

# 人体反馈调节对热舒适及感知空气品质的影响研究

吴语欣<sup>1,2</sup>, 刘红<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045;

2. 重庆大学绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 室内环境对人的舒适性和健康水平有很大的影响。已有研究表明, 接近于自然环境的较大温湿度范围才更有利于人体健康机能。而要在较大环境参数范围内保持舒适性, 则依赖于人体自适应性调节。因此, 为探索行为调节对人体自适应性热舒适的影响, 在冬季进行了一系列模拟机舱环境的实验研究。在 20℃、22℃、24℃、26℃ 的工况下, 受试者静坐在气候舱内, 并可以通过开关个性送风口和脱穿外套进行自我调节, 而对照的受试者无法进行自我调节。结果显示, 在稍不利的环境工况下, 可以进行自我调节的受试者舒适性明显高于对照组, 其热感觉更接近于中性值, 感知空气品质更好。研究表明, 自我调节性对扩展舒适温度范围有积极的影响, 有利于营造更健康的环境。

**关键词:** 暖通空调; 室内环境; 热舒适; 个性送风; 行为

**中图分类号:** TU11

## Impact of adaptive behaviours on thermal comfort and perceived air quality

WU Yuxin<sup>1,2</sup>, LIU Hong<sup>1,2</sup>

(1. Joint International Research Laboratory of Green Buildings and Built Environments (Ministry of Education), Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings (Ministry of Science and Technology), Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** To examine the impact of behavioural adaption on thermal comfort, two comparison studies were conducted in a model aircraft cabin. In series I, 32-68 subjects participated in different experiments, i.e. at air temperature 20℃, 22℃, 24℃, and 26℃, in which the clothing ensembles and personal air supply were controllable by themselves, and meantime the thermal environment was evaluated. In the series II, 20 subjects evaluated the conditions as same as series I, while the behavioural adjustment were not allowed. Results show: Subjects are more comfortable when they can actively control the microenvironment by behavioural responses than they are not in the same conditions. Their thermal sensation are more neutral, the perceived air quality are better and the skin temperature are more stable with thermal environment. Thus, to evaluate and create a thermal comfort environment in aircraft cabins should take the factor of adaptive behaviours into consideration.

**Key words:** HVAC; indoor environment; thermal comfort; personal ventilation; behaviour

## 0 引言

随着暖通空调和净化技术的发展, 室内热环境得到大大改善<sup>[1]</sup>, 室内污染物得到了一定程度上的控制<sup>[2][3]</sup>, 这些都是非常重要的进步。而对技术的片面追求, 已经可以创造接近于恒温恒湿<sup>[4]</sup>以及几乎无污染的洁净环境<sup>[5]</sup>。但是对于人居环境来说, 即使不提能耗问题, 这

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2018CDYJSY0055); 高等学校学科创新引智计划(B13041)

作者简介: 吴语欣(1988-), 男, 在读博士生, 主要从事建筑热环境与人体热舒适研究

通信联系人: 刘红(1966-), 女, 教授, 博导, 主要从事建筑热环境与人体热舒适研究. E-mail: liuhong1865@163.com

类高洁净恒温环境真正是有益于人体健康的吗?

实际上,大部分学者<sup>[6-8]</sup>的观点认为趋于自然的环境才是健康的。自然环境就对保持人体的机能是非常重要<sup>[9]</sup>。我们传统的热环境评价方法把人体当成是被动的接受物<sup>[10]</sup>,实际上人体和环境是一个存在反馈循环的系统<sup>[11]</sup>。一定的刺激量是有益于健康的,就像锻炼身体道理一样<sup>[12, 13]</sup>。影响热舒适的自适应能力有很多<sup>[14]</sup>,包括生理<sup>[15, 16]</sup>、心理<sup>[17, 18]</sup>、社会习俗<sup>[19]</sup>和行为<sup>[20-22]</sup>等等。我们这个研究就是要探索行为调节可以多大程度上提高人体热适应能力。

目前,热舒适评价指标 PMV 广泛应用于建筑室内空调热环境的评价<sup>[23]</sup>,但大量的调查研究证实,在存在人体适应性调节的热环境中,PMV 指数无法准确进行评价<sup>[24, 25]</sup>。在实际建筑中,人是通过多重反馈循环与人-环境系统交互作用的主动参与者<sup>[26]</sup>,如何评价行为调节下的热舒适是一个难题。有研究认为<sup>[27]</sup>,人的可得控制(适应机会)、实际控制以及感知控制能力中,感知控制能力对人的舒适性影响最大。周翔等<sup>[17]</sup>在研究发现,环境控制能力能显著改善人的热感觉和热舒适,但环境控制的成本会减弱其改善作用。刘蔚巍等人<sup>[28]</sup>对办公室行为调节的研究中,得到了不同行为对舒适预测的影响关系<sup>[29, 30]</sup>。崔惟霖等人<sup>[31]</sup>发现,在感知控制能力相同的情况下,积极采用行为调节的乘客普遍对环境比较敏感,对环境评价更苛刻。而对于整体人群都不允许采用调节行为时和允许时的热舒适差异还需要进一步研究。

因此,本文以实验为基础,探讨了行为可调节,即允许与不允许采用调节行为时,对人体热舒适评价的影响。实验中有无行为调节的舒适评价机理的差异如图 1 所示。验证调节行为可以扩展人体热舒适温度范围,从而营造一个既健康又舒适的环境。

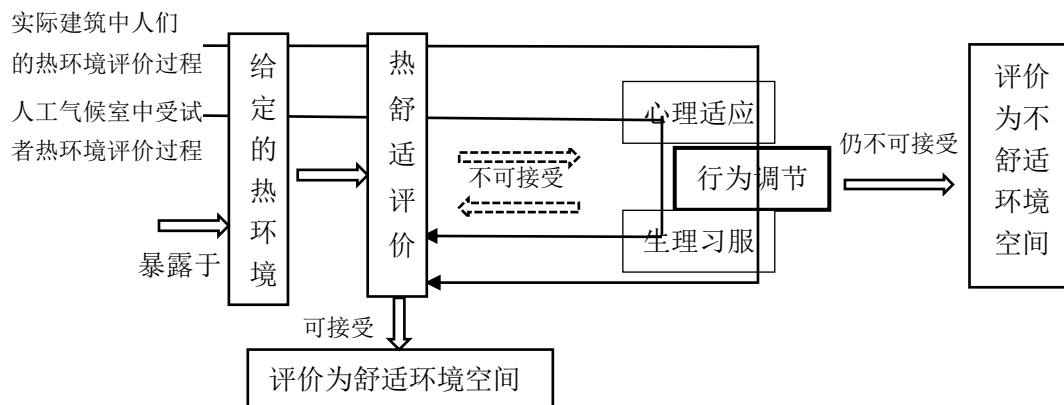


图 1 人体热环境评价过程

Fig. 1 The process of environment evaluation

## 1 实验工况设计

本研究在重庆大学三排模型机舱环境内进行,共两个系列的对比实验。实验开展时间为冬季,室外气温约为 5℃~15℃,两个系列实验中的环境工况类似,温度范围在 20-26℃之间,受试者穿着统一实验服装(秋衣、秋裤、长外裤、薄毛衣、衬衫约 1.0clo,外套约 0.35clo)。不同的是第一系列中受试者可以根据自己意愿对是否张嘴送风和是否穿外套进行选择,即具有行为选择性,受试者都来自大学生,相关信息如表 1 所示。而第二系列和传统热感觉实验研究一致,人为的给定了一些和第一系列相同的热环境让受试者进行评价,共有 20 名受试

参与了每个工况。

75

表 1 实验受试者基本信息  
Tab. 1 Subjects information

温度工况	总人次	男	女	身高（cm）	体重(kg)	BMI
20℃	32	18	14	166±6.4	59.0±8.5	21.1±1.7
22℃	68	36	32	167±5.6	59.6±5.5	21.7±1.3
24℃	40	22	18	166±7.4	58.7±7.5	20.7±1.9
26℃	32	16	16	165±6.4	60.1±6.5	21.9±1.5

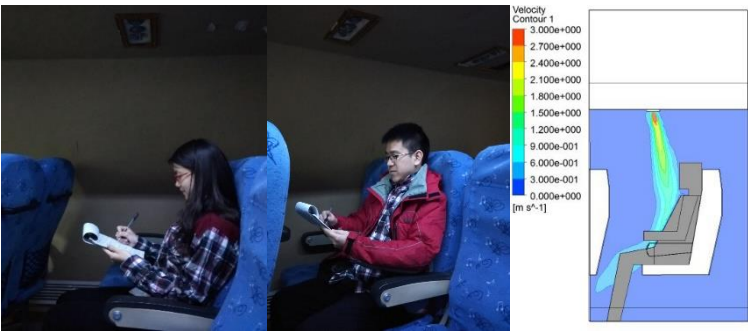


图 2 实验中的服装调节与喷嘴的风速分布

Fig. 2 Photo of subjects in the experiments with different clothing insulation and air distribution of the nozzle

80

第一系列实验模拟了一个人在登机后的行为调节过程，实验共持续了 70min，前 30min 为登机前状态，后 40min 模拟登机后的过程，登机后可以自由调节喷嘴送风开关和外套脱穿，如图 2 所示。在登机 30min 后得到人体调节行为分布如下图 3 所示，并将行为选择样本数量大于 5 的工况数据用来分析，如表 2 所示。相应的系列二的实验工况也在表中，但不模拟实际登机情况，而是在机舱内稳定后有实验员对实验工况进行设定。

85

实验过程中，受试者对喷嘴送风的主观舒适性进行了评估，并填写在问卷中，包括：热舒适、热感觉、感知空气品质（PAQ）等。热舒适采用四级容忍度尺度，0 舒适、1 稍不舒服、2 不舒服、3 很不舒服，在分析结果时乘以-1 来展现。热感觉采用 ASHRAE 七级标度，分别为-3 冷、-2 凉、-1 稍微凉、0 适中、+1 稍微暖、+2 暖、+3 热。PAQ 用来评价空气品质的好坏，+1 为好，-1 为坏，中间为刚好接受（0.1）和刚好不接受（-0.1）。

90

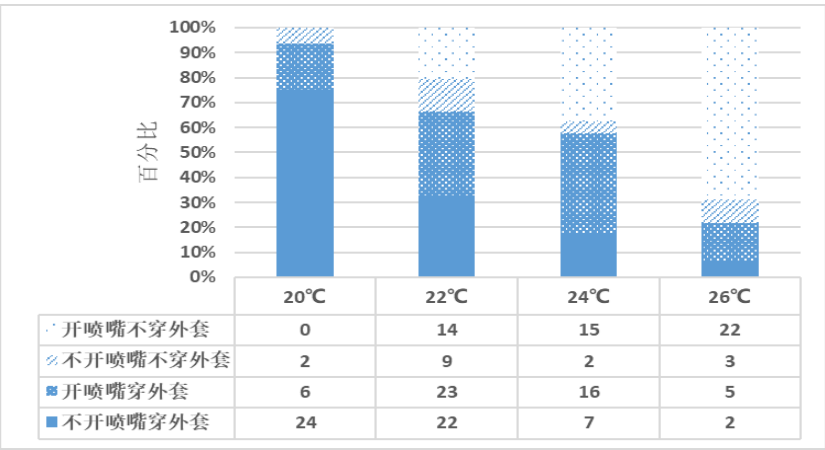


图 3 可调节情况下受试者行为选择结果

Fig. 3 The results when the subjects could selves adjustment

表 2 数据分析用的工况

Tab. 2 The conditions used for data analysis

舱内环境温度	不开喷嘴穿外套		开喷嘴穿外套		不开喷嘴不穿外套		开喷嘴不穿外套	
	可调节	不可调节	可调节	不可调节	可调节	不可调节	可调节	不可调节
20℃	✓	✓	✓	✓				
22℃	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24℃	✓	✓	✓	✓			✓	✓
26℃							✓	✓

2 实验结果

2.1 热舒适对比

从图 4 中可知，当行为可调节时，受试者的热舒适要大大高于不允许调节时。且在越不舒适的环境中，这种不可调节性对热舒适的影响越大。例如，在 24℃、不穿外套、喷嘴开启时，人体热舒适比较好的情况下，行为是否可调节度热舒适的影响就不大。因此，行为调节可以扩大人体对不同环境的接受程度。

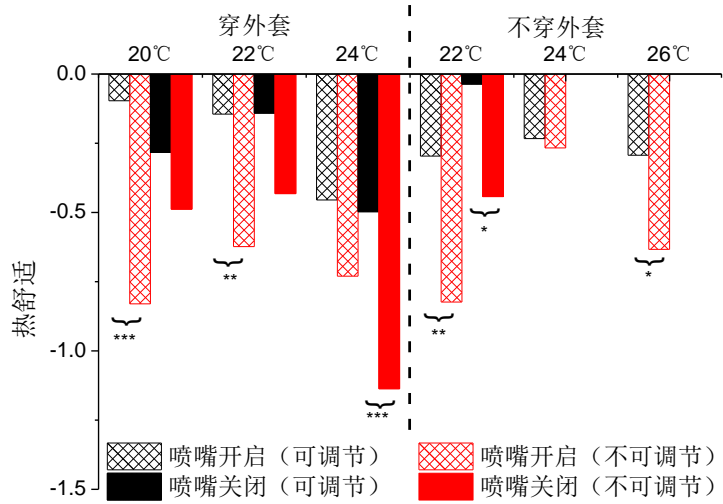


图 4 热舒适投票对比

Fig. 4 Thermal comfort votes

2.2 热感觉对比

从图 5 可以看出，喷嘴可调节时，热感觉都在±0.5 的舒适范围内。且喷嘴开与喷嘴关的两组受试者之间的热感觉没有明显区别，因为人的行为调节造成投票值偏热的乘客会主动开启喷嘴，使得最终开启喷嘴的受试者中有更多人对热比较敏感，从而影响两组之间的结果对比。喷嘴开关不可调节时，热感觉随着室内温度上升而明显增加，开启喷嘴相对于不开喷嘴的工况时人体热感觉明显下降。而在不可调节、温度 24 度且穿外套时人的热感觉超过了 +0.5，20 度穿外套和 22 度不穿外套开启喷嘴时热感觉小于 -0.5。而当人体行为可以调节时，相对于不可调节时热感觉更接近于中性值。

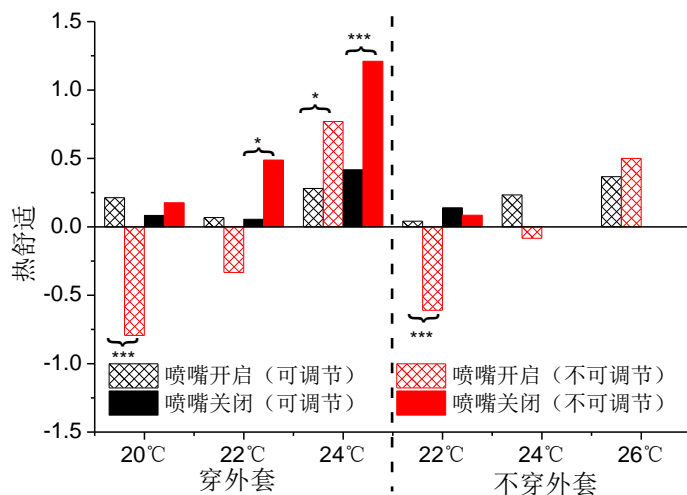


图 5 热感觉投票对比

Fig. 5 Thermal sensation votes

### 2.3 感知空气品质对比

如图 6 所示, 当喷嘴不可调节时, 开启喷嘴的工况下感知空气品质 PAQ 相比关闭喷嘴时明显提高。而喷嘴可调节开关时, 无论是否开启喷嘴, 人的感知空气品质都要高于或接近于喷嘴无法调节被设定为开启时的工况, 这可能是由于心理因素造成的。且喷嘴可调节时, 感知空气品质和喷嘴开关没有明显关系, 因为对空气品质比较敏感的乘客会主动开启喷嘴, 从而使得有些情况下开喷嘴的乘客是认为空气比较差的乘客, 而影响了最终的结果。

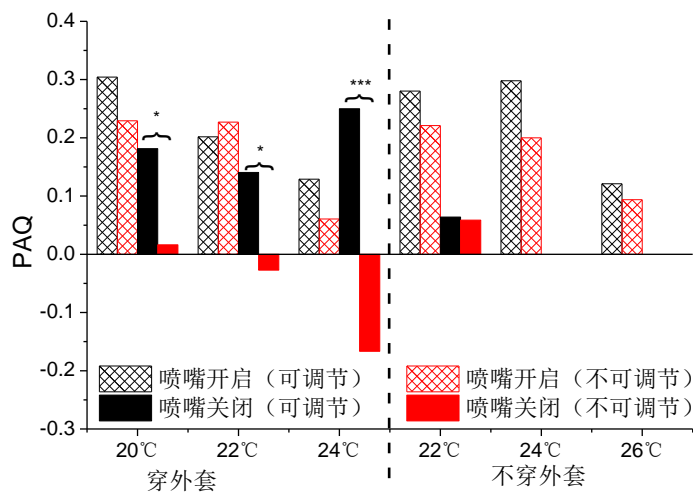


图 6 感知空气品质对比

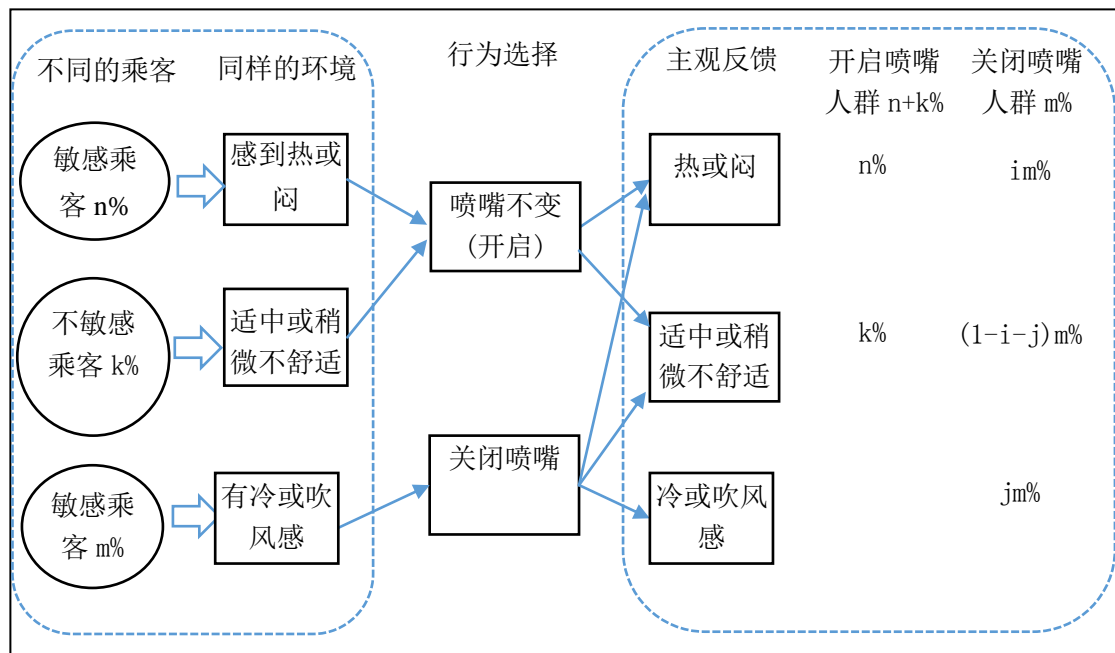
Fig. 6 Perceived air quality

## 3 讨论

### 3.1 行为反馈机制

受试者的行为调节反馈机制如图 7 所示, 可以看出由于敏感乘客在可调节的范围内主动改变自身的微环境, 使得给定工况下敏感乘客的比例发生变化。虽然开启喷嘴时的热环境理论上要比关闭喷嘴时更凉, 但由于自由选择造成不同行为状态中的敏感乘客构成不一样的原因, 有可能开启喷嘴乘客的热感觉还要大于关闭喷嘴乘客的热感觉, 这一点也在崔惟霖等人

<sup>[31]</sup>在实际飞机航班中的调研一致。如图中, 假设开启喷嘴乘客比例为  $k\%$  和  $(1-i-j)m\%$  的投票值在 0 附近, 则最终两种不同行为选择下的热环境主观评价数值结果的对比, 也受到关闭喷嘴中乘客的组成结构  $n$ 、 $i$  和  $j$  比例的影响。



135

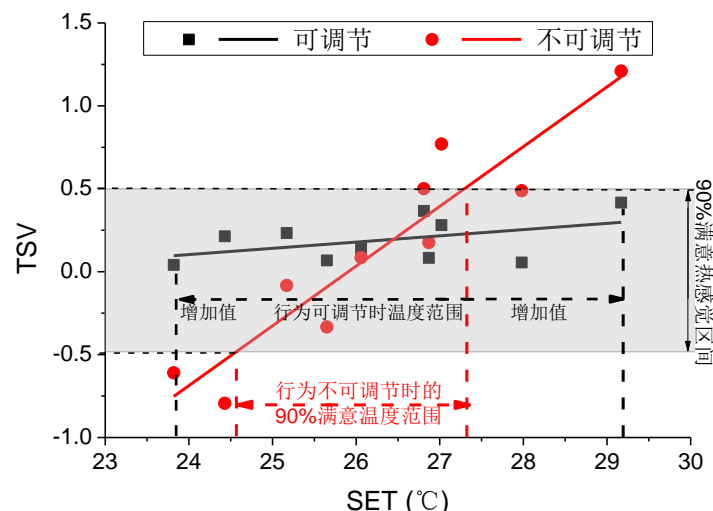
图 7 环境可调控范围内的敏感人群行为选择的影响

Fig. 7 Effect of sensitive subjects' behaviors

### 3.2 自适应热舒适范围

标准有效温度 (SET) 定义为: 假设在一环境中, 空气静止, 空气相对湿度为 50%, 人们穿着与活动相适应的标准服装, 通过对流、蒸发和辐射, 有与实际环境相同的热损失和热感觉, 则该环境下的空气干球温度为 SET 值<sup>[32]</sup>。因此, 适用于将不同服装、风速下的工况转化为统一温度指数进行比较。行为可调节和不可调节下的人体热感觉与 SET 关系如图 8 所示。在行为不可调节时, 90%满意度的温度区间只有  $2^{\circ}\text{C}$  左右, 人体长期生活在这种环境中, 对健康十分不利; 而在可行为调节下人体舒适性的温度区间更广, 因此可以营造更健康又舒适的环境。

140



145

图 8 热感觉与标准等效温度 (SET) 的关系

Fig. 8 Relationship between thermal sensation and SET

## 4 结论

实验表明, 人体自我调节性对改善人体舒适性和扩展舒适温度区间都有着积极的影响。在同样的环境工况下, 当环境较为舒适性, 是否可以调节对舒适性的影响不明显。而在环境稍不舒适时, 可以进行自我调节的受试者舒适性明显高于对照组, 其热感觉更接近于中性值, 且感知空气品质更好。由于在可调节的情况下, 对环境比较敏感的受试者会更加积极的进行调节行为改变自身的微环境, 造成不同工况下对热环境敏感的受试者比例不同, 使得在可行行为调节下要准确预测热感觉更为困难, 即人体热舒适随着温度变化更不明显。另一方面, 在可行行为调节下人体舒适性的温度区间更广, 因此可以为营造更健康的环境提供条件。同样, 室内环控设计应考虑人的自我调节因素, 从而实现节能前提下符合人体需求的环境最优设计。

本实验是在 20℃到 26℃的相对舒适的环境温度中进行, 而在更高或更低的极端温度下人的行为可调性对热感觉的影响可能会有所差异, 值得进一步研究。

## [参考文献] (References)

- [1] 何天祺. 论建筑环境控制与暖通空调[J]. 重庆大学学报(自然科学版). 2002(08): 85-87.
- [2] 王清勤, 李国柱, 赵力, 等. 建筑室内细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)污染现状、控制技术与标准[J]. 暖通空调. 2016, 46(2): 1-7.
- [3] 张寅平. 室内空气质量控制:新世纪的挑战和暖通空调人的责任[J]. 暖通空调. 2013(12): 1-7.
- [4] 曹琳, 江辉民, 孙平, 等. 变频恒温恒湿空调机温湿度控制精度实验研究[J]. 建筑科学. 2009(12): 24-29.
- [5] 白清顺, 郭永博, 陈家轩, 等. 超洁净制造的研究与发展[J]. 机械工程学报. 2016, 52(19): 145-153.
- [6] 朱颖心. 热舒适的
- [7] 张寅平, 莫金汉, 程瑞. 营造可持续室内空气环境:问题、思考和建议[J]. 科学通报. 2015(18): 1651-1660.
- [8] 尚琪, 戴自祝, 贝品联, 等. 夏季空调室内热环境与人群不适综合症状的调查和研究[J]. 暖通空调. 2005(05): 1-7.
- [9] Zhu Y, Ouyang Q, Cao B, et al. Dynamic thermal environment and thermal comfort[J]. Indoor Air. 2015, 26(1): 125-137.
- [10] Fanger P O. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering[M]. Copenhagen: Danish Technology Press, 1970.
- [11] Dear R J D, Akimoto T, Arens E A, et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years[J]. Indoor Air. 2013, 23(6): 442.
- [12] 金权. 非均匀热环境过渡过程人体热感觉的研究[D]. 大连理工大学, 2012.
- [13] 张宇峰, 张军, 陈慧梅, 等. 温湿度突变对人体热反应的影响[J]. 暖通空调. 2014(07): 93-100.
- [14] Luo M, Cao B, Ouyang Q, et al. Indoor human thermal adaptation: dynamic processes and weighting factors[J]. Indoor Air. 2016, 27(2): 273-281.
- [15] 林宇凡, 杨柳, 任艺梅, 等. 人体热舒适的生理热适应机理研究进展[J]. 建筑科学. 2015(04): 148-154.
- [16] 李百战, 杨旭, 陈明清, 等. 室内环境热舒适与热健康客观评价的生物实验研究[J]. 暖通空调. 2016(05): 94-100.
- [17] 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.
- [18] Luo M, Cao B, Zhou X, et al. Can personal control influence human thermal comfort? A field study in residential buildings in China in winter[J]. Energy and Buildings. 2014, 72: 411-418.
- [19] Mishra A K, Ramgopal M. Field studies on human thermal comfort - An overview[J]. Building And Environment. 2013, 64(Jun): 94-106.
- [20] 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.
- [21] 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(2):适应行为[J]. 暖通空调. 2014(01): 15-23.
- [22] 简毅文, 高萌, 裴泽, 等. 基于动作的住宅夏季空调开启行为研究[J]. 建筑科学. 2015(10): 222-227.
- [23] 潘云钢. 我国暖通空调自动控制系统的现状与发展[J]. 暖通空调. 2012, 42(11): 1-8.
- [24] 刘红, 吴语欣, 张恒, 等. 夏季自然通风住宅老年人适应性热舒适评价研究[J]. 暖通空调. 2015(06): 50-58.

- 200 [25] Liu H, Wu Y, Li B, et al. Seasonal variation of thermal sensations in residential buildings in the Hot Summer and Cold Winter zone of China[J]. *Energy & Buildings*. 2017, 140: 9-18.
- [26] Schweiker M, Brasche S, Bischof W, et al. Explaining the individual processes leading to adaptive comfort: Exploring physiological, behavioural and psychological reactions to thermal stimuli.[J]. *Journal of Building Physics*. 2013, 36(4): 438-463.
- 205 [27] Paciuk M. The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction at the workplace[J]. 1990.
- [28] Liu W, Deng Q, Ma W, et al. Feedback from human adaptive behavior to neutral temperature in naturally ventilated buildings: Physical and psychological paths[J]. *Building and Environment*. 2013, 67: 240-249.
- [29] Liu W, Huangfu H, Xiong J, et al. Feedback effect of human physical and psychological adaption on time period of thermal adaption in naturally ventilated building[J]. *Building & Environment*. 2014, 76(2): 1-9.
- 210 [30] Liu W, Deng Q, Ma W, et al. Feedback from human adaptive behavior to neutral temperature in naturally ventilated buildings: Physical and psychological paths[J]. *Building & Environment*. 2013, 67(9): 240-249.
- [31] Cui W, Wu T, Ouyang Q, et al. Passenger thermal comfort and behavior: a field investigation in commercial aircraft cabins[J]. *Indoor Air*. 2017, 27(1): 94.
- 215 [32] Huang L, Arens E, Zhang H, et al. Applicability of whole-body heat balance models for evaluating thermal sensation under non-uniform air movement in warm environments[J]. *Building & Environment*. 2014, 75(4): 108-113.