

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170804806

人体出汗率分布的研究进展

张文欢¹, 钱晓明¹, 范金士^{1,2}, 师云龙¹, 牛 丽¹

(1. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300387; 2. 美国康奈尔大学 人类生态学院, 纽约 14850)

摘要 为全面准确地评价人体热舒适调节过程中潜热的具体表现,从人体显性汗和非显性汗2种出汗方式出发,综述了国内外人体皮肤表面出汗的研究及应用现状,重点介绍了其测量方式和不同环境中的局部与整体出汗率。目前,通气汗囊法和吸汗贴片法是最为常用的2种方式,研究结果显示人体运动达到稳定时二者之间的测量结果无显著差异。对比局部出汗率结果显示,人体局部显性出汗率较高的部位是躯干部位,非显性出汗率最高的部位是手部和脚部,局部非显性出汗率范围在0.02~0.07 mg/(cm²·min)之间。人体局部出汗率的分布特点对服装设计以及暖体假人的皮肤设计具有指导作用。

关键词 人体出汗率; 显性出汗率; 非显性出汗率; 出汗率分布

中图分类号: TS 941.17 文献标志码: A

Research progress on sweating rate distribution of human body

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

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

2. College of Human Ecology, Cornell University, New York 14850, USA)

Abstract In order to evaluate the manifestations and parameters of latent heat during the regulation of human thermal comfort comprehensively and accurately, the research and application of human skin sweating rate at home and abroad based on two methods of sensible sweating and insensible sweating was reviewed. The measurement methods and local and total sweating rate in different environments were introduced. The ventilated sweat capsules and absorbent sweat patch technique were used commonly, and no significant difference exists between the results test by the two ways when the human body movement reaches a stable condition. The area of the highest sweating rate is the trunk, the highest rate of non-primary sweating rate is the hands and feet. The local non-primary sweat rate range is from 0.02 to 0.07 mg/(cm²·min). The distribution characteristics of the local body sweating rate has an instructive role in the design of the clothing and the skin design of the thermal manikin.

Keywords sweating rate of human body; sensible sweating rate; insensible sweating rate; distribution of sweating rate

人体散热方式主要有显热和潜热,其中潜热主要是指人体表面汗液蒸发所产生的热量损失。出汗主要分为显性出汗和非显性出汗。显性出汗是指当人体在高温环境或运动强度较高时产生的能被人所观察到的汗液,非显性出汗是指人体表面随时都在蒸发的汗液^[1-3]。人体着装状态下由于剧烈运动或过高的环境温度等因素导致皮肤表面产生显性汗液

时,蒸发散热的比例显著增加并成为热量散失的主要方式。随着皮肤表面汗液的增加,水分蒸发率下降,同时抑制汗腺活动,影响人体皮肤表面散热。谌玉红等^[4]研究表明随着环境温度的升高,着装人体穿着不同服装时,皮肤表面的汗液蒸发量、温湿度等参数发生明显变化,人体热应激水平增加,表现出不舒适。李佳怡等^[5]利用暖体假人 Newton 分别测量

收稿日期: 2017-08-28 修回日期: 2018-03-29

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

了穿着 4 款面料拼接服装时,假人总出汗量和出汗率,由此评价服装的热湿舒适性。唐香宁等^[6]对人体皮肤湿感觉的测试方法以及影响因素进行综述,表明人体湿感觉对于评价服装热湿舒适性具有重要作用。

出汗率的测量与研究在生理学研究中具有举足轻重的地位,同时由于其对人体的核心温度以及体温调节起到至关重要的作用,所以在人体热调节领域以及服装热湿舒适性研究中具有巨大的影响力。随着相关研究的深入发展,目前对人体出汗量的研究已经延伸到医学、功能性服装设计、服装热湿舒适性评价、暖体假人设计、职业卫生、人体出汗量模型建立等相关领域。特别地,人体绘图服装已经逐渐成为重点推出的功能性服装。人体局部出汗和汗液蒸发量可为各项研究提供重要的数据支持^[7-8]。

目前,应用不同测量方式以及不同测试条件得到的人体各部位显性和非显性出汗率结果具有较大差异,限制了其应用。对具体差异的研究以及人体局部更为详细的定量化比较的探讨较为浅薄。本文对比分析了几种不同的测试方法及其对结果产生的影响,并总结了人体局部显性出汗率和非显性出汗率的分布特点。

1 出汗率的常用测试方法

局部出汗率的测量方法包括湿法测定和质量测定^[9]。湿法测定可通过湿度计或者通气汗囊法进行测定。这类测量法通过将已知温度的干燥空气通过泵,以恒定流速输送进固定在皮肤表面的管道内来完成数据测量。通风管下皮肤表面(约 1 ~ 20 cm)的局部出汗率由流出气流的温度和水蒸气含量的变化来确定^[10-11]。这种方法在某些情况下加大了实际值。比较这 2 种方法,通气汗囊法具有较高的可信度,变异系数(CV 值)为 2%^[12],被认为是测量局部出汗率的参考技术^[12-14]。

质量测定技术主要是使用滤纸^[15],吸汗贴片法^[16-19],Parafilm-M 保护套、棉手套或棉袜、乳胶手套^[20]或塑料汗液收集器^[21]等从皮肤表面(4 ~ 100 cm²)直接收集汗液。局部出汗率均由收集汗液系统的质量变化来确定。在测量运动员的出汗率时,质量测定技术(尤其是吸汗贴片法)比其他方法更为实用,但该方法的收集系统易受局部环境的影响^[22-24]。另外,该方法测定时如果由透气性较差的覆盖物进行汗液收集时,易引起通气不足从而增加皮肤上的水分积累,抑制汗液的产生^[25-27],因此,在使用该类方法进行测定时,可通过减少收集系统在

皮肤上的停留时间(测试时间)或者使用具有高吸收能力的材料制成的贴片最大限度地降低误差^[28-29]。

前人已经针对湿法测定和质量测定测量得到的局部出汗率结果进行了比较。Morris 等^[13]研究表明,在测试开始的 10 ~ 30 min 内,通气汗囊法比吸汗贴片法(尺寸为 4 cm²)的测定值高出 6% ~ 37%,但是在人体运动到 50 ~ 70 min 时 2 种方法得到的测量值几乎相同,并且结果并不受测量部位(前臂和中背)或者吸汗贴片尺寸(4 cm²、36 ~ 42 cm²)的影响^[13]。Boisvert 等^[14]研究显示,在运动的前 20 min 内通气胶囊法比 Parafilm-M 贴片法得到的测量结果高 27%,但是在运动时间为 20 ~ 60 min 时几乎没有差异^[14]。综合比较得出,质量测定法得到的结果更可靠,且操作方便,但仅适用于稳定状态(如运动 20 ~ 30 min 之后)^[13-14],而湿法测定能够进行实时测量。

评估全身出汗率最简单和最准确的方法是通过测量运动前后裸体体重差^[30-31]。但这种方法应考虑非出汗因素引起的体重变化对结果的影响。计算出汗率时应通过流体摄入量和尿量进行矫正。另外,如果运动员在训练期间消耗食物或排出,这些非汗水的质量变化也应考虑在内,同时需要注意的是新陈代谢质量损失和呼吸质量损失^[32-34]。出汗率的计算应基于体重的变化,同时应该考虑到新陈代谢和呼吸道质量损失,特别是在持续运动几个小时(大于 2 ~ 3 h)或者在寒冷干燥的环境中^[35-37]。

但是,裸体体重测量在某些场合是不适用的,因此,运动员常进行着装称量。然而,在衣服内部残留的汗液会降低测量值。Cheuvront 等^[37]在热环境(干球温度为 30 °C,露点温度为 20 °C)或冷环境(干球温度为 14 °C,露点温度为 7 °C)中,风速为 2.1 m/s 时,测量穿着赛跑单鞋、短裤、袜子和跑步鞋的女性以 30 km/h 的速度跑步(最大氧摄取量为 71%)时的出汗率。当没有进行修正时,服装中残留的汗水导致出汗率降低 8% ~ 10%(热环境和冷环境之间无差异),而尿液排泄将出汗率增加了 16%(热环境)或 37%(冷环境),呼吸和代谢质量损失相结合导致汗液损失增加了 9%(热环境)或 20%(冷环境)^[38]。

2 人体局部出汗率分布

近年来对于皮肤水分蒸发量的研究很多,根据测试内容可总结为显性出汗率和非显性出汗率研究,其中显性出汗过程中伴随着非显性出汗的发生,

所以显性出汗率实际是测试过程中显性与非显性出汗率的总和。

2.1 显性出汗率的研究

显性出汗率的研究结果受测试条件、测试状态以及测试方法的影响。Cotter等^[39]和Fogarty等^[40]研究表明,相同状态下人体不同部位的出汗量显著不同,躯干部位(尤其是腰部)具有较高的出汗量,四肢表现出最低值。Fogarty等^[40]和Taylor等^[41]研究发现,前额、颈、腹部和前后躯干的大部分区域具有较高的出汗率,胸部、四肢具有较低的出汗率。相反地,Weiner^[42]发现相对于前躯干,后躯干具有更低的出汗率。Machado等^[43]和Smith^[29]在研究中均发现躯干上、中、下部位的出汗量依次有所减少。Machado等^[43]对人体各部位的出汗率进行定量研究发现:胸部为 $(0.32 \pm 0.07) \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,腹部为 $(0.35 \pm 0.05) \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,上背为 $(0.59 \pm 0.11) \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,下背出汗率为 $(0.56 \pm 0.08) \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,侧面躯干出汗率为 $(0.38 \pm 0.09) \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,肩部出汗率为 $(0.51 \pm 0.13) \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,背部出汗大于腹部且大多数汗液产生于下背。Smith等^[29]对男性运动员的运动强度分别在55%和75%最大摄氧量($VO_{2\max}$)时的出汗量进行研究,表明,后背中部与下部和头部表现出最大的出汗值,四肢的出汗量最少;并且随着运动强度的增加,局部与整体的出汗量都显著增加(脚除外)。Machado等^[43-44]研究表明,头部中部到后部出汗明显增加,头后部出汗率最高,脚部为 $0.76 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。

Smith等^[20]对男性运动强度分别为55% $VO_{2\max}$ (强度I)、75% $VO_{2\max}$ (强度II)和女性60% $VO_{2\max}$ (强度I)、75% $VO_{2\max}$ (强度II)运动强度下的出汗量进行比较,研究显示男子的出汗率分别是 (364 ± 84) 、 $(657 \pm 119) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;女子出汗率分别为 (168 ± 81) 、 $(410 \pm 144) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在相同的运动强度下,男性的局部出汗率整体比女性高(除部分运动强度下的手和脚)。针对男性与女性之间的比较结果可知,所有的汗液分布均表现为:1)前躯干比后躯干的出汗率更高;2)沿着躯干,由中间向侧面出汗量逐渐减少;3)下背中部的出汗量最高;4)四肢的出汗率最低。比较可知,男子强度I和女子强度II的出汗量基本一致。

魏洋^[45]利用体重差法测量了不同温度与运动强度下人体的出汗量,结果显示,环境温度为20℃人体运动速度依次为0.9、1.78、2.68 m/s时,人体平均出汗量分别为 (11.81 ± 9.55) 、 (37.99 ± 21.71) 、 $(146.80 \pm 67.39) \text{ g}/\text{h}$,环境温度为25℃时

人体的出汗量分别为 (48.57 ± 27.89) 、 (118.40 ± 48.24) 、 $(312.36 \pm 89.82) \text{ g}/\text{h}$,温度为28℃时结果为 (119.53 ± 72.23) 、 (212.68 ± 80.35) 、 $(418.36 \pm 150.14) \text{ g}/\text{h}$,由此显示运动强度和环境温度对人体显性皮肤表面出汗量的测量结果均有显著影响。

2.2 非显性出汗率的研究

文献[46-48]研究表明,手和脚的潜汗率最高。每个人的出汗量都呈现相同的模式,手脚的非显性出汗量达到其他部位的2~4倍,但研究结果受到研究主体、实验过程和测试方法的影响。每项测试中都需要将小通气室探头放置在目标皮肤部位上收集水蒸气,或者是通过质量差法、湿法测定。其中汗液损失量可使用吸湿盐(氯化钙)、滤纸^[47]或水蒸气冷凝(干氧^[49])记录质量变化来获得。Ikeuchi等^[46]收集了8名参与者(4名男性和4名女性)在热中性(22.8~26.0℃)条件下的数据。Burch等^[47]也测量了热中性环境(23℃)中46名人体(32名男性和14名女性)在仰卧姿势下的出汗量。Park等^[48]在25℃环境条件下研究了10名女性休息状态(俯卧和仰卧)下的出汗量。以上研究结果显示,手和腋窝的测试值比其他测试值约高出2倍。实际上,以上研究显示平均全身经皮水分损失率分别是0.02、0.07和0.04 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,相当于25.7、75.9和43.4 g/h,假设恒定体表面积为1.8 m^2 ,其中,只有第1个值近似于Benedict等^[50]全身质量变化中的确定值(15 g/h)。

针对此类型的研究很多,结果并不完全一致,分析原因并找到最佳结果是目前的首要问题。Ikeuchi等^[46]、Burch等^[47]从同一部位收集的数据显示,7个常见部位中的3个部位具有较大的变异性,说明测量方式对结果具有较大影响。Ikeuchi等^[46]使用的体重差法受水汽被动积累的影响,而Burch等^[47]以及Park等^[48]均采用优化蒸气通量技术。Burch采用的方法为水分子穿过表皮的运动提供了理想的水蒸气压力梯度,皮肤及其边界层比通常情况更干燥,这种方法在一定程度上夸大了水分蒸发量;但是没有这种情况,蒸气压力梯度将持续下降,随着时间的流逝阻碍水分流失,因此,Burch等^[47]的数据是一种理想的临界状态,可视为裸露皮肤状态数据,而Ikeuchi等^[46]的测试结果可代表完全着装状态的水分损失,由前人的研究可总结出人体非显性出汗量范围在0.02~0.07 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 之间, Park等^[48]的测量值在此限度范围内。

Machado等^[51]总结发现,标准人体(皮肤表面积为1.8 m^2)每天非显性水分蒸发量达到0.6~2.3 L,手部(80~160 g/h)和脚部(50~150 g/h)蒸发量

最高,头部和颈部居中(40~75 g/h),其余部位汗液蒸发量在15~60 g/h。李标^[52]利用质量差法对人体上半身非显性出汗率进行测量,在环境温度为22、25℃,步速为0、0.68、1.35 m/s的情况下,男女性手部、前臂、前胸、后背的出汗率结果如表1所示。

表1 男子和女子局部非显性出汗率

Tab 1 Local insensible sweat rate of males and females

性别	测试温度/℃	步速/(m·s ⁻¹)	局部出汗率/(g·(h·m ²) ⁻¹)			
			手部	前臂	前胸	后背
男	25	0.00	53.40	12.50	6.70	7.10
		0.68	76.10	16.70	12.60	14.50
		1.35	87.50	30.20	26.10	26.40
男	22	0.00	46.40	8.50	6.30	6.10
		0.68	61.00	12.20	7.00	7.10
		1.35	67.00	16.00	10.90	11.80
女	25	0.00	45.60	18.90	—	—
		0.68	62.40	25.80	—	—
		1.35	87.00	40.10	—	—

3 结束语

目前针对人体在各种设定环境条件、不同姿势以及不同运动状态下各部位的出汗量的研究层出不穷,结果也不尽相同。因为真人实验本身存在的误差以及各种测试方案、测试方法的不同,直接影响了总体的测试结果,但综合来看,除头部外,人体显性出汗最多的部位在后背,相比于上背,中下背的显性出汗率更大,而且由躯干到四肢呈现逐渐减少的趋势,四肢的出汗率最低。手和脚部的非显性出汗率呈现最高值,人体的非显性出汗率在0.02~0.07 mg/(cm²·min)之间。

现阶段,针对非显性出汗率的各部位具体数值依据实验测试方法的不同以及测试条件的差异得到的结果也不同。对于人体不同运动状态以及不同温度下的非显性出汗率的相关研究较为缺乏,但前景可观,因此,利用相关研究仪器及研究方法对不同运动状态下男性和女性人体的显性和非显性出汗率进行统一测量,并进行规律分析成为未来的一大发展趋势,这对计算服装的热阻和湿阻以及暖体假人皮肤的改进具有非常重要的作用。

FZXB

参考文献:

[1] 蒋攸. 汗水! 汗水! 汗水 [J]. 科学健身, 2005(10): 128-129.
JIANG Ying. Sweat! Sweat! Sweat! [J]. Science and Fitness, 2005(10): 128-129.

[2] 哈尔. 健康: 需主动出汗 [J]. 养生月刊, 2013, 4: 320-322.
Hal. Health: need to take the initiative to sweat [J]. Health Monthly, 2013, 4: 320-322.

[3] 高燕. 出汗与健康 [J]. 解放军健康, 2004(6): 38-39.
GAO Yan. Sweating and health [J]. People's Liberation Army Health, 2004(6): 38-39.

[4] 谌玉红, 姜志华, 郝俊勤. 热环境下人体穿着热舒适性研究 [J]. 人类工效学, 2005, 11(2): 13-15.
SHEN Yuhong, JIANG Zhihua, HAO Junqin. Study on the thermal comfort of the human body in thermal environment [J]. Eng Ergonomics, 2005, 11(2): 13-15.

[5] 李佳怡, 卢业虎, 王发明, 等. 应用男体出汗图谱的运动装设计与性能评价 [J]. 纺织学报, 2016, 37(1): 116-122.
LI Jiayi, LU Yehu, WANG Faming, et al. Development and performance evaluation of sportswear based on male body sweating pattern [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(1): 116-122.

[6] 唐香宁, 张昭华, 李俊, 等. 人体皮肤湿感的研究进展 [J]. 纺织学报, 2017, 38(9): 174-180.
TANG Xiangning, ZHANG Zhaohua, LI Jun, et al. Research process of human skin wetness perception [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(9): 174-180.

[7] 王永进, 宋彦杰, 刁杰. 排球比赛服的功能结构设计研究 [J]. 纺织学报, 2014, 35(2): 71-77.
WANG Yongjin, SONG Yanjie, DIAO Jie. Study of functional structure design of volleyball match sportswear [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(2): 71-77.

[8] 陈益松, 徐军, 范金土. 暖体假人的出汗模拟方式与测量算法 [J]. 纺织学报, 2008, 29(8): 130-134.
CHEN Yisong, XU Jun, FAN Jintu. Sweating design in different thermal manikin and their measurement methods [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(8): 130-134.

[9] TAYLOR N A S, MACHADO-MOREIRA C A. Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans [J]. Extreme Physiology & Medicine, 2013, 2(1): 4.

[10] BRENGELMANN G L, MCKEAG M, ROWELL L B. Use of dew-point detection for quantitative measurement of sweating rate [J]. Journal of Applied Physiology, 1975, 39(3): 498-500.

[11] GRAICHEN H, RASCATI R, GONZALEZ R R. Automatic dew-point temperature sensor [J]. Journal of Applied Physiology, 1982, 52(6): 1658-1660.

[12] KENEFICK R W, CHEUVRONT S N, ELLIOTT L D, et al. Biological and analytical variation of the human sweating response: implications for study design and

- analysis [J]. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2012, 302(2): 252-258.
- [13] MORRIS N B, CRAMER M N, HODDER S G, et al. A comparison between the technical absorbent and ventilated capsule methods for measuring local sweat rate [J]. *Journal of Applied Physiology*, 2013, 114(6): 816-823.
- [14] BOISVERT P, DESRUELLE A V, CANDAS V. Comparison of sweat rate measured by a pouch collector and a hygrometric technique during exercise [J]. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 1997, 22(2): 161-170.
- [15] OHARA K. Heat tolerance and sweating type [J]. *Nagoya Medical Journal*, 1968, 14(3): 133-144.
- [16] DZIEDZIC C E, ROSS M L, SLATER G J, et al. Variability of measurements of sweat sodium using the regional absorbent-patch method [J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2014, 9(5): 832-838.
- [17] BAKER L B, STOFAN J R, HAMILTON A A, et al. Comparison of regional patch collection vs. whole body washdown for measuring sweat sodium and potassium loss during exercise [J]. *Journal of Applied Physiology*, 2009, 107(3): 887-895.
- [18] 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.
- [19] OGATA K. Functional variations in human sweat glands, with remarks upon the regional difference of the amount of sweat [J]. *J Oriental Med*, 1935, 23: 98-101.
- [20] SMITH C J, HAVENITH G. Body mapping of sweating patterns in athletes: a sex comparison [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2012, 44(12): 2350-2361.
- [21] COLE D E, BOUCHER M J. Use of a new sample-collection device (macroduct) in anion analysis of human sweat [J]. *Clinical Chemistry*, 1986, 32(7): 1375-1378.
- [22] COLLINS K J, WEINER J S. Observations on arm-bag suppression of sweating and its relationship to thermal sweat-gland 'fatigue' [J]. *J Physiol*, 1962, 161(3): 538-556.
- [23] BREBNER D F, MCK K D. The time course of the decline in sweating produced by wetting the skin [J]. *Journal of Physiology*, 1964, 175(2): 295-302.
- [24] RANDALL W C, PEISS C N. The relationship between skin hydration and the suppression of sweating [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 1957, 28(6): 435.
- [25] BREBNER D F, MCK K D. The time course of the decline in sweating produced by wetting the skin [J]. *Journal of Physiology*, 1964, 175(2): 295-302.
- [26] CANDAS V, LIBERT J P, VOGT J J. Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating [J]. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 1979, 46(3): 522-528.
- [27] CANDAS V, LIBERT J P, VOGT J J. Effect of hidromeiosis on sweat drippage during acclimation to humid heat [J]. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 1980, 44(2): 123-133.
- [28] BAIN A R, DEREN T M, JAY O. Describing individual variation in local sweating during exercise in a temperate environment [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, 111(8): 1599-1607.
- [29] 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.
- [30] SAWKA M N, BURKE L M, EICHNER E R, et al. American college of sports medicine position stand. Exercise and fluid replacement [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1996, 28(1): i-vii.
- [31] MAUGHAN R J, SHIRREFFS S M. Development of individual hydration strategies for athletes [J]. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism*, 2008, 18(5): 457-472.
- [32] GIBSON J C, STUARTHILL L A, PETHICK W, et al. Hydration status and fluid and sodium balance in elite Canadian junior women's soccer players in a cool environment [J]. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2012, 37(5): 931-937.
- [33] ROGERS G, GOODMAN C, ROSEN C. Water budget during ultra-endurance exercise [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1997, 29(11): 1477-1481.
- [34] CHEUVRONT S N, MONTAIN S J, GOODMAN D A, et al. Evaluation of the limits to accurate sweat loss prediction during prolonged exercise [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2007, 101(2): 215-224.
- [35] MAUGHAN R J, SHIRREFFS S M, LEIPER J B. Errors in the estimation of hydration status from changes in body mass [J]. *Journal of Sports Sciences*, 2007, 25(7): 797-804.
- [36] CHEUVRONT S N, HAYMES E M. Ad libitum fluid intakes and thermoregulatory responses of female distance runners in three environments. [J]. *Journal of Sports Sciences*, 2001, 19(11): 845-854.
- [37] CHEUVRONT S N, HAYMES E M, SAWKA M N. Comparison of sweat loss estimates for women during prolonged high-intensity running [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2002, 34(8):

- 1344 – 1350.
- [38] BAKER L B. Sweating rate and sweat sodium concentration in athletes: a review of methodology and intra/interindividual variability [J]. *Sports Medicine*, 2017, 47(suppl 1): 111 – 128.
- [39] COTTER J D, PATTERSON M J, TAYLOR N A S. The topography of eccrine sweating in humans during exercise [J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1995, 71 (6): 549 – 554.
- [40] FOGARTY A L, BARLETT R, VENTENAT V, et al. Regional foot sweat rates during a 65-minute uphill walk with a backpack [C]//The 12th International Conference on Environmental Ergonomics. Ljubljana: Biomed Ljubljana, 2007: 283 – 284.
- [41] TAYLOR N G E A S, CALDWELL J N, MEKJAVIC I G R B. The sweating foot: local differences in sweat secretion during exercise-induced hyperthermia [J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 2006, 77(10): 1020 – 1027.
- [42] WEINER J S. The regional distribution of sweating [J]. *The Journal of Physiology*, 1945, 104(1): 32 – 40.
- [43] MACHADO-MOREIRA C A, SMITH F M, VAN A M, 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.
- [44] 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.
- [45] 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: 41 – 42.
- WEI Yang. The measurement of whole body and regional upper body sweat rate [D]. Shanghai: Donghua University, 2012: 41 – 42.
- [46] IKEUCHI K, KUNO Y. On the regional differences of the perspiration on the surface of the human body [J]. *J Orient Med*, 1927, 7: 106 – 107.
- [47] BURCH G E, SODEMAN W A. Regional relationships of rate of water loss in normal adults in a subtropical climate [J]. *American Journal of Physiology*, 1943, 138(4): 603 – 609.
- [48] PARK S J, TAMURA T. Distribution of evaporation rate on human body surface [J]. *The Annals of Physiological Anthropology*, 1992, 11(6): 593 – 609.
- [49] NEUMANN C, COHN A E, BURCH G E. A quantitative method for the measurement of the rate of water loss from small areas, with results for finger tip, toe tip and postero-superior portion of the pinna of normal resting adults [J]. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 1941, 132(3): 748 – 756.
- [50] BENEDICT F G, WARDLAW H S H. Some factors determining the insensible perspiration of man [J]. *Archives of Internal Medicine*, 1932, 49(6): 1019 – 1031.
- [51] MACHADO M, SALGADO T M, HADGRAFT J, et al. The relationship between transepidermal water loss and skin permeability [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2010, 384(1): 73 – 77.
- [52] 李标. 人体局部非显性出汗的测量研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016: 61 – 62.
- LI Biao. The study on the measurement of insensible perspiration on regional part of human body [D]. Shanghai: Donghua University, 2016: 61 – 62.