

高原低气压环境对人体热舒适性影响的研究初探^{*}

青岛理工大学 胡松涛[★] 辛岳芝 刘国丹 王 刚 周景重 刘 恺 陈茂科 周 昂

摘要 模拟了高原低气压环境,以问卷调查的方式进行了低气压环境下人体热舒适的实验研究,为低气压地区舒适性空调的设计提供了参考。

关键词 低气压环境 问卷调查 热舒适 平均热感觉 热中性温度

Preliminary study on influences of plateau low-pressure environment on human thermal comfort

By Hu Songtao[★], Xin Yuezhi, Liu Guodan, Wang Gang,
Zhou Jingzhong, Liu Kai, Chen Maoke and Zhou Ang

Abstract By simulation of low-pressure environment of plateau and survey of questionnaires, carries out experiment to study human comfort under low-pressure environment, which provides reference for designing the comfortable air conditioning for low-pressure areas.

Keywords low-pressure environment, questionnaire, thermal comfort, mean thermal sensation, thermal neutral temperature

[★] Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong Province, China

①

0 引言

目前,国内外学者对热舒适的研究已取得了巨大成果,建立了很多评价热舒适的模型和标准,其中以 Fanger 教授的 PMV-PPD 评价指标应用最为广泛,并为国际标准 ISO 7730 所采用^[1]。但是目前已有的研究工作都是在正常海平面压力环境下进行的,即默认压力为常压,Fanger 的热平衡和热舒适方程也都是针对常压工况提出的。

我国幅员辽阔,拥有世界上最大面积的高原地域,其中海拔在 1 000 m 以上(海拔高度 1 000 m 以上的地区即称为高原)的山地约占陆地总面积的 58%,海拔在 2 000 m 以上的高山和高原占陆地总面积的 33%,常居高原人口约 2 500 万人^[2]。随着西部大开发战略的实施,越来越多的人进入高原地区。但是高原地区自然环境恶劣,具有气压低、含氧量低,平均气温低、日较差大,阳光辐射强,相对湿度小,风速大等气候特点。这些特有的自然环境和气候条件极可能对室内环境质量产生特殊的影

响,使人们产生不舒适感,从而对人体健康、工作效率等产生影响。

文献[3]指出,海拔 3 000 m(相应大气压约为 70 kPa)以下属无症状高原反应区,在此范围内,低压低氧会引起人体的一些生理机能发生代偿性的变化,但不会发生病理的变化,高原缺氧问题可以不予考虑。本文通过无症状高原反应区内模拟高原低气压环境,以问卷调查的方式,考察大气压降低时受试者平均热感觉及热中性温度的变化情况。

1 实验系统简介

本实验是在高原低压模拟舱内进行的,可以模拟高原特有的低气压环境并设有计算机监控系统及远程控制测量系统进行全自动监控。需要变化

①☆ 胡松涛,男,1968 年 7 月生,博士,教授,博士生导师,副院长
266033 青岛理工大学环境与市政工程学院
(0532) 85071710
E-mail: h-lab@163.com
收稿日期:2007-12-05
一次修回:2008-04-18
二次修回:2009-06-08

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50778091)

压力时,可改变控制台的控制参数,通过真空泵抽吸低压舱内的气体实现压力的改变。

实验过程中,在低压舱外设置空调器,同时在舱内沿两侧长度方向分别对称布置 2 组辅助电加热器来控制环境温度,保证实验过程中低压舱内温度维持在设定温度 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内;通过调节低压舱内调速风机来改变舱内空气流动速度;此外,低压舱的四周、地面及顶壁均布置热电偶测定壁面温度,用以计算环境平均辐射温度。

实验台的控制计算机及数据采集仪器均置于低压舱外,并可实现远距离控制和自动记数,操作方便,易于控制。实验原理如图 1 所示。

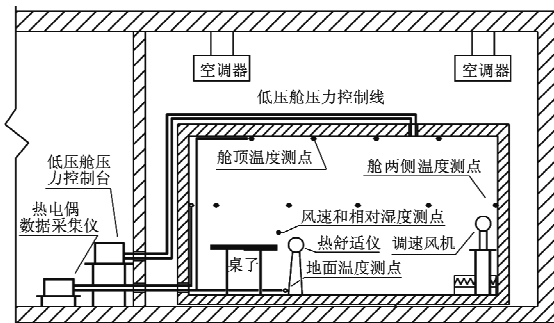


图 1 实验原理

2 实验设计

2.1 受试者

受试者主要为在校学生,共 22 人,男性 12 人,女性 10 人,分别占总人数的 54.55% 和 45.45%。采用男女混合搭配的方法分为 6 组,每组 3~4 人。虽然受试者样本较少,但是作为一种比较性研究,与 Fanger 和 Nevins 等的实验具有一定的可比性。受试者着统一服装,服装热阻为 0.96 clo ($1\text{ clo} = 0.155\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$),人体的活动量为 1.1 met ($1\text{ met} = 58.2\text{ W/m}^2$),实验前睡眠良好,饮食正常(未喝过含酒精的饮料)。受试者背景资料如表 1 所示。

表 1 实验受试者背景资料

参数	性别	最大值	最小值	平均值	标准偏差
年龄/岁	男	29	23	25.25	2.137 3
	女	38	20	23.20	5.432 4
身高/cm	男	184	165	174.83	5.997 5
	女	167	161	163.56	2.011 1
体重/kg	男	80	57	66.42	6.960 4
	女	61	50	53.70	3.713 3

2.2 问卷调查

热舒适问卷采用 ASHRAE 7 点标度,为尽量

减少个体间的差异,对热感觉标度值作了进一步细化,热感觉投票值取至小数点后 1 位,以表示每一分度间的热感觉。热感觉测试表见表 2。

表 2 热感觉测试表

热感级别	数值	客观反应
冷	-3	很冷,可见鸡皮疙瘩或打寒颤
凉	-2	局部感觉冷,不适,需加衣
稍凉	-1	局部关节感觉凉,可忍受
适中	0	感觉冷、热适中
稍暖	1	感觉稍热,皮肤湿润
暖	2	手、头、额等局部见汗
热	3	可见汗滴

注:相邻级别之间可以分为若干等分,即受试人员可以给出-2.2, -1.5, -0.6, 0.3, 1.4, 2.8 等介于-3 与 3 间的数值。

2.3 实验工况

实验中控制的环境变量主要有温度、压力、风速,共 9 个实验工况(见表 3),进行了 198 人次实验。其中压力最低控制为 75.99 kPa ,对应于海拔 $2\,500\text{ m}$,在无症状高原反应区内。为重点考察压力对实验值的影响,在此只分析其他条件不变时,受试者平均热感觉投票和热中性温度随压力的变化情况。为此设计了如表 3 所示的实验工况。

表 3 实验工况

温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/ kPa	风速/ (m/s)
22	101.33/86.13/75.99	<0.10
22	101.33/86.13/75.99	约 0.17
22	101.33/86.13/75.99	约 0.23

3 实验过程

实验之前有专门的实验人员对受试者进行培训,培训的主要内容为此次实验的实验目的、实验测试内容及实验过程中应注意的问题等。受试者于规定的时间到达实验地点,按实验要求整理服装。在进入低压舱之前先进入准备小室静坐 30 min ,以减少外界环境对受试者热感觉的影响,使受试者正式实验时的热感觉尽快达到稳定。

要求受试者坐木质椅子,静坐,可以轻声交谈(但不能谈实验过程中对热环境的评价),可以翻阅图书、报纸等。实验不间断地进行 3 h ,考虑压力改变对人体心理的影响,每一工况稳定 1 h ,每隔 15 min 填写问卷一次。每个压力工况填写 4 次问卷,直至 3 个压力工况共 12 次问卷填写完毕后此次实验结束。数据处理过程中取稳定状态时的实验数据。

4 实验结果处理及分析

4.1 实验处理方法

4.1.1 操作温度 t_o

常压下,操作温度 t_o 是综合考虑了空气温度和平均辐射温度对人体热感觉的影响而得出的合成温度,有些文献中也称作用温度或折算温度。在大多数的室内条件下,用操作温度来描述室内环境具有一定的准确性。文献[4]指出,ASHRAE 先后发起组织的 4 次大规模热舒适现场研究中,最近的 3 次均使用操作温度 t_o 。作为热舒适指标,文献[5]还推荐全球热舒适数据库采用操作温度 t_o 。作为热舒适指标来计算热中性温度。

4.1.2 热感觉与热中性温度

在热舒适研究中,通常采用的人体热感觉的表述方式有两种,即热感觉 TS (thermal sensation)和平均热感觉 MTS (mean thermal sensation)。前者为某一温度的人体热感觉,后者为某一温度区间内的人体热感觉平均值。由于个体间的差异较大,在同一温度下,不同人的热感觉不同,故变量 TS 和温度之间的线性相关系数较小,因此用 TS 不能很好地预测人体热感觉。所以,一般国外学者都不采用 TS 预测人体热感觉,而大多采用温度频率法(Bin 法)^[4-6],即将操作温度 t_o 以 0.5°C 的间隔,分为若干个操作温度区间,以每一操作温度区间的中心温度为自变量,以受试者在每一温度区间的热感觉投票值的平均值 MTS 为因变量,通过线性回归得到以下关系式: $MTS = a + bt_o$,令 $MTS = 0$,即可计算出实测的热中性温度^[5],它代表人体感觉最适中的环境温度。本文采用 MTS 来描述人体热感觉值,采用 MTS 与操作温度 t_o 来评价受试者的热中性温度的变化情况。

4.2 实验数据及分析

对相同温度和风速条件下、不同压力工况时受试者热中性温度的分析,可以清晰地比较压力对人体热感觉的影响。下文详细分析了设定温度 22°C 、风速 $v < 0.10 \text{ m/s}$ 、不同压力工况下受试者热中性温度的变化情况。对其他实验工况的分析也可以得出相同的规律,在此不再赘述。

表 4 给出了设定温度 22°C 、风速 $v < 0.10 \text{ m/s}$ 时不同性别受试者的平均热感觉 MTS 与操作温度 t_o 的回归曲线,表 5 列出了此工况下不同性别受试者热中性温度的具体数值。图 2~5 是对表 4 和表 5 的线性直观描述。图 6,7 分别显示了设定温度 22°C 、风速为 0.17 m/s 左右和 0.23 m/s 左右时受试者热中性温度随压力变化的情况。

表 4 设定温度 22°C 、 $v < 0.10 \text{ m/s}$ 时不同压力下的回归方程及相关系数

压力/kPa	性别	回归方程
101.33	男性	$MTS = 0.276 0 t_o - 5.699 3$
	女性	$MTS = 0.236 1 t_o - 4.999 6$
	男女平均	$MTS = 0.263 4 t_o - 5.491 8$
86.13	男性	$MTS = 0.228 2 t_o - 5.007 3$
	女性	$MTS = 0.222 6 t_o - 5.018 7$
	男女平均	$MTS = 0.193 1 t_o - 4.331 9$
75.99	男性	$MTS = 0.367 6 t_o - 8.117 9$
	女性	$MTS = 0.232 4 t_o - 5.308 0$
	男女平均	$MTS = 0.303 7 t_o - 6.811 8$

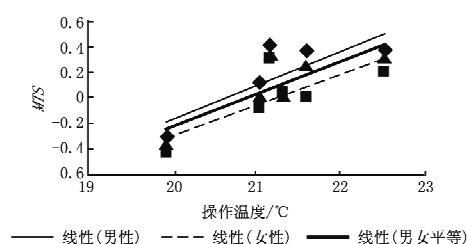


图 2 101.33 kPa 时 MTS 与操作温度的关系

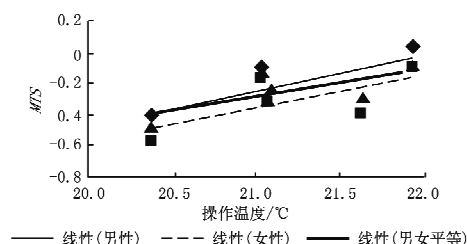


图 3 86.13 kPa 时 MTS 与操作温度的关系

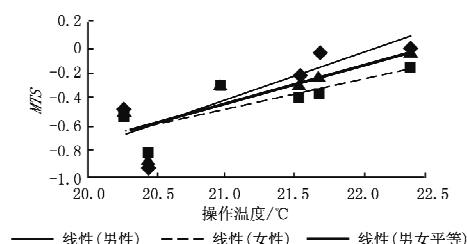


图 4 75.99 kPa 时 MTS 与操作温度的关系

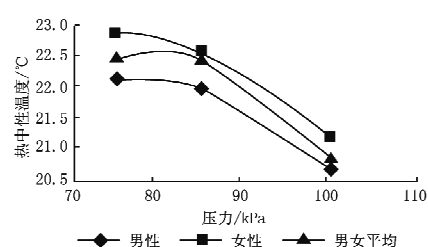


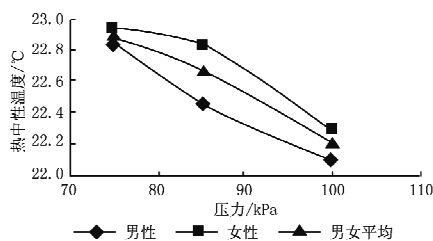
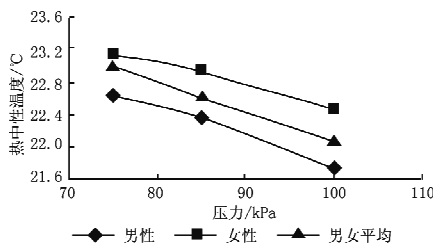
图 5 $v < 0.10 \text{ m/s}$ 时不同压力下受试者的热中性温度

由以上图表可以看出:

1) 相同温度和风速条件下,常压和低压工况

表 5 设定温度 22℃、 $v < 0.10$ m/s 时
不同压力下受试者的热中性温度/℃

性别	压力/kPa		
	101.33	86.13	75.99
男性	20.649 6	21.942 6	22.083 5
女性	21.175 8	22.545 8	22.839 9
男女平均	20.849 7	22.433 5	22.429 4
同压力下男性与 女性差值	-0.526 1	-0.603 2	-0.756 4
与常压下 的差值	男性	1.293 0	1.433 9
	女性	1.370 0	1.664 2
	男女平均	1.583 8	1.579 7

图 6 风速 0.17 m/s 时不同压力下受试者的
热中性温度(设定温度 22℃)图 7 风速 0.23 m/s 时不同压力下受试者的
热中性温度(设定温度 22℃)

下女性受试者的热中性温度都高于男性受试者的热中性温度。其中常压的结果与已有的实验及现场研究的结论一致^[4,7]。随着压力的降低,男性和女性热中性温度都逐渐升高,但女性热中性温度高于男性热中性温度的趋势保持不变。这说明男性更能适应较低的环境温度,而女性偏爱较高的环境温度,这可能是因为在一定的活动水平下女性单位体表面积的能量代谢率要低于男性。

2) 常压环境下,男性和女性热中性温度分别为 20.649 6℃和 21.175 8℃,两者相差约 0.5℃。而王昭俊对严寒地区居室热感觉和热舒适的现场研究中,女性热中性温度比男性高 1.0℃^[4],与本实验结果相差 0.5℃;Nevins 等人对美国大学生平均热感觉的实验研究中,女性热中性温度比男性高 0.8℃^[7],与本实验结果相差 0.3℃。这可能与

受试者着衣情况、地区气候条件及种族等因素有关。

3) 压力越低,男性热中性温度与女性热中性温度的差值越大,而且低压环境下,男性热中性温度变化的比率小于女性。以 75.99 kPa 的压力工况为例,男性热中性温度和女性热中性温度与常压下相比分别升高了 1.433 9℃和 1.664 2℃,升高的百分比分别为 6.47%和 7.86%,这说明女性对温度的敏感程度大于男性。

4) 由图 5 可知,当环境压力由 101.33 kPa 降至 86.13 kPa 时,男性与女性受试者热中性温度的变化比由 86.13 kPa 压力变化至 75.99 kPa 压力时要明显得多。从表 5 的具体数值也能看出这一点。例如,男性受试者在上述两种情况下热中性温度的变化约分别为 1.3℃和 0.1℃;女性受试者在上述两种情况下热中性温度的变化约分别为 1.4℃和 0.3℃。这可能与人体的自身调节能力有关。

5) 低压环境下,受试者热中性温度的升高应归因于人体热损失的增加。其他条件不变时,低压环境下由于蒸发换热带走的热量大于因对流换热削弱而减小的对流换热量,因此与常压相比,人体的失热量增大,而且压力越低,失热量越大,所以就热舒适方面来讲,表现为受试者热中性温度值的升高。

5 结论

5.1 其他条件不变时,常压和低压环境中女性热中性温度都高于男性热中性温度。

5.2 其他条件不变时,男性热中性温度和女性热中性温度随压力的降低而升高,即压力越低,受试者热中性温度值越高。

5.3 常压环境中,男性和女性热中性温度值分别为 20.649 6℃和 21.175 8℃,两者相差约 0.5℃;86.13 kPa 时,男性和女性热中性温度值分别为 21.942 6℃和 22.545 8℃,两者相差约 0.6℃;75.99 kPa 时,男性和女性热中性温度值分别为 22.083 5℃和 22.839 9℃,两者相差约 0.8℃。

5.4 上述研究结论是基于实验室研究的工况得出的,由于人体热舒适受多种因素的影响,对于低气压条件下人体热舒适的研究,还有待开展进一步的实验及现场调查研究。

(下转第 47 页)

- [7] 王宏哲,伊均. 城市污水热能回收与利用发展状况、评价和意义[J]. 中国环境管理,2001,19(5):21-23
- [8] 冯彦刚. 城市污水资源化的研究[D]. 北京:北京工业大学,2002
- [9] 尹军,陈雷,王鹤立. 城市污水的资源再生及热能回收利用[M]. 北京:化学工业出版社,2003
- [10] 马最良,姚杨,赵丽莹. 污水源热泵系统的应用前景[J]. 中国给水排水,2003,19(7):41-43
- [11] 吴荣华,孙德兴,张成虎,等. 城市污水源热泵的应用与研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(8):1326-1329
- [12] 周文忠,李建兴,涂光备. 污水源热泵系统和污水冷热能利用前景分析[J]. 暖通空调,2004,34(8):25-29
- [13] 黄国琦. 城市污水源热泵的开发和应用[J]. 流体机械,2005,33(6):76-38
- [14] Baek N C, Shin U C, Yoon J H. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using waste water as a heat source[J]. Solar Energy, 2005, 78(3): 427-440
- [15] 吴荣华,刘志斌,黄磊,等. 污水及地表水地源热泵系统规范化设计研究[J]. 暖通空调,2006,36(12):63-69
- [16] Reduced fouling of sewage water heat pumps[OL]. <http://gasunie.eldoc.ub.rug.nl/root/1997/2039648/>
- [17] 周文忠. 污水源热泵空调系统在污水处理厂的应用[J]. 暖通空调,2005,35(1):83-86
- [18] 吴荣华,孙德兴,张成虎,等. 热泵冷热源城市原生污水的流动阻塞与换热特性[J]. 暖通空调,2005,35(2):86-88
- [19] 吕监,冯彦刚. 城市污水低位热能回收利用的研究[J]. 工业用水与废水,2002,33(1):10-12
- [20] 吴学慧,孙德兴. 城市原生污水源热泵经济性分析[J]. 暖通空调,2007,37(11):36-39
- [21] 魏真真,张瑞波,耿庆龙,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 新疆师范大学学报,2007,26(3):232-235
- [22] Hassid S, Santamouris M. The effect of the athens heat island on air conditioning load [J]. Energy and Buildings, 2000, 32(2): 131-141
- [23] Svein Erik Pedersen, Jörn Stene. 18 MW heat pump system in Norway utilizes untreated sewage as heat source [J]. IEA Heat Pump Centre Newsletter, 2006, 24(4): 37-38
- [24] 徐邦裕,陆亚俊,马最良. 热泵[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1988
- [25] Energy from sewage water—district heating and district cooling in Sandvika, with 2 Unitop® 28C Heat Pump Units[OL]. http://www.friotherm.com/downloads/sandvika_eoo5_uk.pdf
- [26] 马最良,刘永红. 热泵站的现状及在我国应用的前景[J]. 暖通空调,1994,24(5):6-10
- [27] 吴荣华,张成虎,孙德兴. 城市原生污水源热泵系统运行工况与参数特性[J]. 流体机械,2005,33(11):73-76
- [28] 张成虎,吴荣华,刘志斌,等. 污水源热泵系统双级水泵运行特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(10):1601-1605
- [29] 姚杨,宋艳,那威. 污水源热泵系统中多级淋激式换热器的设计与分析[J]. 暖通空调,2007,37(3):63-67
- [30] 姚杨,马最良,赵丽莹. 污水源热泵系统的设计计算[J]. 煤气与热力,2005,25(2):39-42
- [31] 姚杨,宋艳,那威. 污垢对污水源热泵系统性能影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(4):599-603
- [32] 毕海洋. 污水源热泵系统取水换热过程流化除垢与强化换热方法[D]. 大连:大连理工大学,2007
- [33] 曹达君. 壳管换热器管内污垢生长及旋转转向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006
- [34] 张吉礼. 旋转四通换向阀:中国,2005100099465[P]. 2005-08-12

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] ISO. ISO 7730 Moderate thermal environment—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort [S]. Geneva: International Standard Organization, 1984
- [2] 刘成明. 青藏高原地区人口、资源、环境与可持续发展[J]. 青海社会科学,2003(1):39-42
- [3] 陈信,袁修干. 人-机-环境系统工程生理学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000:43-45
- [4] 王昭俊. 严寒地区居室热环境与热舒适性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002
- [5] Dedear R J, Brager G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [G] // ASHRAE Trans,1998,104(1):145-167
- [6] Cena K, Dedear R J. Field study MTS of occupant comfort and office thermal environments in a hot, arid climate [G] // ASHRAE Trans, 1999, 105(2): 204-217
- [7] 范格. 舒适[M]. 李天麟,曹俊周,黄海潮,译. 北京:北京科学技术出版社,1992