

## 基于脑电的办公环境照度对工作效率的影响研究

童力, 郑玉熙, 郭亚培, 胡松涛, 鹿铭理, 刘念

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 办公场所是办公人员日常活动的主要场所之一, 改善办公环境质量对于促进办公人群身心健康和提高工作效率具有重要意义。选择 75、300、500、750 及 1200 lx 5 个作业面照度, 采集不同照度工况下的脑电信号和认知任务表现。通过快速傅里叶变换计算脑电功率, 分析了不同照度下脑电功率的差异及变化规律, 结合不同工况下受试者认知任务表现, 对办公环境照度进行评估, 探究不同照度环境下人员的工作效率差异。结果显示, 不同照度工况下部分通道的  $\delta$  波段及  $\beta$  波段的功率变化显著, 其中 FT10 通道  $\beta$  波段的功率可作为不同照度环境下评估人员思维活跃程度和信息处理能力的客观生理参数。在综合考虑认知任务评价指标后, 建议作业面平均照度不低于 500 lx。

**关键词:** 建筑光学; 照度; 脑电图; 认知任务表现; 快速傅里叶变换

**中图分类号:** TU113.4<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)03-0096-08

## Research on the influence of EEG-based office environment illuminance on work efficiency

TONG Li, ZHENG Yuxi, GUO Yapei, HU Songtao, LU Mingli, LIU Nian

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** The office is one of the main places for the daily activities of office workers. Improving the quality of the office environment is important to the promotion of physical and mental health of office workers and the increase of work efficiency. In this study, five work surface illuminance levels of 75, 300, 500, 750 and 1200 lx were selected to collect Electroencephalogram (EEG) signals and cognitive task performance under different illuminance conditions. The EEG power was calculated by the Fast Fourier Transform, and the difference and change rule of EEG power under different illuminances were analyzed. Combined with the subjects' cognitive task performance under different working conditions, the office environment illuminance was evaluated to explore the difference in the personnels' work efficiency under different illuminance environments. The results showed that the power in the  $\delta$ -band and  $\beta$ -band of some channels varied significantly under different illuminance conditions, and the power in the  $\beta$ -band of the FT10 channel might be used as an objective physiological parameter to assess the degree of active thinking and the ability of processing information of personnels under different illuminance environments. After comprehensive consideration of

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021ME186)

作者简介: 童力(1981—), 女, 宁夏石嘴山人。博士, 副教授, 主要从事人体舒适性、室内热环境及空气质量等方面的研究。  
E-mail: tongli0220@163.com。

the task evaluation indexes, it is recommended that the average illuminance level of the task area should not be less than 500 lx.

**Key words:** architectural optics; illuminance; EEG; cognition task performance; fast Fourier transform

办公空间的光环境与使用者的健康状况和生产力密切相关<sup>[1]</sup>。合理设计办公光环境,满足办公人群对健康照明的需求,是保障员工身心健康和提高生产力的关键。良好的办公光环境有助于激发人员在生理和心理方面对外界刺激的积极响应<sup>[2-3]</sup>,并有助于提高工作效率。若长期暴露于低质量的光环境中,则易引发视疲劳、注意力分散、反应迟缓、作业失误率增加等问题<sup>[4-6]</sup>。因此,研究办公人员对光环境的需求,合理设计照明环境,受到越来越多研究者的关注和重视。

实际工程应用中,照度是评价照明环境舒适度的最基本指标,对视觉对象的可见度具有决定性作用。SUN等<sup>[7]</sup>选择3种照度(100、500、2500 lx),照度均匀度(0.2、0.6、1.0)和色温(2700、4000、6500 K)研究办公环境对人员工作表现的影响,发现在照度为2500 lx,色温为6500 K,照度均匀度为0.6时,人员的工作效率和注意力满意度最高。RU等<sup>[8]</sup>的研究结果表明适当增加照度会提高记忆任务的准确性。FA-KHARI等<sup>[9]</sup>对冬、夏6座办公建筑进行实地测量,结果显示办公环境照度不应低于550 lx,且在600~650 lx之间的办公光环境中人员舒适度最高。史偲岑等<sup>[10]</sup>研究发现450~700 lx是办公建筑的最佳照度区间。MA等<sup>[11]</sup>通过沉浸式虚拟环境模拟设计了9种办公室光环境工况,结合主观问卷和Landolt C测试,发现受试者的认知任务表现随着照度增加有所改善。

脑电图(Electroencephalogram, EEG)是通过在头皮表面放置多个电极来记录大脑神经元电活动的非侵入式方法,这些电活动反映了大脑神经元之间的信息传递<sup>[12]</sup>。EEG特征分析是研究人体生理和心理状态的有效途径,可以在不打断受试者的前提下,监测有意识和潜意识的反应。EEG已被广泛应用于评估人体在室内环境下的状态<sup>[13-14]</sup>。鹿铭理<sup>[15]</sup>分析了脑电不同波段功率占比与照度的关系,发现 $\beta$ 波段的功率占比受照度影响显著。吴璠<sup>[16]</sup>选取脑电 $\alpha$ 波段的能量作为注意力评价指标,探究不同办公照度环境下各年龄段办公人员工作效率差异,发现该指标与量化的工作效率存在强相关性。SHIN等<sup>[17]</sup>基于脑电对不同照明方式的光环境进行了评估,发现 $\theta$ 波段的振荡活动可作为反应不同照明环境下人员情绪状态的客观生理指针。相关成果充分表明EEG应用于室内环境的研究较为成熟,具有较高的可行性。但对不同照度环境对脑电功率的变化规律与差异的分析报导较少。

本研究通过改变作业面照度,系统地研究了办公人员在执行认知任务期间的脑电相关波段功率的变化规律。同时,结合认知任务表现,探究办公人员舒适且高效的光环境选择,提升光环境评价方法的合理性和精确性,为舒适高效的光环境营造提供理论基础。

## 1 研究方法

### 1.1 受试人员

本次实验样本量采用逻辑回归法(G-power)确定,主要设计参数为 $\alpha=0.05$ 和 $1-\beta=0.8$ ,效应量取中等效应量0.4,通过计算,确定样本量为20人。因此,本实验共招募28(23男5女)名在校研究生作为受试者,基本信息如表1所示。全体受试人员身体状况良好,且视力水平正常或经视力矫正后达到正常水平,均具备足够的阅读水平及认知能力。在实验开始前,受试者均已被告知实验期间的相关要求,并签署知情同意书。

为保证实验结果的稳定性和可靠性,受试者在实验前应保持充足的睡眠、规律的饮食,无较大的情绪波动,不得服用可能影响EEG的神经类药物,实验前12 h内不得饮用酒、咖啡等刺激性饮料,8 h内不得吸烟。

表1 受试者基本信息

性别	年龄/岁			视力矫正	
	最大值	最小值	平均值±标准差	是	否
男	31	22	24.00±0.41	18	5
女	24	22	23.20±0.37	3	2

## 1.2 实验环境设置

本实验在青岛理工大学人工气候室(长×宽×高:5000 mm×3000 mm×2600 mm)中进行,室内布局如图1所示。人工气候室采用高精密恒温恒湿空调系统,可精确调控室内温、湿度参数。顶棚等间距安装了6盏灯具,照度和色温可通过遥控器实现连续自由调节。根据《建筑照明设计标准》(GB 50034—2021)规定的照度为作业面的平均照度<sup>[18]</sup>,因此本实验照度测点布置如图2所示,0.75 m水平作业面的平均照度为作业面各边中点和对角线交点照度的均值。空气流速为0.05 m/s。本实验的自变量仅为照度,因此需要控制其他物理环境参数的设置。受试者在气候室内统一着装为夏季典型服装(服装热阻约0.75 clo, 1 clo=0.155 m<sup>2</sup>·K/W)。实验期间,受试者保持静坐姿态,代谢率约为1 met(1 met=0.155 m<sup>2</sup>·°C/W)。为避免室内热环境和声环境对人员造成的影响,经计算后各实验工况的室内物理环境参数设置如表2所示。



图1 人工气候室内部示意

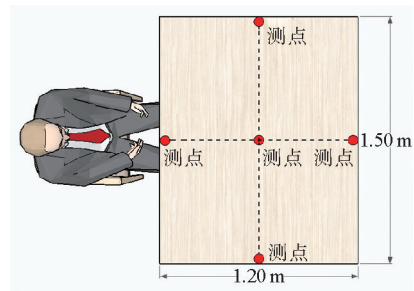


图2 作业面测点布置

## 1.3 Stroop 任务评价

Stroop 字色干扰实验作为经典神经心理学测试,被广泛应用于评估个体抑制认知干扰的能力<sup>[19]</sup>,且该实验基础难度低,易操作,受室内光环境影响显著,与视觉感知联系密切,因此在本研究中被作为认知任务测试内容。Stroop 字色干扰实验内容如图3所示,受试者

被要求读出字的颜色。反应时间(Reaction Time, RT)是指受试者完成测试需要的时间。正确率(Accuracy, AC)是指受试者回答正确数量与总数的比值,如式(1)所示。综合绩效(Performance Indicators, PI)被作为衡量认知任务完成情况的评价指标,如式(2)所示。为避免熟练度的影响,在实验开始前受试者均已练习该项认知任务。

$$A_c = \frac{C_A}{T_A} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{A_c}{R_T} \quad (2)$$

式中: $A_c$ 为正确率,%; $C_A$ 为回答正确的题目数量; $T_A$ 为总作答数量; $P_1$ 为综合绩效,%/s; $R_T$ 为反应时间,s。

## 1.4 脑电信号采集

本实验中,采用Emotiv EPOC Flex设备(Flex Saline Sensor Kit, Emotiv Inc. USA)记录受试者的脑电信号。该设备是一款非侵入式、便携式无线头戴设备,安装和使用便利(图4)。设备共有32个通道,根据国际脑电图学会提出的10—20系统排布。CMS和DRL 2个额外通道为参考电极。设备内部采样率为1024 Hz,降采样率至128 Hz输出,数据通过USB连接蓝牙发送至计算机,接触垫用生理盐水润湿以提高导电性。设备与头皮接触质量和数据采集质量可实时监控。

表2 实验工况参数设计

序号	照度/lx	色温/K	温度/°C	相对湿度/%	声压级/dB
1	75	4000±20	24±0.5	60±5	<40
2	300	4000±20	24±0.5	60±5	<40
3	500	4000±20	24±0.5	60±5	<40
4	750	4000±20	24±0.5	60±5	<40
5	1200	4000±20	24±0.5	60±5	<40



图3 Stroop 字色干扰测试

### 1.5 实验流程

每种工况的实验流程如图 5 所示。实验开始前,工作人员为受试者介绍实验基本情况,并为受试者佩戴脑电采集设备。进入人工气候室后,受试者有 15 min 适应已设定的照度工况。之后,受试者进行 Stroop 认知任务测试,期间受试者的脑电信号被采集。测试结束后,受试者放松休息 10 min。实验期间,受试者全程保持静坐状态,不能使用任何电子设备。实验固定在上午 9:00—12:00 时段进行,每位受试者每日仅完成 1 个工况的实验。

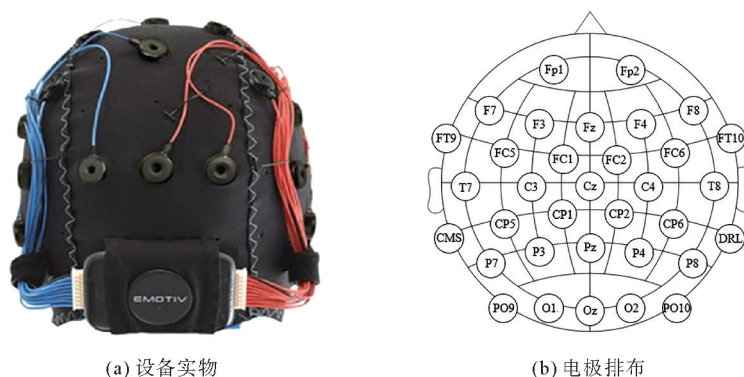


图 4 Emotiv EPOC Flex 实物及电极排布



图 5 实验流程(单位:min)

## 2 实验数据处理分析

### 2.1 Stroop 任务结果与分析

利用 SPSS26.0 软件分别对 5 个工况下受试者 Stroop 认知任务的 RT、AC 和 PI 进行 Levene 检验结果显示,不同工况下 3 项指标的  $P$  值均大于 0.05,符合方差齐性。进一步进行单因素方差分析,结果如表 3 所示,3 项任务绩效指标均存在显著性差异。图 6 显示了各项指标随照度变化情况。75 lx 照度环境下,受试者反应时间最长,准确率最低,综合绩效最差。随着照度的增加,受试者的反应时间显著缩短,准确率有所提升。原因可能是低照度环境,直接加重了视觉系统的调节负担,引发了视觉疲劳,而随着

表 3 Stroop 任务单因素方差分析结果

统计	照度/lx	$N$	$\bar{x} \pm s$	$F$	$P$
RT/s	75	28	45.90±8.58	7.73	0.000**
	300	28	39.78±8.06		
	500	28	36.91±6.37		
	750	28	36.31±5.78		
	1200	28	37.36±5.56		
AC/%	75	28	91.43±6.09	3.80	0.006**
	300	28	93.86±6.93		
	500	28	97.85±3.43		
	750	28	94.71±5.66		
	1200	28	96.15±5.60		
PI/(%·s <sup>-1</sup> )	75	28	2.10±0.57	6.22	0.000**
	300	28	2.49±0.49		
	500	28	2.68±0.53		
	750	28	2.68±0.50		
	1200	28	2.61±0.48		

注: $N$  为样本总数; $\bar{x} \pm s$  为方差±标准差; $F$  为统计量; \*\* 为显著性结果, $P < 0.01$ 。

照度的增加,大脑的激活程度和视觉灵敏度都有所提高,信息传递速度提升,导致认知任务表现有所提升。综合绩效随照度的增加呈现先增加后略有降低的趋势,在照度为 500 和 750 lx 处为 2.68%/s,达到最大。在 1200 lx 时综合绩效有所降低,原因可能是过高的照度,导致大脑神经元过度兴奋或过度抑制,干扰了正常的神经传递,从而导致综合绩效有所降低。

## 2.2 脑电数据处理与分析

### 2.2.1 脑电数据处理

EEG 信号  $x(t)$  是一种易受影响的时域信号, 可以表示为离散的非周期序列  $X_n$  的集合。本研究使用 EEGLAB 对脑电信号进行预处理, 消除噪声及肌电等对脑电信号的影响, 提高信噪比。傅里叶变换可实现脑电信号由时域到频域的转换, 而在实际计算过程中, 快速傅里叶变换 (FFT) 根据傅里叶变换的特性进行改进, 具有明显的速度优势, 更适合应用于脑电信号的处理<sup>[20]</sup>。脑电数据处理流程如图 7 所示。通过快速傅里叶变换, 可计算得到脑电功率值。某波段的功率  $P_k, k = \delta, \theta, \alpha, \beta$ , 为该波段频域序列的模的平方和, 如式(3)所示。

$$P_k = \sum_{n=i}^j |X_n|^2 \quad (3)$$

式中:  $i$  为某波段频率的下限值, Hz;  $j$  为某波段频率的上限值, Hz;  $X_n$  为频域序列。

由于计算后的结果数量级较大, 进行对数化变换得到对数功率  $P'_k$ 。

$$P'_k = \lg(P_k) \quad (4)$$

脑电的总功率  $P_t$  则为所有通道各波段功率的总和。同样, 求和后的结果数量级较大, 需进行对数化得到对数总功率  $P'_t$ , 如公式(5)(6)所示。

$$P_t = \sum P_k \quad (5)$$

$$P'_t = \lg(P_t) \quad (6)$$

因人体行为状态的差异, EEG 信号有不同的频率特征。EEG 信号通常将频域划分为 4 个基本节律:  $\delta, \theta, \alpha$  和  $\beta$ <sup>[21]</sup>, 表 4 中列出各节律的基本特点。

### 2.2.2 脑电数据处理结果及分析

计算 5 种光环境下受试者 32 个通道的  $\delta, \theta, \alpha$  和  $\beta$  4 个波段的功率  $P'_k$ 。不同工况下所有通道 4 个波段的  $P'_k$  值 Levene 检验结果均大于 0.05, 符合方差齐性。使用 Shapiro-Wilk 检验  $P'_k$  满足正态分布。利用 SPSS26.0, 以作业面照度为自变量, 各通道 4 个波段的功率为因变量, 进行单因素方差分析, 得到表 5 所示的结果。

由表 5 可知,  $P'_k$  与作业面照度水平显著相关的波段集中在  $\delta$  波段和  $\beta$  波段。原因可能是  $\delta$  波段的能量变化与人体疲劳或困倦的状态有关<sup>[22]</sup>, 而  $\beta$  波段的能量值则表征了人员注意力集中程度和思维状态的活跃程度<sup>[23-24]</sup>。单因素方差分析结果被标记在电极排布图上, 如图 8 所示, 红色表示更强的显著性。如图 8(a) 所示, 对于  $\delta$  波段的  $P'_k$ , 在顶叶 C3 通道处 ( $P=0.009$ ) 和额叶 F4 通道处 ( $P=0.009$ ) 均发现显著性差异。如图 8(b) 所示, 对于  $\beta$  波段的  $P'_k$ , 在颞叶 FT10 通道处 ( $P=0.041$ ) 和额叶 Fz 通道处 ( $P=0.050$ ) 均发现显著性差异。进一步分析发现, 功率受照度影响显著的通道分布在顶叶区和额叶区, 原因可能是顶叶主要负责处理各类感觉信息, 额叶则主要负责思维、分析等功能, 而认知过程则需要整理各种信息之后

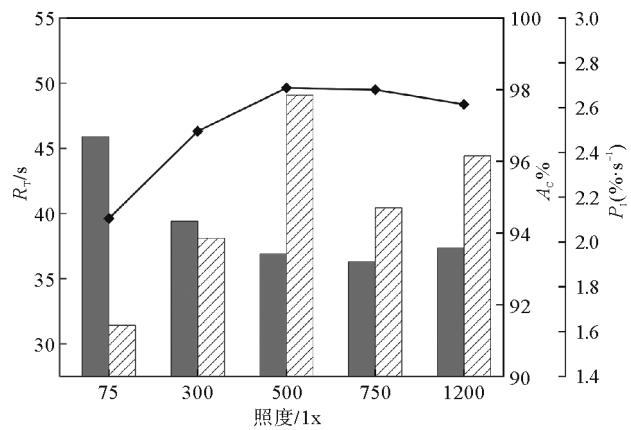


图6 不同工况下认知任务表现

■  $R_t$ ; ▨  $A_c$ ; ◆  $P_t$

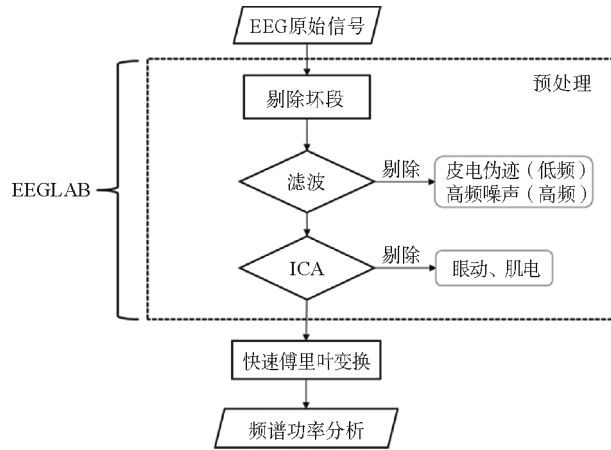


图7 脑电数据处理流程

表 4 不同频段的脑电特征

波段	频率/Hz	人体特征
$\delta$	[0.5~4.0)	极度疲劳, 深度睡眠
$\theta$	[4.0~8.0)	意识模糊、困倦、木讷
$\alpha$	[8.0~13.0)	放松、平静、闭眼但清醒
$\beta$	[13.0~30.0)	精神集中、思考或处理外界信息

进行思考和分析。

表 5 各通道、各波段  $P'_t$  单因素方差分析结果

通道	P 值				通道	P 值			
	$\delta$	$\theta$	$\alpha$	$\beta$		$\delta$	$\theta$	$\alpha$	$\beta$
FC1	0.983	0.972	0.881	0.814	T7	0.837	0.861	0.649	0.216
FC2	0.873	0.842	0.931	0.692	CP5	0.963	0.998	0.899	0.520
C3	0.009**	0.056	0.215	0.331	FC6	0.594	0.685	0.728	0.375
Cz	0.962	0.874	0.653	0.653	FT10	0.083	0.065	0.149	0.041*
C4	0.821	0.940	0.861	0.917	T8	0.705	0.694	0.551	0.523
CP1	0.616	0.755	0.952	0.880	CP6	0.834	0.764	0.553	0.274
CP2	0.428	0.387	0.517	0.575	P7	0.707	0.729	0.928	0.841
Fp1	0.804	0.929	0.929	0.875	P3	0.769	0.856	0.438	0.205
Fp2	0.665	0.948	0.831	0.448	Pz	0.514	0.639	0.884	0.948
F7	0.707	0.729	0.928	0.841	P4	0.485	0.359	0.640	0.745
F3	0.876	0.778	0.666	0.627	P8	0.876	0.788	0.844	0.686
Fz	0.550	0.715	0.739	0.050*	PO9	0.532	0.733	0.834	0.921
F4	0.009**	0.391	0.675	0.782	O1	0.863	0.634	0.714	0.649
F8	0.638	0.984	0.883	0.880	Oz	0.320	0.444	0.798	0.769
FT9	0.797	0.748	0.439	0.270	O2	0.341	0.383	0.454	0.424
FC5	0.745	0.780	0.685	0.577	PO10	0.942	0.895	0.907	0.575

注: \*\* 为显著性结果  $P < 0.01$ ; \* 为显著性结果  $P < 0.05$ 。

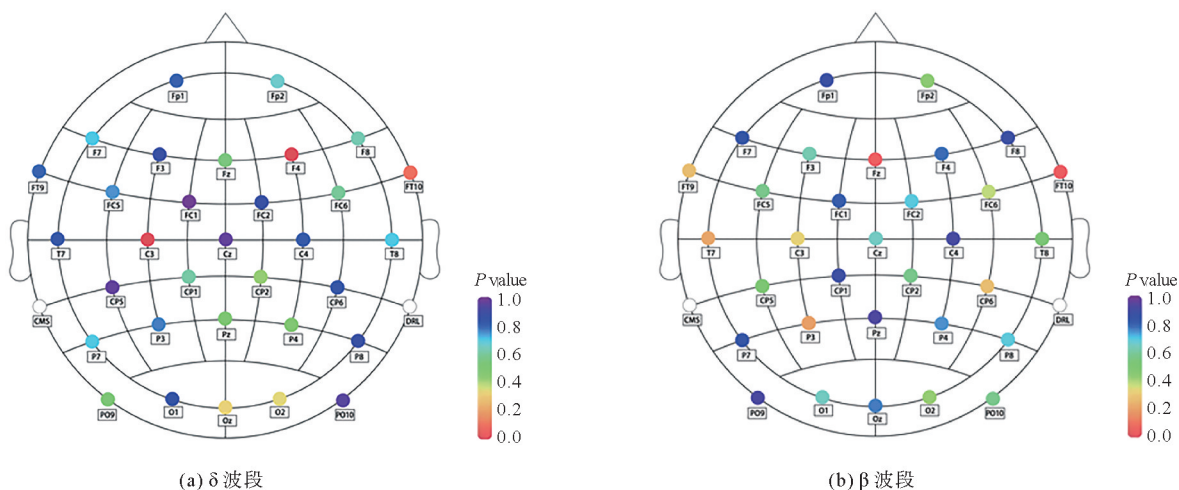


图 8 显著性脑点位分布

### 2.2.3 脑电功率与 Stroop 任务表现

为进一步探究认知任务表现和脑电功率之间的关系,利用 SPSS26.0 软件分别对完成认知任务的反应时间 RT、准确率 AC 和综合绩效 PI,与不同工况下  $P'_t$  变化显著波段进行 Pearson 相关性分析,结果如表 6 所示。FT10 通道处  $\beta$  波段的功率与评价指标中的 PI 呈现显著相关,因此可以作为评估不同照度水平下认知任务表现的生理参数。

进一步分析,以照度为自变量  $x$ ,以平均综合绩效值为  $y_1$ ,以 FT10 通道的  $\beta$  波段的功率均值为  $y_2$ ,分别进行非线性拟合,得到式(7)(8):

$$y_1 = 2.006 + 0.0018x - 1.14 \times 10^{-6}x^2, R^2 = 0.9569 \tag{7}$$

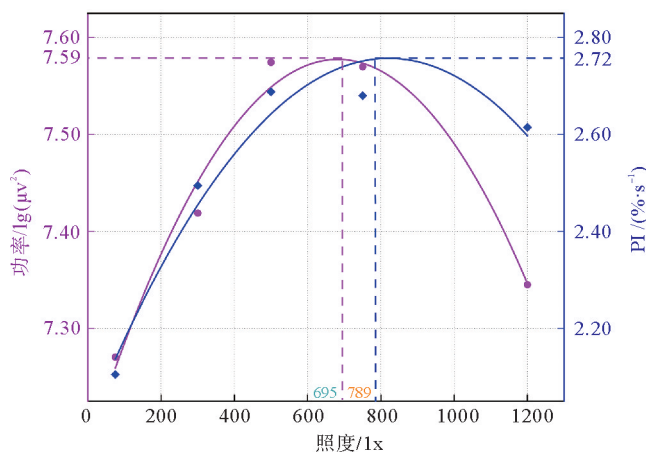
$$y_2 = 7.176 - 0.0012x + 8.63 \times 10^{-7}x^2, R^2 = 0.9493 \quad (8)$$

表6 任务评价-功率相关性分析

指标	相关性分析	$\delta$		$\beta$	
		C3	F4	FT10	Fz
RT	相关系数	-0.124	-0.464	0.780	-0.649
	显著性	0.843	0.431	0.120	0.237
AC	相关系数	0.269	0.203	-0.568	0.749
	显著性	0.662	0.744	0.318	0.146
PI	相关系数	0.082	0.398	-0.839	0.626
	显著性	0.896	0.507	0.043*	0.258

注：\*为显著性结果  $P < 0.05$ 。

拟合结果如图9所示,随着作业面照度的增加, $\beta$ 波段的功率和综合绩效均呈现先增加后降低的变化趋势。在工作面照度达到695 lx时,FT10通道 $\beta$ 波段的功率为7.59  $\mu\text{V}^2$ 。综合绩效则是在789 lx照度下达到最大值,为2.72%/s。 $\beta$ 波段作为脑电的高频成分,通常被认为与大脑激活状态和认知功能相关联,在本研究中, $\beta$ 波段的功率值较大时,综合绩效较高,响应的通道为FT10,位于与目标识别相关的颞叶区,可能与本研究中选用 Stroop 测试作为认知任务有关。

图9 综合绩效、FT10通道 $\beta$ 波段功率与照度的关系

● 功率; ◆ PI

### 3 结论

本研究通过计算5种照度工况下32个通道的 $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$ 和 $\beta$ 4个波段的功率,结合认知任务结果,探究不同照度工况下受试者认知表现与脑电功率的差异及变化规律,在此基础上对综合绩效和脑电功率进行了相关性分析,探究工作表现与脑电能量之间的联系。得到如下结论:

1) 认知任务表现结果表明,受试者完成测试的反应时间、准确率和综合绩效在不同照度水平下具有显著性差异。75 lx照度环境下,3项评价指标最差,综合绩效2.1%/s。随着照度增加,500~750 lx照度区间内,受试者认知任务表现最佳,综合绩效为2.68%/s。照度增加至1200 lx时,综合绩效降低了2.6%,为2.61%/s。

2) 脑电功率分析结果表明,不同照度水平下的脑电总功率在统计学意义上无显著差异。功率受照度影响显著的频段为 $\delta$ 波段和 $\beta$ 波段,且响应的通道在顶叶区、额叶区和颞叶区均有分布。

3) 脑电功率与综合绩效的分析结果表明,FT10通道 $\beta$ 波段的功率与综合绩效随照度增加均呈现先增后减的变化趋势,具有较强的相关性。FT10通道 $\beta$ 波段的功率可以作为不同照度水平下反映认知任务综合绩效的脑电特征值。

#### 参考文献(References):

- [1] ZENG Y Y, SUN H L. Non-visual effects of office light environment: Field evaluation, model comparison, and spectral analysis[J]. Building and Environment, 2021, 197: 107859.

- [2] CHIARA B, LAURA P, GIUSEPPE C, et al. Cold led lighting affects visual but not acoustic vigilance[J]. *Building and Environment*, 2019, 151: 148-155.
- [3] DUIJNHOFEN V J, AARTS M P J, ARIES M B C, et al. Systematic review on the interaction between office light conditions and occupational health: Elucidating gaps and methodological issues[J]. *Indoor and Building Environment*, 2019, 28(2): 152-174.
- [4] LESNIK H, POBORC-GODLEWSKA J. The relationship between ciliary muscle fatigue and the type of artificial light used to illuminate the area of visual work[J]. *Polish Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 1993, 6(3): 287-292.
- [5] WILKINS A J. *Visual stress*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- [6] BOYCE P R. Review: The impact of light in buildings on human health[J]. *Indoor and Building Environment*, 2010, 19(1): 8-20.
- [7] SUN C J, LIAN Z W, LAN L. Work performance in relation to lighting environment in office buildings[J]. *Indoor and Building Environment*, 2019, 28(8): 1064-1082.
- [8] RU T, SMOLDERS K, CHEN Q, et al. Diurnal effects of illuminance on performance: Exploring the moderating role of cognitive domain and task difficulty[J]. *Lighting Research & Technology*, 2021, 53(8): 727-747.
- [9] FAKHARI M, FAYAZ R, ASADI S. Lighting preferences in office spaces concerning the indoor thermal environment[J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2021, 10(3): 639-651.
- [10] 史偲岑, 谭良斌. 建筑光环境对工作效率的影响研究[J]. *建筑技术开发*, 2019, 46(17): 101-102.  
SHI Sicen, TAN Liangbin. Research on the influence of architectural light environment on work efficiency[J]. *Building Technology Development*, 2019, 46(17): 101-102.
- [11] MA J H, LEE J K, CHA S H. Effects of lighting CCT and illuminance on visual perception and task performance in immersive virtual environments[J]. *Building and Environment*, 2022, 209: 108678. 1-108678. 16.
- [12] MA J H, LEE J K, CHA S H. Fundamentals of EEG measurement[J]. *Measurement of Science Review*, 2002(2): 16-30.
- [13] LIU Y J, CHEN D S. An analysis on EEG power spectrum under pressure of girdle[J]. *International Journal of Clothing Science & Technology*, 2015, 27(4): 495-505.
- [14] MORI Y, KUMIKO I, AKIKO S, et al. Clothing comfort of the material (RAFUMA-mixed cotton) of pajamas from the point of biological reactions[J]. *Journal of Home Economics of Japan*, 2005, 56(4): 233-240.
- [15] 鹿铭理. 基于脑电的光环境评价方法及实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.  
LU Mingli. Evaluation method and experimental research of light environment based on EEG[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [16] 吴璠. 室内照明环境对工作效率的影响机制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.  
WU Fan. Research on the influence mechanism of indoor lighting environment on work efficiency[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [17] SHIN Y, SEUNG-HYUN W, DONG-HYEON K, et al. The effect on emotions and brain activity by the direct/indirect lighting in the residential environment[J]. *Neuroscience Letters*, 2015, 584: 28-32.
- [18] GB 50034—2021, 建筑照明设计标准[S].  
GB 50034—2021, Architectural lighting design standard[S].
- [19] SCARPINA F, TAGINI S. The Stroop color and word test[J]. *Frontiers in Psychology*, 2017, 8: 557.
- [20] MURUGAPPAN M, MURUGAPPAN S. Human emotion recognition through short time electroencephalogram (EEG) signals using fast Fourier transform (FFT)[C]//2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. IEEE, 2013: 289-294.
- [21] SANEI S, CHAMBERS J A. *EEG signal processing*[M]. London: John Wiley & Sons, 2007.
- [22] 张崇, 郑崇勋, 裴晓梅, 等. 生理性精神疲劳的多参数脑电能量谱分析[J]. *生物医学工程学杂志*, 2009, 26(1): 162-172.  
ZHANG Chong, ZHENG Chongxun, PEI Xiaomei, et al. Multiparameter EEG energy spectrum analysis of physiological mental fatigue[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2009, 26(1): 162-172.
- [23] BAUMEISTER J, BARTHEL T, GEISS K R, et al. Influence of phosphatidylserine on cognitive performance and cortical activity after induced stress[J]. *Nutritional Neuroscience*, 2013, 11(3): 103-110.
- [24] MATEUSZ G, MIKOAJ M, IZABELA S, et al, et al. EEG beta band activity is related to attention and attentional deficits in the visual performance of elderly subjects[J]. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 2013, 89(3): 334-341.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)