

欧聪颖,刘何清,张强.室内静坐状态下影响皮肤温度的环境因素[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,36(3):22-27. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.004

Ou C Y, Liu H Q, Zhang Q. Environmental Factors of Affecting Human Skin Temperature When Sitting Indoors[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,36(3):22-27. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.004

室内静坐状态下影响皮肤温度的环境因素

欧聪颖,刘何清*,张强

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:在人工舱中以环境温度、湿度、风速为变量,考虑服装热阻的条件下,对多名静坐受试者的皮肤温度进行了测量.实验结果显示:环境温度与皮肤温度呈线性相关,可用于预测人体的皮肤温度;随着环境温度的升高,人体皮肤间的温差减小,皮肤温度均匀度增加;环境湿度对皮肤温度的影响取决于人体的出汗状态;环境风速增大加快对流与蒸发散热,皮肤温度随风速增大而降低.

关键词:环境温度;空气流速;相对湿度;皮肤温度

中图分类号:TU023 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)03-0022-06

Environmental Factors of Affecting Human Skin Temperature When Sitting Indoors

OU Congying, LIU Heqing, ZHANG Qiang

(School of Mining and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The skin temperatures of several sedentary subjects were measured in an artificial environment cabin with ambient temperature, humidity and wind speed as variables and clothing thermal resistance as factors. The results showed that the environmental temperature is linearly related to the skin temperature and can be used to predict the skin temperature of human body. With the increase of environmental temperature, the temperature difference between human skin decreases and the skin temperature uniformity increases. The influence of environmental humidity on skin temperature depends on the sweating. The wind speed increases, accelerate the convection and evaporation heat, resulting in decreased skin temperature.

Keywords: ambient temperature; air velocity; relative humidity; skin temperature

皮肤温度是反映人体热平衡状态的重要生理参数,决定了人体与环境之间热量交换的形式与方向.目前,国内外针对皮肤温度的研究主要集中于皮肤温度对人体热舒适的影响.实验研究发现,皮肤温度与热舒适、热感觉密切相关^[1-2],可以作为评估人体热感觉、热舒适的有效指标^[3-5].皮肤温度受环境参数与个体因素的影响,掌握皮肤温度随环境参数变化的规律,对合理设计室内热湿环境参数,提升人体热舒适具有重要意义.近年来,诸多研究者对人体皮肤温度进行了相关研究:Huizenga^[6]研究了不同温度刺激时,局

收稿日期:2018-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474105);湖南省研究生科研创新项目资助(CX2017B662)

*通信作者,E-mail:hqliu8222638@163.com

部皮肤温度的变化;Sawatari^[7]在热应激实验中对比了不同年龄人群,环境温度升高时皮肤温度的变化情况;熊静等^[8-9]通过实验探究了温度突变环境下,人体生理参数的变化情况及不同性别的皮肤温度变化差异;李敏等^[10]探究了头部送风条件下人体各部位皮肤温度的变化趋势;童力等^[11]对比了2种不同加权方法得到的平均皮肤温度与热感觉之间的关系;王海英等^[12-13]利用人工气候室实验,探究了不同活动下的人体皮肤温度和人体舒适皮肤温度;刘艳峰等^[14]通过测试不同环境温度升温、降温过程中人体的皮肤温度,探究人体皮肤温度的适应性变化特征及垂直分布规律;高黎颖等^[15]研究了高温高湿环境下显性出汗状态时人体上躯干皮肤温度的变化规律;刘蜜等^[16]对不同年龄健康成年人的足趾皮肤温度进行测量,实验结果表明年龄对足趾皮肤温度无明显影响.室内热湿环境下皮肤温度往往同时受到体温调节和环境参数的综合影响,人体皮肤温度的分布特性、随环境参数的变化趋势还有待进一步研究.鉴于此,笔者基于人体热平衡原理,从人体散热的角度研究不同室内热湿环境下人体皮肤温度变化的规律,为室内热湿环境设计、改善人体散热提供科学依据.

1 实验方法

1.1 人工环境舱

本实验在湖南科技大学资源环境与安全工程学院人工环境舱内进行.人工环境舱平面简图见图1,环境舱内实验工位见图2.人工环境舱内部墙壁材料均为不锈钢板,入口处一侧设有双层玻璃透明窗口,可透过窗户观察舱内实验具体情形.除了入口处一侧的墙壁,其他墙壁表面均配备有辐射板,可用于调控舱内环境辐射温度.舱内设有空气调节系统、监测监控系统,可通过电脑上的控制程序动态调控室内温度、湿度、辐射温度等环境参数,从而实现对生产、生活中各种实际热湿环境的模拟,可以满足本研究中实验工况设置的需求.其中,人工环境舱内环境温度控制区间为 $-15\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度控制区间为 $30\%\sim 95\%$,精度为 $\pm 2\%$;壁面温度控制区间为 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.室内风速由志高FS-40-16A8落地扇控制,输出风量 $\geq 60\text{ m}^3/\text{min}$,可均匀提供实验过程中所需的风速.

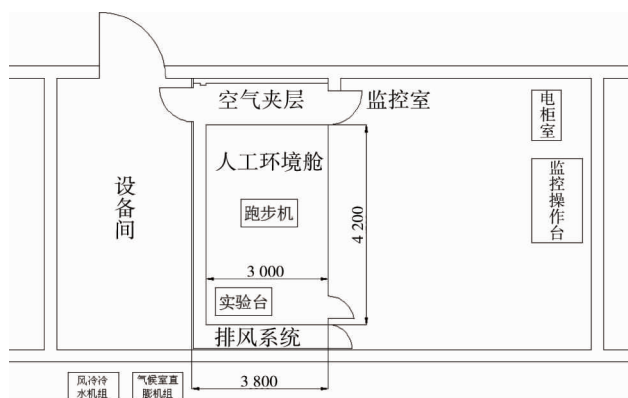


图1 人工环境舱平面



图2 实验工位

1.2 测量仪器

由于监测监控系统检测结果有一定的延迟与误差,为确保实验过程中实验工况控制的准确性及稳定性,对环境舱内温度、湿度、风速、辐射温度进行校准.环境温度、湿度的校准采用 HUMICAP[®] 温湿度手持式仪表 HM70 (配备 HMP76 和 HMP77 探头), HMP76 探头的温度测量区间为 $-50\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; HMP77 探头的温度测量区间为 $-70\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; HMP76 和 HMP77 探头的相对湿度测量区间为 $0\%\sim 100\%$,精度为 $\pm 1\%$.风速的校准采用美国 TSI 公司的 TSI-5725 手持式叶轮风速仪,风速测量区间为 $0.25\sim 30.00\text{ m/s}$,精度为读数 $\pm 1\%$,分辨率为 0.01 m/s .皮肤温度采用上海沃森森电子科技有限公司的 DS1922L 纽扣式温度记录仪进行测量,温度测量范围为 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度小于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.该纽扣式温度记录仪可连接适配器与主机通信,通过 Maxim 在线程序自定义数据采集间隔时间($1\text{ s}\sim 273\text{ h}$)、数据采集任务开始时间和数据分辨率($0.5, 0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$),实现实验过程中人体皮肤温度等间隔实时测量与记录,便于观察皮肤温度的实时变化情况,获取稳定状态下的皮肤温度.本实验中数据采集间隔时间设置为

30 s,数据分辨率设置为 0.062 5 °C.

1.3 实验方法与流程

室内热湿环境下皮肤温度往往同时受到体温调节和环境参数的综合影响,人体皮肤温度的分布特性随环境参数的变化趋势还有待进一步研究.因此,本文以环境温度、湿度、风速为变量进行实验.为减少个人因素对皮肤温度的影响,不同年龄下皮肤温度的变化规律不在本次实验范围内.本实验聘请 8 名湖南科技大学学生,年龄为 23±2 岁,均身心健康,无不良习惯.实验过程中受试人员均穿着内衣、棉质短袖 T 恤、短裤和夏季拖鞋,服装热阻依次为 0.04, 0.19, 0.08, 0.02 clo(1 clo = 0.155 (m² · °C)/W),椅子热阻忽略不计,共 0.33 clo^[17].实验中,皮肤温度测量点的设置及平均皮肤温度的计算依据刘蔚巍等^[18]对 26 种皮肤温度测量布点方式进行综合评估,得出的最适用于实验的布点方法:一共设置 10 个皮肤温度测量点,依次为 A 额头、B 前胸、C 上臂、D 后背、E 腹部、F 下臂、G 手背、H 大腿、I 小腿、J 脚背,平均皮肤温度采用加权平均法计算^[18],如式(1)所示.

$$t_{sk} = 0.06t_A + 0.12t_B + 0.12t_E + 0.12t_D + 0.08t_C + 0.06t_F + 0.05t_G + 0.19t_H + 0.13t_I + 0.07t_J. \quad (1)$$

式中: t_{sk} 为平均皮肤温度, °C; t_A 为额头皮肤温度, °C; t_B 为前胸皮肤温度, °C; t_E 为腹部皮肤温度, °C; t_D 为后背皮肤温度, °C; t_C 为上臂皮肤温度, °C; t_F 为下臂皮肤温度, °C; t_G 为手背皮肤温度, °C; t_H 为大腿皮肤温度, °C; t_I 为小腿皮肤温度, °C; t_J 为脚背皮肤温度, °C.

皮肤测量点具体分布见图 3.

实验分 3 个阶段进行,每个工况进行 8 次重复实验,对皮肤温度测量结果取平均值.第一阶段固定湿度 70%,风速在 0.05 m/s 以内,改变环境温度为 24, 26, 28, 30, 32 °C,探究不同环境温度下皮肤温度的变化规律;第二阶段固定环境温度为 28, 30 °C,风速在 0.05 m/s 以内,改变环境湿度为 60%, 70%, 80%,探究不同环境湿度下皮肤温度的变化规律;第三阶段固定环境温度为 28, 30 °C,湿度为 70%,改变风速为 0.5, 0.8, 1.1 m/s,探究不同环境风速下皮肤温度的变化规律.实验过程中辐射温度与环境温度相同,受试者静坐或低声交谈,新陈代谢率为 1.0 met(1 met = 58.2 W/m²)^[17].

实验均在下午 2:00~6:00 进行,受试人员实验前睡眠良好,避免刺激性饮食与剧烈运动,保持情绪正常,实验之前在休息室休息 15 min,用透气医用胶带将纽扣式温度记录仪黏着于皮肤测量点,到达设定的数据采集时间后进入环境舱,在环境舱内保持静坐或阅读直至实验完成.

2 结果与分析

2.1 实测环境参数

经统计,3 个阶段实测环境工况见表 1~表 3.由表 1~表 3 可知:实测工况与设计工况误差较小,环境温度、风速相对稳定,环境湿度波动较大.环境温度误差控制在 0.5 °C 以内,环境湿度误差控制在 6% 以内,风速误差控制在 0.1 m/s 以内,实验过程中环境工况能较好地稳定在设计工况.

表 1 第一阶段实验实测工况参数

设计工况		实测工况		
环境温度/°C	相对湿度/%	环境温度/°C	相对湿度/%	空气流速/(m/s)
24		24.17±0.16	73.25±1.45	0.051±0.005
26		26.12±0.30	72.12±2.69	0.041±0.009
28	70	27.98±0.32	69.36±1.67	0.043±0.007
30		30.02±0.11	68.24±2.46	0.048±0.021
32		32.13±0.27	69.66±3.22	0.044±0.010

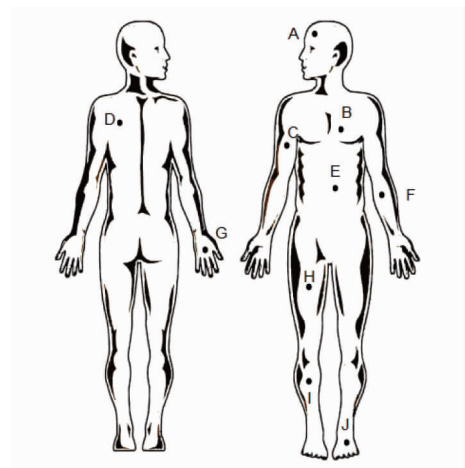


图 3 皮肤测量点分布

表2 第二阶段实验实测工况参数

设计工况		实测工况		
环境温度/℃	相对湿度/%	环境温度/℃	相对湿度/%	空气流速/(m/s)
28	60	27.85±0.15	60.79±1.38	0.046±0.002
	70	27.98±0.32	69.36±1.67	0.043±0.007
	80	28.23±0.31	79.63±3.06	0.039±0.015
30	60	30.05±0.27	60.61±2.11	0.036±0.014
	70	30.02±0.11	68.24±2.46	0.048±0.021
	80	30.12±0.23	79.32±2.68	0.042±0.008

表3 第三阶段实验实测工况参数

设计工况			实测工况		
环境温度/℃	相对湿度/%	空气流速/(m/s)	环境温度/℃	相对湿度/%	空气流速/(m/s)
28	70	0.5	27.56±0.17	68.61±2.91	0.51±0.007
		0.8	28.06±0.38	71.24±1.87	0.79±0.002
		1.1	27.79±0.22	72.47±2.91	1.15±0.011
30	70	0.5	30.01±0.10	69.94±2.33	0.51±0.003
		0.8	29.92±0.13	72.18±2.76	0.81±0.012
		1.1	30.12±0.10	68.83±2.48	1.13±0.008

2.2 不同室内热湿环境下皮肤温度

2.2.1 不同环境温度下皮肤温度变化

环境湿度为70%时,不同环境温度下皮肤温度的变化见图4.

由图4可知:

1)随着环境温度的升高,皮肤温度增大.这是因为皮肤与周围环境直接接触,环境温度上升时,环境与皮肤之间的温差减小,人体向周围环境的对流、辐射散热量减小,为了维持人体热平衡,交感神经活动减弱,皮肤血管舒张,血流量大大增加,皮肤温度上升.

2)环境温度为24, 26, 28, 30, 32℃时,局部皮肤温度标准差依次为0.76, 0.67, 0.60, 0.53,

0.48℃,表明皮肤温度分布的均匀度随环境温度升高而增加.这是因为随着环境温度的升高,人体表面不同部位的出汗状态趋于一致,散热量逐渐稳定,局部皮肤温度的大小也逐渐接近.

为了更直观地分析局部皮肤温度大小随环境温度变化的情况,采用线性回归得出皮肤温度与环境温度的关系式,皮肤温度-环境温度回归关系式及其决定系数 R^2 见表4.

表4 皮肤温度-环境温度回归关系式

测量点	回归关系式	决定系数 R^2
额头	$y = 27.85 + 0.24x$	0.97
前胸	$y = 28.82 + 0.20x$	0.99
后背	$y = 30.00 + 0.16x$	0.97
腹部	$y = 31.10 + 0.13x$	1.00
上臂	$y = 26.81 + 0.24x$	0.94
下臂	$y = 22.81 + 0.38x$	0.96
手背	$y = 23.86 + 0.36x$	0.96
大腿	$y = 27.59 + 0.22x$	0.98
小腿	$y = 25.41 + 0.27x$	0.99
脚背	$y = 25.12 + 0.32x$	0.96
平均皮肤温度	$y = 27.46 + 0.23x$	0.99

注: y 为皮肤温度,℃; x 为环境温度,℃

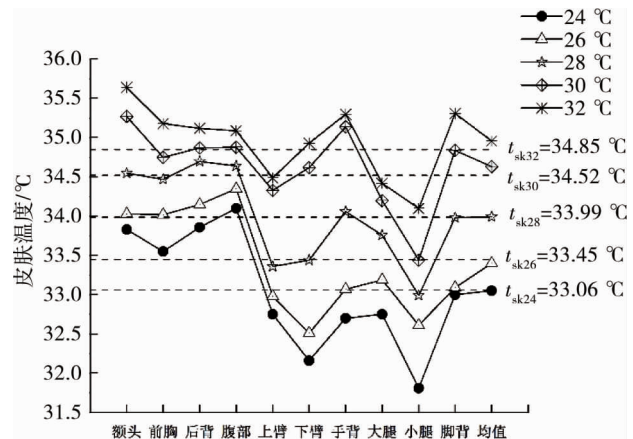


图4 相对湿度70%时不同环境温度下皮肤的温度变化

由表4可知:

1)皮肤温度随环境温度的升高线性增大.不同部位皮肤受环境温度的影响不同.腹部皮肤-环境温度关系式斜率最小,下臂皮肤温度-环境温度关系式斜率最大,表明腹部皮肤温度受环境温度影响的波动最小,而下臂皮肤温度对环境温度的变化最敏感.

2)回归关系式的决定系数均在0.94以上.因此,可用表4中的回归关系式对处于环境温度24~32℃,湿度70%,风速<0.05 m/s中的人体皮肤温度进行良好的预测.

2.2.2 不同环境湿度下皮肤温度

环境温度为28, 30℃时,环境湿度对皮肤温度的影响见图5.

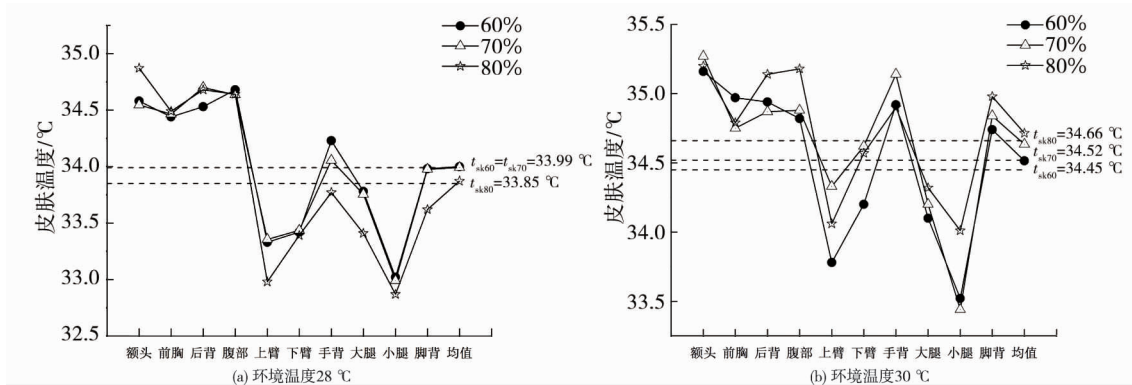


图5 不同环境湿度下皮肤温度变化

由图5可知:

1)环境湿度变化时,局部皮肤温度变化较小,不成明显规律.这是因为环境湿度对皮肤温度的影响取决于皮肤的出汗状态,而不同部位出汗状态不同.皮肤表面处于隐性出汗状态时,人体主要通过对流、辐射向周围环境散热,环境湿度升高,水蒸气分压力增大,辐射散热量增加,为了维持人体热平衡,皮肤血管收缩,血流量减小,皮肤温度降低.皮肤表面处于显性出汗状态时,相较隐性出汗,人体向周围环境的蒸发散热增加,湿度增大,一定时间内,蒸发散热量降低,为了维持人体热平衡,皮肤血管舒张,血流量增大,皮肤温度升高.

2)环境温度不同时,相对湿度对皮肤温度的影响也不同.环境温度为28℃时,相对湿度为60%, 70%, 80%,局部皮肤温度标准偏差依次为0.59, 0.60, 0.74℃,局部皮肤温度均匀度随湿度增大而增大;环境温度为30℃时,局部皮肤温度标准偏差依次为0.57, 0.53, 0.45℃,局部皮肤温度均匀度随湿度增大而减小.

2.2.3 不同环境风速下皮肤温度

环境温度为28, 30℃时,风速对皮肤温度的影响见图6.

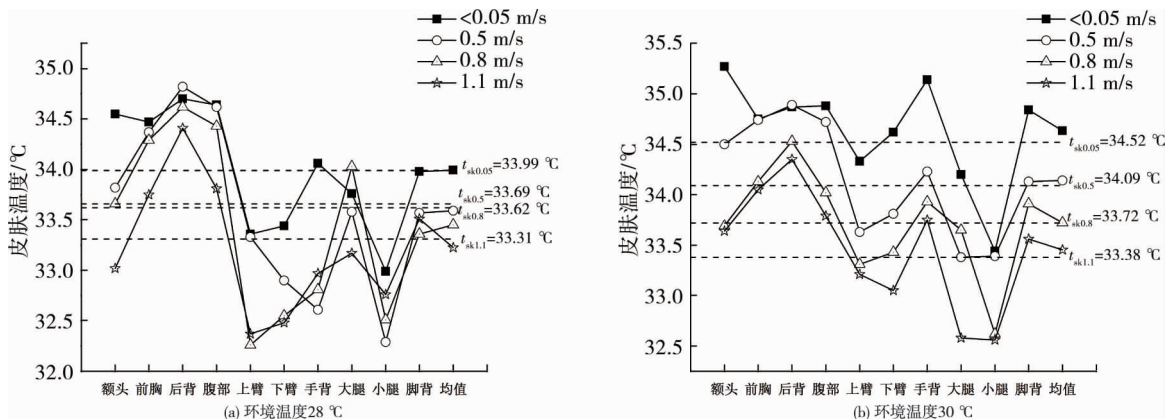


图6 不同风速下皮肤温度变化

由图6可知:

1)环境温度一定时,随着风速增大,皮肤温度基本呈下降趋势.同时,随着风速不断增大,局部皮肤温

度下降幅度变小.这是因为对流传热系数随风速增大而增大,强化了对流散热效率,皮肤温度随之下降;当皮肤温度受风速影响下降到一定程度时,皮肤与环境之间的温差减小反过来使对流散热总量降低,从而导致皮肤温度的下降速率减慢.

2)环境温度越高,风速对皮肤温度的影响越明显.这是因为随着环境温度的升高,人体开始出汗,风速增大加强了对流传质,蒸发散热速率增大,皮肤温度下降速率加快.

3 结论

1)环境温度、湿度、风速对皮肤温度均有影响,但湿度、风速对皮肤温度的影响受环境温度的限制.

2)随着环境温度的升高,人体表面不同部位的皮肤温度趋于一致,在这个过程中,腹部皮肤温度最稳定,下臂皮肤温度变化最大;环境湿度主要影响人体汗液蒸发,进而导致皮肤温度变化;皮肤温度及其下降幅度随风速增大而减小.

3)得出了适用于环境温度 $24\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度70%,室内风速 $<0.05\text{ m/s}$ 热湿环境的皮肤温度预测关系式.

参考文献:

- [1] 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*, 2016, 25(1/2):147-150.
- [2] Kompella S, Mao S, Hou Y H, et al. Thermoreception and temperature regulation [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(1):212-224.
- [3] Liu H, Tan Q, Li B Z, et al. Impact of cold indoor thermal environmental conditions on human thermal response[J]. *Journal of Central South University*, 2011, 18(4):1285-1292.
- [4] Liu W, Lian Z, Deng Q. Use of mean skin temperature in evaluation of individual thermal comfort for a person in a sleeping posture under steady thermal environment[J]. *Indoor & Built Environment*, 2014, 24(4):2267-2269.
- [5] Choi J H, Loftness V. Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate overall thermal sensations[J]. *Building & Environment*, 2012, 58(15):258-269.
- [6] Huizenga C, Zhang H, Arens E, et al. Skin and core temperature response to partial and whole-body heating and cooling[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2004, 29(7/8):549-558.
- [7] Sawatari H, Chishaki A, Miyazono M. Different physiological and subjective responses to the hyperthermia between young and older adults; basic study for thermal therapy in Cardiovascular Diseases[J]. *Journals of Gerontology*, 2015, 70: 912-916.
- [8] Xiong J, Zhou X, Lian Z. Thermal perception and skin temperature in different transient thermal environments in summer[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 128: 155-163.
- [9] Xiong J, Lian Z W, Zhang H B. Physiological response to typical temperature step-changes in winter of China[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 687-694.
- [10] 李敏,端木琳,金权,等.头部送风非均匀热环境下人体皮肤温度的研究[J].*人类工效学*,2014,20(3):59-64.
- [11] 童力,胡松涛,刘国丹,等.基于热感觉的低压环境皮肤温度研究[J].*暖通空调*,2014(7):72-74.
- [12] 王海英,胡松涛.出汗状态下舒适皮肤温度的实验研究[J].*暖通空调*,2014(5):110-113.
- [13] Wang H, Hu S. Experimental study on thermal sensation of people in moderate activities[J]. *Building and Environment*, 2016, 100:127-134.
- [14] 刘艳峰,周翔,王丽娟.人体皮肤温度适应性变化特性及垂直分布规律初步研究[J].*环境与健康杂志*,2014,31(1):68-70.
- [15] 高黎颖,刘何清,刘天宇,等.高温高湿环境对显性出汗人体躯干皮肤温度的影响[J].*环境与健康杂志*,2017,34(1):78-80.
- [16] 刘蜜,李玉珍,宋丹丹,等.正常人足趾皮肤温度和血流灌注量的测定分析[C]//全国中医药博士生创新发展学术论坛,2011.
- [17] The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2004* [S]. 2004.
- [18] Liu W, Lian Z, Deng Q, et al. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study [J]. *Building & Environment*, 2011, 46(2):478-488.