

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-108-07

教学建筑室内环境对学习效率影响的敏感性分析

蒋 婧 张静怡 聂皓清 姜之涛 刘 菲

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048)

【摘 要】 教室内环境的优劣不仅影响学生的健康舒适,还会对其学习效率产生直接影响。在针对过渡季高校室内温湿度、CO₂ 浓度、声音强度和光照强度对学生学习效率影响的研究基础上,利用分段线性插值法和 CRITIC 客观权重赋权法,建立基于学习效率的室内环境因素敏感性评价模型,探讨典型环境因素对学习效率影响的敏感性。结果发现:160~197lx 的光照强度、超过 21.5℃ 的温度或超过 2481ppm 的 CO₂ 浓度会降低专注力;184~260lx 的光照强度或 40~47dB 的声音强度有利于感知力;光照强度超过 310lx 会降低理解记忆能力;21.5℃ 的温度或声音强度超过 42.5dB 有利于逻辑推理能力。声音强度对于专注力、感知力及逻辑推理能力最敏感,温度对于理解记忆能力最敏感;环境因素敏感性占比为:声环境 (30.5%)、热环境 (29.5%)、空气品质 (23.5%)、光环境 (16.5%)。

【关键词】 过渡季;教学建筑;室内环境;学习效率;敏感性分析

中图分类号 TU119.9 文献标志码 A

Sensitivity Analysis of the Effect of Indoor Environment of Teaching Buildings on Learning Efficiency

Jiang Jing Zhang Jingyi Nie Haoqing Jiang Zhitao Liu Fei

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

【Abstract】 The quality of indoor environment not only affects students' health and comfort, but also has a direct impact on their learning efficiency. In this paper, on the basis of the research on the impact of indoor temperature and humidity, CO₂ concentration, sound intensity and light intensity on students' learning efficiency in colleges and universities in the transition season, a sensitivity evaluation model of indoor environmental factors based on learning efficiency was established by using segmented linear interpolation and CRITIC objective weight assignment method to explore the sensitivity of the impact of typical environmental factors on learning efficiency. The results found that: light intensity of 160~197lx, temperature over 21.5℃ or CO₂ concentration over 2481 ppm decreased concentration; light intensity of 184~260lx or sound intensity of 40~47dB favored perception; light intensity over 310lx decreased comprehension and memory ability; temperature of 21.5℃ or sound intensity over 42.5dB favors logical reasoning ability. Sound intensity was the most sensitive to concentration, perception, and logical reasoning, and temperature was the most sensitive to comprehension and memory; the percentage of environmental factor sensitivity was: sound environment (30.5%), heat environment (29.5%), air quality (23.5%), and light environment (16.5%).

【Keywords】 Transition season; Teaching building; Indoor environment; Learning efficiency; Sensitivity analysis

0 引言

近年来,教育研究者和环境科学家们日益关注

教室室内环境对学生学习效率的影响。优良的室内环境能够促进学生的学习效率^[1]。众多研究表明,

基金项目:国家自然科学基金青年项目 (51908438)

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:2024-09-19

不同光照、温度、空气质量和噪声等环境因素可能会对学生的学习效率产生重要影响^[2-5]。为了深入了解这些因素的影响程度,已有众多学者展开了研究。针对夏季教室环境,胡佳林等人指出 CO₂ 浓度长期保持在较高水平是导致学习效率降低的主要原因^[6]。针对秋季教室环境, Xiong 等人发现室内温度是影响反应时间的主要因素,而照度则是影响反应时间和绩效指标的另一个主要因素^[7]。针对冬季教室环境,李明雪等人发现 CO₂ 浓度对学生学习效率的负面影响超过了光照强度^[8]。黄梓薇也指出 CO₂ 浓度是影响学生学习效率最为突出的因素,其次是照度、噪声,而热环境则是较不突出的因素^[9]。

目前,考虑到多种因素的影响,研究室内环境质量与使用者对整体环境满意度之间的量化关系已经成为一种主流方法。Humphreys MA 等人采用偏好量表、空气质量量表和整体环境满意度量表来判断环境质量,发现温度对总体满意度的贡献最高,其次是空气质量^[10]。然而,当前研究中对于环境因素的影响程度排序尚未统一, Frontczak M 等人给出的环境因素重要性排序由强到弱为:热环境、声环境、空气品质、光环境^[11]; Wong LT 的排序为:热环境、空气品质、声环境、光环境^[12]。

一般情况下,敏感性反映的是影响因素(自变量)的改变对被影响因素(因变量)变化幅度的影响强度。当自变量的较小变动引起因变量的较大变动时,称该因变量对自变量的敏感性强^[13]。目前,对环境因素的敏感性分析通常侧重于区域生态敏感性的探究^[14],但也有学者针对室内各环境影响因子对人体健康影响的敏感性进行了研究,结果表明:装修材料污染、空气污染及水污染对室内健康环境影响的敏感性最高^[15]。

通过综合现有文献,可以发现热、光、声环境、空气品质的多种因素在影响学生对整体环境满意度、学习过程及效果等方面都发挥着不同程度的作用,因此多因素的综合研究十分必要。但目前针对多因素的建筑环境研究较少,涉及过渡季节教室环境对学生认知能力的影响和多种环境因素之间的相关性探讨更少,室内环境质量的评价体系尚不完善。

由前期的研究成果可知,过渡季高校室内环境对学生的学习效率有显著影响,其中专注力、感知力、理解记忆能力以及逻辑推理能力受到的影响程

度存在差异^[16]。本文旨在进一步探讨室内环境因素与学习效率之间的关系,构建评价模型分析室内环境因素对学生学习效率影响的敏感程度,本研究将为教室室内环境的高效调控与设计提供参考依据。

1 研究方法

1.1 现场测试概况

本研究于 2023 年 3~5 月在西安市的某高校典型教室内进行现场测试。在整个测试阶段,对空气的温度和湿度、光照强度、声音强度以及 CO₂ 浓度等环境参数进行持续监测。主要的测试仪器有: EZY-1S 型 CO₂ 分析仪(量程 0~5000mg/m³;精度 ±75mg/m³); TR72ui 型温湿度计(量程 -20~60℃,精度 ±0.2℃); JH-149 型照度计(量程 0.1~100000lx,精度 ±4%); JH-921 型噪声计(量程 30~130dB,精度 ±1dB)。测试前校准所有仪器。温度测点采用五点法均匀分布于整个空间,以确保精确测量^[17],其他测点均居中布置,且每个测点的高度统一设定为 1.1m。现场测点布置如图 1 所示。

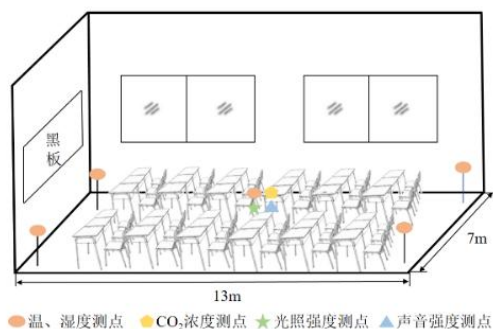


图 1 测点布置图

Fig.1 Layout of measurement points

1.2 测试对象及测试流程

对 248 名高校学生进行现场测试,共收集有效问卷 1200 份,男女问卷比例为 1.04:1。测试对象基本信息(均值±标准差)如下:男生 126 名(占 50.9%),平均年龄(24.3±0.7)岁,平均身高(169.1±6.7)厘米,平均体重(68.4±13.2)千克;女生 122 名(占 49.1%),平均年龄(23.8±0.8)岁,平均身高(161.1±5.4)厘米,平均体重(54.4±7.4)千克。

每日进行四组测试,上午和下午各进行两组,每组由 8 名学生参与,在实际用于上课的教室内进行,具体安排在上午 9:30 至 11:30 以及下午 2:00

至 4:00 的课后时段。在 45min 的课堂学习期间，受试人员像平常一样上课，以适应教室的环境；课间对环境参数进行测量，受试人员静坐 5min 保持身心平静，然后利用 5min 完成一份关于室内环境的主观评价问卷；在随后的 20min 内完成学习效率测试；最后的 5min 完成学习效率的自我评价问卷。

1.3 主观问卷调查

主观测试分为三部分：个人基本信息、主观评价和学习状态自我评价。个人基本信息包括受试人员的性别、年龄、身高和体重等。在主观评价部分，受试人员需要对当前室内的热环境、声环境、光环境以及空气品质进行满意度和舒适度的评价，这些评价均采用五级标尺，依次为“很不满意→很满意（1→5）、舒适→不可忍受（1→5）”；热感觉投票采用 7 级标尺，即“很冷不舒适→热不舒适（-3→3）”。学习状态自我评价包括学习效率和 Learning 热情评价，评分标准采用百分制，即“很低→很高（0→100）”。

1.4 学习效率测试

选择以“专注力、感知能力、理解记忆和逻辑推理”为评价因子表征学习效率的综合测评方法^[18]。测试项目选取字色干扰，字母检索，图形叠加表征感知能力；选取数字筛选，立体视觉，数字计算表征专注能力；选取舒尔特方格，符号译码，无意义数字再认表征理解记忆；选取立体图形展开，逻辑事件推理，文字理解表征逻辑推理^[19]。在评估学习效率的测试阶段，利用软件记录每个测试任务的正误和完成所需时间，进而确定正确率和反应时间，从而计算学习效率。

1.5 室内环境因素评价方法

利用前期研究所获的得分分界值及其对应的学习效率值，使用分段线性插值法^[20]，如式（1）所示，确定不同参数值下对应的评分 F ，取插值后实际效率拐点平均值为分界值效率，由此得到针对不同学习效率因子的各室内环境因素评价分段线性插值函数，进而得到各室内环境因素的评分情况。

$$F(x) = \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} f(x_i) + \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} f(x_{i+1}) \quad (1)$$

1.6 室内环境因素敏感性评价方法

1.6.1 模型原理

CRITIC 是由 Diakoulaki 提出的一种客观定权

法^[21]。在 CRITIC 方法中，假设标准差是恒定的，那么指标之间的冲突性越小，其权重也相应越小；相反，冲突性越大，则权重也越大。同时，若两个指标之间存在较高的正相关性，冲突性越低，表明它们在评估方案的优劣时所反应的信息相似度较高^[22]。

1.6.2 模型构建

假设设有 m 个待评价的环境因素样本， n 项评价指标，形成原始指标数据矩阵 X ，如式（2）所示。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

模型构建步骤如下^[23]：

（1）无量纲化处理

为了消除量纲对结果的影响，需要对各指标进行无量纲处理。这里选用正向指标，如式（3）所示。得到经无量纲处理后的矩阵 X' 。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3)$$

式中： x'_{ij} 为无量纲化处理后的数据； $\max(x_j)$ 、 $\min(x_j)$ 分别为第 j 个评价指标的最大值和最小值。

（2）计算信息承载量

波动性计算式如式（4）所示，式中： \bar{x}_j 为每个指标（列）数据均值。

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (4)$$

计算冲突性需先得到指标的相关性矩阵，计算式如式（5）所示。

$$R = \frac{\sum_{j,k=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (5)$$

冲突性计算式如式（6）所示，其中， r_{ij} 为第 i 个指标与第 j 个指标的相关系数。

$$A_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (6)$$

（3）信息量计算式如式（7）所示，其中， C_j 为第 j 个指标在整个评价体系中作用，其值越大，

权重越大。

$$C_j = S_j \times A_j \quad (7)$$

(4) 计算客观权重

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^n C_j} \quad (8)$$

2 结果与讨论

本研究地处西安市, 经现场测试发现, 过渡季节室内的相对湿度波动范围较小, 所以在研究过程中可以忽略相对湿度的影响。因此, 本文选择温度、声音强度、CO₂ 浓度和光照强度这 4 个环境参数分析其对学生学习效率影响的敏感程度。鉴于现场直接测量获得的环境参数数据量较大, 且各参数值间差距较小, 因此在确保其他环境参数稳定在标准值范围内的前提下, 针对特定参数的波动情况进行数据整合与分组分析。温度测试实测数据区间为 18.5~25℃, 取 0.5℃ 为标准差值分为 14 组 (18.5、19、19.5、20、20.5、21、21.5、22、22.5、23、23.5、24、24.5、25℃); 声音强度实测数据区间为 30~70dB, 取 5dB 为标准差值分为 9 组 (30、35、40、45、50、55、60、65、70dB); CO₂ 浓度实测数据区间为 500~3000ppm, 取 250ppm 为标准差值分为 11 组 (500、750、1000、1250、1500、1750、2000、2250、2500、2750、3000ppm); 光照强度实测数据区间为 160~360lx, 取 20lx 为标准差值分为 11 组 (160、180、200、220、240、260、280、300、320、340、360lx)。因此环境参数的标准值为: 温度 20±0.5℃、声音强度 30±5dB、CO₂ 浓度 1000±250ppm、光照强度 200±20lx。

2.1 基于学习效率因子的室内环境因素评价

室内不同环境因素下专注力的得分情况如图 2 所示。可以看出专注力的得分在 21.5℃ 时最高 (2.50), 在此之后专注力得分直线下降, 说明温度高于 21.5℃ 时会降低专注力; 在 2481ppm 取得最高得分 (2.43), 但此后明显下降, 说明过高的 CO₂ 浓度会对学生的专注力造成负面影响; 在 40dB 时最高, 说明较小的声音强度有利于专注力; 在 160~197lx 得分较低, 197lx 后直线升高, 说明较低的光照强度会降低受试者的专注力, 而 197lx 开始的光照强度会明显提升专注力。

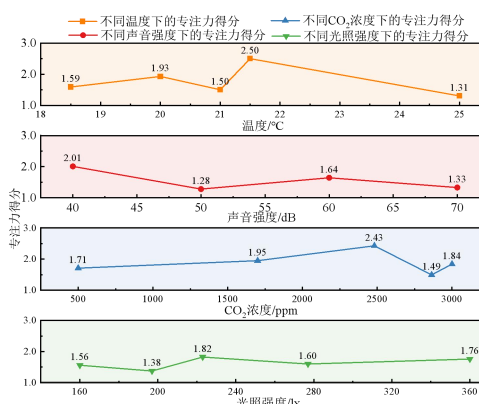


图 2 室内不同环境因素下专注力的得分情况

Fig.2 Attention scores in different environmental factors indoors

室内不同环境因素下感知力的得分情况如图 3 所示。可以看出, 感知力的得分在 21℃ 时最高 (9.83), 但此后直线下降, 说明温度高于 21℃ 会降低感知力; 在声音强度下的得分整体最低, 其中在 40~47dB 时得分较高, 说明较小的声音强度有利于感知力; 在 500~1776ppm 得分较低, 但之后直线上升, 说明高于 1776ppm 的 CO₂ 浓度能够明显提升感知力; 在 184lx 后得分直线升高, 在 260lx 时得到最大值 (9.99), 说明中等偏低的光照能够促进感知力, 且 184~260lx 的光照强度对感知力有明显的促进作用。

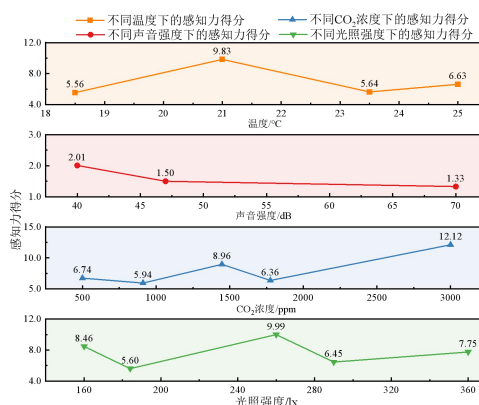


图 3 室内不同环境因素下感知力的得分情况

Fig.3 Perception scores in different environmental factors indoors

室内不同环境因素下理解记忆能力的得分情况如图 4 所示。可以看出理解记忆能力在光照强度下的整体得分波动幅度最大, 160lx 时得分最高 (2.80), 但 310lx 后直线下降, 说明超过 310lx 的光照强度会降低理解记忆能力; 在 18.5~20℃ 时

得分波动幅度较大,但此后呈现平稳增长,25℃时得分最高(1.47),说明21.5~25℃的较高温度能够稳定提高理解记忆能力;理解记忆能力的得分在500~2422ppm及40~55dB的得分整体较高,说明偏低或适中的CO₂浓度或声音强度对其有提升作用。

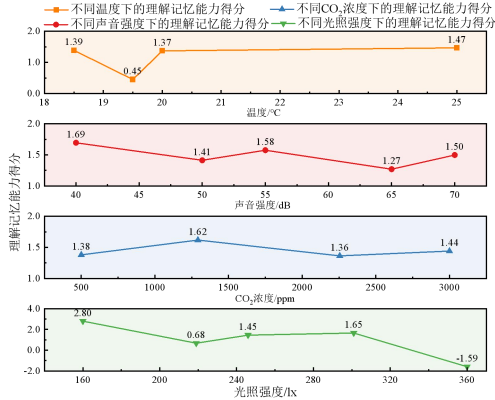


图4 室内不同环境因素下理解记忆能力的得分情况

Fig.4 Comprehension scores in different environmental factors indoors

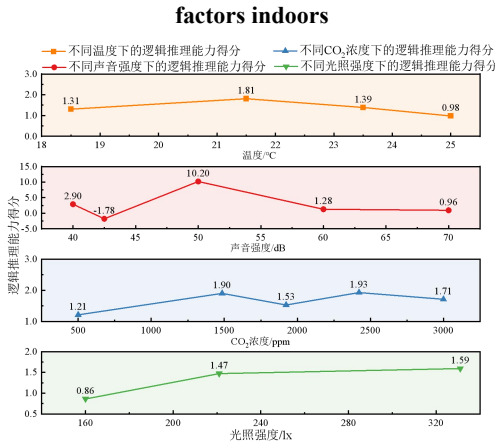


图5 室内不同环境因素下逻辑推理能力的得分情况

Fig.5 Deduction scores in different environmental factors indoors

室内不同环境因素下逻辑推理能力的得分情况如图5所示。可以看出逻辑推理能力在声音强度下的整体得分波动幅度最大,42.5dB时得分最低(-1.78),随后直线升高至50dB达到最大值(10.20),说明高于42.5dB的声音强度对逻辑推理能力有提升作用,但超过50dB就会降此能力;在温度、CO₂浓度、光照强度的整体得分波动相对较小,21.5℃时得分最高(1.81),但此后直线下下降,说明21.5℃的适中温度最有利于逻辑推理能力;在CO₂浓度下的得分整体近似呈现“M”型的变化趋势,说明过低的浓度或过高的浓度都会对此

能力不利;逻辑推理能力的得分随光照强度的增大整体呈现上升的趋势,在331lx取得最大值(1.59),说明较高的光照强度有利于此能力。

2.2 室内环境因素权重计算结果分析

基于各室内环境因素的评分,采用CRITIC客观权重赋权法计算温度X₁、噪声X₂、CO₂浓度X₃、照明X₄的权重,计算结果如表1所示。

表1 室内环境因素权重计算结果

Table 1 Results of weighting of indoor environmental factors

		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
专注力	\bar{X}	0.33	0.45	0.15	0.51
	S	0.23	0.30	0.28	0.32
	R	3.90	3.41	2.60	1.58
	C	0.91	1.03	0.72	0.50
	W	0.29	0.32	0.23	0.16
感知力	\bar{X}	0.37	0.59	0.38	0.41
	S	0.34	0.44	0.33	0.31
	R	3.50	3.02	2.52	2.43
	C	1.18	1.33	0.84	0.76
	W	0.29	0.33	0.20	0.18
理解记忆能力	\bar{X}	0.42	0.39	0.58	0.64
	S	0.31	0.31	0.31	0.30
	R	4.10	3.25	2.88	2.45
	C	1.29	0.99	0.89	0.73
	W	0.33	0.26	0.23	0.19
逻辑推理能力	\bar{X}	0.47	0.49	0.55	0.53
	S	0.24	0.31	0.30	0.27
	R	3.26	2.98	2.70	1.43
	C	0.79	0.93	0.82	0.39
	W	0.27	0.32	0.28	0.13

由此分别得出本研究环境参数条件下基于专注力、感知力、理解记忆能力以及逻辑推理能力的学习效率对室内环境的评价模型公式,如式(9)所示。

$$\begin{cases}
 F(X) = 0.29f(x_1) + 0.32f(x_2) + 0.23f(x_3) + 0.16f(x_4) \\
 F(Y) = 0.29f(y_1) + 0.33f(y_2) + 0.20f(y_3) + 0.18f(y_4) \\
 F(Z) = 0.33f(z_1) + 0.26f(z_2) + 0.23f(z_3) + 0.19f(z_4) \\
 F(N) = 0.27f(n_1) + 0.32f(n_2) + 0.28f(n_3) + 0.13f(n_4)
 \end{cases} \quad (9)$$

由此可知环境因素在专注力和感知力方面的敏感性程度依次为:声音强度>温度>CO₂浓度>光照强度;在理解记忆能力方面依次为:温度>声音强度>CO₂浓度>光照强度;在逻辑推理能力方面依

次为: 声音强度>CO₂浓度>温度>光照强度。

2.3 环境因素敏感性评价及讨论

由于四类环境参数对学习效率会产生不同程度的影响,因此取其权重的平均值为权重的标准值 $\overline{w_i}$, 敏感程度 S_i 为环境参数权重值与标准值的比值, 如式 (10) 所示。

$$S_i = w_i / \overline{w_i} \tag{10}$$

以 $S_i / \overline{w_i} = 1$ 图线作为图形表征的高敏感效应描绘。不同环境因素的敏感程度如图 6 所示。A 区域为存在较强的正相关且冲突性较大的较高敏感区域, B 区域为存在正相关但冲突性较小的较低敏感区域。通过对比可以发现,在不同的学习因子下,温度和声音强度均处于高敏感区域, CO₂浓度和光照强度均处于低敏感区域,但在逻辑推理方面, CO₂浓度也属高敏感因素。

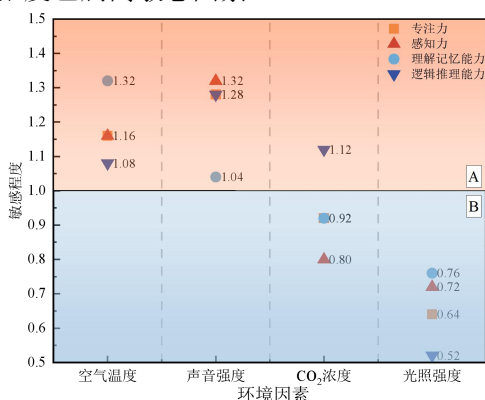


图 6 不同环境因素的敏感程度

Fig.6 Sensitivity to different environmental factors

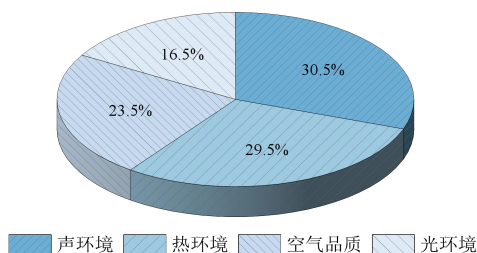


图 7 环境因素敏感程度占比

Fig.7 Percentage of sensitivity to environmental factors

由于室内热环境因素包括空气相对湿度、温度、及空气流速等;室内声环境因素包括声级等;室内光环境因素包括照度等;室内空气品质环境因素包括 CO₂浓度等。因此将本研究环境参数归纳入室内环境等级分析,得到如图 7 所示的环境因素敏感程度的占比情况,排序为:声环境>热环境>空气

品质>光环境。

其中声环境与热环境敏感程度较为突出,这与 Xiong 等人^[7]针对秋季教室环境得出的温度是影响反应时间的主要因素,其次为照度的结论不同,这可能是由于此研究是以感知为任务导向,与本研究的侧重点不同。与 Frontczak M 给出的环境因素重要程度排序较为一致,分别为:热环境、声环境、空气品质、光环境^[24]。但本研究中声环境的敏感程度较为突出,除此之外,该研究主要探讨热、光、声环境及空气品质和环境总满意度间的量化联系,这与本研究的侧重点有所不同。但王兆琦^[25]通过实验建立模型得出不同神经行为能力与环境因素之间的量化关系,认为排序为热环境、声环境、光环境,空气品质的排位与本研究有明显差异,这可能是由于该研究在冬季实验室进行,探究了 CO₂浓度的极端情况。

3 结论

本文在前期研究的基础上,通过对受试者的学习效率进行客观赋权,构建了基于专注力、感知力、理解记忆能力以及逻辑推理能力四方面的室内环境因素敏感性评价模型,综合评价过渡季节高校教室室内不同环境因素对学习效率因子的影响。结论如下:

(1) 现场实测所得的温度变化情况为 18.5~25℃; CO₂变化情况为 500~3000ppm;声音强度变化情况为 30~70dB;光照强度变化情况为 160~360lx。

(2) 160~197lx 的光照强度、超过 21.5℃ 的温度或超过 2481ppm 的 CO₂浓度会降低专注力,较小的声音强度 (40~47dB) 有利于专注力。中等偏低 (184~260lx) 的光照强度或较小的声音强度 (40~47dB) 有利于感知力,温度高于 21℃ 会降低感知力,超过 1776ppm 的 CO₂浓度对感知力有显著提升作用。超过 310lx 的光照强度会降低理解记忆能力,21.5~25℃ 的较高温度或偏低、适中的 CO₂浓度 (500~2422ppm) 对理解记忆能力有提升作用;超过 42.5dB 的声音强度或 21.5℃ 的适中温度有利于逻辑推理能力。

(3) 环境因素在专注力和感知力方面的敏感性程度由强到弱为:声音强度、温度、CO₂浓度、光照强度;在理解记忆能力方面由强到弱为:温度、

声音强度、CO₂浓度、光照强度；在逻辑推理能力方面由强到弱为：声音强度、CO₂浓度、温度、光照强度。基于学习效率的环境因素敏感性程度由强到弱为：声环境、热环境、空气品质、光环境。

参考文献：

- [1] Corgnati S P, Filippi M, Viazzo S. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort [J]. *Building and Environment*, 2007,42(2):951-959.
- [2] Paul W L, Taylor P A. A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building[J]. *Building and Environment*, 2008,43(11):1858-1870.
- [3] Luo M, De Dear R, Ji W, et al. The dynamics of thermal comfort expectations: The problem, challenge and implication[J]. *Building and Environment*, 2016,95:322-329.
- [4] López-Chao V, Amado Lorenzo A, Saorín J L, et al. Classroom Indoor Environment Assessment through Architectural Analysis for the Design of Efficient Schools[J]. *Sustainability*, 2020,12(5):2020.
- [5] Damián-Chávez M M, Ledesma-Coronado P E, Drexel-Romo M, et al. Environmental noise at library learning commons affects student performance and electrophysiological functioning[J]. *Physiology & Behavior*, 2021,241:113563.
- [6] 胡佳林, 窦豆, 陈松, 等. 夏季自然通风教室室内环境与学习效率的调查研究[J]. *节能*, 2009,28(7):19-23,2.
- [7] Xiong L, Huang X, Li J, et al. Impact of Indoor Physical Environment on Learning Efficiency in Different Types of Tasks: A 3×4×3 Full Factorial Design Analysis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018,15(6):1256.
- [8] 李明雪, 吴晓艳, 董砖, 等. 冬季自然通风教室室内环境对学习效率的影响[J]. *建筑热能通风空调*, 2012,31(6):30-33,47.
- [9] 黄梓薇. 夏热冬冷地区绿色中学室内环境评价与优化策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [10] Humphreys M A. Quantifying occupant comfort: are combined indices of the indoor environment practicable?[J]. *Building Research & Information*, 2005, 33(4):317-325.
- [11] Frontczak M, Wargocki P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(4):922-937.
- [12] Wong L T, Mui K W, Hui P S. A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1):1-6.
- [13] 简卿, 张立强, 崔海宁, 等. 青龙满族自治县生态敏感性评价及区划[J]. *中国农业资源与区划*, 2017,38(11): 171-178.
- [14] 李君轶, 吴晋峰, 薛亮, 等. 基于 GIS 的陕西省土地生态环境敏感性评价研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007(4):19-23,29.
- [15] 王杰汇, 郭娟利. 住宅健康环境影响因子敏感性分析[J]. *城市环境设计*, 2023,(3):353-359.
- [16] 蒋婧, 聂皓清, 杨子毅. 过渡季高校室内环境对学习效率的影响[J]. *西安工程大学学报*, 2024,38(1):92-98.
- [17] GB/T 18883-2022, 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 朱赤晖. 室内环境的舒适性评价与灰色理论分析研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [21] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. *Computers & Operations Research*, 1995,22(7):763-770.
- [22] 伊廷华, 陈婷. 基于综合权重可拓理论的结构损伤评估方法研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2014,34(2):137-145.
- [23] 曹志成, 刘伊生, 李明洋, 等. 基于 CRITIC 和 TOPSIS 法的装配式建筑绿色度评价研究[J]. *建筑节能*, 2018, 46(9):37-40,58.
- [24] M F, S S, J G, et al. Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design[J]. *Indoor air*, 2012,22(2).
- [25] 王兆琦. 基于学习效率的高校室内物理环境影响及评价模型[D]. 西安: 长安大学, 2023.