

# 夏热冬冷地区非采暖空调室内可接受温度范围

刘红, 李百战, 马晓磊

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**为了编制“中国民用建筑室内热湿环境评价标准”,需要得到夏热冬冷地区建筑室内非采暖空调环境下的可接受温度范围。以重庆地区为代表,于2007—2009年期间,针对办公建筑和居住建筑进行了为期2年的热环境逐月现场测试和问卷调查。在了解该地区非采暖空调室内外热环境现状的基础上,进行了室内热环境满意度的主观评价以及热适应性的分析。在此基础上提出了确定夏热冬冷地区非采暖空调室内环境的可接受温度范围的方法。通过对获取数据按温度段进行回归分析,结合实验室人体生理和心理实验结果,获得了重庆地区建筑室内非采暖空调环境下根据全年室外空气温度变化而确定的可接受空气温度范围框图。最后,对比讨论了国际相关标准非采暖空调环境下的室内可接受温度范围及确定方法。

**关键词:**室内热舒适;热适应性;室内环境;可接受温度范围;建筑节能

**中图分类号:**TU834.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)04-0127-07

## Acceptable Temperature Range of Indoor Environment without Air Conditioning and Heating in Hot Summer and Cold Winter Zone

LIU Hong, LI Bai-zhan, MA Xiao-lei

(Key Laboratory of Three Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In order to establish “Evaluation Standard for indoor thermal environment of civil buildings”, acceptable temperature range of indoor environment without air conditioning and heating in hot summer and cold winter zone is indispensable. A two-year field measurement and questionnaire survey were carried on from 2007 to 2009 in Chongqing, which focused on office buildings and residential buildings. After the analysis of indoor and outdoor environment, occupants' evaluation and thermal adaptability, a method to obtain the acceptable temperature range, was proposed. Regressing data by temperature range, and combined with human physiological and psychological experiments, the acceptable temperature range of environment without air conditioning and heating in Chongqing was determined according to outdoor air temperature changes in one year. A Comparison of methods to determine the acceptable temperature range in some international standards was discussed.

**Key words:** indoor thermal comfort; thermal adaptability; indoor environment; acceptable temperature range; building energy efficiency

随着现代社会的经济发展和人民生活水平快速提高,冷热空调的应用越来越普遍。空调环境下,为了使热环境满足人体处于热中性状态而控制环境温

度,往往出现建筑室内冷热负荷过大的现象,夏季室内过冷、冬季室内过热的状况经常可见,造成能源浪费和过度的温室气体排放。国际上发达国家的建筑

收稿日期:2011-01-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(50838009)

作者简介:刘红(1966-),女,副教授,主要从事建筑环境与建筑节能研究,(E-mail)liuhong1865@163.com。

用能已占全社会用能40%~50%，中国建筑用能已占社会用能的30%左右<sup>[1]</sup>，因此，建筑室内热环境和热适应性研究有着非常重要的意义，即充分发挥人体热适应能力，最大限度利用非采暖空调环境，减少空调的使用，降低建筑设备能耗，减缓气候变化，同时也可以避免“空调不适应症”等健康问题。

非采暖空调环境在美国标准ASHRAE55-2004<sup>[2]</sup>中称为自然调节空间(Naturally Conditioned Spaces)，在欧洲标准EN15251<sup>[3]</sup>则称为自由运行建筑(Free-running Building)室内环境。在这样的环境里，人们不启动采暖和空调制冷设备，而是可以采取变换着装、开关窗户、通风降温等方式来适应热环境的变化。各国学者对人在非采暖空调环境下的热舒适问题做了大量的研究工作。英国的M. A. Humphreys<sup>[4]</sup>通过现场调查较早提出了自然通风房间的热舒适温度不同于空调房间。美国的J. F. Busch<sup>[5]</sup>在泰国通过现场调查研究表明在同样的热舒适满意投票率情况下，非采暖空调建筑的有效温度范围更大。清华大学曹彬、朱颖心等<sup>[6]</sup>研究了北京地区冬季寒冷的气候条件下人对冷环境的适应性，结果认为冬季将室内温度维持过高，不仅浪费能源，同时也会引发人们的不舒适感。北京理工大纪秀玲等<sup>[7]</sup>对江浙地区夏季非空调环境下人体热感觉进行了调查研究，结果认为对热环境的适应会改变人们的心理期望和热感觉，现有的热舒适标准应该根据实际情况作相应的修正。重庆大学李百战在20世纪90年代初就对中国南方地区建筑室内热环境现状问题开展了研究<sup>[8]</sup>。近年来，又针对重庆地区高校教室<sup>[9]</sup>和学生公寓<sup>[10]</sup>非采暖空调室内环境进行了人体热适应性研究，对高校教室室内热环境提出了适应性预测平均投票(aPMV)的适应性模型。这些研究都充分证明了人具有很好的热适应性和热调节能力，可以使人在非采暖空调环境下比空调环境下有着更大的可接受温度范围。

在非采暖空调环境人的热适应性研究基础上，ASHRAE55-2004标准利用RP. 884项目的数据库数据，以每栋建筑为一个单元产生不同的回归系数，最终获得了适用于自然调节空间的90%和80%可接受温度随室外月平均温度变化的范围<sup>[11]</sup>。欧洲标准EN15251利用欧洲的现场调研数据，根据Griffith的方法<sup>[12]</sup>计算得到舒适温度与室外周内相继平滑温度(running mean temperature)线性回归方程，在此方程基础上得到3种不同类型自由运行建筑设计温度取值范围<sup>[13]</sup>。英国雷丁大学姚润明<sup>[14]</sup>利用重庆地区教室全年的现场调查数据，根据Griffith的方法计算得到舒适温度与室外月平均温度的线性回归方程，利用室内空气温度与热感觉投票得到90%和80%的可

接受范围。可以看出，3篇文献的可接受温度范围的确定方法和数据来源均各不相同，结果也不相同。因此，有待于更进一步的研究。

重庆大学承担了“中国民用建筑室内热湿环境评价标准”的编制工作。该标准的主要内容之一就是提出一个适合于中国的不同气候区的非采暖空调建筑室内的可接受空气温度范围的确定方法。为了给编制中的“中国民用建筑室内热湿环境评价标准”提供依据，该文以典型夏热冬冷气候区的重庆为代表，提出了确定夏热冬冷地区非采暖空调室内环境的可接受温度范围的方法，并得到非采暖空调室内环境的可接受范围。

## 1 研究方法

研究主要通过现场调查结合实验室实验的方式开展研究。首先通过对调查建筑的室内外热湿环境参数进行现场测试，同时对建筑室内的人员进行热舒适问卷调查，了解该地区非采暖空调室内外环境的热湿环境现状、以及人们对室内热环境的热适应能力和主观评价。在调查数据的基础上通过将人们对室内环境的热感觉投票进行分析处理，提出确定非采暖空调室内环境的可接受温度范围的方法，获得80%和90%可接受温度范围。最后结合实验室研究成果，确定室内人员习惯着装情况下的冬季最低和夏季有机械通风情况时的最高可接受温度值。

研究从2007—2009年，整个过程历时2a。每月选取3~5天可以代表该月典型气候的测试日进行建筑室内外热湿环境现场测试和室内居民或办公人员问卷调查。建筑类型为重庆的典型住宅建筑或办公建筑。住宅建筑测试日的测试时段不做限制，办公建筑的测试时段基本为办公时间8:30—17:30。所有数据均在非采暖空调环境采集。

使用高精度便携式温湿度计和热线风速仪对热环境参数(室内干球温度，相对湿度，室内风速以及室外干球温度)进行测量。在进行环境参数测量的同时，请室内的居民或办公人员填写问卷。问卷的主要内容包括：被调查者的年龄，性别，此时穿衣情况，此时对热环境的主观感觉，包括热感觉，湿感觉以及气流感。其中，热感觉采用的是ASHRAE热感觉7级标尺。-3、-2、-1、0、1、2、3分别代表很冷、冷、有点冷、不冷不热、有点热、热、很热。根据7级标尺，对湿感觉和吹风感同样做了标尺，-3、-2、-1、0、1、2、3分别代表很潮湿、潮湿、有点潮、舒适、有点干、干燥、很干燥和很闷、闷、有点闷、舒适风、有点风、风大了点、风很大。

实验室研究则是在非采暖空调实验环境下，在

冬季低温和夏季高温(分有机机械通风和无机机械通风)工况下进行人体生理、心理反应的主客观实验研究,从而获得人在热适应能力范围内的最低和最高可接受温度值。

## 2 调查结果统计分析

通过为期2 a的现场测试和问卷调查,整理得到了有效问卷2 712份,其中男性1 433份,女性1 279份,男女人数比较均匀,比例为1.15:1。为了使调查结果具有普遍性,问卷调查的人员年龄跨度较大,最小的年龄在20岁以下,最大的年龄超过60岁。各年龄段具体比例为20~30岁,占总数的37.2%;30~40岁,占总数的21.5%;40~50岁、50~60岁以及大于60岁的人数基本相等,大约分别占总数的12%左右;小于20岁的人数最少,只占总数的4%。

通过对2 712份问卷进行分类归纳了解全年室内外热环境状况:冬季1月份平均温度最低,夏季8月份平均温度最高,室内空气相对湿度大部分为50%~80%;室内空气流速大部分为0~0.25 m/s,最高为0.94 m/s。将现场测试得到的室内外空气温度数据绘成散点图1。从图上可看出,室外空气温度在6~36℃之间变化,室内空气温度在10~35℃之间变化,室内空气温度随室外空气温度的升高而升高,同一时间内室内外空气温度差大约在1~4℃之间。由此可以看出,在非采暖空调的自然环

境下室外温度对室内温度影响很大。除了室外气象条件外,室内外温差大小主要由建筑围护结构的保温和隔热性能以及室内产热量的大小决定。

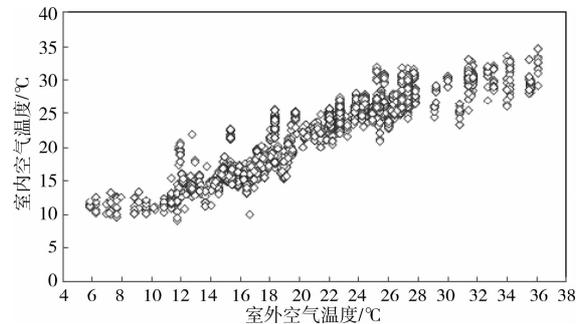


图1 室内外空气温度关系图

在获得非采暖空调建筑室内外热湿环境状况的基础上,需要了解人们对这种工作或居住环境的热舒适评价,研究通过被调查者的热感觉投票值(TSV)来综合体现。同时,由于空气湿度和速度对人体热舒适有着重要的影响。例如高温高湿的环境下,由于皮肤湿润度的增加使汗液蒸发受到限制,并且服装对汗液蒸发有阻碍作用,人体的不舒适感将明显增加。而在高温环境下适当的吹风使人的舒适感会明显增加。因此了解调查者的湿感觉和气流感,对分析热舒适有重要的作用。

将调查问卷分别按冬季、夏季和过渡季节进行统计,得到室内热环境参数、服装热阻与主观评价关系表1。

表1 室内热环境参数、服装热阻与主观评价关系表

季节 (问卷数)	室内热环境参数			服装热阻/ clo	主观评价百分比				
	空气温度/ ℃	相对湿度/ %	空气流速/ (m·s <sup>-1</sup> )		投票值范围	热感觉/ %	湿感觉/ %	吹风感/ %	
冬季(696)	平均值	15.2	65.3	0.07	1.16	(0)	58.8	59.2	49.7
	标准差	2.4	9.7	0.06	0.32	(-1,0,1)	91.7	93.0	89.1
	最小值	9.2	43.4	0.00	0.28	(-3,-2)	8.3	2.5	3.0
	最大值	23.0	98.2	0.42	1.94	(2,3)	0.0	4.6	7.8
夏季(593)	平均值	28.6	68.9	0.15	0.34	(0)	42.5	56.6	30.6
	标准差	2.0	9.5	0.15	0.09	(-1,0,1)	81.9	89.5	87.4
	最小值	23.9	37.7	0.00	0.16	(-3,-2)	0.0	2.3	11.4
	最大值	34.7	98.0	1.02	0.87	(2,3)	18.1	8.2	1.2
过渡季(1 423)	平均值	23.2	64.7	0.09	0.57	(0)	71.4	60.5	37.3
	标准差	3.0	11.5	0.07	0.24	(-1,0,1)	98.5	96.8	89.6
	最小值	13.3	25.3	0.00	0.16	(-3,-2)	0.2	1.2	7.9
	最大值	27.5	90.6	0.50	1.72	(2,3)	1.4	2.0	2.5

从表 1 中可以看出,冬季在热感觉投票值(TSV)为 0 时,热感觉投票百分比为 58.8%。在热感觉投票值(TSV)为-1、0、1 的范围时,热感觉投票百分比为 91.7%。说明该地区人们在习惯的冬季着装情况下(平均服装热阻值为 1.16 clo),对室内热环境满意度基本达到 90% 以上。在夏季热感觉投票值(TSV)为 0 时,热感觉投票百分比为 42.5%。在投票值(TSV)为-1、0、1 的范围时,热感觉投票百分比为 81.9%。可以看出夏季人们对热环境的评价比冬季低,热感觉投票百分比相差约 10%。这说明夏季人们虽然可以通过减少衣着、开窗或打开风扇等适应性调节方式来适应环境,但这些方式比起冬季人们通过增加服装来适应环境调节范围要有限一些。比如夏季着装的减少是有限的,而且一些单位对办公室人员的还有着装规定。因此,冬季人们对室内热环境的适应范围大于夏季。

从表 1 中还可以看到,3 个季节里人们对湿感觉在投票值为 0 和投票值范围-1、0、1 时的百分比分别都达到了近 60% 和 90% 以上,表明人们对于重庆地区非采暖空调室内的高湿环境(平均相对湿度都在 60% 以上)已经比较适应。从吹风感来看,投票值为 0 时的百分比冬季为 49.7%,夏季为 30.6%,过渡季节为 37.3%,在投票值范围-1、0、1 时的百分比则均在 85% 以上。可以看出夏季和过渡季节人们对室内的气流环境不是特别满意,“有点闷”是不少被调查者对所处环境的评价。从室内气流速度统计数据来看,夏季平均室内空气流速为 0.15 m/s,过渡季节为 0.09 m/s。说明非机械通风情况下,室内气流速度较小,对室内热环境的调节能力有限。

### 3 可接受温度范围的确定

为了充分反映不同温度下非采暖空调环境中人的热适应性和热调节能力,在全年室内外空气温度关系图基础上,根据人们对室内热环境的热感觉投票值分布状况,将室外温度以 2℃ 为 1 个温度段单元,寻找各室外空气温度段下的室内空气温度与 TSV 的回归方程。室外空气温度范围从 5~37℃,总共可以分为 16 个温度段。通过数据回归的方式,得到每个室外空气温度段下,室内空气温度所对应的实际投票值之间的一元回归方程,具体如图 2 所示。

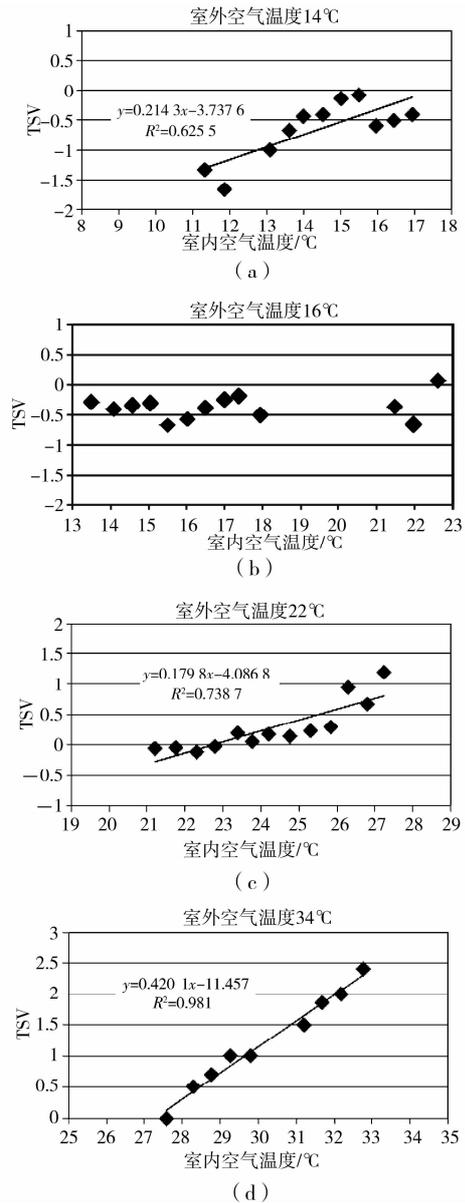


图 2 室外空气温度下 TSV 与室内空气温度关系

从图 2 和回归方程可以看出,每个温度段所回归出来的方程斜率不相同;温度较高时的回归方程比温度较低时的回归方程斜率要大些。这说明人体对不同温度所表现出来的敏感程度不同,较高温度比较低温度人体对热感觉更敏感(见图 2(a)和图 2(d))。

某些温度段下,室内空气温度跨度较大,如过渡季节室内人员通过调整服装等适应性手段满足自身的热舒适要求,此时,热感觉投票随室内空气温度变化不明显(如室外温度为 16~20℃ 时,见图 2(b))。

在得到各室外空气温度段下室内空气温度与 TSV 之间的回归方程的基础上,根据 Fanger 教授提出的 PMV-PPD 方程<sup>[15]</sup>,得出当预测热感觉投票值(PMV)为 ±0.5 时,有 90% 的人满意室内热环

境,当预测热感觉投票值(PMV)为±0.85,有80%的人满意室内热环境。假设实际热感觉投票(TSV)与实际不满意率遵循PMV-PPD同样的规律,则计算得到各温度段下,TSV为±0.5和±0.85所对应的温度值,以室外空气温度为横坐标,室内空气温度为纵坐标作图,得到各数据对应的点,并通过线性回归的方法,得到80%和90%可接受的线性回归方程,具体如图3所示。

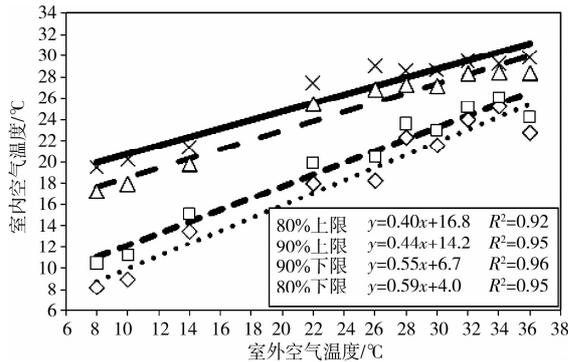


图 3 80%和90%可接受温度线性回归

从图3可以明显看出回归后的80%、90%可接受线呈现一个梯形的形状,在低温度段时可接受范围明显比高温度段时可接受范围要大。这充分反映了不同季节人们的热适应性能力的大小。

重庆大学在近几年将皮肤温度,神经传导速度等生理参数用于人体热舒适及生理健康研究已经取得了很好的研究成果<sup>[16-18]</sup>。通过实验,得到了在重庆地区非采暖空调室内空气温度的冬季下限值为16℃(服装热阻平均值约1.11 clo,平均相对湿度大于70%),夏季上限值为28℃(无机械通风时)。若夏季利用机械通风,室内空气流速为1 m/s时,室内空气温度上限值可达到30℃<sup>[19-20]</sup>,由此最终得到了重庆地区非采暖空调室内可接受温度范围框图,如图4所示。

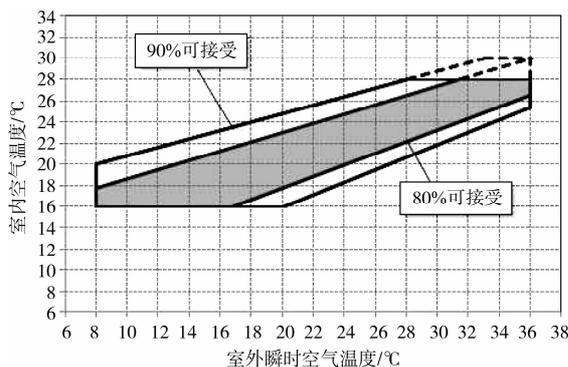


图 4 夏热冬冷地区可接受温度范围

对比讨论ASHRAE55-2004(见图5)、EN15251(见图6)及姚润明(见图7)的研究,3种方法均以热舒适中性温度与室外温度的线性回归方程为基准,在此基础上平移得到满意率为80%和90%可接受温度范围,且上下温度范围是平行等宽的。其中:ASHRAE55-2004采用的是以每栋建筑为1个单元,各单元产生不同的回归系数,得到相应的中性温度。EN15251和姚润明利用griffith公式计算中性温度。研究则是直接将数据按温度段单元的形式进行线性回归得到各温度段下满意率为80%和90%可接受上下限温度值,然后将其值再进行1次线性回归得到全年室外温度下满意率为80%和90%的可接受温度范围。研究结果显示可接受温度范围不是平行等宽的。这符合冬季和夏季人们通过适应性调节方法不同,调节能力不一致的特征,比如在重庆的办公建筑和居住建筑内,冬季人们可以通过增加服装来适应室内热环境的变化,而夏季人们的着装少、可进行的调节是有限的。夏季人们对室内热环境的适应范围小于冬季。

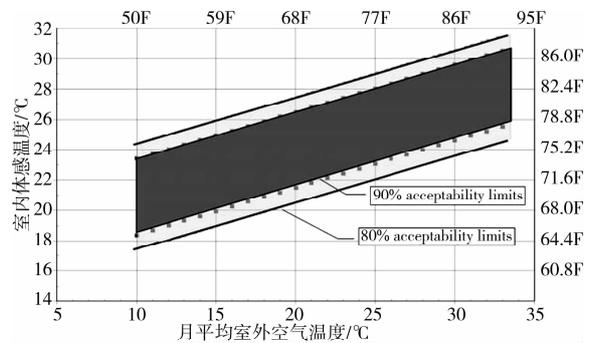


图 5 ASHRAE55-2004 自然空间可接受的运行温度的范围<sup>[2,11]</sup>

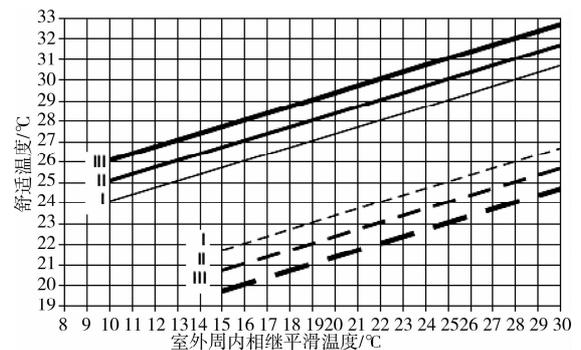


图 6 EN15251 自由运行建筑设计温度取值范围<sup>[3,13]</sup>

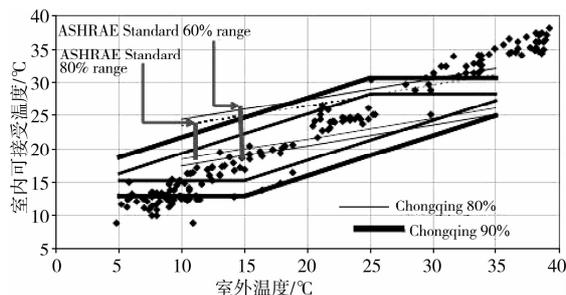


图 7 重庆地区非采暖空调教室热适应温度范围<sup>[14]</sup>

ASHRAE55-2004(见图 5)及姚润明(见图 7)的研究采用的是月平均室外气温。EN15251(见图 6)采用的是将周内相继平滑温度(running mean temperature)。ASHRAE55-2004 和 EN15251 所用到的数据皆没有涉及到中国。根据中国建筑热环境分析专用气象数据集<sup>[21]</sup>典型气象年逐日气象资料中的统计数据显示,重庆、上海、长沙等夏热冬冷地区城市的日平均气温变化较大,如重庆在 3 月—5 月份,8 月—11 月份,日平均气温均超过 10℃,而且每日瞬时温度变化也很明显。如果用月平均温度来表示室外空气温度的变化显得过于笼统。该研究采用各室外瞬时空气温度为自变量,确定可接受室内空气温度范围(见图 4),体现夏热冬冷地区的室外日平均气温变化较大的特点,而且使用也更方便。

值得一提的是,相对湿度也是评价人体热舒适的重要因素之一。国际上用有效温度 ET(Effective Temperature)来考虑室内空气温度、空气湿度和室内空气流速的综合影响,还特别将相对湿度 50%,空气静止不动,服装热阻 0.6 clo 时的有效温度定义为标准有效温度 SET(Standard Effective Temperature)<sup>[22]</sup>。Fanger 的 PMV-PPD 模型中也包含了相对湿度对 PMV 的影响<sup>[15]</sup>。尤其是低湿和高湿环境对热舒适影响更大,低湿度能使皮肤及粘稠的表面干燥,在低湿度的情况下特别是当露点温度低于 0℃时,鼻子、喉咙、眼睛、皮肤等部位有明显的干燥感,在高湿度情况下,相对湿度增加会增加不舒适感,如水分扩散和出汗等<sup>[22]</sup>。ASHRAE55-2004 对于空调环境采用 PMV-PPD 模型进行评价,但是对于非采暖空调环境,ASHRAE55-2004 则给出了自然空间可接受的运行温度的范围(见图 5),并特别说明应用时没有湿度的限制<sup>[2]</sup>。同样,EN15251、姚润明在对自由运行建筑设计温度取值范围(见图 6)和重庆地区非采暖空调教室热适应温度范围(见图 7)中也没有对湿度进行限制。主要论述的是非采暖空调环境的可接受室内温度范围,因此参照 ASHRAE55-2004、EN15251 等做法没有考

虑湿度的影响问题。

## 4 结论

以典型夏热冬冷气候区的重庆为研究对象,利用办公建筑和居住建筑现场测试和问卷调查数据,结合试验室人体生理和心理实验研究成果,得出了一个适用于夏热冬冷地区建筑室内非采暖空调环境的可接受空气温度范围。通过与 ASHRAE55-2004、EN15251 及姚润明的可接受温度范围研究结果的对比,主要结论如下:

1)将重庆办公建筑和居住建筑现场测试和问卷调查数据按温度段单元通过二次线性回归,得到全年室外温度下满意率为 80%和 90%的可接受温度范围,且可接受温度范围在冬、夏季是不平行等宽的。这反映了重庆冬季人们可以通过增加服装来适应室内热环境的变化特征。

2)采用室外瞬时空气温度为自变量,确定可接受室内空气温度范围,充分体现了夏热冬冷地区的室外气温变化较大的特点,而且使用也更方便。

3)为编制中的“中国民用建筑室内热湿环境评价标准”的室内可接受温度范围的确定提供了可行的方法,但在实际标准编制中,夏热冬冷地区的其它典型城市,如上海、南京、武汉、长沙等地的气候条件、室内热湿环境现状及人们的热适应性可能不同,应采用本方法分别进行研究,综合确定夏热冬冷地区的室内可接受温度范围。

## 参考文献:

- [1] LI BAI-ZHAN, YAO RUN-MING. Urbanization and its impact on building energy consumption and efficiency in China [J]. Renewable Energy, 2009, 34: 1994-1998.
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. 2004.
- [3] 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.
- [4] HUMPHREYS M. A. Field studies of thermal comfort compared and applied[J]. Building Services Engineer, 1976, 44: 5-27.
- [5] BUSCH J. F. Thermal comfort in Thai air-conditioned and naturally ventilated offices [J]. Standards for Thermal Comfort, 1995: 114-121.
- [6] 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, 14(5): 98-101.

- CAO BIN, ZHU YIN-XIN, OUYANG QING, et al. Field research of human thermal comfort and thermal adaptability during winter in Beijing [J]. HV&AC, 2010, 14(5):98-101.
- [7] 纪秀玲,王保国,刘淑艳,等. 浙江地区非空调环境热舒适研究[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(12): 1100-1103.
- JI XIU-LING, WANG BAO-GUO, LIU SHU-YAN, et al. Study on thermal comfort in non-air-conditioned buildings in Jiangsu and Zhejiang Provinces [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(12): 1100-1103.
- [8] LI BAI-ZHAN. Investigation of thermal environment of house in China's southern part and research of ways to solve existing problem [J]. International Journal for House Science and Its Applications, 1992, 2: 115-122.
- [9] YAO RUN-MING, LI BAI-ZHAN, LIU JING. A theoretical adaptive model of thermal comfort- Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV) [J]. Building and Environment, 2009, 44: 2089-2096.
- [10] LI BAI-ZHAN, TAN MEI-LAN, LIU HONG, et al. Occupant's perception and preference of thermal environment in free-running buildings in China [J]. Indoor Built Environ, 2010, 19(4): 405-412.
- [11] RICHARD J. DE DEAR, GAIL S, et al. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55[J]. Energy and Buildings, 2002, 34: 549-561.
- [12] GRIFFITHS I. Thermal comfort studies in buildings with passive solar features[S]. UK: Commission of the European Community, 1990.
- [13] FERGUS NICOL, MICHAEL HUMPHREYS. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251[J]. Building and Environment, 2010, 45: 11-17.
- [14] YAO RUN-MING, LIU JING, LI BAI-ZHAN. Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms[J]. Applied Energy, 2010, 87: 1015-1022.
- [15] FANGER P O. Thermal comfort-analysis and application in environment engineering [M]. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1982.
- [16] LIU HONG, LI BAI-ZHAN, CHEN LIANG, et al. Impacts of indoor temperature and velocity on human physiology in hot summer and cold winter climate in China [C]//Proceedings of Clima2007 Well Being Indoors, Finland, 2007, Vol. 1, 501-509.
- [17] LI BAI-ZHAN, LI WEN-JIE, LIU HONG, et al. Physiological expression of human thermal comfort to indoor operative temperature in the Non-HVAC environment[J]. Indoor and Built Environment, 2010, 19(2): 221-229.
- [18] 李文杰. 建筑室内自然环境下基于生理-心理的人体热舒适研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [19] 刘红. 重庆地区建筑室内动态环境热舒适研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [20] 重庆大学. 国家科技支撑计划子课题执行情况验收技术报告:建筑室内热适环境质量标准研究[R]. 2010.
- [21] 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.
- [22] ASHRAE. 2009 ASHRAE Handbook-Fundamentals [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, Inc, 2009.

(编辑 胡玲)