

夏季热调节行为的热容忍特性及节能潜力分析

薛文静, 刘大龙, 宋庆雨

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究夏季城市居住建筑内人体热调节行为的节能效率, 以在校大学生为受试对象, 在人工气候室测试了不同温度调节下人体生理和心理测试的变化规律, 确定了静风静坐、电风扇、扇扇子、湿毛巾擦拭四种热调节行为方式的热容忍温度, 通过动态能耗模拟, 计算了不同容忍温度所对应的空调节能潜力。研究发现: 人体体温随室内空气温度升高而升高, 但升幅不大; 心率和血压值随空气温度升高并无显著性变化; 四种热调节行为的容忍温度范围为: 29.2~31.1 °C, 并对其进行了排序; 夏季, 热调节行为的容忍温度越高, 则空调使用时长越短, 节能率越大, 四种热调节行为的节能率变化范围为: 0~57.2%。

关键词: 行为调节; 容忍温度; 生理参数; 平均热感觉

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0728-06

Thermal accessibility characteristics and energy saving potential analysis of thermal adjustment behavior in summer

XUE Wenjing, LIU Dalong, SONG Qingyu

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the energy saving efficiency of human body thermal regulation behavior in urban residential buildings in summer, the college students are subject to the subject, and the changes of human physiology and psychological testing under different temperature regulations are tested. It is determined that the static wind, electric fan, hand fan, wet towel wipes the heat toleration temperature of the four thermal adjustment behavior, and calculates air conditioning energy saving potential corresponding to different tolerance temperatures by dynamic energy consumption. The study found that as room temperature increases, the body temperature increases with the increase in air temperature, but the increase is not large; the heart rate and blood pressure value have no significant change with the increase in air temperature. The tolerance temperature of the four thermal modulation behavior ranges from 29.2 °C to 31.1 °C, and it is sorted. In the summer, the higher the tolerance temperature of the heat regulating behavior, the shorter the air conditioner, the larger the energy saving rate, the energy saving rate variation of the four thermal regulation behavior ranges from 0% to 57.17%.

Key words: thermal regulation behavior; tolerance temperature; physiological parameter; average thermal sensation

我国居住建筑节能至今经历了 30%、50%、65% 三个阶段, 目前, 越来越多的省市开始实施 75% 的节能标准。而保温与隔热技术受材料性能限制已遇到发展瓶颈, 因此, 节能技术若要继续显著提高, 减少供能时间的策略将成为未来我国节能技术必然的发展方向。人行为的变化能够比节能设备和其他节能政策更快地被采用, 获得减少能耗和碳排放的效果^[1]。因此, 行为节能是典型的以减少供能时间为策略的节能技术体系。

在住宅中, 若室内热环境引起人体不适, 人们会通过换衣服、打开/关闭门窗、开启风扇等行为调节, 以适应热环境^[2], 减少空调设备使用时长。当热环境变化到一定程度, 完全依靠行为调节无法满足人体热感受要求时, 需要通过开启空调设备调节室内热环境, 空调设备开启时的室内温度即为容忍温度^[3], 是节能行为的临界状态, 该状态决定着非空调状态下人体的热容忍性。热容忍性越强则使用空调时间越短, 节能效果越显著。因此,

收稿日期: 2021-05-25

修改稿日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878536); 陕西省重点研发基金项目(2021SF-466)

第一作者: 薛文静(1996—), 女, 硕士生, 主要研究方向为健康建筑。E-mail: 715049571@qq.com

通信作者: 刘大龙(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为建筑热工与节能。E-mail: coffeeyc@xauat.edu.cn

容忍温度的确定是研究行为节能潜力的关键。

我国现行的室内空调制冷设置温度为 26℃，其依据是健康人士在办公室环境中的热舒适评级^[4]，但并未考虑人体的热适应和热容忍特性。实际情况中，室内温度达到 26℃，居住者可以通过行为调节来达到可接受状态。钱晓倩^[5]为获得住户空调使用情况，进行大规模入户实测调研，结果显示，夏季住户的容忍温度为 30~32℃，空调设置温度平均为 26.7℃，发现考虑热容忍后的用能方式更接近实际用能。冉茂宇^[6]实测住宅室温变化发现，室温低于 28℃时，能通过自然通风实现热舒适，高于 28℃时才启用空调。夏一哉等^[7]通过对居民住宅进行现场测试和问卷调查，研究发现住宅空调的启动温度和设置温度不同，分别为 29℃和 26℃。因此，目前模拟住宅热环境时，容忍温度为 29℃，空调设置温度为 26℃^[8]。分析发现夏季容忍温度多处于 28~32℃范围内。

何梅玲等^[9]通过实验研究发现，在热湿环境下，使用风扇能有效提高受试者在高温环境下的舒适性，并节约空调能耗。HUANG L 等^[10]通过在线调查和气候室实验研究，发现电风扇产生的气流可以作为一种保持 28~32℃舒适环境的有效冷却方法。Sefton JoEllen M^[11]研究了薄雾风扇或冷却毛巾在潮湿环境中能否有效降低受试者的核心温度，通过实验研究表明，雾扇和冷却毛巾对降低核心温度均无效，甚至可能增加患热病的风险。因此，在夏季室内热环境中，尽管采取行为调节能够提高热舒适，但采用合理的调节方式同样至关重要。

杨丽红^[12]通过入户调研测试，分析住户空调使用概率和能耗，通过计算得到夏季平均容忍温

度为 31℃，并指出了住户的能耗设备运行概率与气候及住户的耐受度有很大关系。朱光俊^[13]采用 DeST 对上海某一住宅建筑进行模拟计算，研究发现，在敏感性上，容忍温度要强于空调控制温度。由此可以看出，容忍温度对空调和采暖能耗影响显著。

综上所述，热调节行为可以提高人体热容忍能力，且热容忍性与建筑能耗紧密相关。但上述研究并未在热调节方式、容忍温度、节能潜力之间建立闭环系统，更未构建其量化关系。本研究通过测量不同热环境下不同热调节行为的人体主观感受和生理参数，探讨不同行为方式与容忍温度之间逻辑量化关系，并研究不同热调节方式的节能潜力。

1 热调节行为热容忍实验

1.1 实验工况及受试者概况

实验于人工气候室内进行，人工气候室温度分为 28℃、30℃、32℃、34℃、36℃五个工况，相对湿度在 45%~65%的范围内。实验主要研究的行为模式为电风扇模式、扇扇子模式、湿毛巾擦拭模式。为进行对比分析，实验设计一个不采取行为调节的对照组，即静风静坐模式，共计四种模式。

本实验共招募身体状况良好的 20 名志愿者，其中男性 10 名，女性 10 名，基本信息如表 1 所示。将所有受试者分为 4 组，每 5 人一个小组。测试前要求受试者统一衣着（短袖、短裤和凉鞋，服装热阻约为 0.3 clo），测试期间受试者保持静坐状态，允许进行阅读和交谈等轻微的体力活动，新陈代谢率(M)约为 1 met。

表 1 受试人员基本信息
Tab. 1 Basic information of subjects

性别	人数	年龄/yr	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m ⁻²)
男	10	23.08±1.77	1.78±0.04	67.69±6.50	21.30±1.77
女	10	24.17±1.86	1.60±0.05	49.92±3.45	19.43±1.28

注：表中的数值表示(平均值±标准差)

1.2 测试内容及方法

由于环境舱面积小于 16 m²，测点布置在房间平面对角线交点^[14]。在距离地面垂直高度为 1.1 m、0.6 m、0.1 m 处分别布置温湿度仪、风速仪，测定人体坐姿时的头部、腹部、脚踝处的温度、湿度、风速。

在实验中，采用了客观评价和主观评价相结合的方法。测量人体对热环境响应的生理指标包

括核心温度、心率和血压。其中，核心温度是关于体温调节系统的生理参数，心率和血压均属于心血管系统调节的生理指标，是人体对环境刺激进行调节的重要反映参数。问卷调查是受试者对室内热环境的主观评价，评价内容包括实验过程中受试者的整体热感觉和整体环境满意度。其中，热感觉投票采用 9 级标尺^[15]，各级标度含义见图 1；满意度采用 5 级标尺^[16]，各级标度含义见图 2。

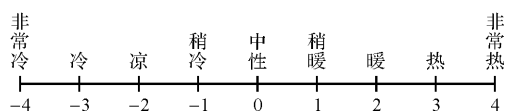


图1 热感觉标尺

Fig. 1 Thermal sensation scale

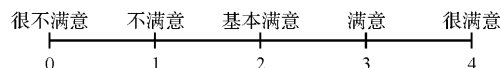


图2 满意度标尺

Fig. 2 Satisfaction scale

1.3 实验过程

实验开始前,实验操作人员提前将气候室内的环境参数调至实验所需工况,受试者提前更换实验服装。随后进入环境适宜的准备间,由实验操作人员向受试者讲解实验流程、问卷填写方法和注意事项,并指导受试者填写个人基本信息(包括受试者的年龄、身高、体重等)。在此期间,受试者需保持静坐状态,使生理参数趋于稳定,以消除之前所处环境和活动状态对实验结果的影响,整个准备过程需40 min。

准备阶段完成后,受试者进入气候室,开始正式实验。每种行为模式持续40 min,受试者每10 min填写一次调查问卷并测量记录生理参数和环境参数。实验过程中,允许受试者阅读和交谈,但不能走动或讨论实验相关内容,受试者若有不适,可主动要求停止实验。

2 结果与分析

2.1 热环境下人体的生理响应规律

文献[17]表明,当环境温度变化小于 10°C 时,受试者的热感觉会在40 min内稳定,因此选取每40 min实验阶段的最后一组投票为稳态投票,考虑每个工况下不同行为模式对生理参数的影响,组内对比采用单因素方差分析。可接受水平 p 值均取0.05。

受试者在不同工况下各模式的稳态平均体温如图3所示。统计分析表明,整体上,受试者的稳态平均体温随空气温度升高而升高,但在测试温度区间内,整体变化幅度不大。这是由于人体具有完备的体温调节机制,可以有效控制人体散热和产热,保持机体处于动态热平衡状态,因此,除了在极端情况下,机体的热平衡一般不易受到破坏,体温一般不会有大幅度的改变。对各工况下的行为模式对体温的影响进行单因素方差分析,结果表明:室内空气温度为 30°C 和 32°C 的工况下,各行为调节模式之间无显著差异($P>0.05$)。

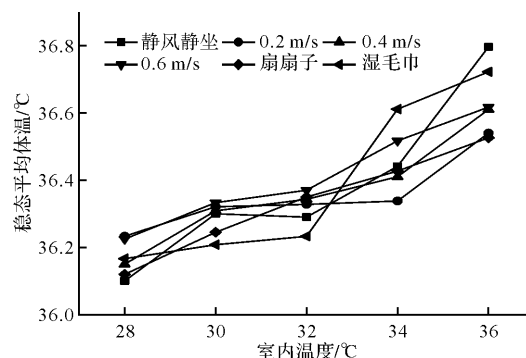


图3 不同工况下各模式的稳态平均体温

Fig. 3 The steady-state mean body temperature of each mode under different working conditions

受试者在不同工况下各模式的稳态平均心率如图4所示。整体上,受试者的心率值随空气温度升高并无显著性的变化($P>0.05$)。对各工况下的模式对心率的影响进行单因素方差分析,结果表明:在空气温度为 28°C 、 30°C 下,各模式之间无显著差异($P>0.05$)。湿毛巾模式下由于水分蒸发,导致室内相对湿度比其他模式更高。有研究表明,增加室内温度和相对湿度会导致受试者心率升高,感到更热更不舒适^[18]。因此,湿毛巾模式下受试者平均心率最大,且心率随温度升高增加幅度最大。

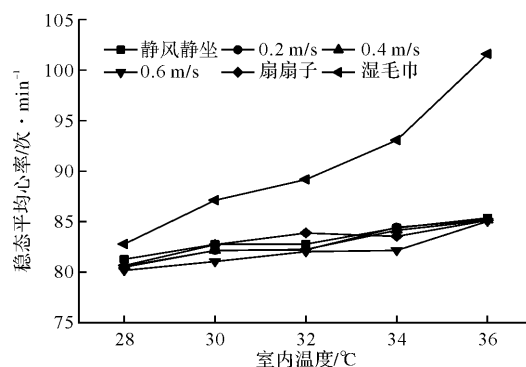


图4 不同工况下各模式的稳态平均心率

Fig. 4 Steady-state mean heart rate of each mode under different working conditions

受试者在不同工况下各模式的稳态平均收缩压、舒张压如图5所示。整体上,受试者的舒张压值和收缩压值随空气温度无显著性变化($P>0.05$)。同时,对各工况下的模式对高压的影响进行单因素方差分析,结果表明:在不同空气温度下,各模式之间无显著差异($P>0.05$)。以上表明,温度和风速的改变没有影响到血管壁的侧压力。

2.2 热环境下人体的主观响应规律

受试者在不同工况下各模式的稳态平均整体

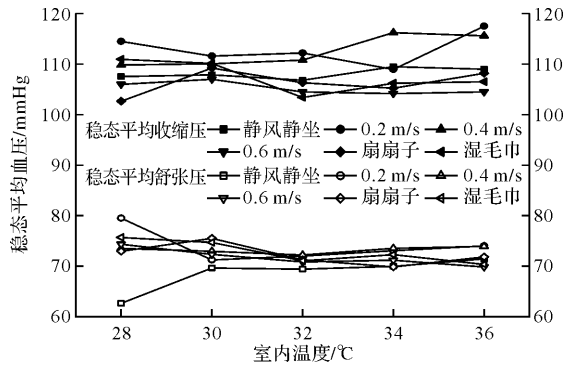


图5 不同工况下各模式的稳态平均收缩压和舒张压

Fig. 5 Steady-state mean systolic pressure and diastolic pressure of each mode under different working conditions

热感觉投票见图6。结果表明,受试者的热感觉投票值随空气温度升高而显著升高。通过各工况下的组内单因素方差分析,得出在各工况下的行为模式对热感觉的影响无显著性差异。在各工况下,从静风模式到电风扇模式,热感觉投票值依次降低。湿毛巾模式虽然在环境温度偏高时能够明显降低人体热感觉,但随着温度升高,湿毛巾模式影响人体的蒸发散热,对人体的热调节作用越来越弱,并且在32℃以上时,湿毛巾模式的热感觉投票高于静风模式,使人体热感受增加。扇扇子模式下,随着温度升高,对人体热感觉的调节作用更强,体现了人们在适应热环境时,能够自主进行行为性的调节的特点。电风扇模式下,随着风扇档位的提高,空气流速增大,能够显著增加对流散热,降低人体蓄热量,达到降温效果,且随着风速增大,降温效果更明显。

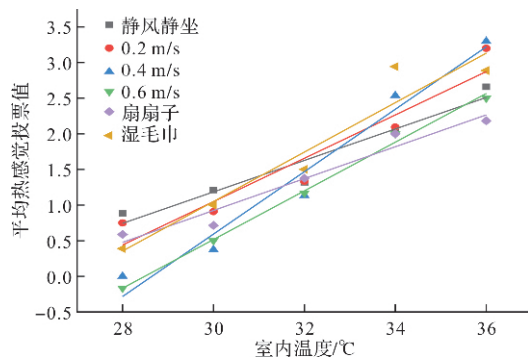


图6 不同工况下各模式的稳态平均整体热感觉投票值

Fig. 6 The steady-state average overall thermal sensation voting value of each mode under different working conditions

使用线性回归分析方法计算,将各调节方式的平均热感觉投票值进行线性回归分析,得到了各调节方式下的线性回归预测模型,当TSV=1时,对应的温度是可接受温度上限,即为该行为调节方式下的容忍温度(见表2)。

表2 不同工况下各模式的回归模型和容忍温度

Tab. 2 Regression model and tolerance temperature of each mode under different working conditions

行为调节方式	回归模型	R^2	容忍温度/℃
静风静坐	$y=0.22x-5.44$	0.93	29.16
0.2 m/s	$y=0.3x-8.08$	0.91	29.84
0.4 m/s	$y=0.44x-12.55$	0.96	30.93
0.6 m/s	$y=0.34x-9.73$	0.99	31.13
扇扇子	$y=0.22x-5.79$	0.93	30.34
湿毛巾	$y=0.35x-9.37$	0.90	29.86

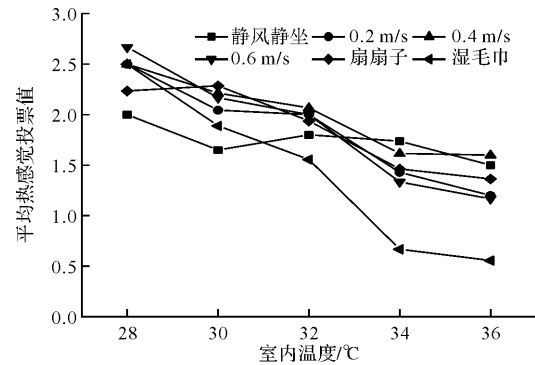


图7 各工况下的稳态平均满意度投票

Fig. 7 The voting mean of steady-state satisfaction of each mode under different working conditions

通过图7可以看出,整体上,受试者的满意度投票值随空气温度的升高而降低。在各工况下,静风模式,除了28℃时满意度能达到基本满意,其余各工况下都无法达到基本满意。在34℃和36℃工况下,所有行为模式都无法使受试者达到基本满意。

在28℃时,基本上所有的行为模式和静风模式,人体满意度投票都能达到基本满意。在30℃时,电风扇模式和扇扇子模式能够使人体满意度投票都能达到基本满意。在34℃时,在此工况下,仅电风扇模式下的满意度投票值达到了2(基本满意)。在36℃时,各模式之间不存在显著性的差异($P>0.05$),但在此工况下,湿毛巾模式的满意度投票值远低于其他行为模式。

3 热调节行为的节能潜力分析

为研究热调节行为所产生的节能效益,以居住建筑为例,利用建筑能耗模拟软件EnergyPlus对典型生活模式下不同行为方式下空调使用时间、空调能耗等进行能耗模拟分析。为充分反映热调节行为对空调能耗的影响程度,以行为调节更为有效的夏季降温方式为研究对象。选取夏热冬暖地区广州市夏至日进行空调能耗分析。模拟建筑为

5层居住建筑,正南朝向,建筑面积为1 575 m²,围护结构构造方式见表3^[19]。

当室内温度达到行为调节方式容忍温度时开启空调,反之则关闭空调,空调设置温度为26℃。室内外温度变化及各行为方式下空调开启时段如图8所示。此处行为调节方式是一种对热环境的应激状态,表明在相应的热环境下能够通过其相应的行为调节方式实现人体热适应。

表3 研究模型热工参数表

Tab. 3 The thermal parameter table of the model studied

构件	结构	厚度 /mm	导热系数/W· (m·K) ⁻¹	比热容/J· (kg·K) ⁻¹
外墙	水泥砂浆	15	0.810	1 050
	XPS板	20	0.030	1 380
	钢筋混凝土	130	1.740	920
玻璃	单层 Low-E 玻璃	6	0.760	840
楼板	钢混现浇楼板	100	1.740	920

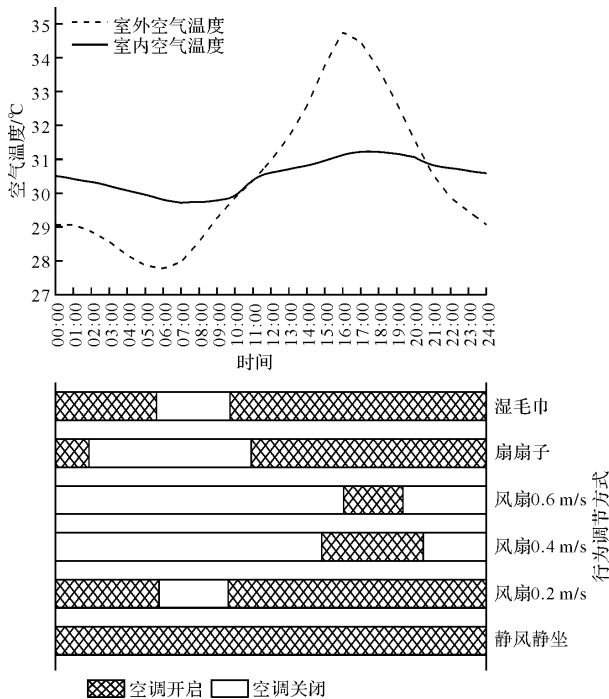


图8 室内外空气温度变化及空调启停时段

Fig. 8 Change of indoor and outdoor air temperature and start and stop time of air conditioning

为分析容忍温度对空调能耗的影响,影响程度使用节能量表示,计算方法如式(1)所示。

$$i=1-E_a/E_s \quad (1)$$

式中, i 为节能率,%; E_a 为采取行为调节工况的空调能耗,kW·h; E_s 为未采取行为调节工况的空调能耗,kW·h。

静风静坐工况下,全天的室内温度均大于该工况下的容忍温度,因此需要全天开空调。将静风静坐作为对照工况,分析其他调节方式工况下容忍温度与节能率之间的关系,计算得到的空调节约时长、

空调节能率与夏季容忍温度关系如图9所示。

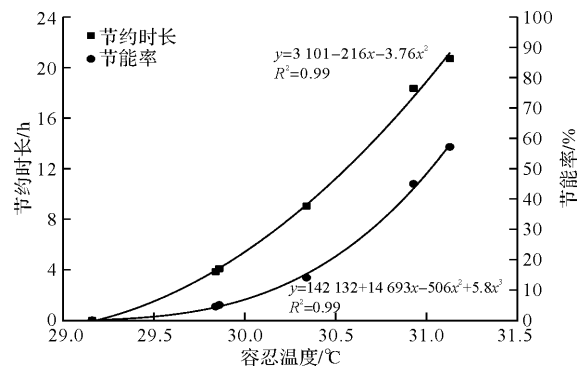


图9 容忍温度与节能指标的拟合曲线

Fig. 9 The fitting curve of tolerance temperature and energy saving index

将容忍温度与空调节约时长、节能率进行拟合,拟合优度均为0.99。分析结果表明,夏季容忍温度越高,空调的使用频率越低,使用时长越短,空调能耗降低,节能率增大。与静风静坐工况相比,电风扇高档的容忍温度最高,能够大幅缩短开空调的时间,节能率最大;其次是吹风扇中档;而湿毛巾擦拭和吹风扇低档对人体的容忍温度影响最小,空调节能效果较差。

4 结论

在人工气候室,通过实验测试了28℃、30℃、32℃、34℃、36℃五个工况,静风静坐、电风扇、扇扇子、湿毛巾擦拭四种热调节行为方式下人体的生理和心理参数,提出了四种热调节行为的容忍温度。通过动态能耗模拟计算了四种热调节行为的节能潜力,得到如下结论:

(1)随着室温的增高,人体的体温随空气温度升高而升高,但升高幅度不大。心率和血压值个体差异较大,随空气温度升高无显著性变化;

(2)人体可以通过热调节行为适应热环境的动态变化。热应力越大,自主调节能力越强;

(3)热调节行为的容忍温度依次为:电风扇高档(31.13℃)>电风扇中档(30.93℃)>扇扇子(30.34℃)>湿毛巾擦拭(29.86℃)>电风扇低档(29.84℃)>静风静坐(29.16℃)。

(4)夏季,热调节方式的容忍温度越高,空调使用时长越短,节能率越大。各调节行为的节能率分别为:电风扇高档(57.17%)>电风扇中档(44.98%)>扇扇子(14.11%)>湿毛巾擦拭(5.08%)>电风扇低档(4.59%)>静风静坐(0%)。

本研究为行为节能奠定了热舒适基础,分析了行为节能的节能潜力,丰富了建筑节能的方法体系。

参考文献 References

[1] DIETZ T, GARDNER G T, GILLIGAN J, et al.

- Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce U. S. carbon emissions[J], Proc. Natl. Acad. Sci., 2009, 106(11): 18452-18456.
- [2] NICOL J F, HUMPHREYS M. Understanding the adaptive approach to thermal comfort [J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104: 991-1004.
- [3] 张文宇, 范洪武, 徐强. 上海地区居住建筑能耗指标限值分析[J]. 建设科技, 2014(22): 37-39.
ZHANG Wenyu, FAN Hongwu, XU Qiang. Analysis of energy consumption index limit of residential buildings in Shanghai[J]. Construction Science and Technology, 2014(22): 37-39.
- [4] ORMANDY D, EZRATY V. Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies [J]. Energy Policy, 2012, 49: 116-121.
- [5] 钱晓倩, 阮方, 钱匡亮, 等. 实际用能状况下夏热冬冷地区居住建筑外保温节能效果[J]. 暖通空调, 2017, 47(7): 46-50.
QIAN Xiaolian, RUAN Fang, QIAN Kuangliang, et al. Energy saving effect of external thermal insulation of residential building under actual energy usage condition in hot summer and cold winter zone [J]. HV&AC, 2017, 47(7): 46-50.
- [6] 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.
RAN Maoyu, LIU Xiaoxun, HU Shen, et al. The monitoring investigation and related analysis on the air conditioning in Summer for residential building at Xiamen [J]. Building Energy & Environment, 2011, 30(1): 39-43.
- [7] 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(2): 3-7.
XIA Yizai, ZHAO Rongyi, JIANG Yi. Thermal comfort in naturally ventilated houses in Beijing[J]. HV&AC, 1999(2): 3-7.
- [8] 赵敬源, 王琼, 吴晓冬. 半围合组团建筑的能耗模拟研究: 以西安地区为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(4): 579-583.
ZHAO Jingyuan, WANG Qiong, WU Xiaodong. The simulation research on the energy consumption of semi-enclosed cluster residential buildings: a case study in Xi'an[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(4): 579-583.
- [9] 何梅玲, 李念平, 何颖东, 等. 热湿环境个体调节桌面风扇对舒适性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 95-101.
HE Meiling, LI Nianping, HE Yingdong, et al. Influence of personal-controlled desk fan on comfort in a hot and humid environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 95-101.
- [10] 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.
- [11] SEFTON JoEllen M, MCADAM J S, PASCOE David D, et al. Evaluation of 2 Heat-Mitigation Methods in Army Trainees. [J]. Journal of athletic training, 2016, 51(11): .
- [12] 杨丽红. 夏热冬冷地区居住建筑人行为对能耗影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
YANG Lihong. The influence of occupant behavior on building energy consumption of residential buildings in hot summer and cold winter zone[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [13] 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(5): 119-121.
ZHU Guangjun, ZHANG Xiaolaing, YAN Da. Effects of Operation Mode of Air Conditioning on Energy Consumption of Heating and Air Conditioning in Residential Buildings [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006(5): 119-121.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 建筑热环境测试方法标准: JGJ/T347-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China, Standard test method for thermal environment of buildings: JGJ/T347-2014[S]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2014.
- [15] ARENS E, ZHANG H, HUIZENGA C. Partial-and whole-body thermal sensation and comfort: Part I: Uniform environmental conditions[J]. Journal of thermal Biology, 2006, 31(1/2): 53-59.
- [16] 王渝东. “生理可调区”评价指标研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
WANG Yudong. Research on evaluation index of “Physiologically adjustable area” [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [17] ZHAO R. Investigation of transient thermal environments[J]. Building and Environment, 2007, 42(12): 3926-3932.
- [18] ZUO C, LUO L, LIU W. Effects of increased humidity on physiological responses, thermal comfort, perceived air quality, and sick building syndrome symptoms at elevated indoor temperatures for subjects in a hot-humid climate[J]. Indoor Air, 2021, 31(2): 524-540.
- [19] 中南地区建筑标准设计办公室. 外墙保温隔热系统建筑构造(一): ZL 外墙外保温系统 08ZJ104[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Central south Regional Building Standards Design Office. External wall thermal insulation system construction (1): ZL Exterior Wall Insulation System 08ZJ104 [M]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2010.