

夏热冬冷地区室内温度对学生认知能力与认知负荷的影响研究

汪 成², 方潜生^{1, 2}, 杨亚龙^{1, 2}, 张 睿^{1, 2}

(1. 智能建筑与建筑节能安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230022;

2. 安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 国务院办公厅要求公共建筑夏季室内空调温度不得低于 26℃, 但这一举措并不一定适合学生在教室的热舒适需求, 甚至给学校带来不必要的能源消耗和财政支出。基于这个问题, 本文讨论更高的夏季室内温度对学生热舒适、认知表现和认知负荷的影响。选取 20~24 岁的学生作为实验对象, 在 26℃ 和 28℃ 两种温度条件下进行实验, 主观评价问卷的结果作为室内环境质量的评价; 长期记忆、反应时间、注意力测试等任务对受试者的认知表现进行了定量测量; 认知负荷由 NASA 任务负荷指数 (NASA-TLX) 与心率变异性 (HRV) 评估。结果表明, 受试者在两种温度下的认知表现与认知负荷均无显著差异。因此, 夏季教室空调温度的设定应根据我国夏热冬冷地区学生的实际热环境需求进行不同设置, 在一定程度上响应了节能减排的号召。

关键词: 热舒适; 认知能力; 温度设定值; 认知负荷; 节能

中图分类号: TU83; TU-023

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2022) 02-063-08

Investigation of Indoor Temperature on Students' Cognitive Ability and Cognitive Load in Hot Summer/Cold Winter Region

WANG Cheng², FANG Qiansheng^{1, 2}, YANG Yalong^{1, 2}, ZHANG Rui^{1, 2}

(1. Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Building and Building Energy Saving, Anhui Jianzhu University 230022, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University 230601, China)

Abstract: According to General Office of the State Council of the People's Republic of China, the indoor air conditioning temperature in public buildings should not be lower than 26℃ in summer. However, this initiative is not necessarily suitable for students' thermal comfort needs in classrooms and may even cause unnecessary energy consumption and financial expenses. For this reason, this paper discusses the effects of higher summer indoor temperatures on students' thermal comfort, cognitive performance, and cognitive load. Students aged 20 to 24 were selected as experimental subjects under two temperature conditions (26℃ and 28℃). The subjective evaluation questionnaire were used to evaluate the indoor environment. Subjects' cognitive performance was measured quantitatively by long-term memory, reaction time and attention tests. Cognitive load was assessed by NASA Task Load Index (NASA-TLX) and Heart Rate Variability (HRV). The results showed no significant differences in cognitive performance and cognitive load of the subjects under the two temperatures. Therefore, the setpoint of air conditioning temperature in classroom in summer should be set differently according to the actual thermal environment demands of students in hot summer/cold winter areas, which can also achieve

收稿日期: 2021-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62001004); 安徽省重点研发计划项目 (202104a07020017); 安徽建筑大学高等人才研究基金项目 (2018QD18); 安徽建筑大学科研项目 (JY2021-C-017)

作者简介: 汪成 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 建筑环境。

energy saving and emission reduction.

Keywords: thermal comfort; cognitive ability; temperature setpoint; cognitive load; energy saving

学生一天中大约有 30% 的时间是在教室里度过的,所以教室环境与学生的学习和健康息息相关^[1]。不舒适的教室环境不仅会带来病态建筑综合征(SBS),还会影响学生的认知能力,而热舒适对环境舒适性起着决定性的作用。因此,室内的热环境要在保证学生热舒适前提下,保障学生的高认知能力。2007 年,国务院办公厅在《关于严格执行公共建筑空调温度控制标准的通知》中规定,夏季室内空调温度设置不得低于 26℃,冬季不得高于 20℃。由于区域差异,不同地区夏季空调的温度设定值不同,学生的热舒适范围也不同。热变化对认知性能的影响呈现一种扩展的 u 型关系^[2],在温度范围内相对稳定。因此,这一规定是否可以应用于教育建筑,还需要进一步的研究。

教学楼的热不适会分散师生的注意力,影响他们的认知能力与认知负荷。Cho^[3]分析了不同夏季高温下学生的学习成绩,发现温度过高对学生的学习成绩有负面影响;Sarbu^[4]发现,当夏季室内温度约为 27℃时,22~24 岁的学生表现最佳;Zhang^[5]研究显示,25℃的温度可以有效降低人员的认知负荷,而不影响其热舒适与认知能力。

在保障学生的热舒适情况下,以较低的认知负荷获得较高的认知表现,则可认为该温度下的热舒适是有效的。因此,本研究通过两种温度条件下学生的认知负荷与认知表现,探究国务院办公厅倡导

的温度是否适合夏热冬冷地区的室内环境。

1 研究方法

1.1 实验环境

本实验在安徽建筑大学北校区智能建筑与建筑节能安徽省重点实验室进行。该实验室配备精密空调(HADC0191)1台,确保实验所需的热湿环境稳定,在实验中控制两种温度(26℃与 28℃),相对湿度为 57% 左右。同时实验室内壁采用了隔音材质,保证实验过程中不会受到外界噪音的干扰,减少实验误差。本实验选择了飞利浦 T8 型荧光灯管,灯管型号是 TL-D。通过对搭建的可移动灯架进行调节来控制荧光灯的高度,从而控制投射到工作面的照度,以此满足受试者所需的光环境。

本实验挑选受试者的年龄在 20~24 岁,无慢性疾病和色盲,身体质量指数(BMI)在 18.5~23.7 之间,且在安徽居住 3 年及以上,最终满足实验条件的共有 13 名学生。受试者在实验前被告知不要饮用任何刺激性饮料,确保睡眠质量,保持情绪稳定,在实验过程中不要从事剧烈活动。

1.2 实验流程

通过文献调研可以发现,温度范围在 21~28℃时人对热环境感到满意,超过 28℃时人们对热环境开始感到不满意并且会影响到人们的学习效率^[6],而国务院文件规定温度为 26℃,本文为了研究这两种温度对认知负荷与认知能力的影响,实验

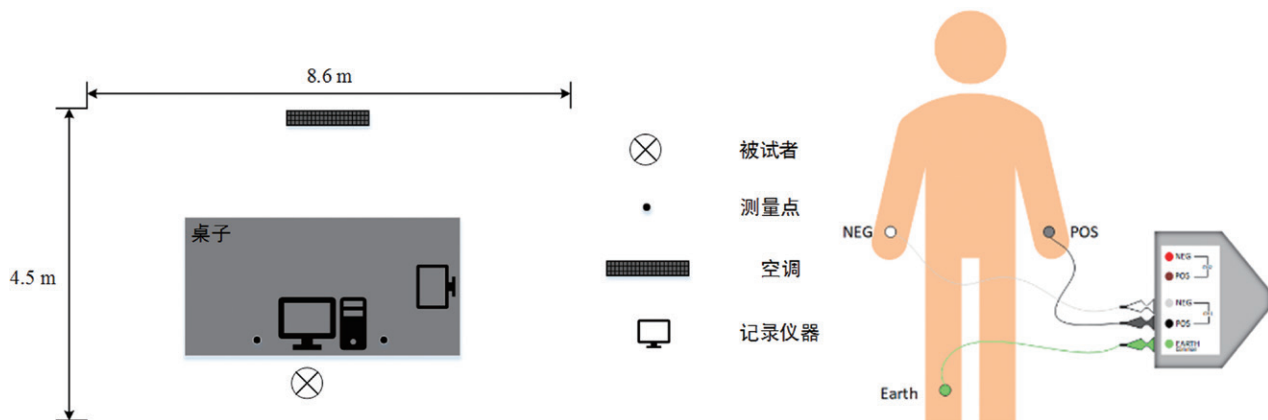


图 1 IEQ 实验室的平面图(左),心电图电极连接方法(右)

中控制两种温度(对照组 26 ℃和实验组 28 ℃),相对湿度约为 57%,详细信息如表 1 所示。

表 1 实验环境参数表

实验温度 (℃)	测量温度 (℃)	相对湿度 (%RH)	光照强度 (Lx)	空气流速 (m/s)
26	26±0.3	57.0±2.0	500Lx	0.06±0.01
28	28±0.3	57.5±1.5	500Lx	0.06±0.01

实验过程如图 2 所示。实验在早上 9 点开始,首先,受试者进入实验室适应环境 30 min,在此期间,根据受试者的喜好调整光强、声强;然后他们可以选择看书等休闲活动,并第一次提交热舒适度问卷调查表;接着由实验员辅助受试者配备仪器(心电图记录电极连接方法见右图 1),完成 5 项认知任务;之后,受试者填写 NASA-TLX 认知负荷问卷。经过 5 min 的休息,N-back 任务在每个温度下执行三个难度等级,心电图记录仪记录受试者在任务期间的心电图。在完成所有任务后,受试者再次填写热舒适度问卷调查表,实验结束。

为减少因学习效应不同而产生的偏差,受试者随机在两种温度条件下进行实验,即所有受试者随机抽取两种温度实验先后顺序。

1.3 实验测量

1.3.1 物理测量

采用热舒适记录仪(北京天建华仪表技术有限公司 SSDZY-1)对实验环境中的空气温度、

空气湿度和空气流速进行监测,并将监测数据进行传输记录。在实验中,光和噪音的强度是根据受试者的喜好进行调整的。

热舒适记录仪用于监测包括环境温度、相对湿度、风速和辐射温度在内的四种室内环境参数(测量位置如图 1 所示)。它测量的是 -20 ℃到 80 ℃范围内的温度和全球温度;相对湿度的测量范围为 0.01~99.9RH%,相对湿度的测量范围为 0.01~99.9RH%,风速的测量范围为 0.05~5 m/s,精度为 0.01。采用 Sentry 色温照度计(ST250)监测环境中的照度和 CCT。ST250 测量照度范围 0~99990 lx,精度 0.1,CCT 测量范围 0~99990 K,精度 1 K。

1.3.2 认知表现

在本研究中,受试者被要求完成 5 项认知任务,并记录和分析得分:

长期记忆任务(LM)。10 min 的时间记忆不同的课文,完成其他任务后,回忆词汇,记录正确的词汇数量。

舒尔特训练(TS)。本任务是一种注意力测试,在计算机屏幕上有一个 5×5 大小的正方形,数字 1~25 随机排列在正方形中,受试者需要按顺序点击这些数字,然后记录完成时间。

反应时间任务(RT)。本任务主要记录受试者视觉刺激发生改变时的响应时间。

数字广度任务(DS)。顺序排列的带数字的方块出现在屏幕的不同位置,受试者需要记住这些

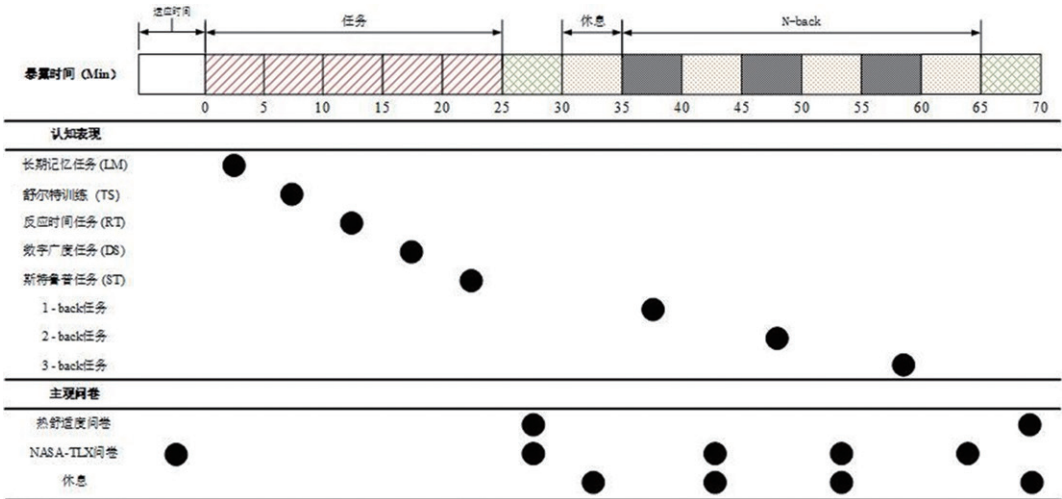


图 2 实验的时间线图

方块,然后按正确的顺序依次点击这些方块,记录完成该关卡的难度。本研究中要求受试者在 3 min 内通过更多的关卡。

斯特鲁普任务(ST)。本任务主要测试背景颜色和语义干扰对视觉感知的影响,要求受试者选择地处理视觉信息。在任务执行过程中,屏幕上会出现一个表示颜色名称的单词,要求受试者快速准确地点击与背景颜色含义不同的选项,在错误的点击结束时记录正确的数字。

N-back 任务。这个任务中有三个难度等级(1-back,2-back,3-back)。在 2500ms 的时间间隔内,受试者需要判断当前刺激与前 N 个刺激的颜色与位置是否相似,实验员记录最终的正确率。

1.3.3 主观评估

NASA 任务负载(NASA-TLX)。NASA-TLX 通常被用来量化受试者的认知工作量,本文采用 NASA-TLX 量化指标中的五个主观因素:心理需求、时间需求、表现水平、努力程度和挫败感。

本研究采用热感觉投票(Thermal Sensation Vote,TSV)和空气品质调查问卷。热感觉、热可接受度、感知空气品质和空气运动偏好开始和结束时都被记录下来。热感觉、感知到的空气品质和空气流动偏好问卷采用七级尺度(值从 -3 到 3),其中空气品质和空气流动偏好得分越高,接受程度越高。热可接受问卷采用两个选项(接受 1,不接受 0)。

1.3.4 HRV 测量

第一步,在计算 HRV 之前,先对原始 ECG 信号采用微分阈值法进行 QRS 波群的提取。

第二步,对处理后的 ECG 信号进行时域分析。本研究采用总体标准差(SDNN)参数评估 HRV 一段时间内的总体变化,具体计算方法:

(1) 先求得均值(MEAN),旨在反映 R-R 间期的平均水平,计算公式为:

$$MEAN = \overline{RR} = \sum_{i=1}^N RR_i / N \quad (1)$$

其中:MEAN 代表 R-R 间期的平均值,RR_i 代表第 i 个 R-R 间期的实际值,N 代表共有多个 R-R 间期。

(2) 总体标准差(SDNN)计算公式为:

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2} \quad (2)$$

1.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 21 软件进行统计分析。任务采集的数据首先通过 Shapiro-Wilk 检验进行正态性检验。正态分布数据采用组内配对样本 T 检验,非正态分布数据采用对数变换满足正态分布,然后进行 Pearson 相关分析。多因素重复比较,采用 Mauchly's Test 判断数据是否符合球形分布,采用 Bonferroni 调整进行多次比较方差。

2 实验结果与分析

2.1 热感觉

如图 3 所示,在对照组(26℃)的情况下,大多数人感觉“中性”。在实验组(28℃)条件下,部分人的 TSV 感知由“中性”变为“温暖”。

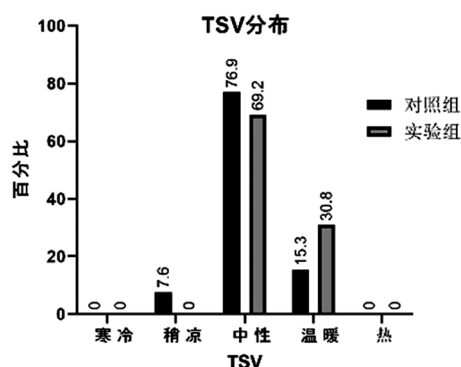


图3 对照组和实验组 TSV 的分布图

如图 4 所示,在实验开始和实验结束时,要求受试者对当前的热接受度进行评价。比较实验组(28℃)与对照组(26℃)的结果发现,实验前,热可接受占比中实验组相较于对照组低 8%;实验后,实验组的热接受度比对照组低 6% 左右。实验结束后,两组受试者当前温度可接受度比例均有所增加,两组受试者热可接受度均高于 80%。

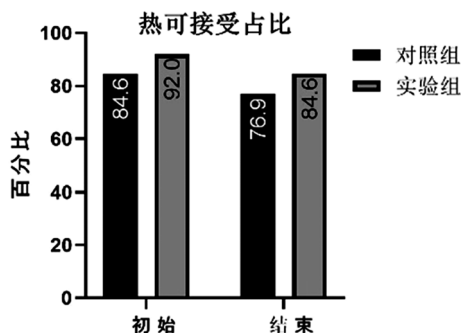


图4 实验前后两种条件的热接受度

由表 2 可以看出,26 ℃时受试者的热感觉明显低于 28 ℃时($p<0.01$)。此外,受试者感知空气品质在 26 ℃期间显著优于 28 ℃($p<0.01$),而且受试者更喜欢在 28 ℃有更多的空气流动。

表 2 控制条件与实验条件下热舒适和空气品质问卷的配对样本 t 检验表

问卷调查项目	均差	显著性	Bca 95% 置信区间	
			下限	上限
热感觉	-.692	.002	-1.073	-.311
感知空气品质	.538	.003	.225	.852
空气流动偏好	-.692	.006	-1.146	-.238

2.2 认知能力

由表 3 和图 5 可以看出,采用配对样本 T 检验比较温度为 26 ℃和 28 ℃时认知性能测试是否存在显著差异。四项任务表明,26 ℃与 28 ℃的认知能力无显著差异($p>0.05$)。

在 26 ℃和 28 ℃条件下,采用配对样本 T 检验比较长期记忆任务的配对 T 检验。结果发现,26 ℃~28 ℃之间的配对样本 t 检验 p 值小于 0.05,存在显著性差异。因长期记忆中存在文本和温度两个变量,为此在两种温度下测试两种文本认知表现,结果如图 6 所示。从图中可以发现,在两种温度条件下,选择记忆文本为国名的认知表现都优于记忆文本为疾病名,并且相同类型的本文记忆表现都没有显著性差异。

表 3 26 ℃和 28 ℃环境下认知能力得分的配对样本 t 检验

认知表现任务	均差	标准差	BCa 95% 置信区间		t	显著性
			下限	上线		
舒尔特训练	-0.903	2.808	-1.813	0.069	-2.009	0.052
反应时间	-6.795	78.905	-32.373	18.783	-0.538	0.594
数字广度	0.205	2.525	-0.614	1.024	0.507	0.615
斯特鲁普	0.294	20.425	-6.326	6.915	0.090	0.929

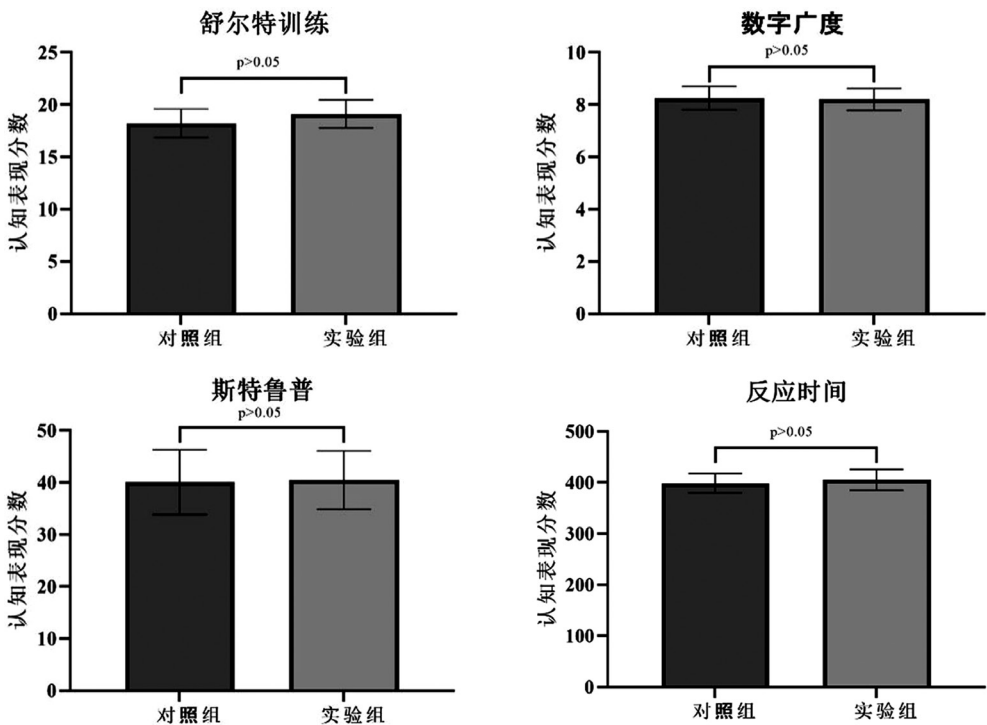


图 5 在 26 ℃和 28 ℃的温度下比较认知表现得分 (误差表示 95% 置信区间)

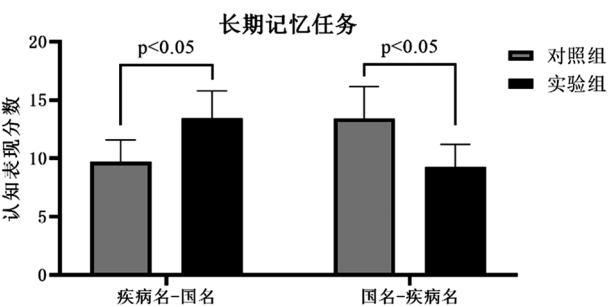


图 6 长期记忆任务在两温度下的认知表现得分
(误差线表示 95% 的置信区间)

2.3 认知负荷

如图 7 所示,在 N-back2 和 N-back3 中,一般会产生较高的认知负荷,而受试者参与的任务由于涉及到多方面,也会产生较高的认知负荷。比较实验组与对照组的脑力需求、时间需求、努力程度、表现水平和受挫程度,通过正态分布检验和配对样本 T 检验,结果显示在脑力需求、时间需求、努力程度与表现水平没有显著差异,但受挫程度有显著差异。实验组(28 ℃)的挫折程度低于对照组(26 ℃)。

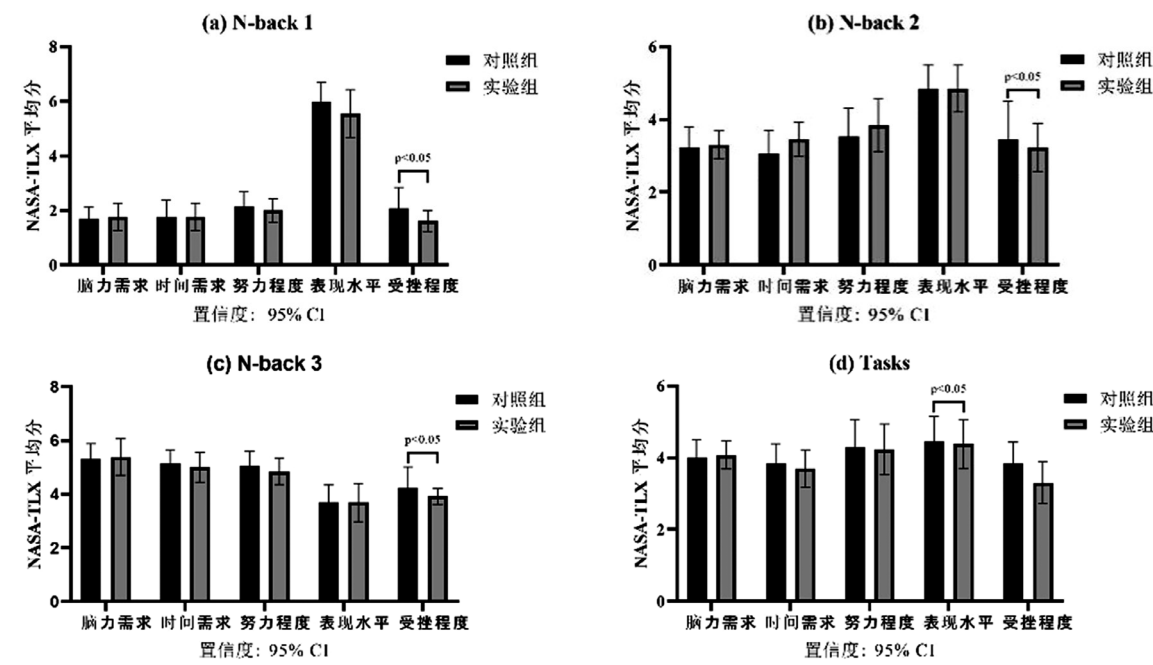


图 7 N-back 1、N-back 2、N-back 3 及任务的心理负荷和 NASA-TLX 指数 (误差线表示 95% 的置信度)

表 4 受试者内效应测试表

		平方和	DF	均方	<i>F</i>	显著性
温度	球形假设	.013	1	.013	.071	.794
误差(温度)	球形假设	2.154	12	.179		
任务难度	球形假设	114.333	2	57.167	46.247	.000
	G-G	114.333	1.352	84.596	46.247	.000
误差(任务难度)	球形假设	29.667	24	1.236		
	Greenhouse-Geisser	29.667	16.218	1.829		
温度 * 任务难度	球形假设	.333	2	.167	.800	.461
误差(温度 * 任务难度)	球形假设	5.000	24	.208		

表 4 显示了 N-back 任务难度和温度对 NASA-TLX 的影响。通过多因素重复测量方差分析的方法,可以确定在 N-back 任务的不同难度下,不同温度对 NASA-TLX 的影响。经研究残差分析,再进行 Shapiro-Wilks 检验,各组数据满足正态分布($p>0.05$);通过评估研究残差是否超过 ± 3 次,各组数据均无异常值;通过 Mauchly's 检验,如表 5 所示,温度与 N-back 任务难度交互项的因变量协方差矩阵无差异($p=0.128>0.05$)。因此,温度与 N-back 任务难度之间满足球形假设。数据也以均数 $\pm$ 标准差的形式表示,可以发现,温度和 N-back 任务难度之间的交互作用对 NASA-TLX 没有统计学影响, $F(2,24)=0.8,p=0.461(>0.05)$ 。因此,可以进一步分析温度和 N-back 任务难度影响认知负荷的主效应。

温度对 NASA-TLX 的主效应无统计学意义, $F(1,12)=0.071,P=0.794(p>0.05)$ 。

由于 N-back 任务难度的主效应达到第三个水平,需要判断其是否满足球形假设。由表 5 得到, $p=0.027(<0.05)$,不满足球形度检验。但是可以看出,Epsilon=0.676(<0.75)是由 Greenhouse-Geisser 计算的,因此需要进一步验证是否存在影响。Greenhouse-Geisser 分析了主体的内部效应,发现 $F(1.352,16.218)=46.247,p<0.001$,因此需要在三个难度等级下进行两两比较,多重比较由 Bonferroni 进行调整。由表 6 可知,N-back 任务难度等级 1 与 N-back 任务难度等级 2 的差异有统计学意义($p=0.001$),平均差异为 -1.615 (95% 置信区间: $-2.521\sim 7.09$)。N-back 任务难度等级 2 与 N-back 任务难度等级 3 的差异具有统计学意义($p<0.001$),平均差异为 -1.346 (95% 置信区间: $-1.853\sim 0.839$)。

表 5 球形假设的结果

影响因子	球形检验 W	卡方检验	DF	显著性	ϵ Greenhouse-Geisser
温度	1.000	.000	0	.	1.000
任务难度	.520	7.189	2	.027	.676
温度 * 任务难度	.688	4.110	2	.128	.762

表 6 N-back 任务难度对比较结果

(I) 困难 等级	(J) 困难 等级	平均差 (I-J)	标准差	显著性 b	差异的 95% 置信区间	
					下限	上限
1	2	-1.615*	.326	.001	-2.521	-.709
	3	-2.962*	.382	.000	-4.023	-1.901
2	1	1.615*	.326	.001	.709	2.521
	3	-1.346*	.182	.000	-1.853	-.839
3	1	2.962*	.382	.000	1.901	4.023
	2	1.346*	.182	.000	.839	1.853

注:①基于估计的边际均值;②*.平均差异在 0.05 水平上显著;
③ b. 多重比较的调整:Bonferroni。

由于温度和 N-back 任务的难度对受试认知负荷的交互作用无统计学意义,因此实验组(28℃)和对照组(26℃)对受试的认知负荷存在差异,其影响取决于 N-back 任务的难度。根据以上两两比较的结果,如下图 8 所示,交互效应的影响基本趋于平行,因此不存在交互作用。不同温度下认知负荷的影响取决于任务的难度,说明实验组和对照组在认知负荷上没有显著差异。

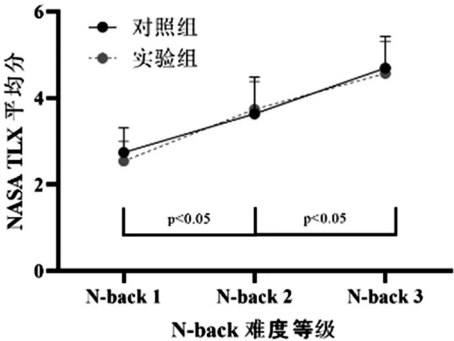


图 8 N-back 难度与实验条件对 NASA-TLX 整体的交互作用(误差线表示 95% 置信区间)

2.4 HRV 信号用于认知负荷评估

为了区分不同任务难度水平的认知负荷(低、中、高),基于三种任务难度和 HRV 特征建立了一元线性回归模型。结果表明 HRV 能够区分不同难度水平的认知负荷,准确率为 75.1%。同理,如果不同的温度条件能够区分出不同的 HR 信号,那么受试者的认知负荷也会受到温度的影响;否则,不受影响。为此,我们采用了一种简单的 k-means 聚类方法,试图将 HR 数据分为两类温度条件。聚类结

果如表 7 所示为混淆矩阵,46.2% 的对照组片段被错误地聚为实验组,38.5% 的实验组片段被错误地聚为对照组。结果表明,实验组条件下的 HR 信号与对照组条件下的 HR 信号过于相似,无法进行可靠分类。故受试者的认知负荷未受到温度的影响。

表 7 对照组和实验组 HRV 特征的混淆矩阵

HRV	对照组	实验组
对照组	61.5%	46.2%
实验组	38.5%	53.8%

3 讨论

3.1 较高温度设定值对在校学生热舒适的影响

用配对样本 t 检验来判断两种不同条件下受试的热感觉、感知空气品质和空气运动偏好是否存在统计学差异。用相关样品 McNemar 方法测试两种条件下的二元热接受度差异。

热舒适问卷显示,夏季教室温度升高 2℃ 对学生在教室的热舒适影响不大。较高的温度 (28℃) 没有显著降低学生的热舒适,热感觉在“稍凉”、“中性”和“温暖”之间略有变化。当温度从对照组 (26℃) 上升到实验组 (28℃) 时,无论相对湿度如何,受试者能敏锐地感知到温度的增长。然而,他们并没有表现出任何热不适,对热环境的接受度也没有明显改变。

3.2 较高温度设定值对在校学生认知负荷的影响

NASA-TLX 结果显示,对照组 (26℃) 与实验组 (28℃) 在认知负荷上无显著差异。HR 的测量也证实了在实验过程中认知负荷不受温度的影响。NASA-TLX 结果发现受试者的认知负荷随着时间需求、努力程度和受挫程度在不断变化 (图 7),这可能是学习效应的结果,而不是物理环境的变化。虽然实验组和对照组按实验顺序随机进行,但实验中 N-back 任务的难度仍然是由易到难,学习效应不可避免。

HR 结果显示,随着 N-back 任务难度的增加,认知负荷显著增加,这与 NASA-TLX 结果一致。由于不同温度条件下 N-back 任务难度的学习效果没有显著差异,因此两种条件下的认知负荷几乎完全受到温度效应的影响,NASA-TLX 显示的认知负

荷下降 (图 8) 应该是学习效应的结果。

3.3 较高温度设定值对在校学生认知表现的影响

舒尔特训练、反应时间、数字广度、斯特鲁普训练的认知表现与 NASA-TLX 结果一致,对照组 (26℃) 与实验组 (28℃) 之间无显著差异。这一结果也证实了之前在较高温度下进行的实验研究,受试者的认知表现在一个温度范围内相对稳定^[7-8]。

从长期记忆任务的显示,排除学习效应的结果,推测其原因是长期记忆任务中生僻字的选择。对于非医学学科,罕见国家名的知识储备略高于罕见疾病名的知识储备。因此,罕见国家名的记忆表现优于疾病名的记忆表现。

长期记忆任务和舒尔特训练任务的结果显示,受试更倾向于温度稍高的环境进行记忆任务,这与 Barbic^[9] 的结论相反,但与 Sun^[10] 的结果相似。

4 总结与研究展望

本研究采用认知测试、主观问卷、心电图等方法,调查热历史在夏热冬冷地区 3 年及以上、年龄在 20~24 岁之间且身体健康的学生在两种温度 (26℃、28℃) 下的认知表现和认知负荷。本研究的主要结论包括:

- (1) 实验组和对照组的热舒适无显著差异,较高的温度设置对学生的热舒适没有显著影响;
- (2) 在夏热冬冷地区,较高的温度设置并不影响学生的认知表现;
- (3) 在夏热冬冷地区,较高的温度设置并不影响学生的认知负荷;
- (4) HRV 与 NASA-TLX 的结果相似,两种情况下认知负荷无显著差异。

由上述结论可以得出,一个实际温度高于由国务院办公厅倡导的温度在教育建筑中未降低学生认知能力或增加学生的认知负荷,也没有显著影响学生的热舒适。因真实教室环境是非密闭性的,不是一个稳态的环境,故本文结论更适用于一个小且密闭的学习空间,所以在设置夏热冬冷地区夏季学习空间温度时,可以根据区域和学生的需求设置不同的学习空间室内温度,这不仅能保证舒适性也不影响认知能力,还能达到节能减排的效果。

同时,本文利用生理参数来测量温度是否影响

(下转第 77 页)

随着单位缺货成本的增加和信用支付期的延长而增加。

参考文献:

- [1] Goyal S K. Economic order quantity under conditions of permissible delay in payments[J]. Journal of the Operational Research Society, 1985, 36(4): 335-338.
- [2] 秦娟娟. 时变供需下基于商业信用的零售商最优订货策略[J]. 中国管理科学, 2016, 24(3): 89-98.
- [3] 曾顺秋, 骆建文. 基于数量折扣的供应链交易信用激励机制[J]. 系统管理学报, 2015, 24(1): 85-90.
- [4] 于丽萍, 黄小原, 邱若臻. 基于商业信用的收入共享契约与供应链协调[J]. 运筹与管理, 2009, 18(1): 42-46.
- [5] 张新, 罗新星. 损失厌恶型零售商参与的供应链商业信用与收益共享协同研究[J]. 管理学报, 2017, 14(5): 759-766.
- [6] 白世贞, 陶阳红, 鄢章华. 信用支付下基于收益共享契约的网购供应链协调策略研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(7): 44-54.
- [7] Fisher M, Raman A. Reducing the cost of demand uncertainty through accurate response to early sales[J]. Operations Research, 1996, 44(1): 87-99.
- [8] 王永明, 余小华, 尹红丽. 基于风险规避和公平偏好的供应链收益共享契约协调研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(7): 148-159.
- [9] Schweitzer M E, Cachon G P. Decision bias in the newsvendor problem with a known demand distribution: experimental evidence[J]. Management Science, 2000, 46(3): 404-420.
- [10] 庞庆华, 申竹沁. 缺货厌恶下的供应链收益共享契约模型[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2011, 10(4): 116-121.
- [11] 庞庆华. 具有缺货厌恶决策偏好的供应链收益共享契约模型研究[J]. 华东经济管理, 2008, 22(7): 109-112.
- [12] 王岩岩, 张骞骞. 存在需求转移的多产品报童模型研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2020, 28(01): 87-94.
- [13] 郭松. 考虑零售商主导下具有行为偏好供应商的供应链决策研究[J]. 统计与决策, 2019, 35(11): 44-47.
- [14] 王永龙, 蔡继荣. 考虑供应商不同行为偏好的供应链决策研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 116-121.
- (上接第70页)
- 个人舒适度, 其中性别也应被考虑, 实验需要进一步优化。
- 参考文献:
- [1] De Giuli V, da Pos O, de Carli M. Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools[J]. Building and Environment, 2012, 56: 335-345.
- [2] Zhang F, de Dear R, Hancock P. Effects of moderate thermal environments on cognitive performance: a multidisciplinary review[J]. Applied Energy, 2019, 236: 760-777.
- [3] Cho H. The effects of summer heat on academic achievement: a cohort analysis[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017, 83: 185-196.
- [4] Sârbu I, Pacurar C. Experimental and numerical research to assess indoor environment quality and schoolwork performance in university classrooms[J]. Building and Environment, 2015, 93: 141-154.
- [5] Zhang F, Haddad S, Nakisa B, et al. The effects of higher temperature setpoints during summer on office workers' cognitive load and thermal comfort[J]. Building and Environment, 2017, 123: 176-188.
- [6] Wu H Z, Wu Y, Sun X Y, et al. Combined effects of acoustic, thermal, and illumination on human perception and performance: a review[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106593.
- [7] Maula H, Hongisto V, Östman L, et al. The effect of slightly warm temperature on work performance and comfort in open-plan offices - a laboratory study[J]. Indoor air, 2016, 26(2).
- [8] Schiavon S, Yang B, Donner Y, et al. Thermal comfort, perceived air quality, and cognitive performance when personally controlled air movement is used by tropically acclimatized persons[J]. Indoor Air, 2017, 27(3): 690-702.
- [9] Barbic F, Minonzio M, Cairo B, et al. Effects of different classroom temperatures on cardiac autonomic control and cognitive performances in undergraduate students[J]. Physiological Measurement, 2019, 40(5): 054005.
- [10] Sun C, Han Y S, Luo L, et al. Effects of air temperature on cognitive work performance of acclimatized people in severely cold region in China[J]. Indoor and Built Environment, 2021, 30(6): 816-837.