

陕西关中乡域中小学教室冬季热舒适调查研究

王登甲¹, 王晗旭¹, 刘艳峰¹, 刘加平²

(1. 西安建筑科技大学环境学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 对陕西关中地区 4 所乡域中小学校 14 间教室冬季室内温湿度、空气流速、黑球温度等参数进行了现场测试, 并以问卷方式调查了中小学生的着装情况及对热环境的主观评价等. 对调查测试结果进行统计回归, 获得该地区中小学生在冬季热中性温度为 14.4℃, 热期望温度为 15.3℃, 80% 学生可接受的温度下限为 10.6℃, 90% 学生感到满意的舒适温度范围为 12.7~16.9℃. 结果表明在当地气候条件及学生衣着、心理期望、生理特性等因素综合影响下, 中小学生对冷环境形成了较强的适应性, 根据该实际情况给出了可预测中小学生在平均热感觉的 *aPMV* 适应性模型, 自适应系数 $\lambda = -0.42$ ($PMV < 0$), $\lambda = 0.28$ ($PMV > 0$). 研究所得各类温度及自适应模型对陕西关中地区乡域中小学教室热环境设计与评价提供依据.

关键词: 中小学教室; 热环境; 热舒适; 现场调查; *aPMV*

中图分类号: TU119

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-0277-05

Field study on thermal comfort of township and villages primary and secondary classrooms in winter in Guanzhong region, Shaanxi province

WANG Dengjia¹, WANG Hanxu¹, LIU Yanfeng¹, LIU Jiaping²

(1. School of Environment, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Architecture, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Field survey is made about the winter indoor temperature, air velocity and black ball temperature of 14 classrooms in 4 township primary and secondary schools in mid-Shaanxi Province, and a questionnaire survey is also made on the dressing condition and subjective evaluation of thermal environment of students in these schools. Through the analysis of the survey results, the acceptable neutral temperature of the students in winter is 14.4℃, and the preferred temperature is 15.3℃. The lowest temperature that 80% students can accept is 10.6℃ and the thermal comfort temperature range that 90% students feel satisfied is 12.7~16.9℃. The results show that the primary school students formed a strong sense of adaptability to the local climate conditions influenced by the factors such as the students' dressing condition, psychological expectation and physical characters. According to the actual condition of the experiment, we figure out the predictable adaptive *aPMV* model that can predict the primary and secondary students' mean thermal sense, adaptive coefficient $\lambda = -0.42$ ($PMV < 0$), $\lambda = 0.28$ ($PMV > 0$). The different kinds of temperature and the adaptive model getting from the research provided the basis about the indoor thermal environment design and evaluation of primary and secondary schools in Guanzhong region of Shaanxi province.

Key words: primary schools; thermal environment; thermal comfort; field experiments; *aPMV*

目前, 在热舒适研究领域国际通用的热舒适标准为 ISO7730^[1]和 ASHRAE55-2013^[2], 而这两个标准并未考虑气候变化、适用人群等产生的差异. 近年来, 国内外学者进行的大量现场研究表明, 人们对室内热环境的实际热感觉与上述两个标准的预测结果存在明显差异, 而引起差异的主要原因可归结为人们对气候的行为、生理适应性及心理期望值^[3]. 我国室内热舒适的研究多集中在各气候区的居住、办公等类型建筑^[4-8], 关于教学建筑也主要针对的是高校^[9-10], 而对于中小学教室研究较少, 乡域中小学教室则更是鲜有关注.

人员密度大、使用时段集中、以青少年学生为主是中小学教室的主要特征, 有别于居住、办公、

高校教室等建筑的室内热环境需求及评价方法. 而受经济技术水平限制, 乡域中小学与城镇中小学的室内热环境需求也存在差异. 因此, 以陕西关中地区乡域中小学教室为对象, 对其室内外热环境参数进行了现场测试, 同时以问卷方式调查了学生对热环境的主观评价. 以期获得该地区乡域中小学教室内学生冬季的中性温度、期望温度、舒适的温度范围等, 提出适用于乡域中小学教学建筑的室内热环境评价分析模型.

1 调查概况

1.1 调查对象

调查于 2014 年 11 月中旬至 2015 年 1 月初进

收稿日期: 2015-07-09 修改稿日期: 2016-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51408462, 51378411); 教育部博士点专项基金项目资助 (20136120120003); 陕西省重点科技创新团队基金项目资助 (2014KCT-01)

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

行,选取陕西关中地区4所乡域中小学校的14间教室进行了现场测试和问卷调查,发放调查问卷440份,收回有效问卷421份,有效收回率95.7%。其中男生196人(占46.6%),女生225人(占53.4%),年龄在9~16岁之间,平均年龄为12.6岁。

1.2 主观问卷调查

问卷内容包括:①学生性别、年龄、衣着情况等基本信息;②调查时刻学生的热感觉、湿感觉、舒适感等主观感受,热感觉投票采用ASHRAE 7级标尺,热舒适投票采用5级标尺;③期望度(以Preference标度表示,-1凉一些,0不变,1暖一些)调查。

1.3 测试仪器及布置

测试参数主要包括教室内外空气温湿度、室内黑球温度、空气流速和壁面温度等,所用仪器主要有TR-72ui自记式温度计、TR102S黑球温度计、ZRQF-F30风速仪、CENTER309热电偶测温仪等,间隔10min自动记录一次。测点布置采用五点法,距离地面垂直高度为1.1m(代表坐姿受试者的颈部高度);窗户、外墙的温度分别测试5个点,内墙、地面和屋顶在其中心位置各测试1个点。

1.4 热舒适评价指标

当相对湿度在热舒适范围内,且室内空气流速较低时,宜采用操作温度 t_o 作为热舒适指标来描述寒冷地区冬季人体热感觉^[11]。 t_o 由下式计算得到^[12]:

$$t_o = (h_r t_{mr} + h_c t_a) / (h_r + h_c) \quad (1)$$

式中: t_{mr} 为平均辐射温度,℃; t_a 为室内空气温度,℃; h_c 、 h_r 分别为对流换热系数和辐射换热系数, W/(m²·K)。坐姿时 h_c 取值4.0^[12];在室温条件下 h_r 取值4.7^[2]。平均辐射温度由下式计算^[12]:

$$t_{mr} = t_g + 2.44v^{0.5}(t_g + t_a) \quad (2)$$

式中: t_g 为黑球温度,℃; v 为室内空气流速, m/s。

2 调查结果与分析

2.1 新陈代谢率及服装热阻

相比于成年人,青少年新陈代谢旺盛,体温通常高于成年人约0.5℃^[4]。ASHRAE给出的代谢率是以普通成人为对象获得的^[2];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活动量和代谢率^[13]。本文中小学生年龄均在9~16岁之间,且主要坐着看书、写字、听讲及讨论问题等,结合上述研究,中小学生新陈代谢率选定为坐姿轻微活动者所具有的代谢水平1.2 met (70 W/m²)。

所调查教室座椅为木椅,不考虑其对服装热阻的附加值^[14]。受试者总服装热阻值由式(3)计算^[12]:

$$I_{cl} = 0.835 \sum_i I_{clu,i} + 0.161 \quad (3)$$

式中: I_{cl} 为单人整套服装的热阻, clo, 1clo=0.155℃·m²/W; $I_{clu,i}$ 为单件服装的热阻, clo。受试者所穿服装热阻值的分布频率如图1所示。

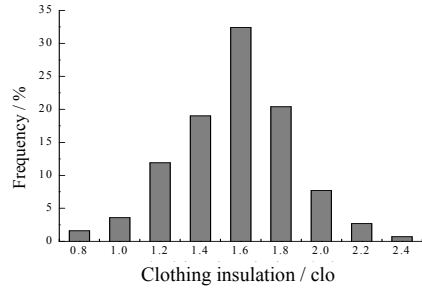


图1 服装热阻分布频率

Fig.1 Frequency distribution of clothing insulation value

由图1可知,服装热阻主要集中在1.2~1.8clo之间,频率最大值出现在1.6clo,热阻平均值为1.56clo,远高于ASHRAE55-2013^[2]舒适标准规定的冬季服装热阻值0.9clo。主要由于该地区冬季室外气温低,且乡域中小学教室大多无采暖措施,学生长期处于低温环境中,普遍穿着较厚的衣服御寒,通过自身行为调节以适应该地寒冷的气候条件;同时,进出教室的学生并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。

2.2 室内外热环境参数

测试期间室外温度变化范围为:-4.9~10.2℃,平均值约为2.0℃;室外相对湿度变化范围为:20%~65%,平均值约为45%。

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_{mr} 为平均辐射温度,℃; ϕ 为相对湿度,%; v 为室内空气流速, m/s。 t_o 、 ϕ 和 v 的分布频率如图2-4所示。

表1 室内热环境参数统计表

Tab.1 Statistics of indoor environment parameters

	t_a /℃	t_o /℃	t_{mr} /℃	ϕ /%	v /m·s ⁻¹
平均值	12.9	12.3	11.7	40	0.085
标准偏差	2.6	2.2	2.1	6.0	0.07
最大值	17.8	17.3	16.1	55	0.35
最小值	7.6	6.3	5.2	16	0

由图2-4可知,上课期间室内操作温度 t_o 位于6.3~17.3℃之间,且主要集中在10.5~13.5℃(约占70%),平均值为12.3℃。室内相对湿度范围为16%~55%,平均值为40%,绝大多数在30%~60%的正常范围内^[15],满足卫生要求。风速范围为0~0.35 m/s,平均值为0.085 m/s,其中低于0.2 m/s的样本量占92.8%。

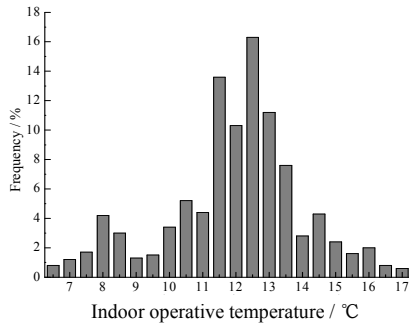


图 2 操作温度 t_o 的分布频率

Fig.2 Frequency distribution of operative temperature

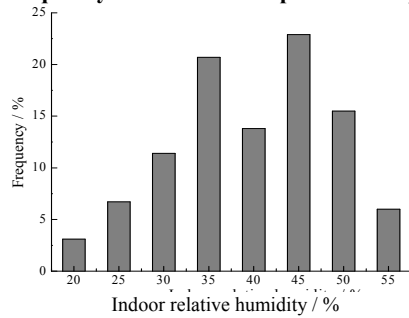


图 3 相对湿度的分布频率

Fig.3 Frequency distribution of relative humidity

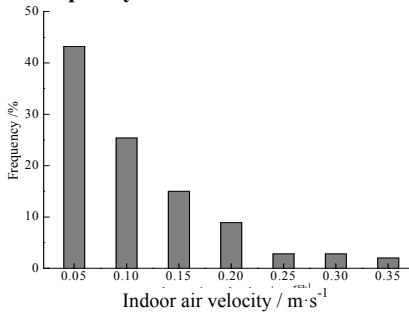


图 4 室内空气流速 v 的分布频率

Fig.4 Frequency distribution of air velocity

2.3 热中性温度

人对风速的感觉阈为 0.2 m/s, 选取风速 $v \leq 0.2$ m/s 的样本 (占总样本的 92.8%), 采用温度频率法^[11]分别回归出实测的热感觉投票平均值 MTS (Mean Thermal Sensation) 随操作温度 t_o 、空气温度 t_a 变化的曲线 (拟合曲线见图 7), 线性回归方程分别为: $MTS=0.178t_o-2.561$ (相关系数 $R^2=0.765$); $MTS=0.181t_a-2.745$ (相关系数 $R^2=0.778$). 当 $MTS=0$ 时由 t_o 表示的中性温度为 14.4°C, 大于冬季室内操作温度平均值 12.3°C, 这与国际热舒适数据库统计结果相近^[16], 说明了人对热环境的生理适应性. 当 $MTS=0$ 时由 t_a 表示的中性温度为 15.2°C, 低于严寒和寒冷地区冬季中小学教室建议值 16~18°C^[17].

人体的新陈代谢率越小, 对温度变化感受越敏感^[4]. 学生在教室内的活动主要为坐着学习, 活动量相对较小, 由于冬季学生的衣着量普遍较大, 热感觉随室内温度的变化并不太敏感, 当室内空气温度每改变 1°C, 其热感觉相应仅改变 0.181 个标度.

2.4 热接受率

将操作温度及其对应的可接受率 (热感觉投票值为 -1、0、1 时, 表示对此时的热环境可接受) 采用抛物线回归, 即得到热接受率与操作温度的关系, 如图 5 所示.

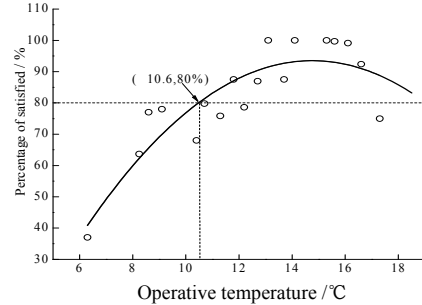


图 5 热接受率

Fig.5 Distribution of thermal acceptability

ASHRAE 标准分别将 80%、90%的室内人员感到满意的热环境确定为可接受及舒适的热环境. 由图 5 可知, 以 80%界定, 冬季中小学生对可接受温度下限为 10.6°C (以 t_o 表示); 90%的中小学生对感到满意的舒适温度范围为 12.7~16.9°C.

2.5 热期望温度

期望温度的计算采用概率统计法: 以 0.5°C 为组距统计所期望的热环境比此刻较暖和较凉的人数占总人数的比例, 并将热期望和冷期望作线性回归, 两条曲线的交点所对应的温度即为期望温度, 如图 6 所示.

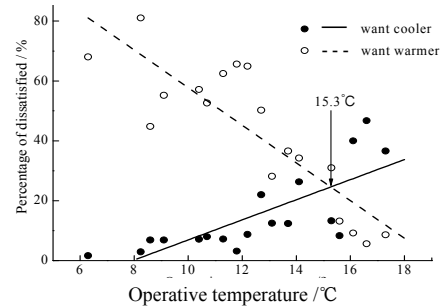


图 6 期望温度的确定

Fig.6 Determining the preferred temperature

由图 6 可知, 冬季学生的期望温度为 15.3°C (以 t_o 表示), 比中性温度高 1.1°C. Humphreys 研究认为人们期望的热环境可能偏离中性温度, 寒冷地区人们所期望的热环境偏向于稍暖的一侧^[18]. 本研究结果与 Humphreys 的这一结论是一致的.

3 讨论

3.1 MTS 与预测平均热感觉 PMV 的比较

利用测试所得室内温度、相对湿度、风速、平均辐射温度及中小学生对服装热阻、新陈代谢率计算预测 PMV 值, 将其与 MTS 作比较, 如图 7 所示.

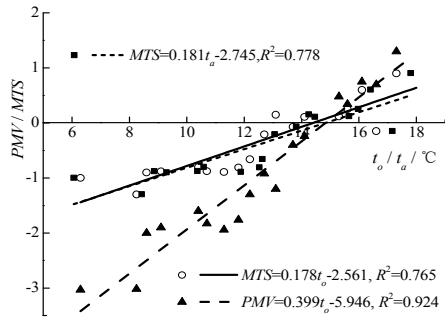


图7 MTS、PMV与室内操作温度的关系对比
Fig.7 Comparison of MTS and PMV

由图7可知,PMV和MTS存在明显的偏差.当PMV=0时,得到预测热中性温度 t_o 为14.9℃,高于冬季实测的热中性温度14.4℃,表明冬季中小学生对冷的承受能力要比预测值高.在低于热中性环境中PMV值的分布比实测的MTS向较冷侧偏移,且斜率较大,说明学生对温度的变化没有预测的那么敏感,通过自身调节形成了对偏冷环境的适应性.

3.2 适应性预测平均热感觉aPMV模型

由前所述,适应性是造成MTS和PMV产生差异的主要原因.姚润明^[19]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aPMV模型(Adaptive Predicted Mean Vote model),模型中采用自适应系数 λ 将PMV与aPMV联系起来,用以解释MTS和PMV之间的差异,见式(4):

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda \times PMV} \quad (4)$$

利用最小二乘法^[19]求解自适应系数 λ ,得到 $\lambda=-0.42$ (PMV<0), $\lambda=0.28$ (PMV>0).由 λ 和PMV值可计算得到aPMV指标,如图10所示.

由图8可知,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人体平均热感觉.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.同时,当PMV<0时,

MTS均大于aPMV且两者相差较大;当PMV>0时两者相差较小,再次说明冬季中小学生对偏冷的室内环境有较强的适应性,而对偏热的室内环境较为敏感.此时,如果室内温度维持过高,不仅浪费能源,也容易引起学生的热不适感.

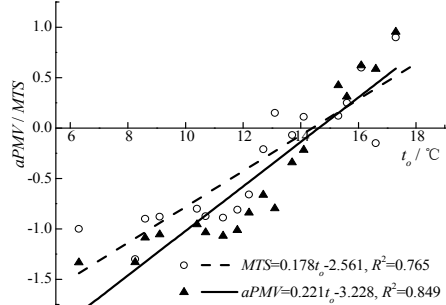


图8 MTS、aPMV与室内操作温度的关系对比
Fig.8 Comparison of MTS and aPMV

3.3 与其他研究结果的比较

国内外诸多学者对冬季室内热环境进行了研究,表2给出了本研究结果与国内外其他研究结果的比较.不同的研究选取的温度指标不同,ET*为新有效温度,℃.

由表2可知,本研究的热中性温度和可接受温度下限分别为14.4℃、10.6℃,均低于其他研究结果;热感觉模型中的平均热感觉随温度变化的斜率较低(0.188).这是因为与其他现场研究相比,乡域中小学教室有如下特征:中小学生对冷形成了心理上的适应性;此外,相比成年人,中小学生对偏热的环境较为敏感,对于寒冷环境则表现出耐受性.

鉴于此,该地区冬季乡域中小学教室内设计温度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、生理特点等因素的特殊性,提出适合于乡域中小学生的热舒适评价指标.

表2 与国内外冬季其他现场研究结果的比较
Tab.2 The comparison with other field study results in winter

研究者	地点	调查对象	新陈代谢率/met	服装热阻 I _{cl} /clo	热感觉模型	热中性温度/℃	80%可接受温度下限/℃
Schiller 等	旧金山	办公人员	1.12	0.58	MTS = 0.26ET* - 5.38	22.0	20.5
Donnini 等	蒙特利尔	办公人员	1.2	0.87	MTS = 0.493t _o - 11.69	22.6	21.5
王昭俊	哈尔滨	居室人员	1.2	1.37	MTS = 0.302t _o - 6.506	21.5	18.0
李百战	重庆	高校学生	—	1.42	MTS = 0.167t _a - 3.193	19.1	14.04
朱卫兵	哈尔滨	高校学生	—	—	MTS = 0.121t _o - 2.528	20.97	19.6
朱颖心	北京	高校学生	1.1	1.3	TSV = 0.431t _o - 8.94	20.7	—
本文	陕西关中	中小学生对	1.2	1.56	MTS = 0.188t _o - 2.664	14.4	10.6

4 结论

(1)陕西关中乡域中小学教室冬季室内温度普遍较低,中小学生的服装热阻较大(平均值为1.56clo)。学生的热中性温度为14.4℃,期望温度为15.3℃,80%可接受温度下限为10.6℃,90%舒适温度范围为12.7~16.9℃。

(2)由于学生自身对热环境的适应性,冬季中小学生的MTS和PMV存在较大偏差。根据实测数据获得的适应性aPMV模型能很好的预测中小学生的平均热感觉,自适应系数 $\lambda=-0.42$ ($PMV<0$), $\lambda=0.28$ ($PMV>0$)。

(3)在寒冷的冬季,中小学生对偏冷的环境表现出耐受性,而对偏热的环境较为敏感。室内设计温度的选取应考虑当地的气候条件及中小学生的服装热阻、生理特点、心理适应性等实际情况,如果室内温度维持过高,不仅浪费能源,也容易引发学生的热不舒适感。

参考文献 References

- [1] ISO. International Standard 7730 Moderate thermal environments : Determination of PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1994.
- [2] ANSI/ASHRAE. Standard 55-2013 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. American Society of Heating, Atlanta, Georgia: Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), 2013.
- [3] HUMPHREYS M A. Outdoor temperatures and comfort indoors[J]. Building Research and Practice, Journal of CIB, 1978(2). 92-105.
- [4] 李百战,郑洁,姚润明,等. 室内热环境与人体热舒适[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2012.
LI Baizhan, ZHENG Jie, YAO Runming et al. Indoor thermal environment and human thermal comfort[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2012.
- [5] 王昭俊,王刚,廉乐明. 室内热环境研究历史与现状[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(6): 97-101.
WANG Zhaojun, WANG Gang, LIAN Yueming. Indoor thermal environment research history and present situation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology University, 2000, 33(6): 97-101.
- [6] 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 Xiaojiang, ZHOU Zhengping, LIAN Zhiwei et al. Study on thermal comfort of neutral ventilated buildings in different city[J]. Building Energy-Saving, 2007, 35(4): 55-57.
- [7] 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 Yi, LIU Jiaping. Thermal comfort properties for air conditioned space in winter[J]. HV&AC, 2000, 30(3): 12-14.
- [8] 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, 29(2): 1-5.
XIA Yizhai, ZHAO Rongyi, JIANG Yi. Thermal comfort in naturally ventilated houses in Beijing[J]. HV&AC, 1999, 29(2): 1-5.
- [9] 朱卫兵,张小彬,杨松,等. 哈尔滨市某高校教室冬季热舒适研究[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(5): 1-5.
ZHU Weibing, ZHANG Xiaobin, YANG Song et al. Field study on thermal comfort of university classrooms in winter of Harbin[J]. Building Energy & Environment 2008, 27(5): 1-5.
- [10] 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 Baizhan, LIU Jing, YAO Runming. Investigation and analysis on classroom thermal environment in winter in Chongqing[J]. HV&AC, 2007, 37(5): 115-117.
- [11] 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(13): 39-42.
WANG Zhaojun. Selection of thermal comfort indexes in the field study[J]. HV&AC, 2004, 34(13): 39-42.
- [12] 朱颖心,张寅平,李先庭,等. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
ZHU Yingxin, ZHANG Yinping, LI Xianting et al. Building Environment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [13] G. HAVENITH. Metabolic rate and clothing insulation data of children and adolescents during various school activities[J]. Ergonomics, 2007, 50(10): 1689-1701.
- [14] McCullough E A, Olesen B W, Hong S. Thermal insulation provided by chairs[J]. ASHRAE Trans, 1994, 100(Part1): 795-802.
- [15] 刘加平. 建筑物理[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
LIU Jiaping. Architectural Physics[M]. 3rd. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [16] DEDEAR R J, BRAGER G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference[J]. ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 145-167.
- [17] 赵融,强梅. 北方城市学校教室温度及学生冷热感调查分析[J]. 中国学校卫生, 1991, 12(3): 153-155.
ZHAO Rong, QIANG Mei. The analysis of temperature and students' thermal sense of classrooms in northern city [J]. The Chinese school health, 1991, 12(3): 153-155.
- [18] HUMPHREYS M A. Field studies of thermal comfort compared and applied[J]. Buildings Services Engineer, 1976, (44): 5-27.
- [19] YAO Runming, LI Baizhan, LIU Jing. A theoretical adaptive model of thermal comfort : Adaptive predicted mean vote(aPMV)[J]. Building and Environment, 2009, 44(10): 2089-2096.

(编辑 沈波)