

中文引用格式:江松,刘迪真,陈盈,等. 基于脑电信号的不同照度对矿工注意力的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 113–120.

英文引用格式:JIANG Song, LIU Dizhen, CHEN Ying, et al. Research on impact of different illuminances on miners' attention based on EEG signals[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 113–120.

基于脑电信号的不同照度对矿工注意力的影响研究*

江松^{1,2}教授, 刘迪真^{**1,2}, 陈盈^{1,2}讲师, 蒋国炜³,
徐中华⁴高级工程师, 何润丰^{1,2}

(1 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2 西安建筑科技大学 西安智慧工业感知、计算与决策重点实验室, 陕西 西安 710055; 3 内蒙古显鸿科技股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4 中钢集团山东富全矿业有限公司, 山东 济宁 272500)

中图分类号:X912

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1223

基金项目:国家自然科学基金资助(52374136); 陕西省重点研发计划基金资助(2024GX-YBXM-495)。

【摘要】 为探究井下光照因素对矿工大脑认知的影响变化过程, 设计脑电(EEG)试验, 结合矿山井下实地采集的光照数据, 分析4种不同光照条件(100、60、30、15 lx)对矿工注意力的影响; 通过功率谱密度提取采集的EEG信号特征, 选用 α 、 β 、 θ 节律波分析注意力特征值; 结合舒尔特方格试验验证分析结果。结果显示: 能量占比图中 β 节律波始终占据较大比例, 脑地形图中在工况2达到峰值, 表示被试集中注意力; 4种工况下注意力特征值(β/θ 值)均呈现下降趋势, 到试验55 min时, 工况4相比工况2的 β/θ 值下降54.86%, 表明在光照强度为60 lx时矿工注意力为最佳状态, 15 lx时注意力呈现显著衰弱; 舒尔特方格试验在工况2的用时最短且出错率最低, 同时, 可靠度为84.83%, 在工况4中可靠度仅为73.15%, 矿工出错次数显著增加, 注意力呈下降趋势。

【关键词】 脑电(EEG); 照度; 矿工注意力; 节律波; 反应时间

Research on impact of different illuminances on miners' attention based on EEG signals

JIANG Song^{1,2}, LIU Dizhen^{1,2}, CHEN Ying^{1,2}, JIANG Guowei³,
XU Zhonghua⁴, HE Runfeng^{1,2}

(1 School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 Xi'an Key Laboratory for Intelligent Industrial Perception, Calculation and Decision, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 3 Inner Mongolia Xianhong Technology Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia 010010, China;
4 Sinosteel Shandong Fuquan Mining Co., Ltd., Jining Shandong 272500, China)

Abstract: To explore the impact of underground lighting on miners' cognition, an EEG experiment was designed under different lighting conditions (100, 60, 30, 15 lx). EEG signals features were extracted

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0113-08; 收稿日期:2025-04-01; 修稿日期:2025-06-17

** 通信作者:刘迪真(1998—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为智能矿山、矿山人因工程。E-mail: kiko@xauat.edu.cn。

using power spectral density, and α , β and θ rhythmic waves were selected for analyzing attention feature values. The analysis results were validated by using the Schultz grid test. The results indicate that β waves always occupy a larger proportion in the energy proportion graph. In the brain map, it reaches the maximum value in working condition 2, indicating that the subject is focused. The attention eigenvalue (β/θ value) shows a downward trend in the four working conditions. The β/θ value of working condition 4 decreases by 54.86% compared with that of working condition 2 at 55 min of the test, which indicates that the miner's attention is optimal at the light intensity of 60 lx, and significantly weakens at 15 lx. The Schultz grid test has the shortest duration and lowest error rate in condition 2, and the reliability reaches 84.83%, while under condition 4, the reliability is only 73.15%. The number of errors made by miners significantly increases, and attention shows a downward trend.

Keywords: electroencephalogram (EEG); illumination; miners' attention; rhythm waves; reaction time

0 引言

近年来,我国矿山生产仍存在较大安全隐患,矿工不安全行为是造成事故发生的最主要、最直接原因^[1-3]。在井工矿中,光照是影响矿山工人作业的重要物理环境因素之一,不良的光照条件会造成工人注意力集中度下降,致使安全事故发生。同时,井工矿具有狭窄、密闭等特点,导致光照环境受到限制,工作环境相对较差,这造成矿工作业效率、反应能力的降低。长时间处于昏暗或明亮环境下,不仅会导致视觉能力下降,并且使矿工注意力无法集中,作业时无法及时作出有效判断,造成诸多安全隐患。因此,良好的光照条件不仅在一定程度上缓解疲劳,而且能有效提高矿工安全作业效率^[4-7]。

目前,李静等^[8]模拟煤矿中不同照度,测试光照对人体疲劳、注意力等生理指标的影响,发现注意力受照度影响最为显著,且照度在 50~75 lx 或以上的梯度,能减少事故的发生。邹亚双^[9]研究低照明和高噪声对作业人员疲劳程度的影响,发现 75 lx 照度有利于延缓作业人员的视觉疲劳,但低于 15 lx 照度反而会加速作业人员的疲劳程度;相较 35 dB,高于 80 dB 会加速疲劳增长。李杰等^[10]构建煤矿照明仿真试验系统,分析不同照度水平对矿工心率、皮肤电活动和呼吸指标 3 个指标的影响,发现当照度恢复 100 lx 后所有指标逐渐恢复正常,而小于 10 lx 时事故发生率增加。

综上所述,现有研究大多从矿工生理指标层面分析注意力,还鲜有聚焦于神经生理层面探究矿工注意力水平的。因此,笔者拟设计脑电 (Electroencephalogram, EEG) 试验,通过设置不同光照强度,对比 EEG 节律波及对注意力的影响程度,

以期减少矿工作业事故提供一定的参考。

1 不同照度下的 EEG 试验

1.1 被试选取及模拟环境设置

1) 试验被试。针对井工矿工驾驶作业时的光照条件,要求被试具备身体健康、反应能力和认知能力较好的条件。通过统计分析软件中 A Prior 得出需招募 12 名被试,修正系数和相关性系数分别取 0.5,显著性水平为 0.05。被试年龄为 22~26 岁的男性学生,要求具有良好的生活作息规律且具有一年以上的矿山企业实习经验。试验开始前,被试需保持足够睡眠、情绪稳定,严禁进食刺激神经中枢的食品,且在试验当天保持头发清洁^[11]。

2) 试验环境与设备。试验于井工矿驾驶模拟实验室内进行,光照强度样本为矿井下实际场景,结合《矿山电力设计标准》(GB 50070—2020),确定矿井实际照明地点及最低光照强度,见表 1。利用可调节照度的 LED 灯管模拟 4 种试验工况,即工况 1 (照度 100 lx)、工况 2 (照度 60 lx)、工况 3 (照度 30 lx)、工况 4 (照度 15 lx),其中,工况 1 为井工矿最高照度的光源条件,工况 4 为井下运输工作业时的光照条件。试验全程将屏幕亮度调节至最低状态,试验光源设置于驾驶模拟实验室顶部。

表 1 矿井实际照明地点、最低照度

Table 1 Actual lighting locations and minimum illumination in mine

照明地点	最低照度/lx
一般电气设备硐室及其他硐室	50
爆破器材库	30
信号室、调度室	75
机械化运输巷道、候车室	20
井底车场及其附近巷道	15
保健站	100

试验仪器主要包括标准 16 导联水电极脑电帽采集系统、驾驶模拟操作台、采矿模拟软件、不同光照强度的发光二极管。由于涉及注意力问题,选用 EEG 信号中与注意力密切相关的 α 波、 β 波、 θ 波

3 种节律波,且分别呈现于大脑的额叶区、中央区和顶叶区。采集额区 (FP1、FP2、F3、F4)、顶区 (P3、P4)、中央区 (C3、C4) 以及双侧乳突 (A1、A2) 8 个电极点的 EEG 信号。试验设备布置如图 1 所示。

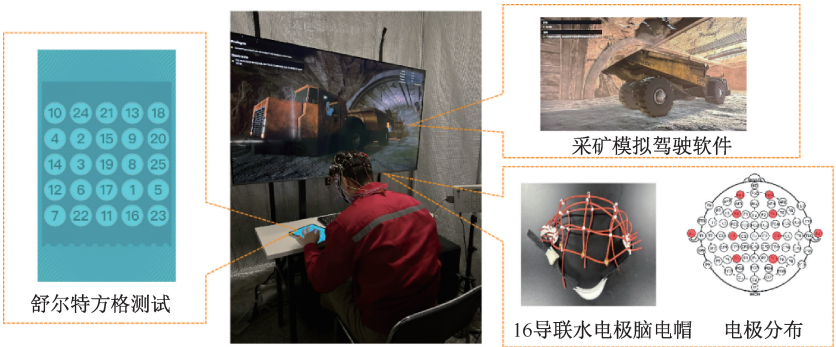


图 1 试验设备布置
Fig. 1 Layout of test equipment

1.2 矿工注意力试验流程

1) EEG 数据采集。被试在试验开始前 5 min 内初步适应驾驶模拟任务的操作方式,当被试 EEG 信号波幅呈现平稳变化时,开始采集 EEG 数据,并且试验过程中,室内温度保持在 $(25\pm3)^{\circ}\text{C}$,相对湿度保持在 40% 左右。

2) 注意力水平。采取舒尔特方格测试试验,分别在被试开始试验任务前和结束试验任务后完成 5×5 方格测试,要求被试按照 1—25 的顺序以最快的速度完成排序,当点击不正确后则直接返回开始界面。每名被试在每次测试中均有 20 次机会,最终获得测试成功的平均时间。

试验分为 2 组开展,1 组周期为 4 天。被试 1—6 (第 1 组) 第 1 天为 100 lx、第 2 天为 60 lx、第 3 天

为 30 lx、第 4 天为 15 lx,且同一被试在同一时间段完成不同光照强度试验。当第 1 组完成全部试验后,被试 7—12 (第 2 组) 以相同方式进行试验。EEG 试验各任务时间安排如图 2 所示,不同照度下试验过程如图 3 所示。

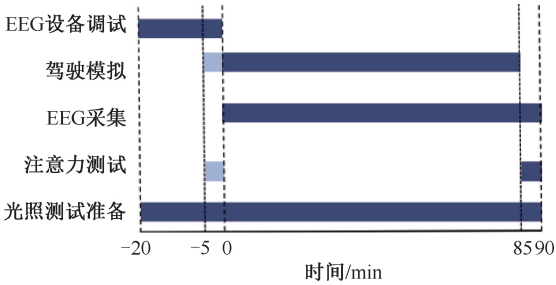


图 2 各任务时间安排
Fig. 2 Time schedule for each task

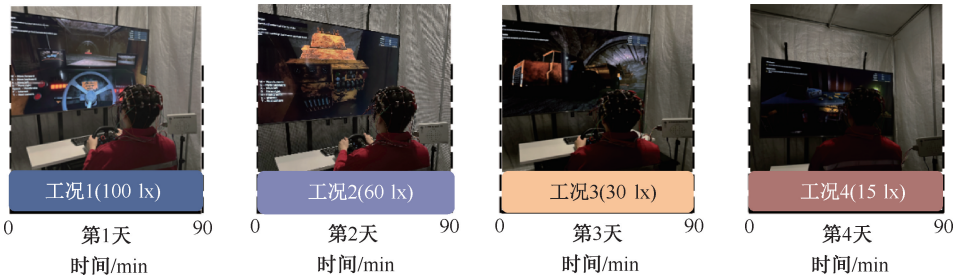


图 3 不同照度下试验过程
Fig. 3 Experimental process under different illumination levels

2 EEG 信号数据处理

2.1 原始 EEG 信号预处理

由于外界环境因素影响,EEG 信号波幅具有不

稳定、微弱等特点,易受外界因素干扰,因此会造成一定程度的误差。为方便后续分析和特征提取,使用 Matlab2018b 软件预处理所采集的数据^[12-13]。

首先,采取滤波进行降噪及选择特定频段观察

信号;其次,由于选取的电极较为繁杂,因此,降低采样频率减小数据复杂度;最后,为提取更纯净的 EEG 信号数据,去除眼瞟、眨眼等成分干扰^[14]。预处理前后的 EEG 信号对比如图 4 所示,进行独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)处理后的脑地形图^[15]如图 5 所示。

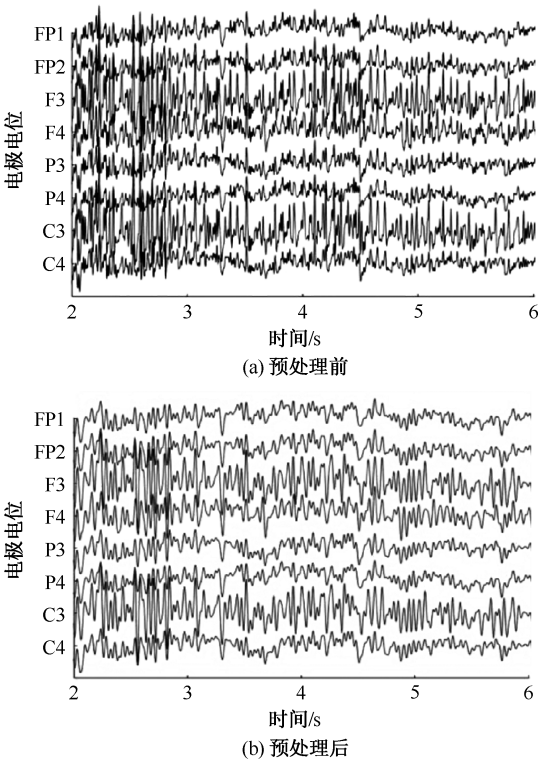


图 4 预处理前后 EEG 信号对比

Fig. 4 Comparison of EEG signals before and after pretreatment

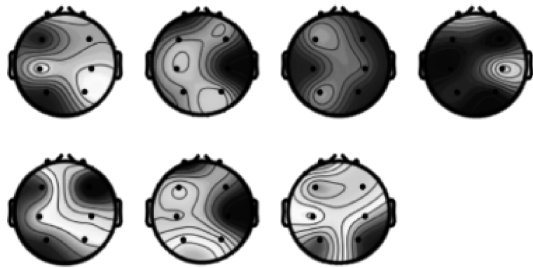


图 5 ICA 处理后大脑地形图

Fig. 5 Brain topographic map after ICA processing

2.2 EEG 信号中影响注意力的相关指标提取

1) 功率谱密度。功率谱密度是分析 EEG 信号的一种方法,可以分析运动想象 EEG 信号的频域特征。信号功率和频率之间可采用功率谱反应,能很好地表述非平稳信号的特征,因此,采用功率谱密度提取 EEG 特征^[16-18]。

利用韦尔奇周期图法(Pwelch)计算 EEG 功率谱密度值,计算式如下:

$$x_p^i(n) = x_p[n + (i - 1)M]d_i[n + (i - 1)M] \tag{1}$$

$$x_p = x_p^1(0) + x_p^2(1) + \cdots + x_p^L(M - 1) \tag{2}$$

$$0 \leq n \leq M - 1, 1 \leq i \leq L$$

$$J_p(\omega) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_p(n) \omega(n) \exp(-jwn) \right|^2 \tag{3}$$

$$P = 1, 2, \cdots, M - 1$$

式中: $x_p^i(n)$ 为第 i 段第 n 个采样点处理后数据; x_p 为各段叠加后的结果; n 为采样点编号; M 为数据 $x_p(n)$ 被分为 L 段后每段长度; $J_p(\omega)$ 功率谱密度值; U 为归一化因子; $\omega(n)$ 为数据窗口; j 为虚数单位; w 为频率, Hz; P 为不同频率点计算结果。

2) 注意力水平提取。在注意力研究中,常见特征有时域特征、频域特征、时频特征等^[19]。EEG 信号中包含 4 种主要的节律波,不同频率下显现不同节律波,从而产生不同的生理反应,具体见表 2^[20]。

表 2 EEG 频率节律波及人体生理反应

Table 2 EEG frequency rhythm waves and human physiological response

节律波	w/Hz	人体生理反应
δ	0.5~4	深度睡眠状态,为“无意识”波
θ	4~8	试图抑制困意或有抑郁时,为“潜意识”波
α	8~13	呈放松、闭眼等清醒状态,为“健康”波
β	13~30	专注、高度警觉的状态下

β 节律波和 θ 节律波主要影响注意力水平相关的 EEG 信号,依据 AZAMI^[18]、NAN Wenya^[21]、YANG Limin^[22]等提出的提取注意力水平特征值能够采用 β 节律波和 θ 节律波的比值来分析注意力在 EEG 信号中的变化情况。 β/θ 节律波能量比值 $E_{\beta/\theta}$ 的计算如下:

$$E_{\beta/\theta} = \frac{\int_{2\pi \times 4/f_s}^{2\pi \times 8/f_s} S(\omega) d\omega}{\int_{2\pi \times 12/f_s}^{2\pi \times 30/f_s} S(\omega) d\omega} \tag{4}$$

式中: $S(\omega)$ 为信号的功率谱, μV^2 ; ω 为 $S(\omega)$ 的频率, Hz; f_s 为采样频率。

根据被试生理变化以及各节律波特征, β 节律波会在人体出现积极思考且专注状态下显著增强,因此, β/θ 比值越大,人体注意力越集中。

3 不同照度对矿工注意力的影响

3.1 照度对 EEG 节律波影响

1) 脑地形图。脑地形图^[15]是 EEG 信号中各节律波能量值在球面头皮展开的平面图,脑地形图可直观反映出大脑受刺激后的强度和活跃状态。颜色由浅到深代表节律波的功率由弱到强,将试验采集的 EEG 数据通过归一化处理和分离节律波,得到的 EEG 活动地形图,如图 6 所示。图中呈现了 12 名被试分别在 4 种工况下各节律波的平均值。

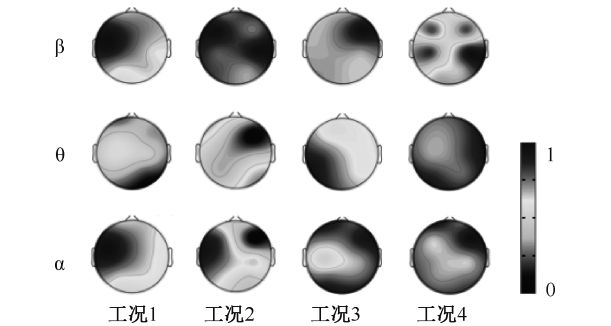


图 6 大脑电位分布
Fig. 6 Distribution of brain potential

由图 6 可知:α 波呈现于额叶区,工况 2 较工况 1 下浅色区域较多,说明被试保持清醒状态。β 波集中于中央区 and 顶叶区,工况 2 时深色区域最多,表明被试注意力最集中;工况 4 时深色区域显著减少,说明被试已出现判断能力下降的情况,可能导致警惕性降低从而增加任务失误率。θ 波在工况 4 时深色区域最多,说明被试已产生较强的疲劳感,同时 θ 波与 β 波呈现相反趋势。

2) 3 种节律波能量占比情况如图 7 所示。δ 节律波通常出现于人体深度睡眠状态下,文中占比很少,可忽略不计,故图 7 中并未呈现。β 波在工况 2 占比最大,且该波始终具有较大占比,表明被试全程保持注意力集中状态。α 波在工况 4 时达到峰值,说明被试开始出现放松、闭眼等现象,注意力呈下降趋势。θ 波于工况 4 中数值最大,表明被试已出现疲惫感并通过主观意识集中注意力。

3) 注意力特征值。计算 12 名被试在 4 种工况的 β/θ 的平均值,得出不同照度对注意力特征值的变化过程。由于 β 节律波和 θ 节律波可作为衡量注意力的特征指标,且由图 6 可知:2 种波集中于被试额叶区与顶叶区,因此,选取这 2 部分电极点数据平均值判断注意力水平的变化情况,结果如图 8 所示。

由图 8 可知:EEG 信号具有不稳定性,导致 β/θ

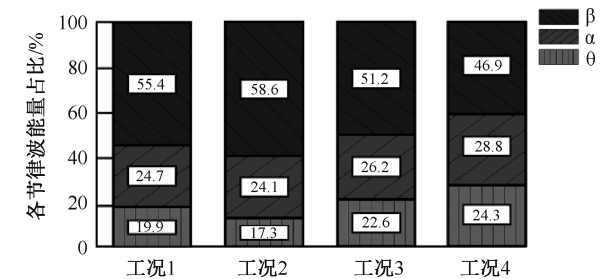


图 7 3 种节律波能量占比情况
Fig. 7 Energy proportion of three types of rhythm waves

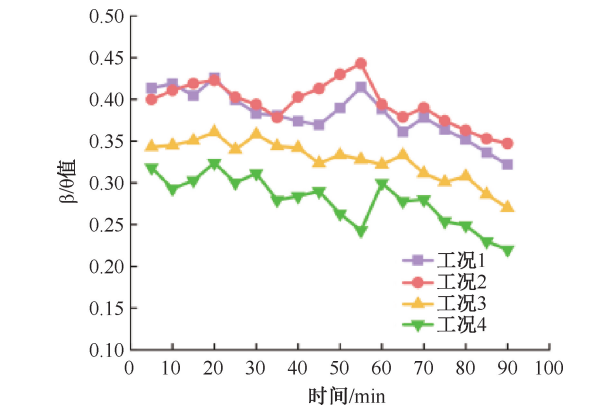


图 8 注意力水平变化情况
Fig. 8 Changes in attention levels

值在 4 种工况中均呈现先升后降的反复变化趋势,且 β/θ 值在一定范围内出现上下波动现象。随着试验进行,工况 2 的变化趋势明显高于另外 3 种工况,说明 60 lx 下被试注意力呈现最集中状态;工况 1 中,β/θ 值相对平稳,表明被试对光照影响处于可控制范围内;工况 3 中,50 min 后呈缓慢下降趋势,表明被试开始存在放松、注意力不集中等疲惫意识。试验进行到 55 min 时,工况 2 的 β/θ 值与其他 3 种工况呈现较大差距,且工况 4 较工况 2 的 β/θ 值下降 54.85%,注意力严重下滑。在试验进行到 70 min 时,工况 4 的 β/θ 值出现突然下降趋势,说明被试此时呈现强烈疲惫感,且疲惫感仍缓慢增强。采用皮尔逊(Pearson)相关性分析,得出光照强度与注意力特征值(β/θ 值)呈现正相关性($r=0.734$,显著性水平 $P<0.05$),说明在 60lx 时被试更易集中注意力,当低于 15 lx 时,如不采取相应措施,矿工注意力将严重降低,产生安全隐患。

3.2 舒尔特方格注意力试验分析

舒尔特方格注意力试验结果只保留全过程中正确的反应时间及正确率高于 50% 的数据,试验结果见表 3。

表 3 各组完成舒尔特方格测试的反应时间和正确阅读量比较 ($\bar{x}\pm s$)

Table 3 Comparison of reaction time and correct reading number in Schulte grid tests completed in each group ($\bar{x}\pm s$)

舒尔特方格	任务分组	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
反应时间/s	A	21.63±3.86	23.36±2.66	23.88±2.04	26.79±2.21
	B	23.66±4.39	21.15±2.48	25.08±3.11	30.04±2.66
出错次数	A	4.43±1.38	2.11±1.25	3.43±2.80	4.96±1.12
	B	3.14±2.43	3.96±0.88	4.58±1.91	5.78±3.31
平均可靠度/%	—	81.08	84.83	79.98	73.15

注: $\bar{x}$ 为均值; s 为标准差。

可靠度是衡量差异性的指标之一,该指标可以反映被试在不同工况下注意力反应的差异情况^[23]。根据 A、B 这 2 组舒尔特方格试验记录被试未完成次数,再分别算出 4 种工况下的平均未完成次数,采用下式计算失误率和 4 种工况下的可靠度指标:

$$F = \frac{m}{20} \tag{5}$$

$$R = 1 - F \tag{6}$$

式中: F 为失误率; m 为未完成次数; R 为可靠度指标。

4 种工况下注意力变化趋势如图 9 所示。根据 A、B 这 2 组任务前、后注意力对比和不同光照对被试的影响,由图 9 可以看出,错次数与可靠度指标呈现反向变化趋势;工况 2 中出现最短反应时间和最少出错次数;工况 4 中可靠度指标较工况 2 相比较下降 11.68%,反应时间和出错次数均呈现显著差异。

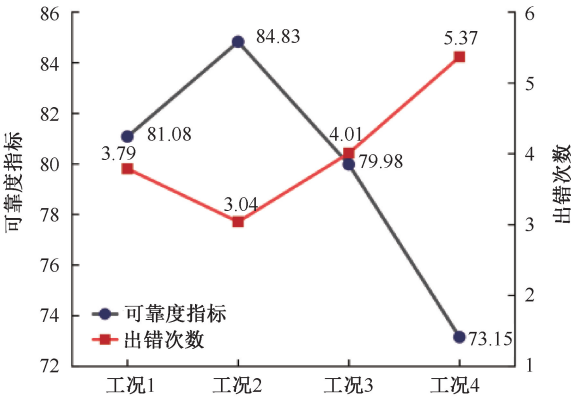


图 9 可靠度指标和出错次数变化趋势

Fig. 9 Reliability metrics and the number of errors

4 讨 论

1) 通过 EEG 数据分析可得,井工矿中 15 lx 下矿工注意力显著降低。同时,EEG 数据和舒尔特方格试验结果存在一致性。基于此,可定期对矿工开展心理调查,并记录或检测矿工在低照度环境下的作业时长,确保矿工具有良好的作业状态,提高矿工自控能力,减少事故发生。

2) 已有研究成果表明:井工矿光照在 50~70 lx 时更佳,低于 15 lx 时会加快疲劳^[9]。与文中得到的 60 lx 下注意力更集中,15 lx 下注意力显著降低相一致,文中采用 EEG 设备进行数据分析,试验结果更加客观。

5 结 论

1) 试验结果证明:15 lx 下矿工注意力较 60 lx 显著下降,揭示光照强度与注意力呈正相关。实践中,合理设置光照区间及矿工作业时长,可有效提升作业效率,并降低事故发生率。

2) 文中仅针对光照单因素研究矿工注意力变化,但实际矿井环境复杂多变,之后可考虑多种环境变量耦合影响。

3) 文中将 EEG 设备应用于矿工注意力分析,可实现注意力动态监测。之后研究中可融合心电、眼动等仪器测量矿工注意力,得到更全面的理论结果。

参 考 文 献

[1] 张舒,王双,史秀志. 不安全行为决策中情绪作用机制的脑电研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 32-40.
ZHANG Shu, WANG Shuang, SHI Xiuzhi. An EEG study of emotion mechanism in unsafe behavior decision-making[J].

- China Safety Science Journal, 2023,33(1):32-40.
- [2] 李红霞, 徐浩冉, 田水承. 基于随机森林的矿工不安全行为预测预警模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 10-18.
- LI Hongxia, XU Haoran, TIAN Shuicheng. A prediction and early warning model of miners' unsafe behavior based on random forest[J]. China Safety Science Journal, 2022,32(12):10-18.
- [3] 景国勋, 田国良, 蒋方. 2016—2022 年我国煤矿顶板事故统计分析及防治对策[J]. 煤炭工程, 2023, 55(10): 74-79.
- JING Guoxun, TIAN Guoliang, JIANG Fang. Statistical analysis and countermeasures of coal mine roof accidents from 2016 to 2022[J]. Coal Engineering, 2023,55(10):74-79.
- [4] 马申, 胡松涛, 辛崧, 等. 基于因子分析的人体疲劳及光舒适综合评价研究[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(2): 101-106.
- MA Shen, HU Songtao, XIN Song, et al. Comprehensive evaluation of human fatigue and light comfort based on factor analysis[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019,40(2):101-106.
- [5] 贾爱芳, 田水承, 郭昕玥, 等. 矿工心理疲劳试验研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2 608-2 616.
- JIA Aifang, TIAN Shuicheng, GUO Xinyue, et al. Experimental study on mental fatigue of miners[J]. Journal of Safety and Environment, 2021,21(6):2 608-2 616.
- [6] 范庆月. 基于多生理信号的 VDT 作业照明环境舒适性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
- FAN Qingyue. Study on lighting environment comfort of VDT work based on multiple physiological signals[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [7] 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.
- [8] LI Jing, WANG Zhen, QIN Yaru, et al. Study on the influence of an underground low-light environment on human safety behavior[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics: JOSE, 2022, 28(1): 305-314.
- [9] 邹亚双. 井工煤矿环境照度和噪声强度对视疲劳的影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
- ZOU Yashuang. Study on the influence of ambient illumination and noise intensity on visual fatigue in underground coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [10] LI Jing, QIN Yaru, GHENG Cuan, et al. Lighting for work: a study on the effect of underground low-light environment on miners' physiology[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(8): 11 644-11 653.
- [11] 卢才武, 徐晓慧, 高睿阳, 等. 热湿环境下矿工注意力对应急决策影响的脑电研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3 641-3 647.
- LU Caiwu, XU Xiaohui, GAO Ruiyang, et al. EEG research on the emergency decision in thermal and humidity environment[J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(10):3 641-3 647.
- [12] GOLJAHANI A, BISIACCHI P, SPARACINO G. An EEGLAB plugin to analyze individual EEG alpha rhythms using the "channel reactivity-based method" [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2014, 113(3): 853-861.
- [13] DELORME A, MAKEIG S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2004, 134(1): 9-21.
- [14] 卢才武, 高睿阳, 徐晓慧, 等. 基于脑电数据的不同噪声工况下矿工注意力研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 35-41.
- LU Caiwu, GAO Ruiyang, XU Xiaohui, et al. Study on miners' attention under different noise conditions based on EEG data[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(5):35-41.
- [15] PIRONDINI E, COSCIA M, MINGUILLON J, et al. EEG topographies provide subject-specific correlates of motor control[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): DOI:10.1038/s41598-017-13482-1.
- [16] 赵德春, 沈利豪, 蒋宇皓, 等. 基于共空间模式和功率谱密度的脑电信号分类[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4 272-4 278.
- ZHAO Dechun, SHEN Lihao, JIANG Yuhao, et al. Classification of electroencephalogram signals based on common space pattern and power spectrum density[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(10):4 272-4 278.
- [17] 张洁, 庞丽萍, 完颜笑如, 等. 基于脑电功率谱密度的作业人员脑力负荷评估方法[J]. 航空学报, 2020,

- 41(10): 118–125.
- ZHANG Jie, PANG Liping, WANYAN Xiaoru, et al. Method for operator mental workload assessment based on power spectral density of EEG[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020,41(10):118–125.
- [18] AZAMI H, ZRENNER C, BROOKS H, et al. Beta to theta power ratio in EEG periodic components as a potential biomarker in mild cognitive impairment and Alzheimer’s dementia[J]. *Alzheimer’s Research & Therapy*, 2023, 15(1): DOI:10.1186/s13195-023-01280-z.
- [19] 杨文阳, 张文瑄. 基于脑电信号的注意力水平评价研究进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2023, 40(4): 820–828. YANG Wenyang, ZHANG Wenxuan. Research progress on attention level evaluation based on electroencephalogram signals[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2023,40(4):820–828.
- [20] LALO E, GILBERTSON T, DOYLE L, et al. Phasic increases in cortical beta activity are associated with alterations in sensory processing in the human[J]. *Experimental Brain Research*, 2007, 177(1): 137–145.
- [21] NAN Wenya, WAN Feng, VAI Mang I, et al. Resting and initial beta amplitudes predict learning ability in beta/theta ratio neurofeedback training in healthy young adults[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015,9: DOI:10.3389/fnhum.2015.00677.
- [22] YANG Limin, NAN Wenya, QU Xiaoting, et al. Beta/theta ratio neurofeedback training effects on the spectral topography of EEG[C]. 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Milan: IEEE, 2015: 4 741–4 744.
- [23] 景国勋, 吕鹏飞, 周霏, 等. 基于 E-Prime 的煤矿噪声对矿工反应时与出错数的影响效应研究[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(6): 2 285–2 289. JING Guoxun, LYU Pengfei, ZHOU Fei, et al. Impact of the coal-mining noise on the miners’ reaction and their error-making frequency based on E-Prime[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018,18(6):2 285–2 289.

作者简介：江松（1990—），男，江西鄱阳人，博士，教授，主要从事智慧矿山、矿山人因工程等方面的研究。E-mail:jiangsong@xauat.edu.cn。

