

沈阳地区高校宿舍供暖前后人体热舒适 实地调查与分析

王岳人,段冠因,于 靓

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究沈阳地区供暖前后高校宿舍热环境状况,提出供暖相关建议,缓解室内供暖温度高,浪费能源的现象. 方法 采用现场测试与问卷调查相结合的方式对室内物理环境参数进行实测同时对受试者展开主观问卷调查;分别建立不同阶段室内温度与实际平均热感觉投票结果 *MTS*、预测平均热感觉投票结果 *PMV* 的线性模型,对比分析不同研究阶段预测平均热感觉投票与实际平均热感觉投票间的偏离关系及不同研究阶段下受试者预测中性温度及实际中性温度间的差值. 结果 通过问卷统计发现部分高校寝室室内温度高于标准建议最高温度上限;计算结果表明:在供暖阶段人体感觉舒适的实际热中性温度均低于室内空气温度,预测中性温度均高于实际中性温度. 结论 沈阳地区高校宿舍冬季供暖阶段室内温度过高,可适当降低温度以达到节能的目的,实际平均热感觉与预测平均热感觉间存在较大偏差,在实际应用中应根据不同地区对 *PMV* 模型进行修正.

关键词 严寒地区;适应性热舒适;现场调查;节能

中图分类号 TU832.5 文献标志码 A

Investigation and Analysis of Human Thermal Comfort During Heating and Non-heating Periods in University Dormitories in Shenyang Area

WANG Yueren, DUAN Guannan, YU Liang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: This paper was proposed for heating guideline to avoid energy waste resulting in high indoor temperature. The thermal conditions of university dormitories during heating and nonheating periods were investigated by field test and questionnaire surveys, and the linear models of indoor temperature and actual average thermal sensation voting *MTS* and *PMV* in different stages were established respectively. By comparing and analyzing the deviation relationship

收稿日期:2018-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51408376)

作者简介:王岳人(1956—),男,教授,主要从事供热空调系统节能技术方面研究.

between the predicted mean thermal sensation vote and the actual mean thermal sensation vote in different study stages, and the difference between the predicted neutral temperature and the actual neutral temperature in different study stages, the indoor temperature of some university dormitories is higher than that of the upper limit of the recommended maximum temperature according to the questionnaire results. The calculation results showed that during the heating period, the thermal temperature that the body feels comfortable is lower than the indoor temperature, and the predicted temperature is higher than the measured temperature. The indoor temperature of university dormitory in Shenyang area is too high in winter during heating period, and the temperature can be lowered appropriately to save energy. There is a big deviation between the surveyed average thermal sensation and the predicted average thermal sensation, therefore, the PMV model should be modified when applying to different regions.

Key words: cold area; adaptive thermal comfort; field investigation; energy conservation

随着空调、供暖在人们生活中的广泛应用,相关学者对居住者感觉满意的室内热环境参数控制进行了大量研究,近百年以来,研究者通过热舒适实验,得到了相关数据,同时美国、英国等国家也进行了相关的实验室研究工作,并制定了一系列有关人体热舒适的国际标准,这些标准给出了相对狭窄的热舒适区^[1-2].但是在实际的建筑环境中,大量实测研究表明,人们对环境温度具有一定的适应性,而且实测的温度区域比现行国际标准建议的要广^[3-4],这是因为基于传统的稳态热环境设计理论忽视了人体生理在气候波动影响下的调节能力^[5],由此提出了适应性热舒适理论,适应性即实际建筑中的人对于所处环境的逐渐减小机体反应^[6],适应性包括行为调节、心理调节和生理调节^[7].热适应是适应性的一种,表示人体对冷热变化的一种短期适应能力^[8].适应性热舒适理论即在动态环境中,人通过与环境的相互适应,通过心理调节、生理调节,改变行为方式与周围环境相适应,从而达到对环境满意的状态^[9].适应性热舒适理论在符合人体生理需求,提高舒适性的前提下,扩大了感觉舒适的温度范围,从而减少了供暖空调等设备的运行能耗,以达到节能的目的^[10-11].国内热舒适的现场研究始于1998年,主要涉及哈尔滨、北京、广州、长沙、天津等地,调查的建筑类型多

样,样本数量不等^[12-13].但目前所做研究大多集中与冬夏等极端天气,其他域研究较少,笔者综合考虑地域性和季节性等因素,确定了选取沈阳地区供暖前后高校寝室为研究对象,通过对人体适应性热舒适的研究,获得更适宜的温度参数,为沈阳市冬季供暖标准提供数据支持,在满足舒适性的前提下达到节能的目的.

1 测试材料与方法

1.1 研究对象

笔者旨在研究沈阳市供暖前后室内热环境以及受试者对环境的热适应性,采用随机抽样的方法,选取3栋宿舍楼,测试时间选取在2017年10月至2018年4月,试验共分为5个阶段:供暖开始前、供暖前期、供暖中期、供暖末期、供暖结束后.实地调查包括问卷调查和室内热环境测试两部分^[14],测试5个阶段共获得有效调查问卷426份.

1.2 测试分析方法

1.2.1 测试方式与内容

本次测试所使用的仪器为多参数通风测试仪,仪器参数如表1所示.该仪器用于测量室内温度、湿度、风速以及大气压力,根据房间面积,本次测试选取两个测点,测试期间里受试者处于静坐状态,房间内基本参数分布均匀,每个测点的温度、湿度以及风速在距地

面0.6 m处测量^[15].

表1 多参数通风测试仪仪器参数

Table 1 Instrument data of multi-parameter ventilation tester

项目	空气温度/℃	相对湿度 RH/%	风速/(m·s ⁻¹)	大气压力/kPa	CO ₂ 体积分数/%
测量范围	-10~60	0~95	0~50	69~124	0~0.5
误差	±0.3	±3	±0.015	±0.002	±0.005

1.2.2 调查问卷

问卷调查包括主观问卷及客观问卷两部分. 客观问卷包含对室内温度、室内湿度、室内风速及室外温度的记录. 主观问卷包含背景调查及主观问题调查两部分, 背景调查包括受试者性别, 在沈阳生活时间以及家乡. 受试者背景不同对热环境的接受度不同, 背景调查为个体结果出现较大差异提供参考因素. 主观问题调查包括受试者的着装、冷热感觉、热舒适度、热满意度、室内期望温度、室内环境的可接受成度以及受试者的不适反应等内容. 受试者热感觉投票设置参照ASHRAE标准的七级标尺^[16]. 热期望标尺、热舒适标尺及湿感觉标尺设置参照热感觉投票标尺.

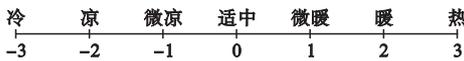


图1 热感觉投票标尺

Fig. 1 Voting gauge of hot feeling

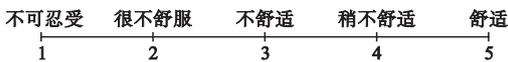


图2 热舒适投票标尺

Fig. 2 Voting gauge of comfort feeling

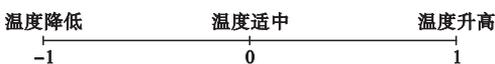


图3 热期望投票标尺

Fig. 3 Voting gauge for heating expectation

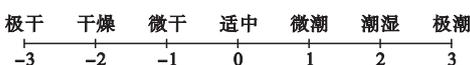


图4 湿感觉投票标尺

Fig. 4 Voting gauge for over humidification

2 研究结果与分析

高校寝室是学生们长时间停留的场所, 通过对沈阳市某高校宿舍进行实地调查研究, 得到供暖开始前、供暖前期、供暖中期、供暖末期和供暖结束后5个阶段寝室内的热环境相关参数等数据, 由此得到了高校宿舍人体热适应性变化规律以及人体的热中性温度.

2.1 室内环境状况

室内环境温度统计结果如表2所示, 在所有测试样本中, 冬季供暖阶段室内空气温度范围在18.6~25.8℃, 根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736—2012)^[17]中建议冬季供暖房间温度范围在18~24℃, 故测试房间均满足规范要求, 部分房间温度超过规范建议温度范围上限.

表2 室内环境温度统计表

Table 2 Statistical table for indoor environmental temperature

统计项目	供暖开始前温度	供暖初期温度	供暖中期温度	供暖末期温度	供暖结束后温度
最大值	23.6	24.9	25.8	24.3	23.2
最小值	17.9	18.9	18.7	18.6	17.8
平均值	21.6	23.6	23.5	22.6	21.1

分析表2可得出, 供暖开始前、供暖初期、供暖中期、供暖末期、供暖结束后的环境温度的标准差分别为2.89, 2.90, 2.85, 2.86, 2.90.

2.2 热感觉投票

热感觉投票统计结果如图5所示.

由图5可知: 5个阶段热感觉投票分布类似于正态分布. 供暖开始前, 有41.1%的受试感到温度适宜. 感觉温度稍凉的受试者占38.36%, 这一比例大于感觉偏暖的比例. 供暖阶段, 感觉温度适宜的受试者比例逐渐增加, 在供暖中期达到了最大值48.84%. 供暖阶段受试者热感觉在偏暖侧(投票值大于等于1)的比例增加感觉偏凉的比例变小. 数

据表明在供暖阶段宿舍内室温较高. 供暖结束后,随着室温降低,感觉偏凉的比例上升.

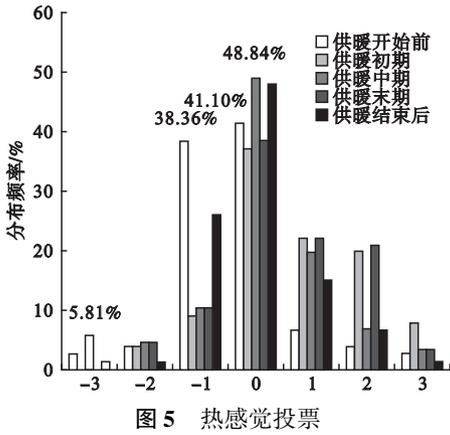


Fig. 5 Voting results of hot feeling

2.3 热期望投票

热期望投票即受试者对期望室内环境温度维持在何种水平进行的投票. 室内受试者热期望投票统计结果如图 6 所示.

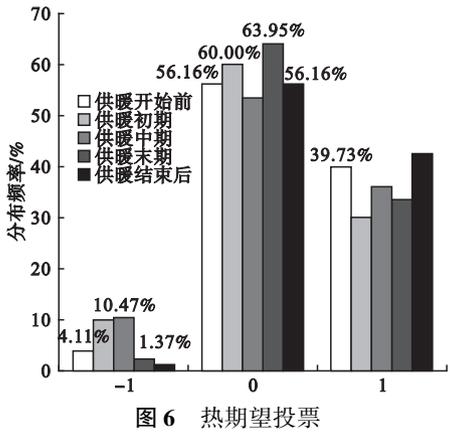


Fig. 6 Voting result for heating expectation

由图 6 可知:在五个测试阶段中期望温度不变的受试者人数最多. 供暖开始前及结束后两个阶段较多的受试者感觉室内温度较低,期望室内温度升高. 供暖前期与供暖末期期望室内温度不变的受试者人数有所增加,在供暖末期达到最多占比 63.95%. 供暖阶段期望室内温度升高的比例下降,期望室内温度降低的比例上升.

2.4 热舒适度投票

室内受试者热舒适度投票统计结果如图 7 所示.

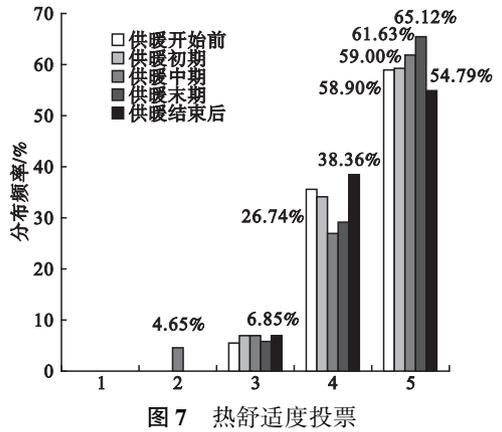


Fig. 7 Voting result for comfort expectation

由图 7 可知:多于 50% 的被调查者在房间内感觉舒适,在供暖末期感觉舒适的受试者人数最多占总人数的 65.12%,与图 5 中供暖末期被调查者期望室内温度不变的比例最大的结果相符. 同时在供暖阶段受试者投票为“舒适”的比例逐渐增加,也体现了被调查者对供暖环境的逐渐适应.

2.5 湿感觉投票

室内受试者湿感觉投票统计结果如图 8 所示.

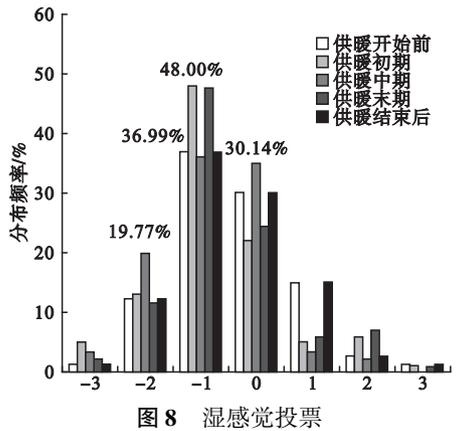


Fig. 8 Voting result for over humidification

由图 8 可知:湿感觉投票支持湿度适中和有点干燥的受试者所占比例更大,很少有受试者感到室内湿度较高. 供暖开始前,宿舍相对湿度高于其他阶段,有 30.14% 的受试者感觉室内湿度适宜,但仍有 36.99% 的受试者感觉有点干燥;在供暖阶段,随着室内温度的升高,室内的相对湿度逐渐降低,更多的

受试者感觉室内干燥;由此可以看出高校寝室室内相对湿度应有所提高。

2.6 中性温度

图9~图13是宿舍内5个阶段平均热感觉与室内空气温度的关系图。MTS为实际平均热感觉投票结果,PMV为预测平均热感觉投票结果。对5个阶段的平均热感觉和室内空气温度进行线性回归分析,得到各个阶段的热感觉回归曲线及线性方程。

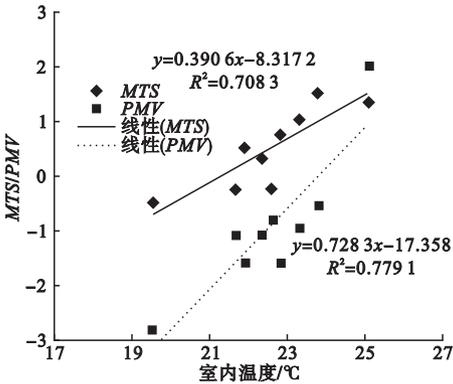


图9 供暖开始前空气温度与MTS、PMV关系图
Fig. 9 Relationship between air temperature and MTS, PMV before heating starts

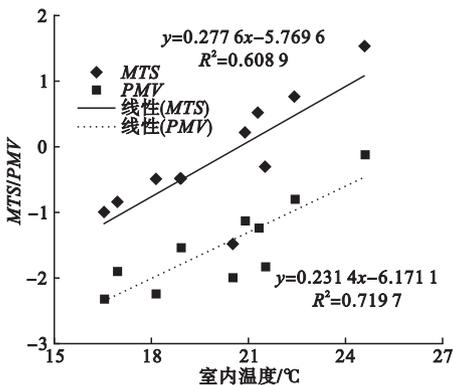


图10 供暖前期空气温度与MTS、PMV关系图
Fig. 10 Relationship between initial air temperature and MTS, PMV

供暖开始前:

$$y = 0.3906x - 8.3172, R^2 = 0.7083. (1)$$

供暖前期:

$$y = 0.2776x - 5.7696, R^2 = 0.6089. (2)$$

供暖中期:

$$y = 0.3623x - 7.6381, R^2 = 0.8071. (3)$$

供暖末期:

$$y = 0.4239x - 8.8518, R^2 = 0.717. (4)$$

供暖结束后:

$$y = 0.4336x - 9.1333, R^2 = 0.6675. (5)$$

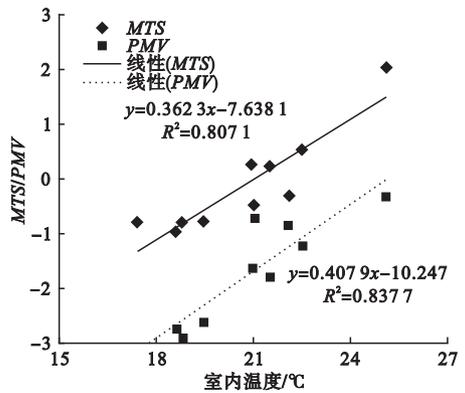


图11 供暖中期空气温度与MTS、PMV关系图
Fig. 11 Relationship between air temperature and MTS, PMV during heating period

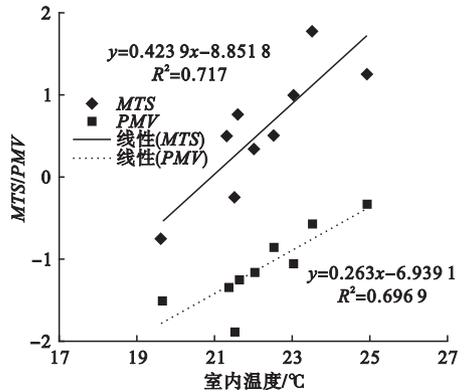


图12 供暖末期空气温度与MTS、PMV关系图
Fig. 12 Relationship between air temperature and MTS, PMV at the end of heating

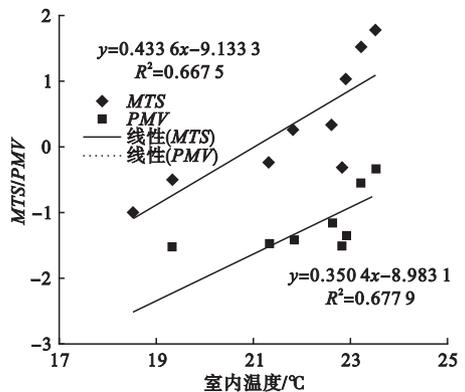


图13 供暖结束后空气温度与MTS、PMV关系图
Fig. 13 Relationship between air temperature and MTS, PMV after heating

根据实际平均热感觉投票拟合曲线方程,各阶段 *MTS* 取值为 0 时对应的室内温度为高校宿舍 5 个阶段的实际热中性温度,即受试者感觉温度适中时的室内温度,经计算各阶段的中性温度分别为: 21.3 °C, 20.78 °C, 21.08 °C, 20.88 °C, 21.06 °C, 供暖前室内温度较低,室内人员期望室内温度有所提高,故中性温度略高于其他阶段为 21.3 °C. 供暖初期室内空气温度逐渐升高,受试者对当前供暖环境并未适应,感觉室内温度温偏高,期望温度降低,因此其中性温度低于供暖开始前的中性温度. 在供暖中期,随着室外温度的降低,人们希望室内温度有所提升,故该阶段供暖温度略高于供暖初期. 供暖末期,室内外气温升高,导致中性温度下降至 20.88 °C.

对现场测试所得数据进行整理与编制程序,利用 MATLAB 软件计算预测平均热感觉 *PMV* 值^[18],将 *PMV* 值与室内温度进行拟合,得到 5 个研究阶段的线性曲线.

供暖开始前:

$$y = 0.728 3x - 17.358, R^2 = 0.779 1. \quad (6)$$

供暖初期:

$$y = 0.231 4x - 6.171 1, R^2 = 0.719 7. \quad (7)$$

供暖中期:

$$y = 0.407 9x - 10.247, R^2 = 0.837 7. \quad (8)$$

供暖末期:

$$y = 0.263x - 6.939 1, R^2 = 0.696 9. \quad (9)$$

供暖结束后:

$$y = 0.350 4x - 8.983 1, R^2 = 0.677 9. \quad (10)$$

同理,根据预测平均热感觉投票拟合曲线方程,各阶段 *PMV* 取值为 0 时所对应的室内温度即为高校宿舍 5 个阶段的预测热中性温度,计算结果分别为: 23.83 °C、26.67 °C、25.12 °C、26.58 °C、25.63 °C,由结果可知预测热中性温度均高于实际热中性温度,说明人体具有一定的适应性,同时该结果与相关学者得出的 *PMV* 与 *MTS* 存在较大偏差的结果相符.

总体来说,供暖阶段的中性温度均低于空气温度与预测中性温度,这表明人们由于自身的调节作用在波动的环境下对环境产生了适应性,在寒冷的冬季,对于室内温度的期望并不太高. 如果室内温度较高,会使受试者感到不舒适,还增大了能耗.

3 结 论

(1)从热感觉与热期望的数据中可看出高校宿舍在供暖阶段室内温度较高,在满足人体舒适性的前提下,应利用人体对环境的适应性,适当降低室内温度,以达到节能的目的.

(2)从热舒适度与可接受度投票的数据中可看出,高校寝室内温度较高,但由于人体适应性受试者仍能接受其所处的热环境.

(3)在 5 个研究阶段中,室内中性温度分别为 21.3 °C、20.78 °C、21.08 °C、20.88 °C、21.06 °C,供暖阶段被调查者实际中性温度均低于室内空气温度,高校宿舍内温度较高,应适当降低温度.

(4)预测平均热感觉与实测平均热感觉存在较大偏差. 在 5 个研究阶段室内预测中性温度分别为 23.83 °C、26.67 °C、25.12 °C、26.58 °C、25.63 °C,预测热中性温度均高于实测热中性温度,在实际应用中,应根据不同地区对 *PMV* 模型进行修正.

参考文献

- [1] 闫海燕. 基于地域气候的适应性热舒适研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
(YAN Haiyan. Study on adaptive thermal comfort on the basis of regions and climates of China [D]. Xi'an: Xi'an University of Architectural and Technology, 2013.)
- [2] 张宇峰,赵荣义. 建筑环境人体热适应研究综述与讨论[J]. 暖通空调,2010,40(9):38-48.
(ZHANG Yufeng, ZHAO Rongyi. Literature review and discussion on human thermal adaptation in built environment [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2010, 40(9):38-48.)
- [3] 王昭俊,宁浩然,吉玉辰,等. 严寒地区人体热适应性研究(4):不同建筑热环境与热适应现场研究[J]. 暖通空调,2017,47(8):

- 103-108.
(WANG Zhaojun, NING Haoran, JI Yuchen, et al. Human thermal adaptation in severe cold area(4): field study on thermal environment and thermal adaptation of different buildings [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2017, 47(8): 103-108.)
- [4] 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): 96-100.
(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]. Heating ventilating & air conditioning, 2010, 40(2): 96-100.)
- [5] 王昭俊, 李爱雪, 何亚男, 等. 哈尔滨地区人体热舒适与热适应现场研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 48-52.
(WANG Zhaojun, LI Aixue, HE Ya'nan, et al. Human thermal comfort and thermal adaptability in Harbin [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2012, 44(8): 48-52.)
- [6] 余娟. 不同室内热经历下人体生理热适应对热反应的影响研究 [D]. 上海: 东华大学, 2011.
(YU Juan. Study on the effects of physiological acclimatization on thermal response of people accustomed to different indoor thermal [D]. Shanghai: Donghua University, 2011.)
- [7] 李百战. 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, 46(5): 94-100.
(LI Baizhan. Biological experimental study of indoor environment on thermal comfort and thermal health objective evaluation [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2016, 46(5): 94-100.)
- [8] 王昭俊, 宁浩然, 任静, 等. 严寒地区人体热适应性研究(1): 住宅热环境与热适应现场研究 [J]. 暖通空调, 2015, 45(12): 57-62.
(WANG Zhaojun, NING Haoran, REN Jing, et al. Human thermal adaptation in severe cold area(1): field study in residential buildings [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2015, 45(11): 73-79.)
- [9] 陈慧梅, 张宇峰. 建筑环境热适应文献综述 [J]. 暖通空调, 2011, 41(7): 35-50.
(CHEN Huimei, ZHANG Yufeng. Thermal adaptation in the built environment: a literature review [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2011, 41(7): 35-50.)
- [10] 屈万英, 闫海燕, 杨柳, 等. 西安地区过渡季人体热舒适气候适应模型研究 [J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 51-56.
(QU Wanying, YAN Haiyan, YANG Liu, et al. Study on climate adaptation model for human thermal comfort in Xi'an in transition season [J]. Building science, 2014, 30(2): 51-56.)
- [11] 宁浩然. 严寒地区供暖建筑环境人体热舒适与热适应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
(NING Haoran. Research on human thermal comfort and thermal adaptation in heating building environments in severe cold area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.)
- [12] 屈万英, 王兴龙, 闫海燕, 等. 西安地区学生公寓过渡季热舒适性实地调查与分析 [J]. 建筑科学, 2013, 29(4): 25-30.
(QU Wanying, WANG Xinglong, YAN Haiyan, et al. Field survey and analysis on students' thermal comfort in dormitories in Xi'an in transition season [J]. Building science, 2013, 29(4): 25-30.)
- [13] 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, 26(10): 177-180.
(ZHOU Xiang, ZHU Yingxin, OUYANG Qin, et al. An experimental study on the effect of environmental control ability on human thermal sensation [J]. Building science, 2010, 26(10): 177-180.)
- [14] 张琳. 哈尔滨市住宅人体热适应性与热舒适性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(ZHANG Lin. Study on adaptation and thermal comfort of residents in Harbin [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [15] 李爱雪. 严寒地区高校建筑热舒适与热适应现场研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
(LI Aixue. Study on thermal comfort and thermal adaptation in university buildings in severe cold region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [16] ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017.
- [17] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(China Academy of Building Research. Design code for of heating ventilation and air conditioning of civil buildings; GB 50736-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T50785-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings; GB / T 50785-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)