

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.008

住宅夏季非空调环境的人体热适应 ——个体特性

简毅文^a, 裴泽^b, 尹素菊^b, 李毅^a

(北京工业大学 a. 建筑工程学院; b. 应用数理学院, 北京 100124)

摘要:为了从更细微的层面把握和认识北京地区住宅夏季非空调环境下人体的热适应特性,从单个个体角度开展相关的分析研究。通过分析建立连续变化的室内温湿度环境与人体对热湿环境主观评价的相互联系,从人体对室内温度、湿度的热适应水平以及在热适应水平上室内温、湿度两者的交互作用两个方面,对住宅夏季非空调环境下单个个体热适应特性进行较完整的分析和刻画。并以北京城区某个居住者为例,阐述了上述的分析方法在研究个体对住宅夏季非空调室内环境热适应特性的应用。

关键词:非空调环境;人体热适应;个体特性;适应水平;应用

中图分类号:Tu831 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)05-0050-05

Thermal Adaptation to Free-Running Environment of Apartments in Beijing: Individual Level

Jan Yiweng^a, Pei Ze^a, Yin Suju^b, Li Yi^a

(a. College of Architecture and Civil Engineering;

b. College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: Occupant's thermal adaptation to free-running environment of apartments in summer was studied at an individual level. The relationship between indoor environmental parameters and occupant's thermal sensation to indoor environment has been developed. Moreover, the effects of indoor temperature and relative humidity, as well as the interaction effects of the two parameters on occupant's thermal sensation have been analyzed. On this basis, the characteristics of occupant's adaptation to indoor temperature and relative humidity have been identified simultaneously. One particular individual dweller in Beijing has been selected to study the thermal adaptation by applying the method to practice.

Key words: free-running environment; thermal adaptation; individual level; adaptation level; application

伴随着采暖、空调系统普及所引发的一系列能耗、环境以及人体舒适健康的问题,自然通风环境下的人体热适应问题近年来已受到研究者的广泛重视,并对此开展了大量现场实地调研的基础研究^[1]。

首先,通过非采暖空调环境下人体实际热感觉与采用国际热舒适标准 ISO7730 和 ASHRAE-1992 预测结果存在明显差异的分析发现^[2-4],早期

的研究者提出了人体热适应的基本理论(Adaptive Model of Thermal Comfort)^[5-6],认为人体并非只是环境热刺激的被动接受者,而是通过生理适应、心理适应以及行为调节 3 种方式积极主动地与热湿环境相互作用,从而在非采暖空调的自然环境中呈现出与采暖空调环境下不同的热感觉状况。

之后,学者们针对不同气候条件、不同功能的建

收稿日期:2014-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278004);北京市自然科学基金资助项目(8142004)

作者简介:简毅文(1967-),博士,副教授,主要从事暖通研究,(E-mail)jianyiwen@bjut.edu.cn。

筑,从多个角度对室内人体的热适应做了广泛的分析调研工作^[7-20]。在热适应模型建立的研究上,美国学者通过大量的数据调研和数据拟合,得到了人体可接受的舒适温度和室外空气平均温度的线性函数关系,建立了被ASHRAE55-2004标准所采用的热适应模型^[11]。之后,欧洲学者利用当地的现场调研数据,通过建立室内舒适温度与周内外温相继平滑温度的线性回归方程,得到了对应于3类建筑的设计温度取值范围,并做为欧洲建筑设计标准EN15251^[12]。中国研究者在文献^[11]研究的基础上,对中国主要热工分区(严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区)的居住和办公建筑内夏季和冬季的人体热适应开展了细致和深入的研究,建立了对应各个地区特定建筑的人体热适应模型^[13-20]。

分析比较该领域的各项研究工作,可以发现,尽管建筑所处的地理位置及建筑功能各不相同,但各项研究结果所反映出的均是特定地区人群对室内环境热适应的平均特征,如中性温度;或是针对80%或90%人群可接受的室内环境范围及其随室外温度的变化。文献^[17]的研究表示,在外温30℃的情况下,夏热冬冷地区90%和80%人群可接受的室内温度范围大致分别为22.0~28.0℃和23.2~27.8℃,这两个温度范围的变化幅度分别为6.0℃和4.6℃。因此,研究结果所给出的是较宽泛的热湿环境范围。

从人体自身的角度分析,由于人体生理状况、生活环境等因素的千差万别,单个个体对室内环境会形成不同的热适应状况^[21],文献^[22-23]中不同地区人体热适应差异的统计显著性证实了上述的论点。因此,有关人体热适应平均特征或群体热适应范围的分析描述会掩盖不同个体对室内环境热适应的差异,例如对应于80%人群23.2~27.8℃的温度适应范围,其中可能有部分人的温度适应范围为23.2~25℃,而另有部分人的范围为26~27.8℃,也即这两类人群在对室内环境的热适应上存在明显差异。这样,研究结果没有细致反映出人体对室内环境的热适应状况,并可能会对群体热适应的特征导致不清晰的认识。

因此,有必要从个体角度开展人体对室内环境热适应的分析和研究,以期在更细微的层面上把握和认识人体的热适应特性。对此,通过分析建立连续变化的室内温湿度与人体对热湿环境主观评价的相互联系,从人体对室内温度、湿度的热适应水平以及在人体热适应上室内温、湿度两者的交互作用两个方面,对住宅夏季非空调环境下单个个体的热适应特性进行较完整的分析和刻画。并以北京城区某个居住者为例,阐述上述方法在研究个体对住宅夏季非空调环境热适应特性方面的应用。

1 研究对象及数据调研

1.1 研究对象

研究个体为在北京城区已生活了7a的青年女性,身材中等偏胖,喜冷。该个体周一至周五每天乘坐45min的公交车上下班,工作地点有室内集中空调。相对应,在住宅内的停留时间为下午6点至第2天早上8点,并且主要在装有空调的主卧室活动,睡眠时间主要在夜间11点至第2天早上6点半。周末一般不外出。

1.2 室内环境测试

采用Testo175-H2型温湿度自记仪,对住宅内客厅和住户的卧室进行室内温、湿度的连续测试和记录,测试时间为2012年7月1日至2012年9月1日,数据记录的时间间隔为10min。产品的出厂证书标注该仪器的温度精度为0.3℃,湿度精度为2%。测试过程没有受到太阳辐射和室内其他热源、湿源直接影响。

1.3 问卷调查

问卷调查的内容主要包括:1)建筑基本信息;2)空调使用基本信息;3)个体基本信息,如性别、年龄、生活作息、在北京生活时间等;4)个体对非空调室内环境的接受状况,包括满意、可接受和不可接受;5)以ASHRAE7级标度(-3、-2、-1、0、1、2和3)表示的个体的热感觉信息。

个体填写问卷的时间主要为睡觉前的23:00和早上8:00,对晚上休息和夜间睡眠2个时间段的室内热环境做出主观评价。

2 调研结果分析

2.1 室内热湿环境状况

根据室内温、湿度随时间的变化,判断出室内空调的开启和关闭状况,剔除出空调运行以及空调关闭2h内的室内环境数据。在此基础上,再依据个体所反映的生活作息,确定出个体停留室内时的非空调环境状况,具体如图1所示。在此条件下,室内温度变化范围为25~31℃,相对湿度主要在40%~80%范围内变化。

2.2 室内温湿度与个体热感觉的关系

对调查问卷所反馈人体热感觉的主观信息进行汇总分析,再结合相应时间段内的室内温湿度数据,得到非空调自然环境下个体的热感觉投票TSV与室内热湿环境的相互关系,具体如图2所示。由此发现,人体热感觉在趋势上随着室内温度、湿度的上升而加强,但两者之间并非呈现明显的数量关系,如在温度28.3℃、相对湿度67%的热湿环境下,出现

了 3 种不同的人体热感觉投票。

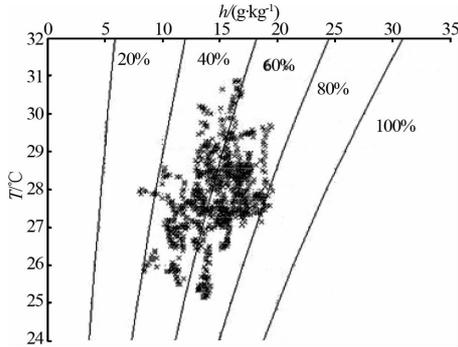


图 1 个体停留室内时的非空调环境

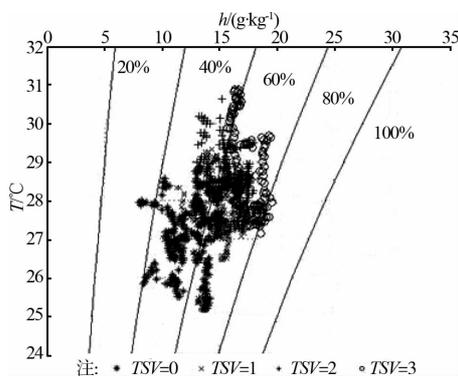


图 2 室内热湿环境与人体热感觉

于是,有必要采用统计学方法,从数量统计特征的角度,研究分析人体热感觉与其所处室内热湿环境之间的相互关系,研究中采用了方差分析中的双因素法^[24]。双因素法不仅可反映单个控制因素(温度或湿度)对观测变量(人体热感觉)的影响,而且还反映出两个控制因素(温度、湿度)在对观测变量(人体热感觉)影响上的交互作用。对于控制因素影响显著性的判断,该方法利用 F 检验,当对因素检验的统计量 F 大于 95% 置信水平下的临界值 $F_{0.05}$ 时,则认为该因素对观测变量具有显著性影响。本研究中住宅夏季非空调环境下室内温度、湿度与人体热感觉的双因素分析结果见表 1。

结果表明,室内温度和湿度在统计意义上对人体热感觉都具有显著影响,同时,这两个环境参数在对人体热感觉影响上存在明显的交互作用。

表 1 温度、湿度与热感觉的双因素分析结果

变量	F	$F_{0.05}$
温度	51.771	1.30
湿度	78.604	1.39
温度 * 湿度	3.966	1.22

2.3 个体热适应水平的分析

以上在室内温度、湿度对人体热感觉影响的显著性以及两者在对人体热感觉的影响上存在的交互作用两方面反映出人体对室内环境热适应的基本状况。接下来的问题是:不同温度或不同湿度水平下人体热感觉的差异程度如何? 也即,人体对室内环境的热适应水平究竟如何?

考虑室内温度、湿度对人体热感觉影响的交互作用,采用频率分析法,对温度和相对湿度分别以 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 5% 的间隔进行划分,得到室内环境的各个微区间。对温度和湿度分别按 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 5% 的间隔进行划分主要原因在于所采用温湿度自记仪的精度, $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 5% 的间隔数值与自记仪温度和湿度精度值的 2 倍基本一致。进而在各个微区间内统计分析不同人体热感觉出现的频率次数,具体结果如图 3 和图 4 所示,图 3 和图 4 的数据源完全一致,不同点在于前者以湿度为划分主轴,后者则以温度为划分主轴。

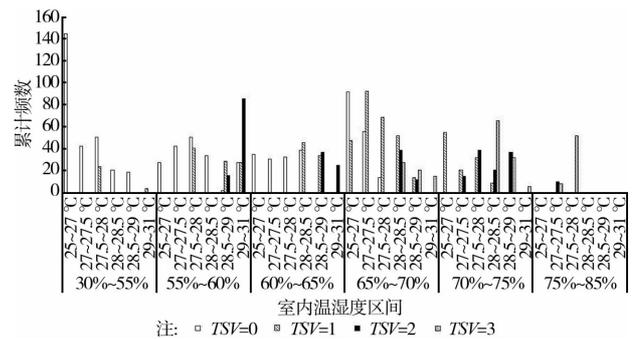


图 3 人体热感觉随室内温湿度的变化 (以湿度为划分主轴)

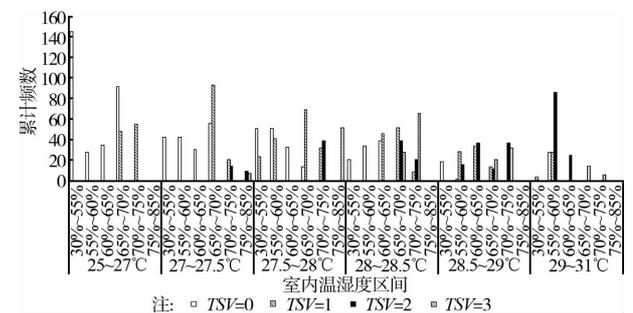


图 4 人体热感觉随室内温湿度的变化 (以温度为划分主轴)

根据热舒适研究中有关人体对室内热环境可接受的描述,本研究将只包含 $TSV \leq 1$ 的温湿度区间作为人体可接受的室内热环境范围,而将出现 $TSV \geq 2$ 的温湿度区间作为人体不可接受热环境范围。

图 3 和图 4 的结果直观反映出人体热感觉及人体其对室内热环境可接受状况随室内温、湿度的变化。

当室内温度为 25~27 °C,或者相对湿度为 30%~55%时,人体热感觉为舒适或稍热,对室内热环境始终表现为可接受。此时,人体对室内热环境的可接受状况由单一的温度或湿度参数所决定,室内温度和湿度两者之间不存在交互作用和制约。

而当室内温度高于 27 °C、同时湿度超过 55%后,人体对室内热环境的接受状况不再随温度或湿度呈现单一的变化。在对人体热感觉的影响上,温度和湿度两者存在交互作用。在 27~28 °C 的温度范围,相对湿度低于 70%的热环境让人体感到可接受;但当相对湿度高于 70%时,人体会出现热、甚至很热的感觉,从而对室内环境感到不可接受。也即,在 27~28 °C 的温度范围内,相对湿度作用的分界点为 70%。同样分析得出在 28~28.5 °C 温度范围内的相对湿度分界点为 65%。温度进一步升高到 28.5 °C 以上后,人体始终感到热或很热,对室内热湿环境总不可接受,此时的相对湿度分解点为 55%。

因此,随着室内温度水平的上升,人体对室内热环境从可接受到不可接受的相对湿度分界点也在逐渐变化。这从更细致的角度反映出室内温度、湿度在对人体热感觉影响上存在的交互作用。综合分析室内温度、湿度的影响状况及两者的交互作用,确定研究个体对室内温湿度环境感到不可接受的 3 组起点分别为 (27 °C, 70%)、(28 °C, 65%)、(28.5 °C, 55%),具体如图 5 所示。

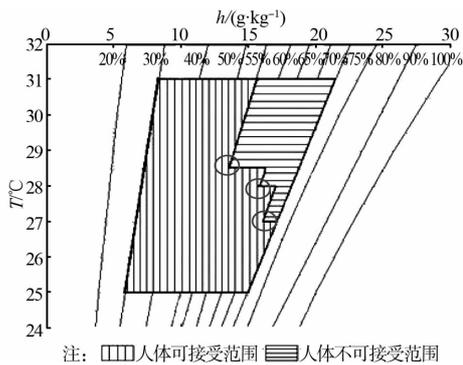


图 5 人体可接受与不可接受的室内热湿环境

进一步,运用统计学参数检验的 t 检验方法^[24],以人体热感觉为被检验参数,分析验证上述有关人体对室内热湿环境热适应水平的结论。 t 检验通过差异发生的概率来分析判断两个总体的均值是否存在显著差异。当被检参数统计量的双尾概率 P 小于所对应的显著性水平 α 时,则认为两总体的均值有显著性差异,否则没有显著性差异。或者检验两总体均值差的 95% 置信区间是否跨零,若不跨零,

则认为差异性显著;若跨零,则认为差异性不显著。

在对应于室温 27~28 °C 的室内热湿环境区内,以相对湿度 70% 为分界,将该区域内的热湿环境状态及相应的人体热感觉投票 TSV 划分为两组,对此进行参数检验。同样,在室温 28~28.5 °C 以及 28.5~31 °C 所对应的两个室内热湿环境区内,分别以相对湿度 65% 和 55% 为分界,对各个区间内的室内热湿环境状态及相应的人体热感觉投票 TSV 进行分组,进行参数的分析验证。具体计算结果如表 2 所示。

表 2 不同室内环境区间内湿度分界点的 t 检验结果

温度水平	均值方程的 t 检验			
	α	Sig (双侧)	均值差 95% 的置信区间	
			下限	上限
27~28 °C	0.05	0.00	-1.752	-1.500
28~28.5 °C	0.05	0.00	-1.962	-1.688
28.5~31 °C	0.05	0.00	-1.793	-1.427

对上述 3 个室内热湿环境区间,被检参数统计量的双尾概率 P 值均为 0.00, 小于显著性水平 0.05;此外,各个环境区间内两组环境下 TSV 均值差的 95% 置信区间都不跨零。因此,计算结果从统计验证的角度说明了 70% 的相对湿度是该个体在 27~28 °C 温度水平下对室内热环境从可接受到不可接受的分界点,同样,65% 和 55% 分别是对应于 28~28.5 °C 以及 28.5~31 °C 温度水平的相对湿度分界点。

3 结 论

通过分析建立连续变化的室内温湿度环境与人体对热湿环境主观评价的相互联系,可以从人体对室内温度、湿度的热适应水平以及在热适应水平上室内温、湿度两者的交互作用两个方面,对住宅夏季非空调环境下单个个体的热适应特性进行较完整的分析和刻画。

针对单个个体的研究可以在更细微的层面上把握人体对住宅夏季非空调环境的热适应特性,从而为在更广层面上研究和认识人体对室内环境热适应的群体特征提供基础。

参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心,中国建筑节能年度发展研究报告 2009[M]. 北京:中国建筑工业出版社 2009.
- [2] Busch J F. Thermal comfort in Thai air-conditioned and naturally ventilated offices [M]. Standards for Thermal

- Comfort, 1995: 114-121.
- [3] De D, Richard B, Gail S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to Ashrae Standard 55 [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 549-561.
- [4] 夏一哉, 赵荣义, 江亿. 北京市住宅环境热舒适研究[J]. *暖通空调*, 1999, 29(2): 1-5.
Xia Y Z, Zhao R Y, Jiang Y. Thermal comfort in naturally ventilated houses in Beijing [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 1999, 29(2): 1-5.
- [5] Dear D, Brager R, Schiller G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [J]. *ASHRAE Transactions*, 1998, 104(1): 145-167.
- [6] Humphreys M A, Nicol J F. Understanding the adaptive approach to thermal comfort [J]. *ASHRAE Technical Data Bulletin*, 1998, 14(1): 1-14.
- [7] Gotoa T, Mitamura T, Yoshino H, et al. Long-term field survey on thermal adaptation in office buildings in Japan [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(6): 3944-3954.
- [8] Hwang R L, Cheng M J, Lin T P, et al. Thermal perceptions, general adaptation methods and occupants idea about the trade-off between thermal comfort and energy saving in hot-humid regions [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(3): 1128-1134.
- [9] Wu Y C, Mahdavi A. Assessment of thermal comfort under transitional conditions [J]. *Building and Environment*, 2014, 76: 30-36.
- [10] Mishra A K, Ramgopal M. Thermal comfort field study in undergraduate laboratories-An analysis of occupant perceptions [J]. *Building and Environment*, 2014, 76: 62-72.
- [11] ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: ASHRAE, 2004.
- [12] CEN Standard EN15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics [S]. Brussels: Comite Europeen de Normalisation, 2007.
- [13] Wang Z j, Li A X, Ren J, et al. Thermal adaptation and thermal environment in university classrooms and offices in Harbin [J]. *Building and Environment*, 2014, Available online.
- [14] 曹彬, 朱颖心, 欧阳沁, 等. 北京地区冬季室内人体热舒适性及热适应性调查[J]. *暖通空调*, 2010, 40(5): 98-101.
Cao B, Zhu Y X, Ouyang Q, et al. Field research of human thermal comfort and thermal adaptability during winter in Beijing [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2010, 40(5): 98-101.
- [15] 黄莉, 朱颖心, 欧阳沁, 等. 北京地区农宅供暖季室内热舒适研究[J]. *暖通空调*, 2011, 41(6): 83-85.
Huang L, Zhu Y X, Ouyang Q, et al. Indoor thermal comfort in rural houses around Beijing in heating season [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2011, 41(6): 83-85.
- [16] 闫海燕, 杨柳. 焦作夏季居住建筑人体热舒适现场研究[J]. *暖通空调*, 2012, 42(4): 96-103.
Yan H Y, Yang L. Field study on occupant thermal comfort in residential buildings of Jiaozuo city in summer [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2012, 42(4): 96-103.
- [17] 刘红, 李百战, 马晓磊. 夏热冬冷地区非采暖空调室内可接受温度范围[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(4): 127-133.
Liu H, Li B Z, Ma X L. Acceptable temperature range of indoor environment without air conditioning and heating in hot summer and cold winter zone [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(4): 127-133.
- [18] 李俊鸽, 杨柳, 刘加平. 夏热冬冷地区人体热舒适的气候适应模型研究[J]. *暖通空调*, 2008, 38(7): 20-25.
Li J G, Yang L, Liu J P. Adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter zone [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2008, 38(7): 20-25.
- [19] 金玲, 孟庆林, 赵立华, 等. 粤东农村住宅室内热环境及热舒适现场研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(2): 105-112.
Jin L, Meng Q L, Zhao L H, et al. Indoor environment and thermal comfort in rural houses in east Guangdong of China [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(2): 105-112.
- [20] Zhang Y F, Wang J Y, Chen H M, et al. Thermal comfort in naturally ventilated buildings in hot-humid area of China [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(4): 2562-2570.
- [21] 孙庆伟, 李东亮. 人体生理学 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2009.
- [22] Cao B, Zhu Y X, Ouyang Q, et al. Field study of human thermal comfort and thermal adaptability during the summer and winter in Beijing [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(2): 1051-1056.
- [23] Makaremi N, Salleh E, Zaky M J, et al. Thermal comfort conditions of shaded outdoor spaces in hot and humid climate of Malaysia [J]. *Building and Environment*, 2012, 48(1): 7-14.
- [24] 李春喜, 邵云, 姜丽娜. 生物统计学 [M]. 4th. 北京: 科学出版社 2008. (编辑 胡玲)