

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-07

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260107001

局部辐射热暴露下人体热反应特性

朱国栋^{1,2} 刘国丹^{1,2} 纪铤行^{1,2} 张佩琦^{1,2} 马浩南^{1,2} 张瑶^{1,2} 胡松涛^{1,2}

(1 青岛理工大学环境与市政工程学院 青岛 266520; 2 健康环境与低碳能源山东省工程研究中心 青岛 266520)

摘要 在室内环境中,人们经常暴露于热辐射非均匀环境中。常见的热辐射有太阳辐射与红外辐射,现有研究大多关注太阳辐射或红外辐射等单一类型的热辐射条件下,人体的热生理反应和主观热感觉变化,为了研究太阳辐射与红外辐射条件下的人体热反应差异,本文分别开展太阳辐射与红外辐射局部热暴露实验,实测2种条件下人体的皮肤温度,收集主观热感觉投票,计算并分析2种辐射条件下各部位热敏感度差异。研究表明:在太阳辐射作用下,单位辐射强度引起各部位皮肤温度变化约0.01~0.02℃;而在红外辐射作用下,单位辐射强度引起各部位皮肤温度的变化量较大,可达1.0℃。太阳辐射和红外辐射局部刺激胸部时,整体热感觉变化均最大,升高超过2.0个标度;局部刺激大臂、小臂、大腿、小腿等四肢时,400 W/m²的太阳辐射条件下,整体热感觉变化最大;200 W/m²的太阳辐射与4 W/m²的红外辐射条件下,整体热感觉变化差异较小。在太阳辐射局部热暴露条件下,热敏感度由高至低依次为胸部>大臂>小臂>大腿>小腿,而在红外辐射局部热暴露条件下,热敏感度由高至低依次为胸部>大臂>小腿>大腿>小臂。本研究对于更准确地预测辐射热环境下的人体热反应,优化室内热环境具有重要意义。

关键词 辐射热暴露;室内人体热舒适;局部与整体热感觉;热敏感度

中图分类号: TU111; TU119+.5

文献标识码: A

Human Thermal Response Characteristics under Local Radiant Heat Exposure

Zhu Guodong^{1,2} Liu Guodan^{1,2} Ji Yihang^{1,2} Zhang Peiqi^{1,2} Ma Haonan^{1,2}
Zhang Yao^{1,2} Hu Songtao^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. Health Environment and Low-Carbon Energy Engineering Research Center of Shandong Province, Qingdao 266520, China)

Abstract In indoor environments, people are often exposed to the non-uniform thermal radiation. Most existing research focuses on changes in human thermal physiological responses and subjective thermal sensations under a single type of thermal radiation, such as solar radiation or infrared radiation. To examine the differences in human thermal responses under solar radiation and infrared radiation conditions, this study conducted separate local thermal exposure experiments involving solar and infrared radiation. Under both testing conditions, skin temperature was measured and thermal sensation votes were collected. Differences in thermal sensitivity across body parts under two radiation conditions were then calculated and analyzed. The results showed that, under the effect of solar radiation, a unit increase in radiation intensity caused skin temperatures at various body parts to increase by 0.01–0.02 °C, whereas infrared radiation produced a relatively greater increase in skin temperature at the exposed area, with reaches up to 1.0 °C. The greatest changes in the overall thermal sensation occurred when the chest was stimulated by solar or infrared radiation, exceeding 2.0 scale units. Upon stimulus application to limbs, such as the upper arm, forearm, thigh, and calf, overall thermal sensation changed most under the condition of 400 W/m² solar radiation, whereas differences in overall thermal sensation were not significant under 200 W/m² solar radiation and 4 W/m² infrared radiation. Under local exposure to solar radiation, thermal sensitivity ranged from high to low in the order of chest, upper arm, forearm, thigh, and calf, whereas under local radiant heat exposure to infrared radiation, thermal sensitivity ranged from high to low in the order of chest, upper arm, calf, thigh, and forearm. These findings provide a reference for more accurate prediction of human thermal responses in radiant heat environments, and for optimizing indoor thermal environments.

收稿日期:2026-01-07;修回日期:2026-02-08;录用日期:2026-04-03

责任编辑:田甜

基金项目:国家自然科学基金(52578132)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52578132).)



移动阅读

Keywords radiation heat exposure; indoor human thermal comfort; local and overall thermal sensation; thermal sensitivity

室内人们常处于热辐射环境中,较为常见的为太阳辐射,其能量密度高、照射面积广,在被动房设计中,常利用太阳辐射实现建筑节能,改善舒适性^[1-2]。此外,家用红外取暖器等局部加热设备,利用红外辐射提升热感觉^[3]。太阳辐射包含可见光、红外线和紫外线波段,家用红外取暖设备发射以红外辐射为主的电磁波,距离人体较近,照射区域集中。2种热辐射形式在波长、辐射强度、作用范围等方面存在差异。

针对太阳辐射热暴露条件下的人体热舒适,众学者开展了广泛研究。梁树维^[4]研究了太阳辐射直射人体时的蒸发散热量、辐射得热量的计算方法,并建立该条件下的人体热调节模型。Ji Yihang等^[5]发现,太阳辐射直射室内人体时,浅色着装人员皮肤温度提高0.9℃,深色着装人员皮肤温度提高1.2℃,是前者的1.3倍。A Yongga等^[6]研究发现,夏季太阳辐射导致平均皮肤温度提升0.7℃,整体热感觉提升0.64个标度。刘国丹等^[7]研究了太阳辐射直射人体时的热舒适区偏移规律,并给出了太阳辐射条件下不同代谢水平对应的热舒适区。在红外辐射热舒适研究方面,Gao Jie等^[8-9]研究了空间辐射供暖供冷系统中的人体热反应规律;杨佳霖等^[10]研究了空间辐射供暖供冷系统的热环境特性。在红外辐射个性化局部加热方面,R. Rugani等^[11]将局部红外辐射板与上下桌面集成,可获得将环境温度提高7 K的等效热感觉;Wang Tianhui等^[12]将红外辐射加热器作用于人体,研究结果显示,脚部、小腿、大腿和前臂部位的皮肤温差与不对称热感觉投票指标的相关性较高;Zhu Xueyue等^[13]将多个辐射板布置在人体周围,研究结果显示,寒冷环境下脚部的冷感觉强于腿部,加热小腿能够明显缓解整体热不适。现有研究多集中于太阳辐射或红外辐射等单一辐射类型下的人体热生理反应和主观热感觉变化,但热辐射的波谱范围较广,不同类型的热辐射条件下,人体热反应差异有待进一步研究。

本文分别开展太阳辐射和红外辐射局部热暴露实验,实测2种条件下人体的皮肤温度,收集主观热感觉投票,计算并分析2种辐射条件下各部位热敏感度差异。本研究有助于更准确地预测和评估辐射热环境下的人体热反应,对优化室内热环境设计、提高人体热舒适性具有重要意义。

1 实验方法

本文采用生理参数测量与主观热感觉投票相结合的方法,分别获取局部太阳辐射和红外辐射热暴露下的人体热反应特性。

GB/T 33833—2017《城镇供热服务》^[14]指出,冬季卧室、起居室温度不低于18℃,因此实验中室内温度设定为18℃。根据团队前期研究结果,对于常见的办公建筑与单元式住宅,进入室内的太阳辐射强度一般小于400 W/m²,因此太阳辐射强度分别设置为200、400 W/m²,热暴露时间为30 min;红外辐射模拟装置为“小太阳”取暖器,红外辐射强度分别设置为4、20 W/m²等常见挡位。为避免红外辐射条件下的人体灼烧感,热暴露时间为5 min。

本次实验招募了青岛理工大学在校学生作为受试者,采用GPower计算所需最小样本量,最终招募20名身体健康的受试者,10名男生,10名女生,受试者基本信息如表1所示。实验前所有受试者睡眠状况良好,饮食正常,72 h内无刺激性饮品摄入及未进行剧烈的身体活动。

表1 受试者基本信息

Tab.1 The basic information of the subjects

性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg
男	22.6±1.6	174.5±5.7	71.3±10.8
女	21.5±1.7	164.4±3.9	56.0±6.1

为避免不同服装热阻及辐射吸收率影响皮肤温度,本研究受试者统一着装,包括秋衣、秋裤、工装服、工装裤、袜子及运动鞋等,总服装热阻为1.10clo。选取前胸、大臂、小臂、大腿和小腿等日常生活场景下人体易受辐射的部位,作为热辐射刺激部位。皮肤温度测点布置及局部辐射热暴露区域如图1所示。

该实验在青岛理工大学人工环境室进行,长5 m、宽3 m、高2.6 m。人工环境室安装了均匀送风空调系统,顶板均匀送风、侧面回风。控制温度精度为±0.5℃,风速在0.1 m/s以下。

实验开始前,受试者在人工气候室外粘贴皮肤温度测点,随后进入人工环境室静坐10 min,并在此阶段结束前填写主观问卷。开启热辐射模拟设备,进行局部辐射暴露实验,最后,关闭热辐射模拟设备,受试者进入恢复阶段。在太阳辐射实验的热暴

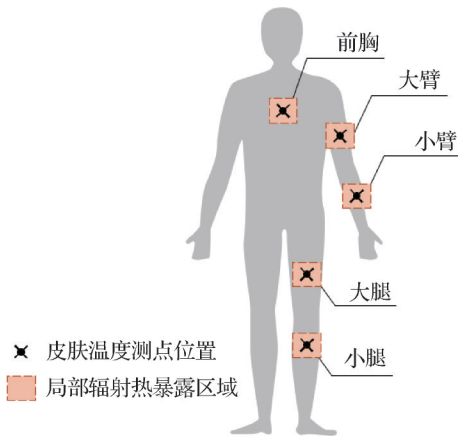
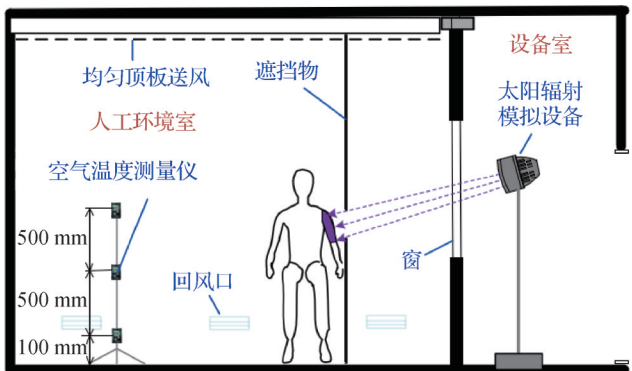


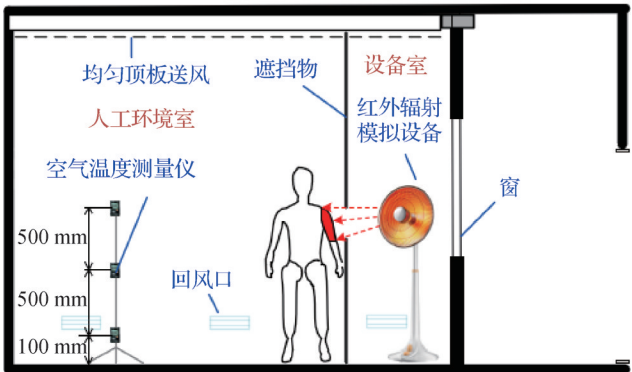
图1 皮肤温度测点布置及局部辐射热暴露区域

Fig.1 Skin temperature measurement points layout and local radiation heat exposure areas

露与恢复阶段,每10 min进行一次问卷调查,暴露阶段共计3次,恢复阶段1次。在红外辐射实验中,热暴露开始与结束时刻,分别进行一次主观问卷调查,间隔5 min,恢复阶段每10 min进行一次主观问卷调查。按照上述流程依次局部辐射各部位。局部热暴露实验系统如图2所示。



(a) 太阳辐射实验系统



(b) 红外辐射实验系统

图2 太阳辐射与红外辐射局部热暴露实验系统
(以刺激大臂为例)

Fig.2 Solar radiation and infrared radiation local thermal exposure experiment system
(taking the upper arm as an example)

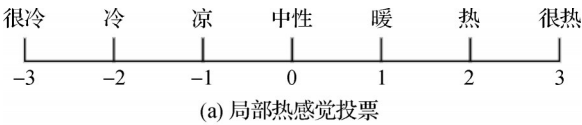
在距地面0.1、0.6、1.1 m处分别设置了testo174H温湿度自记仪,实测室内的温湿度^[15]。采用TES-1333R太阳辐射表和OHSP-350IR红外光谱分析仪,分别测量太阳辐射强度和红外辐射强度,测量方法按照ASHRAE Standard 55-2020^[15]规范执行。采用iButton DS1923纽扣式温湿度记录仪监测人体皮肤温度,测试设备的参数如表2所示。

表2 测试设备参数

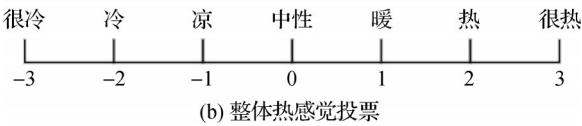
Tab.2 Parameters of test equipment

测试参数	设备名称	设备图	设备参数 (型号/分辨率/精度)
空气温湿度	温湿度自记仪		testo 174H, 0.1 °C/0.1%RH, ±0.5 °C/±3%RH
太阳辐射强度	辐射照度计		TES-1333, 0.1 W/m ² , ±10 W/m ²
红外辐射辐照度	红外光谱分析仪		OHSP-350IR, 波长范围: 380~1 050 nm, ±0.5 nm; 0.1 uW/cm ²
皮肤温度	纽扣式温湿度存储器		iButton DS1923, 0.1 °C, ±0.5 °C

本实验借助主观问卷调查,收集受试者的局部热感觉和整体热感觉。局部和整体热感觉采用7点量表进行评估^[15],具体内容如图3所示。



(a) 局部热感觉投票



(b) 整体热感觉投票

图3 主观热感觉投票

Fig.3 Subjective thermal sensation voting

2 实验结果

2.1 皮肤温度

太阳辐射和红外辐射条件下,被辐射部位皮肤温度变化分别如图4和图5所示。

由图4和图5可知,辐射热暴露前,四肢皮肤温度较低,躯干和头部皮肤温度较高。这是由于四肢血管分布相对较少,血液循环较差,热量难以传递到这些部位。躯干和头部则拥有更多的血管和肌肉组

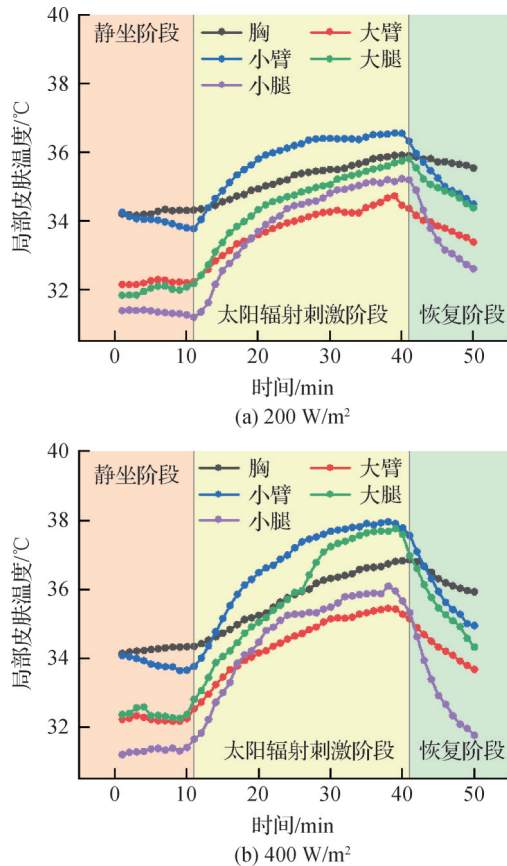


图4 太阳辐射条件下被辐射部位皮肤温度变化

Fig.4 Temperature changes of the skin at the exposed parts under solar radiation

织,能够更有效传递热量。在太阳辐射移除后,各部位皮肤温度几乎立即开始下降。相比之下,当红外辐射移除后,各部位皮肤温度未立即下降,而是经历了额外的升温阶段。这可能是在红外辐射热暴露期间,皮肤组织积累了大量的辐射能量,并在热暴露结束后逐渐释放,导致皮肤温度继续上升。

太阳辐射与红外辐射局部热暴露条件下,单位辐射强度的局部皮肤温度变化量如图6所示。

由图6可知,在红外辐射热暴露下,受辐射部位的皮肤温度增量明显大于太阳辐射。在太阳辐射作用下,单位辐射强度导致各部位皮肤温度变化约 $0.01\sim 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而在红外辐射作用下,单位辐射强度导致辐射热暴露部位皮肤温度的变化量较大,可达 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,红外辐射对人体热反应具有显著影响。这可能是因为红外辐射的能量恰好与人体分子的振动、转动能级匹配,能被人体吸收并转化为热能^[16]。而太阳辐射包含可见光、紫外线等多种波段,虽然可见光和紫外线的能级较高,但人体将其转化为热能的效率较低。此外,在 400 W/m^2 的太阳辐射和 20 W/m^2 的红外辐射等高强度的热辐射条件下,引起人体出汗,皮肤温度升高不显著。

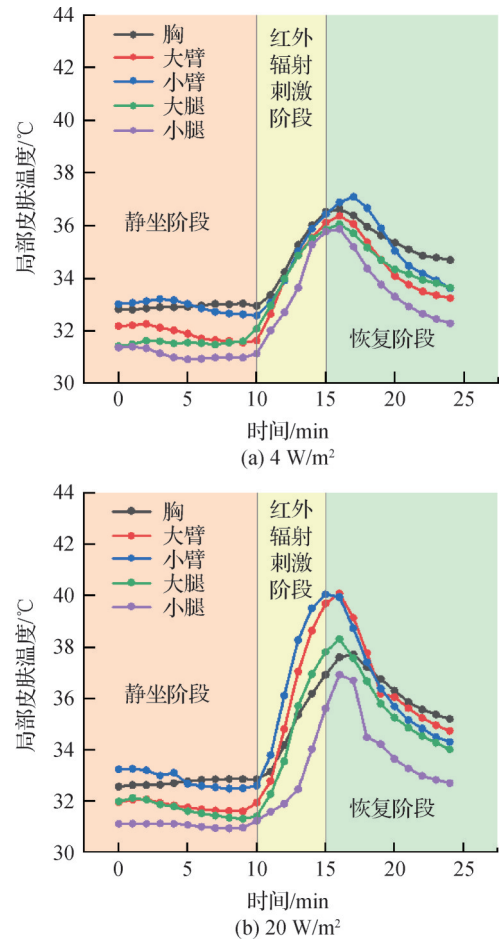


图5 红外辐射条件下被辐射部位皮肤温度变化

Fig.5 Temperature changes of the skin at the exposed parts under infrared radiation

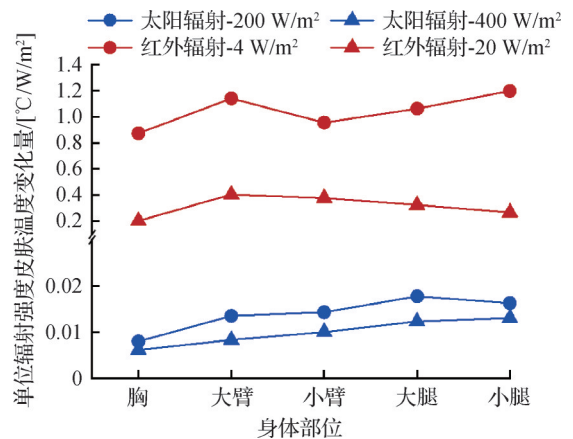


图6 单位辐射强度下被辐射部位皮肤温度变化

Fig.6 The change in skin temperature of the exposed parts per unit radiation intensity

2.2 热感觉

在太阳辐射与红外辐射分别刺激人体不同部位,整体热感觉投票变化量如图7所示。

太阳辐射和红外辐射局部刺激胸部时,整体热感觉变化均最大,升高超过2.0个标度,由于胸部是

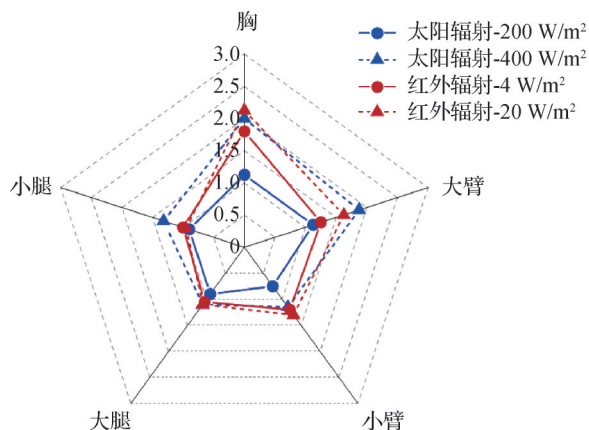


图7 整体热感觉变化量对比

Fig.7 Comparison of overall thermal sensation changes

人体的重要散热部位之一,热感受器分布密集,对热暴露较敏感。热辐射局作用于大臂、小臂、大腿、小腿等四肢部位时,400 W/m²的太阳辐射条件下,整体热感觉变化最大,200 W/m²的太阳辐射与4 W/m²的红外辐射条件下,整体热感觉变化差异较小。

太阳辐射与红外辐射分别作用于不同部位,受辐射部位的局部热感觉投票增量如图8所示。

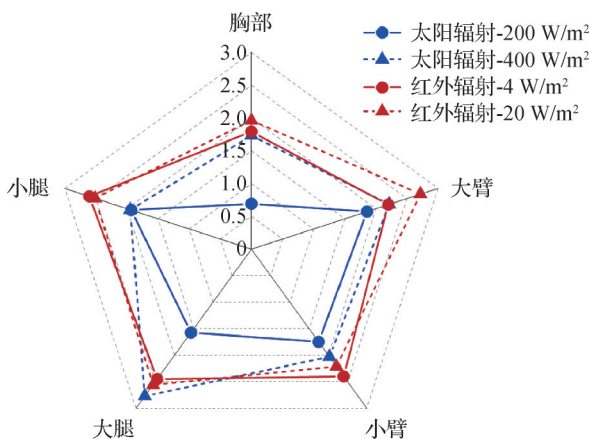


图8 局部热感觉变化量对比

Fig.8 Comparison of local thermal sensation changes

由图8可知,在红外辐射局部热暴露下,受辐射部位的局部热感觉变化量大部分高于太阳辐射,二者存在显著差异,这是由于人体更易吸收红外辐射转化为热能,导致局部皮肤温度上升,显著提升热感觉。在2种条件下,刺激胸部时,局部热感觉增量较小,但整体热感觉变化较大,下文通过热敏感度分析,进一步讨论该现象。

3 讨论

局部热敏感度直接关系到人体对于局部温度变化的感知与反应,进而影响整体热感觉,一般采用局部热敏感度系数反映人体对于热暴露的响应特性。

本团队研究发现,大腿出汗率与局部加热皮肤时的平均皮肤温度直接相关。基于大腿出汗量和皮肤温度变化的热敏感度系数计算方法,能够更准确反映身体各部位对热辐射的响应^[17]。考虑大腿出汗量和皮肤温度变化的敏感度系数计算方法更适用于热辐射条件,该方法如式(1)所示。

$$s = \Delta m / \Delta t_{sk,i} \quad (1)$$

式中: s 为热敏感度系数; Δm 为热作用前后大腿出汗量的变化量,g/(m²·h); $\Delta t_{sk,i}$ 为皮肤温度变化量,°C。

大腿出汗量由式(2)计算。

$$m = 0.63[(M - W) - 58] + 50(t_{sk} - t_{sk,n}) \quad (2)$$

式中: m 为大腿出汗量,g/(m²·h); M 为代谢率,W/m²; $t_{sk,n}$ 为热中性皮肤温度,°C; W 为人体所做机械功率,W/m²; t_{sk} 为皮肤温度,°C。

根据实测数据,计算得到太阳辐射与红外辐射局部热暴露条件下的人体各部位热敏感度,如图9所示。

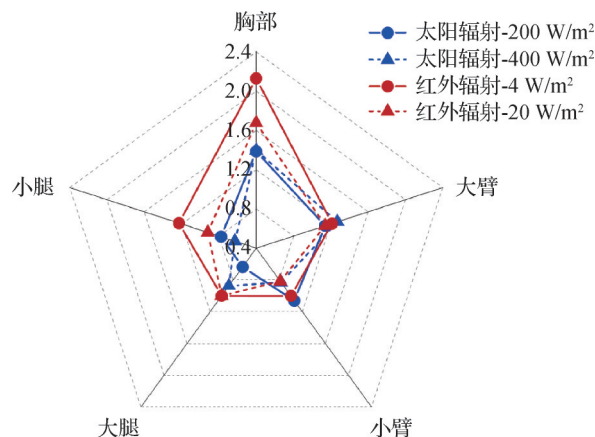


图9 各部位热敏感度对比

Fig.9 Comparison of thermal sensitivity

在太阳辐射局部热暴露条件下,热敏感度由高至低依次为:胸部>大臂>小臂>大腿>小腿;而在红外辐射局部热暴露条件下,热敏感度由高至低依次为:胸部>大臂>小腿>大腿>小臂。胸部的热敏感度较高,在4 W/m²的红外辐射条件下热敏感度超过2.0个标度,这可能是由于其皮肤较薄、血管密集,且承载呼吸和血液循环等重要生理功能,因此对外界环境变化敏感。相比之下,四肢部位皮下脂肪较厚,肌肉组织丰富,热惰性大,传热效率低,对辐射具有阻隔作用,且由于处于远心端,血液循环调节较慢,因此热敏感度较低。此外,各部位血管和神经分布的差异也可能引起了这种辐射热暴露的感知和反应不同。因此,热辐射刺激胸部时,整体热感觉变化较大。

4 结论与局限性

为了研究太阳辐射与红外辐射局部作用于各部位时人体的热反应特性,分别开展了太阳辐射和红外辐射局部加热实验,对比分析了刺激胸部、大臂、小臂、大腿、小腿时受辐射部位的皮肤温度、局部热感觉以及整体热感觉和热敏感度系数变化,得到如下结论:

1)红外辐射热暴露下,单位辐射强度引起的受辐射部位皮肤温度增量明显大于太阳辐射。在太阳辐射作用下,单位辐射强度引起各部位皮肤温度变化约 $0.01\sim 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而在红外辐射作用下,单位辐射强度引起被辐射部位皮肤温度的变化量较大,可达 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2)太阳辐射和红外辐射局部刺激胸部时,整体热感觉变化均最大,升高超过2.0个标度。局部刺激大臂、小臂、大腿、小腿等四肢时, 200 W/m^2 的太阳辐射与 4 W/m^2 的红外辐射条件下,整体热感觉变化差异较小。红外辐射条件下局部热感觉变化量大部分高于太阳辐射。

3)在太阳辐射局部热暴露条件下,热敏感度由高至低依次为:胸部>大臂>小臂>大腿>小腿。在红外辐射局部热暴露条件下,热敏感度由高至低依次为:胸部>大臂>小腿>大腿>小臂。胸部的热敏感度较高。

本研究还存在不足之处。考虑到受试者年龄有可能影响人体对于热辐射的生理响应,未来的研究可扩大样本量,进一步研究不同人群对局部热辐射的生理响应及主观热反应特征。此外,在现有研究成果的基础上,未来的研究可进一步分析热辐射条件下人体的免疫球蛋白S-IgE、多巴胺等激素的变化规律,为热辐射条件下健康适宜的室内环境营造奠定理论基础。

参考文献

- [1] 吴纯杰. 太阳能富集地区农村住宅被动式设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021. (Wu Chunjie. Passive design of rural residence in solar energy rich area design research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.)
- [2] 赵玉芬. 考虑太阳辐射影响的建筑设计策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013. (Zhao Yufen. Research on architecture design strategy considering the influences of solar radiation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.)
- [3] Liu Bingbing, Wang Haiying, Ji Ke, et al. Using personal comfort systems during the post-heating season in a cold climate: a field study in offices [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 45: 102974.
- [4] 梁树维. 太阳辐射条件下活动水平对室内人体热感觉与生理影响研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022. (Liang Shuwei. Research on the effect of activity level on indoor human thermal sensation and physiology under the condition of solar radiation [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.)
- [5] Ji Yihang, Liu Guodan, Zhang Yao, et al. Effects of the clothing colors on heat transfer and thermal sensation under indoor solar radiation in winter [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 53: 103899.
- [6] Yongga A, Li Nianping, He Yingdong, et al. Built thermal environment with multi-directional asymmetric radiations: an experimental study with real occupants [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 69: 103918.
- [7] 刘国丹, 乔美杰, 纪铨行, 等. 太阳辐射作用下不同活动水平的室内人体传热特性及热舒适研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(1): 70-78. (Liu Guodan, Qiao Meijie, Ji Yihang, et al. Examining heat transfer characteristics and thermal comfort of the indoor human body at different activity levels under solar radiation conditions [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(1): 70-78.)
- [8] Gao Jie, Liu Miao, Wu Shuang, et al. Occupant's thermal responses to asymmetric radiant thermal environment with warm wall and cool ceiling, Part A: overall thermal responses [J]. Energy and Buildings, 2023, 286: 112950.
- [9] Gao Jie, Jia Wenhui, Liu Miao, et al. Occupant's thermal responses to asymmetric radiant thermal environment with warm wall and cool ceiling, Part B: local skin temperature and thermal sensation [J]. Energy and Buildings, 2025, 329: 115256.
- [10] 杨佳霖, 吴小舟, 王登甲, 等. 辐射供暖供冷室内热环境特性及热辐射场评价方法[J]. 暖通空调, 2025, 55(6): 18-27. (Yang Jialin, Wu Xiaozhou, Wang Dengjia, et al. Characteristics of indoor thermal environment and evaluation method of thermal radiation fields for radiant heating and cooling [J]. Journal of HV&AC, 2025, 55(6): 18-27.)
- [11] Rugani R, Bernagozzi M, Picco M, et al. Thermal comfort and energy efficiency evaluation of a novel conductive-radiative Personal Comfort System [J]. Building and Environment, 2023, 244: 110787.
- [12] Wang Tianhui, Wang Dengjia, Yao Wanxiang, et al. Analysis of asymmetric thermal sensation under the coupling effect of temperature difference in multiple parts of human body [J]. Journal of Building Engineering,

- 2024, 84: 108598.
- [13] Zhu Xueyue, Liu Hong, He Mengyuan, et al. Comparing the improvement of occupant thermal comfort with local heating devices in cold environments [J]. Building and Environment, 2025, 268: 112350.
- [14] GB/T 33833—2017 城镇供热服务[S]. (GB/T 33833—(2017 Urban heating service[S].)
- [15] ANSI/ASHRAE Standard 55—2010 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- [16] Tsai S R, Hamblin M R. Biological effects and medical applications of infrared radiation [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2017, 170: 197–207.
- [17] Liu Guodan, Zhang Yao, Zhang Peiqi, et al. Thermal comfort and sensitivity of different body parts exposed to local infrared radiation [J]. Indoor Air, 2025, 2025: 5526614.

通信作者简介

刘国丹,女,教授,青岛理工大学环境与市政工程学院,17866827280,E-mail:lguodan@163.com。研究方向:人工环境营造及可再生能源应用。

About the corresponding author

Liu Guodan, female, professor, School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, 86–17866827280, E-mail: lguodan@163.com. Research fields: creation of artificial environments and application of renewable energy sources.