

西安市中小学春季室内热环境研究

白鲁建, 杨 柳, 李署婷, 宋 冰

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 中小学教室由于其建筑功能特点及使用人群的不同, 室内热环境现状与需求不同于其他类型建筑. 研究分别选取典型中、小学教室为样本, 以春季 4 月份为时间节点进行了对比研究. 研究发现当前中小学教室热工性能较差, 中午及下午室内温度偏高, 且室内风速值偏低, 学生热不舒适感强烈. 通过统计分析发现中小学生的中性温度值分别为: 20.13 °C, 17.7 °C. 针对影响热感觉的因子进行了敏感性分析, 发现在教室低风速情况下, 人体热感觉对平均辐射温度的敏感性更高. 此外, 文章还就当前发现的热环境问题提出了相应的改善建议及措施.

关键词: 中小学教室、室内热环境、热舒适

中图分类号: TU111.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)03-0407-06

Study on the thermal environment of middle and primary school classrooms in spring in Xi'an

BAI Lujian¹, YANG Liu¹, LI Suting¹, SONG Bing¹

(Xian University of Architecture & Technology College of Architecture, Xi'an 710055, China)

Abstract: Due to its different functions and users, the indoor environment in middle and primary school classrooms is quite different from that in other types of architecture. We took middle and primary school classrooms as samples and made comparative studies based in spring. From study it is found that the thermal performance of the classrooms was poor. The indoor air temperature was high and the indoor velocity of the wind was low. Pupils' hot thermal discomfort was intense. The neutral temperatures of middle and primary school students were computed to 20.13°C and 17.7°C by statistical analysis. Taking impact factors into sensitivity analysis, thermal comfort was found to be more sensitive to MRT when the velocity in classroom was low. In addition, the corresponding measures to improve the current thermal environment was put forward.

Key words: middle and primary school classroom; indoor thermal environment; thermal comfort

随着生活水平的提高, 室内热舒适问题越发起人们关注. 20 世纪 60 年代美国学者 Givoni 通过实验研究发现舒适的室内热环境不仅有利于居住者的身心健康同时也有利于提高工作效率^[1-2]. 教室作为学生的主要学习空间, 中小学生在除去休息时间以外全天有 67% 的时间在教室渡过. 因此, 研究及提高中小学教室室内热环境状况将对中小学生的学习效率及身心健康产生重要影响.

近年以来不少国外学者通过仪器设备对中小学教室内的客观环境参数进行了大量测试研究. 意大利学者 Valeria De Giuli 在春季通过对 28 间无空调设备的小学教室进行对比研究后发现教室内通风不足 CO₂ 浓度过高, 且学生在多数时间里感觉较热^[3]. 以往研究表明教室温度过高易于导致学生头痛和胸闷, 进而导致无法集中精力上课^[4-5]. 美国学者 Gwen C. Marchand 以大学生为对象开展了对比性试验, 实验发现处在不适室内环境下的学生要比舒适环境下学生学习效率差^[6].

除空气温度、风速及相对湿度等室内客观环境

参数以外, 室内热环境的优劣主要取决于人体的主观热感觉及热需求. 早在 19 世纪 70 年代法国学者 Humphreys 便从人体热舒适的角度出发来研究小学生的热感觉及热需求, 研究发现儿童对热环境的敏感度要低于成年人, 并且不同儿童之间对热环境的感受也各不相同, 并分析出这是由于小孩在上课期间的新陈代谢水平较高的原因^[7]. 荷兰学者 Sander ter Mors 对本国小学生热舒适状况进行了研究并将结果与适应性热舒适理论模型进行了对比分析, 发现小学生的热舒适温度要比以往热舒适模型理论预测的结果更低, 且期望较低的温度^[8]. 近两年韩国学者 Hyunjun Yun^[9]及西安建筑科技大学岳鹏^[10]分别对本国幼儿园室内热环境进行了研究, 发现在热感觉方面幼儿与成人之间存在着明显的差异. Hyunjun Yun 对研究结果分析后指出, 由于小孩的新陈代谢率更高因而热舒适温度范围也较成人偏低.

依据人体热舒适的适应性理论, 不同地域人群因地域气候不同而具有不同的热需求, 国外的研究成果不能完全适用于我国^[11]. 此外, 人体的热舒适

收稿日期: 2014-08-08

修改稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51325803); 陕西省重点科技创新团队 (2012 KCT-11)

作者简介: 白鲁建 (1988-), 男, 博士研究生, 主要研究建筑节能与建筑气候方向. E-mail: blj4622@126.com

需求是建立室内舒适热环境的基础,而不同年龄段人群对热环境的需求各异,因此有必要针对我国中小学生的室内热需求及自身热感觉特点进行研究.鉴于前人的研究成果及基础本次研究主要针对以下四个问题:(1)过渡季(春季)中学与小学的室内热环境现状;(2)不同年龄段学生对热环境需求的差异性;(3)影响中小学生主观热感觉的主要因素;(4)教室室内热环境改善应注意的问题及改善措施.旨在初步发掘教室热环境存在的问题并为以后中小学校建筑设计优化提供参考.

1 研究方法

本次实验研究以西安地区中小学教室为研究对象,以春季为时间节点,通过主观问卷调查与现场热环境参数测试相结合的方法分别从客观环境参数和人体热舒适需求两方面展开研究.

1.1 研究时间和地点

现场调查研究分两次进行.小学调查测试开展于4月10日~12日为期3 d,测试教室面积为60 m²,学生数为46人;中学调查测试开展于4月16日~18日为期3 d,测试同时选取了相同建筑面积的无人教室作为对比房间,有人教室面积为76 m²,学生数为60人.中小学校均位于西安市内,测试期间教室均未采用任何采暖和降温措施.

1.2 研究对象及现场研究方法

研究对象均为在校中小学生,小学回收有效问卷118份、中学回收有效问卷195份.现场研究中每个班级固定挑选10~15人来填写主观问卷,并使问卷填写人员均布于室内各个位置.中学问卷填写起止时间为:7:50~17:50,时间间隔为1 h;小学问卷填写起止时间为:8:00~16:00,时间间隔为1 h.问卷填写工作共持续2 d.

1.3 室内外环境参数测试

室外环境参数测试包括空气温湿度和风速.室内环境参数测试包括空气温湿度、黑球温度、风速以及壁面温度.测量采用的仪器型号可见表1.测量所用仪器的精度和响应时间均满足ASHRAE 55-2004和ISO 7726-2002标准要求.

表1 测试用仪器名称及记录间隔
Tab.1 Test instrument and measure parameters

测量仪器名称	测量参数	记录时间 间隔/min
TR-72 U 双通道温湿度 电子记录仪	空气温度、湿度	10
1221 型室内热舒适度 数据记录仪	空气温度、相对湿度、 黑球温度、风速	10
四通道 SE 309 温度记录仪	壁面温度	10

1.4 热舒适主观问卷调查

调查问卷的内容包括:(1)性别、体重、身高以及衣着情况等基本信息;(2)对房间环境的接受程度评价和期望温度;(3)热感觉、湿感觉以及通风主观感觉,其中热感觉采用ASHRAE的7级指标表示;(4)填写问卷时室内温湿度及风速.

2 数据处理方法

在计算前期对数据中的新陈代谢率和服装热阻参数进行了处理,其中新陈代谢率依据GB/T 18049-2000《中等热环境PMV和PPD指数的测定及热舒适条件的规定》中的规定来确定.^[12]考虑到本次调研测试过程中学生在填写问卷过程中均为坐姿且全天从事轻体力活动,因而新陈代谢率定为1.2 met.

服装热阻按照GB/T 18049—2000中的方法,估算出学生所穿单件服装的热阻值,并依据以下公式估算出整套服装的热阻^[12]:

男: $I_{cl} = 0.113 + 0.727 \sum I_{comp}$

女: $I_{cl} = 0.05 + 0.77 \sum I_{comp}$

式中: I_{cl} 为单人整套服装热阻, clo; I_{comp} 为单件衣服热阻, clo.

3 数据分析

3.1 室内外热环境状况分析

中小学教室在使用过程中门窗长期处于开启或半开启状态,尤其是中学教室上课期间门窗均处于完全开启状态,室内外空气流通性大,室内热环境易受到室外同期环境的影响.因此,在分析前期我们将测试期间室内外环境参数进行了归纳整理,具体环境参数参见表2.

表2 室内外环境参数统计表
Tab.2 Environment parameters indoors and outdoors

学校类别	测试位置	参数名称	最大值	最小值	均值	标准差
中学	室内	空气温度/℃	28.3	20.80	25.44	1.63
		相对湿度/%	36.00	26.00	20.01	3.41
		平均风速 /m·s ⁻¹	0.40	0.03	0.09	0.09
	室外	空气温度/℃	28.1	19.5	23.91	2.91
		相对湿度/%	41.00	31.00	36.19	2.70
		空气温度/℃	21.10	16.40	18.23	1.40
小学	室内	相对湿度/%	44.00	12.00	23.39	7.52
		平均风速 /m·s ⁻¹	0.13	0.02	0.05	0.02
		空气温度/℃	23.30	12.30	16.77	2.93
	室外	相对湿度/%	35.00	8.00	19.6	8.86

由表2可见,测试期间室外空气温度日较差大,平均相对湿度小.教室室内空气温度均值高于室外均值2℃左右,室内平均风速偏低,基本处于静风状态.

空气温度是影响人体热感觉的主要因素之一.通过对中学和小学室内外温度测试结果分析发现(图1~2),中学教室相对于小学教室受室外温度波动的影响更为严重.中学教室白天室内温度波动趋势与室外基本一致,上午室内温度高于室外 0.8°C ,下午室内温度平均低于室外 0.5°C ,而夜间(20:00~次日6:00)室内温度平均高于室外温度 3.5°C 以上.分析这与教室使用规律有关,白天教室由于上课门窗均处于完全开启或半开启状态,这不仅降低了围护结构对室外温度波动的抵御能力,同时较高的室内温度也易于导致热不舒适感增加;在夜间关闭的门窗使得室内热空气无法散出,直至次日6时室内温度仍高于外界空气温度 5.3°C .从图2可以看出次日清晨门窗开启通风时室内温度有显著的下降,降温幅度达 3°C .小学教室白天仅有部分窗开启,门在上课时间处于关闭状态,室内外空气流通速度小,白天室内温度波动幅度较小,为 3.2°C .由于夜间室内没有足够的通风温度比室外平均高 1.2°C .但小学教室室内温度整体受外界环境变化影响较小.总结当前中小学教室的使用模式我们发现,教室的使用方式会使得室内热量无法及时散出,长期累积进而降低建筑围护结构的蓄冷作用,白天长时间开启的门窗也会降低房间抵御室外温度升高的能力.

为进一步分析室内全天人体热感觉与室内空气温度变化的趋势,文章将二者结合进行了对比分析.如图3~4所示,随着全天室内空气温度的持续升高舒适感比率不断下降,热感增加.尤其在下午时间中小学生的热不舒适比率均超过了60%.此外,中小学生在13:00~14:00时间的热不舒适比率均有一个高峰,这是由于午后刚刚回到教室运动量大所导致.图3~4也从侧面说明了降低室内空气温度(尤其是下午时间段)对于提高室内舒适度有很大作用.

从室内外环境温度波动的趋势(图1~2)可以看出,通过夜间通风的方式对室内进行降温具有很大潜力.夜间通过有效地通风将室外冷空气引入室内以降低空气温度,加之围护结构的蓄冷作用,进而可以降低次日白天室内温度的升高速度,但蓄热夜间通风的降温效果需要白天尽量关闭门窗以减少白天外部热量流入^[13-15].由于学校教室人口密度大,内部得热量大,如果白天通风不足会造成室内二氧化碳浓度过高以及积蓄热量过多而产生闷热感,进而降低学生注意力的集中和学习效率^[16-18].如图5所示,通过对本次调研问卷中室内空气品质感受一项分析发现中学教室由于人员密度大(约 $0.8\text{人}/\text{m}^2$),人员密集共处室内时间长,室内闷热感要明显高于小学教室,有71%的人认为室内空气闷或很闷,闷热的空气也会导致学

生学习效率低下.这同时也是我国大部分中小学教室在使用过程中所面临的一个严重问题.因此白天室内适量的低温新风输入是十分有必要的.

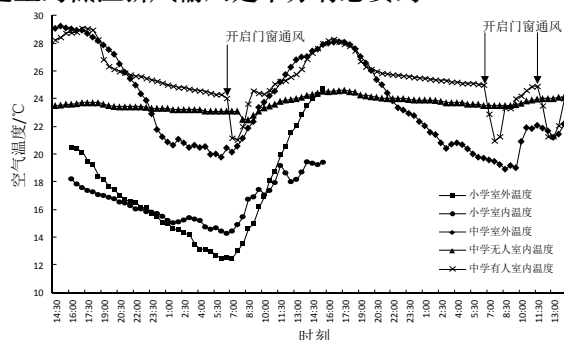


图1 室内外逐时空气温度对比分析

Fig.1 Contrast analysis of indoor and outdoor hourly air temperature

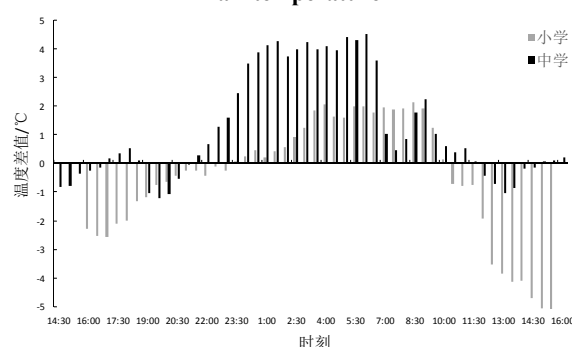


图2 室内外逐时空气温差值对比分析

Fig.2 Analysis of indoor and outdoor hourly air temperature difference value

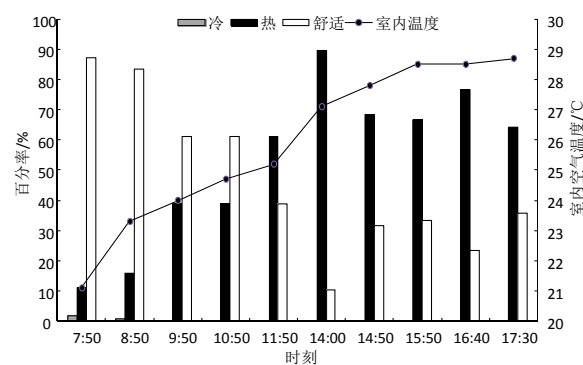


图3 中学生全天热感觉与室内空气温度对比分析

Fig.3 Contrast analysis of the middle school students thermal sensation and indoor air temperature

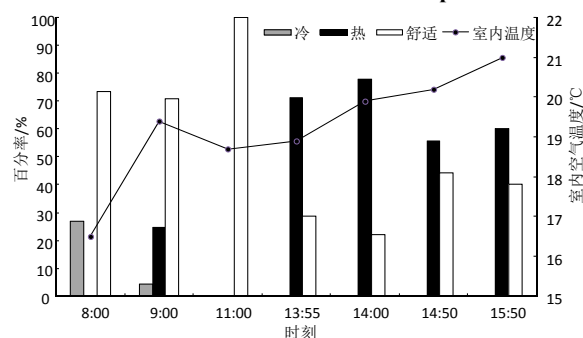


图4 小学生全天热感觉与室内空气温度对比分析

Fig.4 Contrast analysis of the primary thermal sensation and indoor air temperature

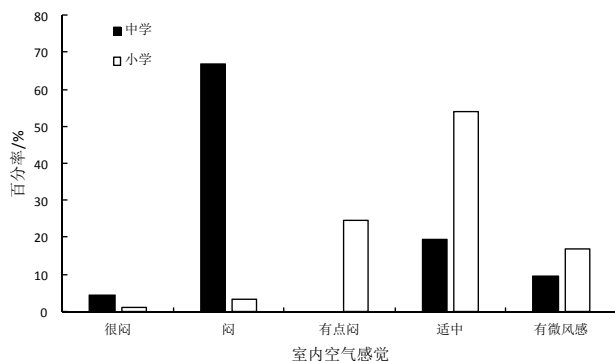


图5 室内空气感觉对比分析

Fig.5 Contrast analysis of the indoor air feeling

3.2 热中性温度与人体热舒适分析

热中性温度是依据现场实测热感觉及操作温度线性回归而得,该指标综合考虑了人体主观热感觉及空气温度、辐射温度、空气流速等客观指标,旨在提出科学合理的室内舒适热环境标准,为建筑设计及暖通设计工作提供相应的指导.文章将实测热感觉及计算出的 PMV 值分别于相应的操作温度进行线性回归求解,进而求出热中性温度值.

依据 20 世纪 70 年代 Fanger 提出的著名的 PMV-PPD 热感觉指标,该指标依据四个环境因素和两个人体因素来对给定的热环境进行人体热感觉预测分析^[19].在前期数据处理的基础上,将实测的空气温度、该温度下的饱和水蒸汽分压力、相对湿度以及代谢率和服装热阻代入编写的 Matlab 程序进行 PMV 及 PPD 值计算.然后依据温度频率法^[20]将操作温度每隔 0.5 °C 划分一个组,分组进行平均值计算,然后分别将每个区间内的操作温度均值与热感觉投票均值 MTS 以及预测热感觉均值 PMV 运用 SPASS 数理统计软件进行线性回归分析,分析结果见图 6~7.

通过图 6 可以看出中学生对于热感觉的敏感性要比预测的低.中学生在操作温度较低时实测热感觉值

比预测值偏高,在操作温度较高时实测值与预测值基本一致.小学生实测值整体偏高于预测值.统计后发现中小学生在实测热感觉值要比同期预测值总体高出 0.5~0.8.热敏感性偏低说明长期处于当前热环境已使得学生对环境有一定的适应和自我调节能力,因而对于环境温度的适应范围广.但由于空间人口密度、通风不畅及衣着调节不便导致学生心理感觉整体偏热.

通过分析分别建立了中小学实测和预测热感觉与操作温度的回归方程式(见表 3),令方程式中 y 值归零可以分别求得实测和预测热中性温度.

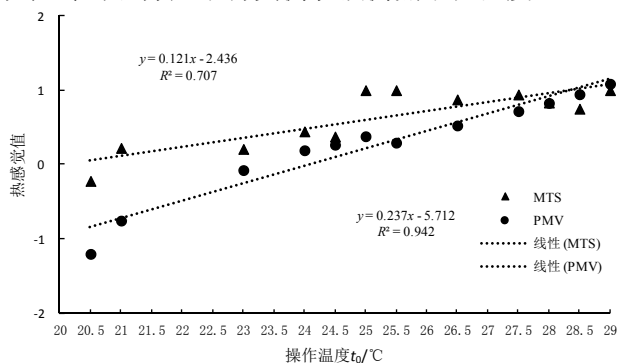


图6 中学生热中性温度求解

Fig.6 The solution of middle school students thermal neutral temperature

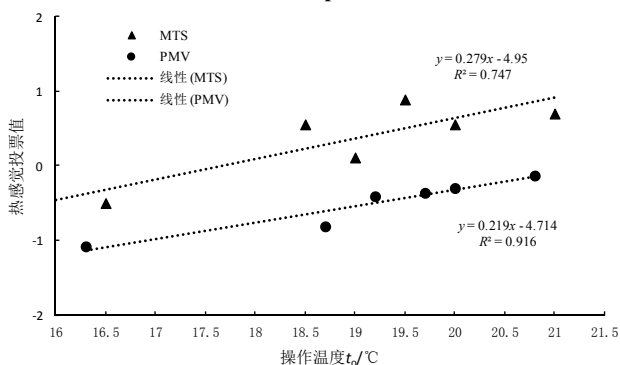


图7 小学生热中性温度求解

Fig.7 The solution of primary thermal neutral temperature

表3 平均热感觉回归方程

Tab.3 Regression equation of the average thermal sensation

	平均衣服热阻值/clo	室外平均温度/°C	回归方程	相关性系数 R^2	中性温度/°C
中学	0.636	25.38	MTS = 0.121 t_o - 2.436	0.707	20.13
			PMV = 0.237 t_o - 5.712	0.942	24.10
小学	0.974	19.33	MTS = 0.279 t_o - 4.950	0.747	17.70
			PMV = 0.219 t_o - 4.714	0.916	21.50

通过表 3 可以看出,中小学实测中性温度均低于预测中性温度,据以往研究结果分析这是因常住人群对地区气候的适应性所致.对比中小学的实测中性温度发现小学比中学低 2.5 °C.西安建筑科技大学茅艳根据广泛的人体热舒适调查建立了我国不同气候区的人体热舒适适应性模型,其中寒冷地区的适应性模型如下^[21]:

$$T_0 = 0.271t_o + 20.014$$

依据该模型,代入本次实测室外空气温度计算出预测中性温度分别为 26.88 °C 和 25.23 °C.该计算值均高于本次调研分析得到的中性温度,但以上模型的建立是基于大规模的实测调研得出的,调研人群主要为中青年.不同年龄段的人群因其自身的代谢速率、活动量及衣着习惯不同对热环境的适应

能力及感知也不相同^[7-8].如西安建筑科技大学岳鹏通过对西安地区幼儿园室内热环境调查研究发现幼儿的热感觉与成人是有差异的,不能使用同一标准判定^[10].本文的研究结果与该观点一致.人群密度较大的教室环境全天处于低风速状态,且适用人群新陈代谢量大活动量大,因而更倾向于获得较低的室内温度.

3.3 热感觉影响因子的敏感性分析

由于本次测试期间室内平均风速均处于 0.09 m/s 以内、全天服装热阻不变.鉴于此本文仅探讨了空气温度 t_a 和平均辐射温度 MRT 对人体热感觉的影响.

影响因子的敏感性研究以中学热舒适问卷为样本,剔除少量靠窗和靠墙位置学生问卷后,根据室内实测壁面温度推算不同位置学生所受到的平均辐射温度 MRT.按照美国 ASHRAE Handbook 2009^[22]中提供的计算方法将室内不同壁面对人体形成的辐射温度进行叠加计算,考虑到教室北窗面积较大计算时以实测的玻璃温度替代北墙作为主要辐射面.计算公式如下:

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \cdots + T_N^4 F_{p-N}$$

式中: \bar{T}_r 为平均辐射温度, K; T_N 为对应壁面的温度, K; F_{p-N} 为人与对应壁面之间的角度系数.

计算后完成后,根据温度频率法分别以平均辐射温度和空气温度为基准每 0.5 °C 划分一组,并求得每组热感觉、平均辐射温度和空气温度的均值.然后分别对热感觉与平均辐射温度和空气温度进行线性回归分析.分析结果如图 8 所示.

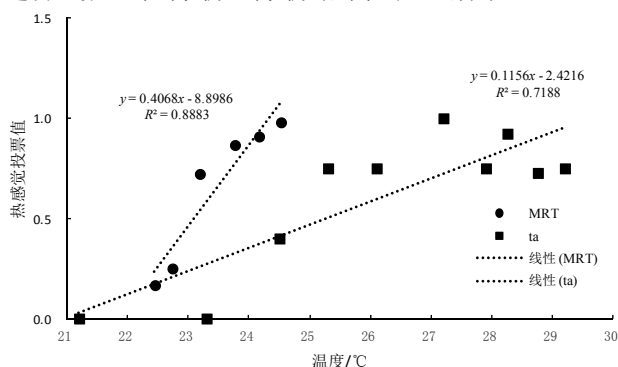


图8 热感觉影响因子敏感性分析

Fig.8 Sensitivity analysis of the thermal sensation influencing factors

通过图8可以看出测试期间空气温度总体高于平均辐射温度.热感觉与平均辐射温度 MRT 的相关性要高于与空气温度 t_a 的,此外人体对平均辐射温度的敏感性高于对空气温度的.通过分析可以发

现在低风速环境下较低的平均辐射温度更易于使人体获得舒适状态,这是因为在人体热平衡方程中正常比例散热条件下辐射散热约占 45%~50%,而对流换热仅占 25%~30%^[19].且春季学生衣着量较大,身体暴露于空气中的部位较少,依据 ASHRAE Handbook 2009 中的有关研究表明衣服透气性小、空气流速低的情况下,对流导热方式散热所占比例较小,辐射散热为主要散热方式^[22].因此,室内较低的壁面温度也有利于提高学生的热舒适感.

4 改善措施及建议

学校建筑因其功能特点及使用人群特点而不同于居住建筑及办公建筑,长时间高密度人群的特点使得室内低风速情况下易产生闷热感.当前一些高校及中小学针对于教室现存的问题采用加装空调设备的方式来加以解决,表面上似乎解决了现存的问题,但深入研究可以发现教室建筑自身的特点(多为外廊式、窗墙面积比高)以及使用模式(门开启频率高)决定了仅采用空调设备既不利于降温也不利于建筑节能.此外,长期处于空调房间对于人体抵抗力等生理机能有一定影响.因此,本文建议针对问题应采用被动式手段加以解决:(1)对于室内温度升速快、温度高的问题,通过对室外环境温度波动趋势的分析发现在过渡季采用夜间通风的方式可以有效降低室内白天积蓄的热量,建议采用蓄热加夜间通风的方式(夜间通风量不足时需采用机械通风加以补充)来处理白天温度升速过快、温度过高的问题,同时注意白天应将量减少窗扇开启;(2)对于室内空气闷的问题,建议白天采用机械通风方式引入室外新风以满足室内需求,但为了防止室内温度升高需要对新风采用预冷处理,建议利用校园室外场地采用地下埋管方式对新风进行降温.

5 结论

中小学教室是中小学生的主要活动及学习空间,其室内热环境的优劣将直接影响中小学生的身心健康及学习效率.通过本次现场调查研究发现了教室热环境较为突出的几个问题并对问题进行了一定研究,问题如下:

(1)在过渡季(春季)由于教室使用模式人为降低了教室围护结构抵御外界温度波动的能力,白天中学室内外温差均值仅为 0.2 °C,室内外温度波动趋势一致,小学教室室内温度相对稳定,白天室内温度平均低于室外 1.6 °C.由于夜间门窗的关闭中

小学室内温度平均高于室外 3.5 °C 和 1.2 °C。

(2) 中学教室由于人员密集、室内风速过低(均值 < 0.1 m/s), 空气质量差学生闷热感强烈。中学教室相对小学教室闷热感觉比例高 41 %。

(3) 中小學生由于生理差异, 其热感觉均不同

参考文献 References

- [1] GIVONI B, RIM Y. Effect of the Thermal Environment and psychological factors upon subject's responses and performance of mental work[J]. *Ergonomics*, 1962, 5: 99-114.
- [2] GIVONI B. A new method for evaluating industrial heat exposure and maximum permissible work load[J]. *Int. J. Biometeor*, 1964, 8(2): 115-124.
- [3] VALERIA De Giuli, OSVALD Da Pos. Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools[J]. *Building and Environment*, 2012, 56: 335-345.
- [4] PUTEH Marzita, IBRAHIM Mohd Hairi. Thermal comfort in classroom: constraints and issues[J]. *Procedia -Social and Behavioral Sciences*, 2012, 46: 1834-1838.
- [5] 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.
- [6] MARCHAND C Gwen, NARDI M Nicholas. The impact of the classroom built environment on student perceptions and learning[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2014, 40: 187-197.
- [7] HUMPHREYS MA. A study of the thermal comfort of primary school children in summer[J]. *Building and Environment*, 1977, 12(4): 231-239.
- [8] MORS S T, HENSEN L M Jan. Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: Creating and validating PMV-based comfort charts[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(12): 2454-2461.
- [9] YUN Hyunjun, NAM Insick. A field study of thermal comfort for kindergarten children in Korea An assessment of existing models and preferences of children[J]. *Building and Environment*, 2014, 75(5): 182-189.
- [10] 岳鹏, 刘加平, 闫杰. 幼儿园室内热环境研究[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 41(4): 549-555.
YUE Peng, LIU Jiaping, YAN Jie. Study on the indoor thermal environment of kindergarten[J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition*, 2009, 41(4): 549-555.
- [11] 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 Univ. of Arch. & Tech.*, 2013.
- [12] 中国标准化与信息分类编码研究所, 中国预防医学科学院劳动卫生与职业病研究所. GB/T 18049-2000 中等热环境 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
Institute of standardization and information classification and coding. GB/T 18049-2000 Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort[S]. Beijing: China Standard Press, 2000.
- [13] GIVONI B. *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*[M]. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1994, .
- [14] GIVONI B. *Man, Climate and Architecture*[M]. London: Applied Science Publishers, 1976.
- [15] GIVONI B. Comfort, climate analysis and building design guidelines[J]. *Energy and Buildings*, 1992(18): 11-23.
- [16] CLEMENTS D J, AWBIA H B, BAKÓ-BIRÓ Z. Ventilation rates in schools[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(3): 362-367.
- [17] BAKÓ-BIRÓ Z, CLEMENTS D J. Ventilation rates in schools and pupils' performance[J]. *Building and Environment*, 2012, 48(2): 215-223.
- [18] 陈威威. 北方地区高校教室室内空气品质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
CHEN Weiwei. Research on Indoor Air Quality of University Classroom in Northern Area in China[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [19] 刘加平. *建筑物理*[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Jiaping. *Architectural Physics*[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [20] 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 Zhaojun. Selection of thermal comfort indexes in the field study[J]. *HV&AC*, 2004, 34(12): 39-42.
- [21] 茅艳. 人体热舒适气候适应性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
MAO Yan. Study on Climate Adaptability of Human Beings to Thermal Comfort in China[D]. *Xi'an Univ. of Arch. & Tech.*, 2007.
- [22] ASHRAE HandBook 2009 Fundamentals[M]. SI Edition. Atlanta: ASHRAE Inc. 2009.

(编辑 桂智刚)