



我国湿热地区人群基础 热舒适反应研究(2): 研究结果的对比分析*

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 张宇峰[☆] 陈慧梅 王进勇 孟庆林

摘要 基于我国湿热地区人群的气候室实验结果,从心理热反应、生理热反应和生理-心理关系等多方面对国内外研究结果进行了系统对比与分析,发现现行国际标准不适用于我国湿热地区,生理热习服和心理热适应是其重要原因。考虑热习服和热适应的影响作用,建立我国湿热地区人群的生理热调节模型与心理-生理模型,是掌握其基础热舒适反应规律、合理制定热环境标准的重要途径。

关键词 热舒适 湿热地区 生理热习服 热适应

Human thermal comfort research in hot-humid area of China (2): comparison between research findings

By Zhang Yufeng[★], Chen Huimei, Wang Jinyong and Meng Qinglin

Abstract Based on the climate chamber experiment results of human thermal comfort in hot-humid area of China, systematically compares and analyses the research results at home and abroad from the aspects of psychological thermal response, physiological thermal response and the relationship between psychology and physiology, and finds that the current international standard is not completely applicable to the hot-humid area of China mainly due to physiological thermal acclimatization and psychological thermal adaptation. The key approach to understand the basic thermal comfort response and set up the reasonable local thermal environment standard is to establish the thermoregulation model and psychological-physiological model considering the effects of thermal acclimatization and adaptation.

Keywords thermal comfort, hot-humid area, physiological thermal acclimatization, thermal adaptation

★ State Key Laboratory of Subtropical Building, South China University of Technology, Guangzhou, China

①

0 引言

人体热舒适研究始于上世纪 20 年代的美国,旨在探寻人体热感觉的变化规律,确定合理可行的建筑热环境参数,经过 80 多年的发展现已在多个国家陆续开展。热舒适的主要研究方法包括气候室实验和现场调查,前者是获取基础热舒适反应和建立热舒适指标与理论的主要依托。最为重要的

气候室实验由 Nevins 等人于 1966 年对 720 名美国大学生开展^[1]。Fanger 于 1970 年在丹麦重复进行了 Nevins 等人的气候室实验,结果表明,丹麦人和美国人的热感觉反应类似,并以上述研究结果

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50708038,50838003),华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室资助课题(编号:2008ZC18)

①☆ 张宇峰,男,1979 年 4 月生,博士研究生,工学博士,副教授
510641 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室建筑节能研究中心

(020) 87112304

E-mail: zhangyuf@scut.edu.cn

收稿日期:2009-05-26

修回日期:2010-03-09

为基础建立了著名的热舒适方程^[2]。因为热舒适方程是针对美国和丹麦受试者的实验结果建立的,其普遍适用性需要在不同国家的人群中加以验证。此后,包括日本、新加坡在内的许多国家和中国香港地区等都开展了类似的实验^[3-6],热舒适方程的适用性相继得到验证,热舒适方程现已被纳入建筑热环境的现行国际标准 ASHRAE Standard 55—2004^[7]及 ISO 7730^[8]中。

我国的热舒适研究起步较晚,针对我国不同地区人群的气候室实验一直未得到系统开展,现行国际标准在我国的适用性亟待大量基础性工作的验证。笔者沿用经典热舒适研究方法,针对我国湿热地区的典型人群进行气候室实验,获取其基本热反应特征,并从多个方面系统地比较国内外的研究成果,讨论国际标准在我国湿热地区的适用性。该气候室实验的实验方法与结果详见文献^[9],本文基于其实验结果进行国内外研究结果的对比分析。

1 国内外研究结果的对比分析

1.1 实测热感觉与 PMV 的比较

图 1 给出了实测热感觉平均值与 PMV 的计算值。通过 T-test 显著性分析发现,除修正温度为 20℃ 的工况外,其他工况的实测热感觉平均值均与 PMV 值存在显著性差异($p < 0.05$)。在湿热地区自然通风环境中长期生活的人群在微凉至暖的热环境中实测热感觉值显著低于 PMV 的计算值。也就是说,在中性偏热的环境中,湿热地区人群的热感觉上升较为迟缓,高温高湿环境下的热感觉值偏低,更为舒适;在中性偏凉的环境中热感觉下降较快,低温环境下热感觉值偏低,更不舒适。基于 PMV 制定的国际标准并不完全适用于我国湿热地区。

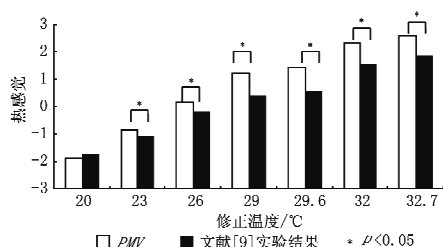


图 1 实测热感觉平均值与 PMV 计算值的比较

1.2 实测不满意百分比与 PPD 的比较

图 2 为预测不满意百分比(PPD)和从实验测得的可接受度转化得到的不满意百分比(PD)与修正温度(MT)之间的关系。当可接受度投票值大于 0

时,则认为对所处热环境满意,故不满意百分比为可接受度投票值小于 0 的人数与总人数的比值。

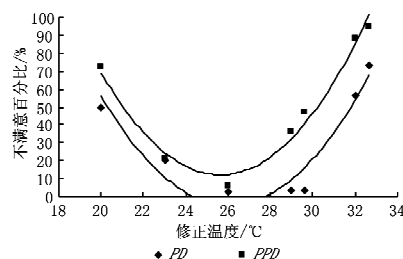


图 2 不满意百分比与 PPD 的比较

其二次多项式回归公式分别为

$$PPD = 1.7997MT^2 - 92.26MT + 1194.3 \quad (R = 0.99) \quad (1)$$

$$PD = 1.6543MT^2 - 86.242MT + 1119.2 \quad (R = 0.96) \quad (2)$$

中性偏凉环境下 PD 略小于 PPD,但差别不大;中性偏热环境下 PPD 随修正温度的上升趋势明显强于 PD。按相对湿度 50% 计算,实验得到的 90% 可接受操作温度范围为 23.1~29.1℃,80% 可接受操作温度范围为 22.2~29.9℃。按现行国际标准采用的 PMV-PPD 评价体系计算,90% 可接受操作温度范围为 24.1~26.9℃,80% 可接受操作温度范围为 23.3~27.9℃。相比可知,我国湿热地区自然通风环境中生活人群的夏季可接受温度范围较现行国际标准宽(90% 可接受温度范围宽 3.2℃,80% 可接受温度范围宽 3.1℃),可接受温度上限较现行国际标准高(90% 可接受温度范围上限高 2.2℃,80% 可接受温度范围上限高 2℃)。可接受温度范围上限的提高具有较大的节能潜力。

1.3 与其他地区气候室实验结果的比较

从上世纪 60 年代末开始,人体热舒适的气候室实验研究在世界各地得到了长足的发展,先后在美国、丹麦和日本开展。图 3 比较了这些研究的实验结果与笔者的实验结果^[9]。

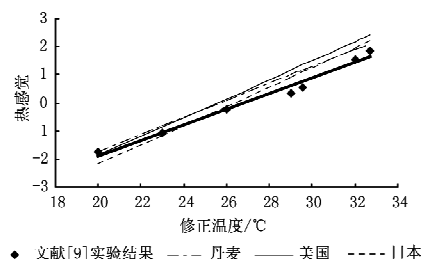


图 3 与国外气候室实验研究结果的比较

从图中可以看出,相对而言,我国湿热地区人群的热感觉对修正温度的变化最不敏感,且在中性偏热环境下热感觉的投票值最小。

我国香港和北京也开展了这方面的研究。1988 年 11 月到 1989 年 4 月,Chung 等人对 134 名香港学生进行了气候室实验,得到热感觉投票平均值 TSV 与修正温度的关系式为^[4]

$$TSV = 0.3615MT - 5.218 \quad (3)$$

周翔于 2007 年夏季在北京进行了温度在 26~32℃ 之间的四个工况的热舒适研究^[10]。将以上研究与笔者的实验结果^[9]进行对比(见图 4),可以发现,香港地区人群的热感觉对修正温度最为敏感,北京地区次之(斜率较大),笔者测试的我国湿热地区自然通风环境生活人群最不敏感。香港同属我国湿热地区,但其实验结果与笔者的实验结果相差较大,其原因可能在于香港地区人们生活水平较高,实验人群在夏季长期处于空调环境,对高温高湿环境的耐受力 and 适应力较笔者测试的自然通风环境生活人群差。北京地区的实验人群生活在自然通风环境,但北京属我国严寒地区,夏季较为短暂干燥,人群在高温高湿环境下的反应与湿热地区有所不同。

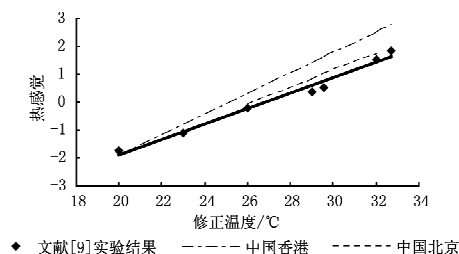


图 4 与国内气候室实验研究结果的比较

表 1 给出了国内外各个地区热舒适气候室实验得到的热中性温度,对比可知,我国湿热地区自然通风环境生活人群的热中性温度最高,与日本的研究结果相接近。

丹麦	美国	日本	中国香港	笔者测试的中国湿热地区
25.7	25.6	26.3	24.9	26.9

1.4 热感觉与热可接受度关系的探讨

文献[11]基于 2005 年对北京人群开展的气候室实验,分析得到了中性偏热范围内的热感觉与热可接受度之间的关系,并认为在稳态均匀热环境中,热可接受度与热感觉存在较好的线性相关关系。笔者也得到了类似的线性相关关系^[9],

相比来看(见图 5),笔者的实验结果与文献[11]相近,热感觉中性对应的热可接受度投票值为 0.6,热感觉投票值每增加 1,热可接受度投票值降低 0.4。

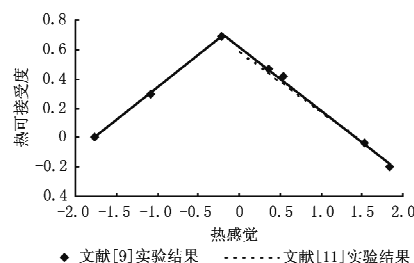


图 5 热可接受度与热感觉的关系对比

另外,笔者的实验还得出中性偏凉环境下热可接受度随热感觉的变化率的绝对值与中性偏热环境下近似相等,这说明热感觉 7 点标尺各个分度的心理学宽度相近不但体现在冷、热感觉上^[12],还体现在由其带来的热可接受度的感受上。全范围内最大热可接受度投票值为 0.7,相应的热感觉投票值为 -0.2,这与 McIntyre 等人的研究结果^[13]近似,也即夏季人们喜欢更为凉爽的环境和感受。热可接受度投票值为 0 对应的热感觉投票值为 -1.8 和 1.4,也即可接受的热感觉投票值范围为 -1.8~1.4,与以往研究结果^[11]相比,有向偏凉范围偏移的趋势。

1.5 热舒适与热可接受度关系的探讨

文献[11]基于 2003 年对丹麦人群开展的气候室实验^[14]分析得到了热舒适与热可接受度之间的关系,与笔者的实验结果^[9]相近(见图 6)。热可接受度投票值为 0 对应的热舒适投票值为 2.35,热可接受范围包括“舒适”和“有点不舒适”投票。热舒适投票值每增加 1,热可接受度投票值降低 0.7。不同国家不同地区的人群在热舒适和热可接受度的主观心理感受方面存在一定的相似性。

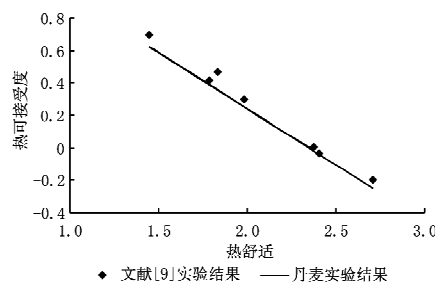


图 6 热可接受度与热舒适的关系对比

1.6 生理热反应的比较

实验测试的主要生理指标包括平均皮肤温度和皮肤湿润度,生理指标的变化趋势是解释受试者心理热反应变化的重要依据和途径。

实验测得的平均皮肤温度与修正温度的关系如图 7 所示。两节点模型^[15]由 Gagge 等人于 1971 年基于欧美地区人群的实验结果提出,是最为常用的人体生理热调节动态模型,也是计算标准有效温度(SET)的重要基础模型。应用两节点模型预测文献[9]实验工况对应的平均皮肤温度,并与实验结果对比可知(见图 7),两节点模型在低温和高温工况下都严重高估了我国湿热地区人群的平均皮肤温度,最大差值接近 2 °C;随着温度或湿度的升高,模型预测结果与实验结果的差值逐渐变小,但在文献[9]的实验范围内仍大于 0.8 °C。皮肤温度是评价生理热习服的一个重要指标^[16],皮肤温度的显著降低在一定程度上说明受试人群形成了对湿热地区夏季环境的热习服。

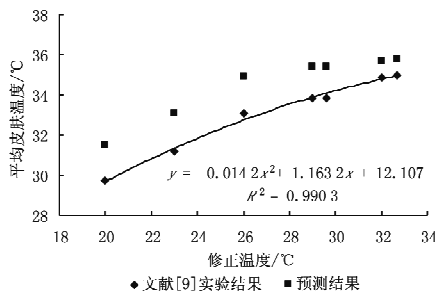


图 7 平均皮肤温度与修正温度的关系对比

根据实验测试数据计算得到的皮肤湿润度与修正温度的关系如图 8 所示。与平均皮肤温度类似,应用两节点模型预测得到实验工况对应的预测值。实验值与预测值相比可知(见图 8),我国湿热地区自然通风环境中生活人群的调节性出汗阈值接近 30 °C,高于两节点模型预测的阈值 28 °C,相同高温高湿工况下两节点模型高估了湿热地区人群的出汗率。

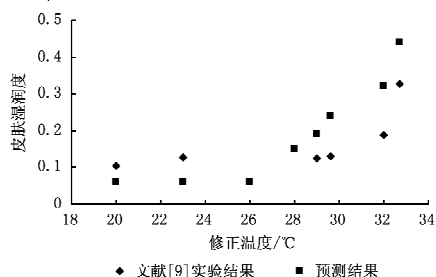


图 8 皮肤湿润度与修正温度的关系对比

以上对比分析结果与同处湿热地区的日本的研究结果^[3]相类似,而与湿热地区的香港的研究结果^[4]有所不同,在相对湿度高于 40% 的工况下香港受试者的出汗率高于两节点模型的预测值,其原因可能在于香港受试者长期生活于空调环境。由此可见,出汗率的变化不但与所处地区的气候特征有关,还与人群的生活环境和热经历有关,不能一概而论。

出汗阈值的升高和出汗率的降低是长期生理热习服的重要现象,这已被诸多研究证实^[17-18]。以上研究结果表明我国湿热地区人群因长年生活于自然通风环境,较好地形成了对当地环境气候的生理热习服。

1.7 平均皮肤温度与热感觉关系的探讨

Gagge 等人于 1967 年最早开始平均皮肤温度与热感觉关系的系统研究,他们通过实验发现,皮肤温度低于 33 °C 时,冷感觉对皮肤温度的变化非常敏感;温度为 33~34 °C 时热感觉对皮肤温度变化的敏感性较高,温度高于 34 °C 后敏感性变弱^[19]。Fiala 汇总了以往多项气候室实验研究结果,试图建立平均皮肤温度与热感觉的关系,其研究结果显示,在平均皮肤温度低于设定温度 3 °C 和高于设定温度 1 °C 的范围内,平均皮肤温度与热感觉呈线性关系,在此范围外呈指数函数关系,其中设定温度是指对应热感觉中性的平均皮肤温度^[20]。Zhang 认为皮肤平均温度在 29~34 °C 范围内时,全身热感觉与平均皮肤温度呈线性关系,在此范围之外线性关系消失^[21]。

图 9 为文献[9]和文献[19]得到的热感觉与平均皮肤温度之间关系的对比。由图可知,平均皮肤温度在 29~33 °C 时,二者的实验结果相近,在 33 °C 以上两种实验结果出现分离,笔者的实验结果明显低于 Gagge 等人的实验结果,但当平均皮肤温度上升至 35 °C 时二者数值又较为相近。

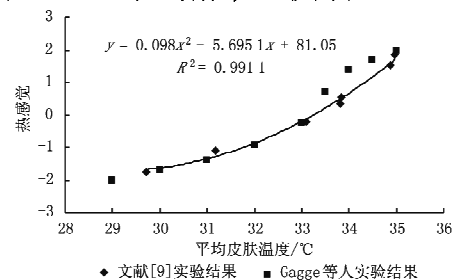


图 9 热感觉与平均皮肤温度的关系对比

文献[9]对应的设定温度为 33.2℃, 平均皮肤温度与热感觉的关系在 30.2~34.2℃ 范围内近似呈线性, 而在 34.2℃ 以上范围变化斜率陡增, 近似呈指数大于 1 的指数函数关系。由此可知, 笔者的实验结果显示的变化趋势与 Fiala 和 Zhang 等人的结果^[20-21]一致。

1.8 皮肤湿润度与热舒适关系的探讨

Gonzalez 等人于 1973 年针对美国受试者开展实验, 研究皮肤湿润度与热舒适感受的关系, 在很宽的温湿度范围内得到了二者较好的线性相关关系, 并由此奠定了标准有效温度的计算基础^[22]。将笔者的实验结果与 Gonzalez 等人的实验结果比较(见图 10)可知, 相同皮肤湿润度条件下, 我国湿热地区人群的热不舒适程度更高, 且热不舒适随皮肤湿润度变化的斜率更大, 对皮肤湿润度更为敏感。

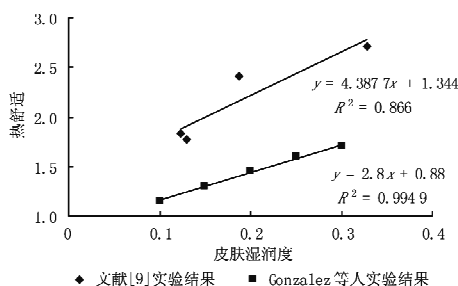


图 10 热舒适与皮肤湿润度的关系对比

2 结论

2.1 基于 PMV-PPD 的国际标准不完全适用于我国湿热地区, 我国湿热地区人群的可接受温度范围更宽, 可接受温度范围上限更高, 90% 可接受操作温度范围为 23.1~29.1℃。

2.2 与国内外气候室研究相比, 我国湿热地区人群的热中性温度较高, 高温高湿环境下的热感觉较低, 热感觉对修正温度变化较不敏感, 当地气候条件与生活环境 and 热经历造成的适应水平不同是其可能原因。

2.3 热感觉与热可接受度的关系及热舒适与热可接受度的关系在国内外的不同研究中较为相近, 夏季人们喜欢更为凉爽的环境和感受。

2.4 基于欧美国家人群的实验结果得出的两节点模型高估了我国湿热地区人群的平均皮肤温度和皮肤湿润度, 相比来看, 我国湿热地区人群出汗阈值较高, 出汗率较低, 平均皮肤温度较低, 体现了较

好的生理热习服特征。

2.5 我国湿热地区人群在中性至暖的热环境中具有如下特点: 相同平均皮肤温度下热感觉投票值偏低, 相同皮肤湿润度下热舒适投票值偏高。

2.6 在生理热反应、生理-心理关系和心理热反应等多个方面, 国内外研究结果存在显著差别, 生理热习服和心理热适应是其重要原因。考虑热习服和热适应的影响作用, 建立我国湿热地区人群的生理热调节模型与心理-生理模型, 是掌握其基础热舒适反应规律、合理制定热环境标准的重要途径。

参考文献:

- [1] Nevins R G, Rohles F H, Springer W, et al. A temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons [G]// ASHRAE Trans, 1966, 72 (1): 283-291
- [2] Fanger P O. Thermal comfort [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970
- [3] Tanabe S, Kimura K, Hara T. Thermal comfort requirements during the summer season in Japan [G]//ASHRAE Trans, 1987, 93(1): 564-577
- [4] Chung T M, Tong W C. Thermal comfort study of young Chinese people in Hong Kong [J]. Building and Environment, 1990, 25(4): 317-328
- [5] de Dear R J, Leow K G, Ameen A. Thermal comfort in the humid tropics—part I: climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore [G]//ASHRAE Trans, 1991, 97(1): 874-879
- [6] de Dear R J, Leow K G, Ameen A. Thermal comfort in the humid tropics—part II: climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore [G]//ASHRAE Trans, 1991, 97(1): 880-886
- [7] ASHRAE. ASHRAE Standard 55—2004 Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004
- [8] ISO. ISO 7730 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: International Organization for Standardization, 2005
- [9] 陈慧梅, 张宇峰, 王进勇, 等. 我国湿热地区人群基础热舒适反应研究(1): 实验方法与结果[J]. 暖通空调, 2010, 40(3): 83-88
- [10] 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

(下转第 25 页)