

湿热地区人群夏季主动利用气流的研究(1):行为与动机^{*}

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 张宇峰[☆]

深圳市建筑科学研究院 刘倩妮

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 气流是湿热地区人群改善夏季室内热环境的有效方式。通过对自然通风宿舍 32 名大学生的夏季现场测试与调研,获得了他们主动利用气流行为的变化特征,并就行为背后的动机加以分析,结果显示:门窗的开启兼顾热环境改善和通风换气,开启率随新有效温度缓慢线性增长;风扇的使用以改善热环境为主,使用率随新有效温度呈较好的 S 形关系变化,增长迅速而剧烈。研究结果对建筑自然通风和风扇设计及建筑热环境与能耗模拟有参考价值。

关键词 湿热地区 气流 行为 动机 门窗 风扇

Airflow utilization in built environment in hot-humid area of China (1): Behaviors and motivations

By Zhang Yufeng[★], Liu Qianni and Meng Qinglin

Abstract Airflow is an effective way for people in hot-humid area of China to improve their thermal environment in summer. Through the field survey on 32 college students in their naturally ventilated dormitories, obtains their behaviors to utilize airflow and analyses the behind motivations. The results show that with motivations of both thermal environment and air quality, openings of windows and doors grow linearly and slowly with new effective temperature, and with single motivation of thermal environment, frequencies of using fans increase rapidly and sharply with new effective temperature. The present study provides reference for the design of natural ventilation and electrical fans, and also the simulation of building thermal environment and building energy consumption.

Keywords hot-humid area, airflow, behavior, motivation, window and door, fan

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

①

0 引言

在我国湿热地区(包括广东、广西、海南、香港、澳门、台湾、福建南部和云南小部分),气流因能促进身体表面对流散热和汗液蒸发,广为人们熟悉和喜爱,开窗自然通风和使用风扇已成为夏季最为常见的无(低)成本降温方式,在生产生活中发挥着不可替代的作用。以广东、广西两省为例,2006 年底风扇在城镇居民家庭的普及率就已超过了空调(1.29 台/户)和流行消费品(如移动电话为 1.81 部/户),高达 2.93 台/户^[1]。在湿热地区的夏季,如能充分利用自然和人工方式合理营造室内气流,

将会显著改善热环境质量,扩展舒适的温湿度范围,缩短空调运行时间,从而减少建筑能耗。

深入了解和认识人群主动利用气流的途径、方法和效果,是合理指导湿热地区建筑的自然通风设计和风扇选型,确保室内气流合理营造和充分利用的基础。据此确立本研究目标:通过连续的现场调研,获得湿热地区人群主动利用气流的行为特征及其动机和气流感受的变化规律,从而提出利用气流的策略。因篇幅原因,本文先就行为与动机展开分析探

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:2013-08-13

修回日期:2013-09-24

* 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资助

讨,气流感受与利用策略部分在后续文章中阐述。

开窗和使用风扇等主动利用气流的行为,是人适应建筑的一种方式。Brager 和 de Dear 在热适应概念模型中指出,行为调节是人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”^[2-3]。人在建筑热环境中的适应行为研究始于上世纪 80 年代^[4],我国学者于 1999 年^[5]开始关注。多数研究伴随热舒适的现场调研展开,在观测热环境和热感受的同时记录受试者的适应行为;少数研究专门观察各种适应行为,观察时间有的长达一年之久。

各种适应行为中,调整服装受到的关注最多,开窗和使用风扇其次。对后两者而言,一般通过观察和问卷获得调研环境窗户和风扇的开启和使用频率,行为特征表示为频率随室内外温度的变化关系。关系通常由 Logistic 回归^[6]得到,也即门窗开启率和风扇使用率随温度呈 S 形曲线升高,这被视为人主动调节环境的有力证据。

现有的研究显示,开窗行为发生变化的新有效温度范围大致为 20~30℃^[7-8],使用风扇的起始温度比开窗高^[7,9],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^[10]。除行为本身外,开窗和使用风扇的主要行为结果,也即室内风速,也受到一定关注^[11],此时的适应特征表达为风速随室内温度的线性提高。

本文在我国湿热地区自然通风建筑的现场调研基础上,对湿热地区人群开启门窗和使用风扇等行为及其动机展开系统分析和讨论,以期获得湿热地区人群主动利用气流的行为特征,为湿热地区建筑的空气流动设计与营造提供参考。

1 研究方法

1.1 气候、建筑与人群

在我国湿热气候的典型城市广州展开研究。广州位于北纬 23°08′、东经 113°19′,夏季 5—10 月,高温高湿,7 月平均气温 28.4℃,相对湿度 82%,冬季短暂,1 月平均气温 13.3℃,全年的气温日较差 7.5℃。

相较于空调建筑,自然通风建筑中人们更依赖于气流散热降温,主动利用气流的行为和效果更为普遍,故此,选择华南理工大学北校区的宿舍为调研对象,其门窗均可开启且未安装空调。通过 16

栋宿舍楼的 433 份问卷调查,了解到校园宿舍楼的实际情况如下(见图 1):宿舍夏季的自然通风情况多为有时有风和偶尔有风,学生在夏季的感受多为很热、沉闷和潮湿,改善不适感的主要手段是开风扇、开窗和开门,风扇分公用和自备两种,公用风扇为宿舍楼统一安装,自备风扇为学生自己购买,风扇缓解不适的效果要优于开门开窗。



图 1 宿舍自然通风与使用风扇的情况

依宿舍楼的总体情况,在走访调研的对象中挑选 9 栋宿舍楼的 32 名学生作为受试者,他们满足如下条件:在湿热地区已生活一年以上,所在宿舍的自然通风和使用风扇情况与校园宿舍楼的总体情况接近,由此确保调研人群和建筑的代表性。受试者的基本信息如表 1 所示。受试人群的平均身高为 1.65 m,体重为 55 kg,体质指数(BMI)为 20 kg/m²,体表面积为 1.6 m²。

表 1 受试者的基本信息

性别	人数	身高/ cm	体重/ kg	BMI/ (kg/m ²)	体表面积/ m ²
男	16	170.2±4.5 ¹⁾	60.3±5.6	20.8±1.3	1.7±0.1
女	16	160.5±4.2	49.6±5.3	19.2±1.5	1.5±0.1
全部	32	165.3±6.5	55.0±7.6	20.0±1.6	1.6±0.1

1) 标准偏差。

1.2 现场调研

以调查问卷和室内物理环境测量相结合的方法,对受试者在整个夏季做连续调研。每人每周接受两次调研,分别在工作日的夜晚和休息日的白天。单次调研约 15 min,受试者填写问卷的同时测量受试者周围的空气温度、黑球温度、相对湿度及风速。

选用满足 ISO 7726^[12] 标准要求的仪器(见表 2 和图 2)对热环境物理量进行测试。部分黑球温度的测试采用 RHLOG 自记录仪探头罩哑光黑漆喷涂的乒乓球进行,经与 150 mm 标准黑球温度计对比,测试精度满足±0.5℃的标准要求。测点位置距受试者 0.3 m 以内,高度分别取 0.1、0.6、1.1 m,对应坐姿人体的脚踝、腹部和头部(见图 2)。

表 2 测试仪器的基本信息

物理量	仪器	量程	精度
空气温度	RHLOG 系列温湿度记录仪	-20~75 ℃	±0.3 ℃
相对湿度	RHLOG 系列温湿度记录仪	15%~85%	±3%
黑球温度	QUESTemp 34°	-5~100 ℃	±0.5 ℃
风速	HD 2303.0 万向型微风仪	0~5 m/s	±0.02 m/s(0~0.99 m/s); ±0.1 m/s(1~5 m/s)



图 2 热环境物理量现场测试

调查问卷分 3 部分:1) 活动量和衣着量等基本信息;2) 利用气流的行为、动机及对气流的感受;3) 整体热环境的评价。

第 1 部分中的衣着量参考国内外相关标准^[13-14]编制单件服装列表,由受试者勾选获得。第 2 部分内容针对 3 种主要的气流利用手段,即门窗、公用风扇和自备风扇,分别加以调查。行为调查的内容包括当前门窗、风扇的使用状态和离调研时间最近一次的行为动作,包括开关门窗、开关或调大调小风扇等。动机以若干选项的方式列出供受试者选择(可多选)。气流感受和整体热环境评价的问卷内容将在文献^[15]中介绍。

调研从 2011 年 5 月 22 日始,至 10 月 24 日止,涵盖整个夏季,共计得到 22 周、1 092 组原始调研数据。调研月份与周次的对应关系如表 3 所示。

表 3 现场调研时间

	调研周次	起始日期	结束日期
5 月	1~2	2011-05-22	2011-06-03
6 月	3~6	2011-06-08	2011-07-04
7 月	7~10	2011-07-06	2011-08-01
8 月	11~15	2011-08-02	2011-09-04
9 月	16~19	2011-09-06	2011-10-03
10 月	20~22	2011-10-04	2011-10-23

2 结果分析

2.1 热环境

2.1.1 空气温湿度

将每周调研结果汇总取平均,得到空气温度、相对湿度的逐周变化如图 3 所示。由图 3 可知,第 1 周和第 18~22 周,室内温度出现较明显的上升和下降,平均值较低,仅为 26.8 ℃,称之为夏季低温期,对应时段为 5 月下旬、9 月中旬和 10 月上旬。与之相对应,第 2~17 周温度虽略有波动,但

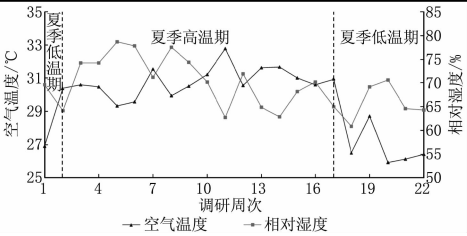


图 3 空气温度和相对湿度的逐周变化

维持在较高水平,平均为 30.8 ℃,称之为夏季高温期,对应时段为 6 月初至 9 月中旬。调研期间室内相对湿度在 60%~80%间波动,平均近 70%,显示出调研地区建筑湿与热并存的特征。

2.1.2 平均辐射温度和风速

平均辐射温度与风速的逐周变化如图 4 所示,为方便对比,空气温度也一并显示。其中,平均辐射温度由黑球温度、空气温度和风速计算得到。

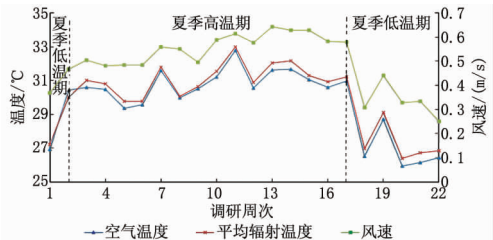


图 4 平均辐射温度和风速的逐周变化

室内平均辐射温度以相同的趋势跟随空气温度变化,第 11 周(8 月上旬)同时达最大,分别为 33.0 ℃和 32.8 ℃;第 20 周(10 月上旬)同时达最低,分别为 26.4 ℃和 25.9 ℃。除第 2 周外,平均辐射温度均高于空气温度,就整个夏季平均而言,高 0.3 ℃。

进入夏季高温期后,室内风速逐周增加,在第 13 周(8 月下旬)达最大(0.64 m/s),平均 0.55 m/s。进入夏季低温期后风速快速减小,并在第 22 周(10 月下旬)降到最小(0.25 m/s)。主动利用气流行为的直接影响体现在室内风速的改变上,也即风速是气流行为的主要结果。对比风速与空气温度可知,二者的逐周变化趋势较为相近,由此可推知,人群主动利用气流的行为与所处环境的温度状况存在密切关联。

2.1.3 其他相关因素

活动量和服装是影响人体热感觉和热舒适的个人因素。在本文的研究中,大多数情况下受试者在调研前为静坐或轻微走动状态,新陈代谢率为1~1.2 met。受试者在宿舍中可随意调整穿着。调研发现,受试者的服装热阻与室内空气温度存在较明显的关联,如图 5 所示。温度越高,服装热阻越小,反之亦然。温度的突变一般对应有明显的服装调整,这说明,调研人群依室内温度调整服装是敏感且快速的。

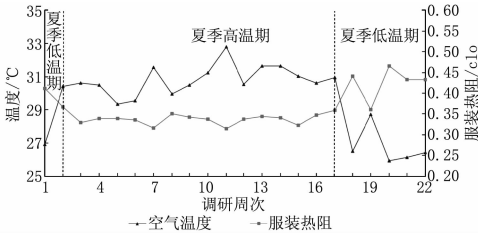


图 5 服装热阻的逐周变化

综合分析可知,湿热地区的夏季分低温期和高温期;在夏季高温期,自然通风宿舍的室内热环境平均状况为:空气温度 30.8℃,相对湿度 70%,平均辐射温度 31.1℃,风速 0.55 m/s;平均辐射温度与相对湿度对热感受的影响不可忽略;风速和服装热阻跟随气温变化的特征明显,预示着气流与服装调节行为与热环境存在密切关联。

2.2 开启和使用率

初步观察发现,门窗和风扇的使用状态在调研期间有明显变化。门窗的开启率在夏季低温期较低,夏季高温期较高。公用风扇的使用率在进入夏季高温期后迅速上升,且多处于高速挡(所占比例为 59%)。自备风扇的使用率在夏季高温期也有所提高,但幅度较小,高、中、低各挡出现的频率也较为平均。

2.2.1 门窗

热环境参数中,风速受气流行为作用最大,视为行为的表征参数,其他参数,即空气温度、相对湿度和平均辐射温度,视为导致行为的热环境因素,并以综合它们影响作用的新有效温度(ET^*)表达。

将 1 092 组原始数据按新有效温度分组,每隔 0.5℃ 一组,共得到 23 组,将每组中门窗处于“全部开启”的样本量占全部样本量的比例作为门窗开启率,得到门窗开启率与新有效温度的变化关系如图 6 所示。

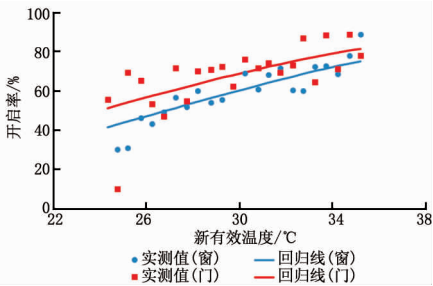


图 6 门窗开启率随新有效温度的变化

由图 6 可知,门窗开启率随新有效温度上升而提高,近似呈线性。相对窗而言,门的开启率波动略大,说明门的开关动作与室内热环境的关联较窗更弱。

借鉴以往研究,采用 Logistic 回归确定门窗开启率与新有效温度的关系。Logistic 回归适用于分析某事件的发生率随自变量的变化关系,它假定关系呈 S 形曲线,对于单一自变量,回归结果可表达为

$$y = \frac{e^{ax+b}}{1 + e^{ax+b}} \tag{1}$$

式中 a, b 为回归系数。

采用 SPSS 软件,得到门窗开启率的回归结果如表 4 所示。

表 4 门窗开启率的 Logistic 回归结果

	窗开启率	门开启率
a	0.13	0.13
b	-3.59	-3.18
伪决定系数	0.04	0.04
优势比 $\exp(a)$	1.14	1.14

注:伪决定系数取调整后的 R^2 。

优势比仅为 1.14,这意味着新有效温度每增加 1℃,门窗开启与不开启的概率之比仅增加 14%,这说明门窗开启率随新有效温度增加的幅度不大,呈缓慢上升的趋势。伪决定系数与决定系数类似,反映自变量引起的变动占总变动的百分比,表 4 中的伪决定系数很小,说明它们在调研范围内所呈现的 S 形曲线关系尚不明显,可近似用如下的线性关系替代:

$$P_w = 3.61ET^* - 47.96 \quad (R^2 = 0.76) \tag{2}$$

$$P_D = 3.24ET^* - 29.28 \quad (R^2 = 0.45) \tag{3}$$

式(2),(3)中 P_w 为窗开启率,%; P_D 为门开启率,%。

2.2.2 风扇

同理,得到公用和自备风扇的使用率与新有效

温度的关系如图 7 所示,其中,风扇的使用率定义为风扇处于开启(包括高、中、低各挡)的样本量占总样本量的比例。

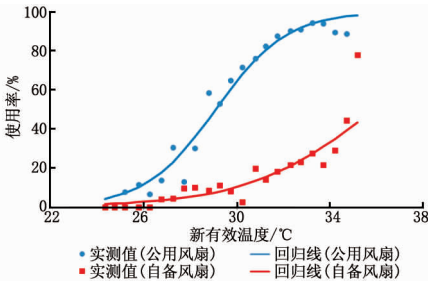


图 7 风扇使用率随新有效温度的变化

由图 7 可知,与门窗相比,风扇的使用更为明显地随室内热环境变化而变化。与自备风扇相比,公用风扇的使用率更高,变化更为剧烈和显著。

经 Logistic 回归得到两种风扇使用率与新有效温度的回归结果如表 5 所示。

表 5 门窗开启率的 Logistic 回归结果		
	公用风扇使用率	自备风扇使用率
<i>a</i>	0.66	0.37
<i>b</i>	−19.12	−13.24
伪决定系数	0.48	0.13
优势比	1.93	1.45

回归得到的优势比和伪决定系数从数量上进一步说明了以上对比的差异。公用风扇使用率随新有效温度变化的优势比为 1.93,这意味着新有效温度每增加 1℃,公用风扇使用与不使用的概率之比增大近 1 倍,由此可知,公用风扇随新有效温度的变化最为敏感,其次为自备风扇,门窗最不敏感。从伪决定系数可以看出,公用风扇使用率随新有效温度变化更接近 S 形,其次为自备风扇,再次为门窗。

由上可知,风扇使用率随新有效温度的变化较为敏感,呈较好的 S 形关系,它们的关系式可表达为

$$P_{F1} = \frac{e^{0.66ET^* - 19.12}}{1 + e^{0.66ET^* - 19.12}} \tag{4}$$

$$P_{F2} = \frac{e^{0.37ET^* - 13.24}}{1 + e^{0.37ET^* - 13.24}} \tag{5}$$

式(4),(5)中 P_{F1} 为公用风扇使用率; P_{F2} 为自备风扇使用率。

综上可知,门窗与风扇的使用状态与室内热环境关系密切,门窗开启率随新有效温度线性增长,增长缓慢,风扇使用率随新有效温度呈较好的 S 形关系变化,增长迅速剧烈。式(2)~(5)以量化的方

式刻画了湿热地区人群门窗开启率和风扇使用率随室内热环境的变化关系,它们不但有助于加深认识人群主动利用气流的行为特征,还能为自然通风设计和风扇选型提供指导,为建筑热环境与能耗模拟提供更为合理的计算条件。

2.3 行为动作

受试者在调研时刻前最近一次开关门窗的动作多发生在 2 h 前。进入夏季高温期,多数调研对象使窗保持“长时间开”的状态,如图 8 所示。由此可知,受试者并未频繁启闭窗户,而是使其长时间处于一种稳定状态。

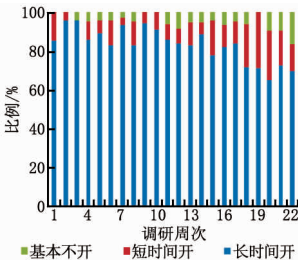


图 8 调研前 3 天窗开关状态比例的逐周变化

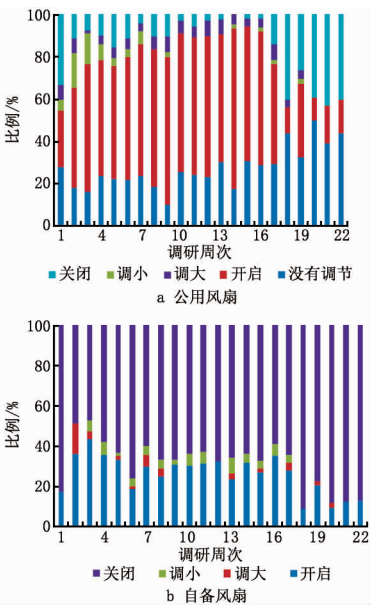


图 9 风扇最近一次动作的逐周变化

调研时刻前风扇最近一次的动作如图 9 所示。由图 9 可知,进入夏季高温期后,无论是公用还是自备风扇,风扇的开启比例有明显提高。另外,风扇的行为动作多为开启、关闭和没有调节,而调大和调小的比例很小(不超过 5%)。对比公用和自备风扇可知,自备风扇的开启动作比例远低于公用风扇,这与第 2.2 节得到的公用风扇使用率高于自

备风扇的结果相一致。

综合门窗、风扇的结果可知,调研人群的行为有某种习惯或惰性,一经调整到合适的状态,比如门窗一经开启或风扇一经调节到合适挡位,就不再做出调整。

2.4 行为动机

2.4.1 门窗

经初步观察可知,开窗行为的主要动机在不同时段有所不同,夏季低温期主要为“使室外新鲜空气进入室内”(58%),夏季高温期变为“希望有风吹过身体使自己凉快”(48%)和“希望增加通风使房间降温”(35%)。由此可推断,开窗的主要动机随室内热环境变化而变化,室内环境适中时,动机为改善室内空气品质,随着温湿度的升高,动机逐渐转到热环境调节方面,也即开窗通风和降温。

据此推断,将动机分为空气品质和热环境两大类,统计新有效温度分组后每组样本中不同动机的比例,得到开窗动机与新有效温度的关系如图 10 所示。

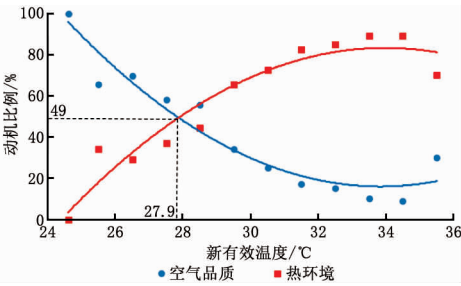


图 10 开窗动机与新有效温度的关系

由图 10 可知,开窗的两种动机与新有效温度均呈较好的二次多项式关系。随着新有效温度升高,空气品质的动机比例逐渐减小,热环境的比例同时上升。两条回归线相交于新有效温度 27.9℃,对应动机为 49%,也即,当新有效温度低于 27.9℃时,开窗动机以空气品质为主,当新有效温度高于 27.9℃时,主要动机转变成热环境。图 11 以直观和量化的方式验证了初步观察的推断。

开门的情况与开窗相似,行为动机在新有效温度 27.7℃时出现分界。关闭门窗的动机随室内热环境的变化不明显,主要考虑安全和隔绝噪声两方面因素。

2.4.2 风扇

观察风扇行为动机的逐周变化发现,无论是公用还是自备风扇,动机在各周近似保持稳定。将所

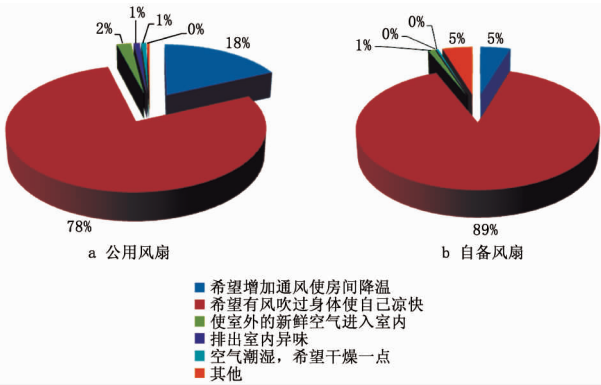


图 11 开启和调大风扇的动机

有数据汇总,得到开启和调大风扇的动机分布如图 11 所示。

由图 11 可知,开启和调大风扇的主要动机均为调节热环境,也即“希望有风吹过身体使自己凉快”,比例分别为 78%(公用风扇)和 89%(自备风扇)。

综合动机与行为的结果可知,动机与行为相互呼应,内在动机的不同为行为表现上的差异提供了解释。风扇的行为以热环境动机为主,故风扇的使用率随新有效温度变化十分明显和剧烈,呈明显的 S 形关系;门窗的开启不单以热环境考虑为主,还兼顾通风换气,故门窗的开启率随新有效温度的变化较为松散和缓慢。

综合门窗与风扇的行为动机可知,利用气流行为的热环境动机体现为两方面:促进人体散热和使房间通风降温。对门窗而言,二者同时存在且比例相当,风扇的动机则更多集中于前者。以上结果为自然通风和风扇的设计提供了有价值的指导信息。开启门窗形成房间的自然通风,对此做设计既要考虑空气流经人员的主要活动区域,又要兼顾房间主要热源或部位的顺畅散热。风扇的设计应紧密围绕人员所在位置展开,以有效促进人体周围空气的流动为目标。

3 结论

3.1 湿热地区的夏季分低温期和高温期,在夏季高温期,自然通风宿舍的室内热环境平均状况为:空气温度 30.8℃,相对湿度 70%,平均辐射温度 31.1℃,风速 0.55 m/s。

3.2 确定了门窗开启率和风扇使用率随新有效温度变化的量化关系:门窗开启率随新有效温度线性增长,增长缓慢;风扇使用率随新有效温度呈较好的 S 形关系变化,增长较为迅速剧烈。

3.3 门窗的开启兼顾热环境改善和通风换气,风扇的使用以改善热环境为主,动机与行为的变化特征相呼应;同为改善热环境,开启门窗自然通风应同时注重人体和房间散热,风扇的使用主要用于人体散热。

本文的研究结果,在加深人群主动利用气流行为特征及动机的认识、促进建筑的自然通风设计和风扇选型,以及合理预测建筑热环境和能耗等方面,提供了基础和重要的信息。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2007 年中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社,2008
- [2] 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
- [3] 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
- [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] 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
- [7] 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

- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] ISO. ISO International Standard 7726 Ergonomics of the thermal environment—instruments for measuring physical quantities [S]. Geneva: ISO, 1998
- [13] ASHRAE. ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: ASHRAE, 2004
- [14] 清华大学, 中国标准化研究院. GB/T 5701—2008 室内热环境条件[S]. 北京:中国标准出版社, 2008
- [15] 张宇峰, 刘倩妮, 孟庆林. 湿热地区人群夏季主动利用气流的研究(2):气流感受与利用策略[J]. 暖通空调, 2014, 44(1):36-41