

夏季温度漂移环境下的人体热舒适研究

马晓慧¹, 童力^{1,*}, 李志权¹, 胡松涛¹, 张忠林², 许哲文², 冯海涛²

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛国际机场集团有限公司, 青岛 266317)

摘要: 长期处于稳态热环境会削弱人体的热适应能力, 影响人体热舒适, 并且空调系统的长期运行也会造成能源过度消耗。研究显示, 允许室内环境温度适当地变化可以改善上述问题。通过控制空调的间歇启停, 结合主观热评价、额头温度、耳温以及平均皮肤温度的变化, 探究了短暂温度漂移下的人体热反应, 并且分析了额头温度与热舒适投票之间的相关关系。结论如下: 存在温度漂移的夏季空调环境, 可以提高人体对偏热环境的接受度; 适当范围内的温度漂移可以提高人体热舒适, 为室内空调系统的动态调节提供了新的研究思路; 温度漂移热环境中, 人体额头温度与热舒适显著相关, 其可以作为表征动态环境热舒适的重要指标之一。

关键词: 动态热环境; 温度漂移; 热舒适; 额头温度; 平均皮肤温度

中图分类号: TU831 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2024)02-0133-07

Study of human thermal comfort in summer temperature drift environment

MA Xiaohui¹, TONG Li^{1,*}, LI Zhiquan¹, HU Songtao¹, ZHANG Zhonglin²,
XU Zhewen², FENG Haitao²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Qingdao International Airport Group, Qingdao 266317, China)

Abstract: Long-term exposure to a steady-state thermal environment can weaken humans' thermal adaptation capacity and affect human's thermal comfort. In addition, prolonged operation of air conditioning systems can also result in excessive energy consumption. Studies have shown that allowing appropriate variations in indoor ambient temperature can solve the above problems. Combining the changes of subjective thermal evaluation, forehead temperature, ear temperature and mean skin temperature, this study explored the human thermal response under transient temperature drift by controlling the intermittent start-stop of the air conditioner. And the correlation between forehead temperature and thermal comfort voting was analyzed. The results showed that a summer air-conditioned environment with temperature drift can improve humans' acceptance of a partially hot environment. Temperature drift in the appropriate range can improve humans' thermal comfort, which provides a new idea for the dynamic regulation of indoor air-conditioning systems. In temperature drift ther-

收稿日期: 2023-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108080)

作者简介: 马晓慧(1998-), 女, 山东滨州人。硕士, 研究方向为人体热舒适及室内热环境。E-mail: 1907781023@qq.com。

* 通信作者: 童力(1981-), 女, 宁夏石嘴山人。博士, 副教授, 主要从事人体热舒适、室内热环境与空气质量研究。

E-mail: tongli0220@163.com。

mal environments, humans' forehead temperature is significantly correlated with thermal comfort. The forehead temperature can be used as one of the important indicators to characterize the dynamic environmental thermal comfort.

Key words: dynamic thermal environment; temperature drift; thermal comfort; forehead temperature; mean skin temperature

随着时代的发展,人们对物质生活的要求逐渐提高,所以对室内生活环境的要求也更加严格。在以往对室内热舒适的研究中,大多数学者普遍关注于如何利用技术手段来营造一个温湿度可控并稳定的舒适热环境^[1]。然而随着对稳态热舒适理论不断探索,人们发现环境参数恒定的热环境会削弱人对热环境的适应能力^[2],导致一些心理及生理的不适反应^[3]。

1998年BRAGER等提出了自适应模型^[4],基于此模型,人们发现了热环境中受试者的适应性调整^[5]。这证实了人在热环境中的生理参数是动态变化的,长久的稳态环境可能会削弱人的热适应性,影响人体热舒适。比如在冬季,长期处于稳定供暖温度下的人群明显更加不耐寒^[6],同样在夏季,呆惯了空调制冷环境,人们就不单单只满足于自然通风环境,更不耐热^[7]。相关研究显示^[8],相较于不经常使用空调的人,习惯呆在空调环境的人群更易产生影响神经系统、消化系统、呼吸系统的不良反应^[9]。并且,长期处于空调环境的人群,严重的可能会产生病态建筑综合征(Sick Building Syndrome, SBS)^[10]。这些均说明长期处于稳定热环境中,缺乏适当的冷热刺激,人们的热适应能力减弱,对热环境的耐受能力减弱,从而增加了热应激对其生理调节造成不适的风险负担。而且追求高舒适性就会带来建筑能耗的增加,并不利于社会资源的节约^[11]。

动态热环境的温度变化方式大致可以分为以下4种,温度突变(Temperature Step)、温度周期性变化(Temperature Cyclical)、温度斜坡(Temperature Ramp)和温度漂移(Temperature Drift)^[12]。其中温度斜坡指的是温度在主动控制下的逐渐变化;温度漂移是指温度被动的变化,如室内空调启停或自然通风下产生的温度逐渐变化^[13]。

动态热环境的研究正在逐渐发展,其具有兼顾人体热舒适与节约建筑能耗两方面的优势。温度漂移环境作为动态热环境的一种,也受到了学者的广泛关注。如SCHELLEN等^[14]分析了年轻人和老年人在适度温度漂移下热舒适性、生产力等方面的差异,研究发现PMV(Predicted Mean Vote)模型能够预测年轻人对适度温度漂移的热感觉,但不适用于老年人。同时,适度温度漂移下,不会影响青年人的生产力。IVANOVA等^[15]通过测量16名健康男性在17~25℃温度漂移范围下的主观热反应、心血管参数以及代谢水平,发现适度的温度漂移变化显著影响人体体温调节和心血管能力,同时提高了人体代谢能力。王友群^[16]通过研究夏季室内温度渐变条件下人体焓损失速率的变化规律,发现了室内温度变化率较小时,人体焓损失时速率变化较小,不会引起室内人员的不适。因此,本文将通过营造人工环境中空调系统关闭时所产生的温度漂移,进一步探究合理的温度刺激对人体主观热投票及生理热反应的影响,同时在此基础上为空调系统的节能运行提供理论基础。

1 实验与研究方法

1.1 研究对象

本实验共计招募受试者16名,其中男女各8名。受试者均为在校大学生,年龄23~26岁,均体型适中。受试者在实验开始前一天需保证充足睡眠,且保持规律的饮食。所有参与实验的受试者在了解实验内容后签署了实验知情同意书。受试者在实验过程中保持静坐,统一服装,穿着为短袖衬衫、薄长裤等。

1.2 实验环境设置

实验在人工气候室中进行,人工气候室装有温湿度独立控制系统。人工气候室由等候室和实验小室两部分组成,2个房间的空调系统可以独立运行。等候室的尺寸为(长×宽×高)2 m×3 m×2.6 m,实验小室的尺寸为(长×宽×高)4 m×3 m×2.6 m,如图1所示。气候室内的天花板和四周墙壁均采用了外层隔音钢板+内层波峰吸音棉的结构,可以更好地保温隔热。

本实验旨在探究夏季室内环境中温度漂移变化对人体热舒适的影响,故实验将利用实验小室内空调的间歇启停,营造存在温度漂移的动态热环境。由于小室的密闭性和保温效果较好,将小室的门打开,辅助模拟实际建筑中因空调关闭而导致的室内气温升高。实验全过程中等候室的温度维持在与夏季室外平均气温相似的温度(约 35 °C)。

实验初始稳定温度选择为 22、25、28 °C。实验全程的温湿度由温湿度自记录仪监测,根据文献[17]中的推荐测量方法,将仪器放置在受试者附近垂直高度 0.8、1.2 m 处。室内环境温湿度的数据将每间隔 1 min 记录一次。使用热线风速仪测量空气流速。实验期间,室内相对湿度控制在 50%~60%,在此范围内,相对湿度不影响人体热舒适度。空气流速 < 0.1 m/s。实验所用仪器详情如表 1 所示。

1.3 热投票与生理参数

实验中,受试者除了需要填写主观问卷,还需要监测身体各部位的皮肤温度变化。需要填写的主观问卷内容包括:受试者基本信息、热舒适投票(Thermal Comfort Vote, TCV)、热感觉投票(Thermal Sensation Vote, TSV)、热偏好投票(Thermal Preference Vote, TPV)。各项热投票的评分标准均参考 ASHRAE 7 级标度评分方法[17],分值范围为[-3,3]。各项热投票的评分标尺如表 2 所示。

关于人体核心温度的测定,主要是通过对人体中耳、食道及直肠温度的测量来确定核心温度[18]。本实验采取耳道温度作为人体核心温度,使用耳温枪(Braun IRT6520,德国)测量受试者耳温。受试者皮肤温度的测量使用的是一种纽扣式温湿度数据储存器(iButton DS1923,美国)。使用无纺布贴将其分别固定在受试者的额头、前胸(偏左)、后背(偏左)、腹部(偏左)、右上臂、左下臂、右大腿、右小腿、右手背、右脚踝。不同身体部位的相对表面积决定了相应部位的权重系数。实验中受试者平均皮肤温度(Mean Skin Temperature, MST)的计算公式如下[19]:

$$T_{MST} = 0.07T_{右脚踝} + 0.13T_{右小腿} + 0.19T_{右大腿} + 0.12T_{左腹部} + 0.12T_{左前胸} + 0.12T_{左后背} + 0.06T_{左下臂} + 0.08T_{右上臂} + 0.05T_{右手背} + 0.06T_{额头} \quad (1)$$

1.4 实验流程

实验于 7 月底到 8 月中旬进行,实验地点为中国青岛市。每 2 个受试者组成 1 组,共 8 组。每组受试者的不同工况均间隔 24 h 以上进行。受试者在等候室完成各种佩戴式监测仪器(仪器与冬季实验相同)的穿戴后,进入实验小室开始实验。实验小室空调提前开启,达到稳定温度(22、25、28 °C)。实验流程如图 2 所示。

受试者在实验期间保持静坐,

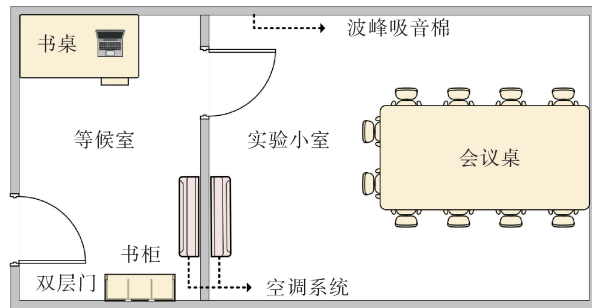


图 1 人工气候室示意

表 1 环境参数测量仪器详情

参数	仪器	测量范围	测量精度
室内空气温度/°C	天建华仪 WSZY-1	0~±50	±0.1
室内相对湿度/%RH	天建华仪 WSZY-1	10~90	±0.1
室内空气流速/(m·s ⁻¹)	Model 6004	0.1~20.0	±0.1

表 2 热投票评分详情

评分标尺	热舒适投票	热感觉投票	热偏好投票
-3	非常不舒适	冷	变冷
-2	不舒适	凉	变凉
-1	稍不舒适	稍凉	稍变凉
0	无感觉	不冷不热	不变
1	稍舒适	稍暖	稍变暖
2	舒适	暖	变暖
3	非常舒适	热	变热

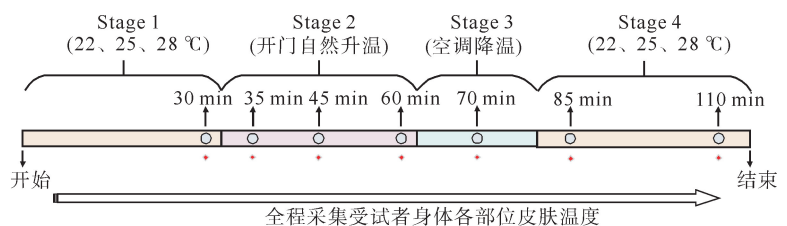


图 2 夏季温度漂移实验流程

• 填写主观热投票问卷、测量耳温

在进入实验小室之后的第30分钟,进行第1次问卷填写以及耳温的测量;然后进入实验的温度漂移阶段(自然升温阶段),关停空调,打开小室门辅助模拟自然升温,在第35、45、60分钟填写主观问卷以及耳温的测量;随后关闭小室门开启空调(降温阶段),快速降温到初始稳定温度。为了更详细地了解实验全程中受试者的热反应状态,在降温阶段的第10分钟追加一次问卷填写以及测量耳温。温度稳定后,在实验开始后的第85、110分钟后分别进行主观问卷的填写和测量耳温。

2 实验数据处理与分析

2.1 实验小室环境温度的变化

夏季实验全程的实验小室温度变化如图3所示。22℃升温工况实验的初始稳定温度控制在 (22.46 ± 0.21) ℃,升温后回到的稳定温度控制在 (22.59 ± 0.20) ℃;25℃升温工况实验的初始稳定温度控制在 (25.27 ± 0.17) ℃,升温后回到的稳定温度控制在 (25.25 ± 0.31) ℃;28℃升温工况实验的初始稳定温度控制在 (28.19 ± 0.24) ℃,升温后回到的稳定温度控制在 (28.22 ± 0.23) ℃。

2.2 主观热评价投票结果与分析

主观热评价是人体对所处环境舒适性的心理反应^[20]。由图4可见,在温度漂移阶段,25℃工况和28℃工况的TCV因室内温度的升高而降低,而22℃工况的TCV则随着温度的升高而升高。并且此阶段下,22℃工况的TCV变化速率最大,25℃工况次之,28℃工况的TCV变化速率最小。由此可见,温度漂移阶段的小室温度变化速率越大,受试者的TCV变化率就越大。因此,温度漂移的变化速率会影响TCV变化速率的大小,但不影响其变化方向。

同时,在实验开始后的第35分钟,对比各工况下此时小室温度与初始稳定温度的差值,尽管22℃工况的温差最大,但此时受试者却越来越舒适。所以,温度对TCV的影响远远大于温度变化温差对TCV的影响。

图4中显示,对比处于初始稳定温度阶段与重回稳定温度阶段时受试者热舒适投票的均值,28℃升温工况下,受试者的TCV有所升高,但其他2个工况的TCV却降低了。由此可见,夏季中性及偏冷温度下,室内环境存在温度漂移对人体热舒适没有积极作用,而夏季偏暖环境下进行温度漂移的效果明显,此时受试者对同一环境温度感受更舒适。

在22、28℃升温工况中,经历温度漂移后重回稳定温度后第5分钟与第30分钟时,受试者的TCV没有多大变化,仍旧偏离初始稳定阶段时的TCV值。这说明偏离舒适区的环境温度(22、28℃)工况下,温度漂移热经历给人体热舒适带来的影响时效要大于30min。而处于舒适环境温度(25℃)下,受试者TCV值在重回稳定温度后第30分钟时已回升至与初始值相近大小。

图5显示,各工况下,受试者的TSV变化趋势与环境温度变化一致。在各工况的自然升温(温度漂移)阶段,最初5min的TSV变化速率最大,并且22℃工况下,受试者的TSV变化速率最大,25℃工况次之,28℃工况最小。由此可见,TSV变化速率与环境过渡温度的变化速率有关。

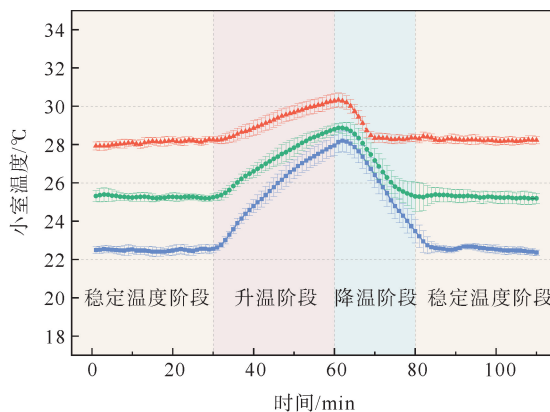


图3 实验中小室的温度变化

— 22℃升温工况; - - 25℃升温工况; - · - 28℃升温工况

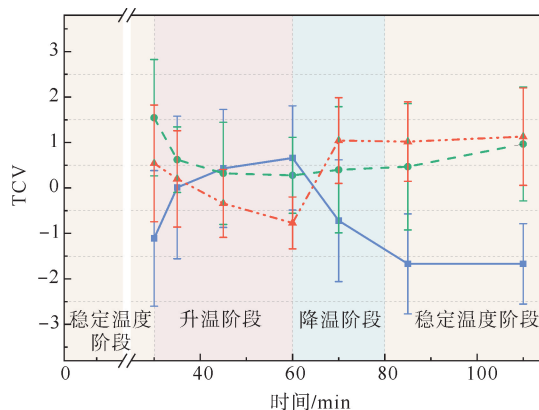


图4 实验中热舒适投票的变化

— 22℃升温工况; - - 25℃升温工况; - · - 28℃升温工况

进入开启空调制冷的降温阶段时,各工况下受试者的 TSV 值均下降明显。可见经历过升温过程后,受试者明显对空调制冷导致的温度降低更加敏感。在偏离舒适区温度(22、28 °C)工况下,受试者经历温度漂移之后的 TSV 与初始稳定温度阶段时 TSV 的对比差异较大,夏季偏冷温度环境尤其明显。

结合图 5、图 6 可知,在经历夏季室内空调环境的温度漂移后,受试者对初始环境温度更加冷敏感,并且受试者对偏热环境的接受度和适应能力有所改善,对夏季制冷的需求降低,使夏季室内空调温度设置的上限值得以提高。研究显示^[21]:夏季空调温度自 26 °C,设置温度每提高 1 °C,理论可节能约 18.7%;提高至 28 °C,节能率可至 35.3%。根据夏季实验的结果,可利用温度漂移,将夏季室内空调的温度值设定在 28 °C,以达到空调整节能的目的。

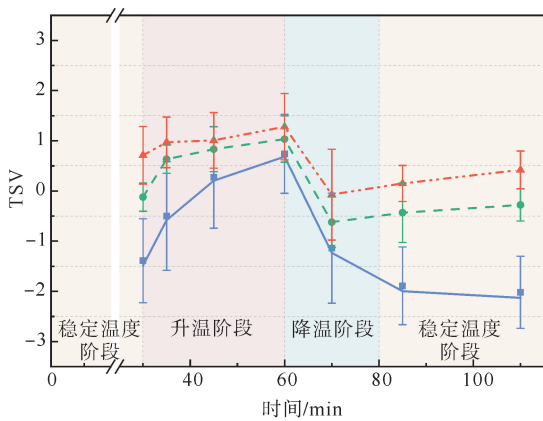


图 5 实验中热感觉投票的变化

— 22 °C 升温工况; —●— 25 °C 升温工况; —▲— 28 °C 升温工况

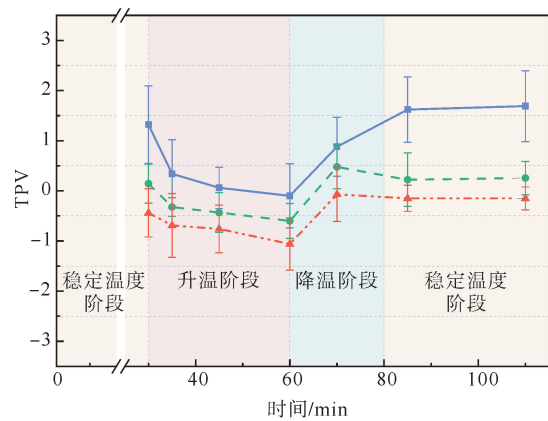


图 6 实验中热偏好投票的变化

— 22 °C 升温工况; —●— 25 °C 升温工况; —▲— 28 °C 升温工况

2.3 耳温、皮肤温度结果与分析

人体核心温度一般是指人体胸腔、腹腔以及中枢神经的温度,即人体身体内部的温度,也就是常说的体温^[22]。为了维持正常的生理活动,人体核心温度的变化是相对稳定的,一般维持在 36.5~37 °C。如图 7、图 8 所示,在环境温度变化时,受试者的核心温度(耳温)变化幅度较小,但额头温度受环境温度影响变化明显,且额头温度的变化趋势与核心温度(耳温)的变化趋势相似。

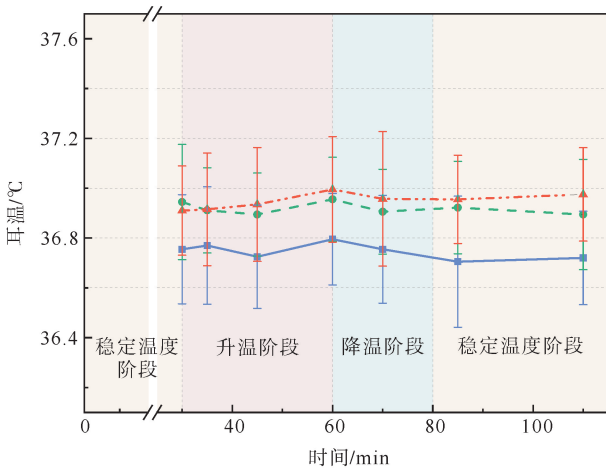


图 7 实验中耳温的变化

— 22 °C 升温工况; —●— 25 °C 升温工况; —▲— 28 °C 升温工况

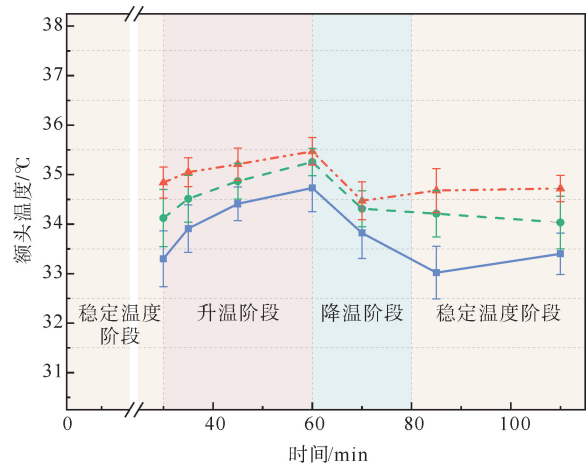


图 8 实验中额头温度的变化

— 22 °C 升温工况; —●— 25 °C 升温工况; —▲— 28 °C 升温工况

如图 9 所示,实验过程中受试者的平均皮肤温度(MST)随着环境温度的变化而变化。经历温度漂移后,受试者重回到初始温度环境,其平均皮肤温度略有升高。此时人与环境间热交换提高,散热量增加,人体对夏季室内热环境的温度接受度提高。

2.4 热舒适投票与额头温度的相关性分析

通过 Pearson 相关系数法,将实验中取得的受试者耳温、额头温度以及平均皮肤温度的数据分别与 TSV、TCV 数据进行相关性分析,结果如表 3 所示。存在温度漂移的夏季热环境中,受试者的额头温度与热舒适相关系数最高,相关性尤其显著。

取不同舒适范围内额头温度的数据均值拟合曲线,结果如图 10 所示,额头温度与 TCV 显著相关,拟合曲线为非线性的多项式。当处于热不舒适范围内时,随着不适感的增强,人体的额头温度逐渐降低;在受试者稍舒适时,额头温度最高,约 34.8 °C;之后随着 TCV 的增高,受试者的额头温度又有所降低。

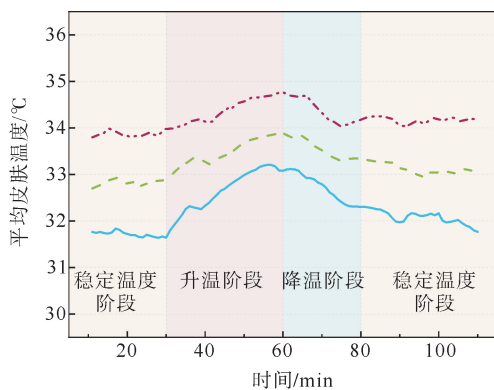


图9 实验中平均皮肤温度的变化

— 22 °C 升温工况; - - 25 °C 升温工况; ··· 28 °C 升温工况

表3 相关性分析结果

Pearson 相关性	热感觉投票	热舒适投票
耳温	0.280 **	0.219 **
额头温度	0.754 **	0.455 **
平均皮肤温度	0.615 **	0.333 **

注:显著性 $P < 0.05$ 表示为“*”; $P < 0.01$ 表示为“**”。

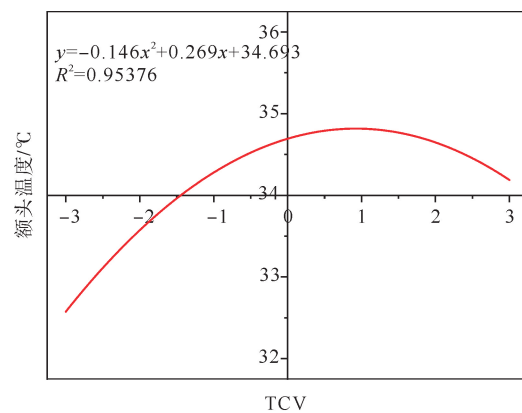


图10 实验中 TCV 与额头温度的关系

3 结论

本文基于主观热投票、额头温度、耳温及平均皮肤温度等指标,研究了温度漂移热环境下人体热舒适的变化,并且对热舒适投票与额头温度之间进行了相关性分析,得到以下结论:

1) 温度漂移变化的速率会影响人体热舒适和热感觉变化的大小,并且温度漂移变化只影响热感觉变化的方向,不影响热舒适水平变化方向。所以在舒适环境温度范围内,适当的温度漂移变化并不会对人体热舒适水平造成负面影响。

2) 经历温度漂移后,人们对夏季热环境更加冷敏感,对偏冷的环境温度接受度下降,但对偏热的环境温度接受度和适应能力会有所提高。温度漂移可以提高人们在夏季偏暖环境温度下的热舒适水平,因此可以利用温度漂移提高夏季室内空调温度设定值,达到节约空调能耗的目的。

3) 额头温度可以显著反应出人体在温度漂移下的体温调节变化。在温度漂移热环境下,人体热舒适与额头温度显著相关,拟合曲线为开口向下的多项式。当受试者感到舒适时,额头温度处于 34.3~34.8 °C。

4) 经历过温度漂移之后,人体处于夏季空调环境时的平均皮肤温度略有升高,人体皮肤血液循环旺盛,代谢能力增强,散热量增加,人体对热环境的制冷需求下降。

因此,室内环境中适当的温度漂移可以在不影响人体热舒适的前提下,提高人体热适应能力。基于以上结论,建议将温度漂移应用到夏季室内空调系统的运行策略中去,这既可以满足夏季制冷需求又能实现空调的节能运行。

参考文献(References):

- [1] 赵荣义. 关于“热舒适”的讨论[J]. 暖通空调, 2000, 30(3): 25-26.
ZHAO Rongyi. Discussion on thermal comfort[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(3): 25-26.
- [2] DU Chenqiu, LI Baizhan, CHENG Yong, et al. Influence of human thermal adaptation and its development on human thermal responses to warm environments[J]. Building and Environment, 2018, 139: 134-145.
- [3] KENNEY W L, DEGROOT D W, HOLOWATZ L A. Extremes of human heat tolerance: Life at the precipice of thermoregulatory failure[J]. Journal of Thermal Biology, 2004, 29(7/8): 479-485.
- [4] BRAGER G S, DEAR R. Thermal adaptation in the built environment: A literature review[J]. Energy and Buildings, 1998, 27: 83-96.
- [5] YAO Runming, LI Baizhan, LIU Jing. A theoretical adaptive model of thermal comfort: Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)[J]. Building and Environment, 2009, 44: 2089-2096.
- [6] LUO Maohui, JI Wenjie, CAO Bin, et al. Indoor climate and thermal physiological adaptation: Evidences from migrants with different cold indoor exposures[J]. Building and Environment, 2016, 98: 30-38.
- [7] 徐涛, 刘刚, 康侍民, 等. 动态热环境下人体热舒适的实验研究[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(2): 62-66.
XU Tao, LIU Gang, KANG Shimin, et al. Experiment on human thermal comfort in dynamic thermal environment[J]. Building Energy & Environment, 2010, 29(2): 62-66.
- [8] 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.
- [9] GUPTA S, KHARE M, GOYAL R. Sick building syndrome: A case study in a multistory centrally air-conditioned building in the Delhi City[J]. Building and Environment, 2007, 42: 2797-2809.
- [10] CAO Bin, SHANG Qi, DAI Zizhu, et al. The impact of air-conditioning usage on sick building syndrome during summer in China[J]. Indoor and Built Environment, 2013, 22(3): 490-497.
- [11] KONG Meng, ZHANG Jianshun, DANG Thong Q, et al. Micro-environmental control for efficient local cooling: Results from manikin and human participant tests[J]. Building and Environment, 2019, 160: 106198. 1-106198. 12.
- [12] HENSEN J. Literature review on thermal comfort in transient conditions[J]. Building and Environment, 1990, 25(4): 309-316.
- [13] VELLEI M, DEAR R D, INARD C, et al. Dynamic thermal perception: A review and agenda for future experimental research[J]. Building and Environment, 2021, 205: 108269.
- [14] SCHELLEN L, MARKEN LICHTENBELT V W D, LOOMANS M G L C, et al. Thermal comfort, physiological responses and performance of elderly during exposure to a moderate temperature drift[C]//9th International Conference and Exhibition on Healthy Buildings (HB 2009), 2009.
- [15] IVANOVA Y M, PALLUBINSKY H, KRAMER R, et al. The influence of a moderate temperature drift on thermal physiology and perception[J]. Physiology & Behavior, 2021, 229: 113257.
- [16] 王友群. 评价室内动态热环境舒适状况的非稳态人体焓分析法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
WANG Youqun. Research on unsteady-state human exergy model for evaluating the comfortable state of dynamic indoor thermal environment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [17] ASHRAE. ASHRAE Standard 55—2017, Thermal environmental conditions for human occupancy[S].
- [18] WU L C, ZARRIN A A. The production and regulation of IgE by the immune system[J]. Nature Reviews Immunology, 2014, 14(4): 247-259.
- [19] DULLAERS M, DE Bruyne R, RAMADANI F, et al. The who, where, and when of IgE in allergic airway disease[J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2012, 129(3): 635-645.
- [20] 刘蔚巍, 连之伟, 邓启红, 等. 人体热舒适客观评价指标[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(2): 521-526.
LIU Weiwei, LIAN Zhiwei, DENG Qihong, et al. Objective evaluation indices of human thermal comfort[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(2): 521-526.
- [21] TAYLOR N A S, TIPTON M J, KENNY G P. Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures[J]. Journal of Thermal Biology, 2014, 46: 72-101.
- [22] 刘博, 唐晓英, 刘伟峰, 等. 人体核心温度的测量方法研究进展[J]. 中国生物医学工程学报, 2017, 36(5): 608-614.
LIU Bo, TANG Xiaoying, LIU Weifeng, et al. Review on human core body temperature measurement method[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2017, 36(5): 608-614.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)