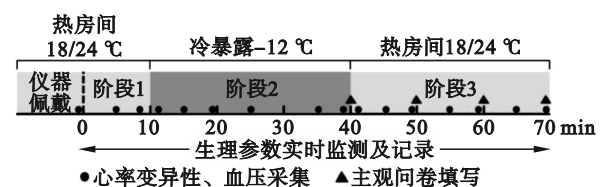


图3 实验流程

Fig. 3 Experimental procedure

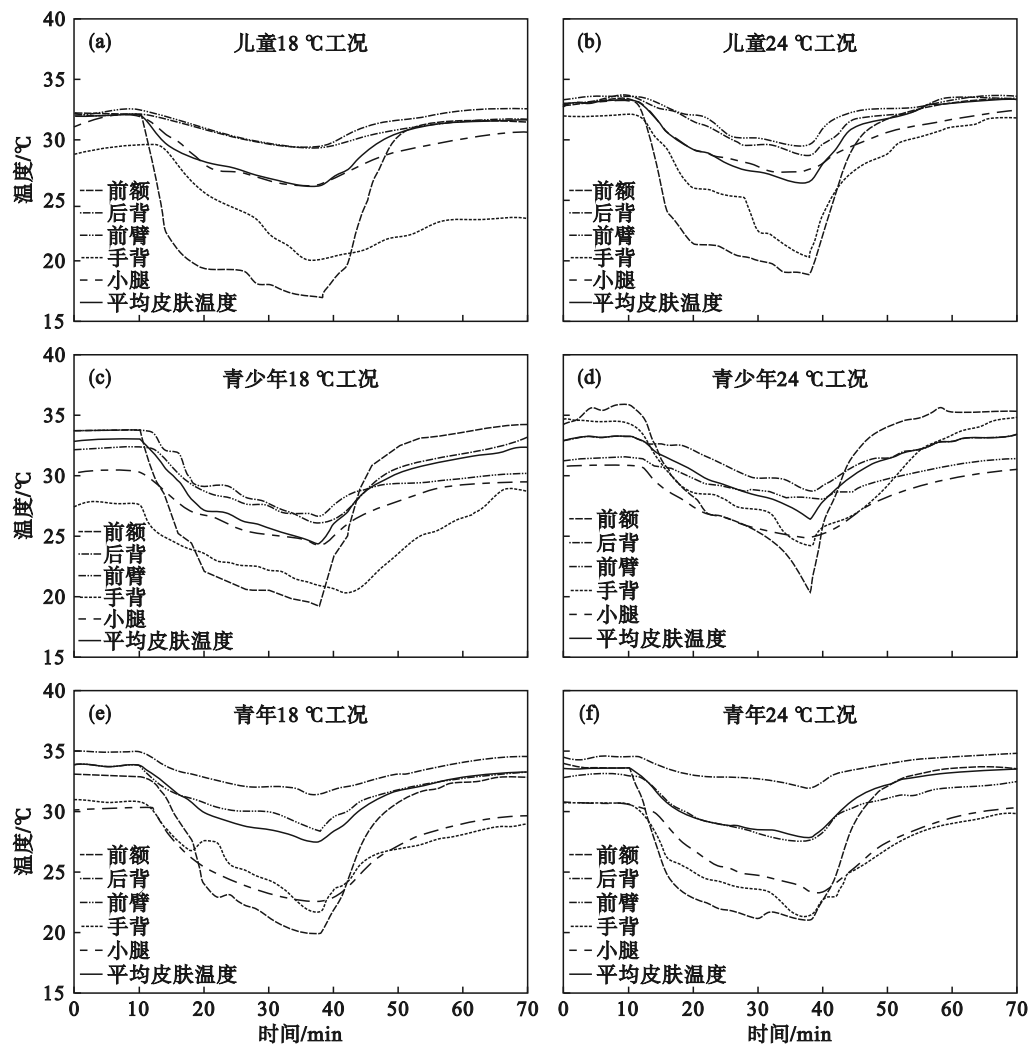
2 实验结果

2.1 皮肤温度

整个实验过程中,在 18 °C 和 24 °C 工况下,平均皮肤温度和局部皮肤温度的变化情况如图 4 所示.结果表明,平均皮肤温度随环境温度的变化而波动.阶段 1 所有年龄组的初始平均皮肤温度均值约为 33.2 °C,经过冷暴露 30 min 后,儿童和青少年组的皮肤温度下降幅度显著高于青年和中年组.阶段 3 结束时,在 18 °C 工况下,所有年龄组的皮肤温度均未恢复至初始值,而 24 °C 工况下,均恢复至高于阶段 1 的水平.局部皮肤温度:后背和前臂皮肤温度波动幅度最小(约 2.6~5.6 °C);手部皮肤温度波动幅度次之(约 10.4 °C);前额由于始终裸露在外,温度波动幅度最大(约 13.5 °C).儿童组在阶段 2 中前额皮肤温度下降较快,这主要是因为儿童的心脏较小,心脏功能较弱,毛细血管充盈不足,导致在低温环境下心脏无法有效地泵出血液至头部.在阶段 3 中,处于活动状态的儿童组新陈代谢速度快,具备较强的体温调节能力,皮肤温度迅速回升.相比之下,中年组的新陈代谢速度

较慢,体内产生的热量较少,因此在阶段 3 中的皮肤温度恢复速度较慢.所有年龄组在 18 °C 工况下平均约需 18 min,24 °C 工况下平均约需 12 min,皮肤温度趋于平稳.研究揭示了不同年龄组在不同环境温度下皮肤温度的变化规律,儿童在低温环境下体温调节有特殊性,新陈代谢速度对体温恢复有影响.

整体来看,表 3 总结了不同时刻平均皮肤温度的比较结果.在 18 °C 和 24 °C 工况下,经历温度阶跃变化的阶段 2 和阶段 3 中,前 5 min 内,平均皮肤温度均存在显著性差异.由于阶段 1 和阶段 3 处于相同的环境温度水平,故对两个阶段结束时的平均皮肤温度进行了配对比较.结果显示,18 °C 工况下,阶段 3 经过 30 min 的热适应后,皮肤温度未能完全恢复至阶段 1 的初始水平,差异具有统计学意义.然而,主观问卷调查表明,这一温度差异并未影响受试者的舒适度.相反,24 °C 工况下,尽管室内温度较高导致皮肤温度恢复到初始水平,主观评价却显示受试者感到不适.这表明皮肤温度是否恢复到初始水平对整体舒适度评价影响较小,可能更多地受到环境温度影响.



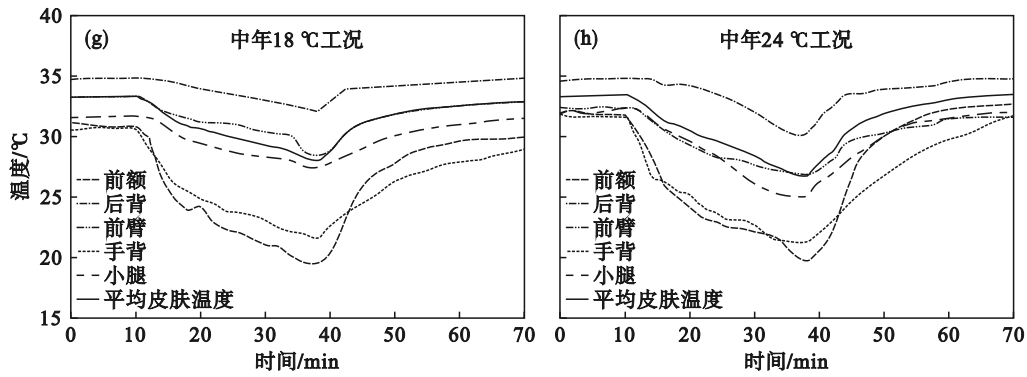


图 4 不同温度阶跃变化下的平均和局部皮肤温度

Fig. 4 Average and local skin temperature under different stepwise temperature changes
 (a)—儿童组:18 °C工况; (b)—儿童组:24 °C工况; (c)—青少年组:18 °C工况; (d)—青少年组:24 °C工况;
 (e)—青年组:18 °C工况; (f)—青年组:24 °C工况; (g)——中年组:18 °C工况; (h)——中年组:24 °C工况.

表 3 不同时刻平均皮肤温度的对比
 Table 3 Comparison of average skin temperature at different time points

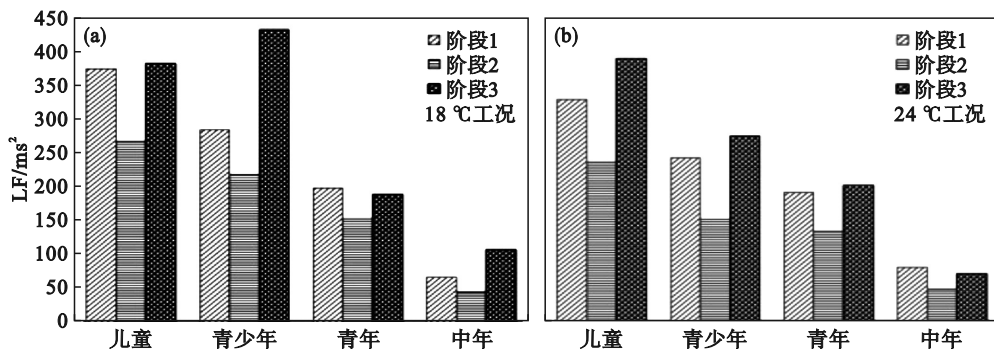
阶段	具体时刻/min	18 °C工况		24 °C工况	
		平均皮肤温度/°C	<i>p</i> 值(前后对比)	平均皮肤温度/°C	<i>p</i> 值(前后对比)
降温	11	33.0±0.7 °C	<i>p</i> <0.01**	33.4±0.2 °C	<i>p</i> <0.001***
	15	30.4±1.3 °C		30.9±0.4 °C	
升温	41	27.0±1.7 °C	<i>p</i> <0.01**	27.5±0.6 °C	<i>p</i> <0.001***
	45	30.1±1.0 °C		31.1±0.4 °C	
热适应	10	33.2±0.8 °C	<i>p</i> <0.01**	33.4±0.2 °C	<i>p</i> =0.402
	70	32.5±0.9 °C		33.5±0.3 °C	

注:***p*<0.01,****p*<0.001.

2.2 心率变异性

不同年龄人群在不同环境下的 LF, HF 和 LF/HF 比值变化情况如图 5 所示,总体来看,突然降温时 LF 和 LF/HF 比值降低,而突然升温时增大, HF 值的变化与之相反,这种现象在较大温差条件下更为显著.频域分析表明,年龄对 HRV 指标的影响存在差异,随着年龄增长, LF 和 HF 普遍下降,但 LF 仍占主导地位,青年和中年组的 HF 活动减少,导致 LF/HF 比值上升.因此,年龄对 HRV 及整体健康和适应能力的影响更为显著.

表 4 汇总的 LF/HF 比值显示,在不同热瞬态环境中,降温时比值减小,升温时比值增大.寒冷或炎热环境会促进交感神经活动,引起不适;而在舒适热环境下,迷走神经活动占优势,人体感受越舒适, LF/HF 比值越低.特别是儿童组在 24 °C 工况下的阶段 3 时, LF/HF 比值增大,显示出不适状态.这表明不同环境温度会影响 HRV 指标和人体健康, LF/HF 比值作为评价热舒适的生理指标具有重要的潜在应用价值.



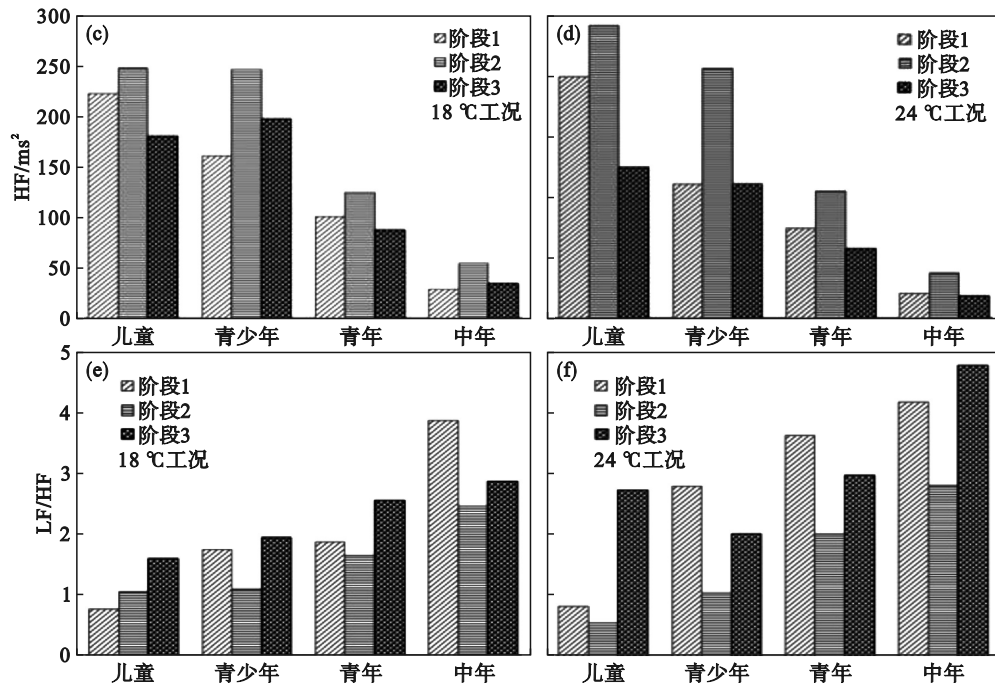


图 5 不同阶段下的 HRV 指标

Fig. 5 HRV indices at different stages

(a)—LF: 18 °C工况; (b)—LF: 24 °C工况; (c)—HF: 18 °C工况; (d)—HF: 24 °C工况;
(e)—LF/HF: 18 °C工况; (f)—LF/HF: 24 °C工况.

表 4 不同热瞬态环境下,不同年龄组 LF/HF 指标数据统计(均值±标准差)

Table 4 LF/HF index data statistics of different age groups under different thermal transient environments (mean±standard deviation)

阶段	18 °C工况				24 °C工况			
	儿童	青少年	青年	中年	儿童	青少年	青年	中年
阶段 1	0.77±0.36	1.75±1.78	1.88±0.87	3.87±3.35	0.82±0.37	2.79±3.20	3.62±3.73	4.17±3.60
9~11 min	1.06±1.22	1.10±0.73	1.66±0.63	2.97±3.28	0.55±0.20	1.05±0.72	2.01±0.41	2.80±3.48
阶段 2	1.51±2.01	1.78±0.81	2.21±2.16	2.27±1.43	1.40±0.25	1.73±1.98	2.52±3.00	1.44±2.88
39~41 min	1.60±0.91	1.95±1.30	2.56±2.30	2.47±3.22	2.73±1.70	2.01±0.41	2.97±2.31	4.77±5.34
阶段 3	0.90±0.49	1.90±0.22	2.21±2.16	6.12±6.40	3.21±2.16	2.36±1.70	2.85±1.82	3.26±1.47

2.3 血 压

图 6 展示了在不同热瞬态环境下收缩压(SBP)和舒张压(DBP)的变化情况,表 5 为显著性检验结果.结果表明,突然降温后 SBP 显著升高,且温差越大变化越剧烈.当温差超过 35 °C 时,总体 SBP 从 115±4 mmHg 增加到 129±8 mmHg;其中儿童组的 SBP 从 116±3 mmHg 增加到 136±4 mmHg(增加 20 mmHg),中年组变化最小,从 114±4 mmHg 增加到 122±5 mmHg(增加 8 mmHg),儿童组增幅是中年组的 2.5 倍.突然升温时:24 °C 工况下,SBP 总体下降至 116±3 mmHg;18 °C 工况下,下降至 119±5 mmHg.DBP 的变化趋势与 SBP 相似,即在热到冷环境阶跃变化时升高,在冷到热环境阶跃变化时降低.与 24 °C 工况相比,18 °C 工况阶跃变化的趋势较弱.此外,阶段 2 和阶段 3 的 30 min 适应过程中,不同温度工况下的 SBP 和 DBP 均

未显示显著性差异.这些结果表明,血压数值不能作为评估室内环境下人体的热舒适的有效指标.

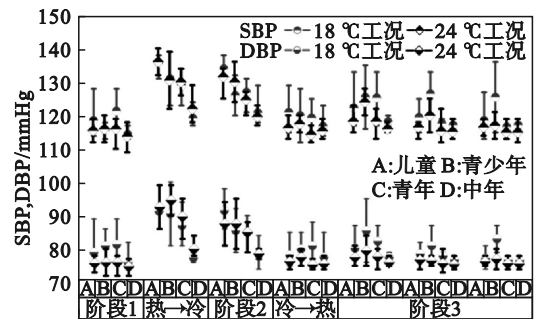


图 6 不同阶段下的 SBP 和 DBP

Fig. 6 SBP and DBP at different stages

基于全部数据,不同年龄组在不同阶段的 SBP 和 DBP 压差值如图 7 所示.从阶段 1 至阶段 2 的温度阶跃变化过程中,压差值是通过阶段 2 的血压值减去阶段 1 的初始血压值得到的,负值表

示前一阶段的血压高于后一阶段.结果显示,SBP和DBP的压差值变化幅度较小且变化模式相似.在热-冷和冷-热的温度阶跃变化中,SBP和DBP的压差值存在显著性差异,温度突然降低或升高时,SBP和DBP的压差值迅速增加且变化幅度较大,随后两个压差值均趋于平稳.

从压差值变化的幅度可以看出,儿童组和青

少年组的压差值变化较大,而中年组的压差值变化较小,表现出较为平稳的特征.此外,SBP对温度变化的反应比DBP更灵敏,单侧SBP的变化率比DBP更剧烈;且在温度阶跃变化后,SBP能够迅速趋于稳定,而DBP则表现出一定的滞后效应.这些发现有助于理解不同年龄群体在温度突变时的生理反应差异.

表5 18℃和24℃工况下,不同年龄组的SBP和DBP的事后多重比较

Table 5 Post hoc multiple comparisons of SBP and DBP across different age groups at 18℃ and 24℃

参数	配对比较	18℃工况				24℃工况			
		儿童	青少年	青年	中年	儿童	青少年	青年	中年
SBP	9 min 与 11 min 比较	0.000***	0.027*	0.013*	0.008**	0.000***	0.001***	0.001***	0.000***
	11 min 与 39 min 比较	0.700	0.659	0.656	0.350	0.065	0.947	0.157	0.236
	39 min 与 41 min 比较	0.003**	0.048*	0.045*	0.024*	0.000***	0.001***	0.001***	0.002**
	41 min 与 60 min 比较	0.522	0.628	0.554	0.814	0.915	0.947	0.854	0.842
DBP	9 min 与 11 min 比较	0.002**	0.357	0.203	0.391	0.000***	0.048*	0.002**	0.000***
	11 min 与 39 min 比较	0.942	0.620	0.645	0.539	0.073	0.289	0.167	0.236
	39 min 与 41 min 比较	0.003**	0.586	0.362	0.623	0.000***	0.045*	0.009**	0.015*
	41 min 与 60 min 比较	0.610	0.655	0.324	0.623	0.780	0.638	0.542	0.608

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

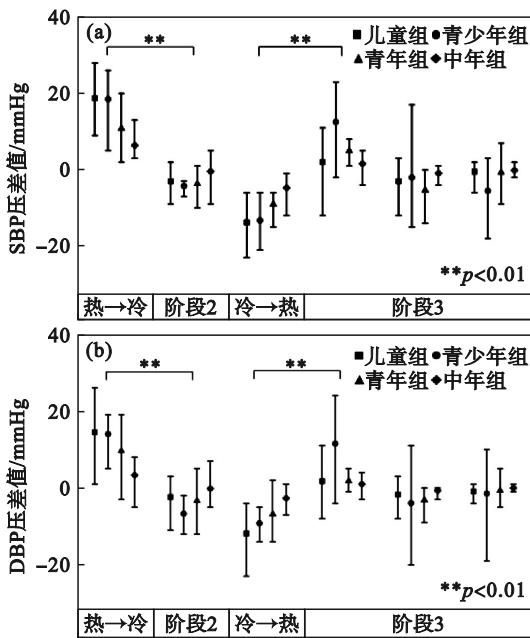


图7 不同阶段的SBP和DBP压差值

Fig. 7 Pressure difference between SBP and DBP at different stages

(a)—SBP; (b)—DBP.

从不同工况角度分析,瞬时血压变化量如图8所示.在24℃工况下,瞬时SBP的变化幅度显著大于18℃工况,表明温差越大,血压对环境变化的反应越敏感.此外,SBP的升压变化绝对值明显大于降压变化绝对值,显示出显著的方向效应.相比之下,DBP的瞬时变化显著性较低.血压的正常波动具有适应性和必要性,但较大幅度的

血压波动会引起生理健康问题^[21].

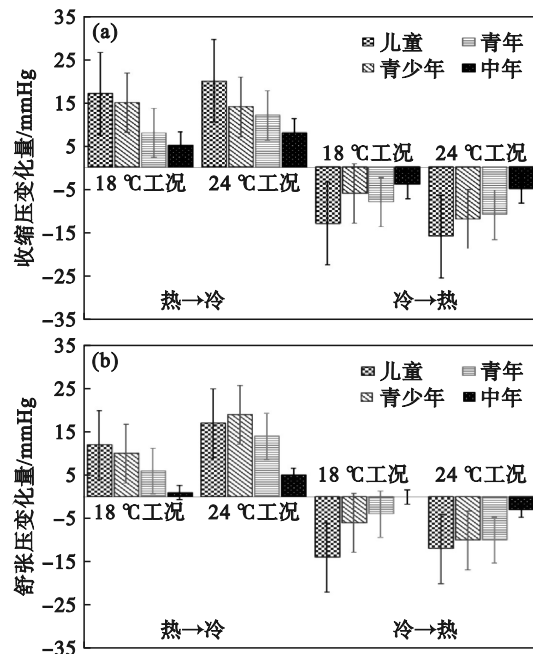


图8 温度变化对SBP和DBP的方向和强度影响

Fig. 8 Effect of temperature change on direction and intensity of SBP and DBP

(a)—SBP; (b)—DBP.

3 生理参数与主观评价分析

3.1 皮肤温度与主观评价

不同工况下,平均皮肤温度与不同时刻的热感

觉投票(TSV)、热舒适投票(TCV)之间的相关系数矩阵如表 6 所示.结果表明,主观评价和平均皮肤温度之间存在相关性.TSV 和 TCV 呈负相关; t_{sk} 与 TSV 存在强相关(皮尔逊相关系数 $r>0.7$),尤其在 24 °C 工况下相关性最强($r=0.876, p<0.01$); t_{sk} 与 18 °C 工况下的 TCV 存在显著相关性($p<0.01$),而在 24 °C 工况下相关性较弱;主观评价与不同年龄组在 18 °C 工况下的相关性高于 24 °C 工况.分析其

原因有:1) 24 °C 工况下,随着室内温度的升高,被试者的热感觉偏离了热中性,心理反应更加强烈,在 60~70 min 时,平均皮肤温度虽然趋于稳定状态,但热舒适程度降低,主观投票差异性减小;2) 24 °C 工况下,不同时刻的主观评价更加敏感;3) 在不同环境温度刺激下,人的心理和生理反应存在分离现象,其中生理反应较心理反应滞后.

表 6 不同工况下,年龄组、不同时刻、TSV、TCV、 T_{sk} 之间的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis among age group, different time, TSV, TCV, and T_{sk} under different working conditions

参数	18 °C 工况					24 °C 工况				
	年龄组	不同时刻	TSV	TCV	t_{sk}	年龄组	不同时刻	TSV	TCV	t_{sk}
年龄组	1	0	-0.480**	-0.386**	0.303*	1	0	-0.233*	-0.028	0.024
不同时刻	0	1	0.631**	0.457**	0.822**	0	1	0.740**	-0.506**	0.905**
TSV	-0.480**	0.631**	1	-0.326*	0.742**	-0.233*	0.740**	1	-0.586**	0.876**
TCV	-0.386**	0.457**	-0.326*	1	0.409**	-0.028	-0.506**	-0.586**	1	-0.285*
t_{sk}	0.303*	0.822**	0.742**	0.409**	1	0.024	0.905**	0.876**	-0.285*	1

注:表中 TSV 与 TCV 呈二次函数相关,其余呈线性相关.相关性强度分级($|r|$): $0.8\leq|r|<1.0$ 为极强相关, $0.6\leq|r|<0.8$ 为强相关, $0.4\leq|r|<0.6$ 为中度相关, $0.2\leq|r|<0.4$ 为弱相关;* $p<0.05$,** $p<0.01$ (双尾检验).

3.2 LF/HF 与主观评价

进一步分析不同工况下 TSV,TCV 与 LF/HF 之间的变化关系,如图 9 所示.通过多项式拟合分析可以看出,不同环境的主观评价水平对 LF 和 HF 的影响规律.LF/HF 比值较高时会产生令人不愉快的热感觉和不适,而在中性环境中(TSV: -1~1,TCV: 1~3),不同年龄组之间的差异性逐渐减小,LF/HF 比值趋近于 1 左右,表明交感神经和副交感神经的活动达到平衡,产生了人体的热舒适感,此时受试者处于热可接受环境中.分析其原因,在舒适状态下,交感神经活动强度较低,而副交感神经活动较强.因此,环境温度的变化会影响人的心理健康.在 TSV 评分为 3(热)时,平均 LF/HF 比值普遍高于 TSV 评分为 -3(冷)时.可能的原因是在非常热的环境中,人体热调节活动(如出汗和血管舒张)主要由交感神经控制;而在凉爽环境中,交感神经更局限,仅调节非寒颤产热^[22].因此,不同年龄人群和环境温度对 LF/HF 的影响较为显著,可以作为评价不同环境条件下人体热舒适的潜在指标.这一指标的应用有助于优化建筑物的温度设定,避免因设定过高温度而导致高能耗,从而实现有效节能.

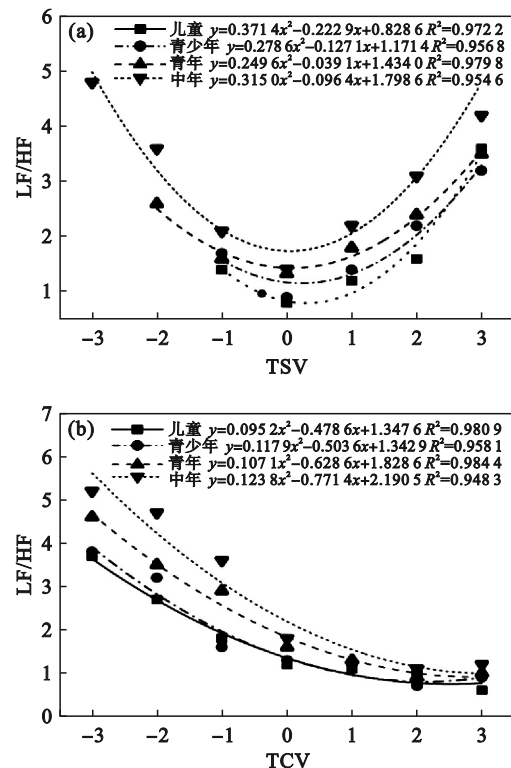


图 9 TSV,TCV 与 LF/HF 的关系 ($p<0.05$)
Fig. 9 Relationship between TSV,TCV and LF/HF ($p<0.05$)
(a)—TSV 与 LF/HF 的二次多项式回归;
(b)—TCV 与 LF/HF 的二次多项式回归.

4 结 论

1) 儿童和青少年组冷暴露后皮肤温度降幅更大(相比于青年和中年组),升温后儿童恢复更快.所有年龄组的皮肤温度在 18/24 °C 工况下分别需要约 18/12 min 趋于平稳状态.

2) 降温时 LF 值和 LF/HF 比值减小, HF 值增大;升温时 LF 值和 LF/HF 比值增大, HF 值减小.随年龄的增长, LF 和 HF 值普遍下降, LF/HF 比值增加.越舒适, LF/HF 比值越低.

3) 温度阶跃变化引起血压显著波动, 24 °C 工况下儿童组血压增幅最大(达 20 mmHg, 是中年组的 2.5 倍).收缩压比舒张压更敏感,但血压参数不适用于评估室内热舒适(不同温度工况下无显著差异),大温差会影响健康.

4) 24 °C 工况下,平均皮肤温度与 TSV 呈极强相关($r > 0.8$),温差越大相关性越强.在 18 °C 工况下,热感觉受年龄影响更为显著. LF/HF 比值与 TSV 呈二元函数关系,即在热中性时最低,向偏冷或偏热方向偏离时均升高.因此, LF/HF 比值可作为不同年龄人群动态热舒适的潜在指标.此外,人在不同温度环境刺激时,生理反应滞后于心理反应.

5) 研究表明,儿童和青少年偏好凉爽环境,中年人偏好温暖环境.商场应根据目标消费群体调整环境温度.

参考文献:

- [1] Duan C X, Ding X D, Shi F G, et al. PMV-based fuzzy algorithms for controlling indoor temperature [C]//2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Beijing, 2011: 1492-1496.
- [2] Xiong J, Lian Z W, Zhou X, et al. Potential indicators for the effect of temperature steps on human health and thermal comfort [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 113: 87-98.
- [3] Liu W W, Lian Z W, Deng Q H, et al. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study [J]. *Building and Environment*, 2011, 46 (2): 478-488.
- [4] 王泽军,王艾平,杨天,等.冷暴露环境下皮肤血管舒张反应的研究进展[J]. *军事医学*, 2022, 46(12): 951-954. (Wang Ze-jun, Wang Ai-ping, Yang Tian, et al. Research progress in skin vasodilation under cold exposure environments [J]. *Military Medical Sciences*, 2022, 46 (12): 951-954.)
- [5] 王斯涵,毕紫娟,袁培,等.脉率变异性与心率变异性相关性研究进展[J]. *辽宁中医杂志*, 2021, 48(10): 216-220. (Wang Si-han, Bi Zi-juan, Yuan Pei, et al. Research progress of pulse rate variability replacing heart rate variability [J]. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2021, 48(10): 216-220.)
- [6] Yao Y, Lian Z W, Liu W W, et al. Experimental study on physiological responses and thermal comfort under various ambient temperatures [J]. *Physiology & Behavior*, 2008, 93(1/2): 310-321.
- [7] 孙建辉,董力,胡松涛,等.基于脑电的温度阶跃变化环境下的身体热舒适研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22 (21): 9054-9060. (Sun Jian-hui, Tong Li, Hu Song-tao, et al. Human thermal comfort under temperature step-change environment based on electroencephalography [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(21): 9054-9060.)
- [8] 刘宁,王刚,贾恩灿,等.不同室温下的人体生理参数与热感觉相关性[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(1): 85-90. (Liu Ning, Wang Gang, Jia En-can, et al. Correlation between human physiological parameters and thermal sensation at different room temperatures [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(1): 85-90.)
- [9] Piñol R A, Mogul A S, Hadley C K, et al. Preoptic BRS3 neurons increase body temperature and heart rate via multiple pathways [J]. *Cell Metabolism*, 2021, 33 (7): 1389-1403.
- [10] Song C, Huang L, Liu Y F, et al. Effects of indoor thermal exposure on human dynamic thermal adaptation process [J]. *Building and Environment*, 2020, 179: 106990.
- [11] Wu Z B, Li N P, Schiavon S. Experimental evaluation of thermal comfort, SBS symptoms and physiological responses in a radiant ceiling cooling environment under temperature step-changes [J]. *Building and Environment*, 2022, 224: 109512.
- [12] Mansi S A, Pigliautle I, Arnesano M, et al. A novel methodology for human thermal comfort decoding via physiological signals measurement and analysis [J]. *Building and Environment*, 2022, 222: 109385.
- [13] Jia X Y, Li S S, Zhu Y X, et al. Transient thermal comfort and physiological responses following a step change in activity status under summer indoor environments [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 285: 112918.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB/T 50736—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB/T 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [15] International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities: ISO 7726: 1998 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [16] Ahmad O B, Boschi-Pinto C, Lopez A D, et al. Age standardization of rates: a new WHO standard [EB/OL] (2001-1) [2024-11-07]. <https://www.researchgate.net/publication/284696312>.
- [17] Havenith G. Metabolic rate and clothing insulation data of children and adolescents during various school activities [J]. *Ergonomics*, 2007, 50(10): 1689-1701.
- [18] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55—2023 [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2023.
- [19] Ramanathan N L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1964, 19(3): 531-533.
- [20] 国家标准化管理委员会.热环境人类工效学代谢率的测定:GB/T 18048—2008[S].北京:中国标准出版社,2009. (Standardization Administration of the People's Republic of China. Ergonomics of the thermal environment: determination of metabolic rate: GB/T 18048—2008 [S]. Beijing: Standardization Press of China, 2008.)
- [21] Brickman A M, Reitz C, Luchsinger J A, et al. Long-term blood pressure fluctuation and cerebrovascular disease in an elderly cohort [J]. *Archives of Neurology*, 2010, 67 (5): 564-569.
- [22] Gagnon D D, Gagnon S S, Rintamäki H, et al. The effects of cold exposure on leukocytes, hormones and cytokines during acute exercise in humans [J]. *PLOS One*, 2014, 9 (10): e110774.