DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201703068

# 热湿环境个体调节桌面风扇对舒适性的影响

何梅玲,李念平,何颖东,贺 德,章文杰,王 宽

(湖南大学 土木工程学院,长沙 410082)

**摘 要:** 个体主动调节行为在满足人体舒适的同时还具有节能的潜力,但现有的文章很少有关于热湿环境下,个体主动调节行为对热舒适影响研究.为此,在热湿环境下对给定风速和个体主动调节风速的情况进行人体主观感觉的实验研究.本次实验共有24名受试者参与,背景环境温度分别为26,28,30 ℃,风速模式分为固定风速模式和自由调控风速模式两种.实验对比分析不同工况下受试者的舒适性情况,结果表明,使用风扇能有效提高受试者在高温环境下的舒适性.个体主动调节的行为不仅可以使受试者在热湿环境中的舒适度优于固定风速下,其调节模式还能在一定程度上起到节约能源的作用.当受试者可以自由控制风扇时,其热感觉最接近于中性,电风扇平均功率最小.

**关键词:** 行为调节;热舒适;主观感受;节能

**中图分类号:** TU831.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)08-0095-07

# Influence of personal-controlled desk fan on comfort in a hot and humid environment

HE Meiling, LI Nianping, HE Yingdong, HE De, ZHANG Wenjie, WANG Kuan

(College of Civil Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Personal control behavior has potentials for both saving energy and maintaining comfort of human body. However, few studies are found on the influence of personal control behavior on thermal comfort in hot and humid environment. In this study, a series of experiments of personal-controlled desk fan were conducted in a hot and humid environment. In total, 24 subjects were invited to participate in the experiments and they experienced the environments which were set at 26, 28, and 30 ℃ with fixed or free-controlled local air flow, respectively. The experiment analyzed the comfort of the subjects under different working conditions. The results show that the use of desk fan significantly improved the subjects' thermal comfort. And the individual control behavior can not only lead to a better thermal comfort situation, but also show potential in energy-saving. When the subjects could freely control the fan, the thermal sensation is very close to neutral, and the average power of fans is at the lowest level.

**Keywords:** behavior control; thermal comfort; subjective feeling; energy saving

人体热舒适在ASHRAE标准中的定义为人对热环境表示满意的意识状态.热舒适的研究通过分析人体对热环境的主观热反应,得到了人体热舒适环境参数组合的最佳范围和允许范围以及实现这一条件的控制、调节方法[1].大量的研究表明,不同的人对相同环境的感知存在差异性,即使穿着相同的服装、拥有相同活动量且所处环境也完全一致,仍有人会对其所处的环境感到不满[2].近年来,对热适应的研究使满足不同人的舒适需求成为可能.热适应包括生理、心理和行为适应.其中行为适应是指人们通过物理调节的手段来改变热交换条件以适应环境,包括所有有意识或无意识地改变自身热平衡状态的行为,如改变衣着、活动量或有目的地利用外界能量以减小外环境对机体的刺激[3].常见的适应性行为有增加或减少着装;通过开窗、关窗、使用手摇扇、开电风扇或拉上窗帘等方式来改变局部环境的通风量和气流速度;在感到冷时增加活动强度提高新陈代谢率,感到热时适当休息降低新陈代谢等[4].个体主动的行为调节可以有效地提升人员的舒适性.研究表明,能控制室内环境的人员比那些很少控制室内环境的人员对室内环境更满意,并且对室内环境的控制大大降低了室内人员建筑病态综合征的发生率[5-8].Humphreys等[9]发现,当建筑环境中进行主动调节的机会越多,人们对周围的环境就越容易适应.周翔等[10]通过实验方式发现,当人们对室内环境具有较高的控制能力时,能显著改善受试者的热感觉和热舒适度.

许多研究指出,在非采暖空调环境下,人们会采取多种行为调节方式来改变热交换条件以适应环

**收稿日期:** 2017-03-20
**基金项目:** 国家自然科学基金(51578220);十三五国家重点研发计划项目(2016YFC0700303,2016YFC0700306)
**作者简介:** 何梅玲(1992—),女,硕士研究生;
李念平(1962—),男,教授,博士生导师
**通信作者:** 李念平,linianping@126.com

境[11-14]. 陈慧梅等[15]在广州地区的混合通风建筑中进行调查发现,在夏季,人们会积极采用开窗通风和使用电风扇的方式来改善热舒适状况,开窗通风的受试者比例为 77%,而使用风扇的比例更是高达 97%. Nico 等[16-18]在巴基斯坦的办公建筑进行的调查显示,室内人员对风扇的使用非常普遍. 曹彬[19]的研究表明在室内偏热环境下,开窗通风及使用电风扇增大室内风速等行为,对于人体热感觉有较为明显的改善作用. 翟永超等[20]的研究表明,自由控制落地扇风速的情况下,即使处于高温高湿的环境中,受试者仍能有较好的舒适性. 翟永超等[21]的另外一项研究表明,使用吊扇可以在炎热环境有效地改善人体热舒适以及感知空气品质. 黄莉等[22]研究了高温环境下人体的热舒适性,发现适当地增加风扇的风速可以有效地降低人们的热感觉. Atthajariyakul 等[23]研究了桌面风扇对人体热舒适的作用,其结果表明,当环境温度为 28 ℃时,受试者仍能保持舒适.

本文旨在研究热湿环境下个体主动调节桌面风扇的行为对人体舒适性的影响. 本研究在湖南大学人工环境实验室进行. 通过实验获得了在不同温度时,固定风速和个体主动调节风速两种情况下受试者对室内热环境的主观反应情况及桌面风扇的能耗情况. 可为个人行为调节、建筑节能及热湿气候区提高室内舒适性的研究提供参考.

## 1 实 验

### 1.1 实验环境与受试者

实验在湖南大学建筑节能与绿色建筑研究中心进行. 受试者参与实验图见图 1,图 2 为实验现场示意. 实验室内背景环境参数由另外一套空调系统控制.

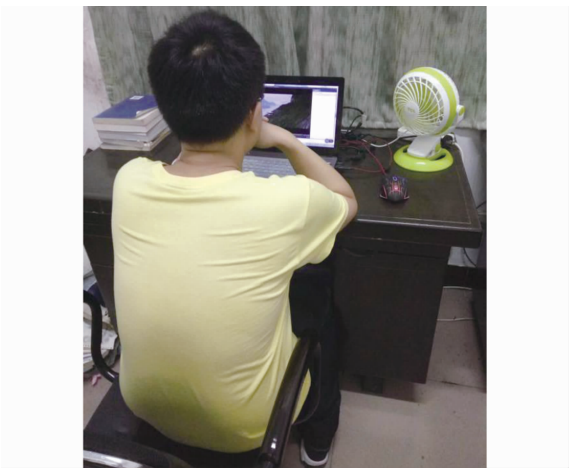


**图 1 实验现场图**

Fig. 1 Experimental site

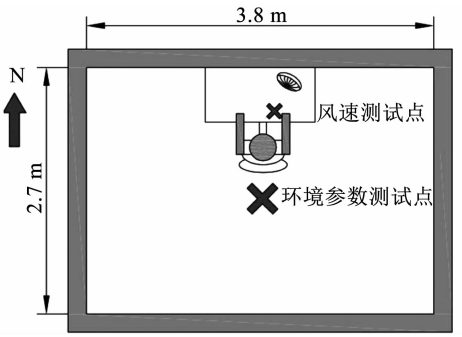



**图 2 实验现场示意**

Fig. 2 Layout of experimental room

室内温湿度采用 TR-72i 温湿度测试仪测量,测量范围为 0 ~ +50 ℃、10% ~95% RH. 采用美国 TSI8347 热式风速仪测定室内风速,测量范围为 0 ~ 20 m/s. 桌面风扇共两档,一档功率为 2 W,二档功率为 3 W.

参与实验的受试者共 24 名,均为大学生,其中男生 12 名,女生 12 名,身高在(165 ±6) cm,体重在(60 ±10) kg. 受试者身体健康,参加实验前未喝含酒精或咖啡因的饮料、服用药品或进行剧烈运动. 受试者的服装为夏季标准着装,上身穿短袖 T 恤、下身穿薄长裤,受试者的服装热阻约为 0.5 clo.

### 1.2 实验工况

实验设定的背景环境温度为 26,28,30 ℃,相对湿度为 80%,风速分为:不开电风扇(0.15 m/s 以内),一档风速(1.6 m/s),二档风速(2.3 m/s),自由控制风速(由受试者自行选择风速档位). 实验共设 12 个工况,见表 1.

**表 1 实验工况**

Tab. 1 Test conditions

| 工况 | 温度/℃ | 湿度/% | 风速/(m·s$^{-1}$) | 电风扇档位 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 26 | 80 | 0.15 以内 | 0 |
| 2 | 26 | 80 | 1.6 | 一档 |
| 3 | 26 | 80 | 2.3 | 二档 |
| 4 | 26 | 80 | 不固定 | 自由选择 |
| 5 | 28 | 80 | 0.15 以内 | 0 |
| 6 | 28 | 80 | 1.6 | 一档 |
| 7 | 28 | 80 | 2.3 | 二档 |
| 8 | 28 | 80 | 不固定 | 自由选择 |
| 9 | 30 | 80 | 0.15 以内 | 0 |
| 10 | 30 | 80 | 1.6 | 一档 |
| 11 | 30 | 80 | 2.3 | 二档 |
| 12 | 30 | 80 | 不固定 | 自由选择 |

受试者到达实验室后,按实验要求整理服装,在进入工作区之前先在背景区静坐 20 min,以减少外界环境对受试者感觉的影响. 同时,在此段时间由实验人员向受试者介绍实验的内容以及实验过程中所

要注意的事项，受试者填写个人信息. 然后受试者进入工作区，按事先安排好的位置坐下开始正式的测试. 在实验过程中受试者可以看书、听音乐、操作电脑或轻声交谈，但谈话不能涉及问卷内容. 受试者进入工作区，立即填写第一份问卷，以后每 10 min 填写一份，每次实验受试者使用桌面风扇 40 min，共填写 5 份答卷. 热感觉投票(TSV)，热舒适(TCV)以及对风速的偏好采用 7 个等级的衡量标准. 投票划分等级见表 2.

**表 2　投票划分**

Tab. 2　Voting table

| 投票值 | 对风速的偏好 | 热感觉 | 热舒适 |
|---|---|---|---|
| -3 | 多降低一点 | 非常冷 | 非常不舒适 |
| -2 | 降低一点 | 冷 | 不舒适 |
| -1 | 稍微降低一点 | 有点冷 | 有点不舒适 |
| 0 | 不变 | 不冷也不热 | 没感觉 |
| 1 | 稍微升高一点 | 有点热 | 有点舒适 |
| 2 | 升高一点 | 热 | 舒适 |
| 3 | 多升高一点 | 非常热 | 非常舒适 |

## 2　实验结果

### 2.1　风速感觉

如表 3 所示，受试者投票分散，任何一个工况，均有部分受试者偏好更高风速或更低风速，这表明不同的人对相同热湿环境中的风速需求存在差异. 随着背景环境温度升高，更多的人偏好更高的风速；而在温度相同时，风速越高，偏好更高风速的受试者越少.

### 2.2　动态热感觉

如图 3 所示，当背景环境温度为 26 ℃、桌面风扇未开启时，受试者热感觉投票值在 +0.4 左右. 桌面风扇处于一档或二档时，热感觉投票值均小于 0，且当风速为二档风时，随着参加实验时间的增加，受试者热感觉投票值小于 -0.6，趋近于有点冷的状态. 当受试者可以主动调节电风扇档位时，随着参加实验时间的增加，受试者逐渐趋近于不冷不热的状态. 当背景环境温度为 26 ℃时，受试者主动调节电风扇档位的工况，热感觉投票值最接近 0.

**表 3　受试者风速期望**

Tab. 3　Vote distribution of wind preference　　%

| 工况 | 26 ℃ | 26 ℃一档风 | 26 ℃二档风 | 28 ℃ | 28 ℃一档风 | 28 ℃二档风 | 30 ℃ | 30 ℃一档风 | 30 ℃二档风 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 多降低一点 | 0 | 0 | 6.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.08 |
| 降低一点 | 2.08 | 20.83 | 27.08 | 2.08 | 4.17 | 25.00 | 4.17 | 6.25 | 10.42 |
| 稍微降低一点 | 4.17 | 43.75 | 43.75 | 8.33 | 35.42 | 45.83 | 0 | 14.58 | 27.08 |
| 不变 | 54.17 | 29.17 | 14.58 | 25.00 | 45.83 | 22.92 | 16.67 | 50.00 | 37.50 |
| 稍微升高一点 | 31.25 | 6.25 | 2.08 | 47.92 | 14.58 | 6.25 | 35.42 | 12.50 | 6.25 |
| 升高一点 | 8.33 | 0 | 6.25 | 16.67 | 0 | 0 | 39.58 | 16.67 | 16.67 |
| 多升高一点 | 0 | 0 | 0 | 8.33 | 0 | 0 | 4.17 | 0 | 0 |

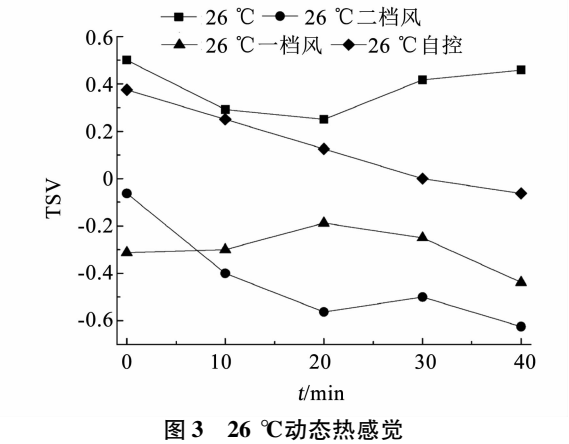



**图 3　26 ℃动态热感觉**

Fig. 3　Dynamic thermal sensation at 26 ℃

如图 4 所示，当背景环境温度为 28 ℃时，不开电扇工况下，受试者热感觉投票值在 +0.6 左右. 受试者在桌面风扇为一档和可以主动控制桌面风扇档位的工况热感觉投票值相近，但受试者主动调节电风扇的工况更加接近于不冷不热的状态. 二档风的工况下，受试者随着时间的增加，热感觉投票值小于 0. 当背景环境温度为 28 ℃时，受试者主动调节风扇档位能使其热感觉最接近中性.

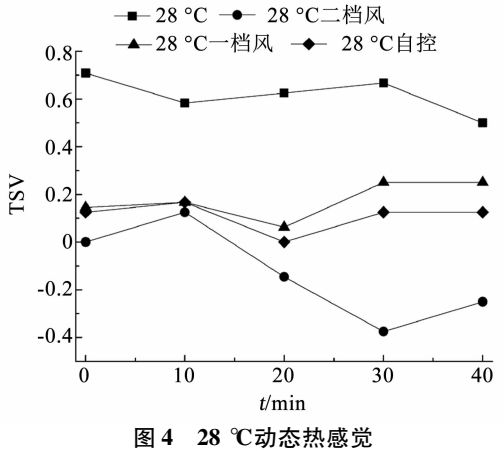



**图 4　28 ℃动态热感觉**

Fig. 4　Dynamic thermal sensation at 28 ℃

如图 5 所示，当背景环境温度为 30 ℃时，背景环境温度已经超出人体舒适温度范围. 不开电扇工

况下,受试者热感觉投票值超过了+1,热感明显.一档风工况热感觉投票值优于不开电扇的状况,但也在+0.8左右,超出ASHRAE规范中90%可接受范围[24].二档风和受试者主动控制电风扇档位的工况热感觉投票值相近,但随着受试者参与实验时间的增加,主动调节电风扇的工况受试者总体热感觉稳定在+0.5左右.当背景环境温度为30 ℃时,虽不能使受试者处于舒适状态,但相比于其他工况,受试者主动调节电风扇档位的工况,热感觉更接近中性.

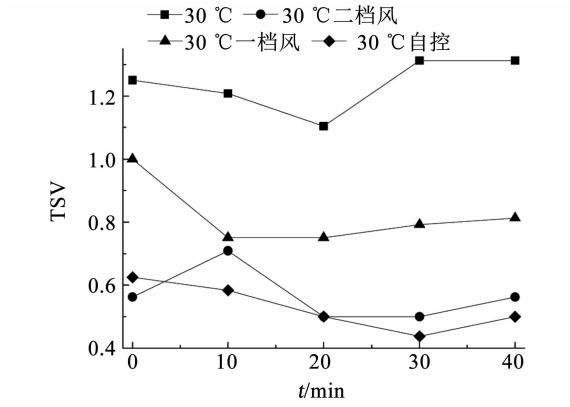



**图5　30 ℃动态热感觉**

Fig. 5　Dynamic thermal sensation at 30 ℃

综上,在热湿环境中,受试者主动调节电风扇的行为使其热感觉更接近中性.

### 2.3　动态热舒适

如图6所示,当背景环境温度为26 ℃时,受试者主动调节电风扇档位的工况,舒适性最佳,不开电扇工况和一档风工况次之,二档风工况舒适性最差.背景环境温度为26 ℃时,二档风工况下,超过70%受试者偏好更低的风速,表明风速过大导致不适.

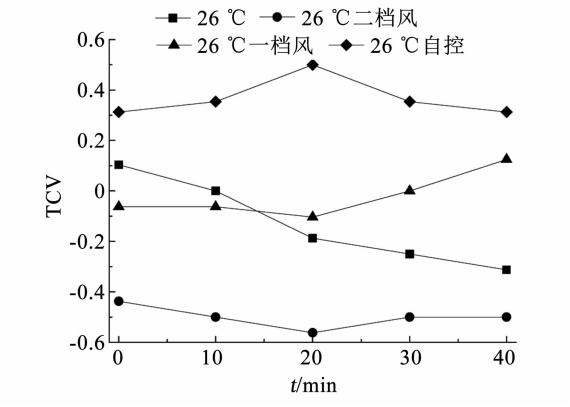



**图6　26 ℃动态热舒适**

Fig. 6　Dynamic thermal comfort at 26 ℃

如图7所示,当背景环境温度为28 ℃时,受试者能主动调节电风扇档位时,舒适程度最高,随着参与实验时间的增加,受试者的热舒适投票值超过+0.8,一档风工况和二档风工况次之,不开电扇工况舒适性最差,处于不舒适的一侧.

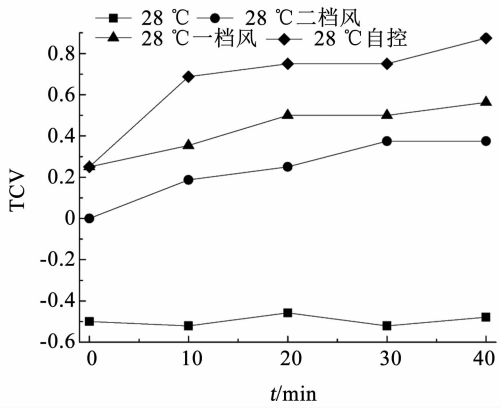



**图7　28 ℃动态热舒适**

Fig. 7　Dynamic thermal comfort at 28 ℃

如图8所示,当背景环境温度为30 ℃时,背景环境温度已经超出人体舒适温度范围,受试者舒适性的投票值均小于0.同等温度下,受试者主动调节电风扇档位的工况,舒适性相对较佳,一档风工况和二档风工况次之,不开电扇工况舒适性最差.

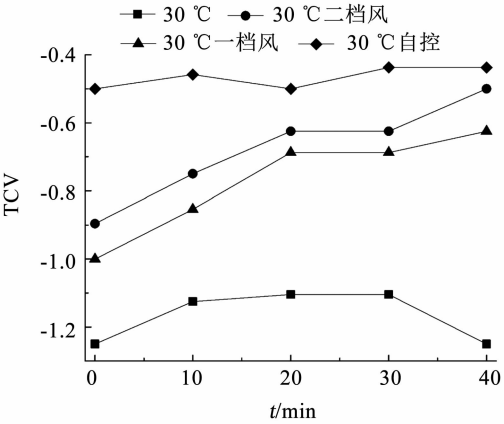



**图8　30 ℃动态热舒适**

Fig. 8　Dynamic thermal comfort at 30 ℃

综上,受试者主动调节桌面风扇档位的行为有效地提高其热舒适性.

### 2.4　稳态热感觉

当开始使用风扇20 min后,受试者的热感觉基本稳定,取最后3份问卷的平均作为稳定期的数据.实验组和对照组进入稳定期后,对其数据进行分析,如图9所示,不管受试者处于何种温度的背景环境中,当受试者主动调节电风扇档位时,受试者的热感觉最接近于不冷不热的状态.

当背景温度为26 ℃时,受试者主动调节电风扇档位的行为,使得个体主动调节电风扇工况和一档风以及二档风工况下的热感觉产生了极显著差异(配对T检验,$P<0.01$),个体主动调节电风扇工况和无风工况下的热感觉产生了显著差异($P<0.05$).

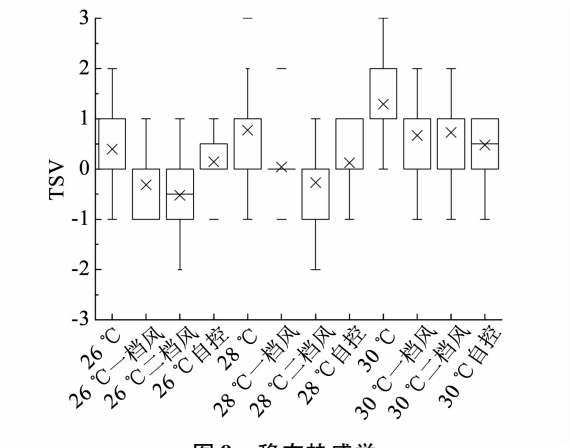



**图 9　稳态热感觉**

Fig. 9　Steady-state overall thermal sensation

当背景温度为 28 ℃时，受试者主动调节电风扇档位的行为，使得个体主动调节电风扇工况和无风工况下的热感觉产生了极显著差异（$P<0.01$），个体主动调节电风扇工况和二档风工况下的热感觉产生了显著差异（$P<0.05$）. 而与一档风工况进行对比，虽然个体主动调节电风扇工况能改善热感觉，但未产生显著性差异（$P>0.05$）.

当背景温度为 30 ℃时，受试者主动调节电风扇档位的行为，使得个体主动调节电风扇工况和无风工况下的热感觉产生了极显著差异（$P<0.01$），个体主动调节电风扇工况和一档工况下的热感觉产生了显著差异（$P<0.05$）. 而与二档风工况进行对比，虽然个体主动调节电风扇工况能改善热感觉，但未产生显著性差异（$P>0.05$）.

## 2.5　稳态热舒适

如图 10 所示，当背景温度为 26 ℃时，受试者主动调节电风扇档位的行为，使得个体主动调节电风扇工况和二档风工况下的舒适性产生了极显著差异（配对 T 检验，$P<0.01$），个体主动调节电风扇工况和无风工况以及一档风工况下的舒适性产生了显著差异（$P<0.05$）.

当背景温度为 28 ℃时，受试者主动调节电风扇档位的行为，使得个体主动调节电风扇工况和无风工况下的舒适性产生了极显著差异（$P<0.01$），个体主动调节电风扇工况和二档风工况下的舒适性产生了显著差异（$P<0.05$）. 而与一档风工况进行对比，虽然个体主动调节电风扇工况能改善热感觉，但未产生显著性差异（$P>0.05$）.

当背景温度为 30 ℃时，受试者主动调节电风扇档位的行为，使得个体主动调节电风扇工况和无风以及一档风工况下的舒适性产生了极显著差异（$P<0.01$），个体主动调节电风扇工况和二档工况下的舒适性产生了显著差异（$P<0.05$）.

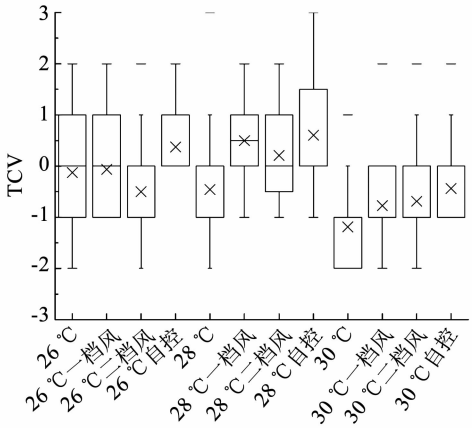



**图 10　稳态热舒适**

Fig. 10　Steady-state overall thermal comfort

## 2.6　能耗分析

各工况风速的选择如表 4 所示. 以背景环境温度 28 ℃为例，统计每个工况下，受试者所选择的风扇风速的人数. 工况 5，桌面风扇不启动，功率为 0 W. 工况 6，受试者风速为给定值，均为一档风，受试者平均电风扇电功率为 2 W. 工况 7，桌面风扇均为二档，相应电功率为 3 W. 工况 8，受试者可以主动调节电风扇风速，其中选择关闭电风扇的有 17 人，一档风速的有 24 人，二档风速的有 7 人，受试者平均电风扇电功率为 1.44 W. 各工况下，人均电风扇功率如表 5 所示. 结合 2.5 和 2.6 节中的结果可知，受试者可以自由控制风扇时能耗较低，其热感觉最接近中性，且舒适程度最高. 因此，主动控制不仅能提高人体舒适性，也具有节能潜力.

**表 4　各工况风速选择分布**

Tab. 4　Distribution of wind speed in each condition

| 风速 | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 | 工况 4 | 工况 5 | 工况 6 | 工况 7 | 工况 8 | 工况 9 | 工况 10 | 工况 11 | 工况 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 电风扇关闭（风速 <0.15 m/s） | 48 | 0 | 0 | 31 | 48 | 0 | 0 | 17 | 48 | 0 | 0 | 11 |
| 一档风（风速 1.6 m/s） | 0 | 48 | 0 | 14 | 0 | 48 | 0 | 24 | 0 | 48 | 0 | 23 |
| 二档风（风速 2.3 m/s） | 0 | 0 | 48 | 3 | 0 | 0 | 48 | 7 | 0 | 0 | 48 | 14 |

表 5 各工况人均电风扇功率

Tab. 5 Average fan power per person under each condition

| 工况 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 人均电功率/W | 0 | 2 | 3 | 0.771 | 0 | 2 | 3 | 1.438 | 0 | 2 | 3 | 1.833 |

## 3 讨 论

### 3.1 与 ASHRAE 规范比较

本文研究的内容为热湿工况下,受试者调节桌面风扇对其的舒适性影响,对比 ASHRAE 规范[24],规范中表明,当人们处于相对湿度为 80% 的环境中时,受试者已处于不舒适状态. 本文所研究的温度为 26、28 及 30 ℃,表明在热湿工况下,受试者通过调节桌面风扇的行为,仍能让自己处于相对较为舒适的状态. ASHRAE 规范中表明,适当地提高风速可以有效降低人的热感觉,但其最高风速一般不超过 0.8 m/s. 本文的最高风速达 2.3 m/s,超过了 ASHRAE 规范的舒适风速范围,其主要原因在于本研究中的桌面风扇产生的是局部风速,而 ASHRAE 规范中所规定的风速为室内环境的整体风速. 本文中对局部风速的研究为未来相关规范增加局部风速对舒适性影响的相关条文制定提供了参考.

### 3.2 与之前的研究比较

对比已有的研究,本文研究表明,个人主动调节的行为可以有效地提高人体的热舒适性,本文实验研究的结果与其结论相一致. 为了进一步说明在热湿环境中个人主动调节桌面风扇对提高热舒适和节能性的效果,将本文的研究与之前的一些研究进行比较. 本文的实验结果表明,当温度为 30 ℃、风速为 2.3 m/s 时,受试者的舒适性较好. 而加州伯克利的学者对落地扇[20]及吊扇[21]进行了热舒适性研究,发现当温度为 30 ℃、风速为 1.2 ~ 1.8 m/s 时,可以让受试者处于舒适状态. 本实验的研究与这些研究结果存在一定差异,该差异主要是由电扇种类的差异产生. 落地扇及吊扇设备体积更大,相比本文采用的小型桌面风扇,其产生的气流范围更大,对人体的冷却效果更好.

与其他使用桌面风扇的研究相比,本文的研究结果也存在一定差异. 王莉等[22]研究了桌面风扇在高温环境下对人体热舒适的影响,发现 30 ℃的环境中,当风速为 2.0 m/s 时,受试者的热感觉处于中性状态. 本文在相同温度下,需要更高的风速才能达到相似的热感觉水平,其主要原因为,本研究中环境相对湿度为 80%,而王莉等的研究中环境相对湿度为 50%,更高湿度的环境中人员会感觉更热,因此需要更高的风速降低热感. Atthajariyakul 等[23]对桌面风扇的研究中受试者保持了较高的舒适性,然而其实验空气温度最高为 28 ℃,而本文的最高温度为 30 ℃. 另外,加州伯克利张慧等[20]研究的落地扇当风速为 1.6 m/s 时,功率为 11 W,而本实验的风扇在二档时,即风速为 2.3 m/s 时,功率为3 W. 因此,本研究所采用的桌面风扇在节能方面具有一定的优势.

## 4 结 论

1)相同温湿度环境中,受试者对风速的偏好存在差异.

2)热湿环境下,使用桌面风扇能有效降低人体的炎热感觉并提高舒适性.

3)相比被动接受固定风速的情况,能自由控制风速时,受试者的热感觉更接近中性,舒适程度更高.

4)个体主动调节行为在改善人体舒适性的同时,可以有效地节约能源.

## 5 局限性与建议

本文的研究表明,桌面风扇在热湿环境下可以有效地提高人们舒适性,但此研究依然存在以下问题:

1)本文的风扇为非无极调节风扇,只能提供两个固定风速的档位,受试者在自由选择风扇档位的工况中,具有一定的局限性. 未来关于人们自由控制风扇风速对人体舒适性影响的研究应考虑提供连续性风速.

2)本文只研究了高湿(相对湿度 80%)工况下个体调节风扇对受试者舒适性的影响,未来的研究应增加不同湿度下的研究.

3)本文在温度上的设定只到了 30 ℃,没有研究更高温度下人员舒适性的情况,不能确定个体主动调节风扇行为是否能进一步扩展舒适温度上限.

4)本研究的对象只是 24 名学生,样本的类型和数目都非常有限,部分结论(如主动调节会带来节能)尚需更多的研究予以证实.

## 参考文献

[1] 罗明智, 李百战, 郑洁. 人体热适应性与热舒适[J]. 制冷与空调, 2005(1): 75 - 78.
LUO Mingzhi, LI Baizhan, ZHENG Jie. Human body's thermal adaptation and thermal comfort [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2005(1): 75 - 78.

[2]李俊鸽. 夏热冬冷地区人体热舒适的气候适应模型研究[D].

西安：西安建筑科技大学，2006.
LI Junge. Adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter zone [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.

[3] 刘红，郑文茜，李百战，等. 夏热冬冷地区非采暖空调建筑室内热环境行为适应性[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2011，42(6)：1805－1812.
LIU Hong, ZHENG Wenqian, LI Baizhan, et al. Behavioural adaptation of indoor thermal environment in hot-summer and cold-winter zone [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(6): 1805－1812.

[4] 李百战. 可持续发展的绿色建筑环境与设备概论[M]. 罗庆，译. 重庆：重庆大学出版社，2009：55－59.
LI Baizhan. Sustainable development of green building environment and equipment[M]. LUO Qing, translate. Chongqing: Chongqing University Press, 2009: 55－59.

[5] HE Y, LI N, PENG J, et al. Field study on adaptive comfort in air conditioned dormitories of university with hot-humid climate in summer[J]. Energy & Buildings, 2016, 119:1－12. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.020.

[6] LEAMAN A, BORDASS B. Productivity in buildings: the 'killer' variables[J]. Building Research & Information, 2010,1(1):4－19.

[7] PACIUK M. The role of personal control of the environment in thermalcomfortand satisfaction at the workplace [D]. Wisconsin Milwaukee: University of Wisconsin Milwaukee,1989.

[8] ROULET C A, JOHNER N, FORADINI F,et al. Percieved health and comfort in relation to energy use and building characteristics [J]. Building Research and Information, 2006, 34(5):467－74. DOI:10.1080/09613210600822279.

[9] HUMPHREYS M A, NICOL J F. Understanding the adaptive approach to thermal comfort[J]. ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 991－1004.

[10] 周翔，朱颖心，欧阳沁，等. 环境控制能力对人体热感觉影响的实验研究[J]. 建筑科学，2010 (10)：177－180.
ZHOU Xiang, ZHU Yingxin, OUYANG Qin, et al. Experimental study on the effect of environmental control on human thermal sensation[J]. Building Science, 2010 (10): 177－180.

[11] TOFTUM J. Central automatic controlordistributed occupant control for better indoor environment quality in the future, building and environment[J]. Building and Environment, 2010,45: 8－23. DOI. org/10.1016/j.buildenv.2009.03.011.

[12] BAHAI A S, JAMES P A B. Urban energy generation: the added value of photovoltaics in social housing [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11:2121－2136. DOI. org/10.1016/j.rser.2006.03.007.

[13] ANDERSEN R. The influence of occupants' behaviour on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments [C]//Proceedings of Healthy Buildings. Brisbane, Australia,2012.

[14] 李楠. 夏热冬冷地区人员行为对住宅建筑能耗的影响研究[D]. 重庆：重庆大学，2011.
LI Nan. Impacts of human behavior on energy consumption of residential buildings in China's hot summer and cold winter zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

[15] 陈慧梅，张宇峰，王进勇，等. 我国湿热地区自然通风建筑夏季热舒适研究——以广州为例[J]. 暖通空调，2010，40(2)：96－101.
CHEN Huimei, ZHANG Yufeng, WANG Jinyong, et al. Thermal comfort in naturally ventilated buildings in hot-humid area of China in summer: An example study of Guangzhou [J]. Journal of HV&AC, 2010, 40(2): 96－101.

[16] NOCOL J F, RAJA I A, ALLAUDIN A, et al. Climatic variations in comfort temperature: The Pakistan projects [J]. Energy and Buildings, 1999, 30(3): 261－279. DOI. org/10.1016/S0378－7788(99)00011－0.

[17] HUMPHREYS M A. An adaptive approach to the thermal comfort of office workers in North West Pakistan [J]. Renewable Energy, 1994, 5(5－8): 985－992. DOI. org/10.1016/0960－1481(94)90121－X.

[18] NOCOL J F, JAMY G N, SYKES O, et al. A survey of comfort temperatures in Pakistan: Towards new indoor temperature standards [D]. Oxford: Oxford Brookes University, 1994.

[19] 曹彬. 气候与建筑环境对人体热适应性的影响研究[D]. 北京：清华大学，2012.
CAO Bin. Research on the impacts of climate and built Environment on human thermal adaptation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.

[20] ZHAI Y, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Comfort under personally controlled air movement in warm and humid environments [J]. Building & Environment, 2013, 65(88):109－117. DOI. org/10.1016/j.buildenv.2013.03.022.

[21] ZHAI Y, ZHANG Y, ZHANG H, et al. Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans[J]. Building & Environment, 2015, 90:178－185. DOI. org/10.1016/j.buildenv.2015.04.003.

[22] HUANG L, OUYANG Q, ZHU Y, et al. A study about the demand for air movement in warm environment [J]. Building & Environment, 2013, 61 (61): 27－33. DOI. org/10.1016/j.buildenv.2012.12.002.

[23] ATTHAJARIYAKUL S, LERTSATITTANAKOM C. Small fan assisted air conditioner for thermal comfort and energy saving in Thailand[J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(10): 2499－2504. DOI. org/10.1016/j.enconman.2008.05.028.

[24] ASHRAE. ASHRAE Standard 55－2010: Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: ASHRAE, 2010.

（编辑　刘　彤）