

## 基于人体皮肤温度与面部肌电图的室内热舒适评估

胡松涛, 胡宇豪, 杨 阳, 鹿铭理, 郭成吉, 赵晓丽, 朱 辉

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 建筑室内热环境会影响人体的舒适度。将人体皮肤温度、面部肌电图与主观投票相结合是一种新的评估室内热环境的方式。招募了 30 名健康成年人, 在实验室经历了中性环境静坐 (26 °C)、寒冷环境静坐 (18 °C)、在寒冷环境增加服装热阻、返回中性环境 4 个过程, 比较了皮肤温度与面部肌电图在不同工况下的差异性与一致性。研究发现面部肌肉对温度更加敏感, 尤其在寒冷环境面部肌肉收缩明显。在降温过程中, 裸露部位比非裸露部位皮肤温度变化速率快、变化量大, 面部肌电图与皮肤温度变化规律一致。增加服装热阻后, 热感觉和热舒适均得到改善, 但额头温度与面部肌电图无明显变化, 因此增加服装热阻可以减少散热, 但是无法通过增加产热来提高裸露部位皮肤温度。

**关键词:** 热舒适; 热感觉; 皮肤温度; 面部肌电图

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)05-0096-08

## Indoor thermal comfort assessment based on human skin temperature and facial electromyography

HU Songtao, HU Yuhao, YANG Yang, LU Mingli, GUO Chengji, ZHAO Xiaoli, ZHU Hui  
(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** The indoor thermal environment of a building affects human comfort. Combining human skin temperature, facial electromyography and subjective voting is a new way to assess the indoor thermal environment. In this study, 30 healthy adults were recruited and underwent four processes in the laboratory: sitting in a neutral environment (26 °C), sitting in a cold environment (18 °C), increasing the thermal resistance of clothing in the cold environment and returning to a neutral environment, and the variability and consistency of skin temperature and facial electromyography under the different working conditions were compared. Facial muscles are more sensitive to temperature, especially in cold environments where facial muscle contraction is pronounced. During the cooling process, the rate of change of skin temperature was faster and larger in exposed parts than in non-exposed parts, and the facial electromyography was consistent with the law of change of skin temperature. Increasing the thermal resistance of clothing improved both thermal sensation and thermal comfort, but there was no significant change in forehead temperature and facial electromyography. Therefore, increasing the thermal resistance of clothing can reduce heat dissipation, but cannot in-

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2022ME061)

作者简介: 胡松涛 (1968—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事人工环境营造、区域能源等方面的研究。

E-mail: songtao-hu@qut.edu.cn.

crease the skin temperature in exposed areas by increasing heat production.

**Key words:** thermal comfort; thermal sensation; skin temperature; facial electromyography (fEMG)

人们大部分时间都在室内度过<sup>[1]</sup>,室内热环境对人们的身体健康、工作效率和舒适性都具有重要的影响<sup>[2]</sup>。

人体热舒适的评估方法主要包括主观评价和客观评价。主观评价可直接反映人体热感觉,但主观性比较强。客观评价可测量人体生理变化,准确性较高,但是无法直接反映人体感受,所以现有研究中往往通过主客观评价相结合的方式评估人体舒适度。CHAUDHURI等<sup>[3]</sup>通过实测20名受试者的生理参数和主观反应,得出主客观综合预测整体热状态具有可能性,并且认为可通过使用穿戴式传感技术监测生理参数来识别人的热状态。廖建科<sup>[4]</sup>研究了人体皮肤温度与热感觉的关系,结果表明在稳态环境时可通过皮肤温度很好地预测热感觉,而突变环境下由于热经历的影响,皮肤温度与热感觉的关系比较离散,不能预测热感觉。当皮肤温度升高时,热量从内部逐渐向外散发,人体的热感觉也会相应发生改变。BUL-CAO等<sup>[5]</sup>研究了皮肤温度与核心温度对人体热舒适的作用权重,改变受试者的皮肤温度与体温,同时调查受试者的热舒适程度,结果表明人体热舒适在很大程度上取决于皮肤温度,而人体的生理调节主要由核心温度决定。身体的热调节主要影响人体热舒适感<sup>[6]</sup>,人体在不同环境温度下必须通过自身的调节来维持体温的稳定,不同环境温度直接影响人体皮肤温度,所以人体皮肤温度可以作为评价热舒适的生理指标。LIU等<sup>[7]</sup>研究发现人体平均皮肤温度是反映人体热舒适的有效生理指标。人体平均皮肤温度一般在33.2~36.7℃,在个体之间存在差异性,也会受环境温度、活动水平等因素影响,但在正常情况下人体皮肤温度的变化不应超过1℃。维持舒适的平均皮肤温度是保证人体热舒适的重要条件<sup>[8]</sup>。

面部作为直接暴露于热环境的人体部位,对温度的敏感性较高。面部肌电图(facial EMG, fEMG)是一种测量面部肌肉活动的技术,通过记录和分析面部肌肉的电活动,可有效获取肌肉收缩和舒张的信息<sup>[9]</sup>。在大多数研究中,用面部肌电图来研究受试者情绪,属于生理心理学应用<sup>[10]</sup>。面部肌电图可以检测出面部不可见的肌肉活动,提供有关抑制表情的信息,或者提供那些不属于可见活动阈值的信息。这种敏感性有助于理解隐藏(有意或无意)的面部表情,面部肌电图仿佛是一个可以看到人们隐含感受的窗口,用来表达人体的感受。因此人们处于舒适或不舒适时面部肌肉活动的微小变化可通过面部肌电图检测。人体在感到寒冷时会咬紧牙关,是寒战反应的一部分。寒战是身体对寒冷环境的生理反应,旨在增加体温以应对寒冷。同时面部肌肉收缩,包括咬肌,这种肌肉收缩旨在减少体表面积,减少热量损失。

本研究通过测量人体在不同工况下的皮肤温度与面部肌电图,同时收集受试者主观热感觉与热舒适问卷来探究人体在室内环境温度变化以及增加服装热阻时皮肤温度变化规律以及面部肌电图的变化。在环境温度或服装热阻发生变化时,人体的皮肤温度会对环境温度有所感知<sup>[11]</sup>,通过面部肌肉的舒张或收缩表达出来。探究了人体面部肌肉对热环境的生理反应状况,从而进一步为热舒适生理机理的认识提供依据。基于面部肌电图来表达热舒适的研究相对较少,本研究为面部肌电图从生理学角度评估人体热舒适提供了参考,为从面部肌肉变化分析人体冷热感觉提供了新思路。

## 1 实验设计与数据处理

### 1.1 实验室介绍

本实验室位于山东青岛,配有分体式空调用于调节房间内的空气温度。如图1所示,该实验室分为3个房间,房间1为休息准备室(5.4 m×2 m×2.5 m),用于受试者刚从室外进入后适应室内环境及进行佩戴实验设备等工作;房间2和房间3为实验室(2.7 m×3 m×2.5 m)。

### 1.2 实验内容

实验于2023年5月份在山东青岛进行,其间每名受试者需

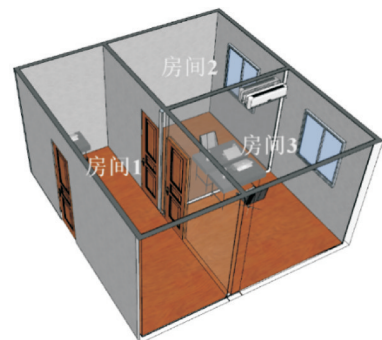


图1 实验室布置

要在实验室的房间2与房间3完成测试。每次实验的总时长为90 min,在此期间测量受试者在房间2及房间3静坐时皮肤温度及面部肌肉的变化并收集主观问卷。为了避免50 Hz工频对肌电信号的干扰,肌电传感器附近0.5 m范围内禁止使用任何交流电设备。主观问卷包括热感觉和热舒适。在实验室中心距地面0.8 m处放置了温湿度自记仪、黑球温度计、风速仪来测量室内热环境参数。主观问卷投票标度如表1所示。

### 1.3 设备及主要技术参数

本实验使用了青岛理工大学参与研发的肌电图采集系统(以下简称系统),采样频率为1000 Hz,使用半径为15 mm的一次性Ag/

AgCl电极片贴附在咬肌表面,捕捉面部肌肉收缩时产生的微弱电信号。经放大与滤波处理,增强信号的幅度并去除噪声,确保后续处理的准确性和可靠性。放大处理可以增加信号幅度,使其更易于检测和分析,滤波则可以消除来自环境干扰或其他面部肌肉活动的噪声。处理后的信号被传输至处理单元,进行峰值检测、时域分析和频域分析等,以提取有用的生理特征并进行进一步研究,系统如图2所示。该系统模块尺寸为11 cm×6 cm,供电电压为5 V,肌电图(electromyogram, EMG)的输入电压为2~5 mV,工作温度范围为-20~60 ℃。本实验使用了1个通道(动作和参考电极各1个),其他仪器及主要技术参数如表2所示。



图2 面部肌电图采集系统实物

表1 主观问卷投票标度

主观问卷	投票标度
热舒适(TCV)	0 舒适, 1 稍不舒适, 2 不舒适, 3 很不舒适, 4 无法忍受
热感觉(TSV)	-3 冷, -2 凉, -1 微凉, 0 适中, 1 微暖, 2 暖, 3 热

表2 仪器及主要技术参数

测量参数	仪器型号	测量范围	精度
皮肤温度/℃	iButton DS1923	-40~85	±0.1
空气温度/℃	Testo174H	-20~70	±0.1
相对湿度/%	Testo174H	0~100	±5
黑球温度/℃	JTR04	20~125	±0.5
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	Model 6004	0.1~20	±(50%+0.1)

### 1.4 受试者

实验招募了30名在校大学生志愿者,其中包括17名男性和13名女性,人口统计学特征如表3所示。所有受试者均身体健康,且没有任何皮肤和神经系统疾病。受试者在受试期间需保持良好的健康状况,要求在参加实验前的12 h内避免吸烟、饮酒以及熬夜等行为,2 h内不能进行持续高强度的面部肌肉活动,避免神经系统处于兴奋和疲劳状态。受试者仪器设备佩戴位置示意如图3所示。

表3 受试者人口统计学特征

性别	人数	年龄/岁	身高/m	体重/kg	BMI
男性	17	23.6±0.87	1.79±0.05	74.06±12.02	23.15±3.33
女性	13	23.4±1.26	1.64±0.04	56.92±7.35	21.18±2.66
整体	30	23.5±1.04	1.72±0.09	66.63±13.29	22.3±3.17

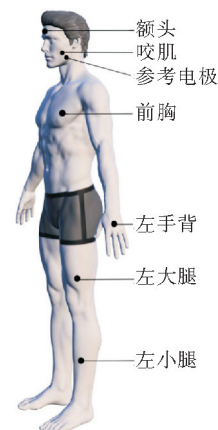


图3 测点位置示意

### 1.5 实验流程

实验流程分为4个阶段,如图4所示。受试者在实验开始前20 min内需到达实验室,在房间1更换统一服装(薄秋衣和秋裤),服装热阻约为0.44 clo(1 clo=0.155 m<sup>2</sup>·K/W)。同时,在工作人员协助下佩戴肌电图采集系统及皮肤温度测点。

阶段I:受试者进入房间2(环境温度为26 ℃)静坐20 min。

阶段Ⅱ:受试者进入房间3(环境温度为18℃)静坐30min。

阶段Ⅲ:受试者仍在房间3,增添1套工装上衣和长裤,总服装热阻约1.08clo,再静坐20min。

阶段Ⅳ:受试者返回房间2静坐20min。

整个实验过程中,每10min进行一次主观问卷调查,在阶段Ⅰ结束前进行肌电图采集,此后每10min采集1次,并全程测量皮肤温度。

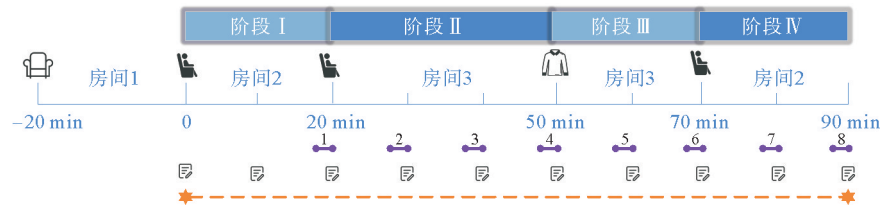


图4 实验流程

★---★ 皮肤温度; ● 面部肌电图; □ 主观问卷

## 2 数据处理及分析方法

### 2.1 平均皮肤温度计算方法

平均皮肤温度由五点法计算得到,如式(1)所示,相关研究证明其在反映人体热舒适时效果良好<sup>[12]</sup>。

$$T_{\text{skin}} = 0.07T_{\text{forehead}} + 0.05T_{\text{hand}} + 0.5T_{\text{chest}} + 0.18T_{\text{thigh}} + 0.2T_{\text{calf}} \quad (1)$$

式中: $T_{\text{skin}}$ 、 $T_{\text{forehead}}$ 、 $T_{\text{hand}}$ 、 $T_{\text{chest}}$ 、 $T_{\text{thigh}}$ 、 $T_{\text{calf}}$  分别为人体平均皮肤温度、额头温度、手背温度、胸部温度、大腿温度和小腿温度,℃。

### 2.2 面部肌电图

为了提高信噪比,需对面部肌电信号进行预处理。本研究使用 Matlab R2018b,通过带阻滤波去除50 Hz工频干扰,然后将各通道的时间序列 $X_i$ 减去平均值,得到一个新的时间序列 $x_i$ ,如式(2)所示。

$$x_i = X_i - \bar{X} \quad (2)$$

式中: $X_i$ 为肌电采集系统采集的时间序列; $\bar{X}$ 为 $X_i$ 的平均值。

为了从处理后的面部肌电信号中提取有意义的特征,从而在时域上量化分析,面部肌电图的均方根电压( $V_{\text{RMS}}$ )可以反映一段时间内面部肌肉的平均放电强度,一般用于描述数据的静态特征,如式(3)所示。 $V_{\text{RMS}}$ 越大表明面部肌肉收缩强度越大,放电强度越高。

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{RMS}}$ 为面部肌电图的均方根电压, $\mu\text{V}$ ;  $N$ 为数据点个数。

## 3 实验结果

### 3.1 热感觉与热舒适

热舒适(TCV)反映了人体对热环境感觉满意的意识状态;热感觉(TSV)反映了人体在热环境中的冷、热感觉,其结果如图5所示。在阶段Ⅰ时 TSV 与 TCV 无明显变化。在阶段Ⅱ时,主观评估发生显著变化,受试者表现出不舒适的状态(凉)。在阶段Ⅲ时,由于受试者的服装热阻增加,静坐10min后 TSV 和 TCV 有所改善。在阶段Ⅳ时,由于环境温度升高,TSV 与 TCV 显著改善,实验结束时主观评价基本恢复到初始水平。由此可见,主观评估准确地反映了环境温度变化和服装热阻增加对人体主观热感知和舒适性的影响。

### 3.2 皮肤温度

皮肤温度常用于评价人体热状态,图6为平均皮肤温度与局部皮肤温度随时间变化。本实验裸露部位为额头与手背,非裸露部位为胸部、右大腿和右小腿。从图6中不难看出,由于阶段Ⅱ的温度骤降,裸露

部位的皮肤温度(以下简称皮温)下降速率高于非裸露部位。其中,额头温度在冷暴露 10 min 后基本稳定。阶段Ⅲ增加服装热阻后,非裸露部位的皮温有一定回升,而裸露部位保持稳定或下降。由此可见,通过增加服装热阻的方式虽然改善了主观评估,但裸露部位的皮温并未得到有效改善。究其原因,增加服装热阻可有效地减小身体向环境的散热量,但产热量并未增加,在阶段Ⅲ的 20 min 内,热量也难以通过血液循环提供给远端的裸露部位。

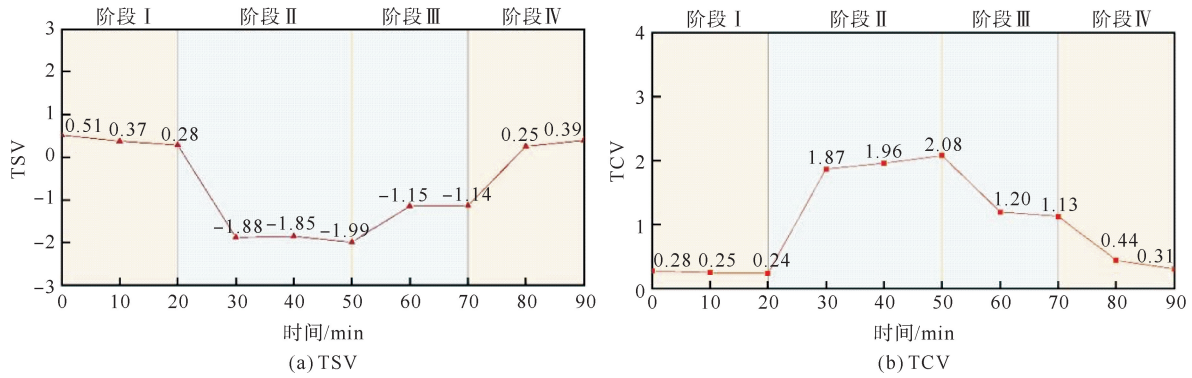


图5 TSV 和 TCV 随时间的变化

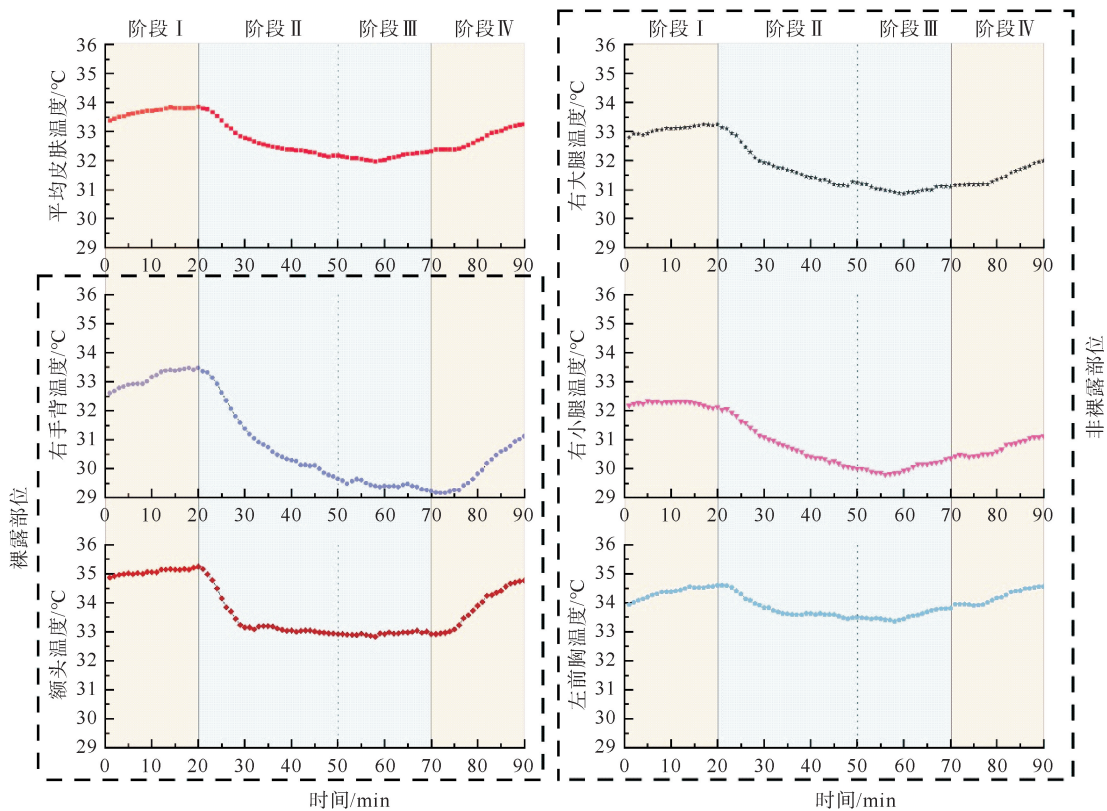


图6 皮肤温度随时间的变化

### 3.3 面部肌电图

以上结果表明,降温过程中主观评估与皮温变化规律基本一致,但在增加服装热阻后,主观评估与裸露部位皮温的变化规律相反。

为了研究面部肌电图能否应用于评估以上 2 种情况,本节计算了面部肌电图的均方根电压( $V_{RMS}$ )。经检验, $V_{RMS}$  不满足正态分布,因此使用 Kruskal-Wallis 检验各条件下的差异性,结果如表 4 所示。

表 4 面部肌电图咬肌  $V_{RMS}$  的差异性

阶段	有效样本量	$V_{RMS}$ (平均值±标准差)	$P$
阶段 I (测试 1)	27	7.45±2.25	0.000***
阶段 II (测试 2)	21	19.71±1.94	
阶段 II (测试 3,4)	23	17.66±4.50	0.058
阶段 III (测试 5)	28	14.45±7.56	
阶段 III (测试 6)	28	17.66±4.50	0.014**
阶段 IV (测试 7,8)	29	14.45±7.56	

注:显著性“\*、\*\*、\*\*\*”分别表示  $p < 0.05$ 、 $p < 0.001$ 。

结合表 4 与图 7 可知,测试 1—测试 2 以及测试 6—测试 7 咬肌  $V_{RMS}$  均有显著性差异,在测试 1—测试 2 时咬肌收缩最明显,是由于当受试者进入寒冷环境,咬肌收缩引起寒战反应,通过收缩产生热量,帮助维持体温,故面部肌电图可以用来评估温度改变时人体的热感觉。测试 4—测试 5 咬肌  $V_{RMS}$  略有降低,但在统计学上未表现出差异性。因此,面部肌电图并不能够准确地评估增加服装热阻时人体热感觉。

### 3.4 额头温度与 $V_{RMS}$ 的一致性

由于实验条件的改变,  $V_{RMS}$  与额头温度的变化趋势表现出较高的一致性,分析全部受试者在 4 个阶段中的测试结果,如图 8 所示。在阶段 I—阶段 II 的过程中,冷暴露使额温降低而  $V_{RMS}$  升高。在阶段 II—阶段 III 的过程中,额温的均值几乎不变,  $V_{RMS}$  略有降低(但在统计学上未表现出差异性)。在阶段 III—阶段 IV 的过程中,升高环境温度使额温升高,而  $V_{RMS}$  降低。因此,在冷暴露及恢复过程中,额温与  $V_{RMS}$  在数值上成反比例关系,即额温越低,面部肌肉收缩强度越高。

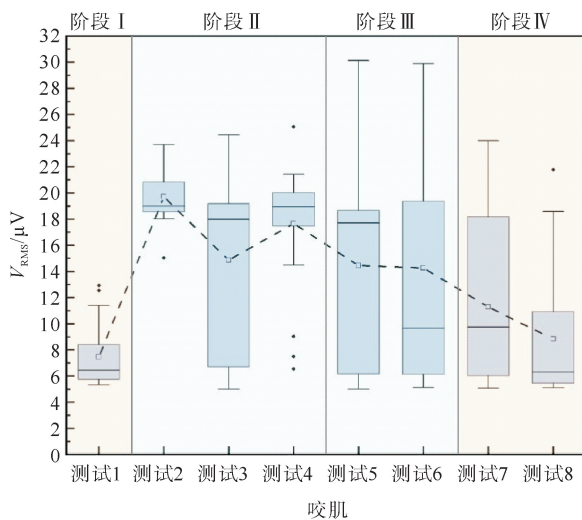


图 7 不同条件下面部肌电图  $V_{RMS}$  的变化规律  
— 中位线; ◆ 异常值; □ 均值

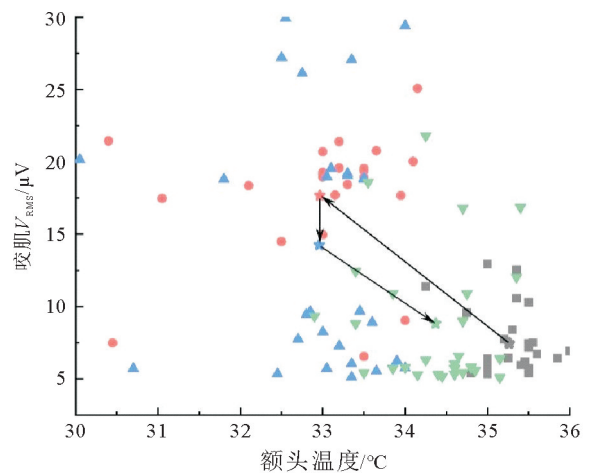


图 8 不同阶段受试者额头温度与咬肌  $V_{RMS}$  散点图  
■ 阶段 I; ● 阶段 II; ▲ 阶段 III; ▼ 阶段 IV;  
★ 阶段 I 均值; ★ 阶段 II 均值; ★ 阶段 III 均值; ★ 阶段 IV 均值

## 4 讨论

### 4.1 与已有研究的对比

通过考虑热环境中生理参数与热舒适之间内在的相关性、生理参数在不同热舒适程度之间差异显著性以及评价热舒适的准确程度来考察人体生理参数是否可以作为评价热舒适的客观指标<sup>[12-13]</sup>。在相关研究中,通常会使用皮肤温度、心率、核心温度等生理参数的变化同主观问卷调查一起分析人体在室内建筑的舒适度<sup>[14-15]</sup>,使用面部肌电图来评估热舒适的方法还比较缺乏,无法直接与类似的研究对比。但本研究可与基于面部皮肤温度评估热舒适的方法互补,TIAN 等<sup>[16]</sup>研究了一种通过中性面部皮肤温度阈值直接

判断个体是否处于中性状态的生理模型,结果表明,夏季中性面部皮肤温度范围高于冬季。在暴露 15 min 后模型表现出较高的可靠性。面部肌电图能够提供面部肌肉收缩情况,同时面部皮肤温度可以提供面部皮肤温度变化情况,两者结合可有效全面地判断环境温度改变时面部对温度的感知与表达。

#### 4.2 面部肌电图评估热舒适的可行性

本研究的创新性在于通过分析面部肌电图对热感觉的表达来评估人体在室内建筑的热舒适度。同时采用主观评价的热感觉评价方法来对环境进行评价<sup>[17-19]</sup>,结果表明在环境温度改变时面部肌电图(咬肌)变化明显,与主观评估和皮肤温度变化规律一致,证实了人体皮肤温度与面部肌电图评估热舒适的可行性。

#### 4.3 本研究的局限性

本文对于生理指标只采用了皮肤温度、面部肌肉(咬肌)与主观评估相结合。仅研究了冷环境与中性环境时面部肌电图的变化,对于热不舒适环境并未探讨,这是由于人体处于热环境时面部出汗会影响电极与皮肤的接触。因此,在进一步研究工作中还需在进行大样本实验的基础上,采用面部其他肌肉(如颧肌、额肌等)与更多生理指标(如皮肤血流量、呼吸频率和心率变异性等)一起来进行人体对室内建筑环境的评估。

### 5 结论

本文采用主观问卷和生理参数测试的方法,研究了 30 名受试者在环境温度变化及增加服装热阻前后的皮肤温度和面部肌电的变化规律,主要结论如下:

- 1) 在改变环境温度的工况下裸露部位比非裸露部位皮肤温度的变化速率快、变化量大。
- 2) 增加服装热阻后,TSV、TCV 均得到改善,但额头皮肤温度无明显变化,非裸露部位皮肤温度得到明显改善。表明增加衣物可以减少散热,但是并未增加产热来提高裸露部位皮肤温度。
- 3) 面部肌肉对温降更加敏感,尤其在寒冷环境面部肌肉收缩明显。面部肌肉与额头温度变化规律相近。

综上所述,在稳定的实验环境下,面部肌电图对冷不舒适的表达与主观评估和皮肤温度变化规律一致,可作为一种新的评估方法用于热舒适领域。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘晋. 改善重庆农村住宅室内热环境的设计研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.  
LIU Jin. Improve the indoor thermal environment of rural residential design and research in Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [2] 董娜娜. 基于工作效率最大化的室内热环境控制研究[D]. 北京:北方工业大学,2021.  
DONG Nana. Research on indoor thermal environment control based on maximum work efficiency[D]. Beijing:North China University of Technology, 2021.
- [3] CHAUDHURI T, ZHAI D Q, SOH Y C, et al. Random forest based thermal comfort prediction from gender-specific physiological parameters using wearable sensing technology[J]. Energy and Buildings, 2018, 166: 391-406.
- [4] 廖建科. 温度突变的动态环境下人体热舒适研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.  
LIAO Jianke. Thermal comfort in dynamic environment under temperature step conditions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [5] BULCAO C F, FRANK S M, RAJA S N, et al. Relative contribution of core and skin temperatures to thermal comfort in humans[J]. Journal of Thermal Biology, 2000, 25: 147-150.
- [6] 陈吉清, 郑习娇, 兰凤崇, 等. 基于人体热调节模型的乘员舱热舒适性分析[J]. 汽车工程, 2019, 41(6): 723-730.  
CHEN Jiqing, ZHENG Xijiao, LAN Fengchong, et al. An analysis on thermal comfort in passenger compartment based on human thermal regulation model[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(6): 723-730.
- [7] LIU W W, LIAN Z W, DENG Q H. Use of mean skin temperature in evaluation of individual thermal comfort for a person in a sleeping posture under steady thermal environment[J]. Indoor and Built Environment, 2015, 24: 489-499.
- [8] HAO S N, WANG F, GUAN J, et al. Skin temperature indexes to evaluate thermal sensation and cognitive performance in hot environments[J]. Building and Environment, 2023, 242: 110540.

- [9] KIM C, KIM C, KIM H, et al. Facial electromyogram-based facial gesture recognition for hands-free control of an AR/VR environment: Optimal gesture set selection and validation of feasibility as an assistive technology[J]. *Biomedical Engineering Letters*, 2023, 13(3): 465-473.
- [10] MORREE H, MAROCORA S. Facial electromyography as a measure of effort during physical and mental tasks[J]. *Electromyography New Developments Procedures & Applications*, 2012, 187: 103-122.
- [11] 康云星, 刘国丹, 童力, 等. 近舒适工况下服装热调节作用分析[J]. *青岛理工大学学报*, 2019, 40(4): 76-83.  
KANG Yunxing, LIU Guodan, TONG Li, et al. Analysis of the thermal regulation effect of clothing under near-comfort conditions[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2019, 40(4): 76-83.
- [12] CHOI J K, MIKI K, SAGAWA S. Evaluation of mean skin temperature formulas by infrared thermography[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 41: 68-75.
- [13] 刘蔚巍, 连之伟, 邓启红, 等. 人体热舒适客观评价指标[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(2): 521-526.  
LIU Weiwei, LIAN Zhiwei, DENG Qihong, et al. Objective evaluation indicators of human thermal comfort[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2011, 42(2): 521-526.
- [14] 徐清浩, 陈浩, 陈琳, 等. 中等运动强度下人体热感觉与生理响应及其相关性实验研究[J]. *建筑科学*, 2021, 37(8): 67-78.  
XU Qinghao, CHEN Hao, CHEN Lin, et al. Experimental study on the correlation between thermal sensation and physiological response at moderate exercise intensity[J]. *Building Science*, 2021, 37(8): 67-78.
- [15] 林宇凡, 杨柳, 柴茜. 基于心理-生理适应的热舒适投票预测[J]. *暖通空调*, 2021, 51(7): 111-117.  
LIN Yufan, YANG Liu, CHAI Xi. Prediction of thermal comfort voting based on psychology-physiological adaptation[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2021, 51(7): 111-117.
- [16] TIAN X Y, SHI L, WANG Z, et al. A thermal comfort evaluation model based on facial skin temperature[J]. *Building and Environment*, 2023, 235: 110244.
- [17] KUCHEN E, FISCH M N. Spot monitoring: Thermal comfort evaluation in 25 office buildings in winter[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 839-847.
- [18] BURATTI C, RICCIARDI P. Adaptive analysis of thermal comfort in university class-rooms: Correlation between experimental data and mathematical models[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 674-687.
- [19] ZHANG Y F, ZHAO R Y. Relationship between thermal sensation and comfort in non-uniform and dynamic environments[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(7): 1386-1391.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)

---

### (上接第 88 页)

- [20] 张雪梅, 张秀梅, 李文涛. 鳗草根际溶磷微生物分离、筛选及其对鳗草生长的影响[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(1): 82-96.  
ZHANG Xuemei, ZHANG Xiumei, LI Wentao. Isolation and screening of rhizosphere phosphorus-solubilizing microorganisms and their effects on eelgrass growth[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(1): 82-96.
- [21] 王文静. 套作大豆根际解磷菌的筛选及其对土壤磷素利用率的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.  
WANG Wenjing. Screening of phosphorus solubilizing bacteria in intercropping soybean rhizosphere and their effects on soil phosphorus utilization[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [22] ROSE T J, HARDIPUTRA B, RENGEL Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 159-170.
- [23] CROSS A F, SCHLESINGER W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. *Geoderma*, 1995, 64(3): 197-214.
- [24] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 增效磷肥对花生生长、产量和磷利用率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2020, 42(5): 888-895.  
SUO Yanyan, ZHANG Xiang, SI Xianzong, et al. Effect of different synergistic phosphate fertilizer on growth, yield and phosphorus use efficiency of peanut[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2020, 42(5): 888-895.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)