

(上接第 51 页)

时,受试者选择的风速基本落在标准规定的范围之内,这说明标准的规定与实验结果吻合较好。

本实验各工况下受试者选择的风速差异很大,特别是在温度 30 °C 时,部分受试者偏好高于标准规定上限的风速,也有部分受试者偏好风速低于标准推荐风速,但受试者的气流可接受百分比均在 80% 以上,表示当受试者对气流有控制时,对气流的接受度较高。

综上,在温度 26 °C 和 28 °C 时,ASHRAE 55 标准的推荐风速及舒适范围与本实验的结果吻合较好;温度为 30 °C 时,大部分受试者偏好高于标准规定的 1.2 m/s 风速。因此建议温度 26 °C 和 28 °C 时风速上限不变,为 1.2 m/s;30 °C 时将风速上限提高至 1.8 m/s。

3 结论

3.1 在湿热环境下,个体控制的气流可保持热舒适和 PAQ 在较高的水平,而且不会造成对湿度、

气流的不满意,是一种改善局部热环境舒适度的有效方式。

3.2 湿热环境中,采用个体控制的气流在受试者进行一定量活动后可快速改善热舒适度和 PAQ。

3.3 湿热环境下,受试者偏好风速高出 ASHRAE 55 标准上限(1.2 m/s),应提高允许范围至 1.8 m/s 以满足舒适需求。

3.4 综合动态和稳态下受试者对热环境、PAQ、湿度和气流的可满意度情况,确定个人可控气流能提供的舒适温湿度上限为 30 °C 和 60%。

参考文献:

- [1] ASHRAE. ANSI/ASHRAE/IES Standard 55-2010 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta, GA: American Society of Heating, Ventilation, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2010
- [2] 翟永超,张宇峰,孟庆林,等. 湿热环境下空气流动对人体热舒适的影响(1):不可控气流[J]. 暖通空调,2014,44(1):42-46,93

湿热环境下空气流动对人体热舒适的影响(2):可控气流*

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 翟永超[☆] 张宇峰 孟庆林
美国加州大学伯克利分校 张 慧 帕苏特·威尔默 阿隆斯·爱德华

摘要 实验研究了温度(26, 28, 30 ℃)、相对湿度(60%和 80%)和不同活动量(动态及静坐)下,可控气流对 16 名中国受试者的热反应和气流偏好的影响。结果显示,静坐时提供可控气流,受试者可接受的温湿度可达 30 ℃, 60%,可控气流可在一定量活动后快速改善热舒适度,与 ASHRAE 55 标准对比可见,受试者舒适的温湿度范围和偏好风速高于标准规定。

关键词 湿热环境 风扇 可控气流 热舒适 感知空气品质

Air movement and thermal comfort in hot-humid environments (2): With occupant control

By Zhai Yongchao[★], Zhang Yufeng, Meng Qinglin,
Zhang Hui, Pasut Wilmer and Arens Edward

Abstract Experiments on the effect of self-controlled air movement on thermal comfort and favorable air speed of 16 subjects from China exposed to the combined environment with different temperatures (26, 28, 30 ℃) and relative humidities (RH) (60% and 80%) combinations in hot-humid environments. Results show that air movement can maintain thermal comfort up to 30 ℃ and 60% RH at sedentary activity and restore comfort quickly after high metabolic rate activities, and subjects prefer higher air speed than ASHRAE 55 upper limit while remain comfortable beyond the comfort zone recommended by ASHRAE.

Keywords hot-humid environment, fan, air movement with occupant control, thermal comfort, perceived air quality

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

①

0 引言

湿热地区的气候、经济和人口发展现状决定了该地区建筑能耗将迅速增长。空气流动作为低能耗的降温方式,虽在 ASHRAE 55 标准中得到推荐^[1],但在湿热地区的实际应用中仍有不足。

首先,ASHRAE 55 标准并未对湿热环境下的舒适范围和偏好风速做出规定,只规定了偏热环境下气流对温度升高的补偿,未涉及气流对湿度升高补偿的问题。其次,ASHRAE 55 标准适用于静坐稳态条件,而在实际办公环境中,虽然大部分时间居住者处于静坐状态,但也常需离开办公桌,如去打印机或饮水机处,或者上下楼到其他办公室等。

在这些时间内人们的热舒适状况如何,以及回到办公桌后空气流动对热舒适的改善效果如何,是影响气流在建筑中应用的重要因素。

综上,本文通过实验研究湿热环境下,用户对气流有控制时,静坐状态下舒适的温湿度范围、偏好风速;以及活动量动态变化时可控气流对热舒适的改善效果。

1 研究方法

1.1 受试者

①[☆] 翟永超,男,1984 年 10 月生,博士,博士后
510641 广州华南理工大学亚热带建筑技术国家重点实验室
建筑节能研究中心
(020) 87110164
E-mail: songchaozhai@gmail.com
收稿日期:2013-10-28

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50978102),新世纪优秀人才支持计划和 California Air Resources Board 资助

受试者为在美国加州大学伯克利分校学习和工作的中国学生和教师,共 16 名(男女各 8 名)。参加实验期间要求身体健康、睡眠充足、个人卫生情况良好。受试者来自中国各个省市,其相关数据见表 1。

表 1 受试者的基本信息

性别	人数	年龄/岁	身高/m	体重/kg
女	8	30.6±6.4 ¹⁾	1.65±0.03	56.4±4.2
男	8	27.2±2.3	1.74±0.05	69.5±1.8
合计	16	28.9±5.0	1.70±0.06	63.0±8.5

1)标准偏差。

实验期间受试者被要求穿着典型夏季服装——短袖衬衣或 T 恤,轻质长裤,内衣裤及袜子。实验室预备拖鞋供使用。实验中受试者座椅采用透气的网椅,增加的热阻可以忽略不计。受试者的服装热阻为 0.5 clo。

1.2 实验布置

实验在美国加州大学伯克利分校建筑环境中心的人工气候室内进行。气候室的详细描述见文献[2]。实验室布置情况如图 1 所示。

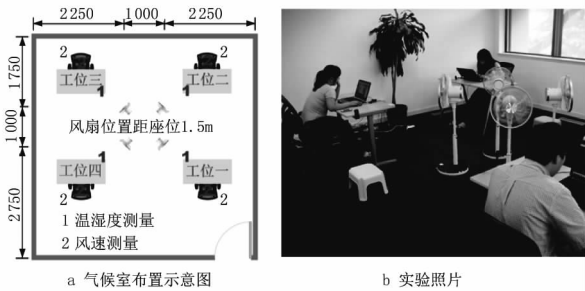


图 1 气候室布置

每次实验有 4 个受试者参加。4 个风扇布置在气候室的中央,距离受试者所坐位置 1.5 m,从房间中央往房间的 4 个角吹风,以减少气流相互之间的影响。实验期间大部分时间受试者处于静坐状态,可以浏览网页,编辑文档。允许受试者进行交谈,但不能讨论与实验有关的内容,如个人感受、天气情况等。

风扇采用落地扇,高 1.1 m,共有 7 级风速控制,风扇功耗从 1 级风速的 3 W 至 7 级的 15 W。

实验中选取了 3 个温度(26,28,30 ℃)和 2 个相对湿度(60%和 80%)的组合,共 6 种温湿度工况。实验期间受试者通过遥控器自行选择其偏好的风速。实验工况及对应的新有效温度(ET*)见表 2。

表 2 实验工况及对应热指标

工况	温度/℃	相对湿度/%	风速/(m/s)	ET*/℃
1	26	60	自选	26.3
2	26	80	自选	27.0
3	28	60	自选	28.5
4	28	80	自选	29.7
5	30	60	自选	30.7
6	30	80	自选	32.6

实验期间连续测量了室内空气温度、湿度和风扇的功耗。风速测试在受试者实验完成后,根据受试者选择的风速组合进行了风速测量以将不同风速组合的影响考虑进去。测试仪器及精度见表 3,所有的测试仪器在实验前后均进行了校准。室内空气温湿度测量在每个受试者的工作台高度(距地面 0.72 m)进行。风速测量为受试者座位处距地面 0.1,0.6,1.1 m 高度处的风速。

表 3 测试仪器的基本信息

	仪 器	量 程	精 度
空气温度	HOBO 温湿度记录仪	-30~50 ℃	±0.35 ℃
相对湿度	HOBO 温湿度记录仪	0~100%	±2.5%
风速	SENSOR 无线式热球风速仪	0~5 m/s	读数的±1.5%

1.3 问卷

问卷内容包括热环境可接受度、全身热感觉和热舒适、热偏好、感知空气品质和空气新鲜度投票,及气流可接受度投票。详细的投票标尺介绍见文献[2]。

1.4 实验步骤

为了与实际办公环境中的活动量情况对应,实验设计了 3 种不同的活动量情况:1) 静坐,活动量为 1.1 met;2) 离开座位进行低活动量的活动,如去饮水机处接水,去打印机处拿东西等,采用上下小凳 12 步的方式模拟这个活动量;3) 离开座位进行高活动量的活动,如上下楼梯等,采用上下小凳 80 次进行模拟,80 步按 10 步/min 进行。

每次实验持续 2 h 15 min,前 15 min 受试者在气候室外的房间静坐休息,调节服装以达到接近热中性状态。该房间的温湿度没有控制,但观测结果表明实验期间室内温度为 20~22 ℃,相对湿度为 40%~50%。气候室控制在预设的温湿度,风扇处于开启状态,根据温湿度的不同依次设定为一挡、三挡和四挡。15 min 后受试者着夏季服装进入气候室,随机入座,并立即调节风扇风速以保持舒适状态。进入气候室后的前 15 min 为适应时间,受试者保持静坐状态,并回答问卷,第 15~45 min 受试者保持静坐,进行阅读、上网或打字等活动,活动量为 1.1 met;第 45~49 min 风扇关闭,受试者被要求离

开座位,伸展四肢并进行 12 步的上下小凳的活动,第 49 min 受试者回到座位,进行投票;第 50 min 风扇开启,受试者进行投票,第 50~80 min 受试者静坐,80~90 min 时风扇关闭,受试者离开座位并进行 4 次 20 步的上下小凳的活动,活动量为 4 met,第 89 min 回到座位并进行投票;第 90 min 风扇开启,受试者继续静坐状态至实验结束。

2 结果分析

结果分析时,组间对比采用重复观测的方差分析方法(RM ANOVA),两两工况之间的比较采用 Holm-Sidak 的多重比较方法(Holm-Sidak's multiple comparisons test),所有可接受水平的 p 值均取 0.05。

2.1 动态问卷结果分析

图 2 给出了所有实验工况下,受试者的热感觉(TS)、热舒适(TC)和感知空气品质(PAQ)投票均值随时间的变化。

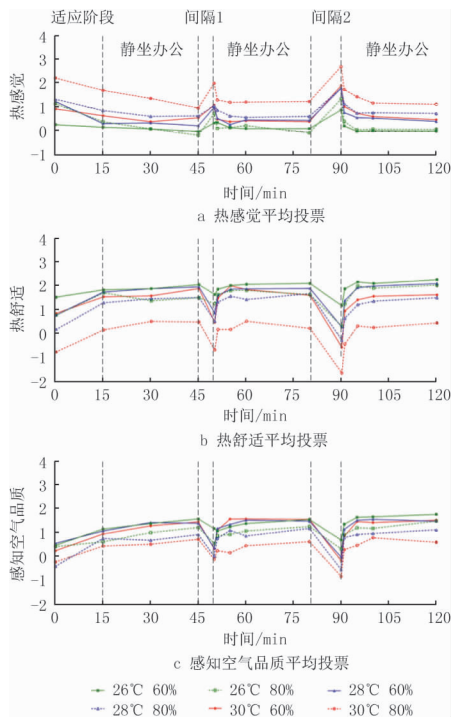


图 2 时序变化的热感觉、热舒适和感知空气品质平均投票

暴露开始至第 15 min 的适应阶段,受试者的 TS、TC 和 PAQ 均有显著改变(见图 2a),可以看出,在刚进入气候室后,受试者感觉环境更热,更不舒适;除了工况 6,其他工况下空气流动都可以使受试者在 15 min 内达到舒适状态。除工况 6 外,其余工况下静坐时段中受试者 TS 均处于 0(中性)

到 1(有点暖)之间。TS 在刚进入气候室时偏高,经过 15 min 的适应期达到平衡;第一个高活动量间隔可使工况 1,4 和 5 中 TS 投票升高 0.5 个刻度,使工况 2,3 和 6 中的 TS 上升 1 个刻度;风扇开启后 TS 显著下降至中性范围,迅速达到稳定并持续至第二个静坐时段结束;第二个间隔后 TS 上升 1~1.5 个投票刻度,至投票 2(暖)至 3(热);开启风扇后 TS 迅速下降并在 5 min 内回到上一个静坐工况后段的水平,并保持至第三个静坐时段结束。

各工况下,除了适应期初段的投票和两个高活动量间隔后的投票,受试者 TC 和 PAQ 投票均值均处于舒适和可接受的一侧(见图 2b 和图 2c)。受试者 TC 和 PAQ 投票随时间的变化规律基本一致:刚进入气候室的投票偏低,然后随时间逐渐上升,在 30 min 内达到稳定,两个高活动量间隔显著降低了 TC 和 PAQ,然后风扇开启显著改善了 TC 和 PAQ,并在 5 min 内达到稳定。

2.2 稳态问卷结果分析

第 2.1 节的分析表明,适应期和两个高活动量间隔对静坐期最后的投票没有显著影响,因此把三个静坐期的投票值综合在一起,进行稳态结果的分析。

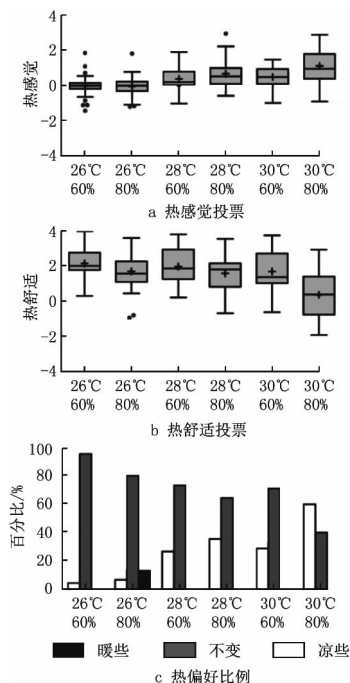
2.2.1 热感觉、热舒适和热偏好

图 3a 为各工况下稳态 TS 投票分布。工况 1 和工况 2 下,受试者处于中性状态,表现为 TS 投票均匀地分布在投票 0 的两侧;工况 3,4 和 5 下,TS 主要分布在微凉至微暖(-1~1)之间,有 25% 左右的投票高于 1;工况 6 下有 50% 的投票高于 1,更有接近 25% 的投票高于 2。显著性分析表明各工况间的差异显著 $F(3, 4, 151, 1) = 30.4, p < 0.001$;比较检验分析表明工况 6 下的 TS 显著高于其余工况 ($p < 0.05$);工况 1 和工况 2 下的 TS 显著低于其余工况 ($p < 0.05$);工况 3,4 和 5 之间没有显著性差异 ($p > 0.10$)。这些结果表明,尽管给受试者提供可控气流,在不同温湿度环境下受试者并未达到相同的热感觉状态,特别是在温度 30 °C 时。

图 3b 为受试者在各工况下的 TC 投票分布。可以明显地看出,工况 1~5 下,绝大部分 TC 投票都分布在舒适一侧($TC > 0$);但在工况 6 下,有 40% 的投票位于不舒适一侧;显著性统计结果表明各工况差异显著 $F(3, 3, 146, 5) = 31.2, p < 0.001$,比较检验表明工况 6 下受试者的热舒适投票显著低于其余工况 ($p < 0.05$),工况 1 的 TC 显著高于

除工况 3 外的其余工况 ($p < 0.05$)。其余工况间无显著性差异 ($p > 0.05$)。

图 3c 为受试者的热偏好百分比。工况 1 和 2 下,有 80% 以上的受试者希望现有热环境保持不变;工况 3~5 下,有 60% 到 70% 的受试者希望保持不变,同时,希望环境更凉些的受试者比例升高至 20%~30%;工况 6 下只有 40% 的受试者希望热环境保持不变,另外 60% 的受试者则希望环境更凉些。



箱线图中显示了中位数(横线)、25%和 75%四分位值(箱子)、均值(十字)及上下边缘,异常值由上下边缘外的黑点表示

图 3 稳态热感觉、热舒适和热偏好

综上,TS,TC 和热偏好投票表明,在 26 °C (60%和 80%)环境下,受试者处于中性和舒适状态,并希望环境保持不变;在 28 °C (相对湿度 60%和 80%)和 30 °C,60%环境中,受试者处于中性稍暖状态,热舒适仍保持在较高的水平;30 °C 和 80%下,受试者多处于稍暖至暖的状态,有 40% 的受试者表现出不舒适,并有 60% 的受试者希望环境更凉些。

2.2.2 感知空气品质

图 4a 为受试者的 PAQ 投票分布情况。实验温湿度工况对 PAQ 的影响效应显著 $F(3, 4, 149.9) = 12.2, p < 0.0001$;工况 1~5 下,PAQ 的可接受度投票大都分布在可接受的范围之内 ($PAQ > 0$, 见图 4a),各工况间无显著性差异 ($p > 0.10$);工况 6 下有 20% 的受试者感到 PAQ 不可接受,且 PAQ 投票显著低于其他工况 ($p < 0.05$),

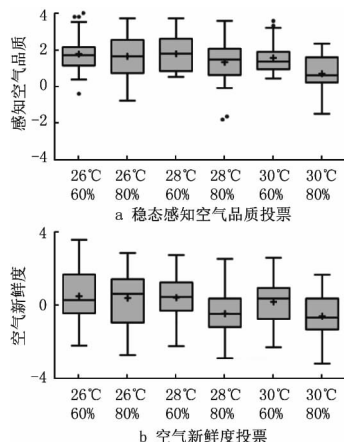


图 4 稳态感知空气品质和空气新鲜度投票

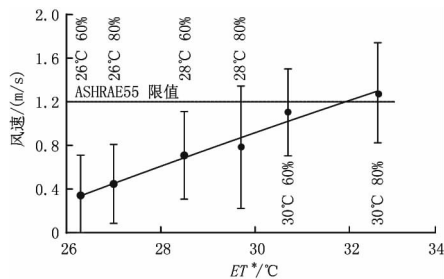
但大部分投票(80%)仍处于可接受范围之内。

然而空气新鲜度投票显示,所有工况下均有超过 20% 的受试者感觉空气不新鲜(见图 4b),尤其是在高温高湿工况下(工况 4 和 6),有接近 70% 的受试者觉得空气不新鲜。这意味着在本实验中,空气流动虽可以显著改善 PAQ 的接受度,但不能同时显著改善空气新鲜度。在 28 °C 和 30 °C 下,相对湿度 80% 时的空气新鲜度投票要显著低于相对湿度 60% 工况 ($p < 0.001$);而且工况 4 的投票显著低于工况 5 的投票 ($p < 0.001$),尽管工况 5 的温度要高些。造成受试者对空气新鲜度的投票较低的可能原因有两个:第一是尽管实验中气候室内的换气次数较高,但是因为气候室是一个相对封闭的环境,而不是一个门窗可以开启的实际环境,因此受试者心理可能受到了影响;第二是尽管实验选择在夏季进行,然而在实验期间,室外的温湿度均较实验设定的温湿度低,这也可能影响受试者对空气新鲜度的反应。

2.2.3 选择风速、空气流动接受度和偏好

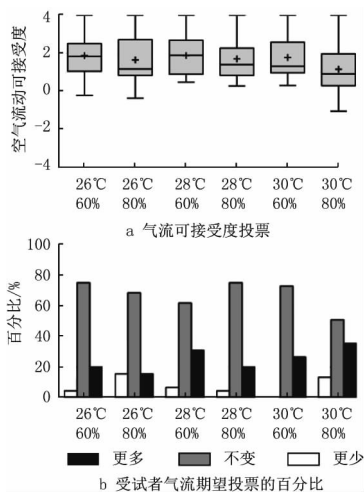
在受试者实验完成后分析了各个工况下、各个时刻受试者选择的风扇功率情况,由功率可推出相应的风扇挡位。受试者选择的风速与 ET^* 的关系如图 5 所示,随着 ET^* 的增加,受试者选择的风速线性增加。受试者的风速偏好有较大差异,表现在各工况中选择风速的标准差较大(0.4~0.5 m/s)。ASHRAE 55 标准规定的有控制风速上限(1.2 m/s)也示于图中,比较可知平均风速与标准上限吻合,但具体到个人选择的风速,则有很多超过标准规定的上限值。

各工况下受试者的气流可接受度投票如图 6a 所

图5 平均气流接受度投票与 ET^*

示。温湿度工况对气流接受度的影响显著 $F(3, 3, 144.5)=6.73, p<0.05$ 。检验表明工况 1~5 中,温湿度的升高对空气流动可接受度没有显著的影响($p>0.10$),工况 6 下可接受度较前面工况显著降低($p<0.05$),但大部分仍在可以接受的范围(89%)。

图 6b 表示受试者气流期望投票的百分比。可以看出,在工况 1~5 中,有 60%~80% 的受试者希望气流保持不变,工况 6 下有 50% 的受试者希望保持不变。所有工况下,均有 20% 左右的受试者希望风速更大些,在工况 6 下这个比例接近 40%。

图6 平均气流可接受度投票与 ET^*

进一步的分析表明,在希望更多气流的受试者中,只有 10% 选择风扇能提供的最大风速。受试者选取低于其偏好风速的气流的原因可能是风扇的控制问题,由于风扇有 7 级控制,各级之间的风速差别多在 0.3 m/s 左右,但第三级至第四级之间的差别有 0.6 m/s,这些不连续的风速控制挡造成部分受试者无法选取到其偏好的风速,选取前一级则风速偏小,选取后一级则风速偏大,因此受试者选取了较低的风速,但是希望风速大一些。另一方面,在希望风速更大的受试者中有 10% 选取了风

扇最大可提供风速,这些投票均发生在工况 6 下,说明在该工况下,本实验中采用的风扇无法提供更高的气流以满足受试者的需要。这些结果可用于指导风扇的设计。为湿热地区设计的风扇应增加风扇的控制,并应增加最大可提供的风速,以满足使用者的不同需求。

2.3 与 ASHRAE 55 标准比较

采用 ASHRAE 55 标准的方法分别计算相对湿度 60% 和 80% 的舒适范围,并与受试者实际选取的风速比较,如图 7 所示。相对湿度 60%、温度 26 °C 和 28 °C 时受试者的偏好风速与 ASHRAE 55 标准规定的范围吻合较好,表现在大部分的选择风速落在标准的范围之内(见图 7a)。温度为 30 °C 时,有一大部分受试者选择了高于标准上限的风速(1.2 m/s),说明温度较高时,标准的规定相对保守。图中虚点为受试者热可接受度投票值为正,实点表示热可接受度投票值为负,由于标准规定的上下限对应 80% 可接受度,可知受试者在较宽的风速范围内均可达到舒适。

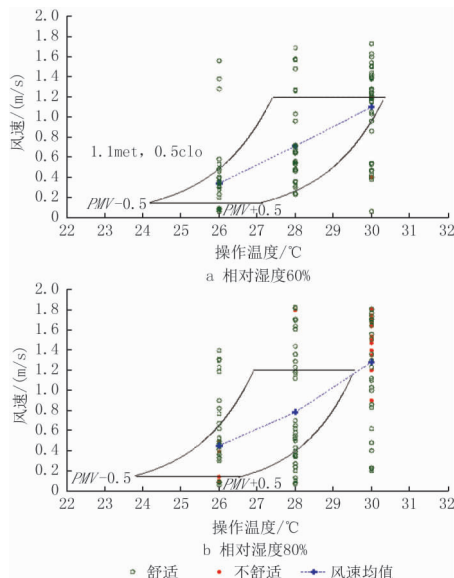


图7 受试者偏好风速与 ASHRAE 55 标准推荐的风速和舒适度范围

图 7b 为相对湿度 80% 时的对比结果。由图可知,温度 26 °C 和 28 °C 时受试者的偏好风速在标准规定的范围之内,而温度 30 °C 时在范围之外。本实验中,相对湿度 80%、温度 26 °C 和 28 °C 时受试者的可接受百分比在 80% 以上,而温度 30 °C 时的可接受百分比在 80% 以下。温度 26 °C 和 28 °C

(下转第 35 页)