

风扇对亚热带气候区民居室内热环境影响分析

杨 柳, 杨 雯, 郑武幸, 刘加平

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安, 710055)

摘要: 亚热带气候区具有高温高湿的气候特点, 为了延长自然通风模式、减少空调使用、降低能耗, 风扇调节在室内通风调节中的比重日益增加, 因此, 风扇对农村居住者主观热舒适性和感知空气质量的影响起到了不可忽视的作用. 为研究自然运行住宅建筑在使用风扇状态(FC模式), 和未使用风扇状态(NFC模式)的人体热适应规律, 确定评估这种建筑居住者热感觉的最佳方法, 选取亚热带气候代表城市中国三亚和北海进行了热舒适现场调查. 使用SPSS软件对调研结果进行统计回归分析, 利用ASHRAE 55标准与中国GB/T 50785中建立的适应性模型对分析结果进行评估比较. 结果表明: 当TSV为1.9, 体感温度为31.6℃, 室外空气温度为32.68℃时, 风扇的室内热环境调节作用受到了较大限制; 两种模式下TSV和PMV随温度变化的规律存在明显差异; 利用适应性模型(aPMV)计算得出NFC、FC模式下自适应系数 λ 分别为0.12和0.43, 均与GB/T 50785规定值有所差异; 相较于GB/T 50785, 通过ASHRAE 55适应性模型获得的评估结果与问卷主观结果更加一致, 因此ASHRAE 55适应性模型被认为更适用于评价亚热带气候区使用风扇的自然运行状态民居的室内热湿环境; 通过对获取数据按温度段进行回归分析, 得到室外温度下满意率为80%和90%的可接受温度范围上限.

关键词: 风扇; 室内热环境; 民居; 适应性模型; 可接受温度范围; 亚热带气候区

中图分类号: TU831.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0544-07

The impact of the fan on rural residential buildings indoor thermal environment in subtropical climate zone

YANG Liu, YANG Wen, ZHENG Wuxing, LIU Jiaping

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Techn., Xi'an 710055, China)

Abstract: For the extension of natural ventilation mode, reduction of air conditioning use and energy consumption, the indoors ventilation is increasingly adjusted by fans in subtropical climate zone featured with high temperature and humidity. Therefore, fans play a vital role in the subjective comfort and perceived air quality for rural occupants. To clarify the controversy whether the adaptive comfort model is applicable in these buildings, study human thermal adaptation rules in fan condition(FC pattern) and no-fan condition(NFC pattern) residential buildings, and find out a suitable method to evaluate thermal sensation of occupants, an approach of field survey of thermal comfort has been carried out in Sanya and Beihai in China, which is the representative of subtropical climate. Software of SPSS was adopted in analyzing the statistical data of investigation. Both adaptive thermal comfort model based on ASHRAE 55 and adaptive PMV model (aPMV) based on GB/T 50785 Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings in China are utilized to evaluate the results. It shows that with the increase of TSV, the change sensitivity of TCV and Thermal Adaptability in FC pattern is significantly greater than those in NFC pattern. There exist obvious differences in the relationship of TSV, PMV and temperature in two patterns. The adaptive coefficient value (λ) calculated by a PMV model with NFC and FC pattern is 0.12 and 0.43, which varied from GB/T 50785. Compared to the aPMV, the evaluation results obtained from the adaptive comfort model based on ASHRAE 55 are more consistent with the subjective questionnaire results. The adaptive comfort model based on ASHRAE 55 was found to be applicable to evaluate the thermal environment of natural-condition residential buildings with fans in subtropical climate zone. Regressing data by temperature range, the acceptable temperature of 80% & 90%(upper limit) was determined according to outdoor air temperature changes.

Keywords: fans; indoor thermal environment; rural residential buildings; adaptive model; acceptable temperature range; subtropical climate zone

如今, 随着人们对改善室内环境质量和增加能源效率的关注增多, 越来越多的研究集中于在减少能源消耗的基础上, 为居住者提供更健康, 更舒适的室内热环境. 在温暖潮湿地区, 风扇具有增加有效对流作用这一特点早已被证明^[1-2]. 新的ASHRAE

舒适标准55-2013^[3]规定也将空气流速提高至0.8m/s (无个人调控)和1.2 m/s (含个人调控), 延长了夏季舒适区. 翟永超等^[4]认为使用吊扇可以在避免造成受试者眼干不适的前提下明显改善热舒适性并增加环境的空气流速和湿度. 对于自然通风建筑,

收稿日期: 2015-11-20

修改稿日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(51221865); 国家杰出青年科学基金项目 (51325803); 陕西省重点科技创新团队项目 (2012KCT-11)

作者简介: 杨柳(1970-), 女, 教授, 主要从事建筑气候与建筑节能. E-mail: yangliu@xauat.edu.cn

风扇可以增加透过窗户的对流冷却, 或者在关闭窗户的状态下保持对流效果。因此, 在炎热的气候条件下, 风扇可以有效避免部分显热和潜热, 实现热舒适条件, 同时最大限度地减少能源消耗。

而这种能源消耗模式的转变, 在热舒适研究领域中同时体现在一个较之前根本上不同的(但不是新的)热舒适模型的提出——适应性热舒适模型。相较于Fanger的预测平均投票/预测不满意百分比(PMV / PPD)模型^[5], 适应性热舒适模型认为热舒适是受人的行为、生理和心理三者综合影响的一种热中性状态, 人体可以通过行为调节、心理适应和生理习服等适应性调节, 逐渐减弱由于热环境的改变带给人体自身的刺激和不舒适感, 最终获得中性状态。通过Brager, de Dear^[6-7], Nicol和Humphreys等众多研究人员的不断努力^[8-9], ASHRAE 55标准和GB/T 50785^[10]等当前适用的热舒适标准已经确认了适应性热舒适模型的合理性。

在推进自适应模型到实际区域性建筑的应用过程中, ASHRAE 55将使用风扇的自然运行建筑归为自然状态空间, GB/T 50785将其划为非人工冷热源热湿环境(通过自然通风或机械通风进行热湿环境调节的区域)进行评价。已有研究表明稳态舒适模型(即PMV模型)不足以说明混合型非空调建筑的实际热舒适情况, 自适应热舒适模型更适合炎热气候^[11-13]。然而, 由于目前存在不同涉及适应性热舒适模型的标准, 在评价一特定气候区热舒适性的适用性。

在以往研究的基础上^[14], 本文设计了实地测试研究, 侧重分析农村居住者在FC模式建筑中的热舒适感觉, 检查用于评估亚热带气候下FC模式建筑的适应热舒适性模型——ASHRAE 55标准和GB/T 50785。以实现以下目标: (1) 研究农村FC模式建筑的人体热适应规律; (2) 确定评估农村FC模式建筑居住者热感觉的最佳方法; (2) 得到室外温度下满意率为80%和90%的可接受温度范围上限。

1 调查方法及统计结果

1.1 调查方法

现场调查选择在我国亚热带气候代表城市三亚和北海进行, 对符合FC和NFC模式条件的农村建筑进行了人体热舒适的连续测试和调查, 共获取375组有效数据。室内外环境参数测试和主观问卷同时进行, 测试时间在每天的早(7:30~11:00)、中

(11: 00~14:00)、晚(14:00~19:00)三个时段。现场数据采集主要包括室内环境参数测试和室外环境参数测试^[16], 室内环境参数测试主要使用1221型室内热舒适度数据记录仪, 室外环境参数测试主要使用JZH-1室内外环境监测系统, 对室内外空气温度、相对湿度、风速和黑球温度分别进行测量, 其精度和响应时间均满足ISO 7726-2002标准。主观问卷调查包括: 受试者基本情况(如年龄、身高、体重、衣着状况等)、人体热感觉和热舒适度调查、受试者改善室内热环境的措施(如加减衣物、开关门窗等)及对室内热环境的满意度。结果见表1, 表中的服装热阻是根据文献进行附加修正后的值。问卷中居住者的主观感受调查, 包括热感投票(TSV), 热舒适投票(TCV), 热接受程度, 如表2所示。

表 1 人员信息统计表
Tab. 1 Conditions of individuals

参数	最小值	最大值	平均值	标准偏差
年龄/岁	12	100	56	44
身高/cm	142	183	162.5	20.5
体重/kg	35	82	63.5	28.5
新陈代谢率/met	0.7	5	2.85	3.04
服装热阻 Icl/clo	0.12	0.61	0.37	0.35

表 2 热舒适指标尺度
Tab. 2 Thermal comfort index scale

	TSV	TCV	热接受程度
-3	很冷	非常不舒适	—
-2	冷	很不舒适	完全不可接受
-1	微冷	比较不舒适	刚刚不可接受
0	中性	适中	—
1	微热	比较舒适	刚刚可接受
2	热	很舒适	完全可接受
3	很热	非常舒适	—

1.2 室内气象参数

亚热带气候具有温度高湿度大的特点。图1为测试期间(8月4-23号)北海室内气象数据, 表2为三亚、北海室内气象数据统计表。

可以看出, 室内空气相对湿度大部分为60%~80%, 空气流速最高为2.55 m/s。室内空气温度在27.4~35.2 ℃之间变化, 室内空气温度随室外空气温度的升高而升高。除了空气流速等气象因素外, 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。

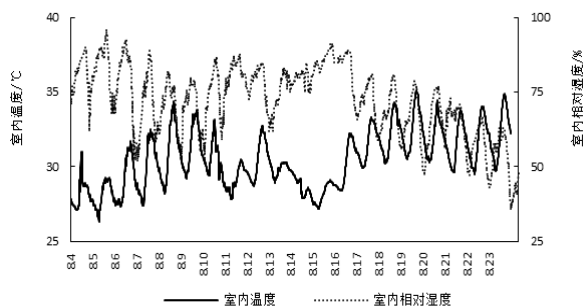
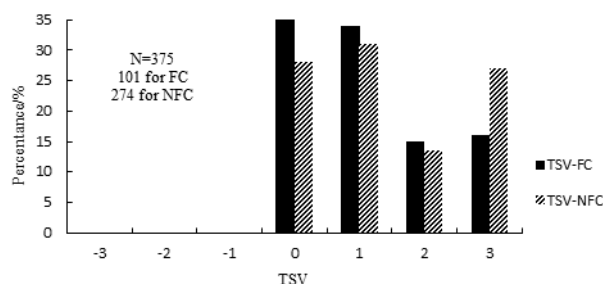


图1 测试期间(8月4-23号)北海室内气象数据
Fig1. Indoor environmental data during the test (August 4-23th) in Beihai District

表3 三亚、北海室内气象数据统计表

Tab. 3 Indoor environmental data during the test in Sanya and Beihai

参数	最小值	最大值	平均值	标准偏差
空气温度 $t_a/^\circ\text{C}$	27.4	35.2	31.3	5.52
相对湿度 RH/%	36	90	63	38.18
风速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.02	2.55	1.285	1.79
黑球温度 $t_g/^\circ\text{C}$	27.1	38	32.55	7.71



2 热感觉相关分析

2.1 热舒适相关参数总体评估

多个热舒适相关参数(TSV,TCV,PMV等)用来定量描述居住者的主观热感知,例如,热感觉是人们对所处环境冷热最直接的心理反应,热感觉的大小可间接反映出环境的冷热情况.图2得到了以TSV和TCV评价室内热环境的总体分布,结果显示(1)居住者的热舒适度广泛分布,但主要是集中在了“适中”和“不太舒适”的选项.这似乎表明虽然居住者在经历不同的室内物理环境,但他们具有的主观感受颇为相似;(2)如果深入对比,可以看出NFC模式下居住者的TSV普遍偏高,且有52%的人群认为室内热环境是舒适的(舒适度 ≥ 0),而FC模式下认为室内热环境是舒适的人群比例为63%.这可能是因为风扇作用下,多数室内温度可以维持在一个较舒适的范围,而在自然通风作用下的室内温度波动较大.

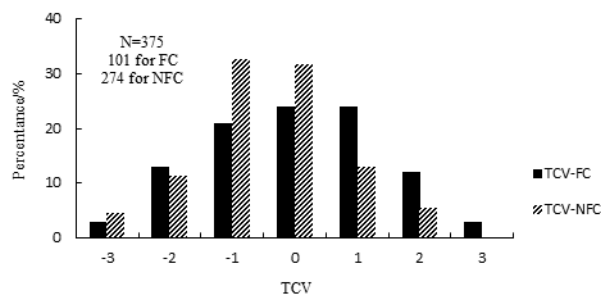


图2 TSV, TCV 调查结果
Fig.2 Results of TSV,TCV

图3表示了热舒适度TCV,热接受度TA与热感觉TSV的关系.(1)中性热感觉(TSV=0)对应于最大的热舒适度值和热可接受度值.当从中性热感觉出发,TSV逐步增大时,越来越多的调查者的TCV趋于“不舒适”,同时,TA也逐步向“不可接受”,“完全不可接受”移动;(2)当TSV增加到一定程度时,两种模式下的TCV和TA趋于一致,这表明当室内温度达到一临界值时,风扇的室内热环境调节作用也受到了一定限制,结合图3、5、8计算得出,该临界值为当TSV为1.9,体感温度为31.6 $^\circ\text{C}$,室外空气温度为32.68 $^\circ\text{C}$ 时;(3)FC模式下TCV和热接受度随TSV的变化敏感度稍大于NFC模式下TCV和热接受度随TSV的变化敏感度.

图4可以看出,(1)当TSV>0时,几乎无居住者希望热感觉维持不变,绝大多数居住者希望获得稍凉的热感觉,其中,FC模式下占89%,NFC模式下比例增大至94%.当处在一较热环境时,大部分

居住者表达了希望降低目前温度,以获得可以接受的热舒适性的期望;(2)尽管FC和NFC模式下的居住者热期望值存在差异,但差异并不显著.

出现以上现象的原因可能是由于NFC居住者通过长期的自我调节(服装、行为等),逐渐适应了当前的热环境,降低了自身的热敏感度,转移了热期望.

2.2 人体自适应水平比较

采用温度频率法对TSV和预测平均热感觉PMV分别与操作温度 t_{op} 进行线性回归分析,结果见图5,线性回归方程为式(1)~(4).对比分析后得出,(1)在FC和NFC两种模式下,TSV曲线与PMV曲线均存在不同程度偏离且近乎平行,这可能是由于在相对极端的热环境下,人体进行调节的措施和调节效果都比较有限,适应水平已经到了一个相对稳定的程度;(2)对比TSV的回归直线的斜率,可以看出TSV-NFC变化较柔和,即居住者对热环境敏

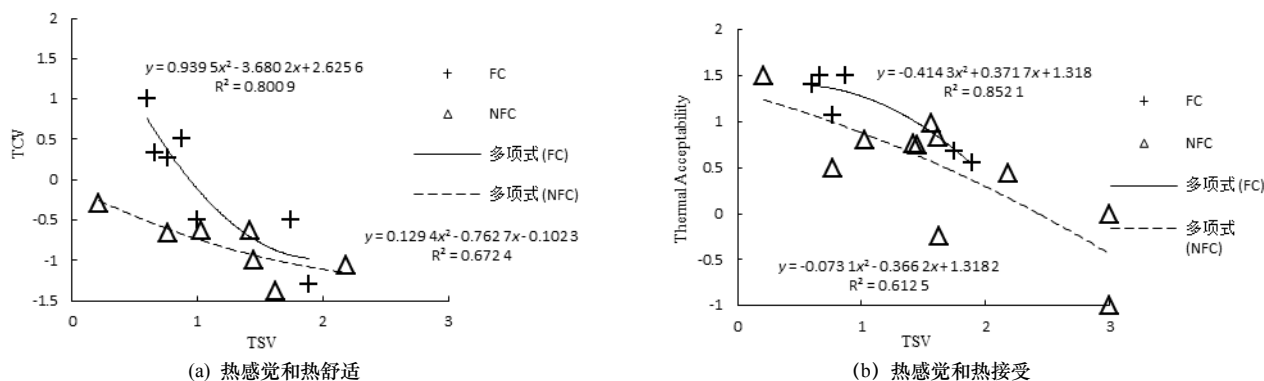


图3 热感觉分别与热舒适和热接受的关系

Fig.3 Relationship between thermal sensation and thermal comfort & thermal sensation and thermal acceptability.

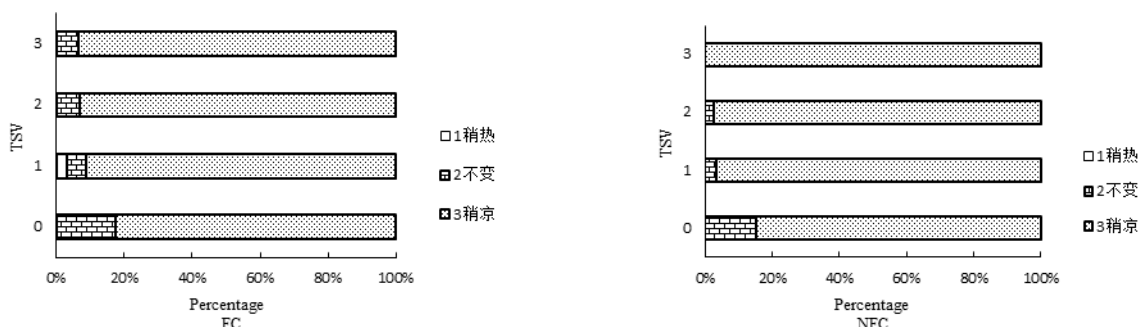
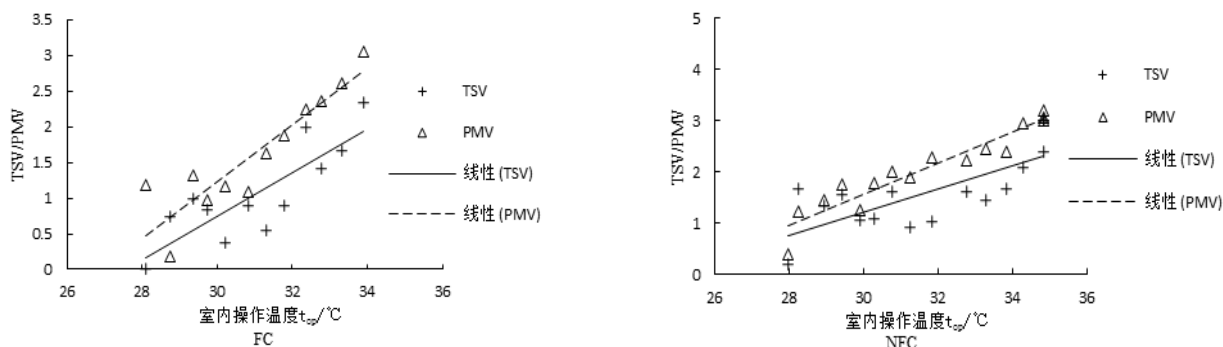


Fig.4 Relationship between thermal sensation and thermal preference.

感性较弱。这表明, 在环境趋向不舒适时, 人体的自适应能力可以起到明显地改变热感觉的作用。在室内有无风扇不同作用下, 人体的适应水平也不同, 造成这种差异的原因是人体的热感觉是一个复杂的过程, 不仅涉及人体的热平衡, 但还有如生理

适应环境, 行为调整, 和心理习惯或期望的非热因素, 人们获得的可以使其达到舒适的调节潜力也不同。为比较人体适应性在两种模式下产生的差异大小及规律, 下面将对人体适应水平进行分析比较。

Fig.5 Relationship between t_{op} against TSV and PMV

$$PMV(FC) = 0.3454x - 9.0172 \quad (R^2 = 0.7989) \quad (1)$$

$$TSV(FC) = 0.3232x - 8.947 \quad (R^2 = 0.8009) \quad (2)$$

$$PMV(NFC) = 0.3025x - 7.4978 \quad (R^2 = 0.8999) \quad (3)$$

$$TSV(NFC) = 0.2604x - 6.6968 \quad (R^2 = 0.6869) \quad (4)$$

GB/T 50785中通过提出自适应系数 λ , 建立了PMV与aPMV之间的关系。自适应系数的绝对值可用来量化人体的自适应水平, 它反映了人体在受到热刺激时试图恢复热中性状态的适应能力, 当 $\lambda=0$

时, 即 $PMV = aPMV$, 表示热环境处于舒适范围, 人体未采取适应行为; 当 $\lambda < 0$ 时, 表示在温度偏低时TSV比PMV值偏高, $\lambda > 0$ 时则相反。郑武幸等^[15]利用 λ 量化计算寒冷气候区四季人体自适应水平, 得出的室内热湿等级评价范围与GB/T 50785中给出的 λ 值有所差异。本文参照其计算方法与本次实验数据, 得到FC和NFC模式下人体自适应系数分别为: 0.43, 0.12, 对比GB/T 50785中给出的自适应

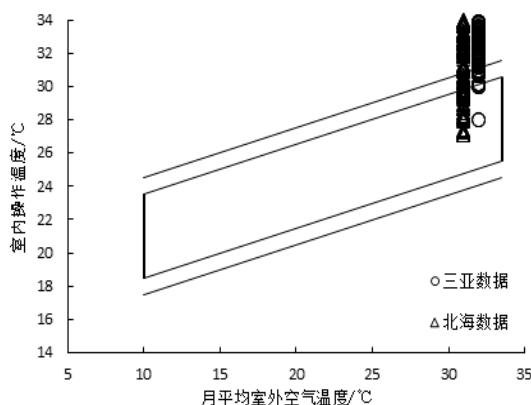
系数 λ 值,当 $PMV \geq 0$ 时, $\lambda=0.21$,但根据本文的分析结果,即使当 $PMV \geq 0$ 时,两种模式下的 λ 值并不相同,且差别较大,因此,以GB/T 50785来评价亚热带气候下FC建筑室内热环境,是否能够完全真实地反映居住者的自适应水平?利用哪一现有热舒适模型提及的可接受温度范围来评估这种热环境下的建筑更合理?

3 可接受温度范围

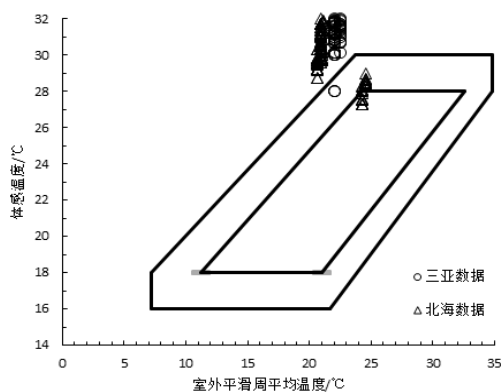
3.1 与标准适应性模型比较

为了确定评估在FC模式下居住者热舒适性的最佳方法,我们采用了两个现有标准的适应性热舒适模型:GB/T 50785和ASHRAE 55标准中提及的可接受温度范围,评估对应于主观问卷调查所测量的物理热参数.图6显示出了评价结果,如图6A所示,从GB/T 50785的适应性热舒适模型的角度看,调查建筑的室内热环境非常差,极少点(12.5%)处在推荐的舒适区.然而,图6B显示,对于ASHRAE 55标准的适应性热舒适模型,评价效果比较好,45%的点处于80%或90%的可接受范围.与GB/T 50785模型对比,从ASHRAE 55标准获得的评估结果与主观结果更加一致(参考图2),这表明居住者的热反应主要集中在了“中性”和“稍微可以接受”的选项.同时参考前文图3-5结果以及自适应系数的分析对比,可以认为ASHRAE 55的适应性热舒适模型更适用于亚热带气候下的FC民居.

然而,尽管ASHRAE 55更为适用,仍仅有45%的点位于可接受范围,因此,本文进一步利用FC模式建筑现场测试和问卷调查所得的数据确定了夏季室外温度下满意率为80%和90%的可接受温度范围上限.



(a) ASHARE55适应性热舒适模型



(b) GB/T 50785适应性热舒适模型

图6 ASHARE55和GB / T 50785适应性热舒适模型

Fig. 6 Adaptive comfort model in ASHARE55 and GB / T 50785

3.2 可接受温度范围(上限)分析

为了充分反映不同温度下使用风扇的自然运行状态建筑中居民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°C 为1个温度段单元,寻找室外各温度段下的室内操作温度与TSV的回归方程^[16].室外空气温度范围从 $27\sim 35^{\circ}\text{C}$,总共分为4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,室内操作温度所对应的实际投票值之间的一元回归方程,具体如图7所示.从图7和回归方程可以看出,室外温度较高时,每个温度段回归出来的方程斜率相近;随温度增高,斜率轻微增大.这说明尽管较高温度下人体表现出来的敏感程度相似,但温度越高仍越敏感见图7(a)~(d).

在得到各室外空气温度段下室内操作温度与TSV之间的回归方程的基础上,根据Franger的PMV-PPD方程,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,由于测试在夏季进行,故只计算各温度段下,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,室内操作温度为纵坐标作图,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的上限值,具体如图8所示.从图8可以明显看出回归后的80%、90%可接受线(上限)近似平行,这反映了在相对极端的热环境下,人体进行调节的措施和调节效果都比较有限;可接受温度范

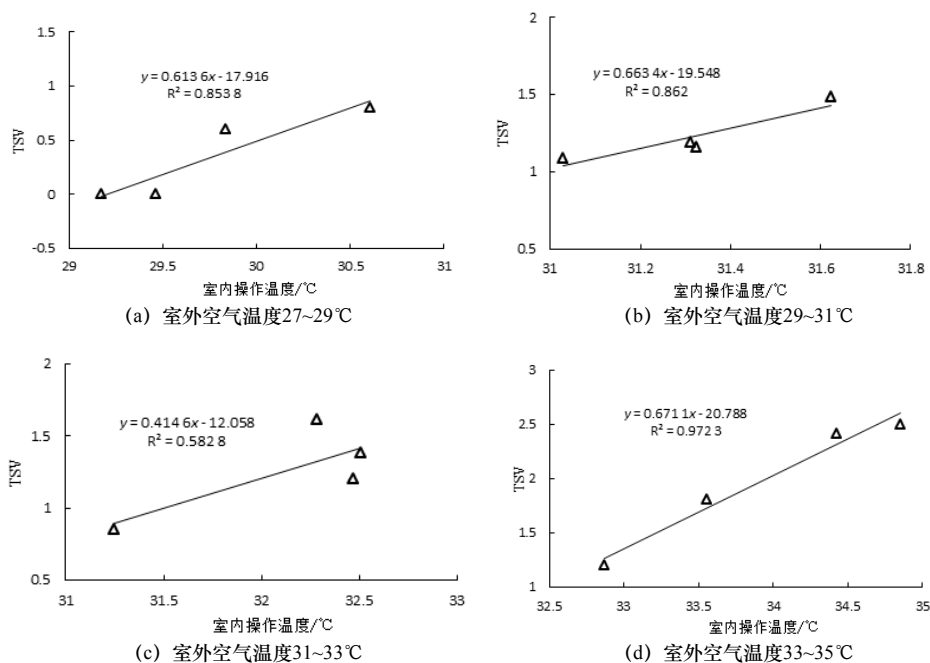


图7 室外空气温度下 TSV 与室内操作温度的关系

Fig.7 Relationship between TSV (with tout) and top

围上限提高、80%与90%可接受线平移温度减小，这表明尽管风扇在一定程度上改善了人体热舒适，

但较高的温度下居住者对热湿环境的满意度变化更为敏感。

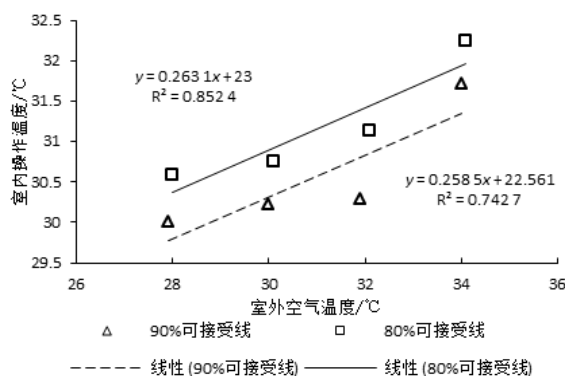


图8 80%和90%可接受温度线性回归(上限)

Fig.8 The acceptable temperature linear regression of 80%&90%(upper limit)

4 结语

通过纵向分析湿热气候农村FC和NFC模式建筑居住者热舒适现场调查结果,可以得到以下结论和建议:

(1) 当TSV为1.9,体感温度为31.6℃,室外空气温度为32.68℃时,风扇的室内热环境调节作用受到了较大限制;

(2) 两种模式下TSV和PMV随温度变化的规律存在明显的差异,说明人体在不同模式对环境的适应性水平不同,产生这种差异的原因是FC模式民居中人们获得的可以使其达到舒适的调节潜力不同造成的;

(3) FC和NFC模式下自适应系数分别为:0.43、0.12,说明了两种模式下人体适应水平差异性,进一步与GB/T 50785中给出的自适应系数λ值对比,均有较大差别;

(4) 与GB/T 50785模型对比,从ASHRAE 55标准获得的评估结果与主观结果更加一致,ASHRAE 55的适应性热舒适模型更适用于亚热带气候下的FC模式建筑;

(5) 将FC模式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,得到夏季室外温度下满意率为80%和90%的可接受温度范围上限。反映了亚热带气候下人们进行调节的措施和调节效

果都比较有限且尽管风扇在一定程度上改善了人体热舒适,但较高的温度下居住者对热湿环境的满意度变化更为敏感。

参考文献 references

- [1] BUSCH JF. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand[J]. *Energy Build*, 1992,18(3/4):235-49.
- [2] de Dear RJ, LEOW KG, FOO SC. Thermal comfort in the humid tropics: field experiments in air-conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore[J]. *Int J Biometeorology* 1993,34(4):259-65.
- [3] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy:ASHRAE Standard 55-2013[S]. Atlanta, Georgia., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013.
- [4] ZHAI Yongchao, ZHANG Yufeng, ZHANG Hui, et al. Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans[J]. *Build Environment*, 2015(90):178-185.
- [5] FANGER PO. Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering[M]. Copenhagen: Danish Technology Press, 1970.
- [6] Brager G, de Dear RJ. Thermal adaptation in the built environment: a literature review[J]. *Energy Build*, 1998(27):83-96.
- [7] de Dear RJ, BRAGER G. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revision to ASHRAE Standard 55[J]. *Energy Build*,2002,34:549-61.
- [8] NICOL F, HUMPHREYS M. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European Standard EN15251[J]. *Build Environ*, 2010(45):11-7.
- [9] NICOL F, HUMPHREYS M. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings[J]. *Energy Build*, 2002(34):563-72.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T 50785[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012.

出版社,2012.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings:GB/T 50785[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

- [11] PFAFFEROTT JU, HERKEL S, KALZ DE, et al. Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria[J]. *Energy Build*, 39 (7): 750-757.
- [12] R. de Dear, Adaptive thermal comfort in natural and hybrid ventilation[C].// Hyb Vent Forum'99—First International One day Forum on Natural and Hybrid, Ventilation. Sidney, AU: 1999.
- [13] RIJAL HB, HUMPHREYS MA, NICOL JF. How do the occupants control the temperature in mixed-mode buildings[C].// Predicting the use of passive and active controls, Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge Network for Comfort and Energy Use in Buildings. Cumberland Lodge, Windsor, UK: 2008.
- [14] LUO Maohui, CAO Bin, DAMIENS Jerome, et al. Evaluating thermal comfort in mixed-mode buildings: A field study in a subtropical climate[J]. *Build Environment*, 2015(88):46-54.
- [15] 郑武幸,杨柳,宋晓吉,等.寒冷地区人体自适应水平的气候季节性[J]. *HV&AC*, 2015, 45(11):80-85.
ZHENG Wuxing, YANG Liu, SONG Xiaoji, et al. Various levels of adaptation in four seasons of a year in cold climate zone of China[J].*HV&AC*, 2015,45(11):80-85.
- [16] 刘红, 李百战, 马晓磊.夏热冬冷地区非采暖空调室内可接受温度范围[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011;33(4):127-133.
LIU Hong, LI Baizhan, MA Xiaolei. Acceptable temperature range of indoor environment without air conditioning and heating in hot summer and cold winter zone[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011,33(4):127-133.

(编辑 沈波)

(上接第542页)

参考文献 References

- [1] KUWAMURA H, AKIYAMA H. Brittle fracture under repeated high stresses [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1994, 29 (1-3): 5-19.
- [2] TATEISHI K, HANJI T, MINAMI K. A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(6): 887-896.
- [3] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures. Technical Rep. 145, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Calif, 2004.
- [4] HANCOCK J W, MACKENZIE A C. On the mechanics of ductile failure in high-strength steel subjected to multi-axial stress states [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1976, 24(3): 147-169.
- [5] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969, 17(3): 201-217.
- [6] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Prediction of

Ductile Fracture in Steel Moment Connections During Earthquakes Using Micromechanical Fracture Models. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 297, 2004.

- [7] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Void Growth Model and Stress Modified Critical Strain Model to Predict Ductile Fracture in Structural Steels [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2006, 132(12): 1907-1918.
- [8] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Finite-Element Simulation of Ductile Fracture in Reduced Section Pull-Plates Using Micromechanics-Based Fracture Models [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2007, 133(5): 656-664.
- [9] KANVINDE A M, FELL B V, GOMEZ I R, et al. Predicting fracture in structural fillet welds using traditional and micromechanical fracture models [J]. *Engineering Structures*, 30(2008): 3325-3335.
- [10] LIAO F F, WANG W, CHEN Y Y. Parameter calibrations and application of micromechanical fracture models of structural steels [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2012, 42(2): 153-174.

(编辑 沈波)