

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-182-07

空调与自然通风工况下 用户个性化特征对热舒适影响分析

陈 颢 熊 宸 程 楠 李依然 袁嘉琦 刚文杰

(华中科技大学环境科学与工程学院 武汉 430074)

【摘要】 面对同样的室内环境,不同用户的热舒适感觉和工作效率不同。为研究用户个性化特征对热舒适的影响,针对空调工况(制冷)以及自然通风工况下的高校教学楼进行实地测试,调研影响学生满意度和学习效率的因素及热舒适,考察用户性别、居住地、使用空调习惯等对用户热舒适的影响。结果显示,大部分用户对教室环境和学习效率比较满意。在夏季空调工况下,女性的热中性温度高于男性,在秋季男女热感觉差异较小。在相同的相对湿度环境下,女性均比男性感到更干燥。相同的 CO₂ 浓度下,女性比男性感觉更憋闷。在夏季空调工况下,长期居住地偏南的用户倾向温度更低的环境,秋季无明显差别。在夏季空调工况下,寒冷地区用户对湿度更敏感,而在自然通风工况下,夏热冬冷地区用户比严寒和寒冷地区用户易感觉干燥。夏季空调工况中寒冷地区用户比夏热冬冷地区用户易感觉闷,秋季无明显差别。空调使用习惯影响用户热舒适,夏季使用空调较多的用户更适应较低的室温,较高的相对湿度。对于闷感觉,不同使用空调习惯的用户无明显差别。

【关键词】 热舒适; 个性化特征; 教室; 学习效率

中图分类号 TU023 文献标识码 A

Impact of the Occupants' Personalized Characters on Thermal Comfort in Air-conditioned and Natural Ventilation Environment

Chen Xie Xiong Chen Cheng Nan Li Yiran Yuan Jiaqi Gang Wenjie

(School of Environmental Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

【Abstract】 Different occupants can have different thermal comfort votes and working efficiency under the same indoor environment. In order to provide a particular design, the field investigation and questionnaire survey were conducted in classrooms in a university in air conditioning and natural ventilation conditions, analyzing occupants' satisfaction degree and working efficiency, discussing the comfort differences of occupants with different genders, long-term residence and habit of using air conditioners. Results show that the majority of occupants are satisfied with the indoor environment and working efficiency. The comfortable temperature of females is higher than males in air-conditioned environment. But there is no difference in natural ventilation environment. Females are more sensitive to the humidity, and are easier to feel stuffy. Occupants who live in the south for a long time tend to have a cooler temperature in air-conditioned environment. But there is no difference in natural ventilation environment. Occupants who live in cold area are more sensitive to humidity in air-conditioned environment. In natural ventilation environment, occupants in hot summer and cold winter area feel drier than occupants in severe cold and cold areas. Occupants in cold area are more likely to feel stuffy than occupants in hot summer and cold winter area in air-conditioned environment. In

作者简介: 陈 颢 (1999.7-), 女, 本科, E-mail: chenxie@hust.edu.cn

通讯作者: 刚文杰 (1988.5-), 女, 博士, 副教授, E-mail: gangwenjie@hust.edu.cn

收稿日期: 2020-07-23

natural ventilation environment, there is no difference. The habits of using air conditioners affect occupants' thermal comfort. In air-conditioned environment occupants who use more air conditioners are more suitable for lower temperature and higher relative humidity. For the feeling of stuffiness, there is no obvious difference between occupants with different air conditioning habits.

【Keywords】 Thermal comfort; Personalized character; Classroom; Efficiency

0 引言

随着人们生活水平的提高,人们对于舒适性的要求也随之上升。了解用户对热环境的需求,不仅能提高环境满意度,还能避免不必要的能源浪费^[1-2]。然而相同热环境下,不同个体的舒适度与工作效率不尽相同,适合不同用户的最优热环境也不同。

江燕涛^[3]等人对夏热冬冷地区的大学生进行调查,发现在同样的环境下,女性的穿衣量一般比男性多,男性耐寒能力要强于女性。Wang Z J^[4]等人在严寒地区的热舒适研究表明,在供热季女性对温度的敏感程度强于男性,女性的中性温度比男性高 1℃ 左右。也有部分学者认为性别对温度的感知没有明显差别^[5]。长期居住地的不同也会对热舒适产生影响^[6],李文菁^[7]等人在非空调环境下分析了长期生活在湖南的本地人与北方人对同一环境的冷热感和湿度感,发现本地人耐寒性与耐湿性更强,耐热性更差。Cao B^[8]等人在冬季对哈尔滨、北京、上海地区人群的热舒适进行调查,发现上海人群对冷环境的适应性更强。在夏季,不同的使用空调习惯也会影响热舒适,长期在空调建筑中居住的人倾向于更低的室内温度^[9],这是由于对空调越来越多的依赖导致人体对热的适应能力降低造成的^[10]。对高校而言,教室作为学习的主要场所,教室内温度、照度、室内空气品质等均会对学习效率产生影响^[11-13]。楼华鼎^[14]等人研究了教室、研究室、图书馆三种高校建筑中学生的学习效率,发现受访者对空气清新程度和通风情况的满意度普遍不高。建筑内的设施与布局、热环境、空气质量、光环境和声环境均会影响学生学习效率。

现有的热舒适研究大多都是关于某一特定建筑物的热舒适性,或者个性化特征与热感觉的关系,对于湿和闷两种感觉研究的较少,本文通过在夏热冬冷地区的高校教室进行监测,同时通过问卷调研用户在监测环境下的热舒适及满意度,挖掘影响学生学习效率的因素,分析用户性别、居住地、使用空调习惯等个性化特征对热感觉、湿感觉、闷感觉

的影响。

1 研究内容和方法

通过对高校教学楼的热环境进行实地测试,测试仪器参数如表 1 所示,并以发放问卷的形式调研学生对教室环境的满意度、学习状况以及学生的热感觉、湿感觉、闷感觉,得到不同性别、不同居住地、不同使用空调习惯的用户热舒适差异。本研究分为夏季空调工况和秋季自然通风工况。夏季空调工况为 2019 年 9 月,大部分教室处于制冷工况,室内热环境范围为 24℃~30℃、23%~65%、 $300 \times 10^{-6} \sim 1600 \times 10^{-6}$,女性着装为短袖 T 恤,短裤、裙子或长裤,男性着装为短袖 T 恤、短裤或长裤。秋季自然通风工况为 2019 年 10 月至 11 月,教室均未开启空调,为自然通风工况。室内热环境范围为 20℃~27℃、23%~65%、 $300 \times 10^{-6} \sim 1600 \times 10^{-6}$ 。女性着装为长袖或 T 恤加薄外套、长裤、短裤或裙,男性着装为长袖或 T 恤加薄外套、长裤。所有接受测试的用户均处于静坐状态。

对收集到的问卷进行筛选,为避免热活动的影响,选择在教室停留超过半小时的用户,并筛选年龄 17~25 岁,最终夏季测试阶段共收集到 672 份问卷,其中有效问卷 638 份,男性 448 份,女性 190 份。秋季测试阶段收集到 658 份问卷,其中有效问卷 601 份,男性 376 份,女性 225 份。

表 1 测试仪器参数

Table 1 Parameters of the test instruments

名称	型号	参数	测量范围	准确度
手持式二氧化碳检测仪	AZ77535	温度	-10℃~60℃	±0.6℃
		湿度	0.0~99%	±3%
		CO ₂ 浓度	0×10 ⁻⁶ ~5000×10 ⁻⁶	±30×10 ⁻⁶

2 结果分析与讨论

通过分析调研数据,得到教室环境总体满意度,学生学习状况,以及用户个性化特征(性别、长期居住地、使用空调习惯)对人体热舒适的影响。其

中热感觉投票值采用ASHRAE七级指标表示：-3（很冷）、-2（冷）、-1（有点冷）、0（中性）、1（有点热）、2（热）、3（很热）；湿感觉投票值采用五级指标：-2（很潮湿）、-1（潮湿）、0（一般）、1（干燥）、2（很干燥）；闷感觉投票值采用五级指标：1（不闷）、2（有点闷）、3（比较闷）、4（很闷）、5（非常闷）。

2.1 热环境及满意度总体分析

2.1.1 教室环境满意度调研结果

对教室的满意度评价如表2所示。由表2可知，在夏季空调工况和秋季自然通风工况下，教室环境满意度选择“一般”和“比较满意”的用户都占主要部分，夏季满意程度选择“一般”、“比较满意”、“非常满意”的用户占到89.81%，在秋季占到85.34%，说明教室内环境较舒适。进一步调研学生对教室环境不满意原因，结果如表3所示。

表2 教室环境满意度评价结果

满意度	占比	
	夏季	秋季
不满意	1.88%	0.67%
不太满意	8.31%	14.00%
一般	37.62%	38.67%
比较满意	42.79%	38.50%
非常满意	9.40%	8.17%

表3 用户对教室环境的不满意原因

不满意原因	占比	
	夏季	秋季
室内温度	10.55%	8.10%
室内相对湿度	10.77%	9.60%
吹风感觉	12.97%	5.46%
空气清新程度	24.84%	24.11%
照明情况	9.01%	11.68%
噪声水平	10.11%	10.17%
房间布局	21.76%	11.11%
人员密度	19.77%	19.77%

由表3可知，无论是夏季空调工况还是秋季自然通风工况，导致学生对教室环境不满意的主要因素均为空气清新程度和房间布局及人员密度。虽然

秋季自然通风工况下，通过门窗的自然通风量大，但仍有部分用户感觉空气不清新，认为较闷和教室内异味。在房间布局及人员密度中，人员密度的影响更大。值得注意的是，空调工况下吹风感觉占比12.97%，到了自然通风工况占比下降了一半多，为5.46%。说明空调工况下空调送风可导致用户有吹风感，可以通过改善送风口位置、风速等提高舒适度。

2.1.2 学习效率满意度调研结果

学习效率满意度以及影响学习效率的因素如表4、表5所示。由表4可以看出，夏季空调工况和秋季自然通风工况，用户的学习情况类似，认为自己学校效率“一般”的用户最多，对学习效率“比较满意”的用户次之，说明大部分用户学习效率尚可。调研中发现熬夜是影响学习的最主要因素，经过受试者反馈后进一步调整调研问卷发现，手机等电子设备的使用是学习效率低的更主要原因。在两种工况下，教室内热湿环境导致用户学习效率低的比例为13.06%和10.36%，说明在同样的教室热环境下，不同用户的热感觉及对环境的满意度不同，接下来分析用户个性化差异对其热舒适的影响。

表4 用户学习效率自我评价

评价内容	占比	
	夏季	秋季
不满意	7.21%	4.33%
不太满意	13.01%	14.31%
一般	50.16%	45.59%
比较满意	26.64%	33.61%
非常满意	2.98%	2.16%

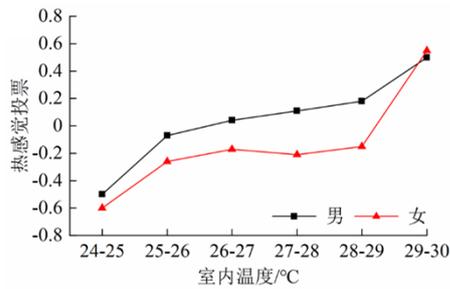
表5 学习效率低的原因

原因	占比	
	夏季	秋季
前一晚熬夜、精神状况不好	27.55%	17.83%
对此课程不感兴趣	18.29%	14.94%
因其他原因导致心情不好	18.29%	13.49%
生病导致状况不佳	4.75%	6.27%
教室内热湿环境	13.06%	10.36%
手机等电子设备导致分心	—	27.23%
以上均不是	18.05%	9.88%

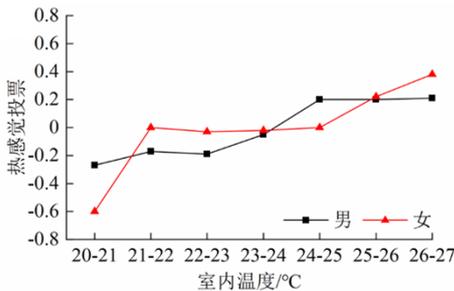
2.2 用户性别对热舒适的影响

2.2.1 用户性别对热感觉的影响

通过多次测试与问卷调研获得教室内男女生所有的热感觉投票值, 结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 夏季空调工况下以及秋季自然通风工况下, 男女用户的热感觉投票值基本都在-0.6到0.6之间, 表明教室内温度整体而言是比较舒适的, 通过对投票值较高的用户进一步调研发现造成不舒适的原因为教室内的温度场分布不均匀、在靠近窗户处太阳辐射较为强烈、靠近门口处渗透风较大等。对比男女投票可知, 夏季空调工况下, 热感觉在 29~30℃ 范围内两者差别不大, 其余温度下女性均比男性感觉偏冷, 即女性的舒适温度较高。秋季自然通风工况下两者的差异较小, 随着温度升高, 男女热感觉投票均升高。



(a) 夏季空调工况



(b) 秋季自然通风工况

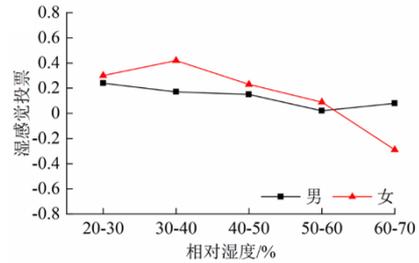
图 1 性别对热感觉的影响

Fig.1 Impact of gender on the thermal sensation vote

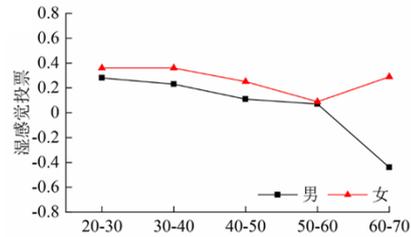
2.2.2 用户性别对湿感觉的影响

男女生在不同湿度下的湿感觉投票值如图 2 所示。由图 2 可知, 夏季空调工况和秋季自然通风工况中, 女性用户的湿感觉投票都普遍要高于男性用户, 即在同一相对湿度下, 女性比男性感到更加干燥。将湿感觉选择“一般”的用户视为对湿度满意。空调工况和自然通风工况都在相对湿度为

50%~60% 时满意率最高, 分别达到了 62.8% 和 65.0%。说明用户更倾向于 50%~60%的相对湿度区间。同时, 我们也发现, 教室内的湿环境大部分时候都是会让人感觉比较干燥的, 适当的加湿是有必要的。



(a) 夏季空调工况



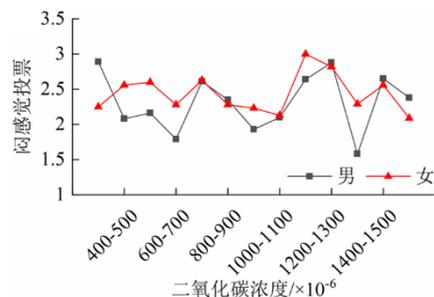
(b) 秋季自然通风工况

图 2 性别对湿感觉的影响

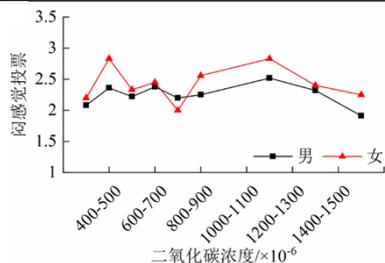
Fig.2 Impact of gender on the wet sensation vote

2.2.3 用户性别对闷感觉的影响

男女生在不同 CO₂ 浓度下的闷感觉投票值见图 3。从图 3 中可以发现, 当 CO₂ 浓度从 300×10⁻⁶ 变化到 1600×10⁻⁶, 男女的闷感觉没有发生明显的变化, 基本都在 2~3 范围内, 说明用户憋闷的感觉和 CO₂ 浓度之间没有紧密的联系, 且均感觉有点闷。女性的闷感觉投票在大多数 CO₂ 浓度区间内都要高于男性, 说明女性较男性而言更容易感到憋闷。此外, 尽管在自然通风工况下新风量比较大, 用户的闷感觉相对空调工况下没有太大提升, 女性的闷感觉投票大部分仍然高于男性。



(a) 夏季空调工况



(b) 秋季自然通风工况

图3 性别对闷感觉的影响

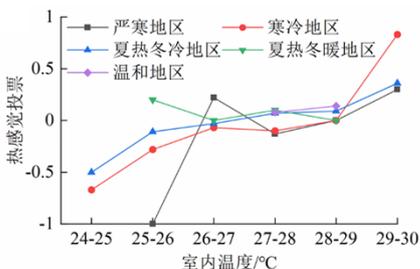
Fig.3 Impact of gender on stuffy sensation vote

2.3 用户长期居住地对热舒适的影响

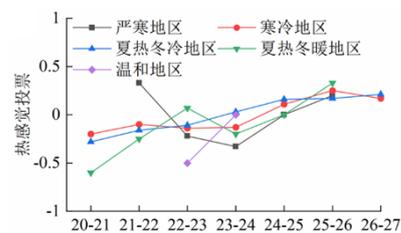
在夏季空调工况和秋季自然通风工况中，我们调查了受访者的长期居住地，以探究生活在不同气候区用户的热舒适差异。气候区分为五类：严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区、温和地区。

2.3.1 用户长期居住地对热感觉的影响

不同居住地用户的热感觉投票值如图4，由图4可知，在夏季空调工况下，曲线从下往上依次是寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区、温和地区，说明相同温度下长期居住地越往北的用户更容易感觉冷，长期居住地越往南的用户偏爱更凉爽的环境。在秋季自然通风工况下，不同地区用户的热感觉没有显示出明显的差异，对温度的接受范围都比较广，热感觉没有随着温度上升有较大幅度增加。



(a) 夏季空调工况



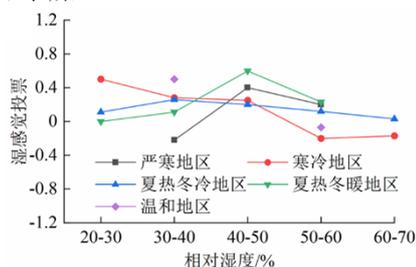
(b) 秋季自然通风工况

图4 长期居住地对热感觉的影响

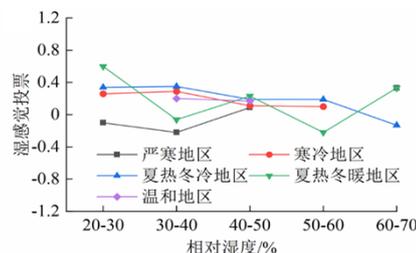
Fig.4 Impact of long-term residence on thermal sensation vote

2.3.2 用户长期居住地对湿感觉的影响

不同居住地用户的湿感觉投票值如图5所示，由图5可知，在夏季空调工况下，随着相对湿度增加，所有地区用户的湿感觉投票值呈下降趋势，寒冷地区用户对湿度比较敏感，在湿度大于50%时会感到潮湿，而其他地区用户仍感觉干燥。夏热冬冷地区用户对湿度不太敏感，在20%~70%的湿度范围内都没有感觉明显干燥或潮湿。在秋季自然通风工况下，严寒地区用户湿感觉低于其他地区，即易感觉潮湿，夏热冬冷地区用户的湿感觉投票值普遍较高，高于寒冷地区、高于严寒地区，也就是说，夏热冬冷地区用户要比寒冷地区和严寒地区用户感觉更加干燥。



(a) 夏季空调工况



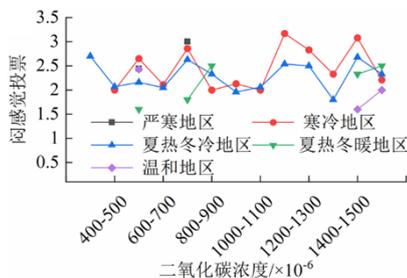
(b) 秋季自然通风工况

图5 长期居住地对湿感觉的影响

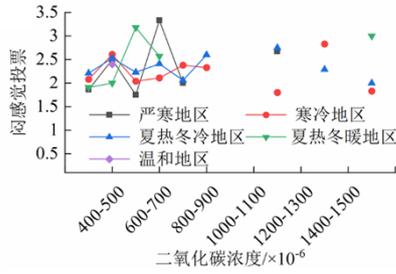
Fig.5 Impact of long-term residence on wet sensation vote

2.3.3 用户长期居住地对闷感觉的影响

不同居住地用户的闷感觉投票值如图6所示，由图6可知，在夏季空调工况下，寒冷地区用户比夏热冬冷地区用户闷感觉投票值高，即寒冷地区用户相比于夏热冬冷地区用户更感觉闷。在秋季自然通风工况下不同居住地用户的闷感觉无明显区别。



(a) 夏季空调工况



(b) 秋季自然通风工况

图 6 长期居住地对闷感觉的影响

Fig.6 Impact of long-term residence on stuffy sensation vote

2.4 用户使用空调习惯对热舒适的影响

在夏季空调工况中,我们统计了用户在家以及在学校使用空调时间占室内活动总时间的百分比,一共分为五个等级,分别是: 0~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80%~100%。由表 6 可得,在家中,不同使用空调频率的人数相近。而夏季在校内期间,超过 70%的同学在室内使用空调的频率超过 60%, 多达 30%的同学使用空调的频率超过 80%, 原因主要是教学楼内教室空调基本保持开启状态,同学们在上课或自习过程中,大部分时间处在空调环境之下。使用空调频率大于 40%的用户无论是在家还是在学校都超过了一半,在学校中处在空调环境下的时间要多于在家中的时间。在与热舒适的相关性分析中,将使用空调时间占室内活动总时间的百分比为 0~60%的用户称为使用空调一般和较少的用户,百分比为 60~100%的用户称为使用空调较多的用户。本文考察长期使用空调习惯对人员热舒适的影响,因此以在家使用空调的时间分布分析用户热感觉、湿感觉与闷感觉的差异。

表 6 在家和在学校用户的使用空调习惯

Table 6 Frequency of using air conditioners at home and in school

使用空调频率	不同使用空调习惯用户占比	
	在家	在学校
0~20%	22.13%	2.55%
20~40%	17.68%	6.21%
40~60%	22.29%	17.99%
60~80%	20.06%	38.69%
80~100%	17.83%	34.55%

2.4.1 用户使用空调习惯对热感觉的影响

不同使用空调习惯用户的热感觉投票值如图 7 所示,由图 7 可知,在同一室内温度下,使用空调较多的用户相比于使用空调一般和较少的用户热感觉投票值高。在 25~27℃ 范围内,使用空调较多的用户感觉舒适,而使用空调一般和较少的用户感觉冷,说明使用空调较多的用户对较冷环境的适应性更强。

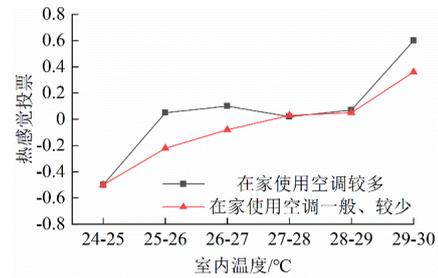


图 7 在家使用空调习惯对热感觉的影响

Fig.7 Impact of the frequency of using air conditioners at home on thermal sensation vote

2.4.2 用户使用空调习惯对湿感觉的影响

不同使用空调习惯用户的湿感觉投票值如图 8 所示,由图 8 可以看出,在家使用空调较多的用户湿感觉投票值高于使用空调一般和较少的用户,由此可知,使用空调较多的用户更感觉空气干燥,即使用空调较多的用户更偏好湿度高的环境。

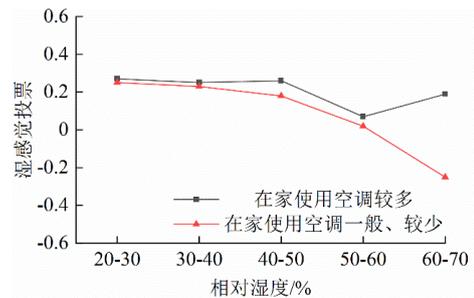


图 8 在家使用空调习惯对湿感觉的影响

Fig.8 Impact of the frequency of using air conditioners at home on wet sensation vote

2.4.3 用户使用空调习惯对闷感觉的影响

不同使用空调习惯用户的闷感觉投票值如图 9 所示,由图 9 可知,不同使用空调习惯用户的闷感觉投票值与 CO₂ 浓度的联系不紧密,与上文结论一致。且两类用户的闷感觉无明显差别。

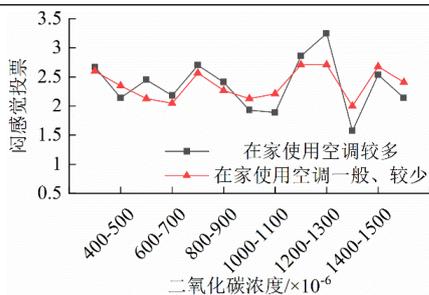


图9 在家使用空调习惯对闷感觉的影响

Fig.9 Impact of the frequency of using air conditioners at home on stuffy sensation vote

3 结论

本文通过对高校教室热环境和用户热舒适进行调研,分析影响学生热舒适和学习效率的因素,研究用户个性化特征(性别、长期居住地、使用空调习惯)对室内温度、湿度、CO₂浓度的反应,考察用户特征及其热舒适的规律。结果表明:

(1) 大部分学生对教室总体环境以及自身学习效率都比较满意,空气清新程度、人员密度是对环境不满意的主要原因,电子设备的使用和熬夜是影响学习效率的主要因素。

(2) 夏季空调工况中女性舒适温度高,秋季自然通风工况中男女性热感觉差别不大;空调工况和自然通风工况下,50%~60%的相对湿度是最舒适的区间,女性相比男性感觉更加干燥;两种工况下,女性普遍要比男性感觉更憋闷。

(3) 夏季空调工况下,在相同热环境下,长期居住地为严寒和寒冷地区的用户比其他地方用户感觉偏冷,秋季自然通风工况下,南北方用户的热感觉没有明显差别;对于湿感觉,夏季空调工况下寒冷地区用户对湿度的敏感程度大于夏热冬冷地区。秋季自然通风工况中夏热冬冷地区用户比严寒地区和寒冷地区用户感觉偏干燥;对于闷感觉,夏季空调工况下,寒冷地区较夏热冬冷地区的用户更感觉闷。秋季自然通风工况下,不同居住地用户的闷感觉无明显差别。

(4) 在夏季空调工况下,在家使用空调较多的用户相比于使用空调一般以及较少的用户更适应温度更低的室内环境;对于湿感觉,使用空调较多的用户更偏好湿度较高的环境;不同使用空调习

惯用户的闷感觉无明显差别。

参考文献:

- [1] 刘赛可,郑文亨. 桂林某火车站候车室夏季热舒适研究[J]. 制冷与空调, 2019, 33(6): 582-587.
- [2] 刘凰君,刘洋伶,徐皓,等. 改善学生宿舍室内热环境的局部送风系统[J]. 制冷与空调, 2019, 33(4): 367-371.
- [3] 江燕涛,杨昌智,李文菁,等. 非空调环境下性别与热舒适的关系[J]. 暖通空调, 2006, (5): 17-21.
- [4] WANG Z J. A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin[J]. Building and Environment, 2005, 41(8): 1034-1039.
- [5] WANG Z, DE DEAR R, LUO M H, et al. Individual difference in thermal comfort: A literature review[J]. Building and Environment, 2018, 138: 181-193.
- [6] 端木琳,孙星维,李祥立,等. 中国各地区人体热舒适与室内热环境参数的关系(续)[J]. 建筑科学, 2018, 34(12): 114-120.
- [7] 李文菁,杨昌智,江燕涛. 非空调环境下的热舒适性调查[J]. 暖通空调, 2008, (5): 18-21.
- [8] CAO B, LUO M H, LI M, et al. Too cold or too warm? A winter thermal comfort study in different climate zones in China[J]. Energy and Buildings, 2016, 133: 469-477.
- [9] 胡钦华,丁秀娟,李奎山. 关于热感觉和热舒适与热适应性的讨论[J]. 山西建筑, 2007, (29): 1-2.
- [10] YU J, OUYANG Q, ZHU Y, et al. A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments[J]. Indoor Air, 2012, 22(2): 110-118.
- [11] 毛鹏,卑圣丹,李婕,等. 高校教室室内温度对学习效率的影响[J]. 东南大学学报(医学版), 2019, 38(1): 168-173.
- [12] 毛鹏,王文翰,李婕,等. 高校教室室内照度对学习效率的影响[J]. 东南大学学报(医学版), 2018, 37(4): 662-666.
- [13] 林成楷,白财政,吕琳,等. 厦门地区教室室内热环境对学生学习效率的影响[J]. 教育现代化, 2019, 6(50): 246-247.
- [14] 楼华鼎,欧达毅,康升娴. 基于学习效率视角下的高校建筑室内环境质量评价研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(12): 9-15.