

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170800306

成年男性各部位非显性出汗率的比例关系

张文欢¹, 钱晓明¹, 范金士^{1,2}, 牛丽¹, 师云龙¹

(1. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300387; 2. 美国康奈尔大学 纤维科学与服装设计系, 纽约 14850)

摘要 为研究不同运动状态下人体局部非显性出汗率的差异以及人体各部位之间非显性出汗率的比例关系, 首先对测量设备进行误差分析, 对2种不同情况的曲线进行拟合; 然后分别对环境温度为13℃和相对湿度为35%下3种活动状态(坐、站、2 km/h 低速行走)下人体背、腰、胸、腹、臀、大腿前、大腿后、小腿、上臂、下臂的非显性出汗率进行测量并比较局部值与最高值的比例关系。结果表明: 人体各部位的非显性出汗率以及总出汗率在3种运动状态之间无显著差异, 站立状态比坐姿状态的总出汗率高出6.99%, 行走状态比坐姿状态高出8.56%; 配对 t 检验结果显示3种状态下相对出汗率比之间具有显著差异。

关键词 人体局部出汗; 非显性出汗率; 相对出汗率比; 不同运动状态; 中国成年男子

中图分类号: TS 941.17 文献标志码: A

Proportion of insensible perspiration of regional parts on adult males

ZHANG Wenhuan¹, QIAN Xiaoming¹, FAN Jintu^{1,2}, NIU Li¹, SHI Yunlong¹

(1. School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Department of Fiber Science and Apparel Design, Cornell University, New York 14850, USA)

Abstract In order to study the difference of the local insensible perspiration rate in different test states, the error analysis was carried out on the equipment, and two equations were established separately to predict the error. And then, the local insensible perspiration rate was measured on the ambient temperature of 13℃ and relative humidity of 35% under the three active states (sitting, standing and low speed walking at 2 km/h) of the back, waist, chest, tummy, hip, front thigh, rear thigh, leg, upper arm, lower arm. Finally, the local insensible perspiration rate and the total perspiration rate was compared. The results proved that no significant difference exists in the insensible perspiration among the three sports states as well as the total perspiration rate. The total sweat rate of standing state is 6.99% higher than that in the sitting state and the total sweat rate of walking state is 8.56% higher than in the sitting state. The paired t test shows a significant difference in the relative perspiration rate ratio among the three states.

Keywords local perspiration of human body; insensible perspiration rate; relative perspiration rate ratio; different sports state; Chinese adult male

人体散热主要分为对流、传导、辐射、蒸发4种方式。蒸发散热分为可感知和不可感知散热2种方式。可感知散热以显汗的形式呈现, 主要发生在高温或人体活动强度较大时; 不可感知散热由非显汗的蒸发引起并随时都在进行^[1-4]。不同部位的汗液产生量与人体热交换、服装覆盖率、环境及肢体运动

具有较大关系, 对人体热生理学模型的建立具有重要的意义^[5-7]。目前, 人体非显性出汗的测量也是医学界较为关注的问题之一。已有研究集中在裸态人体在高强度或者高温环境下人体总汗液产生量方面: Weiner^[8]探究发现背部比腹部的出汗率更低, 上胸部表现出最高值, 而且在接近臀部部位出汗率降

收稿日期: 2017-08-01 修回日期: 2017-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1607117); 天津市应用基础与前沿技术计划项目(16JCZDJC36400); 天津市科技计划项目(14TXGCCX00014)

第一作者简介: 张文欢(1993—), 女, 硕士生。主要研究方向为服装热湿舒适性。

通信作者: 钱晓明, E-mail: qxm@tjpu.edu.cn。

低,腋下也表现出较低值; Machado-Moreira^[9]等利用通气汗囊法针对(36℃:60%)裸态人体躯干部位(上背、下背、肩、胸、腹、腋下)在不同运动强度下的显性出汗率进行测量,与前者的结论有所不同,该实验计算不同生理指标的结果时分别选取10、9、3、2个样本进行计算; Smith等^[10]研究了9名运动员在中等运动强度下各部位的总出汗率,并且 Havenith等^[11]针对9名男子和9名女子之间的差异进行详细探究; Lee等^[12]对亚洲人和韩国人之间的出汗区别的探讨显示,韩国人整体的出汗率比其他亚洲人多,但是二者都是在背部出汗率最高,大腿的出汗率最少。除此之外,文献[13-15]等探究了人体的头部、手部和胳膊的局部显性出汗率。目前为止,关于局部非显性出汗率的详细研究非常少,对于非显性出汗率的研究也集中全身或个别部位的出汗率数值的探讨,尤其是着装人体局部非显性出汗率。Reither等^[16]在环境温度为21~25℃和相对湿度为45%~60%情况下,对人体进行测试的结果显示为600~900 g。Thiele等^[17]测试结果显示在21~32℃相对湿度为50%环境下人体前臂和手掌的非显性出汗率分别为3~25 μg/(min·cm²)。李标等^[2-3]在温度为22~25℃、步行速度为0、0.68、1.35 m/s的情况下,对人体手部、前臂、前胸和后背的非显性出汗率进行测量。但是现有研究并没有对人体全身进行详细的划分,对不同部位的出汗率之间的比例关系的研究缺少详细报道。

本文研究以改进皮肤水分蒸发测量仪为基础,拟采用通气汗囊法测量人体在低温(环境温度 为13℃、相对湿度为35%)坐、站立、低速行走(2 km/h 模拟人体走路速度)3种运动状态下各部位非显性出汗率,并对基于各部位与出汗最高出汗率部位(腰部)的比值关系进行研究,为评价局部服装热湿舒适性以及暖体假人的设计改进提供参考。

1 实验部分

1.1 实验仪器

图1示出 SKN-2000 型皮肤水分蒸发测量仪 (NISHIZAWA ELECTRIC METERS MANUFACTURING CO., LTD) 示意图。测量仪量程为 0~4 mg/(min·m²) 精度为 10%。整套服装的总体热阻和湿阻采用站立式出汗暖体假人“Walter”测量。

1.2 实验人员与服装

人员选择年龄为 22~25 岁、身高为 (174 ± 3) cm、体重为 (70 ± 2) kg、身体质量指数 (BMI) 为 20~24 的中国成年健康男性。本文实验首先选择 8



图 1 皮肤水分蒸发测量仪

Fig. 1 Ventilation capsule system flux compensation type perspiration meter

名受试者进行预实验,选择非显性出汗率接近且较为一致的个体作为最终样本。

本实验选取的服装包括规格为 175/96 A 的短款合体薄型羽绒服(含绒量 90%)、纯棉内衣和运动裤。服装的主要规格参数及基本性能如表 1 所示。

表 1 服装基本性能
Tab. 1 Basic performance of clothing

服装名称	质量/ g	厚度/ mm	热阻/ clo	湿阻/ (Pa·m ⁻² ·W ⁻¹)
羽绒服	1 031.40	10.39	—	—
内衣(上)	220.98	4.65	—	—
内衣(下)	253.21	4.65	—	—
运动裤	463.87	4.25	—	—
套装	—	—	2.29	30.495

1.3 实验方案

实验目的:模拟天津初冬时节,测定着装人体局部非显性出汗率,探究着装人体局部非显性出汗率之间的关系。

实验环境:环境温度为 13℃、相对湿度为 35%。

实验方法:本文实验采用通气汗囊法,该方法通过测定气流流经测量腔之前和之后的湿度,得到湿度变化来计算皮肤水分蒸发速度。

实验过程设定:本文实验中受试者首先在控制室内静坐 30 min,使得人体达到稳定统一的状态,排除测量前活动带来的干扰。测试中,静坐 20 min,站立 20 min,行走 20 min。行走速度的确定以安全为第一宗旨并结合人体皮肤表面不出现显汗这一准则进行确立,最终确定为跑步机速度 2 km/h。

1.4 误差分析与空白实验测定

测量之前首先对实验仪器的精度进行校准,将空白实验的测量值作为实验基础值。首先开机预热约 10 min,将测量腔腔口朝下放好,数十秒后,待显示值稳定,按开关进行调零,确保测量腔支架无汗水和湿气附着,与外界环境之间无气流交换。对空白实验中的数据进行分析,最终将测量曲线总结为

2 种变化趋势: 稳态和非稳态。将实验误差情况总结为 2 种: 稳态和非稳态, 为后期实验做准备。

1.5 非显性出汗率测定

采用皮肤水分蒸发测量仪, 在相同测试条件下测量 4 名受试人员在左半个身体区域内背、腰、胸、腹、臀、大腿前、大腿后、小腿、上臂、下臂 10 个部位的出汗率, 为避免误差, 测量部位事先确定并进行标注, 在人体表面固定测量腔前, 先用干布或纸巾时擦干汗液测定部位的汗水和水分。固定至测定部件后, 再用医用胶带固定, 避免测定部位与测量腔间有间隙影响测量精度。测试项目选择在每天同一时间进行, 减小人体自身变化对结果的影响。测量前每人摄入等量水分(200 mL)。

1.6 总出汗率确定

将局部出汗率进行加权计算, 得到人体整体出汗率, 并对相同温度、不同状态和不同温度、相同状态的总出汗率进行比较。其计算公式为:

$$Q = 0.0475Q_{背} + 0.0475Q_{腰} + 0.0912Q_{胸} + 0.0601Q_{腹} + 0.0637Q_{臀} + 0.1394Q_{大腿前} + 0.1394Q_{大腿后} + 0.1266Q_{小腿} + 0.0986Q_{上臂} + 0.06Q_{下臂}$$

式中: Q 为总出汗率; Q_i 为 i 部位的出汗率测量值; 其中头部不属于服装覆盖范围, 不加入计算。

1.7 相对出汗率比确定

在每一种运动状态下均以出汗率最高的部位作为基础值, 以最高部位出汗率与其他部位的比值表示该部位的相对出汗率水平。

2 结果与讨论

2.1 设备误差分析

2.1.1 稳态数据误差

图 2 示出稳定状态误差, 各探头并无明显的变化趋势, 4 个探头在较长的时间内测量值均保持稳定, 上下波动的幅度一致, 呈现近似正弦曲线状, 对于此类情况中, 模拟曲线取其中出现次数最多的点的平均值作为此次实验中测量的基础值。 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 分别为稳定状态下 1、2、3、4 号探头的出汗率:

$$y_1 = -0.0034 \text{ mg}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$$

$$y_2 = -0.0098 \text{ mg}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$$

$$y_3 = -0.0105 \text{ mg}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$$

$$y_4 = -0.0019 \text{ mg}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$$

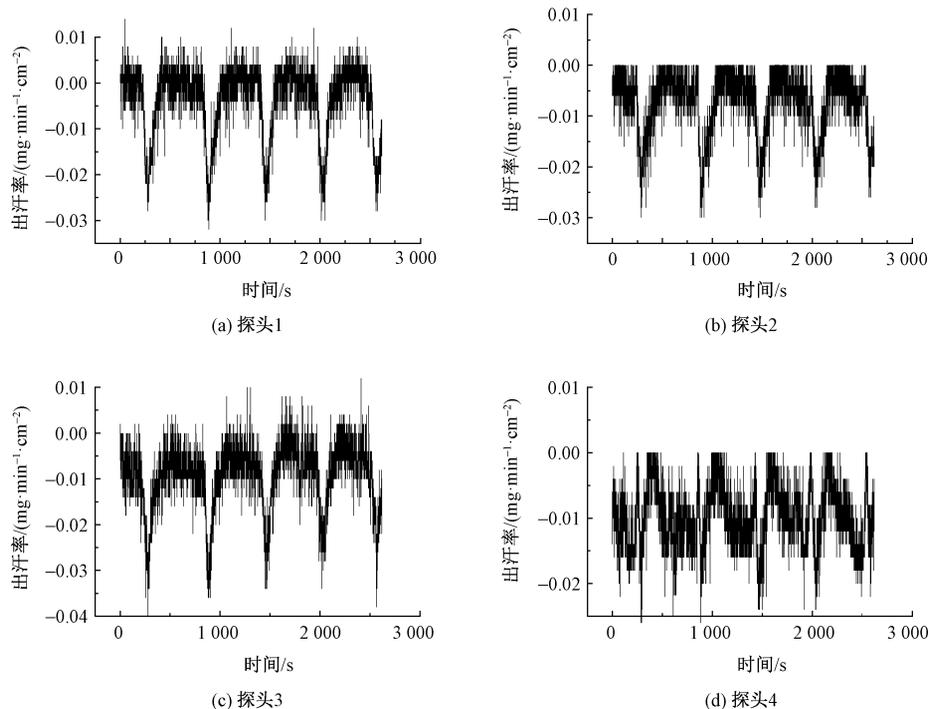


图 2 稳定状态误差

Fig. 2 Error in steady state. (a) Probe 1; (b) Probe 2; (c) Probe 3; (d) Probe 4

2.1.2 非稳态数据误差

第 2 种非稳态情况表现为探头的测量值出现较大幅度的变化与偏差, 急速下降, 如图 3 所示。结果显示, 在开始阶段, 1 和 3 号探头处于较为稳定的状

态, 但是随着时间的推移, 出汗率开始发生极大的偏差, 迅速降低, 对此数据进行线性拟合, 得到随着时间的推移出汗率的具体变化曲线, 拟合方程分别如下:

$$y'_1 = -0.01644 + 2.46136 \times 10^{-6}t - 1.06054 \times 10^{-9}t^2$$

$$y_2' = -0.00232 - 4.01046 \times 10^{-5}t + 4.03349 \times 10^{-9}t^2$$

$$y_3' = -0.01791 - 1.89964 \times 10^{-6}t - 3.90015 \times 10^{-10}t^2$$

$$y_4' = -0.02595 - 2.415910 \times 10^{-5}t - 1.06030 \times 10^{-9}t^2$$

式中: t 为距离开始测试的测试时间; y_1' 、 y_2' 、 y_3' 、 y_4' 分别 t 时刻 1、2、3 和 4 号探头在非稳定状态下的出汗率。

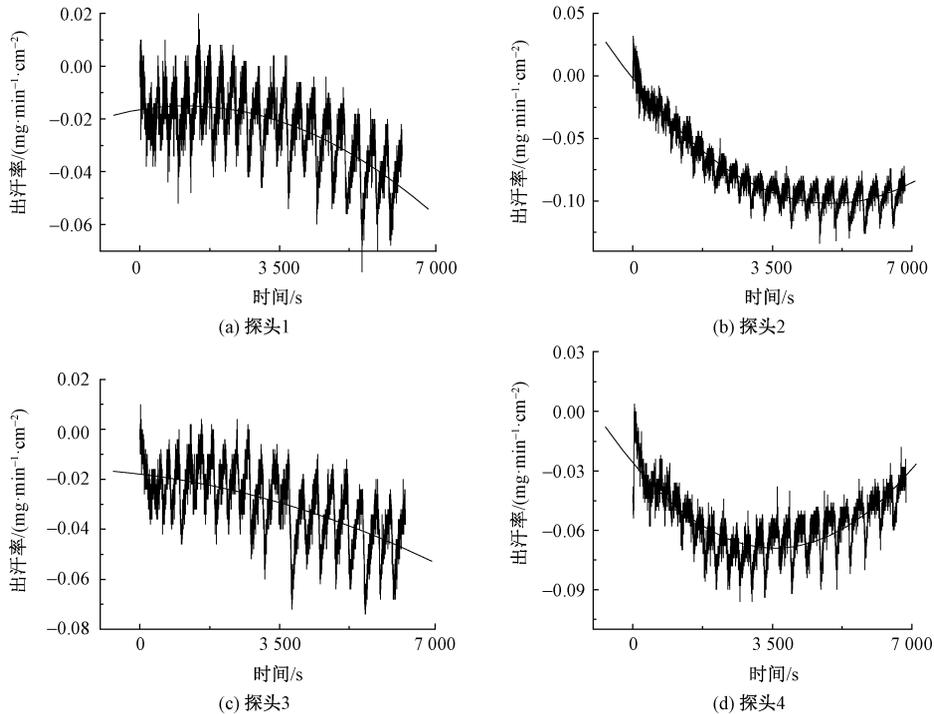


图 3 非稳定状态误差图

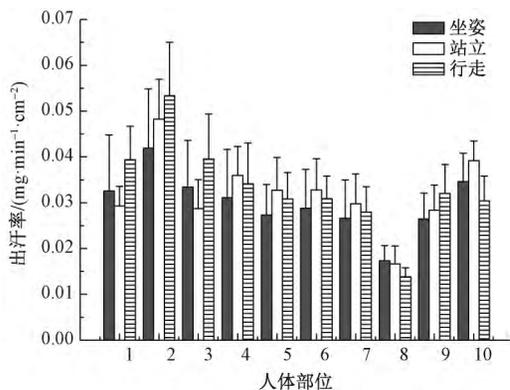
Fig. 3 Error in non-stable state.

(a) Probe 1; (b) Probe 2; (c) Probe 3; (d) Probe 4

2.2 出汗率分析

2.2.1 不同运动状态的出汗率

按照数据筛选的标准,最终选择变化均匀且较为一致的 4 位受试者的结果作为最终结果。在 13 ℃ 不同活动状态(坐、站立、低速行走 2 km/h)的局部出汗率均值结果如图 4 所示。



注: 1—背; 2—腰; 3—胸; 4—腹; 5—臀; 6—大腿前; 7—大腿后; 8—小腿; 9—上臂; 10—下臂。

图 4 不同状态人体局部出汗率

Fig. 4 Local sweat rate in different states

从图中可看出,在测量的 3 种状态下,各部位的局部出汗率比随着运动状态的变化也有所不同,坐

姿状态结果为 0.017 ~ 0.042 mg/(min·cm²),站立状态结果为 0.017 ~ 0.048 mg/(min·cm²),行走状态结果为 0.014 ~ 0.053 mg/(min·cm²),这与前人的研究结果非显性出汗率 0.2 ~ 0.7 mg/(min·cm²) 具有较高的一致性。在背部、胸部从坐姿到站立状态的转换 2 个部位的出汗率减少,但是其他部位都呈现增长趋势。这是由于人体坐姿状态和站立状态的服装的面积发生改变,这在一定程度导致热流量的变化;另外,坐姿状态的凳子增加了部分热阻,使得人体散热热流减少;行走状态下,上半身表现出较高的出汗率,但是部分部位的出汗率低于站立状态,尤其是下半身和活动的上臂,这是由于在低温下运动过程中,四肢活动与外界产生较强的热对流,蒸发带走的热量减少并且低温气流由服装的间隙进入微环境,增加了对流传热传湿,皮肤温度下降,出汗率也会随之下降。

对 3 种状态进行配对 t 检验分析,结果显示,同部位的出汗率在不同状态下无统计学差异 ($P > 0.05$),只有极个别部位(大腿前和上臂)在静止状态(坐、站)下存在显著差异。(大腿前和大腿后对比 $P = 0.026$; 下臂坐姿和站立状态对比 $P = 0.017$),CV 值在 10% ~ 36% 之间,可见不同活动状

态不会对人体产生显著影响。

2.2.2 总出汗率

为进一步评价运动状态与环境温度对人体出汗率的影响,将局部值按照面积公式进行加权求平均,得到总出汗率,如表 2 所示。

表 2 不同状态人体总出汗率
Tab. 2 Total sweat rate in different states

测试状态	总出汗率/(mg·min ⁻¹ ·cm ⁻²)
13℃坐	0.025 0
13℃站	0.026 7
13℃走	0.027 1

从表 2 可以看出,随着人体运动状态的变化,人体的总出汗率逐渐增加,站立状态要比坐姿的总出汗率高出 6.99%,行走状态要比坐姿高出 8.56%。但在 3 种状态下相对出汗率的 $P > 0.05$,CV 值为 4.33% < 5%,说明 3 种低变化的活动状态的总出汗率无显著差异。结合局部结果说明,人体个别部位非显性出汗率受到活动状态的影响,但是在合理活动范围之内,着装舒适人体皮肤表面的总非显性出汗率是一个相对稳定的结果。

2.2.3 相对出汗率比关系

人体在 3 种运动状态下的相对出汗率比均值如图 5 所示。

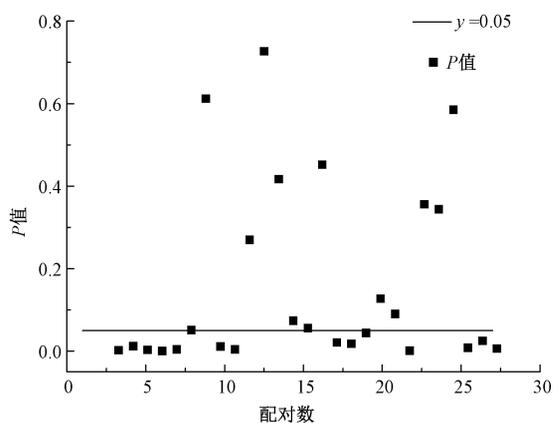


图 5 不同状态相对出汗率比
Fig. 5 Ratio of local sweating rate in different states

由图 5 可知,在相同的状态下,各部位比值之间呈现相对一致的变化规律,但是每种状态间具有一定差异。对 3 种状态下的出汗率比均值按照背坐—背站、背坐—背走、背站—背走、……、下臂站—下臂走的规律进行配对 t 检验结果如图 6 所示,局部部位(腹部、臀部、大腿前、小腿、上臂、下臂)在 3 种活动状态下没有明显差异($P > 0.05$),但其他部位在 3 种状态下与背部的比值之间具有显著差异($P <$

0.05),说明运动状态对相对出汗率比产生显著影响。为进一步分析 3 种状态之间的出汗比,分别将 3 种状态进行归纳得到:坐姿状态下背、胸、腹、臀、大腿前、大腿后、小腿、上臂、下臂与腰部的比值分别是 0.88、0.91、0.79、0.61、0.56、0.80、0.30、0.58、0.60;站立状态下背、胸、腹、臀、大腿前、大腿后、小腿、上臂、下臂与腰部的比值分别是 0.61、0.59、0.75、0.68、0.68、0.62、0.34、0.59、0.82;行走状态下背、胸、腹、臀、大腿前、大腿后、小腿、上臂、下臂与腰部的比值分别是 0.74、0.74、0.63、0.58、0.59、0.53、0.26、0.61、0.58。

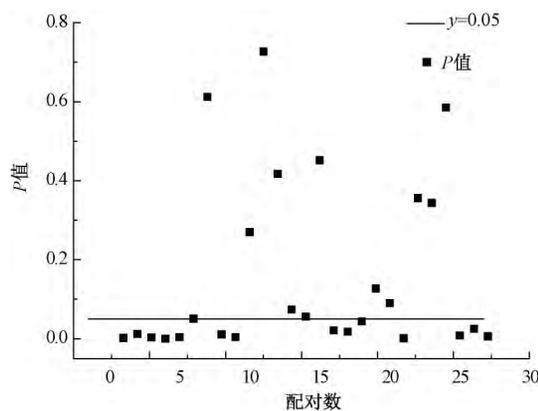


图 6 不同状态配对 t 检验的 P 值
Fig. 6 P value of paired t test in different states

3 结 论

1) 目前皮肤蒸发测量仪精度较低,针对此特点模拟 2 种不同测试差异性分别建立模型,改进测量误差,提高测量精度。

2) 坐姿状态下的人体各部位的局部非显性出汗率在 0.017 ~ 0.042 mg/(min·cm²),站立状态的出汗率为 0.017 ~ 0.048 mg/(min·cm²),行走状态的出汗率为 0.014 ~ 0.053 mg/(min·cm²)。比较 3 种状态下相同部位的非显性出汗率,虽然有所变化,但是从 3 种状态下的配对 t 检验结果来看,运动状态对局部非显性出汗率没有显著影响。

3) 从 3 种状态对总出汗率的结果来看,随着运动状态的变化,出汗率越来越大,但是配对 t 检验结果显示三者之间没有显著差异,说明人体在一定温度下着合适的服装非显性出汗率为相对固定的值。

4) 从 3 种状态对出汗率比的配对 t 检验结果来看,3 种状态之间具有显著差异。

后续研究中将会对不同测试条件下着舒适服装的人体的非显性出汗率情况进行有效的聚类分析,将各运动状态与测试环境之间的具体比例进行研究

与评价,进一步为暖体假人的皮肤设计作出指导。

FZXB

参考文献:

- [1] 魏洋. 人体出汗量的测定研究[J]. 中国个体防护装备, 2011(3): 40-43.
WEI Yang. Study on the Determination of human sweating measure [J]. China Personal Protective Equipment, 2011(3): 40-43.
- [2] 李标. 人体局部非显性出汗的测量研究[D]. 上海: 东华大学, 2016: 1-2.
LI Biao. The study on the measurement of insensible perspiration on regional part of human body [D]. Shanghai: Donghua University, 2016: 1-2.
- [3] 李标, 王革辉, 陈艺娟, 等不同环境温度与活动强度下人体手部非显性出汗率测量[J]. 浙江纺织服装职业技术学院学报, 2016(1): 30-35.
LI Biao, WANG Gehui, CHEN Yijuan, et al. Measurement of non-dominant sweating rate of human hand under different ambient temperature and activity intensity [J]. Journal of Zhejiang Textile and Apparel Vocational and Technical College, 2016(1): 30-35.
- [4] 魏洋. 人体全身及上身局部出汗率的测定[D]. 上海: 东华大学, 2012: 1-2.
WEI Yang. The measurement of whole body and regional upper body sweat rates. [D]. Shanghai: Donghua University, 2012: 1-2.
- [5] FIALA D, LOMAS K J, STOHRER M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions [J]. International Journal of Biometeorology, 2001, 45(3): 143-159.
- [6] HAVENITH G, RICHARDS M G, WANG X, et al. Apparent latent heat of evaporation from clothing: attenuation and "heat pipe" effects [J]. Journal of Applied Physiology, 2008, 104(1): 142-149.
- [7] JACKSON A S, POLLOCK M L. Generalized equations for predicting body density of men [J]. British Journal of Nutrition, 1978, 40(3): 497-504.
- [8] WEINER J S. The regional distribution of sweating [J]. The Journal of Physiology, 1945, 104(1): 32-40.
- [9] MACHADO-MOREIRA C A, SMITH F M, VAN DEN Heuvel A M J, et al. Sweat secretion from the torso during passively-induced and exercise-related hyperthermia [J]. European Journal of Applied Physiology, 2008, 104(2): 265-270.
- [10] SMITH C J, HAVENITH G. Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia [J]. European Journal of Applied Physiology, 2011, 111(7): 1391-1404.
- [11] HAVENITH G, FOGARTY A, BARTLETT R, et al. Male and female upper body sweat distribution during running measured with technical absorbents [J]. European Journal of Applied Physiology, 2008, 104(2): 245-255.
- [12] LEE J, SHIN Y. Comparison of density and output of sweat gland in tropical Africans and temperate Koreans. [J]. Auton Neurosci, 2017, 205: 67-71.
- [13] MACHADO-MOREIRA C A, CALDWELL J N, MEKJAVIC I B, et al. Sweat secretion from palmar and dorsal surfaces of the hands during passive and active heating. [J]. Aviation Space & Environmental Medicine, 2008, 79(11): 1034-40.
- [14] MACHADO-MOREIRA C A, WILMINK F, MEIJER A, et al. Local differences in sweat secretion from the head during rest and exercise in the heat [J]. European Journal of Applied Physiology, 2008, 104(2): 257-264.
- [15] SMITH C J, VENTENAT V, HAVENITH G. Regional sweat rates of the arms and hands in male squash players [J]. Environmental Ergonomics XII, 2007: 285.
- [16] REITHNER L, JOHANSSON H, STROUTH L. Insensible perspiration during anaesthesia and surgery [J]. Acta Anaesthesiologica Scandinavica, 1980, 24(5): 362-366.
- [17] THIELE F A, VAN Senden K G. Relationship between skin temperature and the insensible perspiration of the human skin [J]. Journal of Investigative Dermatology, 1966, 47(4): 307-312.
- [18] QIAN X, FAN J. Interactions of the surface heat and moisture transfer from the human body under varying climatic conditions and walking speeds [J]. Applied Ergonomics, 2006, 37(6): 685-693.