

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201805105

长沙高校宿舍夏季热舒适与热适应现场调研

李念平,刘鹏龙,伍志斌
(湖南大学 土木工程学院,长沙 410082)

摘 要:为研究长沙地区高校自然通风宿舍夏季热舒适与热适应特征,对长沙地区某两所大学的15栋自然通风宿舍进行现场调研。在测试环境参数的同时,对受试者热感觉以及热适应行为进行问卷调查,共收集调研数据437份。通过温度频率法和加权线性拟合得到服装热阻、预测平均热感觉(PMV)、实际平均热感觉(MTS)与室内操作温度的关系式,研究结果表明:夏季服装热阻与室内操作温度负相关,每升高单位操作温度,服装热阻减少0.019 7 clo;PMV较MTS偏大,操作温度越高,两者相差越大,两者所对应的可接受温度范围分别为24.4℃~28.7℃和23.8℃~28.9℃;利用适应性PMV模型计算得出长沙地区夏季高校自然通风宿舍自适应系数为0.5,这与GB/T50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》中给出的规定值有较大出入;将男、女性调研数据分开研究,得到每升高单位操作温度,男、女性服装热阻分别减少0.028 8、0.016 4 clo,且男性比女性感觉更温暖;男、女性的热中性温度分别为26.3℃、26.7℃,可接受温度范围分别为23.8℃~28.7℃、24.2℃~29.2℃。本研究为高校宿舍热舒适与热适应研究提供了参考。

关键词:自然通风;长沙;高校宿舍;热舒适;适应行为;现场调研

中图分类号: TU834.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)04-0194-07

Field survey on summer thermal comfort and adaptation of university dormitories in Changsha

LI Nianping, LIU Penglong, WU Zhibin
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To study the characteristics of summer thermal comfort and adaptation of naturally ventilated university dormitories in Changsha, 15 naturally ventilated dormitories of two universities in Changsha are investigated in this paper. Environmental parameters were recorded, and surveys were conducted on the thermal sensation and thermal adaptation behavior of the subjects. In total, 437 research data were collected. Based on temperature frequency method and weighted linear fitting method, the relations of indoor operating temperature with clothing thermal resistance, the predicted mean thermal sensation (PMV), and the actual mean thermal sensation (MTS) were determined. Results indicate that clothing thermal resistance negatively correlated with indoor operating temperature in summer. With the increase of unit operating temperature, clothing thermal resistance reduced by 0.019 7 clo. PMV was larger than MTS, and the higher the operating temperature was, the greater the difference between the two was. The corresponding acceptable temperature ranges of the two were 24.4℃~28.7℃ and 23.8℃~28.9℃, respectively. By using adaptive PMV model, the adaptive coefficient of the naturally ventilated university dormitories in Changsha was calculated to be 0.5, which is in great discrepancy with the prescribed values given in GB/T50785—2012 “Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings.” The male and female research data were studied separately. As the unit operating temperature increased, the clothing thermal resistance of male and female reduced by 0.028 8 clo and 0.016 4 clo respectively. Male feels warmer than female in summer. The neutral temperatures of male and female were 26.3℃ and 26.7℃, respectively. The acceptable temperature ranges of them were 23.8℃~28.7℃ and 24.2℃~29.2℃, respectively. This study provides reference for the studies on thermal comfort and thermal adaptation of university dormitories.

Keywords: natural ventilation; Changsha; university dormitory; thermal comfort; adaptive behavior; field survey

近年来国内外建筑环境热适应研究指出人们在自然通风建筑中感觉舒适的热环境相较于非自然通风状况下要宽泛得多,且可接受的室内舒适温度与室外温度密切相关^[1-4]。相关人员在各地开展了大量的现场研究工作,但大部分研究致力于办公建筑和住宅,很少涉及高校宿舍。而高校宿舍夏季室内闷

收稿日期: 2018-05-19
基金项目: 国家自然科学基金(51578220)
作者简介: 李念平(1962—),男,教授,博士生导师
通信作者: 李念平,linianping@126.com

热、通风状况较差、人员密度大、年龄分布集中,使得宿舍内的热环境与其他公共和民用建筑有较大区别,因此有必要单独研究高校宿舍的热舒适与热适应特征.

王剑等^[5]对哈尔滨某高校自然通风宿舍春季和秋季的热舒适进行现场调研,得到热舒适温度范围及热舒适适应模型. 司凌燕^[6]对西安地区某大学宿舍学生的热舒适与热适应进行分析,得到各季节服装热阻与操作温度的关系式,并建立了中性温度预测模型. 何鸣等^[7]现场调研重庆大学学生宿舍冬季空调工况热环境状况,研究表明学生对湿度的敏感度低于对温度的敏感度,学生能接受的室内环境温度范围较 ASHRAE 55—2004 标准规定的范围宽.

目前中国对高校宿舍热环境研究较少,研究地区多集中在严寒寒冷地区,而宿舍是大学生生活学习的重要场所,宿舍的功能已趋于多样化,为此本文将着眼于长沙地区,对高校自然通风宿舍内大学生非睡眠状态下的热舒适进行现场调研,研究高校宿舍的热环境、热舒适及热适应特征,为夏热冬冷地区高校宿舍热环境评价与设计提供参考,并为热适应研究提供依据.

1 方法

1.1 研究对象

2016 年 7 月到 2016 年 9 月,对长沙地区某两所高校 15 栋自然通风宿舍进行了现场调研. 调研对象皆为在夏热冬冷地区生活时间超过 1 a 的身体健康的在校大学生,调研得到 450 份数据,为确保热舒适研究的可靠性,将新陈代谢率大于 2.0 met 的数据剔除,得到有效数据 437 份(男性 270 份,女性 167 份). 对象基本信息统计见表 1,表 1 中的服装热阻是按照 ASHRAE 55—2004 标准^[8]计算出的受试者所着服装的总热阻值,再加上座椅的附加热阻值^[9]所得;新陈代谢率是根据测试前半个小时内受试者所做活动,按照 ASHRAE 55—2004^[8]标准换算所得.

表 1 受试者信息统计表
Tab. 1 Information statistics of subjects

参数	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	服装热阻/clo	代谢率/met
最小值	16.00	150.00	40.0	0.05	1.0
最大值	34.00	195.00	105.0	0.71	2.0
平均值	20.80	168.60	58.9	0.35	1.1
标准偏差	2.35	7.97	10.1	0.13	0.2

1.2 研究内容及方法

本文采用现场测试与问卷调查相结合的研究方法. 现场测试主要包括室内外环境参数采集,仪器参数见表 2,均满足 ISO 7726 标准要求且测试之前各仪器均按要求进行过校核. 室内环境参数包括室内空气温度、相对湿度、黑球温度和空气流速. 室外环境参数包括室外空气温度、相对湿度. 室内热环境测量测点位置距受试者 0.3 m 以内,选择距地面 0.1、0.6、1.1 m 这 3 个高度,分别对应坐姿人体的脚踝、腹部和头部(如图 1 所示). 为保证所测参数的准确性,待仪器放置于指定位置 10 min、数值稳定后读取室内外空气温湿度及黑球温度,空气流速取 1 min 内的平均风速.

表 2 仪器参数
Tab. 2 Instrument parameters

物理量	空气温度/℃	相对湿度/%	黑球温度/℃	空气流速/(m·s ⁻¹)
仪器	TR-72U 温湿度记录仪	TR-72U 温湿度记录仪	WBGT-2009 热指数仪	Testo 425 热敏风速仪
量程	-10 ~ 60	10 ~ 95	0 ~ 80	0 ~ 20
精度	±0.3	±5	±0.6	±0.03

主观问卷调查包括受试者基本情况、所着服装类型、热舒适和热适应性行为等,问卷中的热感觉采用 ASHRAE 7 点热感觉标度(+3 很热,+2 热,+1 微热,0 中性,-1 微冷,-2 冷,-3 很冷).



图 1 仪器及现场调研

Fig. 1 Instruments and field survey

2 数据分析

2.1 热环境

2.1.1 空气温度与相对湿度

对调研期间自然通风宿舍室内外空气温度与相对湿度随日期的变化情况进行分析,结果如图 2、3 所示. 室内温度变化趋势与室外空气温度变化趋势相似,同样室内、外相对湿度变化趋势也相似. 室内温湿度与室外温湿度具有更为密切的联系是自然通风建筑有别于空调建筑的重要特征之一.

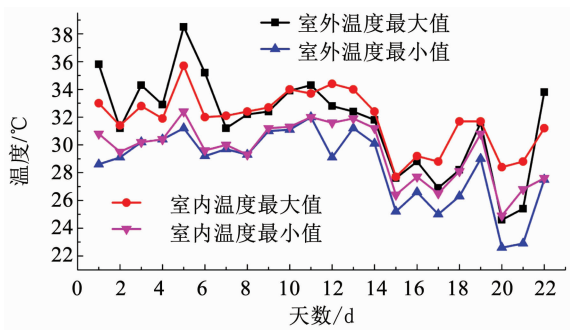


图 2 室内、外温度变化趋势

Fig. 2 Trends of indoor and outdoor temperature

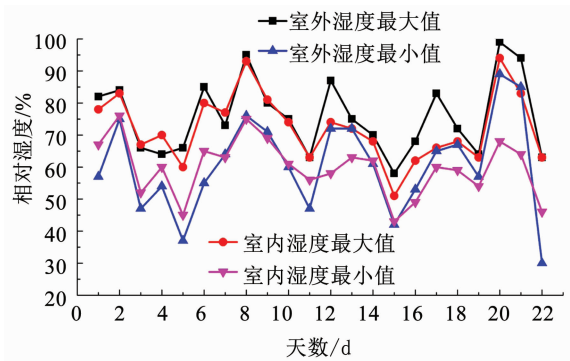


图 3 室内、外相对湿度变化趋势

Fig. 3 Trends of indoor and outdoor relative humidity

调研期间室内空气温湿度变化范围分别为 24.9℃~35.7℃和 43%~94%，其平均值分别为 30.6℃和 65%。室外空气温湿度变化范围则分别为 22.6℃~38.5℃和 30%~99%，比室内温湿度变化范围大；平均值分别为 30℃和 66%。结果表明长沙地区夏季温度高、湿度较大，符合夏热冬冷地区夏季闷热的特点，宿舍内热环境范围远偏离 ASHREA 55-2004 标准^[8]规定的热舒适温度范围。

2.1.2 不均匀性

所测热环境参数除黑球温度外，其余参数均在离地面 0.1、0.6、1.1 m 的 3 个高度上进行测量，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，即热环境不均匀度^[10]。统计并计算所有调研数据对应热物理量的不均匀度与相对不均匀度（即不均匀度与相应平均值之比），取它们的平均值，结果见表 3。

表 3 热环境参数平均值及不均匀度

Tab. 3 Average and unevenness of thermal environmental parameters

热环境参数	空气温度/℃	相对湿度/%	空气流速/(m·s ⁻¹)
平均值	30.60	64.00	0.40
不均匀度	0.30	2.76	0.67
相对不均匀度	1.03	4.37	127.00

注：相对不均匀度，%。

表 3 结果表明 3 个物理参数中空气温度、相对湿度的相对不均匀度较小，空气流速的相对不均匀度极大，受试者周边平均空气流速为 0.40 m/s，处于较高水平，说明室内气流分布不均，与文献[10]所得结论一致，主要是由开窗和使用风扇造成的。

2.1.3 活动量和服装热阻

活动量和服装热阻是影响人体热感觉和热舒适较重要的个人因素。现场调研中，收集的是受试者测试前半个小时内的活动状态，大多数情况下受试者在测试前为静坐活动，极少数受试者参与测试之前半个小时内有进行剧烈运动，测试期间都是静坐填写问卷，代谢率大于 2.0 met 的数据已剔除。对受试者活动量进行评估获得的平均新陈代谢率为 1.1 met，考虑到同一个活动其代谢率也可能出现较大的差别，取所有样本的平均新陈代谢率更为合理，综合考虑可认为，受试者的新陈代谢率约为 1.1 met。

调整服装是一种重要的热适应机会和行为，调研建筑为宿舍，属于受试者的自由空间，所以其享有充分调整服装的自由。操作温度 t_{op} 是综合考虑了空气温度、空气流速和平均辐射温度对人体热感觉的影响而得出的合成温度，能更全面地表征促使服装调整的室内热环境因素，所以选择操作温度作为室内热环境指标。其值为室内空气温度 t_a 与平均辐射温度 t_{mrt} 的平均值，其中 t_{mrt} 可根据下式^[11]计算得出

$$t_{mrt} = t_g + 2.4v^{0.5}(t_g - t_a).$$

式中： t_g 为室内黑球温度，℃； v 为空气流速，m/s。

参考已有研究，并结合现场调研的特点，即与实验室研究相比，样本在操作温度这一方向上不是均匀分布的，存在某区间内样本量较多而另一区间样本量较少的现象，故采用温度频率法即将操作温度以 0.25℃为间隔，分为若干操作温度区间，以每一区间内所测得的操作温度的平均值为自变量、受试者服装热阻的平均值为因变量，进行加权线性拟合（如图 4 所示），权值取每个区间内样本量与总样本量的比值。

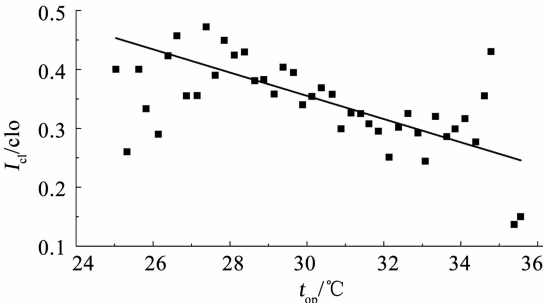


图 4 服装热阻与室内操作温度关系图

Fig. 4 Relationship between clothing thermal resistance and indoor operating temperature

得到服装热阻与室内操作温度的关系式为

$$I_{cl} = -0.019\,7t_{op} + 0.947, R^2 = 0.635\,8. \quad (1)$$

由式(1)可知,服装热阻与室内操作温度呈负相关,每升高单位操作温度,服装热阻减少0.019 7 clo,这表征了受试者随所处环境变化而调整服装的适应

特征,即受试者趋于减少着装或选择更薄的衣服,来适应更高的环境温度。

许多学者通过现场研究获得了现场调查时的服装热阻与室内操作温度 t_{op} 或空气温度 t_a 之间的关系,现将本文结果同已有研究结果进行比较,见表4。

表4 不同地区、不同建筑服装热阻的对比					
Tab. 4 Comparison of clothing thermal resistance from different buildings in different areas					
地区	建筑类型	研究期限	拟合关系式	R^2	文献
哈尔滨	自然通风	春季、秋季	$I_{cl} = -0.091\,6t_a + 3.058$	0.813 9	[5]
重庆	自然通风	全年	$I_{cl} = -0.051\,8t_a + 1.782$	0.955 5	[12]
广州	空调	全年	$I_{cl} = -0.042\,0t_{op} + 1.692$	0.304 0	[13]
长沙	自然通风	夏季	$I_{cl} = -0.019\,7t_{op} + 0.947$	0.635 8	本文

由表4对比可知,本文研究得到的拟合关系式(1)的斜率的绝对值和常数项均小于其他现场研究获得的结果,且服装热阻也偏小. 主要是因为本文研究的是夏季宿舍热环境,仅用夏季数据进行拟合,而其他现场研究皆是用多个季节的数据拟合得到的结果. 这也说明多个季节的数据拟合结果会掩盖各季节的特殊性和季节间的差异性,从而不能反映出各季节的真实规律和特点。

本文所得拟合关系式的斜率绝对值偏小,说明长沙地区夏季高校自然通风宿舍内学生对服装热阻的敏感度较低. 这是因为夏季气温较高且稳定,受试者所着衣物较少,调整的范围有限,也无需频繁调整服装。

2.2 热感觉

2.2.1 热感觉与操作温度的关系

为分析热感觉与室内操作温度的关系,利用调研数据和Franger^[14]的PMV方程计算得到预测平均投票值. 同样采用温度频率法将实际平均热感觉MTS和预测平均热感觉PMV分别与操作温度 t_{op} 进行加权线性拟合,如图5所示,其中MTS为受试者在各操作温度区间内填写的热感觉投票的平均值,PMV为各操作温度区间内预测平均投票值的平均值,权值的取值方法与上文一致. 它们的加权线性拟合方程如下:

$$PMV = 0.396\,2t_{op} - 10.507\,2, R^2 = 0.958\,3; \quad (2)$$

$$MTS = 0.335\,2t_{op} - 8.830\,3, R^2 = 0.815\,9. \quad (3)$$

由图5可以看出,MTS和PMV与室内操作温度呈较好的线性关系,但两曲线间存在明显的偏离,PMV曲线在大于27.5℃的操作温度区间内较MTS高,且随着操作温度的增大,两曲线偏离也越大;在小于27.5℃的操作温度区间内则相反. 这说明自然通风建筑内的受试者为达到舒适进行了适应性调节,比如开关门窗或风扇、增减衣物、增减活动量等;两者偏离越大,热适应行为对其热感觉影响越大。

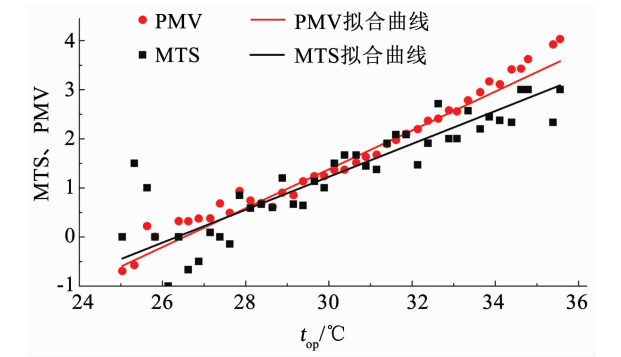


图5 MTS、PMV与室内操作温度关系图

Fig. 5 Relationship between MTS/PMV and indoor operating temperature

2.2.2 可接受温度范围

在MTS、PMV与室内操作温度的加权线性拟合回归方程的基础上,将ASHRAE热感觉标尺中间3个分度视为可接受,根据Franger^[14]的PMV-PDD模型,得出当预测热感觉投票值PMV为±0.50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时,有80%的人满意室内热环境. 将PMV = ±0.85、±0.50分别代入回归方程式(2)中得到PMV所对应的80%和90%可接受的温度范围分别为24.4℃~28.7℃和25.3℃~27.8℃。

假设实际热感觉投票MTS与实际不满意率遵循同样的规律,则将MTS = ±0.85、±0.50分别代入回归方程式(3)中,即得到MTS所对应的80%和90%可接受的温度范围分别为23.8℃~28.9℃和24.8℃~27.8℃。

另将PMV = 0、MTS = 0分别代入对应回归方程中,得两者对应热中性温度分别约为26.5℃、26.3℃. PMV对应热中性温度比MTS对应温度高,但是MTS对应的可接受温度范围要比PMV对应范围大,与文献[3]研究结果一致. 这是因为受试者的适应性调节行为影响着其热可接受度,使其在相同温度区间

内有着更高的热接受度,适应性调节行为的作用不可忽略.

2.2.3 适应性预测平均热感觉

适应性热舒适理论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,而 PMV 模型并未考虑适应性调节,导致了预测平均热感觉投票值与实测平均热感觉投票值的差异. Yao 等^[15]运用黑箱理论提出了适应性预测平均热感觉指标(aPMV),并建立了 aPMV 模型. 模型中采用自适应系数 λ 将 PMV 与 aPMV 联系起来,其关系如下式所示,用以解释自然通风建筑中 PMV 和 MTS 之间产生的差异.

$$\text{aPMV} = \frac{\text{PMV}}{1 + \lambda \text{PMV}} \tag{4}$$

人体不同水平的自适应调节可由不同的自适应系数 λ 反映. 郑武幸等^[16]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—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》中给出的 λ 值有所差异. 本文参照其计算方法,即通过下式^[16]求得自适应系数 λ .

令 $x = \frac{1}{\text{PMV}}, y = \frac{1}{\text{aPMV}}$, 那么, 式(4)就可以表示为

$$y = x + \lambda.$$

为了与给定的一组数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_n, y_n)$ 接近, 最佳拟合曲线 $f(x)$ 应具有最小方差 Π , 即

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 =$$

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (x_i + \lambda)]^2,$$

式中 n 为数据组数.

为使方差最小,由微分学的求极限方法可得

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \lambda} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - x_i - \lambda) = 0,$$

那么

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n}.$$

根据上述方法及测试数据,计算出夏热冬冷地区高校宿舍夏季人体自适应系数 λ 为 0.50, $\lambda > 0$ 表示在温度较高时适应性热感觉投票比预测热感觉投票小,与可接受温度范围结果一致. GB/T 50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》中给出的居住建筑的自适应系数为 0.21,教育建筑的为 0.17,本文所得自适应系数与标准所给系数并不相同,且差别较大. 这证实了高校宿舍的热舒适与热

适应特征不同于公共建筑和一般居住建筑.

2.3 性别差异

2.3.1 服装热阻在性别上的差异

调研期间共获得 437 份调研数据,其中男性数据 270 份,女性数据 167 份. 为研究服装热阻在性别上的差异,将男、女受试者的相关数据分开统计,男、女性服装热阻信息见表 5.

表 5 男、女性服装热阻信息表

Tab. 5 Clothing thermal resistance information of male and female clo

服装热阻	最小值	最大值	平均值	标准偏差
男性	0.05	0.71	0.318	0.138
女性	0.14	0.71	0.390	0.104

同样将室内操作温度 t_{op} 与服装热阻 I_{cl} 进行加权线性拟合,如图 6 所示,得到回归方程式为:

$$I_{\text{男}cl} = -0.0288t_{op} + 1.1865, R^2 = 0.6796; \tag{5}$$

$$I_{\text{女}cl} = -0.0164t_{op} + 0.9, R^2 = 0.5232. \tag{6}$$

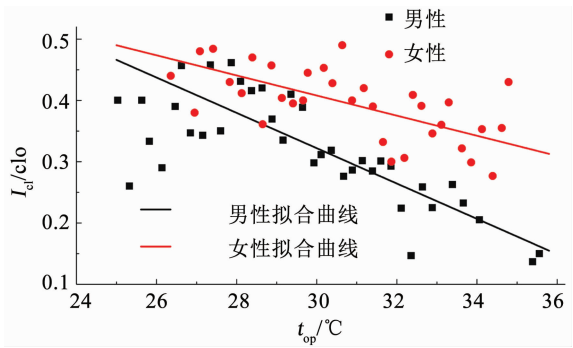


图 6 男、女性服装热阻与室内操作温度关系

Fig. 6 Relationship between clothing thermal resistance of male/female and indoor operating temperature

可以看出男、女性服装热阻都与室内操作温度呈负相关,但服装热阻在性别上有明显差异. 在图 6 中所示的温度区间内,女性服装热阻始终大于男性,且温度越大两者之间的差距越大;男性拟合曲线的斜率相比于女性要大得多,每升高单位操作温度,男、女性服装热阻分别减少 0.028 8 clo 和 0.016 4 clo.

说明夏热冬冷地区夏季女性的服装热阻比男性的大,而男性对服装热阻的敏感度更高. 结合表 5 中数据分析,主要是因为男性的服装热阻可调整范围比女性的大,且存在生理方面的客观原因,女性所着服装普遍比男性多,男性在宿舍的着装也比女性更为随意.

2.3.2 热感觉在性别上的差异

为研究热感觉在性别上的差异,同样采用温度频率法分别将男、女性实测平均热感觉 MTS 与室内

操作温度 t_{op} 进行加权线性拟合,如图 7 所示,得到回归方程式为:

$MTS_{男}=0.343\ 9t_{op}-9.036,\ R^2=0.723\ 6;\ (7)$

$MTS_{女}=0.338\ 7t_{op}-9.038\ 8,\ R^2=0.746\ 3.\ (8)$

可以看出男、女性实测平均热感觉 MTS 都与室内操作温度呈正相关;女性 MTS 拟合曲线在图 7 中所示温度区间内始终在男性拟合曲线的下方;两回归方程式的斜率基本相同. 利用所得回归方程计算夏季不同性别的热中性温度以及可接受温度范围,得夏季男、女性的热中性温度分别为 26.3℃和 26.7℃;男性 80% 和 90% 可接受的温度范围分别为 23.8℃~28.7℃和 24.8℃~27.7℃;女性对应温度范围分别为 24.2℃~29.2℃和 25.2℃~28.2℃.

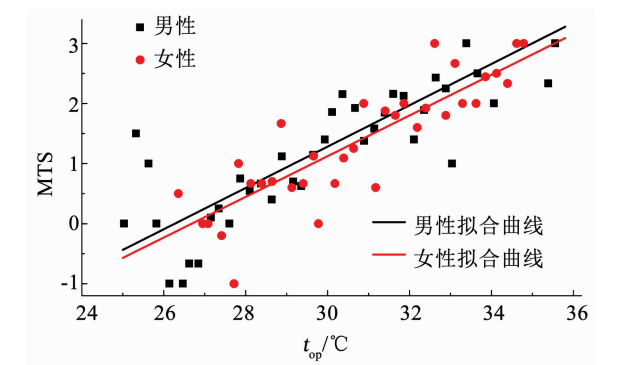


图 7 男、女性 MTS 与室内操作温度关系图

Fig. 7 Relationship between MTS of male/female and indoor operating temperature

可知,夏季高校自然通风宿舍内男性比女性感觉更为暖和;女性的 MTS 与室内操作温度较男性有更好的线性关系;女性热中性温度比男性高 0.4℃,女性的热中性温度、80% 和 90% 可接受温度上、下限都比男性的高. 这主要是因为男、女性生活习惯、生理反应不同,且女性所着服装较多,对于夏季高温环境表现出较男性更强的适应性. 本文对男、女性热感觉、可接受温度范围及热中性温度的研究结果同文献[17]对各气候分区的探讨结果一致.

2.4 适应行为

本次调研针对适应行为在问卷上设置了增减衣物、开窗、使用风扇、手摇扇、喝冷饮等选项供受试者进行多项选择. 现对适应行为进行统计,将各适应行为频数与总样本量之比作为其频率,得到如图 8 所示. 由图 8 中数据可知增减衣物、开窗、使用风扇的频率远高于其他行为,使用风扇的频率最高.

对增减衣物、开窗、使用风扇 3 种行为进一步分析,以 1℃为统计区间,计算相同操作温度区间内各行为发生的次数与该区间内样本量之比,作为行为

比例. 得到各行为比例随室内操作温度的变化关系如图 9 所示.

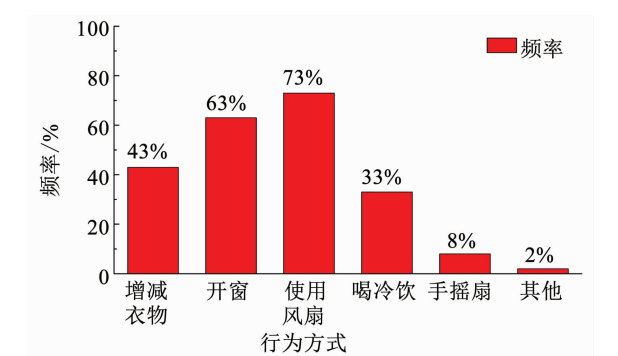


图 8 受试者适应行为频率图

Fig. 8 Frequency chart of adaptive behavior of the subjects

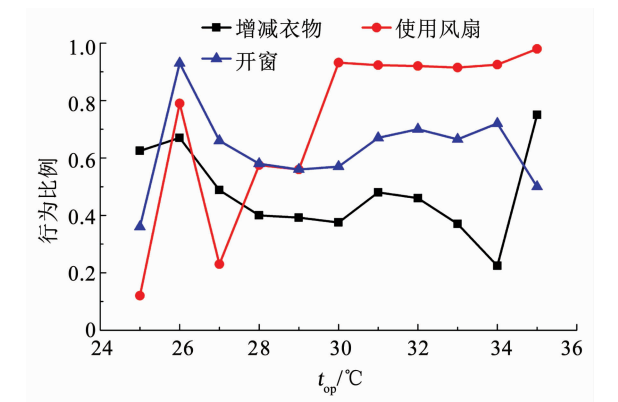


图 9 适应行为比例与室内操作温度关系

Fig. 9 Relationship between adaptive behavior ratio and indoor operating temperature

由图 9 可以看出,随着操作温度的增高,增减衣物、开窗的比例并无明显的变化,增减衣物基本维持在 40% 以上,开窗维持在 60% 以上. 而使用风扇的比例有明显波动,在 27℃~30℃区间内比例急剧增大,30℃以上则趋于稳定,维持在 95% 以上. 说明,三者相比,使用风扇的行为变化与室内操作温度的相关程度更高,变化趋势更加明显.

3 结 论

- 1) 每升高单位操作温度,受试者服装热阻减少 0.019 7 clo,反映了夏季气温高且稳定,受试者所着衣物少,调整范围有限的特点.
- 2) PMV 和 MTS 均与室内操作温度正相关. PMV 值较 MTS 偏大,两者所对应的可接受的温度范围分别为 24.4℃~28.7℃和 23.8℃~28.9℃. 受试者的适应性行为使得 MTS 对应的可接受的温度范围更大.
- 3) 长沙地区高校宿舍夏季自适应系数为 0.5,与 GB/T50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》中的规定值有较大出入. 说明高校宿舍的热

适应特征不同于公共建筑和一般居住建筑。

4) 女性服装热阻大于男性,每升高单位操作温度,男、女性服装热阻分别减少 0.028 8 clo 和 0.016 4 clo。由于生理原因,女性所着服装多于男性,男性在宿舍着装更为随意、服装调整范围大。

5) 男性比女性感觉更温暖,女性可接受温度上、下限比男性高,男、女性热中性温度分别为 26.3 ℃ 和 26.7 ℃。因为女性所着服装较多,对夏季高温环境表现出更强的适应性。

6) 增减衣物、开窗、使用风扇是最主要的 3 种适应行为,使用风扇的行为比例与室内操作温度的相关程度更高。

参考文献

- [1] GAO Jie, WANG Yi, WARGOCKI P. Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings [J]. Building and Environment, 2015, 92: 200. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.04.030
- [2] HUMPHREYS M A, RIJAL H B, NICOL J F. Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database[J]. Building and Environment, 2013, 63(5): 40. DOI:10.1016/j.buildenv.2013.01.024
- [3] 闫海燕,郝利平,杨柳,等. 银川住宅建筑夏季室内热环境与热舒适调查研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(12): 20
YAN Hanyan, HAO Liping, YANG Liu, et al. Indoor environment and thermal comfort of residential buildings in Yinchuan in summer [J]. Building Science, 2015, 31(12): 20. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu2015.12.04
- [4] 李光英,尚春静,李小雪,等. 湿热地区自然通风建筑过渡季热舒适研究——以海口学生宿舍为例[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(4): 140
LI Guangying, SHANG Chunjing, LI Xiaodong, et al. Thermal comfort in naturally ventilated buildings in hot and humid area in transitional season——Take the student dormitory of Haikou for example[J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(4): 140. DOI:10.3969/j.issn.1008-1933.2017.04.028
- [5] 王剑,王树刚. 哈尔滨某高校学生寝室热舒适性研究[J]. 暖通空调, 2013, 43(10): 96
WANG Jian, WANG Shugang. Field study on thermal comfort in dormitories of a university in Harbin[J]. HV&AC, 2013, 43(10): 96
- [6] 司凌燕. 西安地区大学宿舍人体热舒适与热适应行为研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017
SI Lingyan. Research on human thermal comfort and human thermal adaptive behavior of university dormitories in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017
- [7] 何鸣,郑洁,刘正清. 重庆某高校学生宿舍冬季空调工况热环境研究[J]. 制冷与空调, 2014, 14(4): 89

- HE Ming, ZHENG Jie, LIU Zhengqing. Study on indoor thermal environment under winter air-conditioning condition in one university students' dormitory in Chongqing [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2014, 14(4): 89
- [8] ASHRAE. ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2004
- [9] MCCULLOUGH E A, OLESEN B W, HONG S. Thermal insulation provided by chairs[J]. ASHRAE Transactions, 1994, 100(1): 795
- [10] 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(1): 热环境与热感受[J]. 暖通空调, 2014, 44(1): 6
ZHANG Yufeng, CHEN Huimei, MENG Qinglin. Field study on thermal comfort and adaptation in buildings with split air-conditioners in hot-humid area of China (1): thermal environment and perceptions[J]. HV&AC, 2014, 44(1): 6
- [11] 杨柳. 建筑气候学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 61
YANG Liu. Bioclimatic architecture [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 61
- [12] TAN Meilan, LI Baizhan, LIU Hong, et al. Field experiments on thermal comfort in university dormitories in Chongqing, China[J]. Journal of Central South University, 2009, 16(s1): 55. DOI:10.1007/s11771-009-0182-4
- [13] 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
ZHANG Yufeng, CHEN Huimei, MENG Qinglin. Field study on thermal comfort and adaptation in buildings with split air-conditioners in hot-humid area of China (2): adaptive behavior [J]. HV&AC, 2014, 44(1): 15
- [14] FANGER P O. Thermal comfort: analysis and applications in environment engineering [J]. Thermal Comfort Analysis & Applications in Environmental Engineering, 1972
- [15] YAO Runming, LI Baizhan, LIU Jing. A theoretical adaptive model of thermal comfort-Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV) [J]. Building and Environment, 2009, 44(10): 2089. DOI:10.1016/j.buildenv.2009.02.014
- [16] 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变化[J]. 暖通空调, 2015, 45(11): 80
ZHENG Wuxing, YANG Liu, SONG Xiaoji, et al. Various levels of adaptation in four seasons of a year in cold climatic zone of China [J]. HV&AC, 2015, 45(11): 80
- [17] 苏莹莹,丁勇,杨涌泉. 各气候分区的实际可接受温度区域的探讨[C]//全国暖通空调制冷 2010 年学术年会资料集. 昆山: 全国暖通空调制冷学术年会, 2010
SU Yingying, DING Yong, YANG Yongquan. Discussion of the actual region of acceptable temperature in each climate zone of China[C]//National HVAC Annual Conference 2010 data sets. Kunshan: National Annual Conference on HVAC Refrigeration, 2010

(编辑 张 红)