

## 模拟失重条件下人体出汗变化规律的实验研究\*

朱辉<sup>1</sup>,王汉青<sup>1,2†</sup>,刘志强<sup>1</sup>

(1. 中南大学 能源科学与工程学院,湖南 长沙 410083;2. 南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

**摘要:**针对失重条件下人体出汗所发生的变化,采用航天医学领域的一6°头低位卧床(HDBR)实验与常规热舒适实验相结合的方法,在12种空气温湿度下对6名男性受试者进行不同部位皮肤微电流的实验测量,将皮肤微电流作为人体出汗的指示信号. 研究表明:HDBR模拟失重时,空气相对湿度较低的条件(RH=30%)人体皮肤出汗比HDBR卧床前需要更高的空气温度刺激,并且出汗率相比卧床前出现一定程度的降低;中等湿度(45%)条件下,模拟失重时的皮肤出汗率随着空气温度增高而增加,但是显著低于HDBR卧床前的水平;高湿条件(80%)下且环境温度高于29℃时,模拟失重时人体皮肤出汗率显著增高,其值低于HDBR卧床前的水平但与其差值逐渐减小. 此外,在实验环境下所有受试者的皮肤出汗敏感度降低,并且大腿、小腿、上臂皮肤出汗率显著低于额头、胸和背部皮肤处的出汗率. 研究证明,模拟失重条件下人体皮肤出汗与正常重力时存在不同的变化,研究结果可为载人航天时人体热环境的改善提供依据.

**关键词:**模拟失重;皮肤微电流;出汗;空气温度;相对湿度

**中图分类号:**TU111

**文献标志码:**A

## Experimental Investigation on Variations of Human Sweating under Simulated Weightlessness

ZHU Hui<sup>1</sup>, WANG Hanqing<sup>1,2†</sup>, LIU Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** In order to study the changes of human sweating under simulated weightlessness, the -6° Head-Down Bed Rest (HDBR) experiment usually employed in the researches of Space Medicine and the traditional experiment of human thermal comfort were carried out. During the experiment, micro current of skin, which was presumed as an indicator of human sweating, was measured on 6 male subjects under different air temperatures and relative humidity. The results showed that higher air temperature was required under lower air humidity for sweating after HDBR, and the sweat rate was found to be lower than that before HDBR. In addition, the sweat rate, indicated by skin micro current, increased with the air temperatures under neutral air humidity, but it was significantly less than that before HDBR. Furthermore, the sweat rate of the subjects after HDBR was found to increase rapidly when the air temperature was higher than 29℃ under high air humidity (80%), and its value was approaching that before HDBR. Moreover, attenuated

\* 收稿日期:2016-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51276057,51676209), National Natural Science Foundation of China(51276057,51676209)

作者简介:朱辉(1983—),男,湖南常德人,中南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: hqwang2011@usc.edu.cn

sensitivity of sweating was observed among the subjects during HDBR, and the sweat rate at the forehead, thorax and back was more significant than those at the lower body and forearm. The results suggest that the human sweating under simulated weightlessness is different from that under terrestrial condition, which can provide evidences for the improvements of the thermal environment during the manned space-flight.

**Key words:** simulated weightlessness; skin micro current; sweating; air temperature; relative humidity

随着航天技术的发展,载人航天已不再局限于近地轨道,而是向着更深的空间发展.为了满足科学考察、开发宇宙的需要,载人航天的时间也会越来越长、同期航天飞行的航天员人数也逐渐增加.在这种背景下,如何保证航天员在长时间内健康地生活、高效安全地工作,已成为未来载人航天的一项重要课题.皮肤大量出汗意味着人体正在努力去维持热平衡和热舒适,因此研究人体在失重时的出汗问题是失重时人体热舒适研究的重要方面,是载人航天的关键研究内容之一.

由于载人航天事业发展的需要,早期各国学者已对失重时人体出汗问题进行了研究.研究表明,失重对人体出汗反应存在影响,导致人体从失重回到正常重力环境时出汗率比失重前降低<sup>[1-3]</sup>. Michikami 等<sup>[4]</sup>采用卧床模拟失重的方法研究了人体出汗的变化,发现在卧床模拟失重时人体胸及上臂皮肤出汗率未发生明显变化.然而,在对受试者进行全身加热后,胸部及上臂皮肤出汗率明显增加,但仍低于卧床实验前相同环境温度条件下的水平.这表明在失重条件下,人体皮肤可能对热环境的反应变得不如正常重力条件时敏感.此后 Michikami 等对此发现进行了进一步实验,并提出可能的原因在于卧床模拟失重时人体胸部皮肤血管传导的敏感度较卧床前降低.血管传导敏感度的降低,必然导致失重或者模拟失重时人体皮肤出汗的改变,但是此结论目前暂未有实际载人航天飞行时的数据来支撑.

目前针对失重或模拟失重时人体出汗变化的研究工作一般将重点放在“失重条件”上,因此往往在特定环境下进行实验,而忽略了环境温湿度变化的影响.本文在已有研究的基础上,采用-6°头低位卧床(HDBR)实验来使人体心血管循环系统按照失重时的机制运行(如产生血液分布的变化、热调节功能的变化等生理现象),在此基础上利用步入式恒温恒湿实验室在短时间内创造不同的空气温度、相对湿度的组合环境,在各种环境下通过测量人体

多处皮肤微电流来研究人体皮肤出汗变化.

## 1 实验方案与步骤

### 1.1 受试者情况

实验共有6名男性受试者参加,年龄为18~21岁,身高167~174 cm,体重51~59 kg.为了排除服装热阻的干扰,受试者在实验过程中穿着相同材质的短袖与齐膝短裤.为了满足头低位卧床实验的要求,在实验开始前对受试者进行了心脏和肺功能的检查,排除存在心血管病史的受试者.参与实验的6名受试者全部来自于某高校暖通专业大二学生,对于热舒适实验有一定的认识.在实验开始前,对实验的内容和注意事项进行了培训.6名受试者的基本情况见表1.

表1 实验受试者基本情况

Tab.1 Brief information of the subjects

编号	性别	年龄	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )
1	男	20	171	51	17.44
2	男	20	167	52	18.65
3	男	18	174	58	19.16
4	男	19	168	55	19.49
5	男	19	168	56	19.84
6	男	21	170	59	20.42

### 1.2 模拟失重的方法

为了研究模拟失重时人体出汗的变化,本文采用失重的地面模拟技术来使人体按照“失重模式”运行,从而使人体出现各种针对失重环境的适应性改变(“失重效应”).-6°头低位卧床实验是目前失重生理学研究领域公认最有效的地面模拟失重技术<sup>[5]</sup>. Hargens 等<sup>[6]</sup>对利用该技术在地面条件下实现模拟失重的原理进行了分析(见图1):在地面条件下,由于重力的作用,人体体液分布如图1(a)所示,图中深色部分表示体液分布较多;在真实失重条件下(如图1(b)所示),由于重力消失,人体体液的流体静压随之消失,体液压力处处相等,但是体液呈头向分布,身体上部体液分布较多.对于地面模拟技术,若采用平卧模型(图1(c)),虽然人体体

液压力在头-足轴线方向相同,但是体液未出现类似于失重时的分布特征;而采用 $-6^\circ$ 头低位卧床模型(图1(d)),体液的分布出现了类似于失重时的情况,且头-足轴线方向压力差别不大。

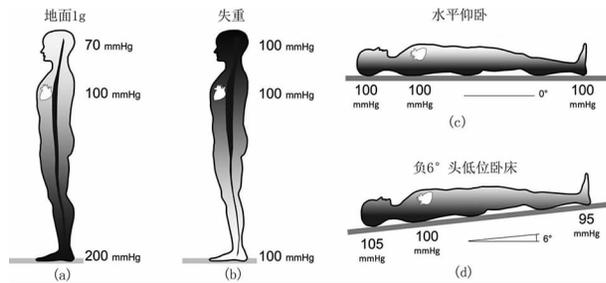


图1 失重的地面模拟技术

Fig.1 Simulation models of weightlessness under terrestrial condition

但是,在地面条件下模拟失重时,短时间的卧床并不能使人体各个系统出现针对失重的适应性改变,且各系统出现“失重效应”所需时间不同.由于人体心血管系统与人体热调节活动密切相关,因此实验过程中只需心血管系统出现“失重效应”便可开始进行出汗方面的实验测试.在 $-6^\circ$ 头低位卧床过程中,一般在3~7 d主要出现体液转移和体液丢失的变化,7 d后逐渐进入血管重塑和神经功能适应性变化,人体的心血管系统开始按照失重时的模式来运行<sup>[7]</sup>.

### 1.3 实验方案设计

基于以上考虑,本实验的周期为14 d,3个阶段.第一阶段:前3 d进行正常情况下人体出汗的实验研究,作为之后失重时人体出汗情况的对照值.第二阶段:第4至第10 d进行 $-6^\circ$ 头低位卧床实验,使人体心血管系统出现失重的适应性改变.在卧床实验中,需要连续7 d保持 $-6^\circ$ 头低位的卧姿,期间除了大小便外不能下床运动,且每天直立时间不能超过10 min.长达7 d天的卧床实验在 $26^\circ\text{C}\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $60\%\pm 5\%$ 的舒适环境中进行,期间主要观测人体体温的变化情况.第三阶段:从第11 d至实验结束,保持 $-6^\circ$ 头低位卧床状态,在不同的温湿度下对人体出汗规律进行实验研究.

人体皮肤出汗的研究方法较多,如衣服增重法、皮肤电阻抗法、通风气囊法等.衣服增重法的精确度有待验证,且无法确定人体的临界出汗状态<sup>[8]</sup>;皮肤电阻抗法是一种较好的实验方法,但是市面上未有成套的实验设备<sup>[9]</sup>;通风气囊法的精确度较高,也可以确定人体的临界出汗状态点,但是实验过程非常繁杂,且每次只能测量平方厘米级的局部皮肤

出汗情况<sup>[10]</sup>.汗腺活动是影响皮肤电传导的重要因素,因此本研究采用皮肤微电流法来评价人体出汗情况.皮肤微电流的测量原理与重庆大学学者提出的皮肤电阻抗法原理类似<sup>[11-12]</sup>:采用直流电压法,把两个电极分别接到皮肤的两个部位(电极距离为 $20\text{ mm}\pm 5\text{ mm}$ ),并把电极与电流计和外接电源进行串联.当电路接通后就会产生电流传导,使电流发生变化.如果给予外接的刺激,如温度、湿度、气流速度等,受试者的皮肤微电流就会发生变化.皮肤微电流法可以捕捉人体出汗的临界点和确定出汗的程度,但是无法定量地确定出汗量.本实验采用皮肤电测试仪来实时测量人体皮肤微电流.该仪器由北大青鸟研发,测量范围为 $0\sim 999$ 单位,对应皮肤电阻 $2\text{ M}\Omega$ 至 $2\text{ k}\Omega$ 之间的皮肤微电流.实时采样周期为1 s,实时显示实验时间.皮肤微电流测量点的选取参考了重庆大学学者的研究<sup>[9]</sup>.同时为了研究模拟失重时人体上、下半身皮肤的出汗情况,在本实验中测点选择在具有代表性的皮肤处(见图2):前额、左胸、上臂、背、大腿、小腿.实验过程中,每个测点连接一台皮肤电测试仪(如图3所示).实验第三阶段的现场测试情况如图4所示.测量皮肤微电流之前,首先对每台皮肤电测试仪进行校准:使受试者在舒适环境中( $26^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ , $60\%\pm 5\%$ )停留30 min<sup>[13-14]</sup>,然后将6台皮肤电测试仪的电极片分别贴附到对应的皮肤测点,记录其电流值,若有读数立即调零.这样每台皮肤电测试仪读数为0表示人体皮肤没有显性出汗的舒适状态.

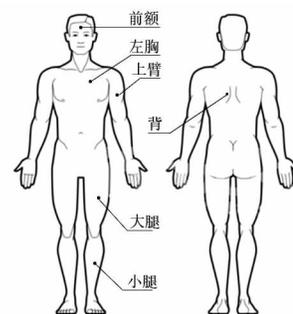


图2 皮肤测点分布图

Fig.2 Measuring points of the subject

本实验通过步入式恒温恒湿实验室来创造不同的温湿度环境,如图5所示.该实验室的容积为 $13.2\text{ m}^3$ ,可创造 $-20\sim 85^\circ\text{C}$ 的空气温度、 $20\%\sim 98\%$ 的相对湿度、 $0.1\sim 1.5\text{ m/s}$ 的风速,升降温速率为不小于 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ ,且可实现无极调节风速.共设计了4组空气温度、3组空气相对湿度,每名受试者共在12种不同的环境下进行模拟失重条件和正常

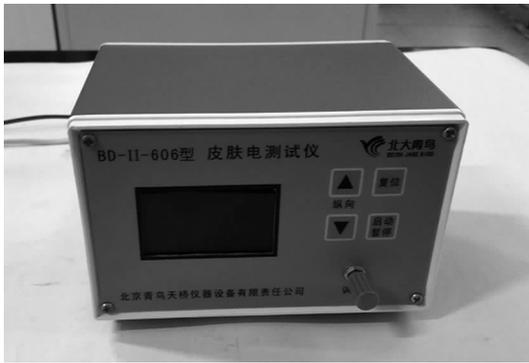


图3 皮肤电测试仪

Fig.3 The skin current measuring device



图4 HDBR 模拟失重状态时现场测试照片

Fig.4 Photo of the field experiment under simulated weightlessness through HDBR

情况2轮共24次测试。所选择的空气温度从人体的舒适温度上升至高温,分别为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;相对湿度包含了较低湿度、中等湿度和高湿,分别为 $30\%$ 、 $45\%$ 、 $80\%$ ;气流速度为 $0.2\text{ m/s}$ 。根据热舒适研究的经验,在变化环境温湿度时,人体需要适应新的温湿度 $10\sim 15\text{ min}$ 后,才能进行新环境下人体出汗的研究<sup>[15-16]</sup>。测试时间在用餐 $1\text{ h}$ 后才能进行,以避免餐后能量代谢增加带来的误差。同时也避开清晨和夜晚,以消除人体体温的昼夜节律带来的影响。



图5 步入式恒温恒湿实验室

Fig.5 The walk-in environment chamber

#### 1.4 实验步骤

实验过程中受试者严格遵守作息时间表,所有实验测试在 $8:30\sim 11:30$ 、 $14:30\sim 17:30$ 时间段进行。

在测试过程中所有受试者保持安静、情绪稳定,并且不允许有剧烈动作。在实验的第一阶段,受试者全程保持静坐;在实验的第二、第三阶段,受试者全程保持 $-6^{\circ}$ 头低位卧床状态。

测量人体出汗的实验按如下步骤进行。在实验第一阶段,首先将恒温恒湿实验室的参数设置至第一组温湿度环境,采用便携式温湿度检测仪(Fluke,精度:温度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $1\%$ )对实验室内环境进行检测,待第一组环境稳定后,6名受试者同时进入实验室内静坐, $15\text{ min}$ 后开始皮肤微电流值的测量。完成记录后,将参数设置至第二组温湿度环境,待环境稳定后,受试者静坐 $15\text{ min}$ ,再开始皮肤微电流值的测量。按照此模式完成所有的12组环境下的皮肤微电流测量。在实验第二阶段主要是头低位卧床,在舒适环境下的空调房间内。其目的是为了使人体出现“失重效应”,期间不进行皮肤微电流测试。实验第三阶段为模拟失重时人体出汗的研究,其实验过程与第一阶段相同,但是所有受试者必须在保持 $-6^{\circ}$ 头低位卧床的状态下进行,且整个实验期间除了大小便外不允许站立。

## 2 实验结果分析

为研究HDBR模拟失重时人体的出汗变化,本文将实验第一阶段(HDBR前 $1\sim 3\text{ d}$ )和第三阶段(HDBR后 $11\sim 14\text{ d}$ )的测量结果放在堆积柱形图中进行了对比。其中纵坐标表示微电流的度量,横坐标为对应各环境温度。带图例的柱为模拟失重时(HDBR后)的皮肤微电流,空白柱代表正常情况下(HDBR之前)的皮肤微电流。对于每个空气温度下的柱形图,从左至右依次表示前额、胸、背、上臂、大腿、小腿处皮肤微电流在测试时间段内的平均值。

### 2.1 相对湿度为 $30\%$ 时不同温度下的出汗情况

当空气相对湿度为 $30\%$ 、迎面气流速度为 $0.2\text{ m/s}$ 、空气温度从 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加至 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,6名受试者皮肤微电流情况如图6所示。需要注意的是,图6中各分图 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处的空白表示该环境条件下未检测到皮肤微电流信号。

由图6可知:1)当空气温度从 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在头低位卧床(HDBR)后和卧床前,6名受试者的前额、胸、背、上臂、大腿、小腿处皮肤微电流为0,其原因是 $30\%$ 的空气相对湿度较低,且该湿度下空气温度为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时人体的汗腺活动水平较低,同时人体皮肤表面水分的蒸发速度大于人体汗

液的分泌量,从而导致皮肤湿润度降低、电阻显著增加. 2)当空气温度上升至 32 °C 时, HDBR 后 1 号、2 号、4 号、5 号受试者仍然未检测到皮肤微电流. 但图 6(c)(f) 显示, 3 号和 6 号受试者除了大腿、小腿皮肤外均检测到微弱的电流信号; 而在 HDBR 前, 32 °C 时 6 名受试者均检测到不同程度的皮肤微电流, 这说明卧床前空气相对湿度为 30%、空气温度大于等于 32 °C 时人体皮肤开始有一定的湿润度, 但不一定意味着显性出汗的开始. 3)当空气温度上

升至 35 °C 时, HDBR 后 1 号和 2 号受试者皮肤测点仍然未有皮肤微电流信号, 但 3 号、4 号、5 号和 6 号受试者除了大腿和小腿皮肤外, 其他 4 处测点均检测到皮肤微电流信号; 而 HDBR 前 6 名受试者全身 6 个测点均观测到电流信号. 皮肤微电流信号的变化说明在 HDBR 后(即模拟失重状态下), 空气湿度较低时人体皮肤汗腺的显著活动需要更高的空气温度刺激, 并且汗腺的活动水平(即出汗率)出现一定程度的降低.

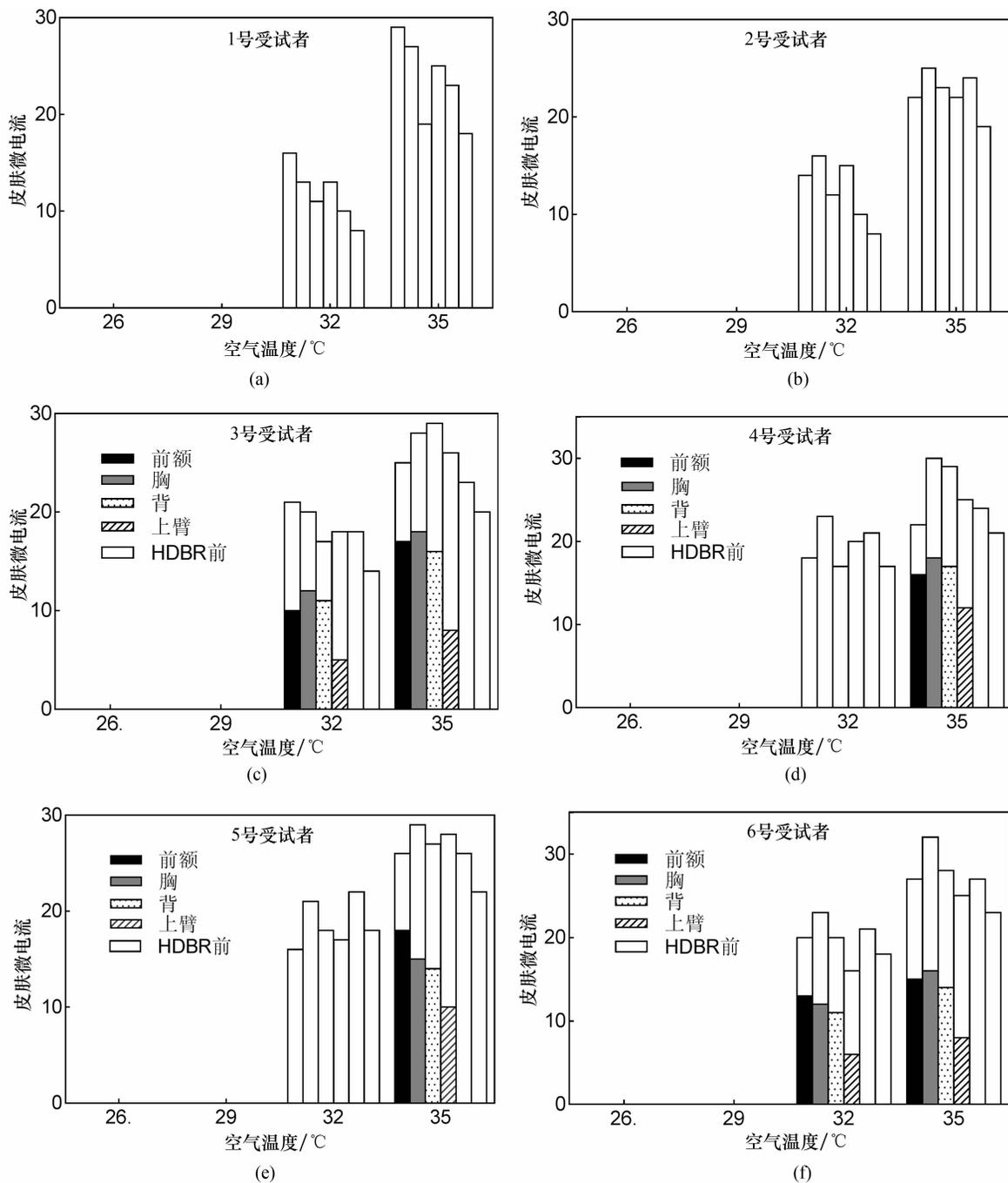


图 6 空气湿度为 30% 时不同温度下的皮肤微电流

Fig.6 Variations of the skin micro current under different air temperature when RH=30%

2.2 相对湿度为 45%时不同温度下的出汗情况

当空气相对湿度为 45%、迎面气流速度为 0.2 m/s、空气温度从 26 °C 上升至 35 °C 时,6 名受试者皮肤微电流情况如图 7 所示. 由图 7 可知:1)当空气温度从 26 °C 上升至 35 °C 时,无论是 HDBR 后还是 HDBR 前,6 名受试者的所有皮肤测点处均检测到了电流信号. 这说明随着空气相对湿度的升高,人体皮肤不再干燥,均存在一定的、高低不一的湿润度,这也是人体热舒适的必要条件. 2)HDBR 后,当空气温度为 26 °C 和 29 °C 时,除了 2 号受试者的大、

小腿皮肤外,其他受试者的所有皮肤测点处均检测到皮肤微电流信号,其峰值在 20 单位左右. 但是在相同温度条件下,HDBR 前受试者的皮肤微电流信号相对较强,26 °C 时各测点皮肤微电流信号平均值在 30~50 单位之间,29 °C 时在 60 单位左右. 这说明在相同的温湿度、气流速度条件下,HDBR 后的人体皮肤汗腺活动水平降低. 这种现象在空气温度达到 32 °C 和 35 °C 时更加显著. 3)当空气温度为 32 °C 和 35 °C 时,HDBR 后 6 名受试者各个测点的峰值电流可达 80 单位(图 7(c)中 3 号受试者的胸部

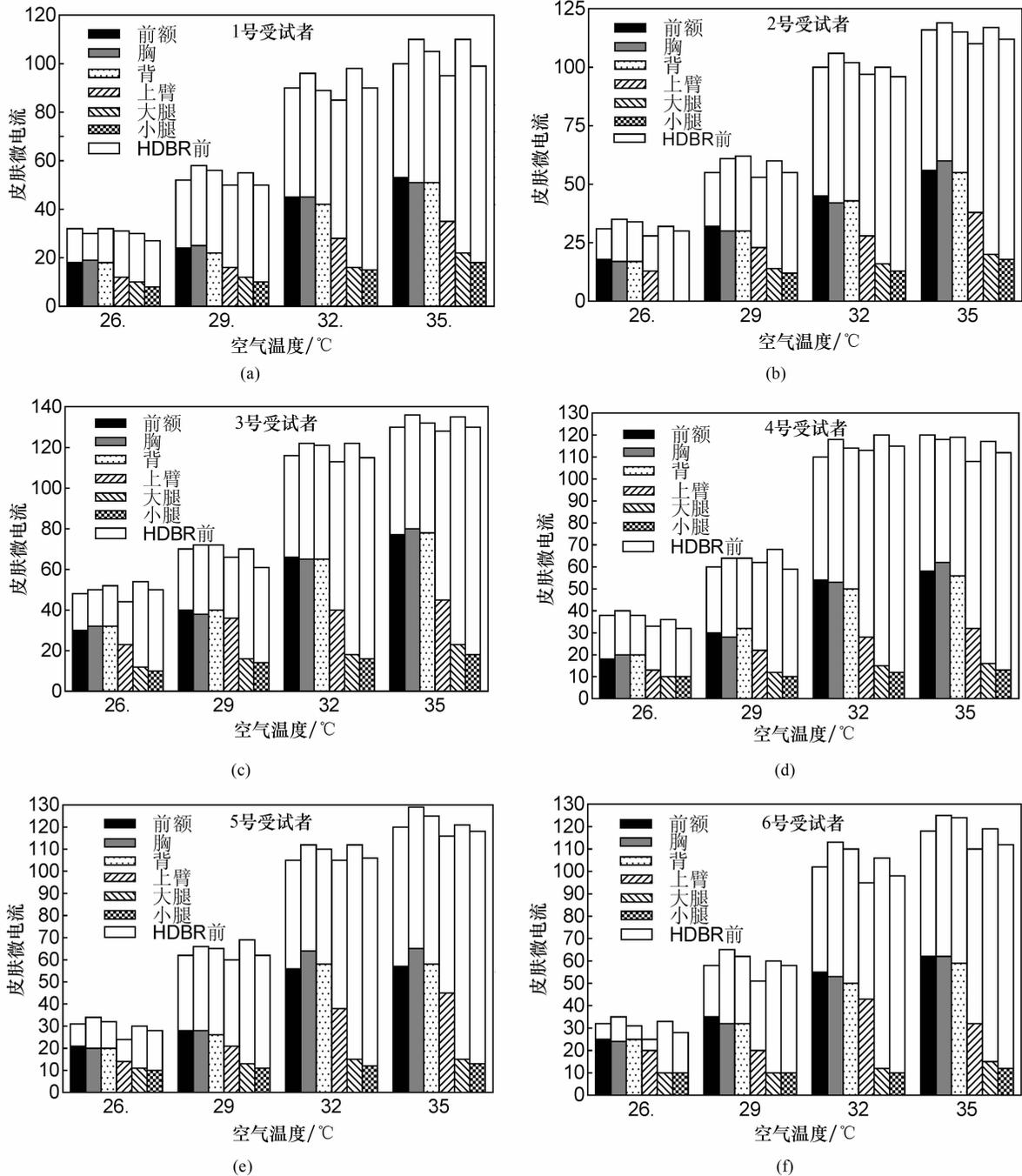


图 7 空气湿度为 45%时不同温度下的皮肤微电流

Fig.7 Variations of the skin micro current under different air temperature when RH=45%

皮肤),皮肤微电流的最低值出现在各受试者的大腿和小腿皮肤处.但是在相同条件下,HDBR前受试者的各个测点处的皮肤微电流大小差别不显著,且其平均值均在100以上.这表明6名受试者在环境温度达到32℃以上时,所有皮肤测点处皮肤湿润度较均匀,这是皮肤开始显性出汗的结果.4)当空气温度从26℃上升至35℃时,HDBR后6名受试者的皮肤微电流的变化与正常状态下出现明显差异:所有受试者的前额、胸和背处的皮肤微电流平

均值均高于上臂、大腿和小腿处的值,即模拟失重时人体上身的出汗率较高,而四肢的出汗率较低.其原因可能在于HDBR模拟失重时人体的血液分布发生变化,身体上部血液量较多、而下部血液量减少.

2.3 相对湿度为80%时不同温度下的出汗情况

当空气相对湿度为80%、迎面气流速度为0.2 m/s、空气温度从26℃上升至35℃时,6名受试者皮肤微电流情况如图8所示.

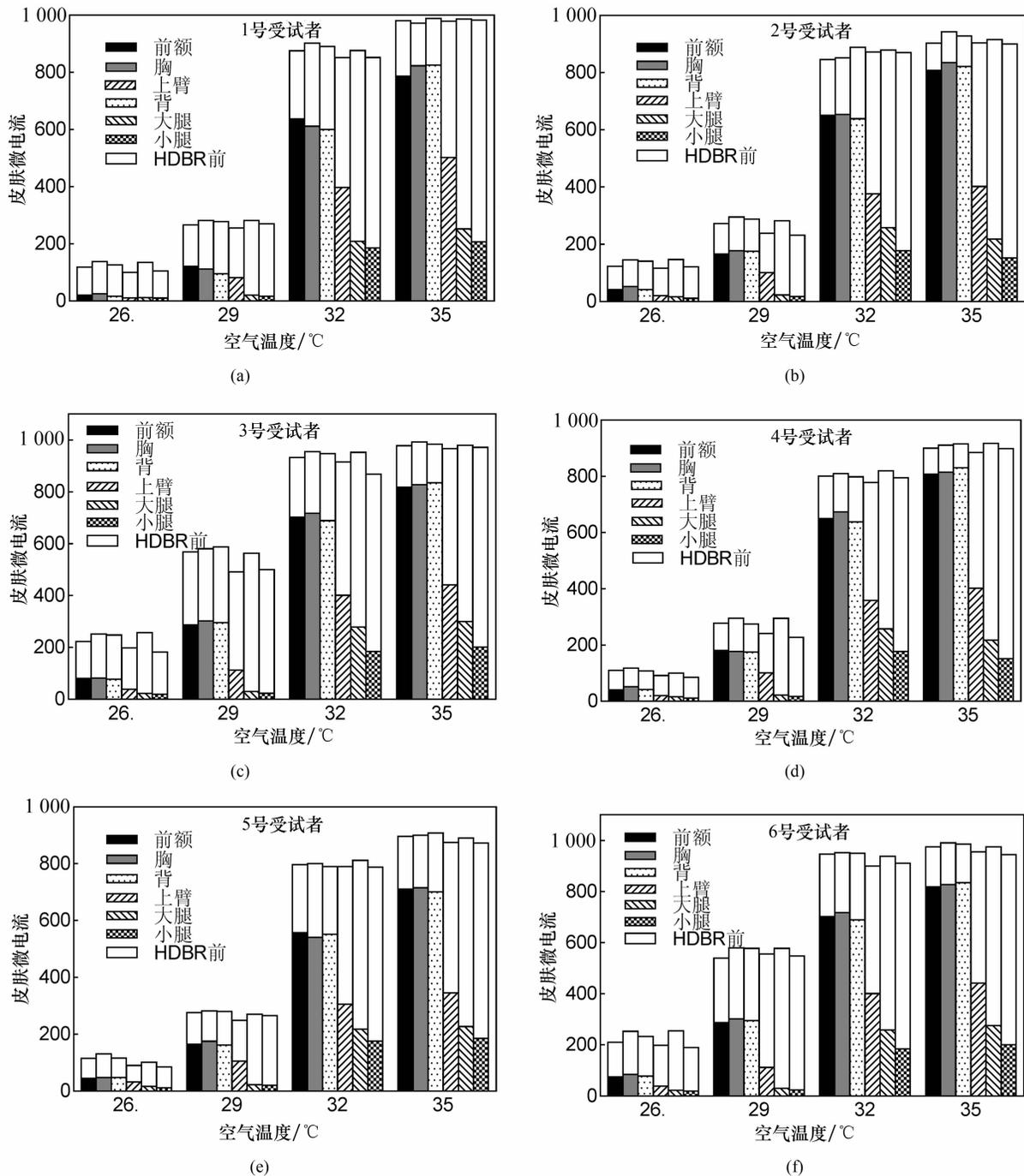


图8 空气湿度为80%时不同温度下的皮肤微电流

Fig.8 Variations of the skin micro current under different air temperature when RH=80%

由图8可知:1)当空气温度从26℃上升35℃的过程中,HDBR后6名受试者各皮肤测点处均检测到皮肤微电流,其峰值出现在额头、胸和背部皮肤,而大腿、小腿和上臂处的电流信号相对较弱.然而在HDBR前,6名受试者从26℃开始各测点的皮肤微电流相差不大.这说明环境温度高于26℃时受试者全身皮肤湿润度较均匀,是全身开始显性出汗的信号.2)当空气温度大于等于29℃时,HDBR后6名受试者各测点处的皮肤微电流平均值与HDBR前的差距减小,并且额头、胸和背部皮肤的电流信号相差不大,这说明此时人体皮肤湿润度均匀分布,受试者开始显著出汗.3)HDBR后受试者的额头、胸、背处的皮肤微电流平均值显著高于下身和上臂处的值,这可能是由HDBR后人体血液的头向分布所导致.4)与30%和45%湿度下的测量结果类似,HDBR后受试者各个皮肤测点处的电流平均值均低于HDBR前的值.这说明模拟失重时人体相同皮肤区域的出汗率低于正常状态下的出汗率,这可能是由HDBR后人体体液流失所引起的.

### 3 失重时人体出汗变化的机理分析

由实验结果分析可知,受试者在HDBR模拟失重状态下皮肤出汗主要表现为3个显著特征:1)人体上部(除上臂)的出汗率高于身体下部;2)在各个温湿度条件下,局部皮肤出汗率比卧床前降低;3)不同温湿度条件下人体皮肤出汗的环境温度阈值升高.这些现象是失重或者模拟失重时人体出汗的特征,其可能的机理分析如下.

#### 3.1 失重或者模拟失重时人体血液分布的变化

在失重条件下,由于重力的消失,人体下肢的血液向身体上部转移.血液的转移导致了人体血液分布的改变,从而各个部位参与人体热调节的皮肤血流量也发生变化.研究证明,在头低位模拟失重实验中,卧床后人体胸部皮肤血流量显著升高,而大腿和小腿的皮肤血流量显著降低<sup>[17]</sup>.这就解释了为何大腿、小腿皮肤在HDBR模拟失重的过程中出汗率较低,而额、胸和背部皮肤出汗率相对较高.

#### 3.2 失重或者模拟失重时人体血液量的减少

正常重力条件下,正常人体的总血液量约为体重的7%~8%.血量的相对恒定对于保证人体心血管系统调节功能正常和维持人体热平衡具有重要作用.失重条件下人体的血液总量会降低.根据空

间实验室生命科学-1号(9d)与生命科学-2号(14d)的监测数据,飞行第一天航天员平均血浆减少量为17%,从第二天到飞行结束血浆量均低于地面水平.双子座4号、天空实验室等载人航天任务的监测数据均表明,在最长达30d的失重过程中,人体血浆量平均减少了约10%<sup>[18]</sup>.空间实验室以及地面的卧床模拟失重实验也证实人体的血浆总量减少了约15%.此外失重时人体红细胞质量也会出现下降的现象,如空间实验室生命科学-1号(9d)与空间实验室生命科学-2号(14d)两次飞行任务中航天员的平均红细胞压积分别下降210 mL与261 mL<sup>[19]</sup>.由于血浆容量减少,机体组织为了达到渗透压平衡,必然导致人体体液的流失,因此汗腺的汗液分泌量相应减少.这就解释了为何模拟失重时人体的皮肤出汗率低于模拟失重前的水平.

#### 3.3 失重引起人体血管功能的变化

失重时人体出汗温度阈值的上升意味着出汗敏感度的降低,这主要是由人体皮肤血管在失重时产生适应性的生理变化引起的.在失重条件下,人体血管的收缩、舒张功能均发生变化(尤其是动脉),导致皮肤血管的传导率降低.在环境温湿度发生变化时,参与人体热调节的血管的响应变得更慢,导致人体出汗的环境温度阈值升高. Michikami等人对此进行了实验并证实了这一观点:胸部皮肤血管传导动作的临界核心温度从卧床前的36.74℃上升至37.01℃、上臂皮肤传导动作的临界核心温度从卧床前的36.72℃上升至37℃;此外胸部皮肤温度血管传导的敏感度从卧床前的68.5 mL/(100 g·min·100 mmHg·℃)降低至43.2 mL/(100 g·min·100 mmHg·℃)、上臂对应值从73.2 mL/(100 g·min·100 mmHg·℃)降低至39.1 mL/(100 g·min·100 mmHg·℃)<sup>[4]</sup>.这可以解释人体在失重条件下出汗的环境温度阈值上升的原因.

## 4 结论

本文借助航天医学领域的一6°头低位卧床实验,在3种湿度、4种空气温度下测量了人体皮肤的微电流,用于评价模拟失重条件下人体皮肤出汗的变化.研究结果表明:

1)模拟失重时,人体前额、胸部、背部皮肤微电流平均值高于身体下部以及手臂皮肤处的值,这说明在模拟失重条件下人体身体上部(除了上臂)出汗率高于身体下部.其原因可能在于模拟失重时人

体血液的头向分布,导致身体上部(除上臂)循环血液分布较多,而身体下部循环血液量较少.此外,模拟失重时,在各个温湿度条件下人体各测点处的皮肤微电流平均值低于卧床前的值,这证明模拟失重时在相同的环境条件下人体皮肤的出汗率显著低于卧床前的水平.其原因可能在于模拟失重时人体体液流失所导致的人体缺水,从而引发汗液分泌量降低.

2)在 HDBR 模拟失重的过程中,出现了出汗所对应的环境温度阈值比卧床前升高的现象,即模拟失重时皮肤出汗的敏感度降低,需要更高的环境温度来刺激.这可能是由于失重引起的皮肤血管传导率降低,从而使得人体皮肤的出汗响应时间变长.

但是,目前所有关于失重的地面模拟技术中,均无法模拟真实失重环境下自然对流消失或减弱的情况,因此真实失重环境下人体体表滞留的空气对汗液蒸发的阻断效应无法在本实验中体现.尽管研究结果存在一定的误差,但是仍可以为失重时人体出汗的研究提供理论支撑,为失重时人体热舒适的研究提供一种新的技术手段,为航天器生命保障系统的设计提供依据.

## 参考文献

- [1] CRANDALL C G, CUI J, WILSON T E. Effects of heat stress on baroreflex function in humans[J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 2003, 177(3): 321-328.
- [2] CRANDALL C G, JOHNSON J M, CONVERTINO V A, *et al.* Altered thermoregulatory responses after 15 days of head-down tilt[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1994, 77(4): 1863-1867.
- [3] FORTNEY S M, MIKHAYLOV V, LEE S M, *et al.* Body temperature and thermoregulation during submaximal exercise after 115-day spaceflight[J]. *Aviation Space & Environmental Medicine*, 1998, 69(2): 137-141.
- [4] MICHIKAMI D, KAMIYA A, FU Q, *et al.* Attenuated thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation after 14-day bed rest in humans[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2004, 96(1): 107-114.
- [5] 齐乃明, 张文辉, 高九州, 等. 空间微重力环境地面模拟试验方法综述[J]. *航天控制*, 2011, 29(3): 95-100.  
QI Naiming, ZHANG Wenhui, GAO Jiuzhou, *et al.* The primary discussion for the ground simulation system of spatial microgravity [J]. *Aerospace Control*, 2011, 29(3): 95-100. (In Chinese)
- [6] HARGENS A R, VICO L. Long-duration bed rest as an analog to microgravity[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2016, 120(8): 891-903.
- [7] 孙喜庆, 李莹辉, 姜世忠. 重力生理学理论与实践[M]. 西安: 第四军医大学出版社, 2009: 174-177.  
SUN Xiqing, LI Yinghui, JIANG Shizhong. Theory and practice of the gravitational physiology [M]. Xi'an: The 4<sup>th</sup> Military Medicine University Press, 2009: 174-177. (In Chinese)
- [8] 魏洋, 王革辉. 不同环境温度和活动强度下人体出汗率测定[J]. *中国个体防护装备*, 2011(5): 9-13.  
WEI Yang, WANG Gehui. The measurement of sweat rate under different ambient temperature and activity intensity [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2011(5): 9-13. (In Chinese)
- [9] 高杨. 体表电阻抗与人体出汗在热舒适中的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2010: 39-54.  
GAO Yang. A research for the application of body surface impedance on thermal comfort prediction [D]. Chongqing: College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, 2010: 39-54. (In Chinese)
- [10] 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.
- [11] 李百战, 郑洁. 热湿环境下热不舒适性的快速检测装置: ZL2005200510057120[P]. 2006-03-22.  
LI Baizhan, ZHENG Jie. Quick detecting method and its device for heat uncomfotableness under hot and wet environment; ZL2005200510057120[P]. 2006-03-22. (In Chinese)
- [12] 陈金华, 赵福滔, 李文强, 等. 重庆市中低海拔村镇旅游区住宅热湿环境实测与热舒适研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(7): 128-134.  
CHEN Jinhua, ZHAO Futao, LI Wenqiang, *et al.* Field study of thermal and humidity environment and thermal comfort study of residences in mid and low altitude rural tourism area of Chongqing [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(7): 128-134. (In Chinese)
- [13] ISO 7730: 2005 Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [S]. Geneva, Switzerland: International Standards Organization, 2005: 14-17.
- [14] 吴小舟, 赵加宁, 王泮浩. 室内热环境参数对人体火用损的影响研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(3): 125-131.  
WU Xiaozhou, ZHAO Jianing, WANG Fenghao. Study on effect of indoor thermal environment parameters on human body exergy consumption [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(3): 125-131. (In Chinese)
- [15] LIU Weiwei, DENG Qihong, MA Weiwu, *et al.* Feedback from human adaptive behavior to neutral temperature in naturally ventilated buildings: Physical and psychological paths [J]. *Building and Environment*, 2013, 67(9): 240-249.
- [16] 杨昌智, 文洁, 蒋新波. 热湿环境参数对 PMV 及空调能耗的影响研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(1): 104-108.  
YANG Changzhi, WEN Jie, JIANG Xinbo. Study on the influence of thermal environment parameters on PMV and energy consumption [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(1): 104-108. (In Chinese)
- [17] 沈羨云. 航天重力生理学与医学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 188-197.  
SHEN Xianyun. Gravitational physiology and medicine in spaceflight [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 188-197. (In Chinese)
- [18] ZHU Hui, WANG Hanqing, LIU Zhiqiang. Effects of real and simulated weightlessness on the cardiac and peripheral vascular functions of humans; a review [J]. *International Journal of Occupational Medicine and Environment Health*, 2015, 28(5): 793-802.
- [19] WATENPAUGH D E, HARGENS A R. The cardiovascular system in microgravity; In handbook of physiology-environmental physiology [M]. New York: Oxford University Press, 1996: 647-649.