

# 局部热暴露对人体热反应的影响研究(1):局部热感觉对全身热感觉的影响<sup>\*</sup>

华南理工大学 张宇峰<sup>☆</sup>

清华大学 赵荣义

**摘要** 随机选取 30 名男性受试者,在中性偏热的房间中,局部冷气流分别作用于脸部、胸部和背部,采用问卷调查的方法以一定的时间间隔记录了受试者身体各个部位的局部热感觉和全身热感觉。结果表明,局部热暴露在改变暴露部位和全身的热感觉的同时,也显著改变了非暴露部位的热感觉,据此提出了基于影响因子的分析方法和全身热感觉的预测模型。

**关键词** 局部热暴露 局部热感觉 全身热感觉 影响因子 影响权重 预测模型

## Effect of local exposure on human thermal responses(1): effects of local thermal sensation on overall thermal sensation

By Zhang Yufeng<sup>★</sup> and Zhao Rongyi

**Abstract** At the room temperatures ranging from neutral to warm, three sensitive body parts—the face, the chest and the back of 30 randomly selected male subjects are each exposed to local cooling air. Records local thermal sensations of each body part and overall thermal sensation at regular intervals by questionnaires. The results show that local exposure affects not only thermal sensations of the exposed body and the whole body, but also thermal sensations of the unexposed body parts. Proposes a new influencing factor method and a predicted model for overall thermal sensation based on the method.

**Keywords** local exposure, local thermal sensation, overall thermal sensation, influencing factor, influencing weight, predicted model

<sup>★</sup> South China University of Technology, Guangzhou, China

<sup>①</sup>

### 1 研究背景

与以往身体各个部位暴露于均一热环境的全身热暴露相对应,身体的一个或几个部位暴露于与其他部位不同的热环境的情况称为局部热暴露。近期,随着传统空调巨大能源消耗问题的出现,局部热暴露作为一种新的调节方式受到越来越多的关注。另外,在以全身热暴露为调节方式的空调环境中也普遍存在局部热暴露的现象。研究方向从全身热暴露到局部热暴露的转变不但具有广泛的

实际应用背景,还将有助于揭示人体热反应的深层次规律。

国内外学者对局部热暴露的研究先后经历了两个重要阶段。第一阶段是在保持全身热感觉中性的条件下考察局部热暴露对热舒适的负面影响,

<sup>①☆</sup> 张宇峰,男,1979 年 4 月生,博士研究生,讲师  
510641 华南理工大学建筑学院  
(020) 39851485

E-mail: zhangyufeng96@tsinghua.org.cn

收稿日期:2006-05-19

修回日期:2006-10-19

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(编号:50178037)

并在实际应用中,对局部受热或冷却现象制定各种约束条件的限制性研究;第二阶段是在偏热或偏冷的热环境中考察局部热暴露对提高热环境可接受程度的积极作用,并对其设计和应用提供指导的应用性研究。两个阶段的研究反应了局部热暴露对全身热反应影响的可变性和复杂性,深入了解其影响规律是合理应用局部热暴露的前提。

一般来说,局部热暴露研究以身体部位为划分依据,以单一部位的局部热感觉为基本元素研究局部热感觉对全身热反应的影响。最受关注的全身热反应有全身热感觉、全身热可接受度和全身热舒适。因篇幅限制,笔者将研究内容分为两部分分别进行介绍,本文仅就局部热感觉对全身热感觉的影响加以探讨,局部热感觉对全身热可接受度的影响见后续文章。

局部热感觉对全身热感觉的影响研究通常采用影响权重的方法进行,即将各个部位的局部热感觉按影响权重加权平均得到全身热感觉,部位的影响权重越大,全身热感觉对其局部热感觉的变化越敏感。Ingersoll 等人提出用占全身面积的百分比作为部位的影响权重<sup>[1]</sup>。Hagino 等人却指出主导全身热感觉的是某些暴露于气流和太阳辐射中的小面积身体部位<sup>[2]</sup>,而非面积较大的部位。Zhang 指出部位的影响权重并非常数,随着部位局部热感觉与全身热感觉之间差距的增大,部位的影响权重呈线性增加<sup>[3]</sup>。李俊也指出部位的影响权重与局部刺激量有关,局部刺激量越大,刺激部位的影响权重越大<sup>[4]</sup>。

影响权重作为评价局部热感觉对全身热感觉影响的重要指标已被普遍接受,部位的影响权重互不相同也已达成共识,但哪些部位具有较大的影响权重以及影响权重随暴露条件的变化规律还未达成一致。本文拟通过受试者主观实验的方法,从单一部位的局部热暴露着手,对局部热感觉影响全身热感觉的客观规律进行探索性的研究。

## 2 实验方法

综合考虑实验预期结果的显著性和实际应用的可行性和广泛性,选择脸部、胸部(不包括腹部)和背部(不包括下背部)三个部位作为实验暴露部位。实验在清华大学建筑技术科学系的人工环境气候室中进行。局部热暴露装置由局部送风系统和挡布组成,局部送风系统提供局部气流,挡布辅

助限定气流的作用区域(见图 1)。

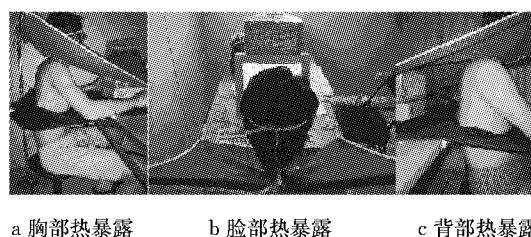


图 1 局部热暴露装置

为便于在实验结果间进行比较,选取跨度较大的 3 种全身热状态水平和 3 种局部热暴露水平进行实验,其中,全身热状态水平由人工环境气候室的房间温度调节实现,局部热暴露水平由局部送风的作用温度调节实现。具体实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况  $^{\circ}\text{C}$

|      |            |
|------|------------|
| 房间温度 | 28, 32, 35 |
| 作用温度 | 22, 25, 28 |

注:作用温度指局部热暴露部位暴露区域中心位置的送风温度。

实验期间其他热环境参数保持不变,房间的相对湿度为 40%,空气速度小于 0.1 m/s,局部送风出口的风速为 1 m/s。

实验随机选取 30 名男性在校大学生作为受试者,参加所有实验工况的实验,其基本信息见表 2。为保证三个暴露部位着衣量的一致性,受试者仅穿着夏季短裤。实验期间受试者保持静坐,身体尽量保持正对风口的姿势,可进行普通阅读或交谈,但不允许就实验相关内容进行交流。实验工况的参加次序在受试者中作均衡安排,以削弱重复测试带来的学习和熟悉效应的影响<sup>[5]</sup>。每次实验包括半小时的适应期和半小时的暴露期,适应期的房间热环境与暴露期相同,但无任何局部送风。

表 2 受试者的基本信息

| 年龄/a           | 身高/cm           | 体重/kg          |
|----------------|-----------------|----------------|
| 22.6 $\pm$ 1.5 | 172.6 $\pm$ 5.3 | 65.2 $\pm$ 7.9 |

实验采用问卷调查的方法获取受试者的热反应信息,包括身体各个部位的局部热感觉、全身热感觉和全身热可接受度。热感觉投票采用 ASHRAE 七点标尺,热可接受度投票采用断裂标尺(见图 2)。考虑到三个暴露部位之外的身体部位处于相同的房间热环境中,热感觉相差不大,以下半身代之。为考察热反应随时间的动态变化,在暴露期间安排多次投票,投票时间间隔分别为 1 min(暴露初期)、2 min(暴露中期)和 5 min(暴露

末期)。为检验受试者的热反应是否达到稳定状态,在适应期的最后 5 min 安排两次投票。

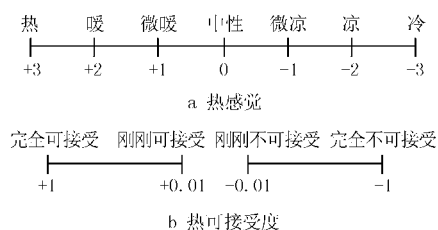


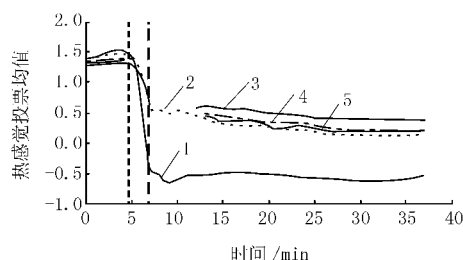
图2 投票标尺

### 3 实验结果与分析

本文的受试者总体为年轻男性学生,如无特殊说明,以下实验结果的适用范围都限定在此总体内。通过 SW 检验(Shapiro-Wilk test)对受试者的投票进行正态性检验,结果表明,所有工况下的受试者投票都近似服从正态分布。通过受试者内方差分析(within-subjects ANOVA)对暴露期投票进行检验表明,暴露开始 20 min 后人体热反应无显著性变化( $p > 0.05$ )( $p$  值为判断检验是否具有统计显著性的指标, $p > 0.05$  为不显著, $p < 0.05$  为显著, $p < 0.01$  为非常显著),可认为达到稳定状态。应用配对数据检验对适应期投票进行假设检验,结果表明投票间无显著性差异( $p > 0.05$ ),即受试者在适应期结束时刻的反应已达稳定。

#### 3.1 观察

图 3 为房间温度为 35 °C、送风温度为 22 °C 的脸部暴露条件下,身体各个部位和全身的热感觉投票均值随时间的变化。由图可知,脸部暴露开始(第 7 min)初期,脸部热感觉和全身热感觉发生显著变化,与此同时,身体的其他部位,包括下半身、胸部和背部的热感觉也有明显变化,应用配对数据检验进一步证实了这一变化的统计显著性( $p < 0.01$ )。



1 脸部热感觉 2 全身热感觉 3 下半身热感觉 4 背部热感觉 5 胸部热感觉

图3 脸部热暴露条件下热感觉投票均值随时间的变化(两竖线间无投票)

依此类推,对其他工况的实验结果进行分析,结果表明,除个别暴露强度较小的工况外,局部热暴露在改变暴露部位和全身热感觉的同时,也显著改变了非暴露部位的热感觉( $p < 0.05$ ),这是实验发现的重要现象之一。

#### 3.2 多元线性回归的问题

影响权重常用来反映局部热感觉对全身热感觉的影响,通常采用多元线性回归方法分析影响权重,其表达式为

$$TS_0 = \sum_{i=1}^n w_i TS_i \quad (1)$$

式中  $TS_0$  为全身热感觉; $w_i$  为部位  $i$  的局部热感觉对全身热感觉的影响权重, $i=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为身体划分的部位数; $TS_i$  为身体部位  $i$  的局部热感觉。

据 3.1 节可知,局部热暴露同时改变了身体各个部位的局部热感觉,说明身体各个部位热感觉间可能存在相关性,也即多重共线性,这种情况下多元线性回归得到的偏回归系数取值大小甚至正负号可能与实际情况相违背,难以解释<sup>[6]</sup>。另外,因采用重复测试的实验方法,不同工况下同一受试者的反应之间可能存在一定程度的相关性,也即自相关<sup>[7]</sup>,这破坏了多元线性回归独立性的前提条件,从而导致不合理的结果。

对于多重共线性和自相关,统计学提供了相应的解决方法,比如针对前者的逐步回归、岭回归和主成分回归方法<sup>[6]</sup>及针对后者的迭代法和差分法<sup>[7]</sup>。参考逐步回归和差分法的思路,结合本文的研究内容提出以下新的分析方法:

$$\Delta TS_0 = f_{EO} \Delta TS_E \quad (2)$$

式中  $\Delta TS_0$  为全身热感觉的变化值; $f_{EO}$  为回归系数; $\Delta TS_E$  为暴露部位的局部热感觉变化值。

新方法因具有以下两个特点,可在很大程度上消除多重共线性和自相关的影响。

1) 以解释权最大的暴露部位的热感觉为自变量,舍去其他部位的热感觉。

2) 先计算暴露部位热感觉的变化值和全身热感觉的变化值,再进行回归。

#### 3.3 影响因子

与影响权重相对应,提出影响因子的概念来描述新方法得到的回归系数。由式(2)可知,影响因子是指在单一部位热暴露情况下,暴露部位的热感

觉每变化一个标度单位所引起的全身热感觉改变的单位数。影响因子表征单一部位的局部热暴露对全身热感觉的影响,是暴露部位热感觉和其他部位热感觉同时发生改变的综合影响结果。而影响权重是在其他部位热感觉保持不变的前提下衡量单一部位的局部热感觉变化对全身热感觉的影响。

类似地,可将影响因子的概念加以扩展,用以描述局部热暴露条件下其他部位热感觉的变化,见式(3)。

$$\Delta TS_i = f_{Ei} \Delta TS_E \quad (3)$$

式中  $\Delta TS_i$  为身体部位  $i$  热感觉的变化值;  $f_{Ei}$  为暴露部位对部位  $i$  热感觉的影响因子。

综合式(1)~(3),假定局部热暴露初始时刻身体各个部位的局部热感觉相同,通过数学推导可得

$$f_{EO} = w_1 f_{E1} + \dots + w_E + \dots + w_n f_{En} \quad (4)$$

式中  $w_E$  为暴露部位的局部热感觉对全身热感觉的影响权重。

由式(4)可知,影响因子与影响权重存在确定的函数关系,暴露部位对全身热感觉的影响因子可表示为身体各个部位热感觉的影响权重与暴露部位对身体各个部位热感觉的影响因子之积的累加。

根据以上推导,提出基于影响因子的分析方法研究局部热暴露条件下局部热感觉对全身热感觉的影响,其步骤如下:

1) 应用式(2)得到暴露部位对全身热感觉的影响因子。

2) 应用式(3)得到暴露部位对其他身体部位热感觉的影响因子。

3) 基于影响因子应用式(4)得到身体各个部位对全身热感觉的影响权重。

### 3.4 局部热感觉对全身热感觉的影响因子

图4为房间温度为28℃时脸部热暴露的实验结果,图中的热感觉变化值指暴露期的稳态均值与适应期的稳态均值之差。由图4可知,拟合直线与实测数据点吻合较好( $R^2=0.90$ ),斜率为0.60,也即脸部对全身热感觉的影响因子为0.6。另外,3种作用温度下脸部的影响因子并未发生明显的变化,影响因子与局部送风作用温度无关。

图5给出了3种房间温度下脸部热暴露的实验结果。由图可知,全身热感觉的变化与脸部热感觉的变化呈现较好的线性关系( $R^2=0.92$ ),脸部对全身热感觉的影响因子不随房间温度的变化而

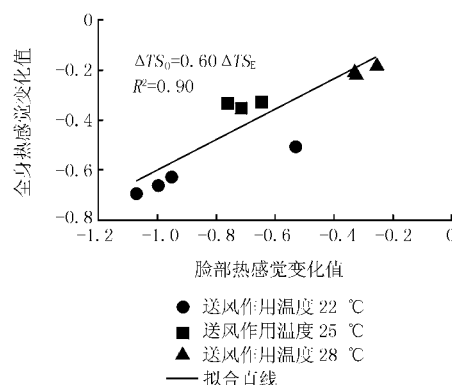


图4 脸部热感觉对全身热感觉的影响因子(房间温度28℃)

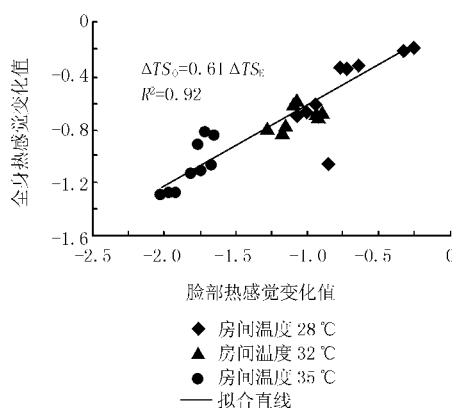


图5 脸部热感觉对全身热感觉的影响因子(房间温度28,32,35℃)

变化,近似等于0.61。

同理分析胸部和背部的影响因子,得到相似的结果,也即影响因子与房间温度和局部送风作用温度无关。胸部和背部对全身热感觉的影响因子分别为0.47和0.45。

### 3.5 局部热感觉对身体其他部位热感觉的影响因子

用同样方法分析暴露部位对身体其他部位热感觉的影响因子可知,影响因子不随房间温度和局部送风作用温度的变化而变化,其结果见表3。

表3 暴露部位对身体其他部位热感觉的影响因子

| 暴露部位 | 脸部热感觉 | 胸部热感觉 | 背部热感觉 | 下半身热感觉 |
|------|-------|-------|-------|--------|
| 脸部   | 1.00  | 0.54  | 0.57  | 0.43   |
| 胸部   | 0.16  | 1.00  | 0.40  | 0.31   |
| 背部   | 0.18  | 0.30  | 1.00  | 0.30   |

由表3可知,相对于胸部和背部热暴露,脸部热暴露对身体其他部位热感觉的影响更大。胸部热暴露对背部热感觉的影响与背部热暴露对胸部热感觉的影响相近,而胸部和背部热暴露对脸部热



感觉的影响明显小于脸部热暴露对胸部和背部热感觉的影响。

### 3.6 局部热感觉对全身热感觉的影响权重

假定不同暴露条件下,身体各个部位对全身热感觉的影响权重保持不变,根据式(4)和身体所有部位影响权重之和为 1 的条件关系式,可列出以下方程组:

$$\left. \begin{aligned} w_1 + 0.54w_2 + 0.57w_3 + 0.43w_4 &= 0.61 \\ 0.16w_1 + w_2 + 0.4w_3 + 0.31w_4 &= 0.47 \\ 0.18w_1 + 0.3w_2 + w_3 + 0.3w_4 &= 0.45 \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $w_1, w_2, w_3$  和  $w_4$  分别为脸部、胸部、背部和下半身对全身热感觉的影响权重。

求解方程组得到唯一解为  $w_1 = 0.21, w_2 = 0.24, w_3 = 0.25, w_4 = 0.30$ 。

脸部对全身热感觉的影响权重为 0.21,而脸部对全身热感觉的影响因子却高达 0.61,其原因就在于脸部热暴露在改变脸部热感觉的同时,也在很大程度上改变了身体其他部位的热感觉,致使其他部位的影响权重与脸部的影响权重共同发挥作用,综合形成对全身热感觉的较大影响。

### 3.7 全身热感觉的预测模型

局部热暴露条件下基于影响因子的全身热感觉预测模型为

$$TS_O = f_{EO}(TS_E - TS_{EO}) + TS_{EO} \quad (6)$$

式中  $TS_{EO}$  和  $TS_E$  分别为暴露前全身热感觉和暴露部位热感觉的初始状态;  $TS_E$  为暴露达到稳定后暴露部位热感觉的稳态反应。

与基于影响权重的全身热感觉预测模型(式(1))相比可知,式(1)同时适用于脸部、胸部或背部热暴露情况,而式(6)中的影响因子与暴露部位相关,故仅适用于相应部位暴露的情况。应用影响权重进行预测需已知所有身体部位的局部热感觉,而应用影响因子进行预测只需给出暴露前的初始热状态和暴露达到稳定后暴露部位的热感觉,故后者在实际应用中更方便、更直接。

用式(1)和式(6)预测各个实验工况下的全身热感觉,并与实测值进行了对比,结果见图 6, 7。由图 6, 7 可知,预测值与实测值吻合得较好,影响因子和影响权重很好地反映了局部热暴露条件下局部热感觉对全身热感觉的影响。

应用基于影响因子的预测模型对 3 种房间温

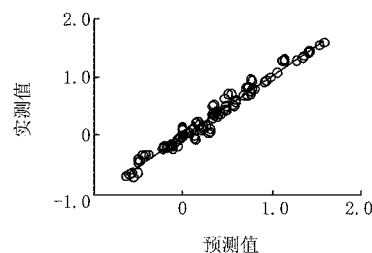


图 6 基于影响因子的全身热感觉预测模型的检验

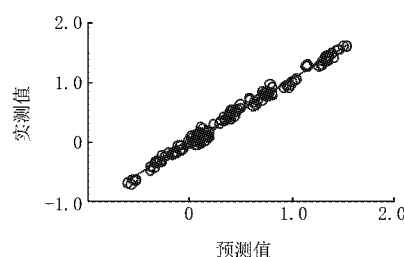


图 7 基于影响权重的全身热感觉预测模型的检验

度下脸部热暴露的全身热感觉反应进行预测(见图 8)可知,同一房间温度下,全身热感觉随脸部热感觉投票值的降低而线性递减;不同房间温度下,全身热感觉随脸部热感觉的变化关系可用一组平行的直线来表示。

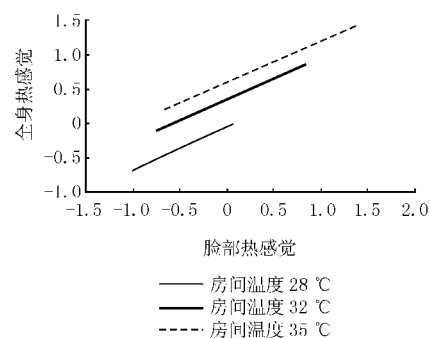


图 8 不同房间温度下全身热感觉随脸部热感觉的变化

### 3.8 局部热感觉对全身热感觉的影响随时间的变化

局部热感觉对全身热感觉的影响因子随暴露时间的变化如图 9 所示。从图中可以看出,影响因子随时间有显著的变化,暴露初期较小,其后逐渐增大,20 min 后趋于稳定。

利用式(6)及图 9 结果可预测全身热感觉的逐时变化。以房间温度 35 °C、送风作用温度 22 °C 的脸部热暴露情况为例,全身热感觉逐时变化的预测值与实测值如图 10 所示,二者吻合得较好。

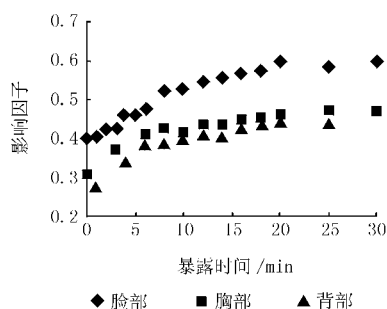


图9 局部热感觉对全身热感觉的影响因子随暴露时间的变化

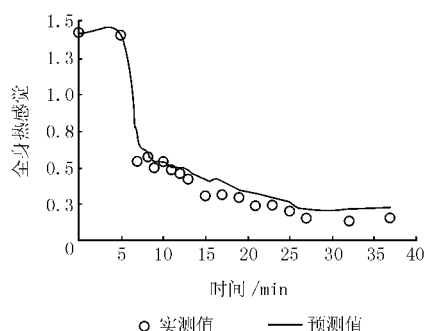


图10 全身热感觉逐时变化的预测值与实测值

## 4 讨论

### 4.1 不同影响权重研究结果的比较

本文的实验结果表明,暴露部位对全身热感觉的影响权重与房间温度和局部送风作用温度无关,为一定值,且三个暴露部位的影响权重相差不大。这与 Zhang 和李俊的研究结果<sup>[3-4]</sup>有所不同,其原因可能有以下几方面。

1) 分析方法不同。李俊在研究中采用多元线性回归的分析方法<sup>[4]</sup>,据本文的分析可知,多重共线性和自相关的存在可能导致多元线性回归结果的不合理。

2) 暴露特性不同。本文的胸部暴露仅指腹部以上部位的暴露,而 Zhang 在研究中将胸部和腹部的同时暴露视为胸部暴露。本文仅就单一部位进行局部热暴露,而李俊的研究对象是多部位同时暴露。本文采用局部气流的暴露方式,而 Zhang 的研究为热传导方式。本文研究的局部暴露强度适中,而 Zhang 的研究中暴露强度较大。暴露面积、方式和强度的不同可能造成研究结果间的差异。

3) 分析对象不同。本文将稳态反应和动态反应分别加以研究,并指出动态反应与稳态反应的不同,而 Zhang 的研究将二者综合起来进行研究。

### 4.2 局部热感觉影响全身热感觉的生理机制探讨

以往的研究已在热感觉与生理热调节反应之间建立了联系,沿此思路,本文对局部热暴露条件下人体生理热调节反应的特点进行初步考察。

局部热暴露对全身的生理热调节反应有显著影响,如果人体只有一部分受到刺激,在全身(生理热调节)反应来看,如同这一刺激平均地分布到全身表面一样,可以观察到类似的全身反应<sup>[8]</sup>。大量研究证实局部热暴露可在很大程度上缓解全身的生理紧张程度<sup>[9-13]</sup>。另外,暴露部位与非暴露部位之间在生理热调节反应上存在相互影响。处在温暖环境中的人把手伸进冷水中时几乎不出现血管收缩,处在寒冷环境中的人把手伸进温水中也不出现手的血流量增加<sup>[14-16]</sup>。体内血液循环系统可将其身体部位的热量传送到冷却区域<sup>[11,13,18]</sup>,这可能促成了各部位间生理热调节反应的相互影响。以上生理现象与实验得到的热感觉反应存在一定的相似性,生理热调节反应的改变可能是热感觉发生变化的生理机制,各部位间借助于血液循环系统的体内传热<sup>[18-19]</sup>可能是局部热感觉影响其他部位和全身热感觉的内在原因。

另据本文实验结果可知,相对于胸部和背部,脸部对全身热感觉的影响因子较大,脸部在生理热调节方面所具有的独特性为此提供了可能的解释。

文献<sup>[20]</sup>指出,人体皮肤表面温度和核心温度对热感觉的影响比率约为 1:1,也即核心温度对热感觉的影响与皮肤温度相同。在脸部热暴露条件下,冷风吹过脸部,通过呼吸体内核心温度可迅速降低,这是脸部热暴露对全身热感觉有较大影响的重要原因之一。另外,正常的头部皮肤温度比其他身体部位高<sup>[20]</sup>,头皮缺乏缩血管神经,即使在寒冷的环境中,头皮血管仍然是扩张的<sup>[19]</sup>,再加上脸部的表皮血管分布丰富<sup>[9]</sup>,这些特征使得脸(头)部成为身体最为有效的散热器<sup>[23]</sup>,相比其他部位,通过脸部冷却可以更大程度地缓解全身的生理紧张程度<sup>[22-23]</sup>,这也可能是脸部热感觉对全身热感觉的影响因子较大的内在原因。

## 5 结论

5.1 基于非暴露部位热感觉随局部热暴露发生显著变化的实验现象,提出基于影响因子的分析方法。

5.2 稳态条件下,局部热感觉对全身热感觉的影

响因子和影响权重与房间温度和局部送风作用温度无关。

5.3 分别基于影响因子和影响权重得到全身热感觉的预测模型,模型的预测值与实验实测值吻合得较好。

5.4 局部热感觉对全身热感觉的影响因子随时间有显著变化,暴露初期较小,随后逐渐增大至稳态值并保持不变。基于不同时刻的影响因子可预测全身热感觉的动态变化过程。

5.5 通过血液循环系统的体内传热可能是局部热感觉影响身体其他部位和全身热感觉的内在原因。脸部特殊的生理热调节特征为脸部具有较大的影响因子提供了可能的解释。

#### 参考文献

- [1] Ingersoll J G, Kalman T G, Maxwell L M, et al. Automobile passenger compartment thermal comfort model—part II: human thermal comfort calculation [G] // SAE Technical Paper Series, No 920266, 1992: 1-11
- [2] Hagino M, Hara J. Development of a method for predicting comfortable airflow in the passenger compartment[G]//SAE Technical Paper Series, No 922131, 1992: 1-10
- [3] Zhang H. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments[D]. Berkeley: University of California, 2003
- [4] 李俊. 个体送风特性及人体热反应研究[D]. 北京: 清华大学, 2004
- [5] Wyon D P[丹麦]. 室内环境研究的方法论[J]. 张宇峰, 译. 暖通空调, 2006, 36(5): 51-54
- [6] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [7] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001
- [8] McIntyre D A. Indoor climate [M]. London: Applied Science Publishers LTD, 1980
- [9] 欧阳骞. 国外水冷服装装备的发展概况[J]. 军队卫生, 1981(3): 75-85
- [10] Shvartz E. Efficiency and effectiveness of different water-cooled suited—a review [J]. Aerospace Medicine, 1972, 43(5): 488-491
- [11] Burch G E, Sodeman W A. Effect of cooling isolated parts upon the comfort of man resting in hot humid environment[J]. Pro Soc Exptl Bio Med, 1944, 55: 190-194
- [12] Kaufman W C, Pittman J C. A simple liquid transport cooling system for aircrew members[J]. Aerospace Medicine, 1966, 37(12): 1239-1243
- [13] Armand J G, Abraham Z. Effect of partial body cooling on man exercising in a hot, dry environment [J]. Aerospace Medicine, 1968, 39(12): 944-946
- [14] Bader M E, Mead J. The effect of local cooling of the finger and wrist during exposure to high ambient temperature[J]. Federation Proceedings, 1949, 8: 6-7
- [15] Hellon R F. Local effects of temperature[J]. British Med Bulletin, 1963, 19: 141-144
- [16] Rapaport S I, Fetcher E S, Shaub H G, et al. Control of blood flow to extremities at low ambient temperatures [J]. J Appl Physiology, 1949, 2: 61-71
- [17] Melikov A K, Arakelian R S, Halkjaer L, et al. Spot cooling part 1: human responses to cooling with air jets[G]//ASHRAE Trans, 1994, 100(2): 476-499
- [18] 邱初之. 环境高温与热损伤[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2000
- [19] Williams B A, Shitzer A. Modular liquid-cooled helmet liner for thermal comfort [J]. Aerospace Medicine, 1974, 45(9): 1030-1036
- [20] Christian F B, Steven M F, Srinivasa N R, et al. Relative contribution of core and skin temperatures to thermal comfort in humans[J]. Journal of Thermal Biology, 2000, 25(1/2): 147-150
- [21] Hertzman A B. Vasomotor regulation of cutaneous circulation[J]. Physiol Rev, 1959, 39: 280-306
- [22] Kissen A T, Hall J F, Klemm F K. Physiological responses to cooling the head and neck versus the trunk and leg areas in severe hyperthermic exposure [J]. Aerospace Medicine, 1971, 42(8): 882-888
- [23] Nunneley S A, Maldonado R J. Head and/or torso cooling during simulated cockpit heat stress [J]. Aviat Space Environ Med, 1983, 54(6): 496-499