

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^{*}

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 张宇峰[☆]

佛山益康置业有限公司 陈慧梅

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 孟庆林

摘要 对受试者在建筑热环境中调整服装、开窗、使用风扇和启停空调器等适应行为进行了分析,得到了我国湿热地区人群在使用分体空调建筑中的适应行为特征,确定了适应行为变化的有效温度范围和关系式,并在与以往研究结果的综合对比中获得了湿热地区人群在建筑环境中的热适应特征。

关键词 湿热地区 使用分体空调建筑 现场研究 热舒适 热适应 适应行为

Field study on thermal comfort and adaptation in buildings with split air-conditioners in hot-humid area of China (2): Adaptive behaviors

By Zhang Yufeng[★], Chen Huimei and Meng Qinglin

Abstract Through analysis of various adaptive behaviors of the subjects in built environment such as adjusting clothing, opening window, using fan and turning on or off air-conditioner, obtains the characteristics of the adaptive behaviors in buildings with split air-conditioners in hot-humid area of China, and determines the effective temperature ranges and the relations with indoor climate parameters for various adaptive behaviors. Obtains the thermal adaptive characteristics of the people in built environment in hot-humid area of China through the comparisons with the previous studies.

Keywords hot-humid area, building with split air-conditioner, field study, thermal comfort, thermal adaptation, adaptive behavior

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

①

0 引言

人在建筑热环境中的调节行为主要包括调整服装、活动量和姿势、冲凉、喝冷饮等自身调节行为和开关门窗、使用风扇、调控空调等环境调节行为。这些行为是改变人体周围热环境、塑造人体热适应性和影响建筑物能耗的重要因素。Brager 等人^[1]在其概念模型中明确提出,行为调节是人体适应建筑热环境的一种重要方式,“人体热平衡的行为调节

可能给人们提供了最大的机会,以在维持自身的舒适中扮演主动角色”^[1-2]。江亿在分析造成中外建筑能耗差异的原因时指出:“其核心是两种不同的生活模式和文化理念,从而造成建筑物不同的使用方式和运行方式”,其中的使用方式主要指开窗和使用空调的方式^[3]。

①☆ 张宇峰,男,1979 年 4 月生,博士,副教授
510640 广州天河五山华南理工大学建筑学院
(020) 87112304
E-mail:zhangyuf@scut.edu.cn
收稿日期:2012-08-20
一次修回:2012-09-16
二次修回:2013-12-03

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50708038,50838003),新世纪优秀人才支持计划资助项目(编号:NCET-10-0373),华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室资助课题(编号:2010ZB05)

人在建筑热环境中的适应行为研究方兴未艾。国外的研究始于 20 世纪 80 年代^[4],我国于 1999 年^[5]开始关注。多数研究伴随热舒适的现场调研开展,在观测热环境和热感受的同时,受试者的适应行为也被记录和分析;少数研究专门观察各种适应行为,观察时间有的长达 1 年之久。

各种适应行为中,调整服装所受的关注最多。服装调整的信息一般由受试者汇报其着装组成而获得,适应特征通常表达为服装热阻与室内外温度的线性关系,也即,随着室内外温度的升高(降低),人们的服装热阻线性减小(增大)。这一变化关系被视为人随室外气候或室内环境变化主动进行自身调节的有力证据。另外,服装调整的规律在不同气候、建筑和人群中的差异也被视为重要的适应特征而受到关注。现有研究显示,服装热阻随温度变化的敏感程度,夏热冬冷地区^[6]较夏热冬暖地区^[7]、自然通风建筑较空调建筑^[8-9]、女性较男性^[8]、老年人较年轻人^[10]更高。

开窗和使用风扇的关注度仅次于调整服装,其信息一般由调研者观察调研环境的窗户和风扇使用状态而获得。开窗和使用风扇的适应特征一般表示为它们的行为比例(指在同样温度条件下行为发生的次数占总观察次数的比例)随室内外温度的变化关系。变化关系通常由 Probit 回归^[11]得到,也即行为发生的比例随温度呈 S 形曲线升高,这被视为人主动进行环境调节的有力证据。现有的研究显示,开窗行为发生变化的有效温度范围大致为 20~30 °C^[12-13],使用风扇的起始温度比开窗高^[12,14],人们在混合通风建筑中的行为特征与自然通风建筑更为接近^[15]。除行为本身外,开窗和使用风扇的主要行为结果,也即室内空气流速,也受到一定关注^[7],适应特征被表达为空气流速随室内温度的线性提高。

空调器是使用分体空调建筑特有的、提供给使用者的一种重要热环境调节手段和适应行为机会。使用空调器的行为信息一般由使用者直接汇报,或由室内温度的连续记录数据间接分析确定。与空调器有关的行为特征,重点集中在空调器的启动(容忍)温度、设定(控制)温度、使用时段和使用率等。现有研究显示,空调器启动时,室内空气温度为 28 °C^[16],29 °C^[17-18]或 30 °C^[19],室外气温为 25 °C^[12]或 28.5 °C^[20];空调器的设定温度为 26

°C^[17-18]或 24 °C(夜间睡眠)^[21];卧室的空调主要在晚上使用,客厅则在中午和下午使用^[18];空调的使用率随室外气温呈线性^[20]或 S 形^[22]增长趋势。另有研究从社会学和心理学角度,尝试对不同的空调使用行为及其影响作进一步的解释和阐述^[23-26]。还有研究尝试量化空调使用行为或运行模式对建筑物能耗及围护结构性能的影响^[18,27-31]。

本文在我国湿热地区使用分体空调建筑的热舒适现场调研基础上,对人们在建筑热环境中的调整服装、开窗、使用风扇和启停空调器等适应行为,展开系统的分析和讨论,并与前期开展的自然通风建筑调研结果^[14]及以往研究结果相对比,以期获得湿热地区建筑热环境中人的适应行为特征和规律,为湿热地区不同类型建筑的室内热环境设计与评价及能耗预测提供参考。

1 研究方法

关于湿热地区使用分体空调建筑的热舒适现场调研方法,在本研究的前一部分^[32]中已有详细阐述。在此,仅就适应行为相关的部分作简要回顾。

在我国湿热地区典型城市广州的某学院宿舍楼和教学楼进行调研,这些建筑在功能房间都安装了分体空调器,同时提供风扇,门窗可开启。选取在以上调研建筑中学习和生活的大学生共 30 人作为受试者,男女各一半,他们均出生和长期生活于珠江三角洲地区,并在调研建筑中已学习和生活 1 年以上。

研究采用纵向设计(longitudinal design)的方法,即每周对每一受试者作两次调研(分别在宿舍和教室)。每次调研用时约 15 min,期间由受试者完成一份调查问卷,由调研人员测试受试者所处环境的物理量。

测试的热环境物理量包括空气温度、相对湿度、黑球温度和空气流速,仪器精度和测试方法依照 ISO 7726^[33]标准的要求。

调查问卷包括活动量和服装、适应行为和热感受 3 部分。其中,服装的调查参照 ASHRAE 55 标准^[34]提供的单件服装列表,由受试者根据自己的着装情况在列表中加以勾选;开窗和使用风扇两种行为的状态利用调查问卷获得,开窗状态分全部开启、部分开启和关闭,风扇状态分高速挡、中速挡、低速挡和关闭,由受试者根据所处环境的真实状态

进行选择。

以上调研从 2009 年 1 月至 2010 年 1 月持续整 1 年时间,期间因寒暑假有部分中断,再加上个别情况人员缺席等影响,总计获得 33 周 1 395 人次的原始数据。

使用空调器的行为通过安放于调研建筑中的温湿度自记录仪获得。因教学楼使用者不固定,人员流动大,考虑安全和管理等因素,仅在宿舍楼放置自记录仪。选用 RHLOG 系列温湿度自记录仪 10 台,安放在 10 个宿舍房间内,以±0.3℃和±3%的精度连续测试并记录,记录时间持续 1 年。

2 结果分析与讨论

2.1 调整服装

2.1.1 服装的逐周变化

对每份问卷的服装选择结果,先按 ASHRAE 55 标准^[34]将勾选的单件服装转成热阻值,而后求其和,再加上座椅热阻 0.1 clo(一般办公座椅),即得其总的服装热阻。将每周得到的所有数据取平均,分析服装热阻的逐周变化,结果如图 1 所示。为方便对比,图 1 中同时显示了室内空气温度的逐周变化。

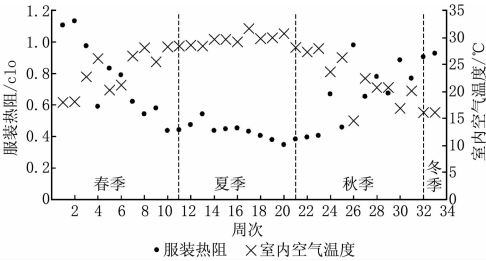


图 1 服装热阻与空气温度的逐周变化

从图 1 可以看出,春季,室内温度缓慢上升,受试者的着装从厚重渐转轻薄;夏季,室内温度居高不下,服装热阻也一直保持在较低水平,平均值为 0.43 clo;秋季与春季正好相反,温度下降,服装加厚增多,热阻值快速增大;冬季温度最低,服装热阻最大,达到 0.93 clo。可见,人们服装的调整与所处的建筑环境有着密切关联。

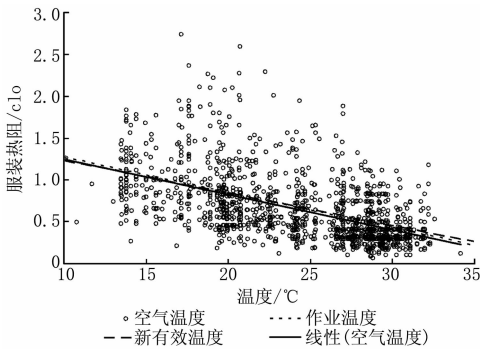
2.1.2 服装调整的变化规律

以往研究一般将服装热阻与室内外温度建立线性关系,其中的室内温度包括空气温度、作业温度、黑球温度和新有效温度等。空气温度最为简单实用,应用范围最广;已有的研究中,与作业温度相关的结果最为丰富;高湿是湿热地区的重要气候特征,同时考虑温湿度作用的新有效温度,能更全面地表征促使服装调整的室内热环境因素。综合考虑以上因素,本文分别选择空气温度(t_a)、作业温度(t_{op})和新有效温度(ET^*)作为室内热环境指标,与服装热阻(I_{cl})建立了如下的线性关系(见图 2):

$$I_{cl} = -0.042t_a + 1.666 \quad (R^2 = 0.296) \quad (1)$$

$$I_{cl} = -0.042t_{op} + 1.692 \quad (R^2 = 0.304) \quad (2)$$

$$I_{cl} = -0.039ET^* + 1.625 \quad (R^2 = 0.296) \quad (3)$$



注:作业温度和新有效温度仅显示回归线

图 2 服装热阻与室内温度的关系

服装热阻与各室内温度均呈负相关的线性关系,温度每升高 10℃,服装热阻减小约 0.4 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。另外,对比可知,服装热阻随新有效温度变化的趋势较空气和作业温度略为平缓。

2.1.3 不同地区的对比

分别以作业温度、空气温度和新有效温度 3 种形式,将本文结果与以往不同地区不同建筑的研究结果进行对比,结果如表 1~3 所示。

表 1 不同地区不同建筑服装热阻的对比(作业温度)

建筑类型		<i>a</i>	<i>b</i>	服装热阻(10℃)/clo	服装热阻(30℃)/clo	参考文献
世界各地	空调	-0.04	1.73	1.33	0.53	[35]
世界各地	自然通风	-0.05	2.08	1.58	0.58	[35]
香港	空调	-0.04	1.76	1.36	0.56	[7]
长沙	自然通风	-0.062 4	2.289 3	1.67	0.42	[6]
台湾	分体空调	-0.05	1.85	1.35	0.35	[10]
广州	分体空调	-0.042	1.692	1.27	0.43	本文

注:建筑类型中,空调指安装集中空调系统的建筑,自然通风指全年自然通风的建筑,分体空调指使用分体空调器的建筑;*a*和*b*分别对应于服装热阻与温度线性回归关系式中的斜率和截距;热阻(10℃)(30℃)指温度为 10℃或 30℃时对应的服装热阻值。

表 2 不同地区不同建筑服装热阻的对比(空气温度)

	建筑类型	<i>a</i>	<i>b</i>	服装热阻(10℃)/clo	服装热阻(30℃)/clo	参考文献
伊朗	自然通风	−0.047	1.868	1.40	0.46	[36]
上海	自然通风	−0.036	1.419	1.06	0.34	[37]
南阳	分体空调	−0.059 9	2.161 4	1.56	0.36	[38]
广州	分体空调	−0.042	1.666	1.25	0.41	本文

注:同表 1。

表 3 不同地区不同建筑服装热阻的对比(新有效温度)

	建筑类型	<i>a</i>	<i>b</i>	服装热阻(10℃)/clo	服装热阻(30℃)/clo	参考文献
台湾	自然通风	−0.027 5	1.326 7	1.05	0.50	[8]
台湾	空调	−0.02	1.18	0.98	0.58	[8]
广州	自然通风	−0.036	1.582	1.22	0.50	[14]
广州	分体空调	−0.039	1.625	1.24	0.46	本文

注:同表 1。

由表 1 可知,同处湿热地区,本文与台湾使用分体空调建筑的结果相近,而与香港的空调建筑有所不同,后者的夏季服装热阻更大,服装随温度变化的趋势更为平缓;本文的调研地点广州属我国的夏热冬暖地区,与广州相比,处于夏热冬冷地区的长沙,服装随温度的调整更为敏感,调整范围更大。

由表 2 可知,同是分体空调建筑,夏热冬冷地区的南阳,较夏热冬暖地区的广州,服装随温度的调整更为敏感,调整范围更大,这与表 1 中与长沙比较的结果一致。

由表 3 可知,同处广州,使用分体空调的建筑与自然通风建筑的结果相近;同处湿热地区,本文与台湾自然通风建筑的结果更为接近,而与空调建筑相差较大,后者的夏季服装热阻更大,服装随温度变化的趋势更为平缓,这与表 1 的香港结果相近。

综上,通过与不同地区不同类型建筑的对比,得到如下结论:气候对服装调整有影响,表现为冬夏季温差较大的气候区,服装随室内温度变化的调整更为敏感、范围更大;建筑类型对服装调整有影响,表现为使用分体空调的建筑与自然通风建筑相近,而与空调建筑不同,后者的夏季服装热阻更大,服装随温度变化的趋势更为平缓。以上结论与以往的研究得到的结论^[6,8-9]基本一致。

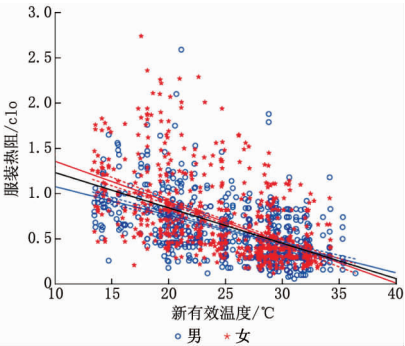
2.1.4 性别对比

将男女受试者的结果分开,分别得到其服装热阻随新有效温度的变化关系如下(见图 3):

$$\text{男 } I_{cl} = -0.032ET^* + 1.396 \quad (R^2 = 0.277)$$
$$\text{女 } I_{cl} = -0.045ET^* + 1.807 \quad (R^2 = 0.315)$$

(4)

(5)



注:黑实线为全部数据汇总的回归线,虚线为均值 95%的置信区间

图 3 服装调整的性别对比

相比于男性,女性随室内温度变化的服装调整更为敏感,范围更大,这与之前的研究结果^[8]一致。

2.2 开窗和使用风扇

2.2.1 开窗和使用风扇比例变化规律

开窗和使用风扇的比例,也即发生频率,由调研得到的原始数据统计得出,方法如下。参照上节的分析,分别选择空气温度、作业温度和新有效温度作为室内热环境指标,先以 0.5℃的温度间隔将原始数据分组,而后对每个数据组统计其开窗和使用风扇发生的比例。开窗的比例取开窗状态为全部开启的比例,使用风扇的比例取风扇状态不为关闭的比例。

参照以往文献和作者的前期研究,采用 Probit 回归,建立开窗比例(*W*)和使用风扇比例(*F*)与室内温度指标的关系如下(见图 4,5):

$$W = 100\Phi(0.160\ 87t_a - 4.231\ 17) \quad (6)$$
$$W = 100\Phi(0.158\ 77t_{op} - 4.229\ 05) \quad (7)$$
$$W = 100\Phi(0.155\ 47ET^* - 4.208\ 45) \quad (8)$$
$$F = 100\Phi(0.415\ 28t_a - 10.710\ 57) \quad (9)$$
$$F = 100\Phi(0.407\ 77t_{op} - 10.770\ 63) \quad (10)$$

$$F = 100\Phi(0.403\,45ET^* - 10.738\,89) \quad (11)$$

式(6)~(11)中 Φ 为标准正态分布函数。

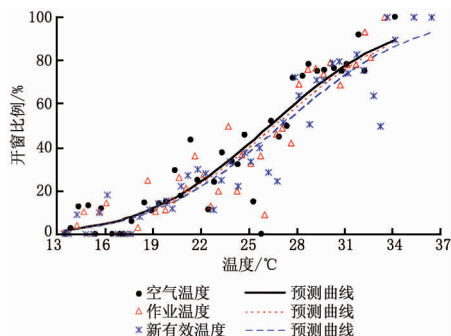


图4 开窗比例随室内温度的变化

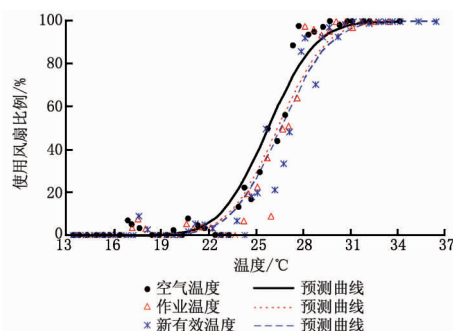


图5 使用风扇比例随室内温度的变化

由图4,5可知,开窗和使用风扇的比例随3种室内温度指标的变化趋势十分相似,均呈S形曲线关系,且曲线较为接近;开窗行为变化的有效温度范围为14~34℃,其中,开窗比例在室内温度14~20℃时缓慢增加,20~30℃时快速线性上升,温度每升高1℃,比例增加6%,30℃以上渐趋平缓,最后达到最大值90%;使用风扇行为的有效温度范围为21~31℃,其中,在21~23℃时使用风扇比例缓慢增大,23~29℃时快速线性提高,温度每升高1℃,比例增加14%,29℃以上趋于平缓,最后达到最大值100%。对应于开窗和使用风扇50%发生比例的温度值在26~27℃之间。以上结果表征了受试者随所处环境变化而开窗和使用风扇的适应特征。

与开窗相比,风扇的使用显示出与室内热环境关系更为密切的特征,表现为:行为发生变化的起始温度虽高,但随后的变化趋势更加显著,变化更为迅速有力;使用风扇的行为变化与室内温度的相关程度更高(见散点与预测曲线的吻合度)。

2.2.2 与以往研究的对比

将本文与笔者前期在同一地区自然通风建筑的研究结果相对比^[14],结果如图6所示。

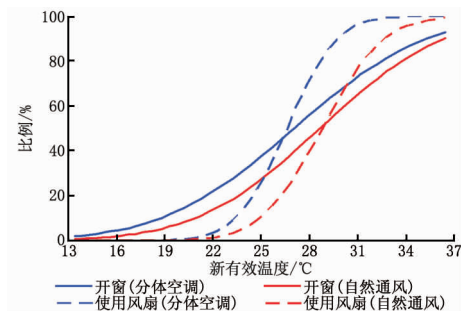


图6 开窗和使用风扇行为在分体空调建筑与自然通风建筑的对比

与自然通风建筑相比,使用分体空调建筑的人群开窗和使用风扇的行为随室内热环境的变化出现得更早,变化更为迅速。以达到50%比例的室内新有效温度为例如,分体空调建筑较自然通风建筑分别低(即提早)1.5℃(开窗)和2.2℃(使用风扇)。

将本文与巴基斯坦、英国和欧洲的研究^[11]相对比,结果如图7,8所示。

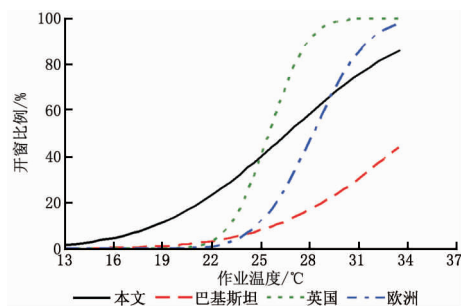


图7 开窗行为在不同国家地区的对比

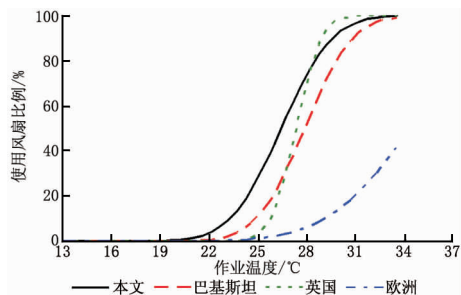


图8 使用风扇行为在不同国家地区的对比

由图7可以看出,开窗行为随室内作业温度的变化,在英国和欧洲较为敏感和迅速,其次为本文研究的广州,巴基斯坦最不敏感。这一方面可能是气候的原因,英国和欧洲大陆的气候夏季相对适宜,而广州属于湿热气候,巴基斯坦属于干热气候,夏季开窗通风的散热效果相对较差;另一方面可能与当地建筑是否设计可开启的窗户有关。

由图 8 可以看出,在使用风扇行为方面,英国和巴基斯坦与本文的结果接近,风扇的利用快速而有力;欧洲的结果较为迟缓,这可能与一些国家建筑并不提供风扇有关^[11]。

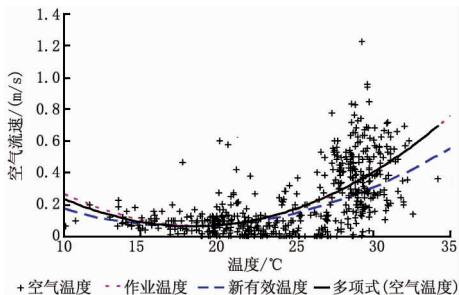
2.2.3 空气流速随温度的变化

视空气流速(v)为开窗和使用风扇的主要行为结果,它与室内温度的关系如下(见图 9):

$$v = 0.002\ 5t_a^2 - 0.092t_a + 0.905\ 8 \quad (R^2 = 0.43) \quad (12)$$

$$v = 0.002\ 6t_{op}^2 - 0.097\ 5t_{op} + 0.983\ 4 \quad (R^2 = 0.44) \quad (13)$$

$$v = 0.001\ 7ET^{*2} - 0.061\ 2ET^{*} + 0.614\ 4 \quad (R^2 = 0.41) \quad (14)$$



注:作业温度和新有效温度仅显示回归曲线

图 9 空气流速与室内温度的变化关系

空气流速与各室内温度均呈二次多项式关系;温度低于 26 °C 时,流速维持在较低水平;温度超过 26 °C 以后,流速随温度的上升而快速提高;对空气温度和作业温度而言,温度每升高 1 °C,空气流速提高 0.05 m/s,对新有效温度而言流速提高 0.03 m/s,流速随空气温度和作业温度变化的趋势更加显著。

将本文与笔者前期的自然通风建筑调研结果及以往的研究结果相对比,结果如图 10 所示。

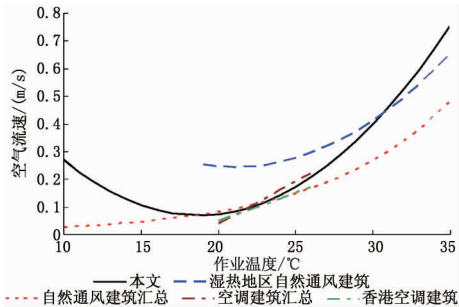


图 10 空气流速与室内温度的关系在不同研究间对比

同处湿热地区,分体空调建筑的室内空气流速随温度的变化趋势较自然通风建筑更为显著,这意

味着前者的气流利用更为积极有力,这与 2.2.2 节的结果相一致;与世界各地自然通风建筑的汇总结果相比,湿热地区的建筑均表现出更高的空气流速;空调建筑的空气流速明显低于自然通风或分体空调建筑。综上可知,对室内气流的调节和利用而言,湿热气候较其他气候、使用分体空调建筑和自然通风建筑较空调建筑更为积极有力。

2.3 空调器的使用

2.3.1 确定启动点和设定点

空调器的使用特征通过安放在宿舍中的温湿度自记录仪获得。首先观察室内空气温度的逐时变化,依温度发生突降和止降的趋势,确定分体空调器的启动点和设定点,如图 11 所示。

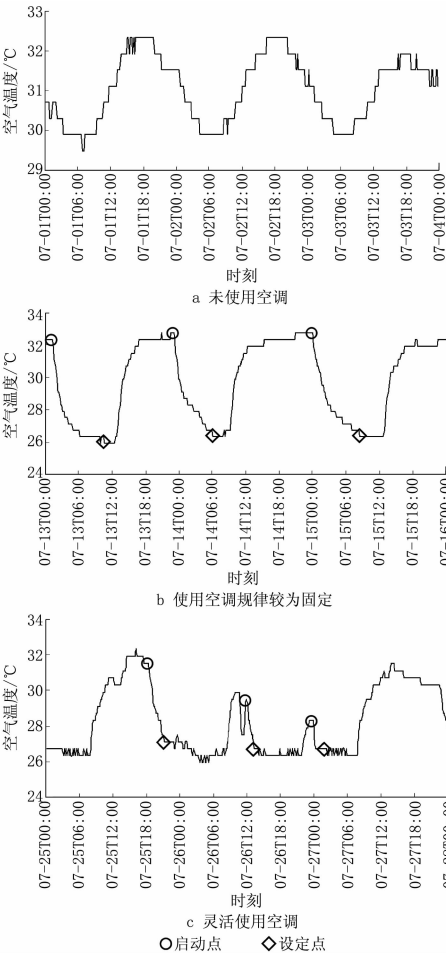


图 11 空调启动点和设定点的确定

依以上方法,对 10 个宿舍房间的所有记录数据进行观察分析,最终确定了 372 对空调的启动点和设定点。提取启动点和设定点对应的空气温度、相对湿度和时间作分析。

2.3.2 使用时间

统计空调使用月份的频数分布如图 12 所示。

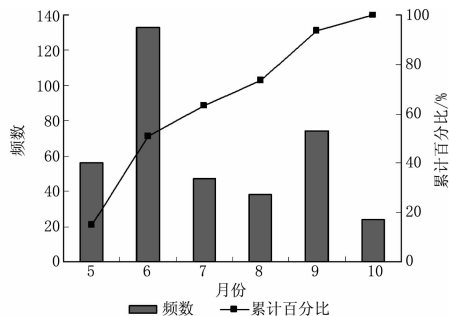


图 12 空调使用月份的频数分布

由图 12 可以看出,分体空调器的使用自 5 月始,至 10 月止,进一步的具体日期分析显示,使用自 5 月中旬始,至 10 月中旬止,与广州的夏季时段恰好对应,共计 5 个月时间;使用空调频数最多的月份为 6 月,其次为 9 月,5 月和 10 月因温度处上升或下降区间,频数较低,较热的 7,8 两月空调使用较少,主要是暑假原因。

统计空调启动时刻的频数分布如图 13 所示。由图 13 可以看出,空调在午夜前后,也即 23:00 和

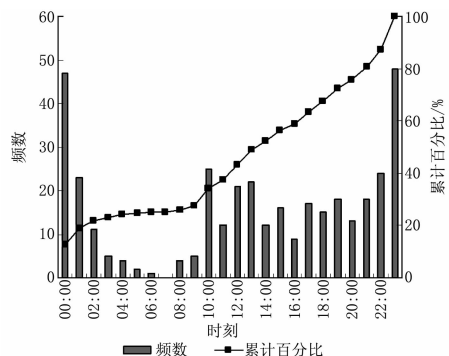


图 13 空调启动时刻的频数分布

00:00 开启的频数最多,其次为 10:00,22:00 和 01:00;如按上午(07:00—12:00)、下午(13:00—18:00)、晚间(19:00—22:00)和夜间(23:00—次日 06:00)分类,统计可知,夜间频数最高(141 次),其次分别为下午(91 次)、晚间(73 次)和上午(67 次)。由此可推知,宿舍的分体空调主要用于夜间睡眠,部分用于下午和晚间的活动需要,这与以往研究的结果^[18]一致。空调的停止时刻主要受使用者作息时间影响,夜间睡眠时使用的空调一般于次日 7:00 左右关闭。

2.3.3 启动与设定温湿度

将空调启动温度按 0.5℃ 分组,统计每组的频

数及温度中值,频数分布如图 14 所示。由图 14 可以看出,室内温度超过 26℃ 时开始有空调启动,温

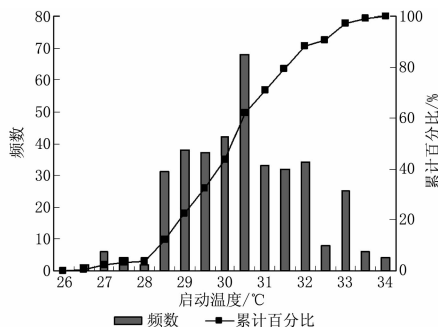


图 14 空调启动温度的频数分布

度升至 28.5℃ 时启动频数突然增大,并在 30.5℃ 时达最大值;空调启动的有效温度范围为 26~34℃,其中的主要范围为 28.5~32℃ (占总频数的 85%),平均值为 30.5℃。与以往研究^[16-19]相比,本文的启动温度平均值更高,范围更大。空调启动时对应的室内相对湿度分布在 40%~85%之间,平均为 68%。

将空调设定温度按 1℃ 分组,统计每组的频数及温度中值,频数分布如图 15 所示。26℃ 为最常

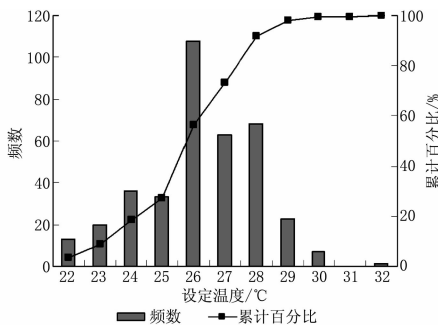


图 15 空调设定温度的频数分布

见的空调温度设定值,这与以往研究结果^[17-18]一致,24~28℃ 的频数占总数的 80% 以上,平均温度为 26℃。达到设定温度时室内的相对湿度平均为 57%。

2.3.4 逐月变化

按月取平均,观察空调启动和设定温度的逐月变化,如图 16 所示。由图 16 可以看出,启动和设定温度有明显的逐月变化,与 5 月和 10 月相比,较热月(6—9 月)的启动和设定温度都很高,这可能意味着受试者随着气温的升高而产生了主动适应,提高了容忍温度上限,调低了对空调的期望。与启动温度相比,设定温度的变化幅度较小。

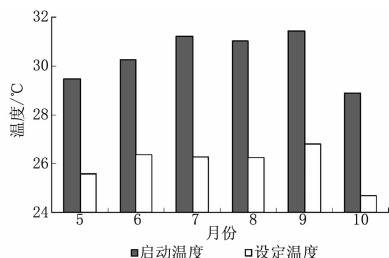


图 16 空调启动温度与设定温度的逐月变化

为进一步分析以上的逐月变化特征,取广州典型气象年数据中的室外月平均气温,与空调的启动和设定温度建立关系,如图 17 所示。由图 17 可以

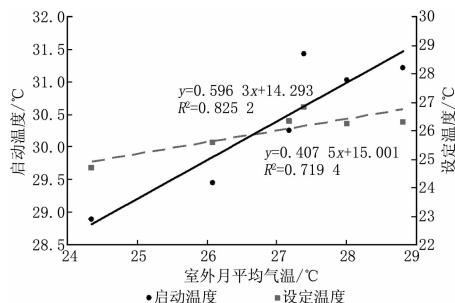


图 17 空调启动温度和设定温度与室外月平均气温的关系

看出,空调的启动和设定温度与室外气温呈较好的线性关系,启动和设定温度随室外气温的上升而提高,其中启动温度的上升趋势更为明显,这与图 16 的结果相一致。

3 结论

3.1 适应行为特征

我国湿热地区人群在使用分体空调建筑中的适应行为特征如下:

1) 室内温度每升高 1℃,服装热阻减小 0.04 clo。

2) 开窗行为变化的有效温度范围为 14~34℃,其中,开窗比例在 20~30℃时快速线性上升,温度每升高 1℃,比例增加 6%;使用风扇行为的有效温度范围为 21~31℃,其中,使用风扇比例在 23~29℃时快速线性提高,温度每升高 1℃,比例增加 14%。温度每升高 1℃,空气流速提高 0.03~0.05 m/s。

3) 分体空调的使用自 5 月中旬始至 10 月中旬止,为期 5 个月;空调最多用于较热月(6—9 月)的夜间睡眠;空调启动的有效温度范围为 28.5~32℃,平均为 30.5℃;空调设定温度在 24~28℃之间,平均为 26℃。

以上结论,连同本文所得的适应行为随室内温度的变化关系式,合理量化了湿热地区人群在使用分体空调建筑中的适应行为特征,这将为理解人与建筑环境之间丰富的交互作用和准确设定边界条件合理预测建筑的热环境与能耗,提供十分重要的基础。

3.2 热适应特征

通过与以往研究的对比,获得建筑热环境人体热适应的特征如下:

1) 气候对适应行为的影响体现在:冬夏温差较大的气候区,人们随室内温度变化调整服装更为敏感、范围更大;湿热地区人群较其他地区更为积极有力地利用室内气流。

2) 建筑对适应行为的影响体现在:使用分体空调建筑人群的服装调整与自然通风建筑相近,而与空调建筑不同,后者的夏季服装热阻更大,服装随温度变化的趋势更为平缓;与自然通风建筑相比,使用分体空调建筑的人群,开窗和使用风扇的行为随室内热环境的变化出现得更早,变化更为迅速有力。

3) 其他适应特征包括:女性随温度调整服装较男性更为敏感,范围更大;与开窗相比,风扇的使用与室内热环境的关联更为紧密;分体空调的启动和设定温度随室外气温的上升而提高。

以上结论,为理解人在建筑环境中的热适应提供了新的证据和支撑。

参考文献:

- [1] Brager G S, de Dear R J. Thermal adaptation in the built environment: a literature review [J]. Energy and Buildings, 1998, 27(1): 83-96
- [2] Brager G S, de Dear R J. 建筑环境热适应文献综述 [J]. 陈慧梅, 张宇峰, 翟永超, 译. 暖通空调, 2011, 41(7): 35-50
- [3] 江亿. 建筑节能与生活模式 [J]. 建筑学报, 2007 (12): 11-15
- [4] Macfarlane M V. Thermal comfort studies since 1958 [J]. Architectural Science Review, 1978, 21(4): 86-92
- [5] 夏一哉, 赵荣义, 江亿. 北京市住宅环境热舒适研究 [J]. 暖通空调, 1999, 29(2): 1-5
- [6] 杨薇, 张国强. 湖南某大学校园建筑环境热舒适调查 [J]. 暖通空调, 2006, 36(9): 95-101
- [7] Mui K W H, Chan W T D. Adaptive comfort temperature model of air-conditioned building in Hong Kong [J]. Building and Environment, 2003, 38

- (6): 837-852
- [8] Hwang R L, Lin T, Kuo N. Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(1): 53-62
- [9] de Dear R J, Brager G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [G] // ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 145-167
- [10] Hwang R L, Chen C P. Field study on behaviors and adaptation of elderly people and their thermal comfort requirements in residential environments[J]. *Indoor Air*, 2010, 20(3): 235-245
- [11] Nicol J F, Humphreys M A. A stochastic approach to thermal comfort—occupant behavior and energy use in buildings[G] // ASHRAE Trans, 2004, 100(2): 554-568
- [12] Nicol J F, Raja I A, Allaudin A, et al. Climatic variations in comfortable temperatures: the Pakistan projects[J]. *Energy and Buildings*, 1999, 30(3): 261-279
- [13] Yun G Y, Steemers K, Baker N. Natural ventilation in practice: linking facade design, thermal performance, occupant perception and control[J]. *Building Research & Information*, 2008, 36(6): 608-624
- [14] 张宇峰,王进勇,陈慧梅. 我国湿热地区自然通风建筑热舒适与热适应现场研究[J]. *暖通空调*, 2011, 41(9): 91-99
- [15] Rijal H B, Humphreys M A, Nicol J F. Understanding occupant behaviour: the use of controls in mixed-mode office buildings[J]. *Building Research & Information*, 2009, 37(4): 381-396
- [16] 冉茂宇,刘晓迅,胡深,等. 厦门住宅夏季空调运行实测及其相关分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2011, 30(1): 39-43
- [17] 简毅文,江亿. 住宅房间空调器运行状况的调查分析[J]. *中国建设信息供热制冷*, 2005(6): 6-8
- [18] 简毅文,李清瑞,白贞,等. 住宅夏季空调行为对空调能耗的影响研究[J]. *建筑科学*, 2011, 27(12): 16-19
- [19] Bae C, Chun C. Research on seasonal indoor thermal environment and residents' control behavior of cooling and heating systems in Korea [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(11): 2300-2307
- [20] Indraganti M. Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(7): 1019-1025
- [21] Lin Z, Deng S. A questionnaire survey on sleeping thermal environment and bedroom air conditioning in high-rise residences in Hong Kong[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(11): 1302-1307
- [22] Schweiker M, Shukuya M. Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-unit usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(10): 2137-2149
- [23] Lutzenhiser L. A question of control: alternative patterns of room air-conditioner use[J]. *Energy and Buildings*, 1992, 18(3/4): 193-200
- [24] Seligman C, Darley J M, Becker L J. Behavioral approaches to residential energy conservation [J]. 1978, 1(3): 325-337
- [25] 李兆坚,江亿,雷毅. 对空调舒适性的伦理学思考[J]. *暖通空调*, 2008, 38(5): 38-43
- [26] 付祥钊,杨李宁. 对住宅空调舒适性的社会学思考[J]. *建筑科学*, 2009, 25(6): 13-15
- [27] 李兆坚,江亿,魏庆元. 环境参数与空调行为对住宅空调能耗影响调查分析[J]. *暖通空调*, 2007, 37(8): 67-71
- [28] 朱光俊,张晓亮,燕达. 空调运行模式对住宅建筑采暖空调能耗的影响[J]. *重庆建筑大学学报*, 2006, 28(5): 119-121
- [29] 李兆坚,江亿,魏庆元. 北京市某住宅楼夏季空调能耗调查分析[J]. *暖通空调*, 2007, 37(4): 46-51
- [30] 韩漪. 夏季空调房间间断运行室内温度特性及节能潜力的理论与实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2007
- [31] 刘晓庆. 间歇空调运行模式下住宅墙体热工性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011
- [32] 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): 6-14
- [33] ISO. ISO International Standard 7726 Ergonomics of the thermal environment — instruments for measuring physical quantities[S]. Geneva: ISO, 1998
- [34] ASHRAE. ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2004
- [35] de Dear R J, Brager G S, Copper D. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [R]. Final report of ASHRAE RP-884, 1997
- [36] Heidari S, Sharples S. A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran [C] // Conference Proceedings on Moving Thermal Comfort Standards into 21st Century. Windsor, UK, 2001
- [37] 叶晓江,连之伟,文远高,等. 上海地区适应性热舒适研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2007, 26(5): 86-88
- [38] 李俊鸽,杨柳,刘加平. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[J]. *暖通空调*, 2008, 38(7): 20-25