

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-202-05

西安某高校宿舍人体热舒适 气候适应性模型研究

张凯歌 王丽娟 孔培婷 王 鹏

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710600)

【摘要】 对该地区某高校学生宿舍冬季室内外温度、相对湿度和风速进行测试,并对受试者的基本信息、主观热感觉和服装热阻进行问卷调查。利用回归方法得出该地区的热中性温度(18.6℃)及其范围(16.9~22.7℃),并建立该地区热舒适气候适应性模型(热适应模型),初步确立室内热中性温度和室外空气温度的关系。将热中性温度作为室内温度设计的标准,可以提高人体舒适度,并可以适当减少建筑能耗。

【关键词】 学生宿舍;热舒适;热感觉;适应性模型;热中性温度

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Research on Adaptive Thermal Comfort Model for University Dormitory in Xi'an

Zhang Kaige Wang Lijuan Kong Peiting Wang Peng

(College of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600)

【Abstract】 The indoor and outdoor temperature, relative humidity, and wind speed of college student dormitories in Xi'an city were tested in winter, and the basic information, subjective thermal sensation, and clothing thermal resistance of the subjects were investigated by questionnaire. Using the regression method, the thermal neutral temperature (18.6℃) and its range in this region were obtained (16.9~22.7℃), and a thermal comfort climate adaptation model (thermal adaptive model) for this region was established. The relationship between indoor thermal neutral temperature and the outdoor air temperature was preliminarily established. Taking thermal neutral temperature as the standard of indoor temperature design can improve the comfort of human body and reduce building energy consumption.

【Keywords】 student dormitory; thermal comfort; thermal sensation; adaptive model; thermal neutral temperature

作者简介:张凯歌(1995-),男,在读硕士研究生, E-mail: 313944526@qq.com

通讯作者:王丽娟(1984-),女,博士,副教授, E-mail: wanglijuan@xpu.edu.cn

收稿日期:2020-08-18

0 引言

随着我国经济的发展和国民生活水平的不断提高,人们对室内环境的要求也越来越高。因此在人体热舒适方面的研究逐渐受到重视。目前常用的研究方法有实验室测试和实地调研测试。两者主要区别在于是否考虑了人体自身对环境的适应性。当环境变化时,人们会不断采取各种方式来适应这种变化,热适应模型反映的就是人和环境之间“给与

拿”的关系^[1]。

国外研究者 Humphreys 和 Nicol 在 1978 年提出了一种利用室外温度来预测室内热舒适温度的方法^[2]。他们通过对大量实测数据的分析研究,得到了适用于自然通风环境下室内热中性温度 t_n 与室外月平均温度 t_{om} 的相关方程。Auliciems 等人接着对 Humphreys 的研究进行了修正和补充,得到了适用于自然通风和空调建筑环境下的室内热中

性温度 t_n 与室外月平均温度 t_{om} 的相关方程^[3]。

国内研究者李俊鸽、杨柳等人通过对南阳市居民住宅的实地调研测试得到了室内热中性温度和室外空气温度(测试期间的平均温度)的相关方程, 并指出将热中性温度作为室内温度设计指标可以改善室内环境并降低设备能耗^[4]。杨柳、杨茜等人通过对昆明市居民住宅进行实地调研测试得到了该地区的热中性温度, 并建立热适应模型^[5]。茅艳了对我国的四个不同气候区 12 个代表城市进行了调研和测试, 分别建立了不同气候区的热适应模型^[6]。

我国的建筑热工分区有严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区和温和地区。长时间在不同地区生活的人对环境的适应能力不相同, 因而适应性模型也不尽相同。目前的热适应模型研究以住宅和办公环境为主, 而关于人员密度较大的学生宿舍研究相对较少。本文对寒冷地区西安某高校的学生宿舍室进行调研测试, 采用线性回归得到该地区人体热适应模型。

1 调研方案

1.1 调研地点和时间简介

西安市位于黄河流域中部的陕西关中地区, 在建筑气候区划分上属于第 II 类, 是温暖带半湿润大陆性季风气候。在建筑热工气候分区中属于寒冷地区, 最冷月平均气温在 $-1.2 \sim 0^\circ\text{C}$ 之间。

本次调研的西安某高校学生宿舍冬季供暖方式为间歇性集中供暖, 且宿舍内配备壁挂式空调。调研期间, 间

歇供暖下有些宿舍温度不能满足舒适需求, 部分受试者使用空调辅助采暖。测试时间定为 2019 年 12 月 4 日~2020 年 1 月 10 日 (10:00~14:00、19:00~21:00 和 22:00~23:00)。测试期间共得到 229 份调查数据, 其中 67 份问卷 (29.3%) 来自空调采暖环境, 162 份问卷 (70.7%) 来自间歇供暖环境。

1.2 测试内容及方法

1.2.1 环境参数

测试的室内环境参数有空气温度、相对湿度、黑球温度和空气流动速度; 室外参数有空气温度。所用到的仪器有: MI6401 热舒适仪; Testo 175H1 温湿度自计仪。仪器测量范围及精度如表 1, 环境

参数详如表 2 所示。

表 1 仪器参数

型号	测量参数	范围	精度
MI6401	室内空气温度	$-20 \sim 60^\circ\text{C}$	$\pm 0.2^\circ\text{C}$
	室内黑球温度	$10 \sim 50^\circ\text{C}$	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
	室内风速	$0.1 \sim 9.99\text{m/s}$	读数的 $\pm 5\%$
	室内相对湿度	$10\% \sim 90\%$	$\pm 2\%$
Testo 175H1	室外空气温度	$-20 \sim +55^\circ\text{C}$	$\pm 0.4^\circ\text{C}$

表 2 环境参数统计

	平均值	标准差	最小值	最大值
室内空气温度/ $^\circ\text{C}$	17.7	2.23	14.7	24.8
相对湿度/%	37.6	5.07	22.2	46.3
黑球温度/ $^\circ\text{C}$	17.9	2.07	15.2	24.6
空气流动速度/m/s		0.01		
室外空气温度/ $^\circ\text{C}$	4.1	1.98	0.5	10
操作温度/ $^\circ\text{C}$	17.9	2.13	15.0	24.9
平均辐射温度/ $^\circ\text{C}$	18.0	2.04	15.3	24.6

本次调研采用操作温度综合反映环境温度。操作温度综合考虑了室内空气温度和平均辐射温度对人员热感觉的影响^[7,8]。鉴于空气温度与平均辐射温度之差小于 2°C , 操作温度计算公式为:

$$t_a = (t_m + t_i) / 2 \quad (1)$$

式中, t_a 为操作温度, $^\circ\text{C}$; t_m 为平均辐射温度, $^\circ\text{C}$; t_i 为室内空气温度, $^\circ\text{C}$ 。

平均辐射温度计算公式为^[9]:

$$t_m = t_g + 2.44\sqrt{v}(t_g - t_i) \quad (2)$$

式中, t_g 为黑球温度, $^\circ\text{C}$; v 为空气流动速度, m/s。

1.2.2 人员信息

调查对象为 46 名在校学生, 其中男生 27 人, 女生 19 人。受试者年龄分布在 22~29 岁之间, 在本地区生活均超过 4a, 已经适应了该地区的生活环境。为了准确分析室内环境对人员热舒适的影响, 受试者填写问卷前在室内稳定至少 40min。受试者活动水平为静坐 (新陈代谢约 1.2met)。问卷调查的信息有:

(1) 基本信息: 性别、年龄、身高、体重和服装热阻 (详情见表 3);

(2) 采暖方式: 间歇采暖或空调采暖;

(3) 热感觉: (+3) 热、(+2) 暖、(+1) 稍暖、(0) 适中、(-1) 稍凉、(-2) 凉、(-3) 冷^[10]。

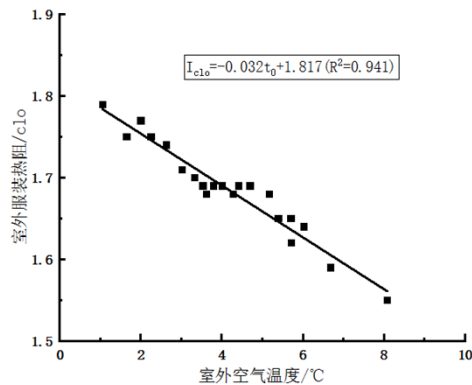
表3 人员基本信息

Table 3 Basic information of personnel				
受试人数 46 (男 27, 女 19)	平均值	标准差	最小值	最大值
年龄	24.8	1.55	22	29
身高/cm	171.3	6.85	156	188
体重/kg	64.1	8.03	55	82
服装热阻/clo	1.36	0.23	0.9	1.8

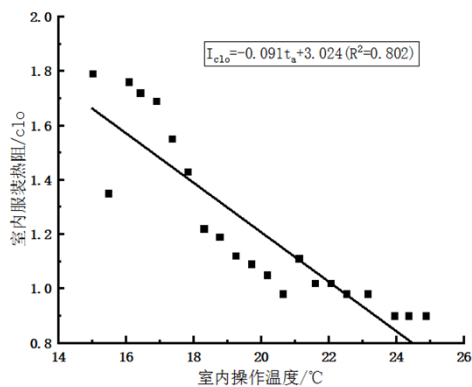
2 结果分析

2.1 服装的适应性调节

服装是影响人体热舒适的重要因素。人们通常会根据环境温度或自身活动水平来增减服装,从而达到舒适的目的。本研究针对受试者在室内外不同热环境和着装情况,分别建立服装热阻 I_{clo} 与室外空气温度 t_o 和室内操作温度 t_a 的线性关系,如图 1 所示。



(a) 室外服装热阻与室外空气温度的关系



(b) 室内服装热阻与室内操作温度的关系

图 1 服装热阻与环境温度的关系

Fig.1 Relationship between clothing thermal resistance

and ambient temperature

图 1 表明,调研期间受试者室外服装热阻在 1.5~1.8clo 之间,多数聚集在 1.7clo 附近;室内服装热阻在 0.9~1.8clo 之间,多集中在 1.1clo 附近。室内外服装热阻都随温度的增加而减少,但室外服装热阻随温度的变化率小于室内。说明人们对室内温度更敏感,服装行为调节更加主动。

不同气候区的服装热阻与环境温度的回归方程不同(详见表 4)。当温度改变 1°C 时,不同地区服装热阻约改变 1.84clo(昆明市)、1.94clo(广州市)、1.60clo(南阳市)、1.34clo(北京市)、1.02clo(长春市)和 1.78clo(西安市)。可见,不同气候区的人对温度的敏感程度不同,即使在同一气候区的不同城市之间也会有所差异。长时间生活在不同地区的人会适应当地室外气候,形成地域性差异穿衣特点。

表 4 不同地区服装热阻与室外空气温度的回归方程

Table 4 Regression equation of clothing thermal resistance and outdoor air temperature in different regions

研究者	回归方程	地区
杨柳 ^[5]	$I_{clo} = -0.0635t_o + 1.9017$	昆明市(温和地区)
茅艳 ^[6]	$I_{clo} = -0.05188t_o + 1.99892$	广州市(夏热冬暖)
李俊鸽 ^[4]	$I_{clo} = -0.041t_o + 1.6375$	南阳市(夏热冬冷)
曹彬 ^[11]	$I_{clo} = -0.015t_o + 1.35$	北京市(寒冷地区)
茅艳 ^[6]	$I_{clo} = -0.01777t_o + 1.03535$	长春市(严寒地区)
本次测试	$I_{clo} = -0.032t_o + 1.817$	西安市(寒冷地区)

2.2 热中性温度

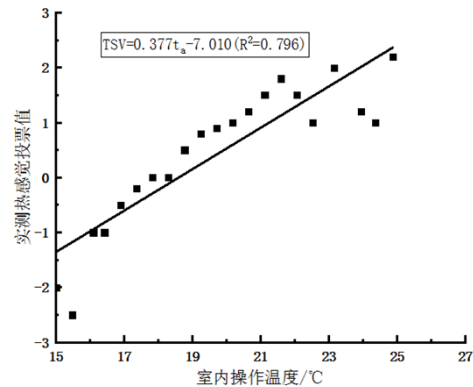


图 2 实测热感觉与室内操作温度的关系

Fig.2 Relationship between measured thermal sensation and indoor operating temperature

热中性温度指的是人体感觉不冷也不热时的最佳温度,一般是指热感觉投票值等于 0 时的温度。

将实测热感觉投票与室内操作温度进行线性回归, 结果如图 2 所示。当实测热感觉投票值 $TSV=0$, 得到该地区冬季学生宿舍的热中性温度为 18.6°C 。

2.3 热环境接受范围

人体对环境的适应能力是有限的, 确定接受温度的上下限对建筑设计和环境控制非常重要。确定热环境接受能力, 主要有直接和间接两种方法。直接法是让受试者判断热环境是否能够接受, 统计分析受试者不接受所处热环境的百分率。间接法是对问卷中受试者填写的热感觉投票值分析, 计算某一操作温度下投票值为不接受的人数占总人数的百分率^[12]。本研究采用间接法, 将满足 80% 以上人群舒适要求的最低和最高温度作为下限和上限。将得到的室内操作温度与不接受投票率 (PPD) 进行统计分析, 结果如图 3 所示。回归曲线表明: 当不接受投票率不超过 20% 时, 热中性温度在 $16.9\sim 22.7^{\circ}\text{C}$ 之间。

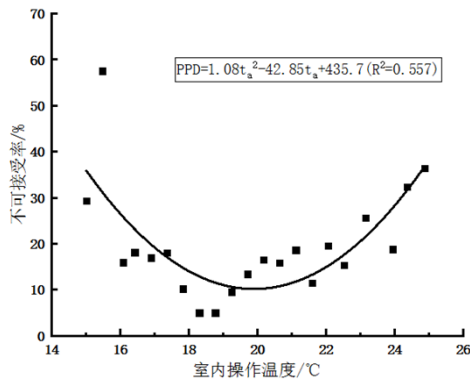


图 3 不可接受率与室内操作温度的关系

Fig.3 Relationship between unacceptable rate and indoor operating temperature

2.4 热适应模型

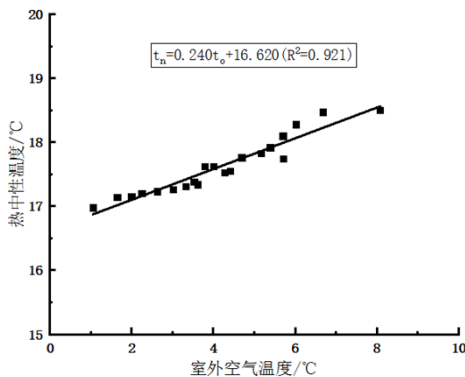


图 4 热中性温度与室外空气温度的关系

Fig.4 Relationship between thermal neutral temperature and outdoor air temperature

热适应模型是室内热中性温度 t_n 与室外空气温度 t_o 的线性回归方程, 两者关系如图 4 所示。从回归方程的斜率 (0.240) 可以看出, 当室外空气温度改变 1°C 时, 人们的热中性温度会改变 0.24°C 。这个结果与茅艳所得到的寒冷地区热适应模型结论一致^[6]。

上述人们对热环境接受范围研究表明: 在不接受投票率不超过 20% 的条件下, 受试者的热中性温度范围为 $16.9\sim 22.7^{\circ}\text{C}$, 也就是说本研究提出的热适应模型范围为 $16.9\sim 22.7^{\circ}\text{C}$ 。由此可得热适应模型 (见图 5)。

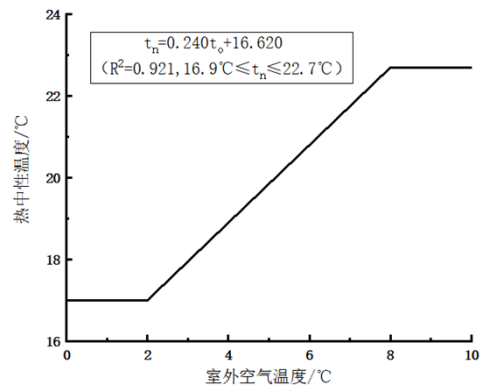


图 5 热适应模型

Fig.5 Thermal adaptation model

热适应模型表明, 人们的热中性温度随室外空气温度变化而变化。在创造舒适室内热环境时, 可以利用热适应模型, 根据人们的需求对室内温度进行控制, 从而达到节能目的。目前, 国内学者针对不同地区、不同气候条件建立热适应模型, 为节省供热空调能耗打下基础。

3 结论

本文对西安地区某高校学生宿舍进行了实地调研, 并对调研结果进行了统计分析, 得到如下结论。

(1) 该高校学生冬季室外服装热阻在 $1.5\sim 1.8\text{clo}$ 之间, 主要集中在 1.7clo 附近; 室内服装热阻在 $0.9\sim 1.8\text{clo}$ 之间, 多聚集在 1.1clo 附近。不同地区人形成适应当地气候特点的穿衣习惯, 即服装热阻具有地域性差异。

(2) 西安地区某高校学生宿舍的热中性温度为 18.6°C , 满足 80% 人员舒适要求的热中性温度范围为 $16.9\sim 22.7^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 热适应模型表明, 热中性温度并非一个

固定数值,它与当地气候有关。若以该模型为依据去控制室内温度,可以实现建筑节能。

参考文献:

- [1] Gail S Brager, Richard J de Dear. Thermal adaptation in the built environment: a literature review[J]. Energy & Buildings, 1998,27(1).
- [2] Humphreys M. Outdoor temperature and comfort indoors[J]. Building Research and Practice, 1978(3/4).
- [3] Auliciems A, de Dear R. Air conditioning in Australia I: human thermal factors[J]. Architectural Science Review, 1986,29:67-75.
- [4] 李俊鸽,杨柳,刘加平.夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[J].暖通空调,2008,(7):20-24,5.
- [5] 杨柳.温和地区人体热舒适气候适应模型研究[C].2010年建筑环境科学与技术国际学术会议论文集,2010:226-230.
- [6] 茅艳.人体热舒适气候适应性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
- [7] 屈万英,王兴龙,闫海燕,等.西安地区学生公寓过渡季热舒适性实地调查与分析[J].建筑科学,2013,29(4):25-30.
- [8] 王昭俊.现场研究中热舒适指标的选取问题[J].暖通空调,2004(12):39-42.
- [9] 王丽娟,狄育慧.平均辐射温度应用探讨[J].暖通空调,2015,45(1):87-90.
- [10] ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. 2017.
- [11] 曹彬,朱颖心,欧阳沁,等.北京校园建筑夏冬两季室内热舒适性现场调查研究[J].暖通空调,2012,42(5):84-89.
- [12] 杨柳,杨茜,闫海燕,等.陕西关中农村冬季住宅室内热舒适调查研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2011,43(4):551-556.
- [13] 管勇,张金萍,胡万玲.兰州市冬季办公房间热舒适研究[J].建筑科学,2009,25(8):94-97,108.
- [14] Tan Meilan, Li Baizhan, Liu Hong, et al. Field experiments on thermal comfort in university dormitories in Chongqing, China[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009,16(S1):55-61.
- [15] 诸葛阳,卢雅林,宋潞云,等.南京高校室内冬季热舒适性和 IAQ 调查研究[J].建筑热能通风空调,2016,35(6):42-45.
- [16] 王昭俊,任静,吉玉辰,等.严寒地区住宅与办公建筑热环境与热适应研究[J].建筑科学,2016,32(4):60-65.