

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-047-07

# 夏季室内风速对学生学习效率的影响研究

蒋婧 孙已明 秦石磊 刘菲

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048)

**【摘要】** 目前,室内环境设计标准大部分面向居住建筑,对教学建筑的研究较为少见,且室内环境设计主要以人员舒适度为基础,较少考虑到人员工作及学习效率的层面。而教室作为青少年学生的主要学习场所,其内部环境的优劣与学生身心健康和学习效率密切相关。因此以在校中学生为研究对象,采取主观问卷调查与学习效率测试实验相结合的方法,在前期研究的基础上探究了夏季教室舒适温度 $24^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{CO}_2$ 浓度为600ppm的环境中在不同风速(0m/s、0.4m/s、0.8m/s、1.2m/s)下学生对室内环境的主观评价和学习效率的变化。结果表明:夏季教室内推荐风速为0.4m/s,在该风速下,有着最高正确率、最短反应时间和最高学习效率的同时对风速评价和风速满意度评价也在良好范围。不同风速对学习效率测试项目的影响程度差异主要取决于任务类型。

**【关键词】** 中学生; 室内风速; 学习效率; 主观评价; 实验研究

中图分类号 TU119 文献标志码 A

## Experimental Research on the Effect of Indoor Air Velocity on Learning Efficiency in Summer

Jiang Jing Sun Yiming Qin Shilei Liu Fei

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** At present, most indoor environmental design standards are oriented towards residential buildings, and research on teaching buildings is relatively rare. Moreover, indoor environmental design is mainly based on personnel comfort, with little consideration given to personnel work and learning efficiency. As the main learning place for young students, the quality of the classroom's internal environment is closely related to their physical and mental health and learning efficiency. Therefore, this article takes middle school students as the research object and adopts a combination of subjective questionnaire surveys and learning efficiency testing experiments. Based on previous research, it explores the subjective evaluation of indoor environment and changes in learning efficiency of students under different wind speeds (0m/s, 0.4m/s, 0.8m/s, 1.2m/s) in an environment with a comfortable temperature of  $24^{\circ}\text{C}$  and a  $\text{CO}_2$  concentration of 600ppm in summer classrooms. The results show that the recommended wind speed in the summer classroom is 0.4m/s. At this wind speed, it has the highest accuracy, shortest reaction time, and highest learning efficiency, while the evaluation of wind speed and satisfaction with wind speed are also within a good range. The degree of impact of different wind speeds on learning efficiency testing projects mainly depends on the type of task.

**【Keywords】** middle school student; Indoor wind speed; learning efficiency; subjective evaluation; experimental study

## 0 引言

中小学生的绝大部分时间在教室中度过,教室内部环境的优劣直接影响着学生的热舒适和学习效

率<sup>[1,2]</sup>。其中空气温度、平均辐射温度、相对湿度、气流速度等环境变量时刻影响着人体热舒适,室内碳氧浓度是空气品质的重要评价指标。而在炎热的

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51908438); 西部绿色建筑国家重点实验室开放基金项目(LSKF202004)

作者(通讯作者)简介: 蒋婧(1989-),女,博士,副教授, E-mail: jiangjing@xpu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-22

夏季,人体会分泌汗液来调控体温,需要适当的风速加速表面汗液蒸发,以降低不适感。目前国内外对室内热环境的研究多集中在办公室环境,而办公室与教室的环境有着很大差别。且以往对教室热环境的相关研究多集中在大学生,对中学生的关注度较少,大部分的中学生教室与大学教室相比存在使用时间长、人员密度大、通风质量差等<sup>[3]</sup>特点。因此研究夏季室内通风对中学生学习效率提高具有重要参考意义。

教室的主要目的是为学生提供有利的学习环境,其内部影响学习效率的因素众多。目前已经有众多学者对环境风速与学习效率之间的关系进行了研究,但尚未明确给出将二者之间结合后有利于高效学习的推荐范围,崔惟霖<sup>[4]</sup>研究了相同热感觉条件下不同环境温度与风速组合对人体舒适性及工作效率的影响,发现在偏热环境中较大的风速可以明显改善人员的热舒适。Wargocki 等<sup>[5,6]</sup>研究了空气温度和空气质量对学生学习状态的影响,研究发现换气率从 5.2L/s 提高到 9.6L/s 和室内温度从 25℃降低到 20℃时,学生的阅读速度会大幅提高。Almeida 等人<sup>[7,8]</sup>发现具有通风设备的教室的 CO<sub>2</sub> 浓度远低于自然通风教室,良好的学习环境(热环境和空气质量)可以提高学生 30%的成绩。Liu<sup>[9]</sup>等人在中国西北农村地区针对中小学在自然通风教室进行主观调查和客观测量评估学生对环境的感知和学习成绩,结果表明最佳学习温度为 14℃。杨晓敏等<sup>[10]</sup>对教学建筑自习室通风进行了调查研究,研究结果发现,教室内通风状况与学生学习状况有较大关联。综上可知,良好的通风条件可以营造一个有利于学生健康、学习效率提升的环境。

因此,本文在模拟教室内通过主观评价和客观实验结合的方法,探究夏季教室内风速对学生学习效率的影响,采用适合学生认知水平的 4 类神经行为评价项目进行学习效率测试,研究分析在 0m/s、0.4m/s、0.8m/s、1.2m/s 四组风速工况下学习效率的变化情况,为改善教室条件,提高学习效率提供参考。

## 1 实验方法

### 1.1 实验条件

本实验于 2021 年 8 月在河南省洛阳市某中学模拟教室环境下进行,模拟教室内人员和仪器分布

位置如图 1 所示。根据 ISO7730 的夏季轻体力劳动推荐操作温度为 23~26℃,因此本实验温度设置在 24℃。通过分体式空控制室内温度,空气加湿器控制湿度,室内变频风扇控制室内风速,CO<sub>2</sub> 浓度通过人工释放纯 CO<sub>2</sub> 气体进行调节,在正式实验前由实验人员对实验所需要的室内条件进行调控,并在实验过程中实时监测并记录房间内的风速、温度、相对湿度及 CO<sub>2</sub> 浓度,结合实验前对实验对象进行的热舒适问卷结果和实际教室环境,最终营造 CO<sub>2</sub> 浓度为 600ppm、室内风速为 0m/s、0.4m/s、0.8m/s、1.2m/s 四种实验工况条件。

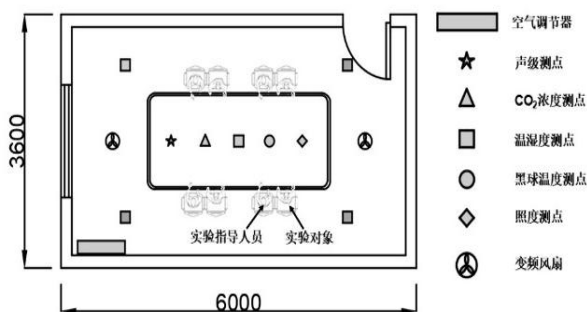


图 1 模拟教室及测量仪器摆放平面图

Fig.1 Layout plan of simulation classroom and measuring instruments

### 1.2 实验对象和实验安排

为避免实验对象学习效率的个体差异和不清楚实验流程引起紧张等因素对实验结果产生影响,选取当地中学生(近期身体健康、作息规律、无基础疾病、统一着装)进行预实验使其熟悉实验流程并筛选出学习效率差异不大的 8 男 8 女共 16 名实验对象。实验对象基本信息(均值±标准差)如下:年龄方面男性(14.6±0.5)岁,女性(14.1±0.8)岁;身高方面男性(165.9±2.3)厘米,女性(154.6±2.7)厘米;体重方面男性(54.1±3.6)千克,女性(45.4±3.1)千克。

16 名实验对象被分为 4 组(每组男女各 2 名),均参与所有的风速工况实验,同时为保证实验结果客观公正,各试验工况对实验对象保密。正式实验为期 2 天,安排在每天的上午 08:00~12:00,下午 14:00~18:00 进行,每个实验工况实验时长为 50min,与正常学校课程时长保持相似。50min 内各项测试项目分布流程如图 2 所示,实验对象在各项测试完成后即可离开教室。

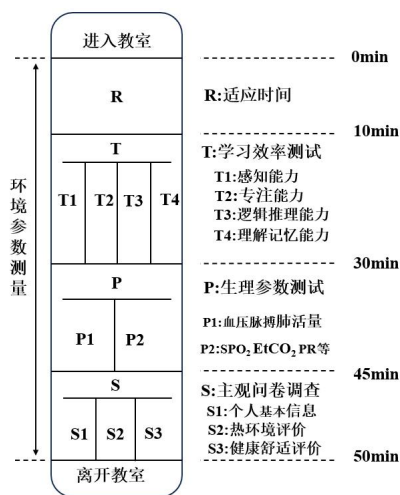


图 2 实验流程图

Fig.2 Experimental flowchart

### 1.3 实验对象和实验安排

#### 1.3.1 环境参数测量

在正式实验前对所有测量仪器进行校准, 确保实验过程中对室内环境参数准确实时监测, 使用的主要仪器有: CO<sub>2</sub> 测试计 TES-1370H (测量范围 0~6000ppm、精度 ±1ppm), 温湿度记录仪 PR-3003-WS (温度测量范围 -40~84℃、精度 ±0.1℃; 相对湿度测量范围 0~100%、精度 ±1.5%), 热球风速计 ZRQF-F30J (测量范围 0.05~30m/s、精度 ±(4%+0.1) m/s), 热力指数计 8778 (测量范围 0~80℃, 精度 ±1℃), 噪声计 DT855 (测量范围 30~130dB、精度 ±1.4dB), 数字照度计 BSD33OL (测量范围 0~100000Lux、精度 ±3%+5Lux)。

#### 1.3.2 主观问卷调查

问卷内容由学生个人基本信息调查、主观评价调查以及学习状态自我评价三部分组成。个人基本信息主要调查学生的性别、年龄、身高等; 室内环境主观评价主要包括室内环境主观评价, 室内风速、空气品质及其满意度评价, 均采用 5 级标度, 依次为“太小→太大 (0→4)、很不满意→很满意 (0→4)”; 及健康舒适评价头痛, 口干、嗓子难受, 想瞌睡, 无精打采, 思考能力下降等方面, 采用 5 级评价标度, 从“无→极其严重” (0→4)。学习状态自我评价包括学习效率和热情评价, 采用 7 级标度依次为“很低→很高 (0→6)”。

#### 1.3.3 学习效率测试

在针对学习效率测试的众多方法中, 本文采用具有高效便捷特性的基于人员认知能力的神经行

为评价方法<sup>[11]</sup>对实验对象进行测试。测试内容针对中学生的学习认知能力和水平设定, 其中字母检索、空间定位、立体视觉用来评价感知能力; 注意力测试、舒尔特方格、数字分类用来评价专注能力; 连续加减、顺序推理、定义判断用来评价逻辑推理能力; 记忆扫描、方格填充、视觉学习用来评价理解记忆能力。在学习效率测试规定的时间内完成实验人员开发的学习效率测评软件, 再由记录的各项目正确率和反应时间换算出学习效率。

#### 1.3.4 数据分析

首先, 检查所有数据, 剔除极个别明显偏离正常取值范围的数据, 以保证数据分析结果的准确性; 然后对数据进行描述性统计, 计算得到各项结果的描述统计量: 均值和标准差; 检验数据是否服从正态分布。

对测试所得数据进行方差分析, 确定各组测试项目在不同风速下的差异, 设置显著性水平  $P$  为 0.05。此外, 由于  $P$  值仅能表明结果存在差异的概率, 而无法显示结果差异的大小, 因此引入效应量  $ES$  来衡量实验影响强度<sup>[12]</sup>。效应量  $ES$  可由式 (1) 计算的到:

$$ES = \sqrt{\frac{F}{n}} \quad (1)$$

式中:  $ES$  为效应量;  $F$  为检验统计量;  $n$  为每次实验的人数。其中  $ES \geq 0.1$ ,  $ES \geq 0.25$  和  $ES \geq 0.4$  分别代表较小、中等和较大影响的效应量。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境测量结果与分析

实验过程中各工况的环境参数测量值如表 1 所示, 由表中数据可以看出, 室内实际环境参数接近于设计工况参数, 表明室内环境得到较好控制。其他参数 (光照、噪声) 在各工况中波动不大, 可忽略其影响。

表 1 实测环境参数

Table 1 Measured environmental parameters

实验工况	室内风速 (m/s)	空气温度 (°C)	相对湿度 (%)	CO <sub>2</sub> 浓度 (ppm)	平均辐射温度 (°C)
0m/s	0.01±0.02	26.1±0.2	45.5±1.8	625±102	25.9±0.1
0.4m/s	0.40±0.01	26.1±0.2	45.3±1.6	650±110	25.9±0.1
0.8m/s	0.79±0.02	26.0±0.1	45.6±1.8	596±95	25.8±0.2
1.2m/s	1.21±0.01	25.9±0.2	45.2±1.5	610±120	25.9±0.1

### 2.2 主观问卷调查结果分析

实验对象的风速评价及风速满意度投票结果如图 3 所示。在 0m/s 时有 87.5% 的实验对象认为“风速适中”，12.5% 认为“风速较小”。在 0.4m/s 时实验对象一致认为此时“风速适中”，此后随着风速的增加，实验对象开始觉得“风速较大”，可见实验对象对风速的评价是以 0.4m/s 为拐点。在 0m/s 和 0.4m/s 中实验对象风速满意度的评价一致是“满意”，随着风速增加至 0.8m/s 和 1.2m/s 时，实验对象对其的评价逐步下降为“不满意”。

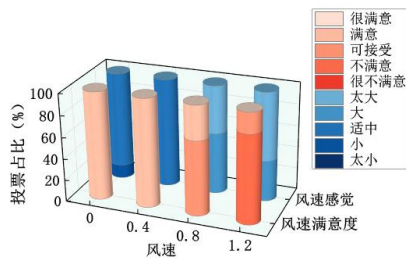


图 3 不同风速评价及满意度投票

Fig.3 Evaluation of different wind speeds and satisfaction voting

同时不同风速工况下实验对象的舒适程度及对工况下风速的变化期望如图 4 所示。实验对象在 0.4m/s 及以下一致认为是“舒适”状态。随后，风速的增加开始让实验对象的舒适程度下降，在 0.8m/s 时舒适程度的评价最低，31.3% 的实验对象给出“不可忍受”的评价。在风速期望上则是 0.4m/s 工况下评价最高，全部的实验对象认为风速不需要变化，此时对风速舒适程度也是 100% “舒适”评

价。综合风速体感、满意度、舒适程度、变化期望四个类型的评价投票结果，认为 0.4m/s 的风速适合作为教室舒适风速的范围。

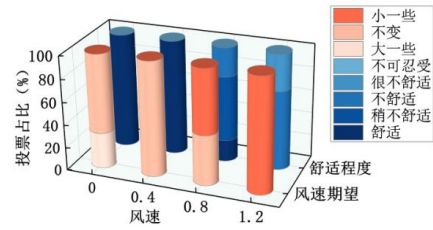


图 4 不同风速舒适度及变化期望

Fig.4 Comfort levels and expected changes at varying wind speeds

不同风速条件下，实验对象的病态建筑综合症<sup>[13]</sup>统计结果如表 2 所示，其中数值越高表征病态建筑综合症越严重。从表中数据可以看出，随着风速的增加，学生“想瞌睡”症状在 1.2m/s 工况中最低；“皮肤干、痒”症状在 0.4m/s 及 0.8m/s 的工况中优于另外两组工况；“呼吸困难、鼻子堵塞、空气中不良的气味”在四组工况中均没有让实验对象感觉有症状产生；其他症状均在风速为 1.2m/s 时最严重。其中，随着风速的增加“呼吸困难”“流鼻涕”“鼻子堵塞”的症状变化大。此外，效应量 *ES* 值表明“头痛”“口干、嗓子难受”“流鼻涕”“鼻子堵塞”具有中等效应值，其余症状均具有较小效应值。表中的 *P* 值显示风速对病态建筑综合症症状的影响并不显著；再结合其 *ES* 值可认为在本研究中病态建筑综合症与风速之间无明显关系。

表 2 不同风速对实验对象的健康舒适感觉的影响

Table 2 The effect of different wind speeds on the health and comfort of experimental subjects

病态建筑综合征	0m/s	0.4m/s	0.8m/s	1.2m/s	<i>P</i>	<i>ES</i>
头痛	0.13±0.33	0.13±0.33	0.13±0.33	0.38±0.60	0.34	0.27
口干、嗓子难受	0.06±0.24	0.06±0.24	0.06±0.24	0.38±0.48	0.11	0.36
呼吸困难	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	—	—
皮肤干、痒	0.13±0.33	0.06±0.24	0.06±0.24	0.13±0.33	0.87	0.12
想瞌睡	0.19±0.39	0.19±0.39	0.19±0.39	0.06±0.24	0.72	0.17
无精打采	0.19±0.39	0.19±0.39	0.19±0.39	0.25±0.43	0.96	0.08
思考能力下降	0.13±0.33	0.13±0.33	0.13±0.33	0.19±0.39	0.93	0.10
难以集中注意力	0.19±0.39	0.25±0.43	0.25±0.43	0.44±0.61	0.48	0.23
眼睛刺激	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	—	—
流鼻涕	0.06±0.24	0.13±0.33	0.13±0.33	0.44±0.61	0.09	0.38
鼻子堵塞	0.00±0.00	0.06±0.24	0.06±0.24	0.38±0.70	0.12	0.35
空气中不良的气味	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	—	—

2.3 学习效率测试

2.3.1 测试结果

学习效率是结合测试项目的正确率和反应时间经计算得到, 用来评价测试的整体性能。对正确率和反应时间赋值权重 0.5 经加权计算得到, 计算公式<sup>[14]</sup>如下:

$$LP = \left[ AC^{0.5} \times \left( \frac{1}{RT} \right)^{0.5} \right]^2 = \frac{AC}{RT} \quad (2)$$

式中:  $AC$  为正确率, %;  $RT$  为反应时间, s; ( $P < 0.05$ )。

$LP$  为学习效率。

$CO_2$  浓度在 600ppm 不同风速工况下的各项学习效率项目测试结果如表 3 所示。对正确率  $AC$ 、反应时间  $RT$ 、学习效率  $LP$  三个评价指标进行分析, 得到其  $P$  值和  $ES$  值。从表中数据可知, 在  $CO_2$  浓度为 600ppm 背景下, 不同风速对学习效率的影响差异主要取决于任务类型。在全部的测试项目中, 未有测试项目有在不同工况下有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

表 3 学习效率测试项目结果 (均值±标准差)

Table 3 Learning efficiency test project results (mean ± standard deviation)

测试类别	测试项目	指标	0m/s	0.4m/s	0.8m/s	1.2m/s	$P$	$ES$
	注意力测试	AC	0.94±0.11	0.94±0.11	0.94±0.11	0.91±0.12	0.83	0.14
		RT	56±5.95	55±4.15	58±7.91	60±8.54	0.21	0.31
		RP	1.16±0.17	1.19±0.19	1.13±0.18	1.05±0.16	0.18	0.32
	舒尔特方格	AC	0.98±0.06	0.98±0.06	0.98±0.06	0.97±0.08	0.89	0.11
		RT	108±5.66	106.31±7.87	110.00±7.83	112.00±6.00	0.14	0.34
		RP	1.11±0.09	1.13±0.10	1.09±0.11	1.05±0.11	0.23	0.30
	数字分类	AC	1.00±0.00	1.00±0.00	1.00±0.00	1.00±0.00	1	0.00
		RT	5.63±0.99	5.38±0.86	5.38±0.11	5.38±1.17	0.88	0.12
		RP	0.98±0.17	1.02±0.17	1.04±0.22	1.04±0.23	0.81	0.14
	字母检索	AC	1.00±0.00	1.00±0.00	1.00±0.00	1.00±0.00	1	0.00
		RT	13.13±1.76	12.63±2.15	14.19±3.15	14.81±4.64	0.22	0.31
		RP	1.15±0.16	1.21±0.19	1.09±0.20	1.09±0.29	0.37	0.26
	空间定位	AC	0.89±0.13	0.89±0.12	0.86±0.12	0.86±0.12	0.88	0.12
		RT	16.38±2.37	15.00±3.92	17.25±4.71	17.81±4.98	0.27	0.29
		RP	1.12±0.23	1.32±0.42	1.10±0.30	1.07±0.32	0.16	0.34
	立体视觉	AC	0.97±0.08	0.98±0.06	0.97±0.08	0.95±0.10	0.78	0.15
		RT	39.31±7.19	38.88±5.34	41.25±7.18	41.63±6.54	0.59	0.20
		RP	1.12±0.22	1.13±0.16	1.07±0.24	1.02±0.16	0.44	0.24
	记忆扫描	AC	0.95±0.10	0.97±0.08	0.95±0.10	0.94±0.11	0.85	0.13
		RT	77.38±7.38	76.38±8.29	78.31±10.37	81.00±5.84	0.45	0.24
		RP	1.10±0.18	1.13±0.11	1.09±0.17	1.03±0.15	0.36	0.26
	方格填充	AC	0.97±0.08	0.97±0.08	0.97±0.08	0.95±0.10	0.95	0.09
		RT	48.38±3.69	48.06±2.22	48.88±3.06	49.38±3.20	0.67	0.18
		RP	1.06±0.14	1.06±0.11	1.04±0.09	1.02±0.12	0.70	0.17
	视觉学习	AC	0.28±0.29	0.30±0.28	0.27±0.27	0.28±0.28	0.99	0.04
		RT	286.06±33.01	283.31±16.80	290.50±27.26	292.13±20.92	0.76	0.15
		RP	1.11±1.06	1.39±1.49	1.12±1.12	1.44±1.87	0.88	0.12

续表 3 学习效率测试项目结果 (均值±标准差)

Table 3 Learning efficiency test project results (mean ± standard deviation)

测试类别	测试项目	指标	0m/s	0.4m/s	0.8m/s	1.2m/s	P	ES
连续加减		AC	0.86±0.18	0.86±0.18	0.86±0.20	0.81±0.24	0.89	0.11
		RT	102.50±27.65	100.19±17.39	106.00±16.14	112.13±26.47	0.50	0.22
		RP	1.27±0.36	1.27±0.33	1.18±0.30	1.14±0.55	0.77	0.15
逻辑推理	顺序推理	AC	0.72±0.23	0.72±0.23	0.68±0.23	0.68±0.23	0.96	0.08
		RT	77.50±19.61	75.31±14.03	81.31±26.03	87.38±19.88	0.39	0.25
		RP	1.27±0.56	1.24±0.46	1.25±0.68	1.04±0.39	0.61	0.19
定义判断		AC	0.36±0.20	0.38±0.20	0.31±0.19	0.30±0.20	0.81	0.14
		RT	61.38±12.59	60.06±11.52	63.00±14.63	65.06±13.04	0.74	0.16
		RP	1.42±1.05	1.13±0.18	1.07±0.69	1.07±0.84	0.53	0.22

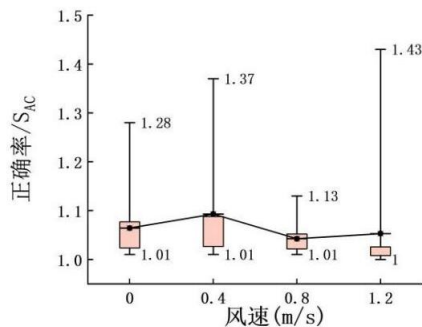
2.3.2 基本要求

在计算各测试项目学习效率时,由于各项目类型不同导致正确率及反应时间不同。为比较不同测试项目,对所有实验对象的各项学习效率指标进行标准化处理,计算公式<sup>[15]</sup>如下:

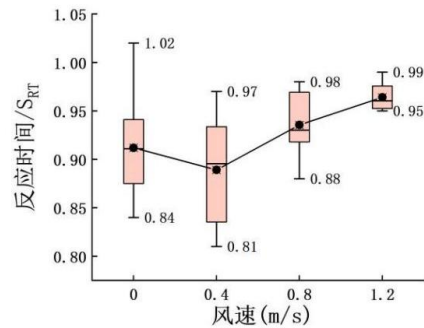
$$S_{i,j}(\%) = \frac{x_{i,j}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{i,j}} \quad (3)$$

式中:  $S_{i,j}$  为第  $i$  个受试者在工况  $j$  时的学习效率指标经标准化处理后的数值;  $x_{i,j}$  为第  $i$  个受试者在工况  $j$  时的指标;  $n$  为每个测试者进行的工况总数。

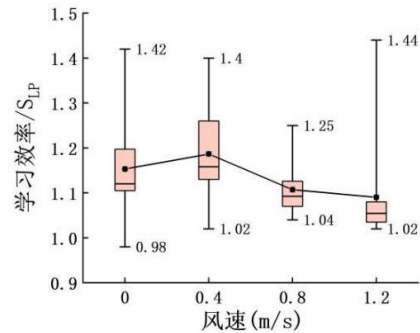
由公式 (3) 可以得出各测试项目标准化后的正确率  $S_{AC}$ 、反应时间  $S_{RT}$  及学习效率  $S_{LP}$ , 各指标随风速不同变化情况如图 5 所示。综合分析图 5 各图可以得出,随着风速的增加,正确率及学习效率的均值先增加后减小,正确率在 1.2m/s 时略高于 0.8m/s; 在风速为 0.4m/s 时达到最大值; 反应时间先减少后增加; 即在 0.4m/s 时有着最高正确率、最短反应时间和最高学习效率。总体上看,用变频风扇营造出不同的风速工况中,学习效率各项指标均有变化,但变化幅度各不相同。



(a) 正确率变化情况



(b) 反应时间变化情况



(c) 学习效率变化情况

图 5 不同风速条件下各学习指标变化情况

Fig.5 Changes in various learning indicators under different wind speed conditions

2.3.3 室内风速与学习效率的关系

在用变频风扇营造的不同风速工况中,学生对风速的满意度和变化期望等进行评估。结果表明:实验对象对风速的满意度和舒适都是在 0.4m/s 及以下达到最佳,随后开始随着风速增加评价逐渐下降;风速的增加会导致出现或加重不适症状,但不适症状在不同风速工况之间并未有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。另外,本实验工况设置  $CO_2$  浓度



600ppm, 该浓度值较低接近室外空气 CO<sub>2</sub> 浓度, 符合其他实验研究<sup>[16]</sup>中低 CO<sub>2</sub> 浓度对病态建筑综合症影响较小的结论。室内风速随学习效率的影响研究表明<sup>[17]</sup>, 教学建筑内学生学习效率主要受教学建筑内通风状况的影响。综合表 3 数据和图 5 的图像走势, 正确率、学习效率先增加后减小, 反应时间先减小后增大, 各项学习效率指标都是以 0.4m/s 为拐点。本实验采取的所有测试任务项目均被应用于研究其他因素对工作效率的影响, 可能会由于实验对象的个体差异在不同工况下有显著影响。

采用变频风扇营造不同风速时会与空调产生的气流及人员对气流的遮挡相互影响可能会造成实验对象周围最终风速不均; 其次, 在实验对象进入模拟教室后会先有一段适应时间再去完成问卷调查和学习效率测试。在这一段时间里, 由于个体适应新环境的能力不同及人体对于环境的适应性, 会使实验对象对接下来的问卷调查和学习效率实验的结果产生一定影响。因此, 在接下来的实验中可以优化送风方式, 降低气流干扰因素影响, 使气流更加均匀, 增加刚进入模拟教室后即进行问卷调查和学习效率测试的环节, 并与现研究结果进行对比分析。

### 3 结论

通过在模拟教室中设置以室内温度 24℃, CO<sub>2</sub> 浓度 600ppm 为背景, 风速为 0m/s、0.4m/s、0.8m/s、1.2m/s 四种工况的实验探究, 分析中学生在夏季教室不同风速下的主观热感受和学习效率变化情况, 为改善优化建筑热工设计、通风设置等中学生教室条件, 提高学生学习效率提供依据。

风速在 0.4m/s 之内, 实验对象拥有较高的风速主观评价; 当风速大于 0.4m/s 后, 实验对象对风速的评价和满意度开始大幅下降, 风速带来的舒适程度也开始下降。

随着风速的增加, 实验对象正确率和学习效率均先增加后减小, 在 0.4m/s 工况中达到最佳; 同时各项学习效率指标在不同风速工况中均有所变化, 但变化幅度各不相同。

夏季教室环境推荐风速为 0.4m/s。在该风速下, 不仅有着良好的风速主观评价, 还有着最高的正确率、最短的反应时间和最高的学习效率。

### 参考文献:

- [1] Mendell M J, Heath G A. Do indoor environments in schools influence student performance? A review of the literature[J]. *Indoor Air*, 2002.
- [2] Nisha Patet Sensharma J E W A. Relationships between the indoor environment and productivity: A literature review[J]. *Ashrae Transactions*, 1998,104(1a):686-701.
- [3] Zomorodian Z S, Tahsildoost M, Hafezi M. Thermal comfort in educational buildings: A review article[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016,59: 895-906.
- [4] 崔惟霖, 欧阳沁, 余娟, 等. 相同热感觉条件下不同环境温度与风速组合对人体舒适性及工作效率的影响[J]. *暖通空调*, 2013,43(7):68-72.
- [5] Pawel wargocki, Wyon D. The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257)[J]. *Hvac & R Research*, 2007,13(2): 193-220.
- [6] Wargocki P, Wyon D. The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classrooms on the Performance of Schoolwork by Children(RP1257)[J]. *Hvac & R Research*, 2007,13:165-191.
- [7] Almeida R M S F, De Freitas V P. IEQ Assessment of Classrooms with an Optimized Demand Controlled Ventilation System[J]. *Energy Procedia*, 2015,78:3132-3137.
- [8] Almeida R M S F, Freitas V P D, Delgado J M P Q. Indoor Environmental Quality in Classrooms: Case Studies[J]. Springer International Publishing, 2015.
- [9] Liu Y, Jiang J, Wang D, et al. The indoor thermal environment of rural school classrooms in Northwestern China [J]. *Indoor and Built Environment*, 2017,26(5): 662-679.
- [10] 杨晓敏, 侯东梁, 王哲. 关于自习教室通风与噪声环境调查报告[J]. *科教导刊: 电子版*, 2017,(8):1.
- [11] 蒋婧. 热舒适与学习效率综合作用的西北乡域教室冬季热环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [12] 兰丽. 室内环境对人员工作效率影响机理与评价研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [13] Takaoka M, Suzuki K, Norback D. Sick Building Syndrome Among Junior High School Students in Japan in Relation to the Home and School Environment[J]. *Glob J Health Sci*, 2015,8(2):165-177. (下转第 76 页)

蒸发冷却结合的空调系统相比蒸发冷却与机械制冷复合的空调系统 PUE 降低 0.13, 每年节约电量 34.16 万 kWh, 节约电费约 19.29 万元, 节能环保效果显著。

#### 参考文献:

- [1] 孙铁柱,黄翔,汪超,等.蒸发冷却空调设备的研究进展与应用概况[J].制冷与空调,2014,14(3):40-45.
- [2] 孙铁柱.蒸发冷却与机械制冷复合高温冷水机组的研究[D].西安:西安工程大学,2012.
- [3] 孙铁柱,黄翔,文力.蒸发冷却与机械制冷复合高温冷水机组设计分析[J].西安工程大学学报,2011,25(5):679-683.
- [4] 孙铁柱,黄翔,文力.蒸发冷却与机械制冷复合高温冷水机组的测试探讨[J].暖通空调,2011,41(7):31-34.
- [5] 杜成仁.冰蓄冷空调系统设计及优化节能措施[J].住宅科技,2013,33(10):13-15.
- [6] 王宝龙,石文星,李先庭.空调蓄冷技术在我国的研究进展[J].暖通空调,2010,40(6):6-12.
- [7] 余延顺,屈贤琳,徐辉,等.季节性冰雪蓄冷技术在建筑空调中的应用[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2010.11(3):339-343.
- [8] 余延顺,李迪,李先庭,等.季节性冰雪蓄冷技术的研究现状与技术展望[J].暖通空调,2005,35(3):24-30.
- [9] 于军琪,赵何超,陈登峰.基于 IW-ABC 算法的冰蓄冷空调系统优化调度研究[J].建筑科学,2023,39(08):124-133,175.
- [10] 狄育慧,刘加平,黄翔.蒸发冷却空调应用的气候适应性区域划分[J].暖通空调,2010,40(2):108-111.
- [11] 张玉东,宣永梅,黄翔.蒸发冷却适应性分区进展研究[J].制冷与空调,2013,27(1):33-38,51.
- [12] 宋芳婷,诸群飞,吴如宏,等.中国建筑热环境分析专用气象数据集[C].全国暖通空调制冷 2006 学术年会资料集,2006:264.
- [13] 杜赛赛,王新如,张勇,等.基于 TRNSYS 的埋地管地源热泵系统土壤冷热平衡研究[J].建筑节能(中英文),2022,50(12):119-125.
- [14] 史晨曦,狄育慧,蒋婧.基于 TRNSYS 的高校浴室燃气锅炉+污水源热泵供热水耦合系统的优化分析[J].制冷与空调,2022,36(5):726-732.
- [15] 孙林娜,刘启明,许抗吾,等.基于 DeST 及 TRNSYS 软件的公共建筑能耗模型分析[J].建筑节能(中英文),2022,50(10):63-71.
- [16] 孙铁柱,王祺,马杰.自然条件下水冷捕获量的建模与验证[J].西安工程大学学报,2023,37(1):38-45.
- [17] 陕西省发展和改革委员会关于榆林电网 2020-2022 年输配电价有关问题的通知[Z].2020,1640 号.
- [14] Lan L, Lian Z, Pan L. The effects of air temperature on office workers' well-being, workload and productivity-evaluated with subjective ratings[J]. Applied ergonomics, 2011,42(1):29-36.
- [15] Lan L, Lian Z. Use of neurobehavioral tests to evaluate the effects of indoor environment quality on productivity[J]. Building and environment, 2009,44(11): 2208-2217.
- [16] Vehviläinen, Lindholm H, Hannu Rintamäki, et al. High indoor CO<sub>2</sub> concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO<sub>2</sub> level and sleepiness during cognitive work[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 201,13(1):19-29.
- [17] 王雷耀,王丽新,马丽,等.大学校园典型室内环境新风量调查与分析[J].北京建筑大学学报,2019,35(2):6.

(上接第 53 页)