

冬季冷热冲激下人体热反应的性别差异研究

胡松涛¹, 宋鹏飞¹, 郭成吉¹, 张军², 冯海涛², 许哲文², 童力¹

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛国际机场集团有限公司, 青岛 266300)

摘要:为探究冷热冲激下人体热反应的性别差异,对 8 名男性及 8 名女性受试者进行了不同温差的冷热冲激实验,获得了受试者的平均皮肤温度(T_{mean})、心率(HR)、热感觉投票(TSV)和热舒适投票(TCV)。计算冲激前后各参数的变化量以反映不同温差对人体产生的影响,分析不同温差下冲激前后的男女性 T_{mean} 、HR、TSV 和 TCV 的变化量,即 ΔT_{mean} 、 Δx_{HR} 、 Δx_{TSV} 和 Δx_{TCV} 。研究表明,在冲激工况下,男性和女性的 ΔT_{mean} 和 Δx_{TSV} 均与冲激温差呈正相关关系,性别差异随冲激温差的增大而显著,尤其在 15、18 °C 的冲激温差下;男性 Δx_{TCV} 随冲激温差的增大而呈现倒 U 型变化。同时发现女性热调节能力较男性弱,表现为冲激工况下女性的 $|\Delta T_{\text{mean}}|$ 、 $|\Delta x_{\text{TSV}}|$ 及 $|\Delta x_{\text{TCV}}|$ 通常大于男性。

关键词:冷热冲激;热舒适;热感觉;性别差异

中图分类号: TU831.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)06-0088-07

Study on the gender difference in human thermal response under cold and hot impulses in winter

HU Songtao¹, SONG Pengfei¹, GUO Chengji¹, ZHANG Jun²,
FENG Haitao², XU Zhewen², TONG Li¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;
2. Qingdao International Airport Group Co. Ltd., Qingdao 266300, China)

Abstract: In order to explore the gender difference in human thermal response under cold and hot impulses, this study conducted cold and hot impulses experiments on 8 male and 8 female subjects with different temperature differences, and obtained the mean skin temperature (T_{mean}), heart rate (HR), thermal sensation vote (TSV) and thermal comfort vote (TCV) of the subjects. The changes of parameters before and after the impulse were calculated to reflect the influence of different temperature differences on human body, and the changes in T_{mean} , HR, TSV and TCV of males and females before and after the impulse were analyzed under different temperature differences, namely ΔT_{mean} , Δx_{HR} , Δx_{TSV} and Δx_{TCV} . The results shown that the ΔT_{mean} and the Δx_{TSV} in both males and females were positively correlated with the temperature difference of the impulse under impulse conditions. The gender difference was more significant with the increase of impulse temperature difference, especially under the impulse temperature differences of 15 and 18 °C. The Δx_{TCV} of males

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108080)

作者简介: 胡松涛(1968—),男,山东青岛人。博士,教授,博士生导师,主要从事新能源开发、建筑节能技术、列车空调、系统仿真技术等方面的研究。E-mail: songtao-hu@qut.edu.cn.

shown an inverted U-shaped change with the increase of impulse temperature difference. At the same time, it was found that female's thermal regulation ability was weaker than male's, which was manifested as their $|\Delta T_{\text{mean}}|$, $|\Delta x_{\text{TSV}}|$ and $|\Delta x_{\text{TCV}}|$ were usually larger than that of males under impulse working conditions.

Key words: cold and hot impulses; thermal comfort; thermal sensation; gender difference

在日常生活中,由于环境瞬息万变,人类多处于动态的、变化的热环境中。研究发现与稳态热环境相比,动态热环境更能满足人们对舒适性的要求,且更有利于人的健康,对动态热环境的研究在现代有着很大的发展前景^[1-2]。冷热冲激环境作为一种在实际生活中常见的温度突变形式,包括从较低温度环境转移到较高温度环境的热冲激和与之方向相反的冷冲激,如人们在出入制冷或供暖房间、上下开启空调的交通工具等多种情况下都会经历冷热冲激。

在冷热冲激环境下人体热反应的实验研究中,多数研究都会采用男女比例相同的受试者,以排除性别不均带来的误差^[3]。然而,因男女性之间的生理结构和热调节能力差异引起的不同热反应经常被忽视,并由此产生“空调战”等一系列性别矛盾问题^[4-5]。因此,有必要研究冷热冲激下男女性在热反应上的差异。目前,一些团队已开展冷热冲激环境中人体热舒适性别差异的研究,CHEN 等^[4]开展包括 32—24 °C、28—24 °C 和 20—24 °C 3 种温差工况的实验,研究夏季温度冲激对热感觉和皮肤生理特性的影响及性别差异,发现体温调节中存在性别差异,男性的皮肤毛细血管血流量、皮肤水分与水分流失程度比女性高,尤其在环境温度从 32 °C 降到 24 °C 时。XIONG 等^[6]使用 32—37—32 °C、26—37—26 °C 和 22—37—22 °C 3 种工况实验验证夏季冷热冲激下的性别差异,得出结论:在经历 22—37 °C 的热冲激后,女性的口腔温度出现瞬间显著下降;心率变异性性别差异不显著;女性更容易对凉爽的环境表现出热不满,而男性更可能在温暖的环境中感到热不适。以上研究的共同点是:在时间尺度上研究夏季偏热环境下较小温度范围的冷热冲激对人体生理和心理的影响。因此,偏冷环境下更大温度范围的冷热冲激对人体热反应影响的性别差异就值得研究和探讨。

本研究开展冬季拓展温度范围的实验,对比 7 种不同冲激工况下,冲激前后的皮肤温度、心率、热感觉和热舒适变化的性别差异。研究结果为基于性别差异的个性化室内动态热环境营造提供了重要依据,从而使室内人员更加舒适地生活与工作。

1 研究方法

1.1 受试者

为减少年龄对实验造成的影响,本实验招募 16 名健康的在校研究生志愿者,受试者基本情况见表 1。其中身体质量指数^[7](BMI)是衡量人体肥胖度的标准,使用体重除以身高的平方表示。实验前,告知受试者实验流程,并自愿签署知情同意书。为确保心率等生理指标处于正常范围内,本实验要求受试者 24 h 内不得吸烟饮酒、服用刺激性饮料或其他药物。

实验过程中,受试者保持静坐,代谢率约为 1.0 met^[8](1 met=58.15 W/m²),统一穿着长袖和长裤,服装热阻约为 0.67 clo^[8](1 clo=0.155 m²·K/W),以避免服装热阻变化对实验结果的影响。

表 1 受试者基本情况

性别	人数	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI
男	8	24.6±0.7	1.75±0.05	63.1±5.9	20.6±0.9
女	8	23.7±0.4	1.67±0.07	57.7±3.2	21.7±2.1

1.2 实验场所与工况

实验在具有温度与湿度控制能力的人工气候室内进行,见图 1。该气候室有 2 个相邻且具有相同功能办公家具的房间,分别为房间 1(4 m×3 m×2.6 m)和房间 2(2 m×3 m×2.6 m),2 个房间的空调系统独立运行。实验期间,气候室内相对湿度在 28%~65%,风速小于 0.1 m/s。

基于ASHRAE 7级热感觉^[8],实验共设计7种不同的工况,探讨冬季冷热冲激对男性与女性的影响,包括1个恒温对照工况和6个不同温差的冲激工况。在对照工况中,受试者全程处于15℃的恒温环境。每个冲激工况的温度变化过程包括3个环境温度阶段,即:从低温环境到高温环境再到低温环境。低温环境的空气温度设置为15℃,模拟冬季热感觉为冷的环境;高温环境则模拟分别代表凉、微凉、适中、微暖、暖、热6种不同热感觉的室内空气温度,依次是18、21、24、27、30、33℃。根据温度变化过程中高温与低温的温差将7个工况依次命名为I0、I3、I6、I9、I12、I15和I18(I为Impulse的缩写)。从较低温度切换到较高温度的过程称为热冲激过程,用“+I”表示;反之则称为冷冲激过程,用“-I”表示。将房间1的室内温度分别设置为15、18、21、24、27、30、33℃,将房间2的室内温度设置为15℃。

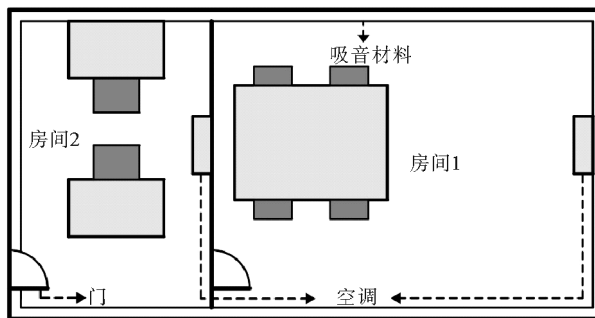


图1 人工气候室示意

1.3 测试方法

实验测试仪器的量程和精度均符合ISO 7726标准^[9]的相关规定,如表2所示。

表2 实验仪器的量程与精度

测试参数	所用仪器	仪器量程	测量精度
空气温度	Testo 174H 温湿度记录仪	-20~70℃	±0.5℃
相对湿度	Testo 174H 温湿度记录仪	0~100%	±3%
风速	KANOMAX 6004 风速计	0.1~20 m/s	±(指示值×5%+0.1) m/s
皮肤温度	iButton DS1923 纽扣式皮肤温度存储器	-40~85℃	±0.5℃
心率	Polar OH1 心率臂带	0~170次/min ^[8]	±3次/min

实验中,温湿度记录仪放置于受试者附近,在垂直高度为0.8和1.2m处分别进行记录。

平均皮肤温度(T_{mean})是反映人体与热环境之间热交换状态的重要生理参数^[10]。使用iButton DS1923采集受试者前额、手臂、背部、胸部、手、大腿6个部位的皮肤温度,采样间隔是1min。使用医用透气胶带将温度存储器贴附在相应皮肤位置。本研究中人体平均皮肤温度(T_{mean})使用相应部位的皮肤表面积加权值计算获得,方法见式(1)^[11]:

$$T_{mean} = 0.14 \times T_{前额} + 0.11 \times T_{手臂} + 0.19 \times T_{背部} + 0.19 \times T_{胸部} + 0.05 \times T_{手} + 0.32 \times T_{大腿} \quad (1)$$

心率(HR)是一项常用于反映人体心脏活动的生理指标。有研究发现人体在温暖环境下的心率高于寒冷环境^[12-13]。采用Polar OH1心率臂带记录心率,采样间隔是1s。

1.4 主观问卷

实验中采用的主观问卷分为个人信息和主观投票两部分。个人信息包括受试者的性别、年龄、身高、体重。主观投票则包括受试者的热感觉投票(TSV)和热舒适投票(TCV),采用ASHRAE 7点投票量表^[8],如表3所示。

1.5 实验流程

为防止前组实验干扰后组实验,受试者一天中最多参与一组实验。各工况总时长为80min,受试者在实验前先统一着装。然后进入房间2开始实验,受试者在该环境中静坐20min,此为第1阶段。之后受试者立刻进入房间1,并在该环境中暴露40min,为第2阶段。最后,受试者回到房间2的低温环境中,并在该环境中暴露20min,此为第3阶段。

表3 主观投票量

尺度	TSV	TCV
-3	冷	非常不舒适
-2	凉	不舒适
-1	微凉	有点不舒适
0	适中	适中
1	微暖	有点舒适
2	暖	舒适
3	热	非常舒适

实验期间,受试者保持静坐,可以阅读书籍或杂志等,但不能与其他受试者交流实验问卷的内容。皮肤温度传感器实时记录受试者的皮肤温度,心率传感器实时监测受试者的心率,受试者每 10 min 填写一次主观投票问卷。实验流程如图 2 所示。

1.6 数据处理与统计学分析方法

冷热冲激前后参数的变化量能够衡量不同冲激温差对人体的影响程度,直观刻画不同参数的变化幅度^[1,4]。由于人体受温度刺激后,不同参数的变化速率及稳定时间各不相同,本研究中 TSV、TCV 和 T_{mean} 均能在经历冲激后的 20 min 达到稳定状态,与 CHEN 等^[4]和 HU 等^[14]的发现相同,故 3 种参数的变化量使用冲激后 20 min 处的数据值减去冲激前阶段 20 min 时的数据值表示。HR 则在 2 min 后保持稳定^[15],故采用冲激后 3 min 时的数据。本文使用 ΔT_{mean} 、 Δx_{HR} 、 Δx_{TSV} 和 Δx_{TCV} 表示冲激后稳定时刻各参数值(T_{mean} 、HR、TSV、TCV)与冲激变化前稳定时刻的对应参数值的差值。

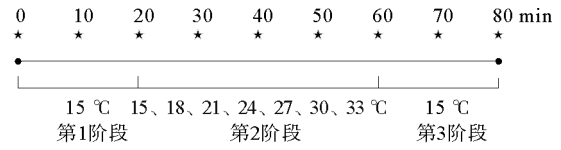


图 2 实验流程

●—● 皮肤温度和心率; * 主观投票

在统计学分析中,首先使用 Shapiro-Wilk 检验所有数据的正态性;然后采用独立样本 T 检验和 Wilcoxon-Mann-Whitney 检验正态分布和非正态分布数据中的性别差异。使用 SPSS 22 软件进行统计分析,显著性水平为 0.05(* 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$,其中, p 为样本的实际显著性)。

2 结果及分析

2.1 平均皮肤温度

图 3 为不同冷热冲激下的男性与女性的 ΔT_{mean} 。由图 3 可知,在冷冲激或热冲激工况下,男性与女性的 $|\Delta T_{mean}|$ 均随着冲激温差的增大而增大,即在冲激温差为 0~18 °C 范围内, $|\Delta T_{mean}|$ 与冲激温差呈现正相关关系。

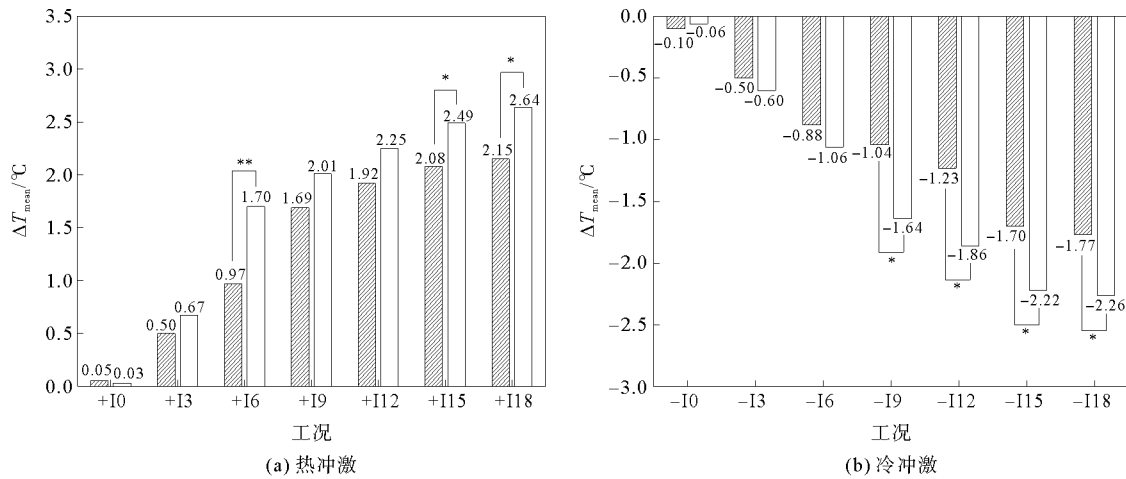


图 3 冷热冲激前后 T_{mean} 的变化

■ 男性; □ 女性

如图 3(a)所示,室内温度恒定(+I0)时,男性和女性的平均皮肤温度较为稳定($|\Delta T_{mean}| \leq 0.1^{\circ}\text{C}$),而存在冷或热冲激时,女性的 $|\Delta T_{mean}|$ 均大于男性。热冲激工况时,女性在 +I0—+I6 工况 $|\Delta T_{mean}|$ 增长幅度逐渐增大,+I6 和 +I3 工况的 $|\Delta T_{mean}|$ 差值甚至超过 1°C ,而在 +I6—+I18 工况 $|\Delta T_{mean}|$ 的增长幅度则随着冲激温差的增大而逐渐减小;男性 $|\Delta T_{mean}|$ 随冲激温差的变化趋势与女性基本一致,即在 +I0—+I9 工况下 $|\Delta T_{mean}|$ 的增长幅度逐渐增大,不同的是,男性在 +I9—+I18 工况, $|\Delta T_{mean}|$ 的增长幅度则逐渐减小。由图 3(b)可知,在冷冲激工况下,女性在一0—-I9 工况 $|\Delta T_{mean}|$ 增长幅度较大,在 -I9—-I18 工况增长幅度较小;男性 $|\Delta T_{mean}|$ 随着冲激温差增加,增长幅度较为均匀。由图 3 可知,在 +I6、+I15、+I18 和 -I9、-I12、-I15、-I18 存在显著的性别差异,这表明随着冲激温差的增大, ΔT_{mean} 的性别差异越显著。

在同一冷热冲激工况下,女性 $|\Delta T_{\text{mean}}|$ 高于男性。这是因为同男性相比,女性的身体脂肪占比较高,肌肉占比较低,循环血量较小,表面积与质量比较大,故面对冷热冲激需要较大的生理应变以平衡产热量和热损失量^[16],因此相比男性,女性在低温时 T_{mean} 较小,在高温或温暖环境中 T_{mean} 较大^[6]。在本研究冲激工况下,女性通常表现为较低出汗量和较大的身体储热能力,同男性相比,女性的 $|\Delta T_{\text{mean}}|$ 要高;且女性通过肌肉和骨骼肌颤栗产生热量的能力较小,皮肤表面热量损失却较大, $|\Delta T_{\text{mean}}|$ 的变化也大,所以冷热冲激对女性的 ΔT_{mean} 影响更大。

2.2 心率

图4为不同冷热冲激下的男性和女性的 Δx_{HR} 。由图4可知,在冷热冲激工况下,男性和女性的 Δx_{HR} 的最大值和最小值均出现在冷冲激工况。冲激温差相同时,男性与女性在冷冲激工况下的 Δx_{HR} 多大于热冲激工况,说明HR对冷冲激的敏感度大于热冲激。这是由温度感受器和传入神经纤维的特征决定的,人体各部位的冷感受器数量大大超过热感受器,给定刺激水平下冷感受器产生更强的脉冲,提高冷纤维的传导速度,进而引起冷冲激下生理反应更为快速和剧烈^[17]。而不同冲激温差的差异性检验结果表明,仅在一19存在显著的性别差异,即从冷环境突然进入适中环境,男性和女性的心率变化截然不同。然而,就其心率变化量而言,不同工况的 Δx_{HR} 介于-2.5~2.21,且存在一定的随机性,因此可认为冷热冲激对心率的影响较小,也无法使用 $|\Delta x_{\text{HR}}|$ 判断人体经历冷热冲激之后是否具有显著的性别差异。

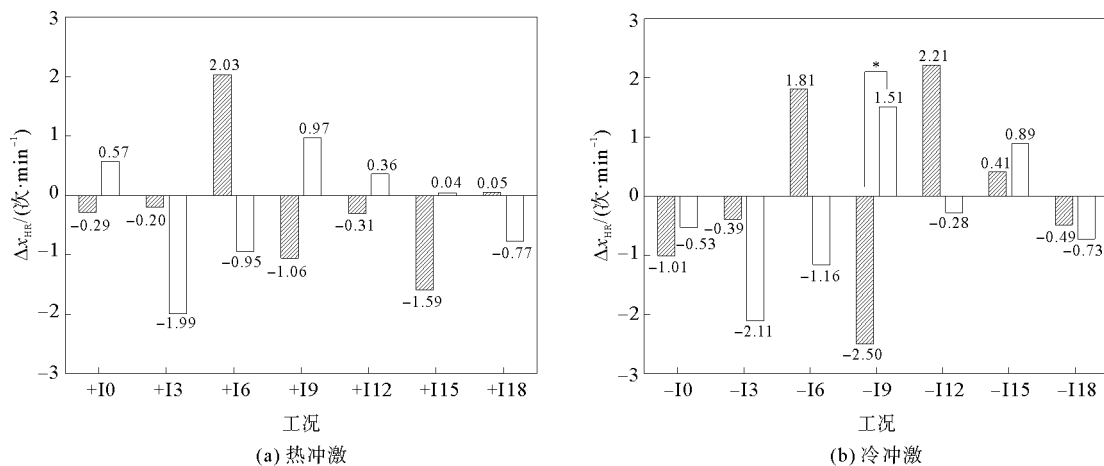


图4 冷热冲激前后HR的变化

▨ 男性; □ 女性

2.3 热感觉投票

不同冷热冲激下男性和女性的 Δx_{TSV} 见图5。冲激发生后,TSV出现了显著的变化,即无论是经历热冲激还是冷冲激,男性和女性的 $|\Delta x_{\text{TSV}}|$ 均随冲激温差的增加而增大,即在统计学意义上 $|\Delta x_{\text{TSV}}|$ 与冲激温差呈现正相关关系。

经过冷热冲激后,受试者的 Δx_{TSV} 和 ΔT_{mean} 随冲激温差变化表现出相似的规律,这证实了主观热感觉和人体热调节密切联系,仅+13工况下男性的 $|\Delta x_{\text{TSV}}|$ 大于女性,其他工况均是女性大于男性。针对男性与女性 Δx_{TSV} 差异的解释可能是:

1) 女性对凉爽环境具有更高的不满意度,+13为冷环境到凉环境的热冲激,因此+13工况下,女性受冲激温差影响较男性而言更小;

2) 相同温差的冲激工况,女性的皮肤温度对环境温度敏感度高于男性,这将导致女性在 Δx_{TSV} 上出现较为强烈的变化^[18]。+16、+19、+115、+118和-16、-112、-115、-118存在显著的性别差异,这表明男性和女性在大温差冷热冲激时更倾向于表现出显著性差异。

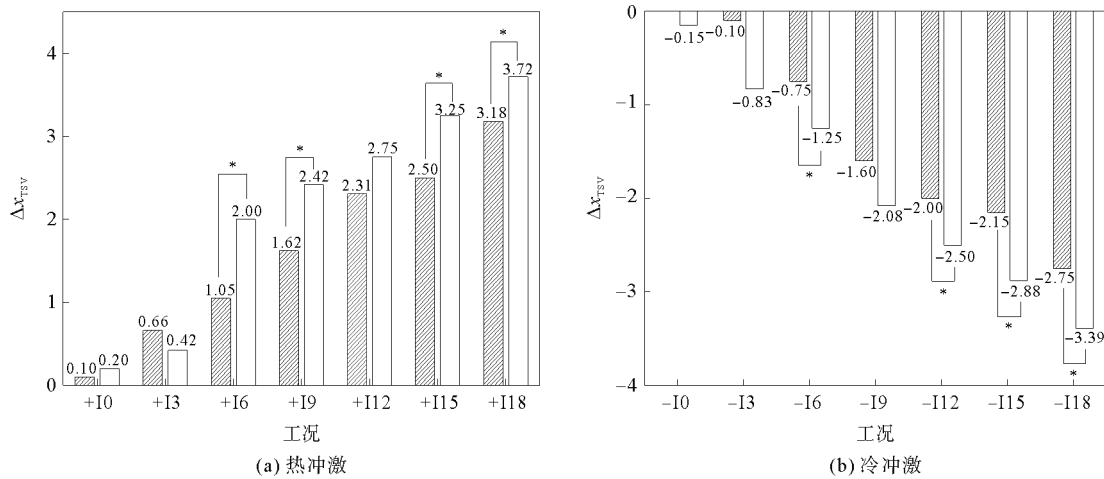


图 5 温度冲激前后TSV的变化

▨ 男性; □ 女性

2.4 热舒适投票

图 6 为不同冷热冲激工况下男性和女性的 Δx_{TCV} 。如图 6 所示,从 ±10—±18 随着冲激温差的增大,男性和女性的 $|\Delta x_{TCV}|$ 均呈现先逐渐递增,并在 ±19 工况时达到最大值,之后逐渐递减的趋势。无论是在热冲激还是在冷冲激工况下,男性 $|\Delta x_{TCV}|$ 均以 ±19 为对称轴呈倒 U 型分布;女性在 +13—+16 工况, $|\Delta x_{TCV}|$ 增加幅度大,增加值为 2,从 +19—+118 较为均匀地下降。除 +13 工况的其他冲激工况下,男性的 $|\Delta x_{TCV}|$ 均小于女性,这与热感觉投票结果一致。而差异性检验结果表明: +16、+19、+112 和 -19、-112 冲激工况在统计学意义上的性别差异显著。针对以上现象可能的解释是:

1) 结合本文 2.1 节对 $|\Delta T_{mean}|$ 的分析结果发现,受试者在应对冷热冲激时热调节能力并非随冲激温差增加而线性增加, $|\Delta T_{mean}|$ 的变化幅度不同。尤其是当冲激温差超过 9 °C, $|\Delta T_{mean}|$ 随冲激温差增长的变化幅度低于 9 °C 以内。因此,受试者的热舒适投票呈现倒 U 型分布;

2) 在经历相同温差的冷热冲激时,女性的 $|\Delta T_{mean}|$ 和 $|\Delta x_{TSV}|$ 变化量比男性更高。从生理学层面来看,男性的热调节能力和耐受力强于女性^[19-20],而女性对环境温度的敏感度比男性高。

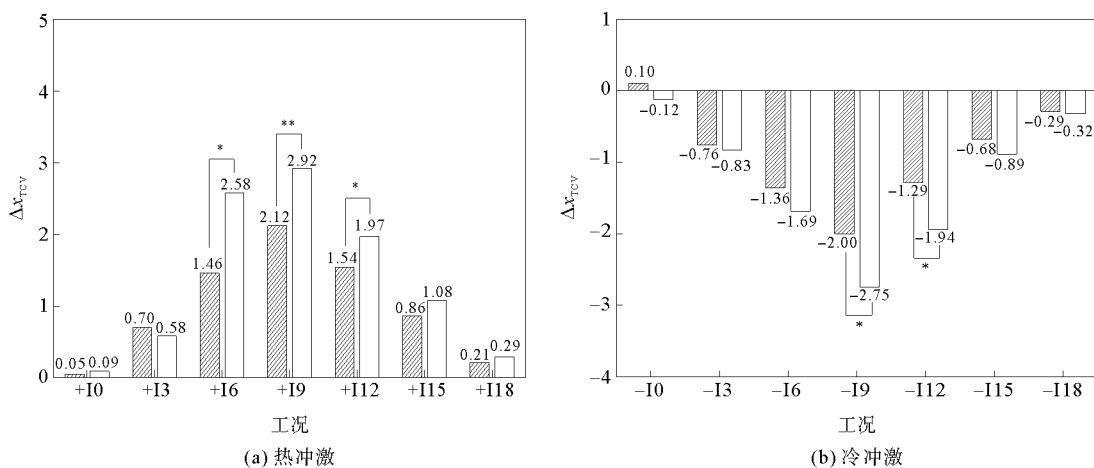


图 6 冷热冲激前后TCV的变化

▨ 男性; □ 女性

3 结论

通过分析冬季冷热冲激前后人体热感觉(TSV)、热舒适(TCV)、平均皮肤温度(T_{mean})和心率(HR)的

变化量,即 ΔT_{mean} 、 Δx_{HR} 、 Δx_{TSV} 和 Δx_{TCV} ,研究冷热冲激对人体热反应影响的性别差异,可以得出以下结论:

1) 在冷热冲激后,人体在冲激前后的 Δx_{TSV} 和 ΔT_{mean} 均与冲激温差呈正相关;女性较弱的热调节能力使得多数冲激工况下,女性在冲激前后的 $|\Delta x_{\text{TSV}}|$ 和 $|\Delta T_{\text{mean}}|$ 均大于男性,冲激前后的 Δx_{TSV} 和 ΔT_{mean} 在大冲激温差时更倾向于表现出显著性差异,尤其当冲激温差为 15、18 °C 时。

2) 随冲激温差的增加,男性在冲激前后的 Δx_{TCV} 呈倒 U 形分布。由于男性的热调节能力和耐受力较女性强,在多数冲激工况下,男性在冲激前后的 Δx_{TCV} 小于女性。

3) 冲激前后的 Δx_{HR} 受冷冲激的影响较大,但无法通过 HR 判断冷热冲激后是否存在显著的性别差异。

参考文献(References):

- [1] WANG Zi, YU Hang, JIAO Yu, et al. Chinese older people's subjective and physiological responses to moderate cold and warm temperature steps[J]. *Building and Environment*, 2019, 149: 526-536.
- [2] 端木琳, 于连广, 胡文军. 动态环境下热舒适问题的探讨[J]. *制冷与空调*, 2004(5): 24-27.
DUAN Mulin, YU Lianguang, HU Wenjun. The discussidn on thermal comfort in a dynamic environment[J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2004(5): 24-27.
- [3] XIONG Jing, LIAN Zhiwei, ZHANG Huibo, et al. Correlation between health discomforts and temperature steps in winter of China[J]. *Building and Environment*, 2017, 114: 387-396.
- [4] CHEN C P, HWANG R L, CHANG S Y, et al. Effects of temperature steps on human skin physiology and thermal sensation response[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(11): 2387-2397.
- [5] 高云飞, 余佳宁, 宋文馨, 等. 运动状态下基于性别差异的人体热舒适研究[J]. *广东工业大学学报*, 2021, 38(4): 71-80.
GAO Yunfei, YU Jianing, SONG Wenxin, et al. Gender differences of thermal comfort during exercise[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2021, 38(4): 71-80.
- [6] XIONG Jing, LIAN Zhiwei, ZHOU Xin, et al. Investigation of gender difference in human response to temperature step changes[J]. *Physiology & Behavior*, 2015, 151: 426-440.
- [7] PRENTICE A M, JEBB S A. Beyond body mass index[J]. *Obesity Reviews*, 2001, 2(3): 141-147.
- [8] ASHRAE 55-2017, Thermal environmental conditions for human occupancy[S].
- [9] ISO 7726, Ergonomics of the thermal environment-instruments for measuring physical quantities[S].
- [10] 黄建华, 张慧. 人与热环境[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
HUANG Jianhua, ZHANG Hui. *Human and thermal environment*[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [11] LIU Weiwei, LIAN Zhiwei, DENG Qihong, 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.
- [12] CHOI J H, LOFTNESS V, LEE D W. Investigation of the possibility of the use of heart rate as a human factor for thermal sensation models[J]. *Building and Environment*, 2012, 50: 165-175.
- [13] LAN L, WARGOCKI P, WYON D P, et al. Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance[J]. *Indoor Air*, 2011, 21(5): 376-390.
- [14] HU Songtao, HE Mengyuan, ZHANG Xiaoxia, et al. Cold and hot step-changes affecting thermal comfort and physiological indicators in winter[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 254: 111587.
- [15] GOTO T, TOFTUM J, DE DEAR R, et al. Thermal sensation and thermophysiological responses to metabolic step-changes[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 50(5): 323-332.
- [16] BURSE R L. Sex differences in human thermoregulatory response to heat and cold stress[J]. *Human Factors*, 1979, 21(6): 687-699.
- [17] LUO Maohui, WANG Zhe, ZHANG Hui, et al. High-density thermal sensitivity maps of the human body[J]. *Building and Environment*, 2020, 167: 106435.
- [18] ZHAI Yongchao, ZHANG Yufeng, MENG Qinglin, et al. Gender differences in thermal comfort in a hot-humid climate[C]// *International Conference on Indoor Air Quality & Climate*. California: UC Berkeley, 2014.
- [19] ZHENG Peiping, WANG Chunxiao, LIU Yanchen, et al. Thermal adaptive behavior and thermal comfort for occupants in multi-person offices with air-conditioning systems[J]. *Building and Environment*, 2022, 207: 108432.
- [20] 黄方经, 张国高. 高温环境中生理反应的性别差异[J]. *国外医学(卫生学分册)*, 1985: 261-263.
HUANG Fangjing, ZHANG Guogao. Gender difference of physiological response in high temperature environment[J]. *Foreign Medicine(Hygiene Volume)*, 1985(5): 261-263.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)