

我国湿热地区使用分体空调建筑的热舒适与热适应现场研究(1): 热环境与热感受^{*}

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 张宇峰[☆]

佛山益康置业有限公司 陈慧梅

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 孟庆林

摘要 在对广州某校使用分体空调建筑进行为期 1 年的现场调研基础上,对 33 周共计 1 395 人次的调研数据从热环境和热感受方面进行了分析,得到了我国湿热地区使用分体空调建筑的室内热环境变化特征,确定了热中性温度和 80% 可接受温度范围,分析了热感觉的季节变化,与人工气候室实验结果和自然通风建筑现场调研结果进行了综合对比,获得了湿热地区人群在建筑环境中的热适应特征。

关键词 湿热地区 使用分体空调建筑 现场研究 热舒适 热适应 热环境
热感受

Field study on thermal comfort and adaptation in buildings with split air-conditioners in hot-humid area of China (1): Thermal environment and perceptions

By Zhang Yufeng★, Chen Huimei and Meng Qinglin

Abstract Through analysis of the thermal environment and thermal perceptions based on the 1 395 sets of raw data in 33 weeks from a whole-year-long field survey on the buildings with split air-conditioners in a college in Guangzhou, finds the variations of indoor thermal environment, and obtains the thermal neutral temperature and 80% acceptable range. Obtains the adaptive characteristics of the people in built environment in hot-humid area of China through the comparisons with the results from various seasons, climate chamber experiments and field study in naturally ventilated buildings.

Keywords hot-humid area, building with split air-conditioner, field study, thermal comfort, thermal adaptation, thermal environment, thermal perception

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

①

0 引言

近年兴起的热适应研究发现,以往在人工气候室实验中得到的热舒适模型,不能准确预测人们在真实建筑中的热感觉;自然通风建筑,因其提供大量的被动调节手段,相比于采用全年集中空调的建筑,居住者有更高的中性温度,能接受更大的温度变化范围^[1-2]。由此提出的热适应模型认为,人不再是给定热环境的被动接受者,而是通过多重反馈循环与人-环境系统交互作用的主动参与者;人在热环境中的感受不仅受其自身与环境间的热平衡制约,还可能与所处建筑的类型和当地的气候背景有关。受此启发,研究者在世界各地的不同类型建筑中,开展了大量的热舒适现场研究,它们因富含实际建筑的真实性、人与环境的交互作用和各种适应机会^[3],为热适应研究提供了有力的数据支撑。

我国南方的湿热地区,夏季漫长,高温高湿,气候特征鲜明;经济发达,人口众多,建筑存量和能耗巨大。在我国湿热地区开展热舒适的现场研究,对提高建筑热环境质量、指导建筑被动式设计和空调系统设计等具有重要的意义和价值。

以往在湿热地区开展的热舒适现场研究较少,且多集中于集中空调系统控制或自然通风建筑。笔者及其团队于2008—2009年针对湿热地区的自然通风建筑开展了为期1年的现场调研,分析了自

然通风建筑的热环境、热舒适及热适应反应的变化特征^[4]。作为此项工作的延续,笔者于2009—2010年对湿热地区使用分体空调的建筑开展了为期1年的现场研究。

安装和使用分体空调的建筑,在我国南方地区的居住和办公建筑中广泛分布,量大面广。以我国湿热地区经济较为发达的广东省为例,城镇居民的空调器拥有量在2010年底已高达2台/户^[5],居全国榜首,其中分体式空调又占绝大多数^[6]。对使用分体空调的建筑开展热舒适研究,将为湿热地区广泛分布的居住和办公建筑提供热环境设计与节能方面有价值的指导和参考信息。

从现有热适应模型和观点看,使用分体空调的建筑,其热适应特征有别于以往受到较多关注的自然通风和集中空调建筑。一方面,使用分体空调的建筑为人们提供了诸如门窗开启、使用风扇和调整服装等丰富的调节手段和适应机会,这与自然通风建筑相似;而在另一方面,它又与采用集中空调系统的建筑相似,能够为人们提供不随室外气温变化、凉爽而恒温的热经历。故此,使用分体空调的建筑中人体的热适应特征可能介于自然通风与集中空调建筑之间,对其加以研究,将为建筑环境中人体的热适应提供新的理解

①☆ 张宇峰,男,1979年4月生,博士,副教授
510640 广州天河五山华南理工大学建筑学院
(020) 87112304
E-mail: zhangyuf@scut.edu.cn
收稿日期:2012-08-20
一次修回:2012-09-16
二次修回:2013-12-03

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50708038,50838003),新世纪优秀人才支持计划资助项目(编号:NCET-10-0373),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:2010ZB05)

和认识。

综上,本研究以我国湿热地区使用分体空调的建筑物热舒适现场研究为主题,分析建筑热环境、使用者的热感受和适应行为的变化特征,并与前期开展的自然通风建筑调研和以往研究结果相对比,以期获得湿热地区人群在建筑环境中的热适应规律,为今后湿热地区不同类型建筑的室内热环境设计与评价提供参考。限于篇幅要求,本文仅介绍热环境与热感受的研究结果,适应行为的分析见文献[7]。

1 研究方法

1.1 气候与建筑

选择在我国湿热地区的典型城市广州市展开研究。位于北纬 $23^{\circ}08'$ 、东经 $113^{\circ}19'$ 的广州,夏季高温高湿,7月平均气温 28.4°C ,相对湿度 82%;夏季从5月中旬开始,至10月中旬结束^[4],长达5个月之久;冬季短暂,1月平均气温为 13.3°C ;全年的气温日较差仅为 7.5°C 。

选择广州某学院的宿舍楼和教学楼作为本研究的调研建筑。这些建筑在功能房间都安装了分体空调器,同时也提供电风扇,门窗可开启。宿舍楼的房间,一般3~4人同住,共用1台空调器,空调器完全由居住者使用和控制,电费也由居住者负担,这与住宅的情况近似;而在教学楼,15人以上共用1个教室的空调器,一般由教师或管理员负责调控,电费由学校统一负担,这与小型办公楼的情况相近。

1.2 受试者

随机选取在调研建筑中学习和生活的大学生共30人作为受试者,男女各一半,基本信息见表

1。为确保受试者对调研建筑的热环境有充分的热经历,对调研所在的湿热气候有充分的热习服,所选大学生均出生和长期生活于珠江三角洲地区(我国典型的湿热地区),在调研建筑中已学习和生活1年以上。

表 1 受试者的基本信息

性别	人数	年龄	身高/ cm	体重/ kg	体质指数 BMI/(kg/m ²)
男	15	20±1 ¹⁾	173.7±7.0	64.9±6.6	21.5±1.7
女	15	20±1	159.5±5.5	48.8±5.6	19.1±1.2
全部	30	20±1	166.6±9.5	56.8±10.1	20.3±1.9

1) 标准偏差。

1.3 现场调研方法

研究采用纵向设计(longitudinal design)的方法,即对相同受试者在一段时间内作重复观测。考虑到频繁的重复观测可能造成过度熟悉和厌烦^[8]的不利影响,每周仅对每一受试者作2次调研(分别在宿舍和教室)。每次调研用时约15 min,期间由受试者完成1份调查问卷,由调研人员测试受试者所处环境的物理量。

选用满足 ISO 7726^[9] 标准要求的仪器(见表2和图1),对空气温度、相对湿度、黑球温度和空气流速4个热环境物理量进行测试。测点位置距受试者0.3 m以内,高度分别取0.1、0.6、1.1 m,对应坐姿人体的脚踝、腹部和头部(见图1)。

表 2 测试仪器的基本信息

物理量	仪器	量程	精度
空气温度	RHLOG 系列温湿度 自记仪	-20~ 75 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
相对湿度	WBGT-103 热指数仪	10%~90%	$\pm 5\%$
黑球温度	WBGT-103 热指数仪	0~80 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
空气流速	HD 2303.0 万向型微 风速仪	0~5 m/s	$\pm 0.02\text{ m/s}$ (0~ 0.99 m/s), ± 0.1 m/s(1~5 m/s)



图 1 热环境物理量现场测试

调查问卷分3个部分:活动量和服装,门窗和风扇等适应行为,热感受。3种热感受,即热感觉、热舒适和热可接受度,采用图2给出的标尺进行投票。其中,采用ASHRAE 9点而非7点标尺进行热感觉投票,主要考虑到调研建筑夏季可能出现很

热的情况。

调研从2009年1月至2010年1月持续1年,期间因寒暑假有部分中断,再加上个别情况人员缺席等影响,总计获得33周1395人次的原始数据。对照广州地区的季节划分,将此33周数据对应到

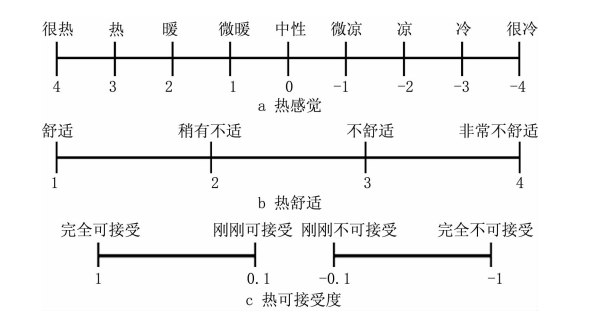


图2 调查问卷用投票标尺

月份,并划分为不同季节,如表3所示。

表3 周次、月份与季节

周次	月份	季节	周次	月份	季节
1~5	3月	春季	21	10月上旬	夏季
6~9	4月	春季	22~23	10月下旬	秋季
10~11	5月上旬	春季	24~27	11月	秋季
12~13	5月下旬	夏季	28~32	12月	秋季
14~18	6月	夏季	33	1月	冬季
19~20	9月	夏季			

除以上现场调研外,还在调研建筑中安放了温湿度自记仪,以获取受试者使用分体空调的行为特征。因教学楼使用者不固定,人员流动大,考虑安全和管理等因素,仅在宿舍楼放置自记仪。选用RHLOG系列温湿度自记仪10台,安放在10个宿舍房间内,以±0.3℃和±3%的精度连续测试并记录,记录时间持续1年。

2 结果分析与讨论

2.1 热环境

2.1.1 空气温度与相对湿度

将每周对30名受试者在不同建筑的调研数据取平均值作为周平均值,分析室内温湿度的逐周变化,结果如图3所示。

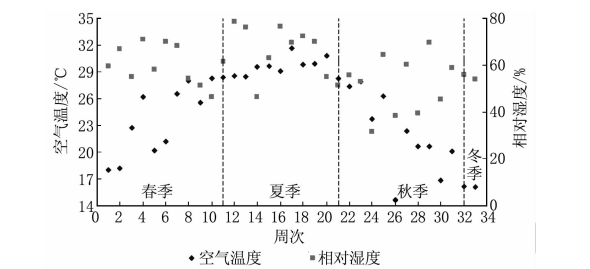


图3 空气温度与相对湿度的逐周变化

空气温度春季由18.0℃升至28.3℃;夏季在28.3~31.7℃之间波动,平均为29.6℃;秋季由27.9℃快速下降(期间第26周出现温度突降,达14.6℃,而后上升),最终达到冬季最低值16.1

℃。相对湿度的平均值春季为60%,夏季为66%,秋季为52%,冬季为54%。

与广州市典型气象数据(见图4)相比可知,使用分体空调建筑的室内热环境与室外气候关系密切,室内温湿度紧随室外温湿度而变化。

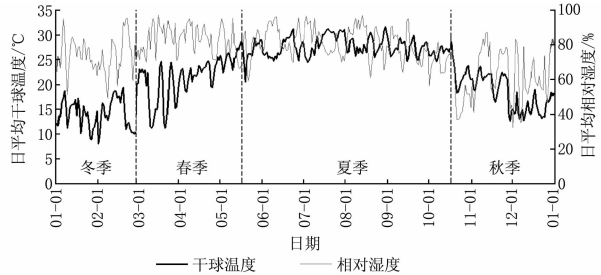


图4 广州市典型气象年空气温度与相对湿度的日变化^[10]

2.1.2 空气流速与平均辐射温度

空气流速和平均辐射温度的逐周变化如图5所示,其中,平均辐射温度由空气温度、黑球温度和空气流速三者计算得到。

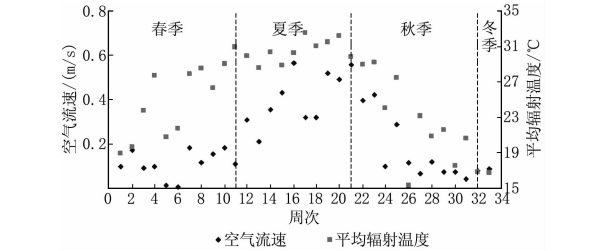


图5 空气流速与平均辐射温度的逐周变化

由图5可以看出,春季受试者周边空气流速保持在0.11 m/s的低水平,夏季迅速提升至0.41 m/s,到秋季又快速降低到较低水平;平均辐射温度的逐周变化趋势与空气温度相近,在大多数情况下辐射温度高于空气温度,差值全年平均约1℃,这意味着调研建筑环境中的热辐射作用不可忽略。

2.1.3 不均匀性

热环境物理量均在3个高度上进行测试,不同高度间测量结果的最大差值可在一定程度上表征热环境分布的不均匀性。本文将此称之为热环境不均匀度,其计算结果如表4所示。

表4 热环境不均匀度及相应的平均值

	春季	夏季	秋季
空气温度/℃	0.3/23.9	0.3/29.6	0.6/21.5
相对湿度/%	2/60	1/66	3/52
黑球温度/℃	0.3/24.0	0.2/30.0	0.5/22.2
空气流速/(m/s)	0.06/0.11	0.23/0.41	0.09/0.16

注:“/”前后分别为不均匀度和参数平均值。

由表4可知,4个物理参数中,温湿度相对不

均匀度(即不均匀度与平均值之比)较小,而空气流速的相对不均匀度较大,开窗和风扇造成的室内空气分布不均是其主要原因。

2.1.4 个人因素

活动量和服装是 2 个影响人体热感觉和热舒适的个人因素。在本文的研究中,大多数情况下受试者在调研前为静坐活动,调研期间静坐填写问卷 15 min,综合考虑可认为,对应于受试者在问卷中的热感受投票反应,相应的活动状态为静坐,新陈代谢率为 1.0 met。

受试者在调研建筑中享有充分的服装调整的自由。服装调整被许多研究视为一种重要的适应机会和行为,其结果与其他适应行为见文献[7]。

2.2 热感觉

2.2.1 热感觉的逐周变化

热感觉的逐周变化如图 6 所示。受试者的热感觉春季由微凉升至微暖,夏季维持在微暖和暖之间(除第 17 周外),秋季热感觉投票值快速下降,冬季的热感觉在凉和冷之间。

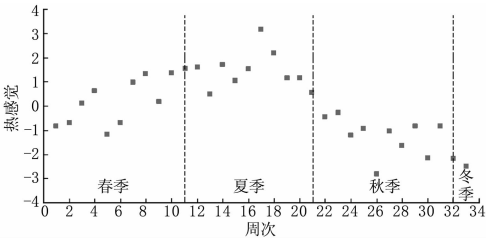


图 6 热感觉的逐周变化

2.2.2 热感觉与室内热环境的关系

对比图 3 和图 6 可知,热感觉有与空气温度相近的变化趋势。在以往的热舒适现场研究中^[11-18],热感觉通常与室内热环境指标建立一定的关系,常见的指标包括空气温度、黑球温度、作业温度和新有效温度等简单指标,以及 PMV 和标准有效温度等综合指标。

笔者及其团队曾从机理研究的角度对不同指标的优劣加以探讨,指出综合指标具有全面体现热环境特征和表达含义更为明确等优点^[3-4]。但从另一方面,也即实用的角度而言,简单指标最为人所熟知和常见,在限定的前提和条件下,简单指标所得的关系式也能揭示一定的规律和特征,且更容易理解和应用。故此,本文尝试将热感觉分别与简单和综合指标建立关系。

空气温度最为简单实用,应用范围最广;已有

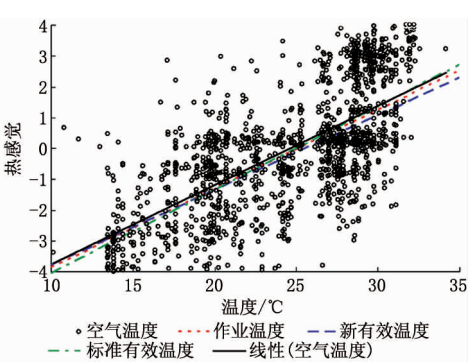
的研究中,与作业温度相关的结果最为丰富;高湿是湿热地区气候特征的重要方面,同时考虑湿湿度作用的新有效温度,能更全面地表征室内热环境的作用;综合指标中,标准有效温度较 PMV 的适用范围更大。综合考虑以上因素,选取空气温度(t_a)、作业温度(t_{op})、新有效温度(ET^*)和标准有效温度(SET)作为室内热环境指标,与热感觉(TS)建立的关系如下(见图 7):

$$TS = 0.257\,1t_a - 6.334\,7 \quad (R^2 = 0.452\,1)$$
(1)

$$TS = 0.256\,1t_{op} - 6.420\,9 \quad (R^2 = 0.454\,1)$$
(2)

$$TS = 0.243\,2ET^* - 6.211\,0 \quad (R^2 = 0.472\,3)$$
(3)

$$TS = 0.270\,9SET - 6.760\,4 \quad (R^2 = 0.336\,5)$$
(4)



注:作业温度、新有效温度和标准有效温度仅显示回归线

图 7 热感觉与各热环境指标的关系

热感觉与各热环境指标均呈线性关系,即热感觉随温度的上升而线性提高;不同热环境指标的关系式区别不大,斜率相差在 0.03 以内,热中性温度相差在 1℃以内;热感觉与热环境指标的相关性(见 R^2),以新有效温度最高,这可能与湿热地区建筑室内环境较高的湿度和不能忽略的热辐射作用有关。

对应各指标的热中性温度与可接受温度范围如表 5 所示,其中,可接受范围依“ASHRAE 热感觉标尺中间 3 个分度为可接受”的假设确定,也即对应于热感觉±0.85 之间的温度。

表 5 热中性温度与可接受温度范围			
热环境指标	热中性温度/ ℃	80%可接受 范围下限/℃	80%可接受 范围上限/℃
空气温度	24.6	21.3	27.9
作业温度	25.1	21.8	28.4
新有效温度	25.5	22.0	29.0
标准有效温度	25.0	21.8	28.1

2.2.3 与以往研究结果的对比

将本文与湿热地区的以往研究结果相对比,结果见表 6~8。

表 6 湿热地区不同研究结果的对比(作业温度)

国家或地区	建筑类型	热中性温度/℃	斜率/℃ ⁻¹	参考文献
澳大利亚	空调	24.2	0.522 0	[19]
台湾	空调	25.5	0.345 3	[20]
香港(夏季)	空调	23.5	0.361 8	[21]
台湾	自然通风	24.9	0.337 6	[20]
长沙、广州、深圳(夏季)	分体空调 + 自然通风	28.6	0.409 0	[22]
广州	分体空调	25.1	0.256 1	本文

注:建筑类型中,空调建筑指安装集中空调系统的建筑,自然通风建筑指全年自然通风的建筑,分体空调建筑指使用分体空调器的建筑。

表 7 湿热地区不同研究结果的对比(新有效温度)

国家或地区	建筑类型	热中性温度/℃	斜率/℃ ⁻¹	参考文献
台湾(夏季)	空调+自然通风	26.6	0.141 3	[23]
新加坡	自然通风	29.3	0.340 2	[24]
台湾	分体空调	26.1	0.257 0	[25]
广州	分体空调	25.5	0.243 2	本文

表 8 湿热地区不同研究结果的对比(标准有效温度)

国家或地区	建筑类型	热中性温度/℃	斜率/℃ ⁻¹	参考文献
泰国	空调	24.4	0.182 0	[12]
泰国	自然通风	22.8	0.152 0	[12]
广州	分体空调	25.0	0.270 9	本文

由表 6 可知,本文得到的热中性温度与台湾地区的自然通风建筑相近,而与湿热地区的空调建筑不同,后者一般较低;本文得到的斜率最小,其次为台湾的自然通风建筑,空调建筑较大。台湾自然通风建筑人群的敏感度高于广州的分体空调建筑人群,这可能与两地气候背景的差异有关,前者处于台中地区,与广州相比,其气温年变化较小,夏季温湿度略低。在长沙、广州和深圳等地所得的结果与本文相差较大,其原因可能在于前者局限于夏季而本文是全年结果。

由表 7、8 可知,本文结果无论是热中性温度还是斜率,都与台湾的分体空调建筑相近;与泰国的结果相比,本文的热中性温度更高,斜率更大。

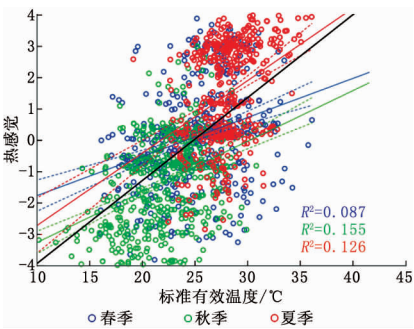
另外,与以往欧美国家在人工气候室实验中获得的热感觉与标准有效温度的关系^[26](23.9℃和 0.248℃⁻¹)相比,本文现场研究得到的热中性温度更高,斜率更大。

2.2.4 热感觉的季节变化

随季节而发生变化,也是人在建筑环境中热适应的可能表现之一。上节所得关系均为全年不同季节汇总后的综合结果。针对热感觉与热环境指标的关系,尝试将夏、春、秋 3 个季节分开分析,并

与全年汇总结果相对比。冬季仅调研 1 周,数据过少,故不作分析。

因不同季节的相对湿度、空气流速、人员服装等参数变化较大,如就热感觉与简单指标的关系作观察,分析其季节变化的原因,无法排除是其他热环境或个人因素的季节变动。因标准有效温度已综合考虑了所有已知因素的变动,对比结果可合理体现未知的人体适应方面的影响。故选热感觉与标准有效温度的关系作观察,结果如图 8 所示。



注:实线为各季节回归线,虚线为回归均值的 95% 置信区间,黑实线为全部数据的回归线

图 8 热感觉与标准有效温度关系的季节变化

由图 8 可知,春夏季的热中性温度接近,低于秋季;夏季的热敏感性较强(也即回归线斜率较大),春秋季节较弱,这与前期笔者的自然通风建筑调研结果^[4]和日本的研究结果^[27]相近。另外由图 8 可知,全年汇总后的结果,无论热中性温度还是热敏感性,均居不同季节结果之间,在较热端渐与夏季接近,较冷端渐与秋季接近。全年汇总的结果可较好体现不同季节热感觉随环境变化的总体趋势和范围。

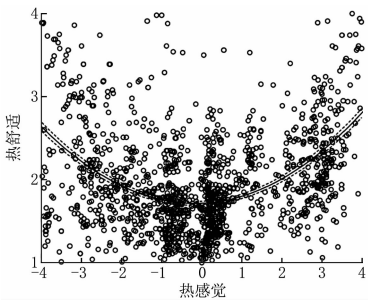
2.3 热舒适

通过热舒适与热感觉的逐周变化可以发现,它们存在一定的关联,在热感觉接近中性时,较为舒适,而在热感觉远离中性时较为不适。已知的热舒适与热感觉关系多在严格受控的人工气候室中得到^[28-30],其结果显示,热感觉标尺中间的 3 个分度对应舒适,其余分度的投票对应稍有不适和不适。

对本文得到的热舒适和热感觉投票结果建立关系,如图 9 所示,热舒适(TC)与热感觉呈二次多项式关系:

$$TC = 0.063TS^2 + 0.021TS + 1.716 \quad (R^2 = 0.213) \quad (5)$$

热感觉中性对应于最为舒适的反应,热感觉远离中性时,不适感逐渐增强,暖和凉的热感觉对应



注:实线为回归线,虚线为回归均值的 95%置信区间

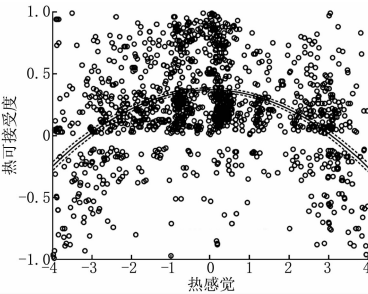
图 9 热舒适与热感觉的关系

于稍有不适。这些现场调研的结果与以往气候室实验的结果保持一致。

2.4 热可接受度

实现热环境 80%的可接受度或满意度,已作为美国 ASHRAE 55 标准多年以来不变的目标。确定达到 80%可接受的热环境条件,一般依据“ASHRAE 热感觉标尺中间 3 个分度为可接受”的假设。此假设最早在人工气候室实验中获得^[28,31],并在后期的气候室研究中得到进一步的证实^[29-30,32]。

对本文的热可接受度与热感觉投票建立关系,如图 10 所示,热可接受度(TA)与热感觉呈如下的



注:实线为回归线,虚线为回归均值的 95%置信区间

图 10 热可接受度与热感觉的关系

二次多项式关系:

$$TA = -0.039TS^2 - 0.001TS + 0.371 \quad (R^2 = 0.191) \quad (6)$$

热中性对应于可接受度的最大值,这与以往的结果一致。但与以往研究有明显不同的是,可接受的热感觉范围(也即热可接受度>0 的热感觉)从中间 3 个分度扩展到包括暖和凉在内的 5 个分度,范围明显拓宽。

产生以上差异的可能原因有二:其一,本文使用的 9 点标尺,在 7 点标尺基础上增加了 2 个额外分度很热和很冷,这可能潜在地扩展了受试者的感

觉视野,继而拓宽了他们视为可接受的感觉范围;其二,参与本文研究的受试者,对当地的湿热气候和调研建筑的湿热环境有较充分的习服和适应,这种背景造成了较宽的热感觉经历,继而可能拓展了他们视为可接受的感觉范围。

2.5 不满意百分比

由 Fanger 基于人工气候室实验提出的 PPD-PMV 关系^[31],作为不满意百分比与热感觉的对应关系,被纳入国际标准^[33-34],广泛应用于室内热环境的评价和工程设计指导。上节的分析发现,现场研究中得到的可接受热感觉范围与人工气候室结果明显不同,故此,本文尝试建立不满意百分比与热感觉的关系,并与 PPD-PMV 关系进行对比。

先将原始数据按热感觉投票分组,每变化 0.25 个刻度为 1 组,共分成 32 组。对每组数据,统计热可接受度投票小于 0 的比例,即得到其不满意百分比。在此基础上,分析不满意百分比(PD)与热感觉的对应关系。因各组的样本量可能相差较大,按样本量加权作统计分析,结果如下(见图 11):

$$PD = 3.583TS^2 + 0.056TS + 4.850 \quad (R^2 = 0.836) \quad (7)$$

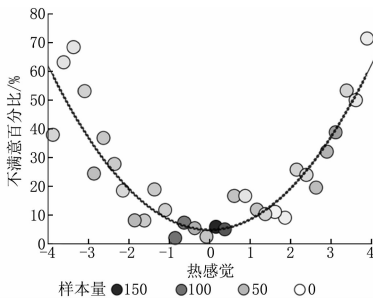


图 11 不满意百分比与热感觉的关系

热感觉中性对应不满意百分比最低值 5%,这与 Fanger 得到的结果一致;80%满意(即 20%不满意)对应的热感觉投票范围,按 PPD-PMV 关系式计算为-0.85~0.85,而按本文得到的关系式计算为-2.1~2.1。后者明显宽于前者,这又一次证实了上一节的发现,即本文现场研究得到的可接受或满意的热感觉范围较以往气候室实验得到的热感觉范围大。

按以上结果重新计算,得到 80%的可接受空气温度范围为 16.5~32.8℃,这比按传统假设计算的范围更大,与 Hwang 等人在台湾教室现场研究中发现的趋势^[23]一致。

2.6 与自然通风建筑的对比

将本文研究结果与笔者前期的自然通风建筑现场研究结果相对比,如表 9 所示。分体空调主要在夏季使用,故仅就夏季的热环境情况加以比较。

表 9 夏季分体空调建筑与自然通风建筑的对比		
	分体空调 建筑	自然通风 建筑 ^[4]
平均空气温度/℃	29.6	30.4
平均相对湿度/%	66	70
平均辐射温度/℃	30.5	31.0
平均空气流速/(m/s)	0.41	0.44
热中性标准有效温度/℃	25.0	25.4
热感觉对标准有效温度的敏感度/℃ ⁻¹	0.270 9	0.256

由表 9 可知,与自然通风建筑相比,使用分体空调的建筑在夏季有较好的室内热环境,表现为较低的平均空气温度、湿度和辐射温度。相应地,受试者调节其周边空气流动的流速也较低。从热感觉看,使用分体空调的受试者,其热中性温度略低,热敏感性略强。较好的室内热环境经历、略低的热中性温度和略强的热敏感性,是使用分体空调建筑人群与自然通风建筑人群不同的主要特征。

2.7 与 ASHRAE 标准的比较

ASHRAE 55 标准^[33]规定了空调建筑和自然通风建筑的可接受热环境条件,前者以 PMV 为基础,后者以热适应模型为基础。

首先将本文结果与空调建筑的规定相比较。按 90%可接受度标准,考虑常规的冬夏季服装和活动量以及微风速,ASHRAE 给出的可接受作业温度范围为 20~27℃,如考虑室内空气流速增至 0.4 m/s,则上限可升至 29℃。按本文式(2),(7)计算可知,90%可接受的作业温度范围为 20.4~29.8℃。由此可知,本文得到的可接受温度范围与 ASHRAE 55 标准考虑增加风速的空调建筑规定较为接近。

再将本文结果与自然通风建筑的规定相比较。取广州最冷最热月平均气温(13.3℃和 28.4℃),查 ASHRAE 55 标准的图 5.3 可知,全年 80%的可接受作业温度范围为 18.4~30.1℃。按上述办法计算,本文的 80%可接受作业温度范围为 16.9~33.3℃,这比标准中的自然通风建筑规定的范围更大。

3 结论

3.1 室内热环境的主要特征为:紧随室外气候而变化;夏季高温高湿,平均空气温度 29.6℃,相对湿度 66%;春季潮湿,平均相对湿度 60%;平均辐射温度普遍高于空气温度 1℃左右;空气流速随季节变化明显,夏季平均为 0.41 m/s。

3.2 全年的热中性空气温度为 24.6℃,80%可接受范围为 16.5~32.8℃,这可作为评价和设计使用分体空调建筑室内热环境的重要依据。

3.3 与湿热地区自然通风建筑人群相比,使用分体空调建筑的人群,有较好的室内热环境经历、略低的热中性温度、略强的热敏感性以及相似的季节适应;与以往欧美国家的人工气候室实验结果相比,湿热地区使用分体空调建筑的人群,有较高的热中性温度、较强的热敏感性和更大的可接受范围。以上结论,是湿热地区人群在建筑环境中热适应的重要特征。

参考文献:

[1] Brager G S, de Dear R J. Thermal adaptation in the built environment: a literature review[J]. Energy and Buildings, 1998, 27(1): 83-96

[2] Brager G S, de Dear R J. 建筑环境热适应文献综述[J]. 陈慧梅, 张宇峰, 翟永超, 译. 暖通空调, 2011, 41(7): 35-50

[3] 张宇峰,赵荣义. 建筑环境人体热适应研究综述与讨论[J]. 暖通空调, 2010, 40(9): 38-48

[4] 张宇峰,王进勇,陈慧梅. 我国湿热地区自然通风建筑热舒适与热适应现场研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(9): 91-99

[5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011

[6] 李兆坚,江亿. 我国房间空调器材料资源消耗状况分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(3): 25-31

[7] 张宇峰,陈慧梅,孟庆林. 我国湿热地区使用分体空调建筑的热舒适与热适应现场研究(2): 适应行为[J]. 暖通空调, 2014, 44(1): 15-23

[8] Wyon D P. 室内环境研究的方法论[J]. 张宇峰, 译. 暖通空调, 2006, 36(5): 51-54

[9] ISO. ISO International Standard 7726 Ergonomics of the thermal environment —instruments for measuring physical quantities[S]. Geneva: ISO, 1998

[10] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005

[11] Heidari S, Sharples S. A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran [C] // Conference Proceedings on Moving Thermal Comfort Standards into 21st Century. Windsor, UK, 2001

[12] Busch J F. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand[J]. Energy and Buildings, 1992, 18(3/4): 235-249

- [13] Buratti C, Ricciardi P. Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: correlation between experimental data and mathematical models [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 674–687
- [14] Nicol J F, Raja I A, Allaudin A, et al. Climatic variations in comfortable temperatures: the Pakistan projects [J]. *Energy and Buildings*, 1999, 30(3): 261–279
- [15] Brager G S, Paliaga G, de Dear R J. Operable windows, personal control, and occupant comfort [G] // *ASHRAE Trans*, 2004, 110(2): 17–35
- [16] Karyono T H. Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta-Indonesia [J]. *Building and Environment*, 2000, 35(1): 77–90
- [17] Feriadi H, Wong N H. Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia [J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(7): 614–626
- [18] Wong N H, Khoo S S. Thermal comfort in classrooms in the tropics [J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35(4): 337–351
- [19] de Dear R J, Fountain M E. Field experiments on occupant comfort and office thermal environments in a hot-humid climate [G] // *ASHRAE Trans*, 1994, 100(2): 457–475
- [20] Cheng M J, Hwang R L, Lin T P. Field experiments on thermal comfort requirements for campus dormitories in Taiwan [J]. *Indoor and Built Environment*, 2008, 17(3): 191–202
- [21] Chan W T, Burnett J, de Dear R J, et al. A large-scale survey of thermal comfort in office premises in Hong Kong [G] // *ASHRAE Trans*, 1998, 104(1B): 1172–1180
- [22] Hana J, Zhang G, Zhang Q, et al. Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(12): 4043–4050
- [23] Hwang R L, Lin T, Kuo N. Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(1): 53–62
- [24] Feriadi H, Wong N H, Chandra S, et al. Adaptive behavior and thermal comfort in Singapore's naturally ventilated housing [J]. *Building Research & Information*, 2003, 31(1): 13–23
- [25] Hwang R, Cheng M, Lin T, et al. Thermal perceptions, general adaptation methods and occupant's idea about the trade-off between thermal comfort and energy saving in hot-humid regions [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(6): 1128–1134
- [26] McIntyre D A. *Indoor climate* [M]. London: Applied Science Publishers Ltd, 1980
- [27] Goto 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(12): 3944–3954
- [28] Gagge A P, Stolwijk J A J, Hardy J D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures [J]. *Environmental Research*, 1967, 1(1): 1–20
- [29] Zhang Y, Zhao R. Overall thermal sensation, acceptability and comfort [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 44–50
- [30] Zhang Y, Zhao R. Relationship between thermal sensation and comfort in non-uniform and dynamic environments [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(7): 1386–1391
- [31] Fanger P O. *Thermal comfort* [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970
- [32] Berglund L G. Thermal acceptability [G] // *ASHRAE Trans*, 1979, 85(2): 825–834
- [33] ASHRAE. *ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy* [S]. Atlanta: ASHRAE, 2004
- [34] ISO. *ISO International Standard 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: ISO, 2005