

多种局部供冷方式下人体热反应特性

李念平[†], 李娜, 何颖东, 何梅玲, 李甲, 颜金波, 谭畅
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:研究了热湿环境中不同局部供冷方式(辐射、传导、对流)下人体热反应特性. 通过在热湿室内环境的试验房间内试验, 收集人体主观反应数据, 分析不同局部供冷方式对人体局部与整体产生的舒适效果差异. 试验结果表明, 在热湿环境中不同局部供冷方式作用下受试者达到稳定状态所需时间不同, 局部对流供冷小于 5 min、局部传导供冷 10 min、局部辐射供冷 20 min 后受试者可达到稳定. 对照组中对整体热反应影响程度较大的身体部位为颈部、大腿、背部; 而在不同局部供冷作用下, 对整体热反应影响最大的部位发生变化, 变为被直接冷却的身体部位, 分别为上臂(辐射)、前臂(传导)及头部(对流). 根据热舒适投票值进行回归分析, 环境温度低于 27.55 °C 时, 局部辐射供冷方式最优; 27.55~28.96 °C 时, 局部对流供冷方式最优; 高于 28.96 °C 时, 局部传导供冷方式最优.

关键词:热感觉; 热舒适; 局部供冷

中图分类号: TU831.4

文献标志码: A

Human Thermal Responses with Various Local Cooling Methods

LI Nianping[†], LI Na, HE Yingdong, HE Meiling, LI Jia, YAN Jinbo, TAN Chang
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper studies the thermal responses of human subjects with different local cooling methods (radiation, conduction and convection) in hot-humid environments. Through experiments in the hot-humid environments in the experimental room, the data of subjective feelings were collected and the different effects generated by different local cooling methods on the local and overall thermal comfort were then analyzed. The obtained results showed that the time before subjects reached static-state condition differed with different local cooling: the time was less than 5 minutes with local convective cooling; the time was 10 minutes with conductive cooling and 20 minutes with local radiant cooling. In the reference condition, necks, legs and backs exerted large effects on overall subjective responses. When local cooling was applied, the local body parts which exerted large effects were those which were locally cooled directly, like upper-arms (local radiation), lower-arms (local conduction) and heads (local convection). Moreover, according to the regression results of the thermal comfort vote at 26/28/30 °C, it is the best to choose local radiant cooling when the ambient temperature is lower than 27.55 °C, local convective cooling with the ambient temperature at 27.55~28.96 °C, and local conductive cooling with the ambient temperature higher than 28.96 °C, respectively.

Key words: thermal sensation; thermal comfort; local cooling

* 收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878225), National Natural Science Foundation of China(51878225)

作者简介: 李念平(1962—), 男, 湖南邵阳人, 湖南大学教授, 博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: linianping@126.com

在现代生活中,舒适的建筑环境能够减少居住者病态建筑综合症的频率,并提高受试者的工作效率^[1].但是采用常规空调系统时,即使温湿度在舒适区间内,仍然不能满足人们对舒适性的要求^[2].为确保居住者的热舒适性,建筑空调系统的能耗不断上升.因此,为了同时确保舒适性及节能性^[3],需要高效和创造性的低能耗供冷技术^[4].以往的研究指出,人体不同部位对冷热刺激的敏感性不同^[5],冷热感觉程度也不同^[6].有研究表明,局部供冷使得提供更少的冷量就能产生显著的舒适效果,同时能耗也相应地降低^[3].Williams等^[7]、Melikov等^[8]、Brooks等^[9]均通过研究表明局部加热或冷却可以提高受试者对热环境的接受度.

Zhang^[10]在对人体进行局部刺激的试验中发现,胸部、背部和臀部等局部热感觉,对整体热感觉影响权重较大,而手和脚的影响权重较小.李俊^[11]通过研究发现,在局部对流供冷中头颈部对整体热感觉的影响权重最大,上半身次之,下半身最小.根据传热原理,局部供冷方式可分为辐射、传导和对流三种.对于局部对流供冷,王月梅^[12]研究表明,胸部送风供冷方式可以降低人体热感觉,显著升高人体热舒适,且热不满意度可降低至15%以下.对于局部传导供冷,张宇峰等^[13]研究得出,一定环境温度下热可接受度是环境温度的线性函数,应用可变温座椅90%可接受的温度范围可达16.0~28.9℃.对于局部辐射供冷,何颖东、何梅玲等人^[14-15]通过试验研究了高温环境下工位辐射空调末端装置的热舒适性,结果表明,局部辐射供冷显著降低了人体热感觉、增加了受试者的舒适性,但受试者仍希望有更高的风速.因此李念平、贺德等^[16]又研究了热湿环境中辐射空调末端加桌面风扇供冷方式下的人体热舒适特性,发现多种局部供冷方式共同作用下受试者能适应更高的温度.

然而现有的研究很少对比多种局部供冷方式(辐射、传导及对流)的差异,尤其是很少涉及局部供冷时的人体局部热感觉、热舒适及其对整体热感觉、热舒适的影响.为研究不同局部供冷方式在热湿环境中对人体热舒适的作用差异,本文通过试验研究偏离舒适区环境中受试者的整体及局部热感觉与热舒适,研究不同局部供冷方式对扩展舒适温度区间的作用;根据受试者在不同局部供冷作用下的热舒适状况,建立多种局部供冷方式的作用模型,并研究不同局部供冷方式的适宜作用温度区间.

1 试验概述

1.1 试验房间及设备仪器

试验在湖南大学建筑节能与绿色建筑研究中心的人工环境试验室内进行.如图1所示,试验房间尺寸为4.3 m×2.7 m×3.0 m,为避免北面窗户对试验造成影响,在窗户室内面覆盖了约40 mm厚的保温板.局部辐射供冷及局部传导供冷均由室内一套工位辐射空调末端实现(冷板传热系数为8.68 W/(m²·℃)),而局部对流供冷设备为桌面风扇.试验房间详细描述参见文献[16],环境参数测点(位于房间中心)及辐射板面温度测点位置如图1所示.在该试验中所使用的仪器及其测量范围见表1.主要测量的参数为室内温湿度、黑球温度、室内风速、辐射板温度、供回水温度及流量.测点各传感器距地面高度设置:温湿度计距地面0.1 m、0.6 m、1.1 m;风速传感器距地面0.6 m;黑球温度传感器距地面0.6 m.

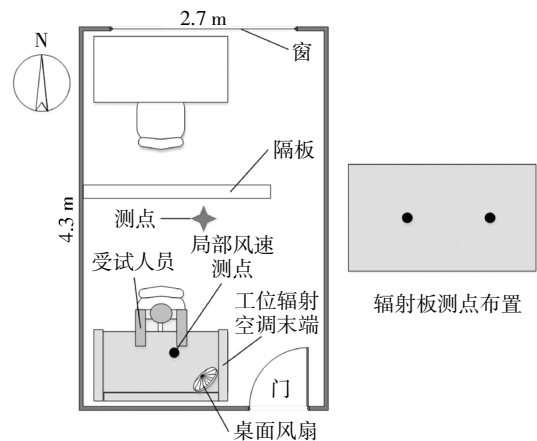


图1 试验房间及测点布置

Fig.1 The layout of experimental room and measurement points

表1 试验仪器及测量范围

Tab.1 Experimental instruments and measuring range

测量项目	试验仪器	测量范围	仪器精度
室内温度	TR-72i 温湿度测试仪	0~50 ℃	±0.3 ℃
室内湿度	TR-72i 温湿度测试仪	10%~95%RH	±5%
黑球温度	TR-102 黑球温度测试仪	0~50 ℃	±0.2 ℃
室内风速	TSI8347 热式风速仪	0~20 m/s	±3%
辐射板温度	贴片式铂电阻 PT100		±1%
无纸记录仪	16 通道无纸记录仪		

试验过程中所开启的辐射板分为前辐射板和桌面板,分别实现局部辐射供冷和局部传导供冷.辐射板板面温度比露点温度高1~1.5℃;其他未开启的辐

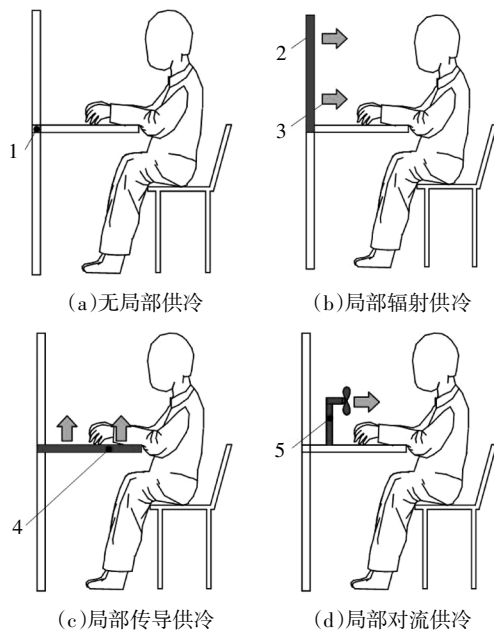
射板板面温度与环境空气温度相同(辐射板板面温度及环境温度设定具体见表2)。何梅玲等人^[15]研究了桌面风扇作用下人体热舒适性,发现最佳局部风速为1.5 m/s。因此,采用局部对流供冷方式时,调节桌面风扇使之靠近受试者头部和胸部的局部风速为1.5 m/s。本试验共设置了4种供冷方式。

表2 试验工况

Tab.2 Experimental conditions

工况	局部供冷方式	供冷末端	室内温度/℃	相对湿度/%	局部风速/(m·s ⁻¹)	辐射板温度/℃
1	无局部供冷	无	26	60~70	—	—
2	无局部供冷	无	28	60~70	—	—
3	无局部供冷	无	30	60~70	—	—
4	局部辐射供冷	前辐射板	26	60~70	—	21
5	局部辐射供冷	前辐射板	28	60~70	—	22
6	局部辐射供冷	前辐射板	30	60~70	—	23
7	局部传导供冷	桌面板	26	60~70	—	21
8	局部传导供冷	桌面板	28	60~70	—	22
9	局部传导供冷	桌面板	30	60~70	—	23
10	局部对流供冷	桌面风扇	26	60~70	1.5	—
11	局部对流供冷	桌面风扇	28	60~70	1.5	—
12	局部对流供冷	桌面风扇	30	60~70	1.5	—

方式1:无局部供冷(如图2(a)所示);方式2:局部辐射供冷,开启前辐射板(如图2(b)所示);方式3:局部传导供冷,开启桌面板(如图2(c)所示);方式4:局部对流供冷,开启桌面风扇(如图2(d)所示)。



1—辐射空调末端;2—前辐射板;3—传热方向;4—桌面板;5—桌面风扇

图2 局部供冷方式示意图

Fig.2 The schematic diagram of local cooling

1.2 受试者

根据本试验对受试人员的要求:1)在夏热冬冷地区生活超过1年;2)身体健康,精神良好;3)参加试验前未进食刺激性食物,共邀请16位人员(男、女各8位)作为受试者参与试验。受试者年龄(22±1.65)岁,身高(161±3.15)cm(8名女生)、(173±5.45)cm(8名男生),体重(50±8.73)kg(8名女生)、(62±5.19)kg(8名男生),服装热阻(0.46±0.09)clo^[17]。

1.3 试验工况

本试验均在湿度60%~70%,温度分别为26℃、28℃、30℃的环境下进行,共12个工况。为防止冷却面结露,水冷板表面温度应高于露点温度1~1.5℃^[18]。因此,在室内温度为26℃、28℃、30℃时,水冷板的表面温度分别设定为21℃、22℃、23℃。设计工况中各试验参数的设定见表2。

1.4 试验流程及问卷

如图3所示,试验共50min:在开始试验前,受试者在环境温度为26℃左右的准备室停留10min,并填写性别、年龄、身高、体重、着装等背景资料;在试验过程中,受试者共需填写5份问卷,填写时间分别为试验开始0min、10min、20min、30min、40min。

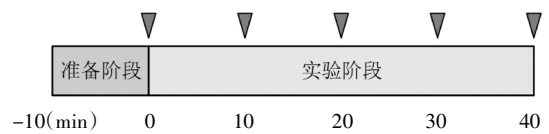


图3 试验流程

Fig.3 Experimental procedure

本试验中间卷包括受试者整体与局部的热感觉、热舒适,其中受试者12个局部分别为:头部、颈部、胸部、腹部、背部、臀部、上臂、前臂、手掌、大腿、小腿、足部。热感觉投票(Thermal Sensation Vote, TSV)及热舒适投票(Thermal Comfort Vote, TCV)均采用7等级衡量标准,热感觉及热舒适投票尺度划分等级见表3。

表3 热感觉及热舒适投票划分等级

Tab.3 Scales of thermal sensation and thermal comfort

等级	热感觉	热舒适
3	非常热	非常舒适
2	热	舒适
1	有点热	有点舒适
0	不冷不热	没感觉
-1	有点冷	有点不舒适
-2	冷	不舒适
-3	非常冷	非常不舒适

2 试验结果

试验结果会存在一定的随机误差,应用S-W检验(Shapiro-Wilk test)^[19],对试验得到的个体投票值进行统计分布检验,发现所有工况下的投票近似服从正态分布.在分析检验了试验数据独立性和正态性的前提下,本文应用统计方法对试验结果进行分析和整理.

2.1 动态热反应

2.1.1 动态热感觉

如图4所示,在无局部供冷时,除了环境温度为26℃的工况,受试者整体热感觉平均投票值最终均高于+0.8;在30℃时,热感觉投票值最后超过了+1.3.在局部辐射供冷方式下,室内温度为26℃、28℃及30℃时,受试者整体热感觉投票值最终分别接近0、+0.4及+0.6.在局部传导供冷方式下,室内温度为26℃、28℃及30℃时,受试者热感觉投票值最终分别达到0、+0.1及+0.4左右.在局部对流供冷方式下,室内温度为26℃、28℃及30℃时,热感觉投票值最终分别稳定在-0.4、0及+0.7左右.显然,在26℃、28℃时,局部对流供冷方式冷却作用最强;但在30℃时,冷却作用最差.

当所有受试者连续三次平均投票值最大差异不超过0.2时,认为受试者的主观热反应达到稳定.在室温为26℃、28℃或30℃,局部对流供冷作用下,受试者热感觉最快达到稳定;局部传导供冷作用10min后,受试者整体热感觉达到稳定;而局部辐射供冷需作用20min后,受试者热感觉才达到稳定.

2.1.2 动态热舒适

如图5所示,对照组中,在26℃时,受试者舒适投票值在0左右;在28℃、30℃时,受试者平均热舒适投票值始终处在不舒适侧(分别为-0.7、-1.2左右).在局部辐射供冷方式下,室内温度为26℃、28℃及30℃时,受试者热舒适投票值最终分别稳定在+1.5、+0.7及-0.3左右.在局部传导供冷方式下,室内温度为26℃、28℃及30℃时,整体热舒适投票值均大幅度上升,最终分别接近+1.0、+0.9及+0.2.在局部对流供冷方式下,室内温度为26℃、28℃及30℃时,受试者热舒适投票值最终分别达到-0.1、+1.0及-0.4左右.相比于对照组,使用局部供冷后,除26℃时使用局部对流方式导致受试者整体热舒适下降,其他工况下受试者热舒适均得到改善.在26℃、28℃及30℃时,受试者热舒适的改善效果最明显的分别是局部辐射、局部对流及局部传导.

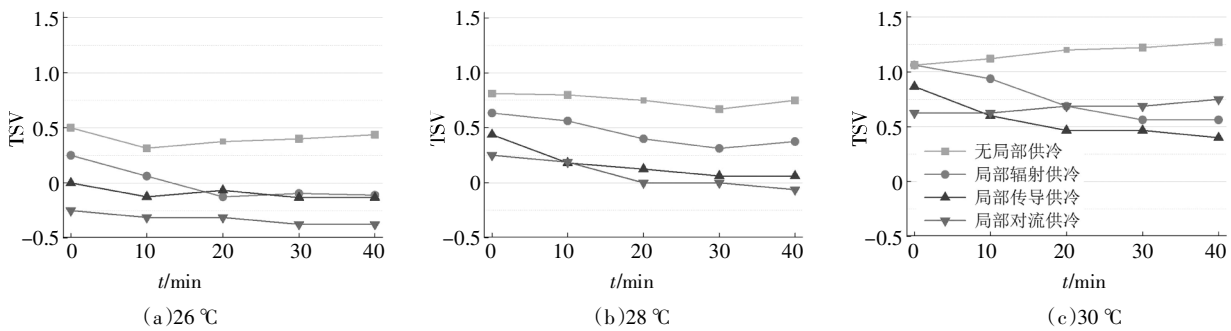


图4 整体动态热感觉

Fig.4 Dynamic-state overall thermal sensation

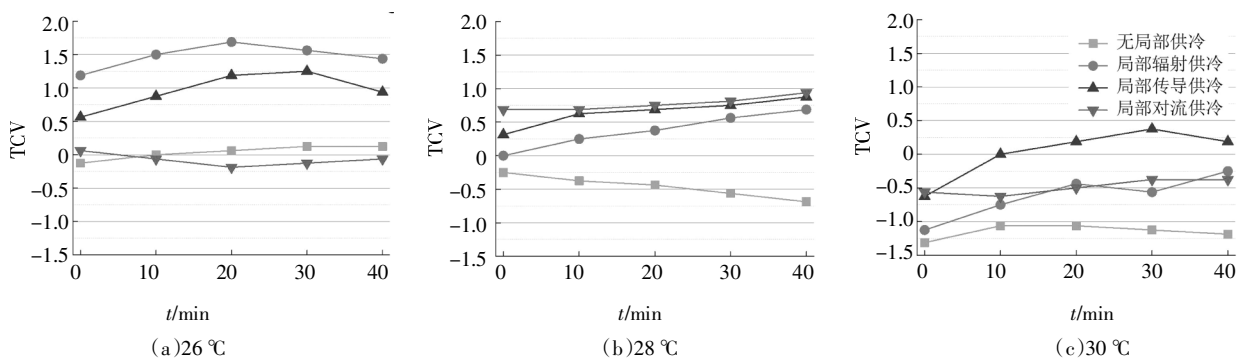


图5 整体动态热舒适

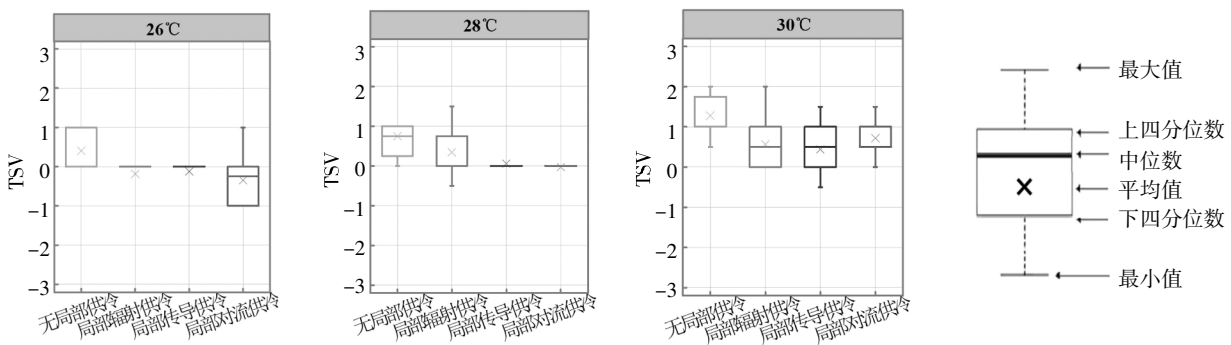
Fig.5 Dynamic-state overall thermal comfort

2.2 稳态热反应

为进一步研究不同局部供冷方式下受试者热反应特性,以最后2份问卷(即第30 min和40 min所填两份问卷)的平均值作为稳态数据进行分析,主要包括整体热感觉及热舒适的投票分布、整体主观反应与温度的关系、整体与局部主观反应的关系。

2.2.1 稳态整体热感觉

如图6所示,相比无局部供冷工况,采用局部供冷方式后受试者的稳态整体热感觉均有下降。在26℃时,三种局部供冷方式使热感觉集中于中性(0)附近,且相比无局部供冷的对照组均有显著差异(配对样本T检验, $P < 0.05$)。在28℃时,局部传导、对流供冷作用下受试者整体热感觉显著降低($P < 0.05$),并集中于中性;局部辐射供冷作用下热感觉投票值虽有所下降,但无显著性差异($P > 0.05$)。在30℃时,相比无局部供冷工况,三种局部供冷方式使整体热感觉集中于0~+1之间,且均产生显著差异($P < 0.05$)。除26℃局部对流供冷下热感觉投票值的标准差为0.66,28℃对照组中为0.71,其余工况下均低于0.5。



注:四分位数即将所有数值按大小顺序排列并分为四等份,处于三个分割点位置的数就是四分位数。

图6 整体稳态热感觉

Fig.6 Static-state overall thermal sensation

2.2.2 整体热感觉与操作温度的关系

根据3个环境温度下试验的结果,采用线性拟合的方法对人体热感觉(TS)与操作温度(operative temperature, T_{op})的关系进行了研究^[20]。

线性拟合结果如下:

$$\text{对照: } TS = 0.213T_{op} - 5.13, R^2 = 0.961; \quad (1)$$

$$\text{辐射: } TS = 0.168T_{op} - 4.45, R^2 = 0.867; \quad (2)$$

$$\text{传导: } TS = 0.153T_{op} - 4.17, R^2 = 0.965; \quad (3)$$

$$\text{对流: } TS = 0.272T_{op} - 7.52, R^2 = 0.830. \quad (4)$$

计算得到当热感觉达到热中性(即 $TS = 0$)时,不同供冷方式下的操作温度分别为:24.08℃(对照)、26.75℃(辐射)、27.22℃(传导)、27.69℃(对流),采用局部对流供冷的中性温度最高。而上述等式中的斜率也反映了在局部不同供冷方式受试者对高温环境的适应性,斜率越低,在同样的温度上升程度时受试者越不容易感觉热。由式(1)~(4)可知,局部传导供冷方式下受试者热适应性最强,局部辐射供冷次之,局部对流供冷、对照组最弱。

近,且相比无局部供冷的对照组均有显著差异(配对样本T检验, $P < 0.05$)。在28℃时,局部传导、对流供冷作用下受试者整体热感觉显著降低($P < 0.05$),并集中于中性;局部辐射供冷作用下热感觉投票值虽有所下降,但无显著性差异($P > 0.05$)。在30℃时,相比无局部供冷工况,三种局部供冷方式使整体热感觉集中于0~+1之间,且均产生显著差异($P < 0.05$)。除26℃局部对流供冷下热感觉投票值的标准差为0.66,28℃对照组中为0.71,其余工况下均低于0.5。

2.2.3 局部与整体热感觉的回归模型

如图2所示,在不同局部供冷方式下,受试者被冷却局部不同。在局部辐射供冷方式下,被冷却局部为头部、颈部、胸部、上臂、前臂及手掌;在局部传导供冷方式下,被冷却局部为前臂及手掌;在局部对流供冷方式下,被冷却局部为头部、颈部、上臂、前臂及手掌。为分析三种局部供冷方式下身体局部热感觉对整体热感觉的影响程度,本文采用逐步回归法进行拟合分析^[21]。

拟合方程如下:

$$OTS = \sum C_i LTS_i + C_0. \quad (5)$$

式中:OTS为整体热感觉(Overall Thermal Sensation, OTS); LTS_i 为部位*i*的局部热感觉(Local Thermal Sensation, LTS); C_i 为部位*i*的拟合系数; C_0 为拟合常数。

拟合结果见表4,无局部供冷时,大腿、背部及头部等部位对受试者整体热感觉影响程度较大,稍弱

表 4 局部与整体热感觉的拟合结果

Tab.4 Regression results of LTS and OTS

部位	无局部供冷		局部辐射供冷		局部传导供冷		局部对流供冷	
	系数	显著性	系数	显著性	系数	显著性	系数	显著性
头部	0.238	0.053	0.352	0.047			0.488	0.000
颈部	0.541	0.001			0.598	0.000	0.260	0.019
胸部								
背部	0.255	0.008						
腹部								
臀部								
上臂			0.534	0.002	0.189	0.012		
前臂			0.135	0.273	0.637	0.000	0.310	0.013
手掌								
大腿	0.276	0.006					0.435	0.000
小腿								
足部								
常系数	0.078	0.174	-0.045	0.464	0.050	0.202	-0.039	0.477
模型显著性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
调整 R ²	0.730	0.654	0.749	0.844				

于颈部. 在局部供冷作用下,对整体热感觉影响程度最大的身体部位分别为上臂(辐射)、前臂(传导)、头部及大腿(对流). 显然,与对照组相比,在局部供冷直接冷却的身体部位对整体热感觉影响最大,表明局部供冷改变了身体局部热感觉对整体热感觉的作

用大小. 在局部辐射、传导、对流供冷方式下同一被冷却局部对整体热感觉的影响程度也不同,前臂热感觉分别为较弱、最强、较强,头部热感觉分别为较强、可忽略不计、最强,颈部热感觉分别为可忽略不计、较强、较弱.

2.2.4 整体稳态热舒适

如图 7 所示,在 26 °C 时,局部辐射、传导供冷作用下热舒适投票值分别集中在+2、+1,相比无局部供冷有显著差异(P<0.05);局部对流供冷作用下受试者热舒适集中于-1,与对照组无显著差异(P>0.05). 在 28 °C 时,相比无局部供冷工况,三种局部供冷方式下受试者稳态整体热舒适集中于 0~+2 之间,且均产生显著差异(P<0.05). 在 30 °C 时,局部辐射、传导供冷方式下受试者热舒适显著提升(P<0.05),并集中于-1~+1 之间;局部对流供冷方式下,大部分受试者处于热不舒适状态(-1),无显著改善(P>0.05). 26 °C 对照组中受试者热舒适投票值的标准差为 1.29,其余工况下均低于 1.

2.2.5 整体热舒适与操作温度的关系

为了更好地研究不同局部供冷方式对人体热舒适的温度区间的影响,本文拟合了人体热舒适(TC)与操作温度(T_{op})的关系,结果如图 8 所示.

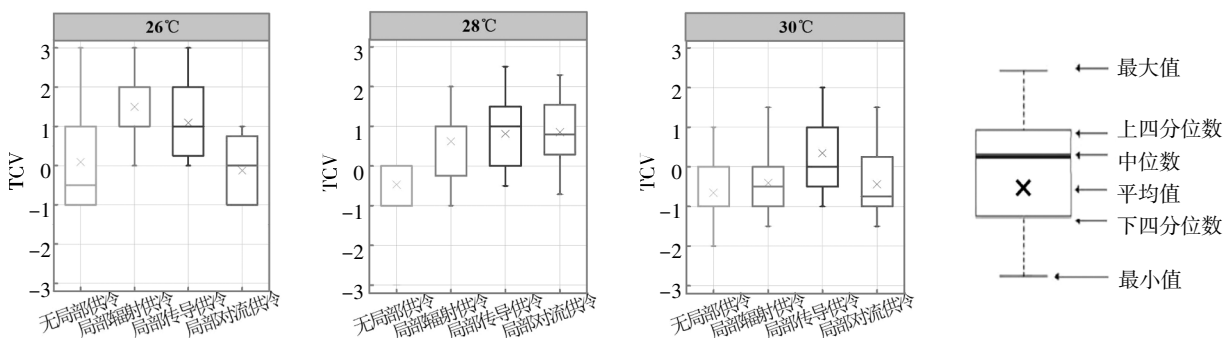
拟合结果如下:

对照: $TC = -0.322T_{op} + 8.41, R^2 = 0.996;$ (6)

辐射: $TC = -0.431T_{op} + 12.70, R^2 = 0.999;$ (7)

传导: $TC = -0.213T_{op} + 6.70, R^2 = 0.979;$ (8)

对流: $TC = -0.236T_{op}^2 + 13.18T_{op} - 183.03,$
 $R^2 = 0.979.$ (9)



注:四分位数即将所有数值按大小顺序排列并分为四等份,处于三个分割点位置的数就是四分位数.

图 7 整体稳态热舒适

Fig.7 Static-state overall thermal comfort

由式(9)可知,局部对流供冷方式下人体热舒适与操作温度并非线性关系,温度不高时(26℃),局部对流供冷会造成不适.根据式(6)~(9),计算当热舒适达到舒适性的下限(即TC=0)时,3组试验中各操作温度 T_{op} ,分别为:26.11℃(对照)、29.51℃(辐射)、31.52℃(传导)、26.24℃及29.59℃(对流).显然当受试者达到热舒适下限时, T_{op} (传导) $> T_{op}$ (对流温度上限) $> T_{op}$ (辐射) $> T_{op}$ (对流温度下限) $> T_{op}$ (对照).

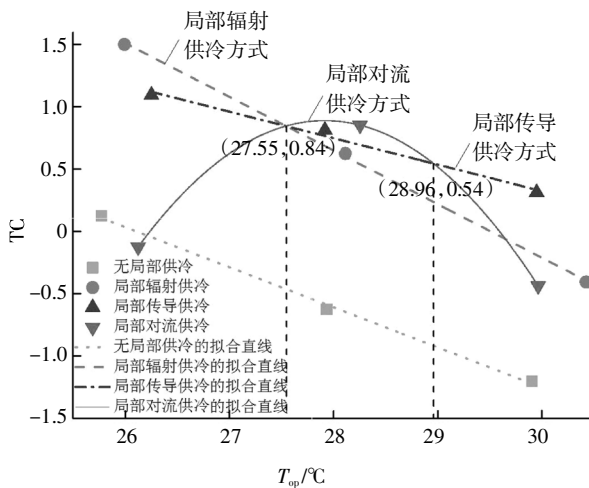


图8 热舒适与操作温度的关系

Fig.8 Relationship between thermal comfort and operative temperature

2.2.6 局部与整体热舒适的回归模型

本文通过建立以下拟合模型,分析研究受试者身体局部对整体热舒适的影响:

$$OTC = \sum C_i LTC_i + C_0 \tag{10}$$

式中:OTC为整体热感觉(Overall Thermal Comfort, OTC); LTC_i 为部位*i*的局部热感觉(Local Thermal Comfort, LTC).

拟合结果如表5所示,无局部供冷工况下,颈部、背部对受试者整体热舒适影响程度最大,大腿次之,臀部最弱.在局部辐射、传导、对流供冷方式下,对整体热舒适影响程度最大的身体部位分别为上臂、前臂、头部,与对整体热感觉起决定性作用的局部相同,表明局部供冷作用下被冷却局部对整体热舒适的影响最大.

表5 局部与整体热舒适的拟合结果

Tab.5 Regression results of LTC and OTC

部位	无局部供冷		局部辐射供冷		局部传导供冷		局部对流供冷	
	系数	显著性	系数	显著性	系数	显著性	系数	显著性
头部			0.234	0.179			0.575	0.000
颈部					0.148	0.233		
胸部			0.161	0.193				
背部	0.481	0.004						
腹部								
臀部	0.105	0.248			0.186	0.175		
上臂			0.494	0.007				
前臂					0.354	0.049		
手掌								
大腿	0.304	0.005					0.425	0.002
小腿								
足部					0.207	0.141		
常数	-0.116	0.031	0.052	0.556	0.124	0.292	-0.076	0.448
模型显著性	0.000		0.000		0.000		0.000	
调整R ²	0.619		0.815		0.611		0.780	

3 讨论

3.1 不同局部供冷适宜温度区间

根据ASHRAE标准55^[7],可接受的温度区间对应热感觉投票值为-0.5到+0.5.根据式(1)~(4),四组试验的可接受温度区间分别为21.73~26.42℃(对照)、23.78~29.72℃(辐射)、23.96~30.49℃(传导)、25.85~29.53℃(对流).局部传导供冷将可接受温度上限提高了近4℃,局部对流与辐射供冷方式的提高程度在3℃左右.

但以热舒适度为评价标准时,不同局部供冷适宜使用的温度区间不同.如图8所示,结合第2.2.5节的拟合回归结果, $T_{op} < 27.55$ ℃时,局部辐射供冷舒适度最高; 27.55 ℃ $< T_{op} < 28.96$ ℃时,局部对流供冷舒适度最高; $T_{op} > 28.96$ ℃时,局部传导供冷舒适度最高.该结果表明,为在偏热环境实现更高层次的舒适性,应根据周围温度选择适宜的局部供冷方式.

3.2 与现有研究对比

3.2.1 身体局部影响权重比较

本文2.2.3节的试验结果分析表明,相比于对照

组,采用局部供冷后受试者对整体热反应影响较大的部位产生变化,其中被冷却局部对整体热反应的作用大幅度增大;不同局部供冷方式会让同一被冷却局部产生对整体热反应不同的影响程度,如头部、颈部及前臂.而Zhang^[10]的研究表明影响权重较大的为胸部、背部和臀部等局部热感觉.李俊^[11]研究发现,在局部对流供冷中头颈部对整体热感觉的影响权重最大,上半身次之,下半身最小.本研究与Zhang和李俊的研究结果有一定差异,可能由供冷方式差异造成.本文采用了三种不同局部供冷方式刺激人体局部,而Zhang只采用局部传导供冷方式,李俊只采用局部对流供冷方式.与李俊相同,本文对人体多部位同时供冷,而Zhang对单一部位逐一进行局部供冷.Zhang的研究相比于本试验,供冷强度较大,而本试验所采用的供冷强度较为适中.供冷方式、部位、强度的不同可能导致局部对整体影响权重的不同.

3.2.2 热舒适比较

张宇峰等^[13]研究发现局部传导供冷可使受试者的热反应在11 min内达到稳定,与2.1.1节中分析得出的局部传导供冷时,受试者10 min内热反应达到稳定类似.如3.1节中所述,当环境温度在28℃左右时,局部对流供冷方式具有良好的舒适性,而且局部对流供冷方式的能耗远低于局部辐射及传导供冷方式.此外,研究表明过高的风速会产生局部过度冷却、气流感过强等问题,从而降低人体热舒适,受试者更倾向于较弱的气流^[12,15].当室内温度达到29℃以上时,局部对流供冷方式降低热感觉的效果已无法满足受试者热舒适的要求,此时需采用供冷效果更强的局部传导供冷方式.对于局部传导供冷方式,本文采用桌面板,文献[3]与文献[13]均采用可变温座椅作为局部传导供冷系统末端,直接吸收人体热量.然而,与局部对流供冷相似,当室内温度较低时,局部传导供冷会过度冷却人体导致热舒适度下降.因此在环境温度低于28℃时,应采用局部辐射供冷.文献[14]结合局部辐射+传导的供冷方式在热湿环境提高了人体舒适性,若能在实际应用中实现对两种局部供冷方式单独使用或共同使用的合理控制,则可在不同温度下实现较高的舒适性.

4 结论

1)在热湿环境中不同局部供冷方式作用下受试者达到稳定状态的速度不同:局部对流供冷下小于5 min,局部传导供冷下10 min,局部辐射供冷20 min可达到稳定.

2)不同局部供冷方式对热湿环境中受试者的热感降低程度亦不同,扩展的可接受温度区间分别为23.78~29.72℃(辐射)、23.96~30.49℃(传导)、25.85~29.53℃(对流).

3)相比于对照组,局部供冷通过影响受试者局部热反应,改变整体热反应的变化趋势,降低热感觉,改善热舒适.在局部供冷作用下,对整体热反应影响程度最大的身体部位分别为上臂(辐射)、前臂(传导)、头部及大腿(对流).

4)以舒适度为标准时,不同局部供冷方式有不同的适宜温度区间.室内温度低于27.55℃时,局部辐射供冷舒适度最高;室内温度为27.55~28.96℃时,局部对流供冷舒适度最高;室内温度高于28.96℃时,局部传导供冷舒适度最高.

参考文献

- [1] MELIKOV A K. Personalized ventilation [J]. *Indoor Air*, 2004, 14: 157—167.
- [2] IMANARI T, OMORI T, BOGAKI K. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system: comparison with the conventional all-air system [J]. *Energy and Buildings*, 1999, 30 (2): 167—175.
- [3] PASUT W, ZHANG H, ARENS E, *et al.* Energy-efficient comfort with a heated/cooled chair: results from human subject tests [J]. *Building and Environment*, 2015, 84: 10—21.
- [4] ZHANG Y F, WYON D P, FANG L, *et al.* The influence of heated or cooled seats on the acceptable ambient temperature range [J]. *Ergonomics*, 2007, 50(4): 586—600.
- [5] STEVENS J C, MARKS L E, SIMONSON D C. Regional sensitivity and spatial summation in the warmth sense [J]. *Physiology & Behavior*, 1974, 13(6): 825—836.
- [6] 丁千茹. 非均匀环境下局部热感觉对整体热反应的影响[D]. 大连:大连理工大学土木工程学院, 2008: 27—47.
DING Q R. Effect of local thermal sensation on human responses in non-uniform thermal environment [D]. Dalian: School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2008: 27—47. (In Chi-

- nese)
- [7] WILLIAMS B A, SHITZER A. Modular liquid-cooled helmet liner for thermal comfort [J]. *Aerospace Medicine*, 1974, 45(9): 1030—1036.
- [8] MELIKOV A K, ARAKELIAN R S, HALKJAER L. Spot cooling. Part 1: human responses to cooling with air jets [J]. *ASHRAE Transactions*, 1994, 100(2): 476—499.
- [9] BROOKS J E, PARSONS K C. An ergonomics investigation into human thermal comfort using an automobile seat heated with encapsulated carbonized fabric [J]. *Ergonomics*, 1999, 42(5): 661—673.
- [10] ZHANG H. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2003: 113—186.
- [11] 李俊. 个体送风特性及人体热反应研究[D]. 北京: 清华大学土木工程系, 2004: 63—81.
- LI J. Personalized ventilation characteristics and human thermal responses [D]. Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2004: 63—81. (In Chinese)
- [12] 王月梅. 胸部送风工位空调的局部送风参数范围研究[J]. *建筑科学*, 2015, 31(2): 29—33.
- WANG Y M. Study on the range of the local airflow parameters of the task ambient air conditioning with chest exposure [J]. *Building Science*, 2015, 31(2): 29—33. (In Chinese)
- [13] 张宇峰, 赵荣义. 座椅与人体接触表面最佳热流通量的试验研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(9): 1405—1408.
- ZHANG Y F, ZHAO R Y. Experimental determination of the optimal heat flow from a human body to a seat [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Sciences)*, 2007, 47(9): 1405—1408. (In Chinese)
- [14] HE Y D, LI N P, HE M L, *et al.* Using radiant cooling desk for maintaining comfort in hot environment [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 145: 144—154.
- [15] 何梅玲, 李念平, 何颖东, 等. 热湿工况下工位辐射空调的热舒适试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(4): 11—16.
- HE M L, LI N P, HE Y D, *et al.* Experimental analysis of thermal comfort in the hot-humid environment with radiant panel workstation [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2017, 39(4): 11—16. (In Chinese)
- [16] 李念平, 贺德, 何颖东, 等. 热湿环境工位辐射空调加桌面风扇热舒适试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(11): 198—204.
- LI N P, HE D, HE Y D, *et al.* Experimental study of thermal comfort with radiant cooling workstation and desktop fan in the hot-humid environment [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(11): 198—204. (In Chinese)
- [17] ANSI/ASHRAE 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2017: 3—14.
- [18] 徐征. 低温辐射供冷方式设计问题的探讨[C]//全国暖通空调制冷2006年学术年会文集. 北京:《暖通空调》编辑部, 2006: 108—115.
- XU Z. Discussion on the design of low temperature radiation cooling method [C]//Proceedings of National HVAC Refrigeration 2006 Academic Annual Conference. Beijing: Department of Journal of HV&AC, 2006: 108—115. (In Chinese)
- [19] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 169—189.
- LU W D. SPSS for Windows statistical analysis [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 169—189. (In Chinese)
- [20] HE Y D, LI N P, PENG J Q, *et al.* Field study on adaptive comfort in air conditioned dormitories of university with hot-humid climate in summer [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 119: 1—12.
- [21] HE Y D, LI N P, ZHANG W J, *et al.* Overall and local thermal sensation & comfort in air-conditioned dormitory with hot-humid climate [J]. *Building and Environment*, 2016, 101: 102—109.