

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-890-07

# 寒冷地区夏季中小学室内热舒适与空气品质研究

蒋婧 云旭鑫 秦石磊 狄育慧

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048)

**【摘要】** 教室作为中小学生学习的主要场所,室内环境会对其身心健康造成一定影响,为研究寒冷地区夏季中小学室内热舒适与空气品质,选取寒冷地区某中学为研究对象,对夏季教室内的热环境参数与环境质量参数进行测量,同时调查了325名学生对教室内热感觉和空气品质的主观评价。结果表明:预计热中性温度为24.6℃,实测热中性温度为26.5℃,两者相差为1.9℃,表明在当地的气候条件、衣着习惯、心理期望等因素作用下,中小学生对环境形成了适应性;通过研究给出寒冷地区中小学生对适应性预计平均热感觉(aPMV)。通过学生对最佳学习状态时段投票进行分析,得出在温度稍低的早、晚时段学生认为是最佳学习时段;CO<sub>2</sub>浓度低,室内空气品质较好,满足国标要求,且室内空气品质越好,对学生学习情况越有利。上述研究结论为中小学教室室内设计提供依据。

**【关键词】** 室内空气品质; CO<sub>2</sub>浓度; 热舒适; 热中性温度; 中小学  
**中图分类号** TU119 **文献标识码** A

## Study on Indoor Thermal Comfort and Air Quality of Primary and Secondary Schools in Cold Area in Summer

Jiang Jing Yun Xuxin Qin Shilei Di Yuhui

(School of Textile and Materials, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** Classroom is the main place for primary and secondary school students to learn, and indoor environment will have a certain impact on it. In order to study the indoor thermal comfort and air quality of primary and secondary schools in cold areas in summer, a middle school in cold areas was selected as the research object to measure the thermal environmental parameters and environmental quality parameters in classrooms in summer. 325 students' subjective evaluation of thermal sensation and air quality in classroom were also investigated. The results show that the predicted thermal neutral temperature is 24.6℃, the measured thermal neutral temperature is 26.5℃, the difference between the two is 1.9℃, indicating that under the influence of local climatic conditions, clothing habits, psychological expectations and other factors, primary and secondary school students have formed the adaptability to the environment. The aPMV of primary and secondary school students in cold area is given, which provides the basis for the parameter standard of interior design of primary and secondary school classrooms. By analyzing the voting time of students' best learning state, it is concluded that students think the best learning time is in the morning and evening when the temperature is slightly lower. Indoor air quality is good, and CO<sub>2</sub> concentration is low, which meets the requirements of the national standard. And the better the indoor air quality is, the more beneficial to students' learning.

**【Keywords】** indoor air quality; carbon dioxide concentration; thermal comfort; neutral temperature; primary and secondary schools

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(编号 51908438); 西部绿色建筑国家重点实验室开放基金项目(编号 LSKF202004)  
作者(通讯作者)简介: 蒋婧(1989.01-), 女, 博士, 副教授, E-mail: jiangjing@xpu.edu.cn  
收稿日期: 2022-04-06

## 0 引言

室内环境会影响人体热舒适以及健康,教室环境的优劣与学生的健康和学习效率密切相关。相较于其他建筑,教学建筑的功能性更强,教室除了保证学生的舒适性外,还需要满足对学习效率的要求,好的教室环境不仅有益于学生的身心发展,更能提高学生的学习效率,教室作为中小学生学习的主要场所,学生在校期间有约75%的时间在教室,因此研究中小学生学习教室热舒适和空气品质具有很大的意义。

目前研究多将热舒适<sup>[2]</sup>与空气品质<sup>[2]</sup>单独考虑,少有考虑到两者的综合影响,而实际情况中,两者会共同影响室内人员。国内外研究偏向于办公建筑<sup>[3]</sup>、住宅<sup>[4]</sup>、交通运输<sup>[6]</sup>,对于教学建筑关注甚微,针对教学建筑的研究集中于高校教学建筑<sup>[7-9]</sup>且目前热舒适评价模型的指标和方法都是基于全社会的平均水平,难以直接指导中小学教室热环境的设计<sup>[10]</sup>。现有的研究中对高校室内热舒适和空气品质的研究多为夏热冬冷的重庆地区<sup>[11]</sup>以及严寒地区的哈尔滨<sup>[12]</sup>,对于寒冷地区中小学建筑研究较少,寒冷地区夏季气温较高,对教室内热舒适影响大,夏季教室开门窗次数多,和风扇共同作用,因此对室内空气品质影响显著。

因此,本文对寒冷地区夏季中小学室内热舒适与空气品质进行研究,采用主观问卷调查和客观现场测试相结合的方法,研究中小学室内热舒适与空气品质,获得寒冷地区中小学教室的热中性温度,掌握室内空气品质状况,为改善教室内空气质量,提高学生学习效率提供参考。

## 1 调研基本情况

本研究于2021年夏季在寒冷地区洛阳市某中学进行,调研的教室门窗均可由使用者自主调节。教室夏季采用风扇和自然通风调节室内温度,无空调等其他制冷设备。

### 1.1 调查对象

调研测试共325名学生,受试学生均来自测试当地,考虑到测试的复杂程度,年龄较小的学生可

能无法完成测试,本测试招募的学生其年龄均大于10岁,且身体健康,能够独立完成问卷,受试者基本情况如表1所示。

表1 受试者基本情况

Table 1 Basic information of subjects

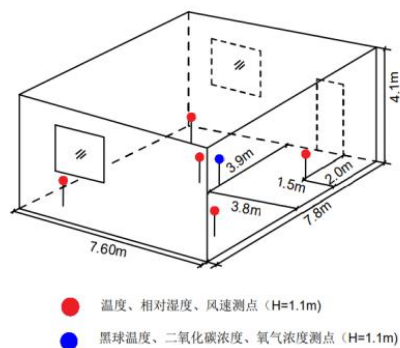
	人数	年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)
男	169	13.7±0.7	168.1±7.7	58.4±13.2
女	156	13.5±0.8	161.1±5.4	48.4±7.4

### 1.2 客观测试

测试期间室内环境参数包括室内热环境参数和室内空气质量参数,测试教室室外布局图如图1(a)所示。根据我国的室内热环境与空气品质标准<sup>[13]</sup>,室内温度测点、风速测点采用五点法布置,其余测点均居中布置,测点布置如图1(b)所示。



(a) 测试教室室外布局



(b) 测点布置

图1 调研教学楼及室内测点布置

Fig.1 Layout of research teaching building and indoor measuring points

测量的室内热环境参数主要包括:空气温度、相对湿度、黑球温度、空气流速等热环境参数;以及CO<sub>2</sub>浓度、O<sub>2</sub>浓度分数等室内空气品质参数,各测量参数及测试所要用的仪器如表2所示。

表 2 测试参数及仪器

Table 2 Test parameters and instruments

室内环境参数	仪器名称	仪器型号	测量范围	精度
空气温度	温湿度记录仪	PR-3003-WS	温度: -40~85℃	温度: ±0.1℃
相对湿度			湿度: 0~100%RH	湿度: ±1.5%
风速	智能热球风速计	ZRQF-F30J	0.05~30m/s	±(4%)m/s
黑球温度	热力指数计	8778	0~80℃	±1℃
O <sub>2</sub> 浓度	气体检测仪	ST8990	0~30%VOL	±0.1%
CO <sub>2</sub> 浓度	CO <sub>2</sub> 测试计	TES-1370H	0~6000mg/m <sup>3</sup>	±1 mg/m <sup>3</sup>

### 1.3 主观调查

主观问卷调查包括受试者年龄、性别、身高、体重以及受试者对室内热环境及室内空气品质等主观评价。热感觉投票采用 7 级标尺, 即: -3 (冷)、-2 (凉)、-1 (稍凉)、0 (适中)、1 (稍暖)、2 (暖)、3 (热); 空气品质采用 5 级标尺, 即: 1 (很不新鲜)、2 (不新鲜)、3 (一般)、4 (新鲜) 5 (很新鲜); 满意度采用 5 级标尺, 即: 1 (很不满意)、2 (不满意)、3 (可接受)、4 (满意)、5 (很满意); 舒适度采用 5 级标尺, 即: 1 (舒适)、2 (稍不舒适)、3 (不舒适)、4 (很不舒适)、5 (不可忍受)。

表 3 室内环境参数

Table 3 Indoor environmental parameters

	CO <sub>2</sub> 浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	O <sub>2</sub> 体积分数 (%)	空气温度 (°C)	操作温度 (°C)	相对湿度 (%)	空气流速 (m/s)
平均值	626.2	20.9	29.9	29.0	46.0	0.26
标准偏差	10.8	0.1	0.1	0.2	0.2	0.01
最大值	767.0	21.1	34.0	31.0	62.0	0.77
最小值	557.0	20.8	26.0	27.7	31.0	0.00

取测试期间具代表寒冷地区夏季气候特点的某天作为研究, 观测其 CO<sub>2</sub> 浓度、黑球温度和室内温度随着时间变化的趋势, 如图 2 所示。室内温度与黑球温度均随着时间增加而增大, 且随着时间的变化, 两者相差不多, 可见辐射是导致室内温度升高的主要原因。室内 CO<sub>2</sub> 浓度在早晨 7 点之前以及中午 12 点到 14 点, 浓度较低, 这是因为这段时间, 教室内学生人数较少, 随着 7 点之后, 学生人数的增加, 室内 CO<sub>2</sub> 浓度也随之增加, 可见室内人员呼吸作用是导致室内 CO<sub>2</sub> 浓度变化的主要原因, 测试过程中室内 CO<sub>2</sub> 浓度范围为 557.0mg/m<sup>3</sup>~767.0mg/m<sup>3</sup>, 变化不够明显, 由于教室采用自然通风以及风扇辅助通风, 加大了室内空气的流动, 空气得到及时的置换, 室内空气品质较好。

## 2 调查结果与分析

### 2.1 室内环境参数

调研测试期间, 室内各环境参数如表 3 所示。CO<sub>2</sub> 浓度变化范围为 557.0~767.0mg/m<sup>3</sup>, 室内空气温度的变化范围为 26.0℃~34.0℃, 室内相对湿度的变化范围为 31.0%~62.0%, 室内操作温度变化范围为 27.7℃~31.0℃, 室内空气流速变化范围为 0m/s~0.77m/s, O<sub>2</sub> 体积分数变化范围为 20.8%~21.1%。

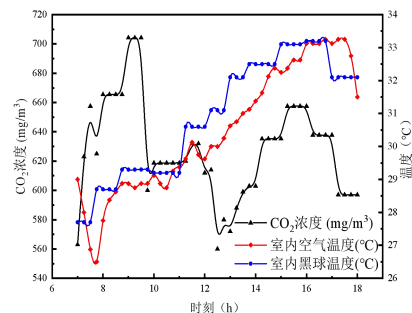


图 2 典型天内 CO<sub>2</sub> 浓度及温度变化

Fig.2 Changes of indoor CO<sub>2</sub> concentration and temperature in typical days

### 2.2 热感觉和热中性温度

为获得热中性温度, 根据计算所得的预计平均热感觉投票 *PMV*、调研得到的平均热感觉投票

MTS 与操作温度  $t_o$  进行拟合, 通过线性回归分析分别得出  $PMV$  与  $t_o$  线性关系 (如式 (1)), 以及  $MTS$  与  $t_o$  线性关系 (如式 (2)), 如图 3 所示。

$$PMV = 0.41t_o - 10.09 \quad R^2 = 0.76 \quad (1)$$

$$MTS = 0.25t_o - 6.62 \quad R^2 = 0.84 \quad (2)$$

令  $PMV$  等于 0, 得出预计热中性温度为  $24.6^\circ\text{C}$ ; 令  $MTS$  等于 0 得出实测热中性温度为  $26.5^\circ\text{C}$ 。实测热中性温度要高于预计热中性温度, 两者相差为  $1.9^\circ\text{C}$ 。室内温度一直较高, 而实测平均热感觉投票值  $MTS$  并不是非常高, 说明夏季中小学生对热的承受能力比预测的要高, 且通过行为、生理活动以及心理作用上的调节, 对这种热环境在一定程度上具有适应性。

根据图 3 分析,  $PMV$  指标明显高于  $MTS$ , 说明夏季中小学生对温度的变化敏感程度比预测值要小,  $PMV$  指标与测试结果存在较大差别, 并不能完全应用于寒冷地区中小学生群体, 其中造成  $MTS$  和  $PMV$  结果差异的主要原因是人体的适应性。

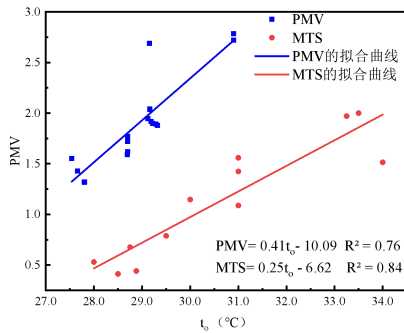


图 3 MTS、PMV 与  $t_o$  关系

Fig.3 Relationship between MTS, PMV and  $t_o$

有学者<sup>[14]</sup>结合当地气候、文化、心理、社会条件以及曾经经历过的热环境, 提出了适应性预计平均热感觉 ( $aPMV$ ), 解释了许多学者在实际研究中发现的预计平均热感觉指数 ( $PMV$ ) 大于实际平均热感觉投票 ( $aPMV$ ) 的现象, 该模型采用自适应系数  $\lambda$ , 表征影响热舒适感的适应因素, 得到  $aPMV$  与  $PMV$  的关系式, 如式 (3) 所示。

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda PMV} \quad (3)$$

根据调研数据, 利用最小二乘法<sup>[15]</sup>求得  $\lambda_1=0.41$  ( $PMV>0$ ),  $\lambda_2=-0.28$  ( $PMV<0$ ), 根据自适应系数  $\lambda$  和  $PMV$  求得  $aPMV$ 、 $MTS$  指标如图 4 所示, 相比  $PMV$  模型,  $aPMV$  计算结果更接近学生实际投票热感觉。

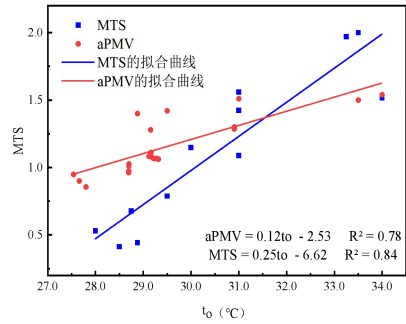


图 4  $aPMV$ 、 $MTS$  与  $t_o$  关系

Fig.4 Relationship between  $aPMV$ ,  $MTS$  and  $t_o$

### 2.3 室内热环境满意度和热感觉

室内空气热环境满意度和热感觉投票如图 5 所示。9 点时 67% 人感觉当前温度可以接受, 随着时间的变化, 11 点时感觉温度可以接受的人数减少, 而感觉不满意的人数从 13% 增加到 30%, 说明大多数人对室内热感觉不满意。随着温度的增加, 室内人员的满意度急剧下降; 热感觉投票显示 9 点有 46% 的人感觉温度适中, 15 点时只有 23% 的人感觉温度适中, 有 50% 的人感觉热, 10% 的人感觉暖, 说明随着温度的增加, 学生的热感觉投票随之增加。在 9 点温度较低时, 学生对室内热环境满意度的投票较低, 而在 15 点左右, 学生对室内热环境满意度的投票较高。可以得出, 室内热环境满意度投票随着温度的增加而减小, 室内温度越高, 室内热环境满意度越低。

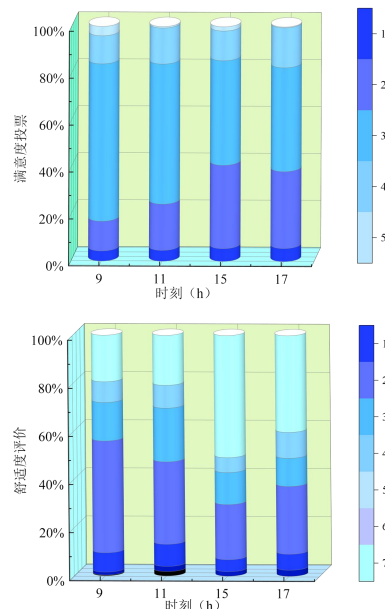


图 5 室内空气热感觉和满意度投票

Fig.5 Indoor air thermal sensation and satisfaction vote

### 2.4 室内环境品质满意度和舒适度

室内空气品质满意度和舒适度投票如图 6 所示。可知不同阶段的室内环境品质满意度投票有所波动，9 点对空气品质的不满意投票低于 11 点的不满意投票，这说明随着在教室时间的增加，室内空气品质发生改变，导致学生对空气品质的满意率下降，约有 62% 的学生认为教室的空气品质可以接受，另外有 21% 的人对室内的空气品质不满意。舒适度投票有 48% 的学生认为室内的空气品质稍不舒适，有 28% 的人认为室内的空气品质舒适。分析空气品质的满意度投票和舒适度投票关系发现，随着室内满意度增加时，舒适度也会增加，这说明室内空气品质会影响到室内人员的舒适性，室内空气品质越高，舒适性越强。

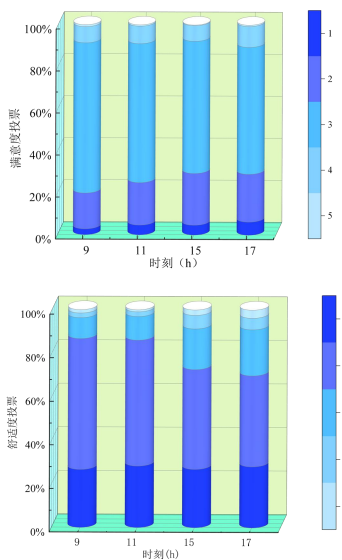


图 6 室内空气品质满意度和舒适度投票

Fig.6 Indoor air quality satisfaction and comfort vote

### 2.5 室内环境对学生学习状态的影响

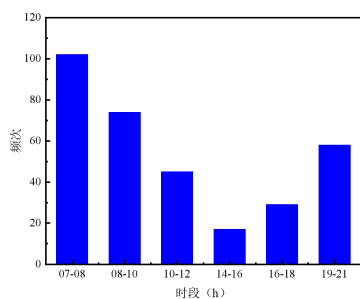


图 7 最佳学习状态时段投票图

Fig.7 Voting chart of optimal learning state period

教室内环境不仅影响学生的舒适，进一步也会

影响到学生的学习状态。如图 7 所示根据学生的最佳学习状态投票，在 7~8 点，学生的最佳学习状态时段投票数量最多，在 14~16 点，学生的最佳学习状态时段投票数量最少，这是由于在 7~8 点时，教室温度相对较低，学生的学习状态好，在 14~16 点时，温度高，导致学生的学习状态较差。

进一步分析学生热感觉投票与学习情况投票，热感觉投票与学习情况投票变化趋势相近，且随着热感觉投票数值的增加，学习情况投票数值也增加，如图 8 所示。由于 10~18 点的温度较高，导致学生的学习状态变差，结果与最佳学习状态时段投票结果一致，即教室环境温度越高，学生的学习状态越差。本次测试过程中，空气品质会影响到学生的学习情况，15~17 点时，随着空气品质投票数值的增加，学习情况投票数值也增加，但室内空气品质较好，学习情况对空气品质的作用规律不够明显，室内环境对学生学习状态的影响主要是受到温度的影响。

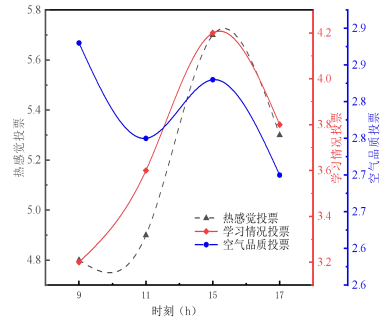


图 8 室内环境与学习情况投票

Fig.8 Indoor environment and learning voting

## 3 讨论

### 3.1 室内环境品质相关研究对比

在室内环境品质状况研究方面，众多学者进行了研究，Bakó-Biró 和 Clements-Croome<sup>[16]</sup>在英格兰小学教室内对 9-11 岁的学生进行了通风量对室内环境品质的影响研究，测试的室内环境 CO<sub>2</sub> 浓度远高于 1500ppm，得到的期望值为 1000ppm，表明在较低的通风量条件下，室内环境品质较差。而本文研究发现室内空气品质对学生的学习效率影响较小，影响的主导因素为室内空气温度，对比分析结论的差异，其原因是由于前者开窗较少，CO<sub>2</sub> 浓度大，室内空气品质差。而本研究测试为夏季，室内使用风扇，风速较大，平均值为 0.26m/s，接近



80%的风速 $\geq 0.25\text{m/s}$ <sup>[13]</sup>,超出了夏季室内风速推荐取值范围。测试期间的教室内风速较大,风速分布频次如图9所示,导致室内空气新风量大,污染物能够迅速置换,因此本研究中室内 $\text{CO}_2$ 浓度小,环境品质相对较好。

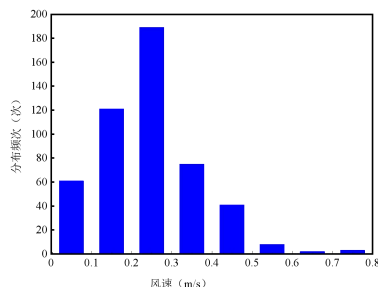


图9 室内风速分布频次

Fig.9 Indoor wind speed distribution frequency

### 3.2 室内热环境的研究结果对比

将本文与国内外室内热环境的研究结果对比,如表4所示。对比热舒适模型可以看出,本文的平均热感觉随温度变化的斜率偏高,即该地区中小学生对温度的敏感程度高于其他地区。同时洛阳地区的热中性温度比同为寒冷地区的北京高。主要原因:由于洛阳地区四季分明、夏季气候炎热,教室环境简陋,没有空调设备,导致教室内温度较高,内外温差较小;此外,北京商场采用中央空调制冷,室内平均温度只有 $24.4^\circ\text{C}$ ,而本文室内平均温度为 $29.0^\circ\text{C}$ ,长期生活于此的中小学生对高温已经形成了一定的适应性。

表4 国内外夏季热舒适研究现状

Table4 Research status of thermal comfort in summer at home and abroad

研究者	调查地点	调查对象	风速 (m/s)	MTS 或 TSV 模型	$R^2$	热中性温度 ( $^\circ\text{C}$ )	气候区类型
李梦	西安	商场	0.10	$TSV=0.360t_o-9.159$	0.94	25.5	寒冷
Cena	卡尔古利	办公楼	0.18	$TSV=0.270t_o-6.290$	0.889	23.3	严寒
Yong Li	南京	地下商场	0.38	$PMV=0.260t_o-6.170$	0.94	23.7	夏热冬冷
刘小燕	哈尔滨	候车厅	0.21	$TSV=0.351t_o-8.575$	0.883	24.4	严寒
党睿	北京	商场	0.10	$PMV=0.359t_o-8.584$	0.927	23.9	寒冷
刘赛可	桂林	车站	0.15	$PMV=0.676t_o-18.072$	0.911	26.8	夏热冬冷
杨薇	长沙	教室	0.10	$PMV=0.120t_o-2.954$	0.711	24.3	夏热冬冷
本文	洛阳	教室	0.26	$PMV=0.410t_o-10.090$	0.76	24.6	寒冷

## 4 结论

(1) 调研期间寒冷地区中小学教室夏季室内平均温度为 $29.0^\circ\text{C}$ ,室内接近80%的风速 $\geq 0.25\text{m/s}$ ,两者均高于国标规定;室内空气品质较好, $\text{CO}_2$ 浓度低( $557.0\text{mg/m}^3\sim 737.0\text{mg/m}^3$ ),满足国家标准的要求。

(2) 寒冷地区中小学教室室内设施简陋,没有空调等制冷设备,室内温度高,得到室内实测热中性温度为 $26.5^\circ\text{C}$ ,预测热中性温度为 $24.5^\circ\text{C}$ ,学生对教室环境以及心理期望的调节作用,寒冷地区中小学生的实测热中性温度比预测热中性温度高,学生对热环境有较强的适应性;由于室内外温差较小,学生对热变化不太敏感,导致 $PMV$ 和 $MTS$ 存在着较大的偏差,通过实测数据计算得出的适应性模型( $aPMV$ )在 $PMV$ 的基础上对寒冷地区中小学生对平均热感觉的预测更为准确。

(3) 寒冷地区中小学生学习情况主要随温度变化,温度越低,学习情况越好,在7~8点温度较低时,学生的最佳学习状态时段投票数量最多,在14~16点温度较高时,学生的最佳学习状态时段投票数量最少。

(4) 中小学生学习情况随着室内空气品质进行变化,室内空气品质越好,学习情况越好,15~17点,随着空气品质投票数值的增加,学习情况投票数值也增加,由于室内空气品质较好,室内环境对学生学习状态的影响主要是受到温度的影响。

### 参考文献:

- [1] 徐小林,李百战.室内热环境对人体热舒适的影响[J].重庆大学学报(自然科学版),2005,(4):102-105.
- [2] 茅艳.人体舒适气候适应性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.

- [3] 李波.成都市自然通风办公建筑室内热环境营造策略研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [4] 王昭俊,任静,吉玉辰,等.严寒地区住宅与办公建筑热环境与热适应研究[J].建筑科学,2016,32(4):60-65.
- [5] 范莹莹.住宅通风系统对室内空气品质的影响研究[D].北京:北京建筑大学,2021.
- [6] 翟彤.基于现场实测调查的严寒地区地铁热环境与热舒适研究分析[D].西安:长安大学,2019.
- [7] 李敏,曹彬,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,(12):73-76.
- [8] 胡天乐,曹彬,朱颖心,等.北京高校自习教室使用率对供暖季室内热环境的影响[J].暖通空调,2015,(8):98-101.
- [9] Yu Yanzhe, Wang Bei You, Shijun, et al. The effects of manual airing strategies and architectural factors on the indoor air quality in college classrooms: a case study[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2021(prepublish).
- [10] Jiang J, Wang D, Liu Y, et al. A holistic approach to the evaluation of the indoor temperature based on thermal comfort and learning performance[J]. Building and Environment, 2021,(4):107803.
- [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.
- [12] 王昭俊,宁浩然,任静.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(11):73-79.
- [13] GB/T 18883-2002,室内空气质量标准[S].北京:中国质检出版社,2003.
- [14] Brager G S, Dear R. Thermal adaptation in the built environment: a literature review[J]. Energy and Buildings, 1998,27(1):83-96.
- [15] Yao R, Li B, Liu J. A theoretical adaptive model of thermal comfort - Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)[J]. BUILDING AND ENVIRONMENT, 2009.
- [16] Bakó-Biró Zs, Clements-Croome DJ, Kochhar N, et al. Ventilation rates in schools and pupils' performance[J]. Building and Environment, 2012,48:215-223.

---

### (上接第 853 页)

- [2] 严瀚.气流组织对数据中心空调系统能耗影响的研究[D].上海:上海交通大学,2015.
- [3] 田振武,黄翔,郭志成,等.新型蒸发冷却空调系统在数据中心的运行测试分析[J].制冷与空调,2020,34(3):297-302.
- [4] 中国制冷学会数据中心冷却工作组.中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2019[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [5] 赖柏年,张剑麟,陈文,等.数据中心水冷空调末端的 CFD 模拟及应用分析[J].制冷与空调,2017,31(6):565-575.
- [6] 王冰霜,张云娟,宋俊峰,等.R410A 直流变频列间空调系统变流量调节性能分析及试验研究[J].制冷与空调,2017,31(2):194-198.
- [7] 陈杰.数据机房冷通道封闭技术应用及模拟分析[J].暖通空调,2015,45(6):37-40.
- [8] 邱玉英,邱琳祯.数据中心列间空调气流组织分析与优化[J].福建工程学院学报,2021,19(1):84-88.