

# 不同热适应舒适标准在台湾地区的适用性

联合大学 黄瑞隆<sup>☆</sup> 施文玫

**摘要** 藉由台湾地区热舒适现场调研得到的数据库探讨了国际标准 ASHRAE 55 及 EN 15251 在台湾地区的适用性。实测结果与标准计算结果的交叉比较发现,对于热季的舒适温度上限,EN 15251 的计算值和实测值相接近,ASHRAE 55 的计算值远低于实测值;对于冷季的舒适温度下限,两标准的计算值均高于实测值。生活在热湿地区的台湾地区居民表现出对冷热环境更强的适应能力,其舒适温度范围较现行国际热适应舒适标准更宽。

**关键词** 热舒适 热适应 适用性 热湿地区 国际标准

## Applicability of different adaptive thermal comfort standards in Taiwan

By Hwang Rueylung<sup>★</sup> and Shih Wenmei

**Abstract** Examines the applicability of international standards ASHRAE 55 and EN 15251 in Taiwan based on the database developed from field thermal comfort studies in Taiwan. The comparison results between measured and calculated values indicate that, for the upper limit of indoor comfort temperature in hot season, the calculated values according to EN 15251 are close to the measured ones, but those according to ASHRAE 55 are much lower; and that the calculated lower limits of indoor comfort temperature in cold season are higher than the measured ones for both standards. Concludes that local inhabitants in Taiwan that living in hot-humid areas have stronger adaptabilities to cold and hot environments and wider comfort ranges than those specified by the current international standards.

**Keywords** thermal comfort, thermal adaptability, applicability, hot-humid area, international standard

★ United University, Miaoli, Taiwan

①

### 0 引言

室内热环境的设计与评价不仅主导着使用者的热舒适性,也在很大程度上影响着建筑物空调与供暖设备的能耗。自从 Fanger 在 20 世纪 70 年代提出热平衡模型<sup>[1]</sup>,并在 1984 年被 ISO 7730<sup>[2]</sup>采用成为国际通用模型后,室内热环境的评估便开始广泛采用 PMV 和 PPD 指标。PMV-PPD 模型定义的可接受热舒适范围为  $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$  及  $PPD \leq 10\%$ 。

近年来兴起的另一种热环境评估方法是热适应模型。有别于在精确控制实验室里得到的热平衡模型,热适应模型从人们日常生活的环境现场实测而来<sup>[3]</sup>。现场实测的优势在于它与日常生活和工作环境有着更为直接的关联<sup>[4]</sup>。热适应是一种

行为模式,它来自于观察中的发现:人们在日常生活中并不是被动地接受环境,而是倾向通过适应行为,如调整衣服、活动和姿势及热环境,使他们保持舒适。迄今已有热适应舒适标准发布,如 ASHRAE 55-2004<sup>[5]</sup>和 EN 15251<sup>[6]</sup>对热适应模型和舒适温度作出了规定。研究表明,在建筑中应用热适应舒适标准,与传统的舒适标准相比,也即与空调温度设定为固定值的情况相比,能创造出约 30%的节能潜力<sup>[7]</sup>。热适应使得更多新的节能策

①☆ 黄瑞隆,男,1964 年 11 月生,博士,教授  
360 苗栗县苗栗市恭敬里联大一号  
(+886) 37381643  
E-mail: rueylung@nuu.edu.tw  
收稿日期:2013-10-12  
修回日期:2013-11-18

略变得可行,也会让建筑更好地实现可持续发展。在全球气候变暖普遍受到关注的时代大背景下,引入热适应概念及标准,更能凸显其契合时宜的特点。

热适应舒适标准的特点在于室内舒适温度随室外气候而变,也即舒适温度是室外气候的函数。美国 ASHRAE 55 及欧洲 EN 15251 的热适应舒适模型在国际上最为成熟并被认可,两者都源自热舒适现场调研数据库的整合分析(meta-analysis)<sup>[8-9]</sup>。其中,ASHRAE 55 使用的是 ASHRAE RP-884 数据库<sup>[10]</sup>,该数据库由四大洲涵盖主要气候区的 160 座办公楼的现场调研数据组成,原始数据总量达 21 000 组。在 ASHRAE 55 中,室内舒适温度( $t_{\text{comf}}$ )

$$t_{\text{mf7}} = \frac{t_{-1} + 0.8t_{-2} + 0.6t_{-3} + 0.5t_{-4} + 0.4t_{-5} + 0.3t_{-6} + 0.2t_{-7}}{3.8} \quad (3)$$

式中  $t_{-1}, t_{-2}, t_{-3}, t_{-4}, t_{-5}, t_{-6}, t_{-7}$  分别为前 7 天的室外温度,℃。

比较式(1),(2)可知,EN 15251 用前 7 天的室外气温滑动平均代替 ASHRAE 55 中的月平均温度,以改善后者对室外气温变化反应过于迟钝的质疑<sup>[12]</sup>。EN 15251 规定的 3 种舒适等级对应的温度范围分别为  $t_{\text{comf}} \pm 2$  ℃,  $t_{\text{comf}} \pm 3$  ℃ 和  $t_{\text{comf}} \pm 4$  ℃。

ASHRAE RP-884 数据库的调研数据来自世界各地,所以一般认为 ASHRAE 55 的热适应标准是全球通用的。相对地,因为采用区域性的数据,EN 15251 被认为更适合于欧洲。台湾地区目前并没有热适应舒适标准。图 1 给出了利用 2 个国际热适应标准计算得到的台中的逐日舒适温度。可以看出,与 ASHRAE 55 相比,EN 15251 计算得到的舒适温度明显偏高,最冷的 1 月高出 1.5 ℃,最热的 7 月高出 1.9 ℃。

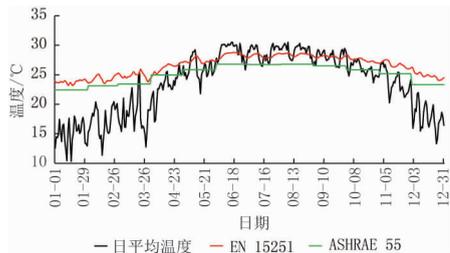


图 1 基于 ASHRAE 55 和 EN 15251 的逐日舒适温度比较

本文藉由台湾地区热舒适现场实测得到的数据库检验 ASHRAE 55 和 EN 15251 在台湾地区的适用性,并对台湾人的热适应特征加以认识。

是室外月平均温度( $t_{\text{om}}$ )的函数,如式(1)所示。同时规定  $t_{\text{comf}} \pm 2.5$  ℃ 为 90% 可接受范围,  $t_{\text{comf}} \pm 3.5$  ℃ 为 80% 可接受范围。

$$t_{\text{comf}} = 0.31t_{\text{om}} + 17.8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

EN 15251 使用的数据来自 SCATs 项目<sup>[11]</sup>,该项目组在法国、希腊、葡萄牙、瑞典和英国等欧洲国家的 26 座办公楼开展了为期 1 年的实测调查,获取了 4 655 组原始数据,其中 1 449 组数据是在无空调(free-running)建筑中得到的。基于无空调建筑数据,EN 15251 给出了舒适温度与室外气温滑动平均  $t_{\text{mf7}}$  的关系式,如式(2)所示。

$$t_{\text{comf}} = 0.33t_{\text{mf7}} + 18.8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

其中

## 1 研究方法

本研究采用的数据库由 2003—2004 年<sup>[14]</sup>, 2005—2006 年<sup>[15]</sup> 和 2011 年<sup>[16]</sup> 3 个时间段开展的 3 次热舒适现场调研数据组成。这些现场调研是在学校(包括大学、高中或小学)的自然通风或混合通风教室中进行的,总共进行了 197 个班次的调研,获得了 6 932 组包括客观物理环境测试和主观问卷评价在内的原始数据,其中自然通风教室 3 754 组,其余 3 178 组来自混合通风教室。数据样本的总量较欧洲 SCATs 项目的数据库略多。

为了解学生逐月的热舒适反应变化,每月进行一次热舒适调研。每次现场调研的步骤是先获得校方同意,而后将测量影响人体热舒适性的参数——温度、湿度、平均辐射温度及风速的传感器和数据记录仪组装成室内气候分析仪,在学生上课前 10 min 放于教室内(3 个测点)和教室外(1 个测点),测点距地 1 m 高。采样时间从 8:00 至 16:00,以 10 min 的间隔连续记录读数。各仪器的规格性能见表 1。

表 1 实验仪器设备规格

传感器	测量范围(精密度)
干球温度 K 型热电偶温度计	-250~1 370 ℃(±0.5 ℃)
黑球温度 15 cm 标准黑球温度计	-250~1 370 ℃(±0.5 ℃)
相对湿度 TES-1360 湿度计	10%~95%(±3%)
风速 微风速计	0~2.5 m/s(±0.01 m/s)

为了解学生在每天最热、最冷时刻的热舒适变化,问卷的填写时间选在室温最低时的早上第一节课及室温最高时的下午第一节课 2 个时段进行。

问卷调查前会有研究人员简单介绍调研目的,并在受访者填写问卷时加以解说和答疑,但不主动诱导和干涉其填写。为避免前一节课的活动影响到对其主观感觉的评估,在下课前 10 min 开始填写问卷。

问卷内容包括个人基本信息、对目前环境热舒适度的评估、对其他物理环境的评估、对环境各方面的满意度及衣着量和活动量的调查等。本研究的问卷参考 ASHRAE 55 修改而成,大致包括以下三部分。

第一部分为个人信息,包括受访者的学校、班级、性别与着装情况。由于学生穿着学校规定的制服上课,故问卷中只调查除制服外的着装,如内衣与外套等。

第二部分是热舒适评估,采用热感觉、热偏好与热接受度 3 种常见的评估方式进行。其中热感觉采用传统的 7 级热感觉标尺,分别是冷(-3)、凉(-2)、微凉(-1)、中性(0)、微暖(1)、暖(2)、热(3)。热偏好询问受访者希望当前环境更凉、不变还是更暖。热接受度考察受访者能否接受当前的温度。

第三部分询问学生对其他物理环境,即湿度、风速和照度的评估。评估采用 7 级标尺,分别为很湿、湿、微湿、刚好、微干、干、很干(湿度评估),很弱、弱、微弱、刚好、微强、强、很强(风速评估)和很暗、暗、微暗、刚好、微亮、亮、很亮(照度评估)。

## 2 主观感受与标准的比较

采用本文数据库中的主观热可接受度问卷结果计算热接受度,同时采用实测的客观物理参数,按不同标准给出的热适应模型计算得到热接受度,将两种结果进行比较,以分析主观感受与标准间的异同。以上计算均以班级为单位。

图 2 显示了基于客观物理测量数据、按不同标准计算得到的不同接受度等级的样本量。对照图 1 易知,ASHRAE 55 的舒适温度较低,所以可接受的样本量较少;相对地,EN 15251 的舒适温度较高,可接受的样本量较多。基于主观问卷的统计结果也一并显示在图 2 中,对比可知,多数情况下,主观投票所得到的可接受的样本量大于 ASHRAE 55 或 EN 15251 的计算值。

为进一步比较主观感受与标准的差异,将现场实测的室内外参数和接受度投票直接显示在

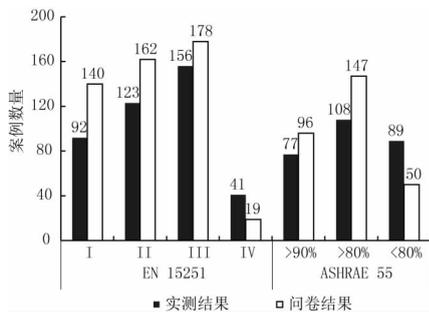


图 2 基于物理测量与主观投票、符合 ASHRAE 55 和 EN 15251 标准的样本数目

ASHRAE 55 和 EN 15251 给出的热适应舒适图上,如图 3 所示。观察可知,ASHRAE 55 和 EN 15251 提供的 2 种热适应模式与台湾地区居民的热感受存在明显的差异,以 80% 和 82% 接受度为例,台湾地区实地调研得到的舒适温度范围均超过标准给定的范围。

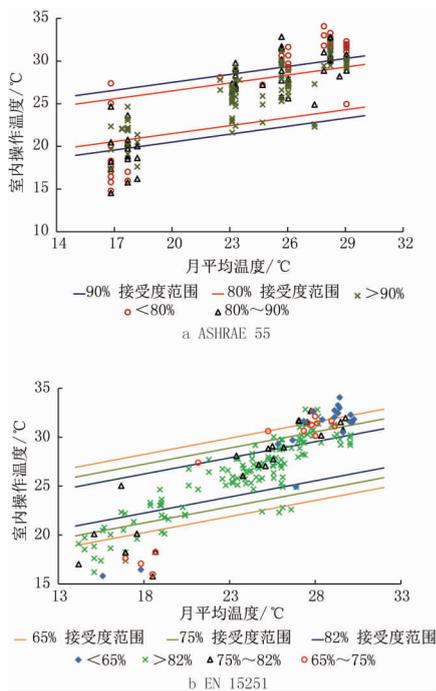


图 3 显示在 ASHRAE 55 和 EN 15251 的舒适图上的室内热环境和接受度

为分开讨论标准所定的舒适范围上下限的适用性,根据客观物理测量数据将全部样本分成 2 组。一组为暖和组,由室内操作温度高于标准计算得到的舒适温度的所有样本组成;其余样本的室内操作温度低于计算的舒适温度,构成凉爽组。通过交叉比较各组中主客观的评估结果,判断台湾居民感觉舒适的温度上下限更接近哪个标准。

图 4 显示了暖和组的交叉比较结果。图中填色色块代表热环境符合标准要求、同时受访者也接受的样本百分比,外围两条折线分别表示热环境符合标准规定和受访者接受的样本百分比,折线与色块间的距离代表标准与台湾居民热感受之间的差异。

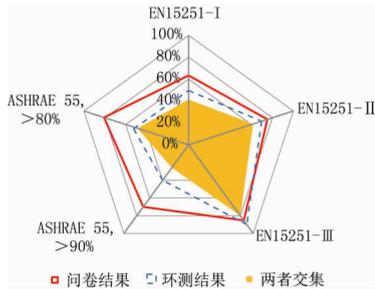


图 4 暖和组的交叉比较

观察 EN 15251 的结果可知,在暖和组中,分别有 41%,61%和 80%的样本,其热环境状况和主观接受度同时符合 I, II, III 级接受度的要求;仅热环境符合的比例分别为 50%,70%和 90%;仅主观投票符合的比例则分别为 63%,75%和 85%。对 II 级和 III 级接受度而言,不论是热环境还是主观投票,其样本比例较两者同时符合的比例高不到 10%,这说明,EN 15251 II 级和 III 级接受度的上限温度和台湾地区居民的可接受上限温度较为接近。

基于 ASHRAE 55 的交叉比较结果显示,只有热环境符合 90%和 80%接受度等级的样本比例分别为 40%和 54%,略高于热环境和主观接受度同时符合的比例(26%和 49%),然而却远低于只有主观接受度符合的比例(70%和 81%),这表明台湾地区居民可接受的温度上限较 ASHRAE 55 计算值明显偏高。

图 5 显示了凉爽组的交叉比较结果。由图可知,热环境符合的折线相当接近热环境与主观投票

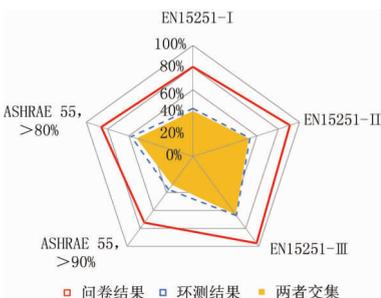


图 5 凉爽组的交叉比较

同时符合的色块,而主观投票符合的折线却与它们有明显距离,差距达 28%~37%。可见,相比这两种热适应标准,台湾地区居民有更低的可接受温度下限。

### 3 冷热应力分析

通过计算热湿地区城市全年的累计冷热应力,分析 EN 15251 与 ASHRAE 55 在热湿地区应用的差异。本研究选定的城市为台湾地区的台北、台中及高雄,分别为北、中、南部的城市。采用当地气象站监测的气象资料,时间为 2002—2011 年,共计 10 年。根据热湿地区的气候状况,将一年分成热季(4—10 月)和冷季(11—3 月),分别计算热季超出热舒适上限的累计热应力及冷季低于热舒适下限的累计冷应力,计算方法如下,结果如图 6,7 所示。

1) 当室外温度  $t_o$  处于舒适范围内时,  $w_f = 0$ 。

2) 当室外温度高于舒适温度上限 ( $t_{uc}$ ) 时,  $w_f = t_{uc} - t_o$ ; 当室外温度低于舒适温度下限 ( $t_{lc}$ ) 时,  $w_f = t_o - t_{lc}$ 。

3) 4—10 月逐时 ( $T$ ) 的累积热应力为

$$\sum w_f T, \text{ 仅当 } t_o > t_{uc} \text{ 时。}$$

4) 11—3 月逐时的累积冷应力为

$$\sum w_f T, \text{ 仅当 } t_o < t_{lc} \text{ 时。}$$

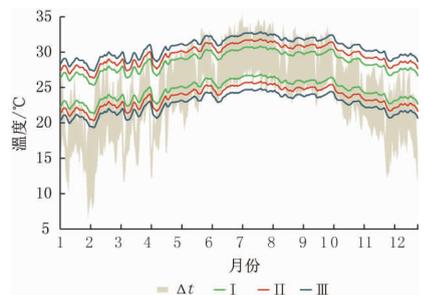


图 6 台中 2007 年室外温度与 EN 15251 舒适范围分布

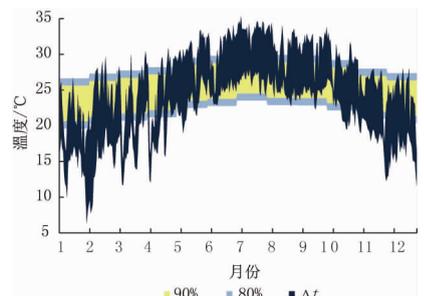


图 7 台中 2007 年室外温度与 ASHRAE 55 舒适范围分布

表 2 给出了台北、台中及高雄 3 个城市从 2002 年到 2011 年 10 年间的累积冷、热应力。从

表 2 台北、台中及高雄 2002—2011 年累积冷、热应力

		℃·h		
	标准	台北	台中	高雄
冷应力	EN 15251	5 749	2 314	1 012
	ASHRAE 55	21 724	16 622	13 920
热应力	EN 15251	108 870	102 518	56 438
	ASHRAE 55	95 772	90 789	47 812

表中可知,根据 EN 15251 计算出的累积热应力偏高,累计冷应力则偏低。台北的 EN 15251 与 ASHRAE 55 的累计冷应力之比为 0.3,累计热应力之比为 1.1;台中的累计冷应力之比为 0.1,累计冷应力之比为 1.1;高雄的累计冷应力之比为 0.07,累计热应力之比为 1.2。比值愈趋近于 1,表示两者差异愈小。由表 2 可知,热应力、冷应力差异最大的均为高雄。

#### 4 结论

目前台湾地区尚无单独的热适应舒适标准,相关研究多以美国 ASHRAE 55 和欧洲 EN 15251 标准为依据展开分析讨论。本研究根据台湾地区热舒适现场实测得到的 6 932 组原始数据检验这两个标准在台湾地区的适用性,探讨台湾地区居民的热适应特征。

通过主观热可接受度与热适应标准的交叉比较发现,在热季台湾居民的可接受温度上限与 EN 15251 的计算值较为接近,而与 ASHRAE 55 的差异较为明显;在冷季台湾居民实际可接受的温度下限比两标准都低。综上所述,生活在热湿地区的台湾居民,对冷热环境的适应能力较强,舒适温度范围较现行国际热适应舒适标准范围更宽。另外,通过比较 EN 15251 和 ASHRAE 55 在不同城市的累计冷热应力发现,不同舒适标准的判定结果相差较大。

#### 参考文献:

- [1] Fanger P O. Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970
- [2] ISO. ISO 7730 Ergonomics of 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 Standards Organization, 2005
- [3] Humphreys M A, Nicol J F. Understanding the adaptive approach to thermal comfort[G]//ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 991-1004
- [4] de Dear R J. A global database of thermal comfort field experiments[G]//ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 1141-1152
- [5] ASHRAE. ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2004
- [6] CEN. CEN Standard EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings—addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics[S]. Brussels: CEN, 2007
- [7] McCartney K J, Nicol J F. Developing an adaptive control algorithm for Europe [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 623-635
- [8] de Dear R J, Brager G S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55 [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 549-561
- [9] Nicol J F, Humphreys M A. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251 [J]. Building and Environment, 2010, 45(1): 11-17
- [10] de Dear R J, Brager G S, Cooper D. Final report-ASHRAE project RP-884: developing an adaptive model of thermal comfort and preference[R], 1997
- [11] McCartney K J, Nicol J F. Developing an adaptive control algorithm for Europe: results of the SCATs project[J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 623-635
- [12] Borgeson S, Brager, G S. Comfort standards and variations in exceedance for mixed-mode buildings [J]. Building Research & Information, 2011, 39(2): 118-133