

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.006



青海乡域中小学教室内学生冬季的热舒适性

王登甲^a, 王晗旭^a, 刘艳峰^a, 蒋婧^a, 刘加平^b

(西安建筑科技大学 a. 环境学院; b. 建筑学院, 西安 710055)

摘要:对青海乡域4所典型中小学校10间教室冬季室内温湿度、风速、黑球温度等热环境参数进行现场测试,同时对420余名青少年学生的衣着情况、热感觉评价等进行了主观问卷调查。对测试和调查结果进行统计分析,得到实测和预测热中性温度分别为13.8和14.5℃,热期望温度为16.2℃,90%的学生感到满意的舒适温度范围为15.8~18.7℃。在当地寒冷的气候条件、学生衣着习惯、心理期望及生理特性等因素影响下,中小学生对偏冷环境的适应性,提出可利用适应性PMV模型(aPMV)对中小学生对平均热感觉进行准确预测。可为乡域中小学教室冬季热环境设计提供依据。

关键词:热舒适;热环境;MTS;aPMV

中图分类号:TU119 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0032-06

Thermal comfort of students in rural primary and secondary schools in winter in Qinghai province

Wang Dengjia^a, Wang Hanxu^a, Liu Yanfeng^a, Jiang Jing^a, Liu Jiaping^b

(a. School of Environment; b. School of Architecture, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The subjective questionnaires were conducted on dressing condition and thermal sensation for more than 420 students of 10 classrooms in 4 rural primary and secondary schools in Qinghai. At the same time, the indoor and outdoor parameters were measured, such as temperature and relative humidity, air speed and globe temperature etc. The results showed that the measured and predicted thermal neutral temperature were 13.8 °C and 14.5 °C, respectively. The preferred temperature was 16.2 °C, and the thermal comfort temperature range accepted by 90% students was 15.8 °C ~ 18.7 °C. Students had the adaptability to partial cold environment under the facts of cold climate conditions, dressing habit, psychological expectation and physical characters. Adaptive PMV model (aPMV) was proposed to predict students' mean thermal Sensation. It could provide basis for the design of indoor environment in rural primary and secondary classrooms in winter.

Keywords: thermal comfort; thermal environment; MTS; aPMV

收稿日期:2016-03-04

基金项目:国家自然科学基金(51408462, 51378411, 51678468);陕西省科技计划项目(2014KCT-01, 2016JQ5016)

作者简介:王登甲(1984-),男,副教授,博士,主要从事建筑热环境调节与太阳能采暖研究,(E-mail) wangdengjia@xauat.edu.cn。

Received:2016-03-04

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51408462, 51378411, 51678468); Science Planning Subject of Shaanxi Province (No. 2014KCT-01, 2016JQ5016)

Author brief: Wang Dengjia (1984-), associate professor, PhD, main research interests: building thermal environment regulation and solar heating, (E-mail) wangdengjia@xauat.edu.cn.

基于稳态热平衡方程建立的 PMV 模型仅适用于均匀、稳定的热环境,但大量热舒适现场研究表明其与受试者实际平均热感觉存在较大偏差^[1]。基于 ASHRAE RP-884 项目提出的适应性热舒适理论,很好的解释了这种差异产生的原因^[2]。中国学者也进行了新的尝试,姚润明等^[3-4]将气候、季节、社会文化等影响人体热舒适的因素考虑在内,运用“黑箱”理论提出了预计适应性平均热感觉指标,并建立了“适应性 PMV 模型”(aPMV)。受经济发展水平影响,乡域地区无完善的集中采暖措施和明确的设计依据。而且,中国目前关于热舒适的研究主要集中在城市办公^[5-6]、居住^[7-9]、高校教室^[10-11]等建筑中,对乡域中小学教室涉及较少。已有研究表明,舒适的室内热环境更有利于提高学生的学习效率^[12-13],而过高的室内温度容易使学生感到头痛、胸闷,导致注意力下降^[14]。相比成年人,中小學生拥有更高的新陈代谢水平^[15],对室内热环境有其独特的要求,合理确定冬季教室内热舒适性参数,对学生身心健康及学习效率有着重要的影响。

本文通过对青海西宁乡域地区中小学教室热环境、中小學生热舒适的大量现场测试和实地调研,获得该地区中小学教室内学生冬季热中性温度、期望温度、舒适温度范围等,并提出适用于青海乡域中小学教学建筑的室内热环境评价模型,为中小学教室冬季热环境设计提供依据。

1 热舒适研究方法

1.1 调查对象概况

现场调研于 2015 年 12 月 5—13 日进行,处于一年中教室使用的最冷时段,选取青海西宁地区 4 所乡域中小学校的 10 间教室,在对室内热环境参数进行测量的同时对 420 名中小學生进行问卷调查,其中男生 214 名(占 50.8%),女生 207 名(占 49.2%),年龄在 10~15 岁之间,平均年龄为 12.6 岁。测试教室内景如图 1 所示。

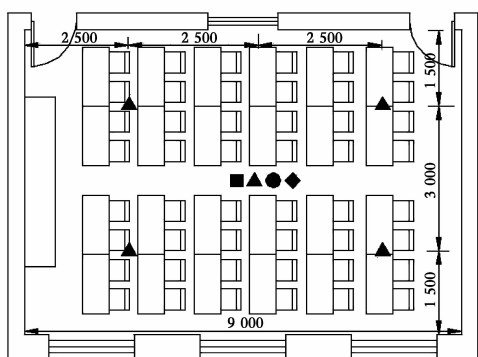


图 1 测试教室内景

Fig. 1 Interior of test classroom

1.2 环境参数测试

测试的室内参数有:空气温湿度、风速、黑球温度等;室外参数有:空气温湿度、太阳辐射强度、风速。主要仪器有 TBD-1 型太阳辐射仪、TR-72ui 自记式温度计、TR102S 黑球温度计、ZRQF-F30 风速仪,每隔 10 min 自动记录一次。其中 TBD-1 型太阳辐射仪布置于屋顶,四周无遮挡;室内温湿度采用五点法平均布置在教室内,并以锡箔纸遮蔽;室内风速、黑球温度布置一个测点,位于教室中间位置;室外温湿度测点位于屋面背阴处。室内测点高度均为 1.1 m,热环境参数测点布置如图 2 所示。



注: ▲ 温湿度测点($H=1.1$ m) ■ 风速探头($H=1.1$ m)
◆ CO_2 浓度测点($H=1.1$ m) ● 黑球温度测点($H=1.1$ m)

图 2 室内热环境参数测点布置

Fig. 2 Arrangement of measuring points of thermal environment parameters

1.3 主观问卷

问卷内容包括:1)被调查学生的年龄、衣着情况等客观信息;2)调查时刻学生的热感觉、舒适感等对室内热环境的主观感受,热感觉投票采用 ASHRAE 7 级标尺;3)热接受度、期望度调查。

1.4 热舒适评价指标

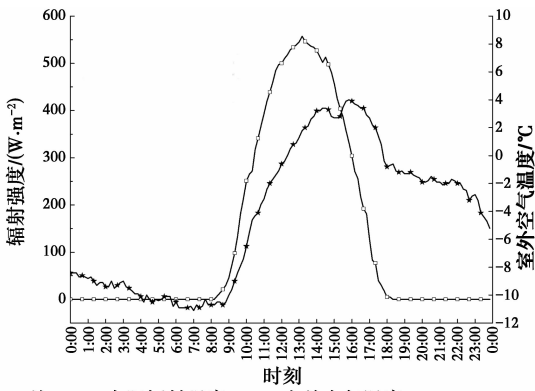
冬季围护结构内壁面温度较低,当相对湿度在热舒适的范围内、且室内风速很低时,人体热感觉同时受空气温度和平均辐射温度的影响,应采用操作温度 t_o 作为热舒适评价指标^[16]。

2 测试结果与分析

2.1 室内外热环境参数

测试期间均为晴天,室外气象条件相近,选取 12 月 8 日的室外热环境参数进行分析,如图 3 所示。

由图 3 可知,当日室外气温变化范围为 $-11.1 \sim -4.2$ °C,平均值约为 -4.0 °C;室外相对湿度变化范围为 $16\% \sim 73\%$,平均值约为 45% ;日太阳辐射持续 $9 \sim 10$ h,平均太阳辐射强度为 306 W/m^2 ,最大



注: ——太阳辐射强度 ——室外空气温度

图3 室外空气温度及太阳辐射强度

Fig. 3 Outdoor air temperature and solar radiation

值出现在13:00左右,为 557 W/m^2 。可见,该地区室外气候寒冷,但太阳能资源丰富。

对室内环境参数的统计结果见表1, t_a 为空气温度, t_o 为操作温度, t_r 为平均辐射温度, φ 为相对湿度, v 为风速。 t_o 的分布频率如图4所示。

表1 室内热环境参数统计表

Table 1 Indoor thermal environment parameter table

| 统计值 | $t_a/^\circ\text{C}$ | $t_o/^\circ\text{C}$ | $t_r/^\circ\text{C}$ | $\varphi/\%$ | $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|----------------------------------|
| 平均值 | 15.9 | 15.6 | 15.4 | 41 | 0.10 |
| 标准偏差 | 3.5 | 3.9 | 4.1 | 8.0 | 0.05 |
| 最大值 | 23.1 | 23.5 | 23.8 | 61 | 0.39 |
| 最小值 | 6.2 | 5.6 | 5.2 | 19 | 0 |

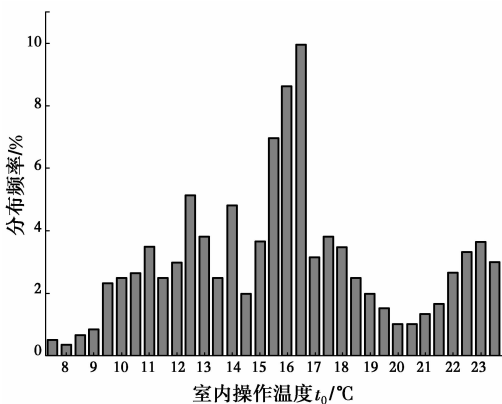


图4 昼间室内操作温度 t_o 的分布频率

Fig. 4 The distribution frequency of daytime indoor operating temperature t_o .

由表1可知,昼间(7:00—18:00)教室内空气温度变化范围为 $6.2\sim 23.1\text{ }^\circ\text{C}$,平均值为 $15.9\text{ }^\circ\text{C}$,低于《中小学校设计规范》中的规定值 $18\text{ }^\circ\text{C}$ ^[17];室内相对湿度范围为 $19\%\sim 61\%$,平均值为 40% ,绝大多数在 $30\%\sim 60\%$ 的正常范围内,满足卫生要

求^[18];风速 $v\leq 0.2\text{ m/s}$ 的样本占 94.2% 。由图4可知,上课期间室内操作温度 t_o 位于 $5.6\sim 23.5\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,平均值为 $15.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 新陈代谢率及服装热阻

G. HAVENITH 通过研究给出了9~18岁不同年龄中小学生在不同课程类型下所具有的代谢率^[19]。中小學生新陈代谢率取值 $1.2\text{ met}(70\text{ W/m}^2)$ 。

统计分析学生衣着情况,参照ASHRAE标准计算服装热阻值,获得其分布频率如图5所示。

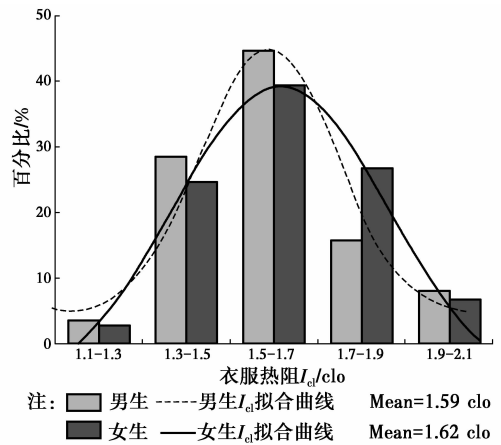


图5 学生服装热阻分布频率

Fig. 5 The distribution frequency of students' clothing thermal resistance

由图5可知,中小学生的服装热阻主要集中在 $1.3\sim 1.9\text{ clo}$ (约占 90%),平均值高达 1.6 clo 。主要由于青海西宁地处严寒地区,室外气温低,学生普遍穿着较厚的衣物,通过自身行为调节以适应当地寒冷的气候条件;且学生频繁进出教室,即使室内温度较高,也没有频繁更换衣物的习惯,这一点与城市居住和办公建筑有很大差别。此外,女生服装热阻平均值略高于男生,分别为 1.62 clo 和 1.59 clo ,说明女生更期望温暖的环境。

2.3 热感觉及热中性温度

学生热感觉投票 TSV (Thermal Sensation Vote) 采用ASHRAE7级标度表示,青海乡域中小学教室内学生热感觉投票分布频率如图6所示。

由图6可知,学生热感觉投票值0、+1所占比例为 59.8% ,男女生热感觉投票平均值分别为 0.46 和 0.55 。可见,由于学生衣着较厚、教室普遍有取暖措施,学生对室内热环境的整体感觉偏暖。

由室内空气温度、相对湿度、风速、平均辐射温度、服装热阻和新陈代谢率计算得到预测平均投票值PMV。采用温度频率法^[16],得到每个温度区间

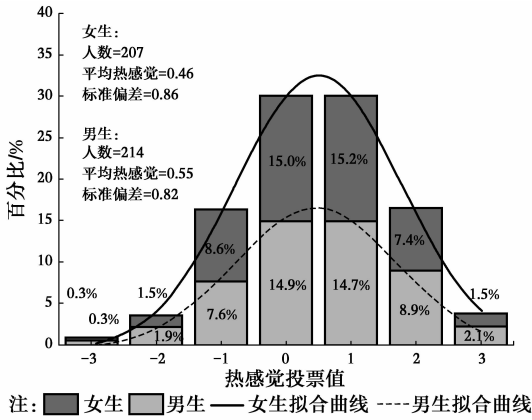


图 6 学生热感觉投票分布频率

Fig. 6 The distribution frequency of students' thermal sensation vote

内实测平均热感觉值 MTS (Mean Thermal Sensation)。将 MTS 和 PMV 与操作温度 t_o 分别进行线性回归,结果见图 7。

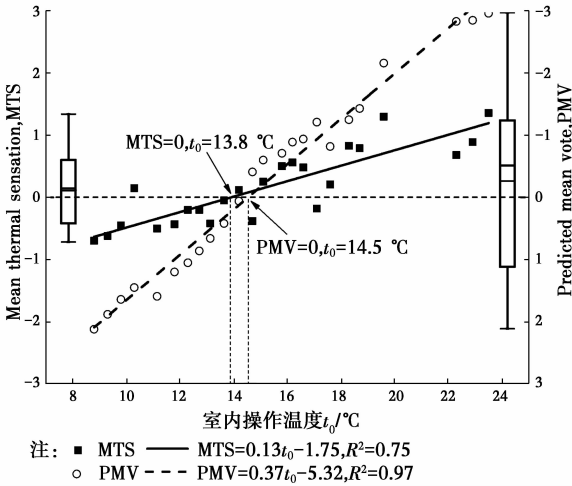


图 7 热中性温度的计算

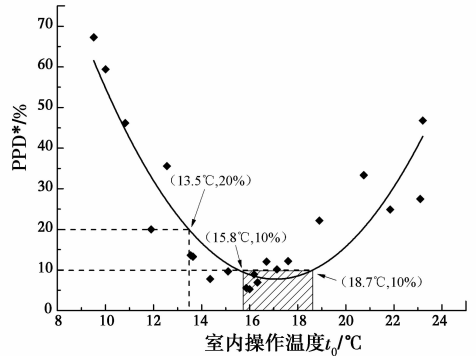
Fig. 7 Calculation of thermal neutral temperature

由图 7 可知,当 $MTS=0$ 、 $PMV=0$ 时,实测和预测中性温度分别为 $13.8\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $14.5\text{ }^\circ\text{C}$; MTS 曲线的斜率明显小于 PMV 曲线的斜率。说明由于该地区冬季室外气温低,加之衣着量普遍较大,长期生活于此的学生通过自身调节形成了对偏冷环境的适应性,其实际热中性温度并没有预测值高,对温度变化的敏感程度也比预测值要小。

MTS 与 PMV 之间存在“剪刀差”现象的原因是,教室虽有取暖,但并非标准的采暖系统,使得室内热环境仍处于非稳态条件且波动较大,而中小学生对这种非稳态环境的适应性使得 PMV 模型并不能准确预测学生的平均热感觉。

2.4 热接受率和热舒适区间

计算某一温度下的热不可接受率 PPD^* (热感觉投票值为 -3 、 -2 、 2 、 3 的学生占总投票人数的百分比),将 PPD^* 与室内操作温度 t_o 进行回归分析: $PPD^* = 0.93t_o^2 - 32.05t_o + 281.46$, 相关系数 $R^2 = 0.79$,如图 8 所示。



注: ◆ PPD^*
— $PPD^* = 0.93t_o^2 - 32.05t_o + 281.46, R^2 = 0.79$

图 8 不可接受率与室内操作温度 t_o 的回归分析

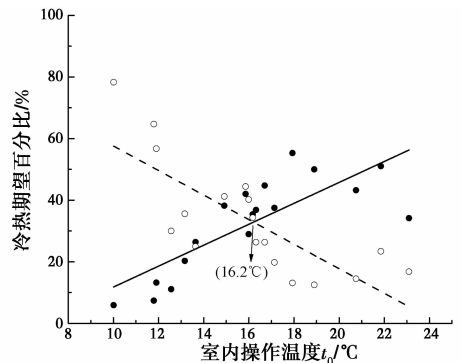
Fig. 8 Regression analysis of unacceptable rates and room temperature t_o .

由图 8 可知,冬季 80% 的中小学生对可接受的温度下限为 $13.5\text{ }^\circ\text{C}$, 90% 的中小学生对感到满意的舒适温度范围为 $15.8\sim 18.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。

结合图 4 可知,舒适温度范围 $15.8\sim 18.7\text{ }^\circ\text{C}$ 约占昼间教室内温度分布的 45%,即由于采暖水平的不同,仍有一半的时刻室内温度过低或维持过高,室内热环境难以满足热舒适需求,需要进一步改善。

2.5 热期望温度

将室内操作温度 t_o 与冷热期望百分比进行线性回归,两条直线的交点即为期望温度,如图 9 所示。



注: ● want cooler,wc ○ want warmer,ww
— $WC^* = -5.28t_o - 48.91, R^2 = 0.83$
--- $WW^* = -3.96t_o - 89.19, R^2 = 0.68$

图 9 期望温度的计算

Fig. 9 Calculation of expected temperature

由图 9 可知,期望温度为 $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (以 t_0 表示),在寒冷地区冬季学生趋向于达到温暖的感觉,所期望的温度比热中性温度($t_0=13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$)高 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 讨论

3.1 适应性预测平均热感觉 aPMV 模型

如前所述,由于教室内热环境是非稳态的,PMV 并不能准确预测学生的平均热感觉,人体自身的适应性是引起 MTS 和 PMV 产生差异的主要原因。姚润明等^[3]提出的预计适应性平均热感觉 aPMV 模型 (Adaptive Predicted Mean Vote model),采用自适应系数 λ (λ 值反映了人体采取的自适应调节水平高低或自适应机会的多少)将 PMV 与 aPMV 联系起来,用以解释 MTS 和 PMV 之间的差异,见式(1):

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda \times PMV} \quad (1)$$

利用最小二乘法求得 $\lambda = -0.53$ ($PMV < 0$), $\lambda = 0.3$ ($PMV > 0$),由 λ 和 PMV 值可计算得到 aPMV 指标,如图 10 所示。

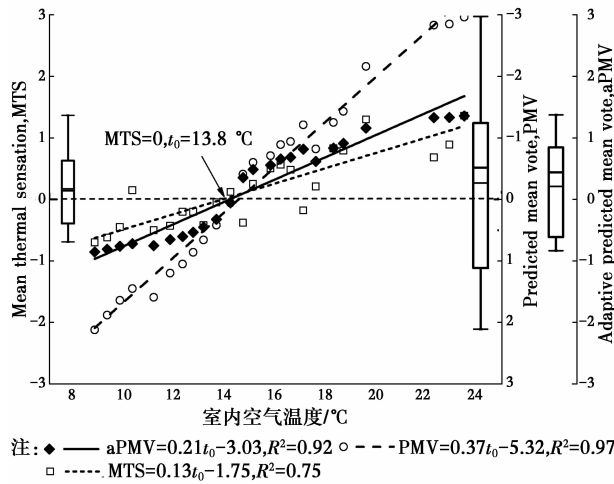


图 10 PMV、MTS 与室内操作温度的关系对比

Fig. 10 A contrastive analysis of the relationship between PMV, MTS and indoor operating temperature

由图 10 知,对偏冷和偏热的热环境采取不同水平的自适应调节后得到的 aPMV 模型能够较好的预测学生平均热感觉。分析发现,相比于 $PMV > 0$ 的偏热环境中, $PMV < 0$ 时的偏冷环境中 λ 的绝对值更大,说明学生对偏冷的环境有更强的适应性,而对偏热环境的适应性较差。因此,冬季室外寒冷的气候条件使长期生活于此的学生形成了对偏冷环境的适应性,此时如果室内温度过高,这种适应性将被破坏,不仅浪费能源,也容易引起学生的热不适感。

3.2 与其他研究结果的比较

与其他冬季现场研究结果^[8-11]相比,本文模型中的平均热感觉随温度变化的斜率较低(0.13),即中小学生对温度的敏感程度要低于其他研究结果;同时乡域中小学教室内学生的中性温度、舒适温度均较低。分析其原因是:该地处于严寒气候区,长期生活于此且频繁出入室内外的中小学生对冷环境的心理适应性;乡域中小学生对衣着量普遍较大,且频繁进出教室并没有更换衣物的习惯,形成了对冷环境的行为适应性;此外,相比成年人,中小学生对拥有更高的新陈代谢水平,使得其对热环境的敏感度要低于成年人。

严寒地区乡域中小学教室冬季室内设计温度的取值应结合当地的气候条件,充分考虑中小学生的衣着习惯、心理期望、生理特性等因素的特殊性,提出适合于中小学生的热舒适标准。

4 结论

1)青海乡域中小学生对冬季服装热阻普遍较大(平均值为 1.60 clo),其中女生衣着水平高于男生。主要原因是室外气温很低,学生频繁出入室内外,即使室内温度较高,也没有频繁更换衣服的习惯。这一点与城市居住和办公建筑有很大差别。

2)冬季中小学生的热中性温度为 $13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,期望温度为 $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,80%学生接受的温度下限为 $13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,90%感到满意的舒适温度范围为 $15.8\sim 18.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。较大的服装热阻、偏冷环境对心理期望的调节作用以及新陈代谢旺盛的生理特性,使得乡域中小学生对中性温度、舒适温度低于城市其他冬季现场研究结果。

3)青海乡域地区中小学教室取暖不属于标准的采暖系统,室内温度非稳态且波动较大,学生自身的适应性使得 PMV 与 MTS 仍存在较大偏差。由实测数据计算得到自适应系数 $\lambda = -0.53$ ($PMV < 0$)、 $\lambda = 0.30$ ($PMV > 0$)时的适应性 aPMV 模型可对该类地区中小学生的平均热感觉进行准确预测。分析 λ 值大小可知,学生对偏热的环境较为敏感,对偏冷的环境有较强的适应性。

参考文献:

- [1] DE DEAR R J, BRAGER G S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55 [J]. Energy and Building, 2002, 34 (6): 549-561.

- [2] DE DEAR R J, BRAGER G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference[J]. ASHRAE Transaction, 1998, 104(2):146-167.
- [3] YAO R M, LI B Z, LIU J. A theoretical adaptive model of thermal comfort : Adaptive predicted mean vote (aPMV) [J]. Building and Environment, 2009, 44 (10): 2089-2096.
- [4] 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/T 50785—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
People's Republic of China Ministry of Housing and Urban Rural Construction. Civil building indoor thermal and humid environment evaluation criteria: GB/T50785-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012 (in Chinese)
- [5] 叶晓江, 周正平, 连之伟, 等. 不同城市自然通风建筑热舒适状况研究[J]. 建筑节能, 2007, 35(4): 55-57.
YE X J, ZHOU Z P, LIAN Z W, et al. Study on thermal comfort of neutral ventilated buildings in different city [J]. Construction Conserves Energy, 2007, 35(4): 55-57. (in Chinese)
- [6] 王怡, 刘加平. 空调房间冬季室内致适参数的分析与研究[J]. 暖通空调, 2000, 30(3): 12-14.
WANG Y, LIU J P. Thermal comfort properties for air conditioned space in winter [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(3): 12-14. (in Chinese)
- [7] WANG Z. A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin [J]. Building and Environment, 2006, 41: 1034-1039.
- [8] 曹彬, 朱颖心, 欧阳沁, 等. 不同气候区住宅建筑冬季室内热环境及人体热适应性对比[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4): 499-503.
CAO B, ZHU Y X, Ou Yangqin. Indoor thermal environment and human thermal adaption in residential buildings in various climate zones during the winter [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology) , 2012, 52(4): 499-503. (in Chinese)
- [9] 王昭俊, 方修睦, 廉乐明. 哈尔滨市冬季居民热舒适现场研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(4): 500-504.
WANG Z J, FANG X M, LIAN L M. Field experiments on occupant thermal comfort in Harbin [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(4): 500-504. (in Chinese)
- [10] 李敏, 曹斌, 欧阳沁, 等. 北京地区大学教室热舒适长期调查研究[J]. 暖通空调, 2014, 44(12): 67-70.
LI M, CAO B, OUYANG Q, et al. Long-time investigation on indoor thermal comfort in campus buildings in Beijing [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2014, 44(12): 67-70. (in Chinese)
- [11] 李百战, 刘晶, 姚润明. 重庆地区冬季教室热环境调查分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(5): 115-117.
LI B Z, LIU J, YAO R M. Investigation and analysis on classroom thermal environment in winter in Chongqing [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007, 37 (5): 115-117. (in Chinese)
- [12] MARCHAND C G, NARDI M N. The impact of the classroom built environment on student perceptions and learning[J]. Journal of Environmental Psychology, 2014, 40: 187-197.
- [13] CUI W L, CAO G G, PARK J H, et al. Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance [J]. Building and Environment, 2013, 68: 114-122.
- [14] TURUNENA MARI, TOYINBOA OLUYEMI. Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2014, 217: 733-739.
- [15] 李百战, 郑洁, 姚润明, 等. 室内热环境对人体热舒适 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012.
LI B Z, DENG J, YAO R M. Indoor thermal environment on human thermal comfort [M]. Chongqing, Chongqing University Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 王昭俊. 现场研究中热舒适指标的选取问题[J]. 暖通空调, 2004, 34(12): 39-42.
WANG Z J. Selection of thermal comfort indexes in the field study [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34(12): 39-42. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中小学校设计规范:GB50099—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
People's Republic of China Ministry of housing and urban rural construction. Design specification of primary and secondary schools: GB50099-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [18] 刘加平. 建筑物理[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
LIU J P. Architectural Physics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese)
- [19] HAVENITH G. Metabolic rate and clothing insulation data of children and adolescents during various school activities [J]. Ergonomics, 2007, 50(10): 1689-1701.