

# 夏季空气流动对人体热舒适性的影响

谈美兰<sup>a,b</sup>, 李百战<sup>a,b</sup>, 李文杰<sup>a,b</sup>, 刘红<sup>a,b</sup>, 郑洁<sup>a,b</sup>, 许孟楠<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**为确定夏季高温环境下空气流动对人体热舒适性的影响程度,于2008年夏季,进行了吹风环境下人体生理、心理热舒适实验。统计分析表明:夏季高温环境下,吹风使人体生理参数及热感觉出现明显下降的现象,且下降的程度与其所处环境的空气温度有关,相同风速下,空气温度越低,下降程度越大。但当空气温度达到约34℃时,吹风对人体生理参数基本无影响,但对热感觉仍有所改善。研究表明:夏季高温环境下,加强空气流动可在一定程度改善人体热舒适性,但是这种改善是有限制的,空气温度过高、风速太大或长时间吹风都可能会导致人体不舒适。

**关键词:**空气流动;热舒适;热感觉;人体生理参数;问卷调查

**中图分类号:**TU834.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)02-0070-04

## Physiological Experiment for Human Thermal Comfort of Air Flow in Summer

TAN Mei-lan<sup>a,b</sup>, LI Bai-zhan<sup>a,b</sup>, LI Wen-jie<sup>a,b</sup>, LIU Hong<sup>a,b</sup>, ZHENG Jie<sup>a,b</sup>, XU Meng-nan<sup>a,b</sup>

(a. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment(Ministry of Education);

b. College of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** A physiological and psychological experiment was conducted in summer, 2008 to ascertain the effect of air flow on human thermal comfort in hot summer. The statistics analysis shows that air flow makes physiological index and thermal sensation an obvious drop tendency, which is correlated to the air temperature of indoor environment. The lower the air temperature is, the greater the physiological index and the thermal comfort drop. But when the temperature is up to about 34℃, the air flow almost does not make any change to physiological index while the human sensation is still improved. These results indicate that air flow can improve human thermal comfort to some extent, but the improvement has limits. Higher air temperature, strong wind and long time exposure to wind can lead to uncomfortableness.

**Key words:** air flow; thermal comfort; thermal sensation; physiological index; questionnaire investigation

空气流动是影响人体热舒适的一个重要因素。热环境中人体的热舒适感与皮肤表面湿润度  $W$  及皮肤表面温度  $T_{sk}$  密切相关,当人体处于热状态时,  $W$  的下降会令人更舒适<sup>[1]</sup>。当人体周围空气流速适当增加时,不仅可提高皮肤表面与环境的换热系数,而且可加强皮肤表面汗液的蒸发,有效降低  $W$ , 提

高环境的热舒适度。即在高温环境下,加强室内空气流动,可在一定程度上补偿温度的升高,提高室内环境舒适温度的上限<sup>[2]</sup>。然而,空气流动对空气温度的补偿作用还不清楚。

近年来,许多学者对高温环境下空气流动对空气温度的补偿作用展开了研究,其研究内容主要针

收稿日期:2010-09-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50838009);国家“十一五”科技支撑重大项目(2006BAJ02A09);重庆市重大科技专项(CSTC,2008AB7110)

作者简介:谈美兰(1985-),女,博士生,主要从事建筑热环境与建筑节能研究,(E-mail):tanmeilan85@163.com。

李百战(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)baizhanli@cqu.edu.cn。

对各种空气温度、相对湿度环境下,空气流动对人体热舒适的改善作用<sup>[2-7]</sup>,力图寻找在一定温度范围内合适的风速水平。研究的结果显示,在风速的补偿下,舒适温度的上限大多在 28~32℃ 之间,可接受风速的上限大多在 0.5~1.6 m/s 之间。但是目前大多数研究采用的是热感觉问卷方法,存在很大的主观性、随意性,于是,渐渐出现了一些将人体生理指标如皮肤温度、出汗、血压等纳入热舒适的研究<sup>[8-11]</sup>,旨在从人体生理角度客观地研究人体对热环境的响应;风速究竟可达多高,尽管过高的风速能够保证人体的散热需要,使人处于热中性的状态,但却会给人带来吹风的烦扰感、压力感、黏膜的不适感等<sup>[12]</sup>,对此,ASHRA E55-2004 标准<sup>[13]</sup>中规定风速上限为 0.8 m/s。另外,长时间的吹风也会使人产生不适等负面影响<sup>[14]</sup>,时间也是热舒适的一个重要影响因素<sup>[15]</sup>,以往研究均忽略了吹风时间这一因素。

基于以上几点,笔者选择受热环境影响较为显著的生理指标——感觉神经传导速度 Sensory nerve Conduction Velocity (SCV) 及相应的测点皮肤温度 ( $T_s$ )<sup>[16]</sup>,并结合热感觉问卷调查的方法,从主客观两方面对夏季高温高湿环境下,空气流动对人体热舒适的影响进行研究。

## 1 研究方法

### 1.1 受试者

共 41 名志愿者参加了实验,其中男 20 人,女 21 人,均为重庆大学在读大学生,身体健康状况良好。受试者来自全国各省份,在重庆平均生活时间为 4 a 以上,均已基本适应本地区的气候条件。同时,为保证实验数据的可靠性,所有受试者在参加实验前均具有良好的睡眠,且未喝含有酒精的饮料。表 1 为受试者的基本信息。

表 1 受试者基本信息

性别	人数	年龄	身高/cm	体重/kg
男	20	21.7±1.5	171.2±7.2	61.1±7.4
女	21	21.6±1.6	158.6±4.7	45.5±5.8

### 1.2 实验方法与步骤

实验地点为重庆大学城环实验大楼 2 楼的“热舒适研究实验室”,房间尺寸为 7.3 m×7.5 m×4 m,室内通风良好。

受试者穿着自认舒适,平均服装热阻约为 0.3 clo<sup>[17]</sup>。实验开始前,为减少外界环境及代谢率对受试者的影响,要求受试者到达实验室后,静坐休息 30 min 以适应实验室环境,期间由实验人员向受试者介绍实验的内容以及实验过程中所要注意的事项。实验共历时 90 min,前 30 min 为自然风工况,后 60 min 为吹风工况,风源为落地式风扇,距离受

试者 2.5 m。实验期间,每 10 min 对受试者进行一次生理指标测试以及热感觉问卷调查。热感觉投票采用的是 ASHRAE 7 级指标(-3 冷,-2 凉,-1 微凉,0 适中(不冷不热),1 微热,2 热,3 很热)<sup>[13]</sup>。

### 1.3 测试方法及仪器

感觉神经传导速度 (SCV) 采用逆向检测法,用表面电极刺激和记录,在掌长肌腱和桡侧腕屈肌腱之间、腕褶皱线上方刺激正中神经,用表面电极粘贴于拇指记录。记录的活动电极置于近端指一指关节,参考电极置于远端<sup>[18]</sup>。测点皮肤温度 ( $T_s$ ) 指神经节段沿神经走向中间一点的皮肤温度<sup>[19]</sup>。

感觉神经传导速度测试采用 Neuropack 肌电诱发电位仪 (MEB-9104)。测点皮肤温度用红外线测温仪记录 (精度 ±0.5℃)。

室内热环境参数 (包括人体附近空气温度、相对湿度、风速、黑球温度) 的检测采用的是国外引进的里氏热舒适仪 Babuc A。测量位置取坐姿人体附近距离地面 0.6 m 高度处,仪器精度要求符合国际标准 ISO 7726<sup>[20]</sup>。

实验选在 2008 年 7—8 月进行,为重庆地区气温最高的月份。实验室内的环境参数测试值见表 2。

表 2 实验室环境参数一览表

空气温度/℃	样本量/个	相对湿度/%	空气流速/(m·s <sup>-1</sup> )	
			自然	吹风
28.2±0.7	10	75.8±7.0	0.08±0.06	1.20±0.26
30.9±0.6	18	86.7±15.4	0.14±0.07	1.02±0.24
33.9±0.6	13	83.0±5.7	0.11±0.08	1.08±0.12

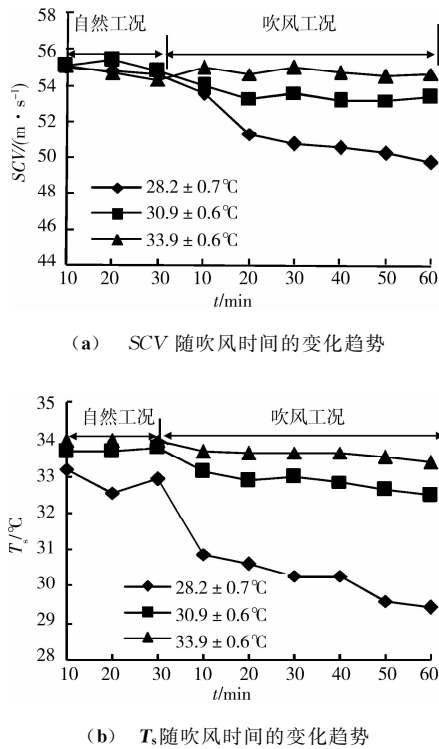
## 2 结果与分析

### 2.1 吹风对人体生理参数的影响

将不同环境温度段下,同一时刻各受试者的 SCV 和  $T_s$  求平均值,得出其随时间的变化关系,结果如图 1 所示。

从图中可以看出,不同温度下,吹风对人体生理参数的影响程度各不相同。空气温度越低,吹风的影响越大。

空气温度小于 30.9±0.6℃ 时,SCV 及  $T_s$  在吹风开始时均出现明显下降的现象,且空气温度越低,下降越明显。这主要是因为人体突然受到吹风的刺激,空气的流动加快了皮肤与周围空气间的换热,使得皮肤温度下降,进而影响 SCV。当空气温度为 30.9±0.6℃ 时,SCV 及  $T_s$  在吹风 20 min 时就渐渐趋向稳定,而空气温度为 28.2±0.7℃ 时,SCV 及  $T_s$  随吹风时间的延长继续下降,直至吹风 60 min 时还未达到稳定。

图 1 SCV 和  $T_s$  随吹风时间的变化趋势

而当空气为  $33.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$  时,吹风对 SCV 及  $T_s$  几乎没有影响。这表明,此时的环境热应力已经超过了人体自身生理调节的范围,这种情况会对人体生理产生长期性的影响,对人体身体健康不利,因此,为保证人体的身体健康,此时人体应采取主动干预的措施来降低环境热应力。

## 2.2 吹风对人体热感觉的影响

室内空气温度的高低直接影响着室内人员的热感觉,是影响人体热舒适最为重要的环境参数。因此,实验在对每位受试者进行人体生理指标测试的同时还进行了热感觉问卷调查。

将不同环境温度下,同一时刻各受试者的实际热感觉 TSV (Thermal Sensation Vote) 投票值分别求平均值,同时求出对应的 PMV (Predicted Mean Vote) 预测值。从而得出不同空气温度下,TSV 和 PMV 随吹风的变化趋势,如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,3 个空气温度下,热感觉在吹风时均出现明显下降的现象。

当空气温度为  $28.2 \pm 0.7^\circ\text{C}$  时,随着吹风时间的延长,TSV 渐渐偏离中性“0”,直至吹风 40 min 时才基本趋于稳定。TSV 由吹风前 0.1 至吹风 60 min 时的 -1.0。即此空气温度下,吹风并未改善反而恶化了人体热感觉。这表明此时吹风风速过大 ( $1.20 \pm 0.26 \text{ m/s}$ ),引起冷吹风感而造成人体不适。而在此空气温度下,SCV 及  $T_s$  在吹风 60 min 时未达到稳定的原因可能是由引起人体吹风感而导致的。

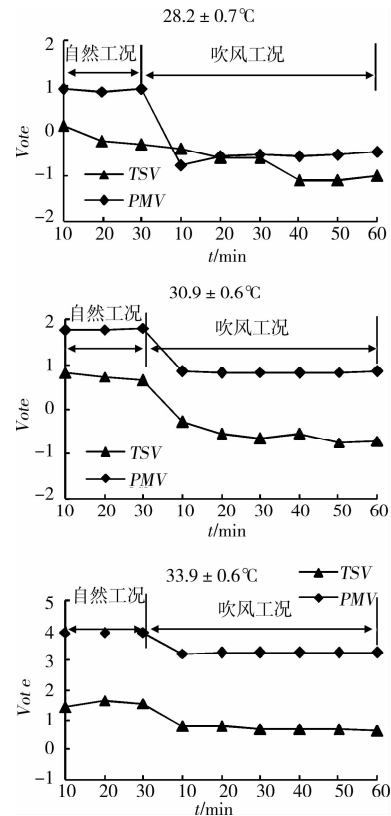


图 2 TSV、PMV 随吹风时间变化趋势

当空气温度为  $30.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$  时,TSV 由吹风前 0.8 至吹风 10 min 时 -0.3,直至 60 min 时,TSV 已降至 -0.7。这表明,此环境下,吹风在短时间内有效的改善了人体热感觉,但随着吹风时间的增加,吹风有可能会引起冷吹风感。

当空气温度为  $33.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$  时,TSV 由 1.4 降至最后的 0.6,下降了 0.8,即此时吹风在一定程度上改善了热感觉。但是由生理参数的结果分析,发现吹风对人体生理参数基本无影响,此时的环境热应力已经超过了人体自身生理调节的范围。这表明,此时单靠主观热感觉并不能正确评价热环境,而应该结合人体生理参数的变化规律,从主观和客观两方面来对热环境进行评价。

另外,从图 2 中还可以看到,PMV 预测值与 TSV 的变化规律基本一致,且 PMV 预测值均大于 TSV 投票值,即在中性—热环境下,PMV 过高的估计了人体热感觉,且温度越高,PMV 与 TSV 差值越大。这与大多数的相关研究结论一致<sup>[21-24]</sup>。

## 3 结论

通过对夏季高温环境下,空气流动对人体热舒适的影响研究,得出以下主要结论:

1) 夏季高温环境下,风速在  $1.0 \sim 1.2 \text{ m/s}$ ,相对湿度约高于 70% 时,吹风使 SCV、 $T_s$  出现明显下降的趋势,下降的程度与其所处的环境温度有关,相

同风速下温度越低,下降程度越大。当空气温度达到约 34℃时,吹风对 SCV、 $T_s$ 基本无影响。

2)夏季高温环境下,吹风(增加空气流动)可以在一定程度上改善室内热环境,提高人体热舒适感,但是这种改善是有限制的,即便是在高温环境下,不合理的吹风(风速过大或是时间过长)也会使人产生不舒适的吹风感。

3)当空气温度达到约 34℃时,单靠主观热感觉并不能正确评价热环境,而应该结合人体生理参数的变化规律,从主观和客观两方面来对热环境进行综合评价。

#### 参考文献:

- [1] GAGGE A P, NISHI Y, GONZALEZ R I. Standard effective temperature - a single index of temperature sensation and thermal discomfort [C]//Proceedings of the CIB Commission W45 (Human Requirements) Symposium at the Building Research Station, 1972: 229-250.
- [2] TOFTUM J. Air movement - good or bad? [J]. *Indoor Air*, 2004, 14(S7): 40-45.
- [3] ROHLES F H, WOODS J E, NEVINS R G. The effect of air movement and temperature on the thermal sensations of sedentary man [J]. *ASHRAE Trans* 1974, 80: 101-119.
- [4] TANABE S, KIMURA K. Thermal comfort requirements under hot and humid conditions [C]//Proceedings of the First ASHRAE Far East Conference on Air Conditioning in Hot Climates, Singapore, ASHRAE, 1989: 3-21.
- [5] ARENS E, XU T, MIURA K, et al. A study of occupant cooling by personally controlled air movement [J]. *Energy Building*, 1998, 27: 45-59.
- [6] 田元媛,许为全. 热湿环境下人体热反应的实验研究 [J]. *暖通空调*, 2003, 33(4): 27-30.  
TIAN YUAN-YUAN, XU WEI-QUAN. Experiment of human thermal response in warm and humid environment [J]. *HV & AC*, 2003, 33(4): 27-30.
- [7] CANDIDO C, DEAR R J DE, LAMBERTS R, et al. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 222-229.
- [8] 徐小林. 重庆夏季室内热环境对人体生理指标及热舒适的影响研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2005.
- [9] TOMONORI SAKOI, KAZUYO TSUZUKI, SHINSUKE KATO, et al. Thermal comfort, skin temperature distribution, and sensible heat loss distribution in the sitting posture in various asymmetric radiant fields [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 3984-3999.
- [10] YAO YE, LIAN ZHIWEI, LIU WEIWEI, et al. Experimental study on physiological responses and thermal comfort under various ambient temperatures [J]. *Physiology & Behavior*, 2008, 93: 310-321.
- [11] LI BAIZHAN, LI WENJIE, LIU HONG, et al. Physiological expression of human thermal comfort to indoor operative temperature in the NON-HVAC environment [J]. *Indoor and Built Environment*, 2010, 19(2): 221-229.
- [12] 朱颖心. 建筑环境学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [13] ASHRAE. ANSI/ASHRAE 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. 2004.
- [14] 贾庆贤, 赵荣义, 许为全. 吹风对舒适性影响的主观调查与客观评价 [J]. *暖通空调*, 2000, 30(3): 15-17.  
JIA QING-XIAN, ZHAO RONG-YI, XU WEI-QUAN. Survey of the impact of air movement on thermal comfort and its objective assessment [J]. *HV & AC*, 2000, 30(3): 15-17.
- [15] FERGUS NICOL. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics [J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36: 628-637.
- [16] 刘红. 重庆地区建筑室内动态环境热舒适研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2009.
- [17] ISO7730:2005. 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 Standard Organisation, 2005.
- [18] 卢祖能, 曾庆杏, 李承晏, 等. 实用肌电图学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2000: 56, 233
- [19] 陈良. 室内热湿环境对人体生理及热舒适影响的实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2006.
- [20] ISO. International Standard 7726: Thermal Environment—Instruments and Methods for Measuring Physical Quantities [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [21] FANGER P O, TOFTUM J. Thermal comfort in the future—excellence and expectation [C]//Proceedings of the International Conference Moving thermal Standards into the 21st Century, Windsor, 2001: 11-18.
- [22] YAO RUNMING, LI BAIZHAN, LIU JING. A theoretical adaptive model of thermal comfort—Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV) [J]. *Building and Environment* 2009, 44: 2089-2096
- [23] 周翔. 偏热环境下人体热感觉影响因素及评价指标研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [24] YANG WEI, ZHANG GUOQIANG. Thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned buildings in humid subtropical climate zone in China [J]. *Int J Biometeorol*, 2008, 52: 385-398.