

低温环境下电加热服加热区域分布对局部热舒适的影响

林磊¹, 钱骏楠², 王宏付³, 柯莹^{*3}, 苏军强³

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 浙江理工大学 纺织科学与工程学院, 浙江 杭州 310018; 3. 江南大学 设计学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为探究电加热服加热区域分布对人体局部热舒适的影响规律,设计了3种不同加热区域分布方案,在5℃和0℃的环境温度下进行真人穿着实验,统计受试者局部热感觉和热舒适投票结果并进行分析。结果表明:电加热服加热区域分布在躯干、大腿和小腿时的加热效果最好,能显著提高腿部、足部的热感觉和热舒适,并使其他部位维持在较为舒适的状态;加热区域分布在躯干、大腿和手臂时能显著改善手部、手臂的热感觉和热舒适;加热区域集中分布在躯干部位时对局部热感觉和热舒适的改善效果不明显。

关键词:电加热服;主观热评价;热感觉;热舒适

中图分类号:TS 941.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2023)06-0508-05

Influence of the Heating Area Distribution of Electrically Heated Clothing on Local Thermal Comfort in Cold Environments

LIN Lei¹, QIAN Junnan², WANG Hongfu³, KE Ying^{*3}, SU Junqiang³

(1. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. College of Textile Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to explore the effect of the heating area distribution of electrically heated clothing on local thermal comfort, three types of heating area were designed. Human-wearing experiments were carried out at ambient temperatures of 5℃ and 0℃. The local thermal sensation and thermal comfort voting values of the subjects were calculated and analyzed. The results of the study showed that the best heating effect was achieved when the heating area is distributed in the torso, thighs and calves, which could significantly improve the thermal sensation and thermal comfort of the legs and feet as well as maintain other parts of the body in a relatively comfortable state. The distribution of heating zones on the torso, thighs and arms significantly improved the thermal sensation and thermal comfort of the hands and arms. When the heating area is concentrated in the trunk area, the improvement effect on local thermal sensation and thermal comfort is not significant.

Key words: electrically heated clothing, subjective thermal evaluation, thermal sensation, thermal comfort

室内环境温度的均匀稳定能使人保持热舒适,但是在办公场所使用空调进行大范围的温度调节会造成能量浪费^[1-2]。个体舒适系统(personal comfort systems,简称PCS)通过作用于人体局部,改善人体热感觉与热舒适^[3-4]。个体舒适系统包括桌

面风扇、电加热座椅、辐射板、电加热服装等^[5]。相对于传统空调改变室内温度使人体达到热舒适,个体舒适系统便捷性更好、舒适性较高且能耗少^[6-7]。

有学者通过电加热椅研究局部加热对人体热舒适的影响,结果发现局部加热能显著提高人体热

收稿日期:2023-05-22; 修订日期:2023-10-29。

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJCZH063)。

作者简介:林磊(1998—),男,硕士研究生。

*通信作者:柯莹(1987—),女,副教授,硕士生导师。主要研究方向为功能性服装设计与评价。Email:keying0312@163.com

感觉和热舒适,在凉爽环境中加热效果更为显著^[8-10]。WANG H Y 等^[11]使用电热扇、电加热夹克、电热护膝和电热护腕进行局部加热实验,结果表明对手腕加热不能明显改善热感觉,躯干加热和组合加热能明显改善整体热感。LI Z Q 等^[12]研究了电加热椅、加热垫、加热辐射板和电加热服装在 15 ℃ 和 18 ℃ 两种环境温度下对女性热舒适的影响,结果发现电加热服的热可接受性最高,对热感觉和热舒适的改善作用最好,消耗功率最低。张昭华等^[13]在低温环境下使用电加热片对人体单部位以及双部位组合加热,总结出脚部和背部加热对热感觉影响较大,组合加热比单部位加热效果好。DENG Y 等^[14]通过加热鞋垫、加热扶手和加热栏杆进行真人实验,得出局部加热有效消除了腿部和手部的不适感,同时提升低温环境下受试者的整体舒适性。

现有的个体舒适系统研究主要利用局部热通风、局部热辐射、电加热椅等方式^[15],对于电加热服装加热区域分布的研究较少,且研究侧重于单部位或者双部位组合加热对人体热舒适的影响,较少涉及多部位共同加热对电加热服性能的影响,对电加热服加热区域的研究有待深入^[10]。

文中研究了环境温度为 0 ℃ 和 5 ℃,空气相对湿度为 50% 时电加热服加热区域分布对人体局部热舒适的影响,并对躯干、腿部和手臂进行组合加热,分析针对不同加热区域受试者局部热感觉和热舒适的变化,探究非均匀低温环境下局部热感觉和热舒适之间的相关性,以期提高电加热服的加热效率和保暖性,实验结果可为人体热舒适的研究提供一定依据。

1 实验方案

1.1 实验环境

人工气候室,日本 Espec 公司制造。气候室于实验前 1 h 打开,保持室内温度稳定,空气温度分别设置为 5 ℃ 和 0 ℃,相对湿度为 50%,风速控制在 0.1 m/s 以内。

1.2 实验材料

碳纳米管电加热片,苏州捷迪纳米科技有限公司提供。加热片尺寸:1 片为 18 cm × 16 cm,6 片为 12 cm × 8.5 cm,加热温度范围为 37 ~ 53 ℃。实验所用服装及其面料成分见表 1。加热片置于摇粒绒夹克内层,以保证加热效果。为体现电加热服的加热效果,服装总热阻设定约为 0.240 3 m² · K/W,稍低于标准 ISO 11079—2007^[16]要求在 5 ℃ 环境条件下静坐时需要的服装热阻。

表 1 服装面料成分
Tab. 1 Clothing fabric components

| 服装 | 面料成分 |
|-------|--|
| 外套 | 面料: $w(\text{涤纶}) = 100\%$;里料: $w(\text{涤纶}) = 100\%$;填充物: $w(\text{涤纶}) = 100\%$ |
| 摇粒绒夹克 | $w(\text{涤纶}) = 100\%$ |
| 长裤 | $w(\text{涤纶}) = 100\%$ |
| 打底长裤 | $w(\text{涤纶}) = 100\%$ |
| 打底内衣 | $w(\text{涤纶}) = 100\%$ |
| 袜子 | $w(\text{腈纶}) = 65\%$, $w(\text{锦纶}) = 23\%$ $w(\text{绵羊毛}) = 11\%$, $w(\text{氨纶}) = 1\%$ |
| 鞋子 | 鞋底: $w(\text{合成橡胶}) = 100\%$;帮面: $w(\text{涤纶}) = 80\%$, $w(\text{氨纶}) = 20\%$;衬里和内垫: $w(\text{涤纶}) = 100\%$ |

具体加热区域分布如图 1 所示。躯干为人体主要代谢部位,并且背部和胸部冷感受器较多,对冷感受较为敏感,因此方案 H₁ 将加热片集中分布在躯干部位,背部使用一片 18 cm × 16 cm 的加热片,其余部位使用 12 cm × 8.5 cm 的加热片。低温环境下,人体四肢冷感较强,皮肤温度下降明显^[4],因此方案 H₂ 是将方案 H₁ 中腰部和背部的加热片分布到大腿和小腿位置,方案 H₃ 是在方案 H₂ 的基础上将小腿加热片分布到手臂位置。除背部加热面积为 288 cm²,其他部位的加热面积均为 102 cm²,3 个加热区域的加热总面积为 900 cm²。

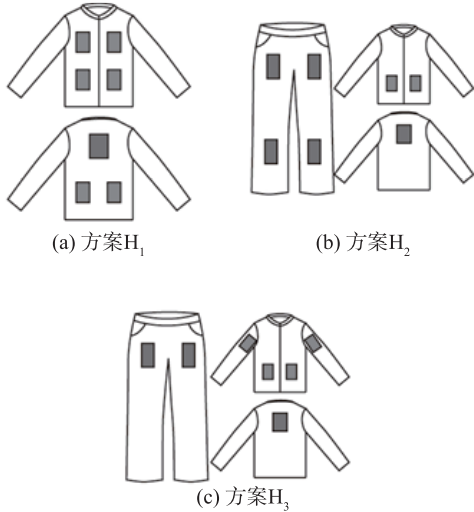


图 1 加热区域分布
Fig. 1 Heating area distribution

1.3 受试者

受试者为 7 名男性在校大学生,年龄(22.6 ± 1.2)岁,身高(175.1 ± 1.6) cm,体质量(62.6 ± 3.4) kg,身体质量指数(BMI)为(20.4 ± 1.0) kg/m²。提前告知受试者实验信息,受试者被要求实验前不能喝刺激性饮料,不进行剧烈运动。

1.4 实验流程

受试者实验前 30 min 到达,在休息室静坐休息,使身体达到稳定状态,换好实验服装后进入人工气候室,开始静坐实验。加热片温度设置为 53 ℃,实验总时长为 60 min,每隔 10 min 受试者填写主观感受问卷,反馈头部、躯干、手臂、手部、腿部和足部的热感觉和热舒适。评价参考 ISO 10551—2019^[17],采用 7 级评价标尺。热感觉和热舒适评价标尺见表 2。

表 2 主观感受评分标尺
Tab.2 Subjective feeling rating scale

| 评分标尺 | 热感觉 | 热舒适 |
|------|-----|-------|
| 3 | 热 | 非常舒适 |
| 2 | 暖 | 舒适 |
| 1 | 稍暖 | 有点舒适 |
| 0 | 中性 | 没感觉 |
| -1 | 稍凉 | 有点不舒适 |
| -2 | 凉 | 不舒适 |
| -3 | 冷 | 非常不舒适 |

1.5 数据分析

用 SPSS 软件进行数据处理,Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验,配对样本 t 检验比较主观感受是否存在显著差异。*,#,^分别表示 H_1 与 H_2 、 H_1 与 H_3 、 H_2 与 H_3 的结果有显著性差异($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 局部动态热感觉与热舒适

腿部和足部动态热感觉变化如图 2 所示。由图 2(a)可知, H_1 腿部热感觉逐渐降低,5 ℃和 0 ℃时评分均在 0 以下,在 0 ℃时接近稍凉, H_1 集中加热躯干,热量不足以传递到腿部,因此 H_1 腿部热感较低。 H_2 腿部热感最高,评分基本在 1 和 2 (稍暖~暖)之间,10 min 后和 H_1 产生显著性差异($p < 0.05$)。 H_3 腿部热感在 5 ℃时评分维持在 0.5 左右,0 ℃时评分维持在 0 左右。从图 2(b)可知,3 种加热区域的足部热感觉较接近; H_2 足部热感觉在 5℃和 0℃时均最高,0 ℃条件下,在 10 min 和 60 min 时与 H_1 有显著差异($p < 0.05$),在 30 min 时与 H_3 有显著差异($p < 0.05$)。原因可能是 H_2 对大腿和小腿进行加热,热量有部分传递到足部,使足部热感增加。

头部动态热舒适曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,5 ℃时 H_3 头部最舒适,在 10 min 和 60 min 时与 H_1 头部热舒适有显著差异($p < 0.05$),当温度下降到 0 ℃时, H_3 头部热舒适低于 H_2 ,可能在 5 ℃时, H_3 对手臂进行加热时能传递部分热量到头部;

温度降低至 0 ℃时,手臂加热产生的热量不足以影响头部热舒适。

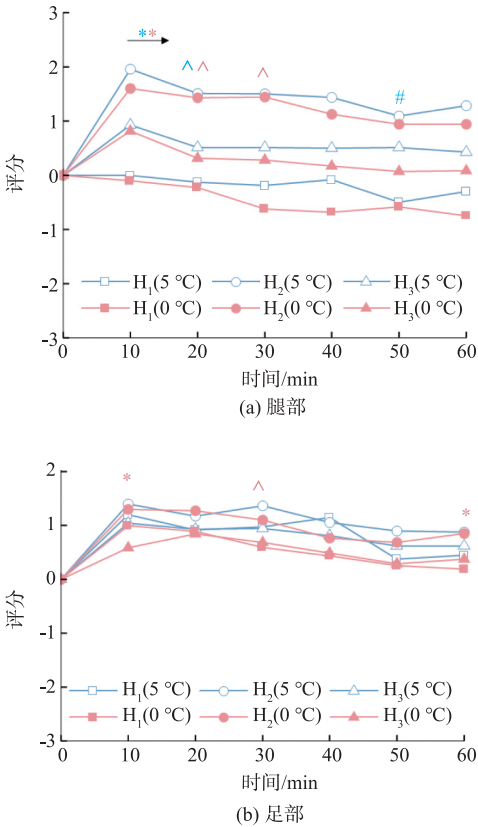


图 2 局部动态热感觉

Fig.2 Local dynamic thermal sensation

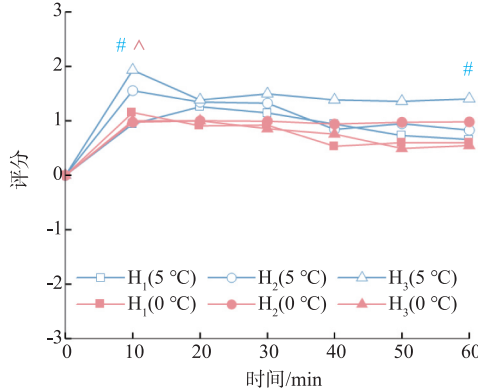


图 3 头部动态热舒适

Fig.3 Dynamic thermal comfort for the head

手部和腿部动态热舒适如图 4 所示。由图 4 (a)可知,5 ℃时 3 种方案的手部热舒适评分基本在 1 以上(有点舒适),0 ℃时 H_1 和 H_2 手部热舒适下降趋势比 H_3 明显,说明 H_3 对手臂加热,在一定程度上能提升手部热舒适。根据图 4(b)可知, H_1 腿部热舒适在 5 ℃和 0 ℃条件下评分均下降到 0 以下,说明穿着 H_1 时受试者腿部有点不舒适。5 ℃条件下, H_2 腿部热舒适最高,评分维持在 1.5 左右,腿部热舒适良好,在 10 min 后显著高于 H_1 ;在 20,30

和60 min时H₃腿部热舒适显著高于H₁($p < 0.05$)。温度降低到0℃时,H₂腿部热舒适较5℃评分降低约1个尺度,说明环境温度的变化对局部热舒适有较大影响。

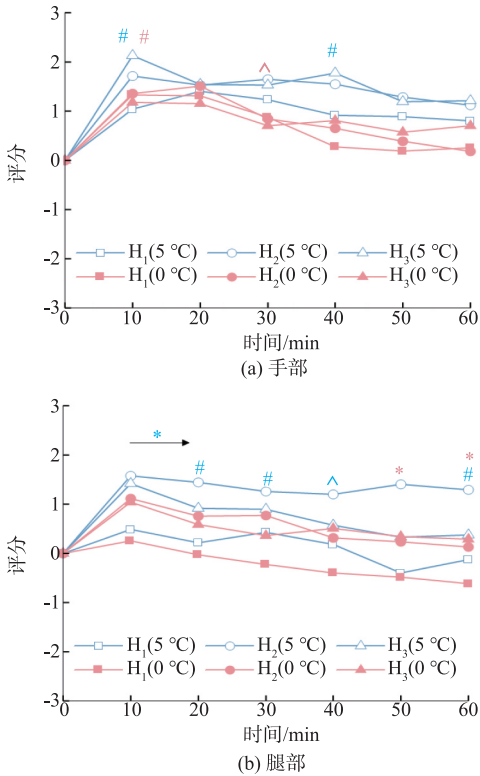


图4 局部动态热舒适

Fig.4 Local dynamic thermal comfort

2.2 局部稳态热感觉与热舒适

从局部动态热感觉和热舒适结果可以看到,实验进行50 min后受试者主观感受比较稳定,因此取最后两次主观感受投票值的平均值作为稳态数据进行分析。局部稳态热感觉如图5所示。由图5(a)可知,在5℃时,H₂腿部热感显著高于H₁和H₃($p < 0.05$),H₂头部热感也和H₁产生显著性差异($p < 0.05$)。H₂所有局部稳态热感觉评分基本在0以上,因此H₂对局部热感觉改善作用较好。由图5(b)可知,H₂腿部和足部热感觉均显著高于H₁和H₃($p < 0.05$),说明H₂对腿部和足部热感觉改善效果明显。

受试者局部稳态热舒适如图6所示。从图6(a)可以看出,H₃对提高头部的热舒适有较好作用,5℃时显著高于H₁和H₂($p < 0.05$);H₃腿部热舒适和H₁也有显著差异($p < 0.05$),H₂相比H₁和H₃腿部热舒适($p < 0.05$)显著提高,且使受试者保持了良好的足部热舒适。从图6(b)可以看出,0℃时H₂头部、手臂、腿部和足部热舒适均显著高于H₁($p < 0.05$),相比H₁,H₃对手臂和手部热舒适提升

明显。无论在5℃还是0℃,H₁躯干热舒适均是最低,说明集中加热躯干不能有效提高躯干热舒适,并可能导致躯干温度过高,从而造成人体不适。该结果与前人的研究具有一致性,与躯干调温相比,针对四肢进行热调节能更大程度地改变局部皮肤温度,从而提高热舒适感^[18-19]。

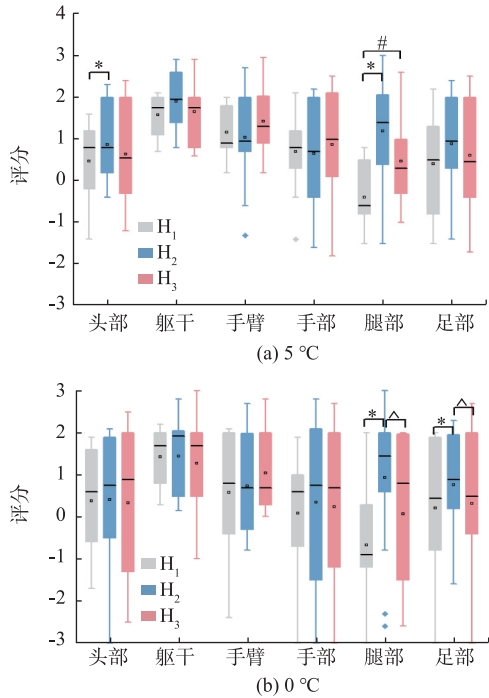


图5 局部稳态热感觉

Fig.5 Local steady-state thermal sensation

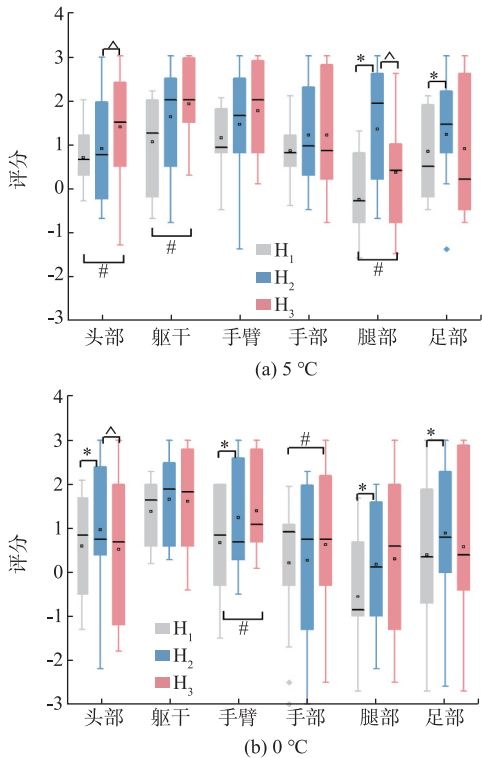


图6 局部稳态热舒适

Fig.6 Local steady-state thermal sensation

3 结 语

通过真人着装实验,分析电加热服不同加热区域分布对人体局部主观感受的影响,实验结果表明,电加热服的不同加热区域对人体局部热舒适感受产生不同的影响。加热区域集中分布在躯干位置对躯干热感觉和热舒适提升作用不大,还会造成其他部位局部热感觉和热舒适的降低。加热区域分布在躯干、大腿和小腿时对各局部热舒适改善效果最好。建议在加热面积有限的情况下,将加热片分散到尽可能多的部位,且与手臂加热相比,优先考虑腿部加热。研究结果可提高电加热服加热效率、优化电加热服的设计,同时可为人体热舒适的研究提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] VESELY M, ZEILER W. Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014 (34): 401-408.
- [2] YANG L, YAN H Y, LAM J C. Thermal comfort and building energy consumption implications [J]. *Applied Energy*, 2014,115: 164-173.
- [3] ZHANG H, ARENS E, ZHAI Y C. A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments [J]. *Building and Environment*, 2015,91: 15-41.
- [4] ANDRÉ M, DE VECCHI R, LAMBERTS R. User-centered environmental control: a review of current findings on personal conditioning systems and personal comfort models [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 222: 110011.
- [5] 沈雷,孙焱. 智能可穿戴领域研究现状和发展趋势 [J]. *服装学报*,2023,8(2):125-133.
SHEN Lei,SUN Tian. Intelligent wearable research status and its development trend [J]. *Journal of Clothing Research*,2023,8(2):125-133. (in Chinese)
- [6] SONG W F, ZHANG Z R, CHEN Z H, et al. Thermal comfort and energy performance of personal comfort systems (PCS): a systematic review and meta-analysis [J]. *Energy and Buildings*, 2022,256: 111747.
- [7] YANG B, WU M C, LI Z, et al. Thermal comfort and energy savings of personal comfort systems in low temperature office: a field study [J]. *Energy and Buildings*, 2022,270: 112276.
- [8] DENG Q H, WANG R H, LI Y G, et al. Human thermal sensation and comfort in a non-uniform environment with personalized heating [J]. *Science of the Total Environ-*

ment, 2017,578: 242-248.

- [9] YANG H C, CAO B, ZHU Y X. Study on the effects of chair heating in cold indoor environments from the perspective of local thermal sensation [J]. *Energy and Buildings*, 2018,180: 16-28.
- [10] LUO W, KRAMER R, DE KORT Y, et al. Effectiveness of personal comfort systems on whole-body thermal comfort-a systematic review on which body segments to target [J]. *Energy and Buildings*, 2022,256: 111766.
- [11] WANG H Y, XU M S, BIAN C X. Experimental comparison of local direct heating to improve thermal comfort of workers [J]. *Building and Environment*, 2020, 177: 106884.
- [12] LI Z Q, KE Y, WANG F M, et al. A study of thermal comfort enhancement using three energy-efficient personalized heating strategies at two low indoor temperatures [J]. *Building and Environment*, 2018,143: 1-14.
- [13] 张昭华,陈雪,倪军,等. 低温环境下局部电加热对人体热反应的影响 [J]. *纺织学报*, 2023, 44 (3) 187-194.
ZHANG Zhaohua, CHEN Xue, NI Jun, et al. Influence of local electric heating on overall thermal response of human body in cold environment [J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(3)187-194. (in Chinese)
- [14] DENG Y, CAO B, LIU B, et al. Effects of local heating on thermal comfort of standing people in extremely cold environments [J]. *Building and Environment*, 2020, 185: 107256.
- [15] SHAHZAD S, CALAUTIT J K, CALAUTIT K, et al. Advanced personal comfort system (APCS) for the workplace: a review and case study [J]. *Energy and Buildings*, 2018,173: 689-709.
- [16] Ergonomics of the thermal environment- determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects: ISO 11079: 2007 [S/OL]. [2023-03-24]. <https://www.doc88.com/p-6394774218955.html>.
- [17] Ergonomics of the physical environment-subjective judgmentscales for assessing physical environments: ISO 10551: 2019 [S/OL]. [2023-03-24]. <https://www.doc88.com/p-3877328235140.html>.
- [18] NAKAMURA M, YODA T, CRAWSHAW L I, et al. Relative importance of different surface regions for thermal comfort in humans [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2013, 113(1): 63-76.
- [19] NAKAMURA M, YODA T, CRAWSHAW L I, et al. Regional differences in temperature sensation and thermal comfort in humans [J]. *Journal of Applied Physiology*, 2008, 105(6): 1897-1906.

(责任编辑:卢杰)