

doi: 10.11731/j.issn.1673-193X.2022.03.021

## 应急场景下矿工脑电成分特征的研究<sup>\*</sup>

袁晓芳<sup>1,2</sup>, 李玲<sup>1,2</sup>, 周垚<sup>1,2</sup>

事件相关电位ERP

(1.西安科技大学 管理学院 陕西 西安 710054;

2.西安科技大学 人因与管理工效学研究中心 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为探究矿工在应急场景下的脑电成分变化规律,研究通过脑电实验的方法对矿工在观看应急与正常作业场景下文字与图片素材的脑电数据进行分析。结果表明:矿工在实验素材的靶刺激下,ERP成分明显,且图片刺激效果强于文字,在200~400 ms时,P200、P300成分峰值最大;矿工大脑 $\alpha$ 节律不断下降, $\beta$ 节律不断上升,且 $\beta$ 节律波幅面积值总是大于 $\alpha$ 节律。研究结果能够为矿工应急能力的评估与培养、煤矿企业的安全培训提供科学依据与建议。

**关键词:** 应急场景; 脑电数据; 靶刺激; 节律

中图分类号: X936 文献标志码: A 文章编号: 1673-193X(2022)-03-0137-06

## Experimental study on EEG components characteristics of miners in emergency scenario

YUAN Xiaofang<sup>1,2</sup>, LI Ling<sup>1,2</sup>, ZHOU Yao<sup>1,2</sup>

(1.School of Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China;

2.Research Center for Human Factors and Management Ergonomics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** In order to investigate the change law of the electroencephalogram (EEG) components of miners in the emergency scenario, the EEG data of miners watching the text and picture materials of emergency and normal working scenarios was analyzed by means of EEG experiment. The results showed that for the miners under the target stimulation of experimental materials, the ERP component was obvious, and the stimulation effect of picture was stronger than that of text, the peak values of P200 and P300 components were the largest at 200~400 ms. The  $\alpha$  rhythm of the miners' brain kept decreasing, while the  $\beta$  rhythm kept increasing, and the amplitude area value of the  $\beta$  rhythm wave was always larger than that of the  $\alpha$  rhythm. The study can provide scientific basis and suggestions for the assessment and training of miners' emergency capability and the safety training of coal mining enterprises.

**Key words:** emergency scenario; electroencephalogram (EEG) data; target stimulation; rhythm

## 0 引言

我国是产煤大国,煤炭行业内部生产环境复杂,煤矿安全事故时有发生。大量煤矿安全事故案例表明,矿工的应急处置不当是造成事故的主要原因<sup>[1]</sup>,如煤矿发生冒顶、瓦斯超限等危险预兆时,由于慌乱未能正确及时应对等,都有可能造成重大事故的发生。可见,探究人的应急能力水平是降低煤矿安全事故的重要基础<sup>[2]</sup>,而如何提高矿工的应急反应能力,将是我国煤矿安全生

产中的重要课题。

对个体应急反应及应急能力研究方面,国内外很多学者采用实验的方法来获得受试心理、生理指标数据,进而分析个体心理、生理变化特性和行为选择过程。例如,张江石等<sup>[2]</sup>通过建立井下应急实验场景,评估矿工生理指标来定量计算矿工应急能力;赵鹏飞等<sup>[3]</sup>采用生理反映心理的方法,测试了应急场景下矿工的心理应急能力指标,并对矿工心理应急能力进行了评价;Hammad等<sup>[4]</sup>通过问卷的方法,发现可以通过对护士进行应急能

收稿日期: 2021-06-10

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(71673220); 陕西省科学技术厅青年项目(2020JQ760); 中国人类工效学学会-津发科技优秀青年学者联合研究基金项目(CES-Kingfar-2019-002)

作者简介: 袁晓芳,博士,副教授,主要研究方向为人因工程、安全工程、消费者行为学等。

通信作者: 李玲,硕士研究生,主要研究方向为人因工程、人力资源管理等。

力的培训和学习来提高其在突发事件下的急救工作应急能力水平。国内外有关个体应急反应的研究多采用心率、呼吸率、血氧浓度等生理信号监测与主观调查问卷分析等方法,而关于个体应急场景下的深层次认知加工过程的研究成果尚不多见。相关研究指出,脑电信号是大脑内部神经元在皮层组织的表现<sup>[5]</sup>,在研究突发事件时,可很好地反映出个体的生理活动<sup>[6]</sup>。脑电中的事件相关电位技术(Event-Related Potential, ERP)通过对头皮相关电位的正负波进行脑电波形成像,其可以反馈用户细微的脑部认知活动<sup>[7]</sup>。李乃文等<sup>[8]</sup>利用脑电 ERP 成分中的 P300 波幅对不同作业阶段下矿工的安全注意力进行了研究,结果表明矿工在作业中期阶段, P300 波幅会大幅下降,安全注意力水平降低;王金娥等<sup>[9]</sup>通过诱发被试不同的 ERP 成分,得出选择注意与维持注意有不同的脑机制;李红霞等<sup>[10]</sup>通过脑电实验研究了矿工在疲劳前后的大脑 ERP 成分特征。

综上所述,现有研究缺乏对矿工在应急场景下的大脑活动情况分析,为更准确地观测矿工在应急场景下的认知加工状况从而分析个体应急反应情况及应急能力水平,研究通过构建脑电 ERP 测试实验来获取矿工在应急场景下的大脑活动数据,以此探究矿工在应急场景下的脑电活动规律,揭示矿工应急反应认知加工机制,为煤矿企业在事故预防和提高矿工应急能力方面提供新的建议。

## 1 实验设计及实验过程

### 1.1 实验设计

研究采取 Oddball 实验范式,靶刺激与非靶刺激数量占比为 1:4。通过搜集煤矿生产作业中常见的工作场景,用文字与图片的形式作为实验刺激素材,并进行差异度处理,邀请 30 名煤矿工作人员,对每张图片进行危险评估打分,最终将分值相近的图片作为实验素材,其中靶刺激的文字和图片各 5 张(20%),非靶刺激的文字和图片各 20 张(80%),图 1~2 为 1 组素材示例。

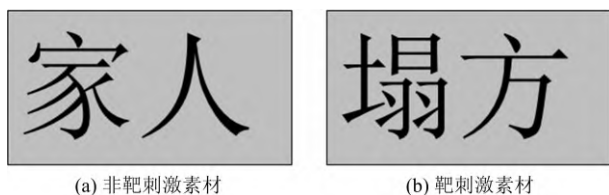


图 1 文字刺激素材

Fig.1 Text stimulus material

### 1.2 被试选择与实验设备

选取 25 名听力正常、右利手的 20~60 岁某煤矿男性在岗人员作为被试,平均年龄 39 岁,实验前均未服用



(a) 非靶刺激素材

(b) 靶刺激素材

图 2 图片刺激素材

Fig.2 Picture stimulus material

任何对生理检测有影响的药物,亦无饮酒等情况,无任何脑神经损伤和精神疾病病史,所有被试者视力或矫正视力正常,均无色盲或色弱等症状。脑电实验设备为 NeuroScan32 导脑电仪,Ag/AgCl 记录电极固定于 32 导电极帽,电极点采用国际 10~20 标准电极系统定位,参考电极设置在电极点 FCz 处,接地点设置在电极点 AFz 处。脑电信号经过放大后被连续记录,采样频率为 500 Hz。

### 1.3 实验过程

实验前,被试阅读实验流程并签署知情同意书,实验环境选择空间小、光线较暗的房间,尽可能模拟井下能见度较低的密闭空间环境。所有被试均要进行预实验与正式实验,根据 E-Prime2.0 实验系统设计和 Oddball 实验范式要求,先呈现文字再呈现图片。每位被试按空格键开始实验,正式实验前,先进行注视点矫正,矫正图片呈现时间为 800 ms,然后呈现文字素材,每张素材背景为灰色,呈现时间为 1 000 ms,间隔时间为 800 ms,接着以相同方式呈现图片素材,呈现时间为 1 500 ms,间隔时间为 800 ms,靶刺激与非靶刺激素材随机出现。实验流程如图 3 所示。

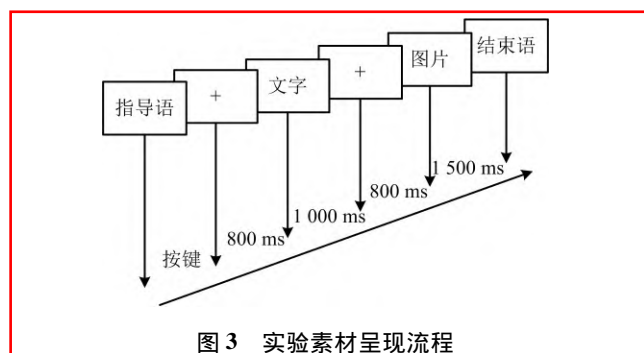


图 3 实验素材呈现流程

Fig.3 The flow chart of test material presentation

## 2 应急场景下脑电实验数据预处理和分析

### 2.1 实验数据预处理

本文运用 BrainVision Analyzer 2.0 分析软件对矿工应急场景下脑电实验数据进行预处理,主要包括电极转化、去眼电、去伪迹、滤波、基线校正、叠加平均和波峰检

测,去除实验误差较大的7位被试脑电数据后,最终选取18位脑电信号纯净的被试来进行数据分析和说明。

## 2.2 脑电实验数据分析

在Oddball实验范式中,靶刺激的出现会诱发较为显著的P2、P3、N1、N2等ERP成分。其中,P2是出现在刺激呈现后200 ms左右的早期正波成分,主要诱发电极点位于大脑前额<sup>[11]</sup>。Liu等<sup>[12]</sup>发现被试对目标刺激注意力越高,P2波幅越明显;Siegfried等<sup>[13]</sup>指出采用Oddball实验范式得到P3成分与注意力有关,而在非注意条件下不能诱发,其波幅与所投入的心理资源呈正相关。N1成分与视觉和听觉的早期注意力有关,受被试觉醒状态的影响,不受刺激因素影响。N2成分与具体时间和任务有关,如:刺激复杂度、主观轮廓、注意转移等<sup>[14]</sup>。

本文将主要采用时域分析方法中的峰值检测与频域特征分析下的脑电波节律来分析被试在应急场景下脑电数据变化特征,并结合脑电地形图来描述其脑部活动。

### 2.2.1 基于时域特征分析下脑电数据的组平均分析——峰值检测

#### 1) 脑电ERP波形分析

在有效被试所诱发的脑电ERP波形图中,被试大脑头皮的额叶区、顶叶区和枕叶区都提取出了明显的N1、P2和P3成分,其中N1成分与人视觉和听觉的早期注意有关,受被试觉醒状态的影响,而与刺激素材无关,故研究将重点分析P2和P3成分。通过对所有被试脑电ERP成分检测发现,被试在文字与图片的靶刺激下大脑额叶区与顶叶区会出现P2和P3成分且波幅显著,说明在应急场景下被试大脑额叶区和顶叶区活动增强,并且注意力因受到靶刺激的影响,而处于高度集中状态。

表1为18名被试在实验素材刺激下的波幅平均值,研究选取200~400 ms之间的ERP成分为例进行说明。

与文字的非靶刺激相比,被试在靶刺激下的脑电波幅平均峰值较大,且在Fz电极通道提取的P2和P3成分波幅更高,Fz电极属于大脑额叶区,由此可以得出:在文字靶刺激下,被试大脑的额叶区会出现明显的P2和P3成分,说明在应急场景下,被试大脑额叶区会因为受到外界负面刺激物和强烈视觉刺激效果的影响,大脑会调动更多注意力资源,使被试的注意力增强,同时大脑会处于高度紧张和兴奋状态。同理,在图片的靶刺激下,被试大脑的顶叶区会出现明显的P2和P3成分,说明在应急场景下,被试大脑顶叶区的注意力会受到外界负面且复杂的视觉刺激物干扰而处于高度集中状态,并且注意力也会增强。为了证明数据的有效性,研究对所

表1 ERP成分波峰数据值

Table 1 ERP component peak data value

$\mu\text{V}$

| 被试 | 波幅平均值  |       |        |       |
|----|--------|-------|--------|-------|
|    | 文字非靶刺激 | 文字靶刺激 | 图片非靶刺激 | 图片靶刺激 |
| 1  | 2.1    | 2.9   | 3.3    | 4.1   |
| 2  | 1.2    | 3.1   | 5.1    | 5.6   |
| 3  | 0.9    | 2.5   | 4.6    | 5.4   |
| 4  | 2.6    | 2.7   | 4.9    | 3.8   |
| 5  | 2.8    | 3.9   | 4.1    | 5.1   |
| 6  | 3.1    | 2.5   | 2.9    | 6.1   |
| 7  | 1.8    | 1.9   | 3.7    | 5.8   |
| 8  | 1.6    | 1.6   | 3.6    | 3.8   |
| 9  | 2.4    | 2.4   | 3.8    | 4.6   |
| 10 | 1.5    | 2.8   | 4.3    | 4.8   |
| 11 | 2.1    | 2.6   | 2.2    | 5.1   |
| 12 | 0.9    | 1.8   | 2.6    | 5.3   |
| 13 | 0.8    | 2.7   | 3.4    | 4.7   |
| 14 | 2.4    | 3.4   | 4.6    | 6     |
| 15 | 1.3    | 1.6   | 2.5    | 5.1   |
| 16 | 2.1    | 2.8   | 1.9    | 4.6   |
| 17 | 1.6    | 1.9   | 3.7    | 3.9   |
| 18 | 1.1    | 1.6   | 1.5    | 3.7   |

得到的ERP成分波幅数据进行组内样本T检验,结果表明:文字刺激素材的P值分别为0.000 3与0.000 2;图片刺激素材的P值分别为0.001与0.000 5。4组独立样本T检验值远小于临界值 $p=0.01$ ,故4组数据有显著的差异性。

#### 2) 脑电地形图分析

被试在文字与图片的靶刺激下,在-200~200 ms中整个大脑脑区处于未激活状态,此时被试大脑中ERP成分处于潜伏期;在0~200 ms中所有被试的大脑在文字靶刺激下依然处于未激活状态,但图片靶刺激下有部分区域被微量激活;在200~300 ms可以发现大脑的顶叶区和枕叶区被大量激活,尤其是在图片靶刺激下额叶区的激活程度更明显;在300~400 ms被试大脑额叶区和枕叶区被大量激活,且图片靶刺激下激活效果更显著,而在400~1 000 ms时大脑顶叶区和枕叶区会慢慢恢复平静,表明此时外界刺激对被试的作用在逐渐减弱,被试大脑信号逐渐恢复正常状态,具体如图4~5所示。

基于时域特征分析得出:应急场景即靶刺激的情形下,被试大脑在200~300 ms内,额叶区、顶叶区和枕叶区出现显著的P2成分,并且成分峰值的波幅高,说明大



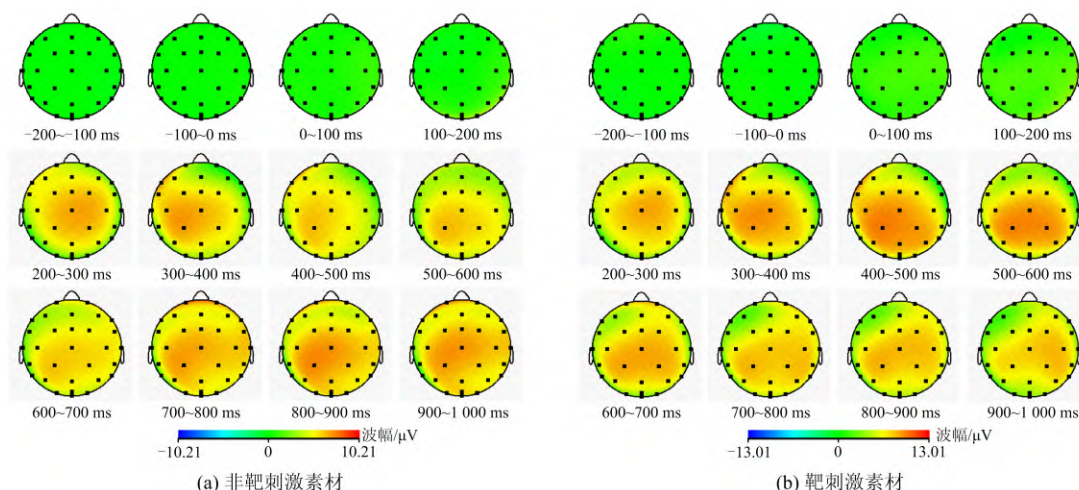


图 4 文字素材非靶刺激和靶刺激下的平均脑电地形图

Fig.4 The mean electroencephalogram under the non-target and target stimuli of text materials

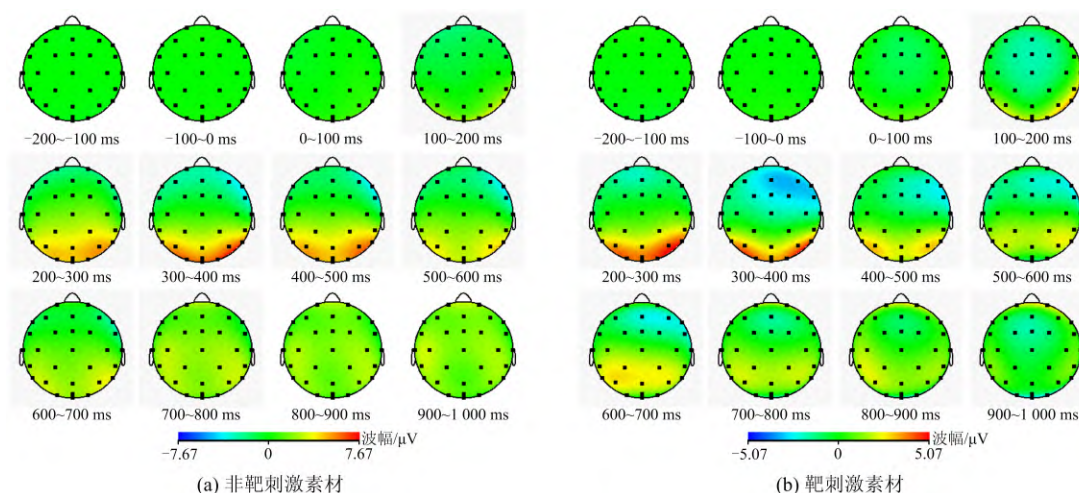


图 5 图片素材非靶刺激和靶刺激下的平均脑电地形图

Fig.5 The mean electroencephalogram under the non-target and target stimuli of picture materials

脑在额叶区进行记忆加工和工作记忆任务;在 300 ~ 400 ms 内,大脑额叶区和枕叶区会出现显著的 P3 成分,并且成分峰值的波幅高,说明此时大脑的额叶区和枕叶区处于注意力高度集中的状态。这与大脑额叶区、顶叶区和枕叶区控制躯体运动和高级思维中枢神经以及视觉神经有关,并且与 ERP 成分中 P2 和 P3 成分与人的视觉、听觉和注意力有关的理论相符合。

### 2.2.2 基于频域特征分析下脑电数据的脑电波节律分析

傅立叶变换是 1 种将脑电信号基于时间转变为基于频率方法的数学方法,能将不同波段的脑电波输出为波的面积值。因此,可以用各个节律波的面积大小来衡量被试在观看不同刺激素材下的脑电波节律变化。在脑电波节律中,  $\alpha$  节律在人睁眼、感觉刺激、精神活动时

有变化,而  $\beta$  节律通常在人精神紧张或情绪激动、亢奋时出现变化<sup>[15]</sup>。研究比较被试在文字与图片的不同刺激下  $\alpha$  和  $\beta$  节律的面积值大小与变化情况。18 名被试在文字与图片的非靶刺激和靶刺激下的脑电波  $\alpha$  和  $\beta$  节律面积值见表 2。

表 2 非靶刺激和靶刺激下脑电波  $\alpha$  和  $\beta$  节律面积值比较  
Table 2 Brain waves under non target stimulation and target stimulation  $\alpha$  and  $\beta$  rhythm area comparison

|             |     | 文字非<br>靶刺激 | 文字靶<br>刺激 | 图片非<br>靶刺激 | 图片靶<br>刺激 |
|-------------|-----|------------|-----------|------------|-----------|
| $\alpha$ 节律 | 平均值 | 65.17      | 93.80     | 46.44      | 139.30    |
|             | 总值  | 456.19     | 656.70    | 325.14     | 975.00    |
| $\beta$ 节律  | 平均值 | 92.81      | 162.40    | 62.51      | 215.63    |
|             | 总值  | 649.73     | 1 136.90  | 437.64     | 1 509.33  |

通过表2可看出,被试 $\beta$ 节律波幅面积平均值总是大于 $\alpha$ 节律,由此可以得出刺激素材诱发大脑情绪紧张的效果明显,进一步说明在应急场景下被试大脑会受到外界文字和图片等刺激的影响处于高度紧张和兴奋状态。

被试在图片靶刺激下的 $\alpha$ 和 $\beta$ 节律波幅面积平均值大于文字靶刺激下,但是在图片非靶刺激下 $\alpha$ 和 $\beta$ 节律波幅面积平均值小于文字非靶刺激下,由此可以看出,在靶刺激下,图片的效果比文字更加明显,使得被试大脑脑电信号的频率特征更显著,在非靶刺激下,文字比图片效果明显,说明被试在正常工作环境中,大脑受到外界文字的影响效果强于图片。

利用SPSS软件对被试观看文字和图片实验素材中,有无靶刺激的2组数据进行样本T检验,结果表明:文字刺激素材的 $P$ 值分别为0.0007与0.0004;图片刺激素材的 $P$ 值分别为0.001与0.0005,4组数据值远小于临界值 $p=0.01$ ,故这4组数据有显著的差异性。这也进一步说明,被试在文字与图片素材中,有无靶刺激条件下的脑电波节律差异明显。

综上所述,基于频域特征分析得出:在应急场景下,矿工大脑会出现明显的 $\alpha$ 和 $\beta$ 节律,并且随着刺激的出现, $\alpha$ 节律的面积值不断下降,而 $\beta$ 节律的面积值会大幅度上升,这与 $\beta$ 节律在人情绪紧张或者激动时出现的理论相符合<sup>[16]</sup>。

### 2.3 讨论

1) 通过对矿工的脑电实验数据分析得出,文字与图片的宣传内容会让矿工产生ERP成分: N1、P2与P3,这与矿工注意力及大脑觉醒程度有关。

在实验靶刺激素材的作用下,脑电ERP成分的波幅明显高于非靶刺激素材,这说明图片中的靶刺激内容能使矿工大脑快速激活且注意力迅速集中,从而会更好应对可能发生的突发事件。所以在煤矿生产工作环境中,文字与图片的标语宣传内容会影响矿工的大脑活动,而在宣传素材中加入适当的负面警示标语或图片可以很好地使矿工保持对危险的警惕而提高应急能力。宣传素材尽量多选取图片,因为图片中的负面内容更能使被试产生警惕的心理。

2) 矿工在实验素材靶刺激下, $\alpha$ 和 $\beta$ 节律的波幅面积值会发生变化。

$\alpha$ 和 $\beta$ 节律与人的情绪相关,当人处于平静时, $\alpha$ 节律的波幅面积值要大于 $\beta$ 节律,而当人情绪紧张时则相反。当矿工观测到实验素材中的靶刺激时, $\alpha$ 节律的波幅面积不断下降,而 $\beta$ 节律的面积不断上升,说明此时矿工受到实验素材的刺激影响,大脑会处于情绪紧张与亢奋状态。这也说明,实验素材中的靶刺激会使矿工

大脑处于紧张状态,从而提高其对突发事件的警惕性。

因此,在日常的煤矿生产过程中,可以通过在文字与图片的宣传标语中加入负面警示内容来提高矿工的警惕性,也可以在矿工的日常培训中加入含有负面警示的文字与图片来提高矿工的警惕性同时增强其应急能力水平,其中文字的非负面内容更能引起矿工的遐想,从而提高安全意识。

### 3 结论

1) 构建应急场景下矿工脑电实验系统,以文字与图片作为刺激素材,对18名矿工进行事件相关电位(ERP)数据特征的提取与分析,结果显示不同素材刺激下矿工注意力水平有显著差异,这也说明利用脑电实验可以对矿工应急能力水平进行评估。

2) 对矿工在文字与图片刺激素材下的ERP成分进行分析,结果表明矿工在素材展示的200~300 ms会出现显著的ERP成分P2,300~400 ms会出现显著的ERP成分P3,图片靶刺激下的波幅最大,文字非靶刺激下的波幅最小。基于脑电实验频域特征分析,矿工在实验刺激素材下, $\alpha$ 节律波幅面积值呈现下降趋势, $\beta$ 节律波幅面积值呈现上升趋势,且靶刺激素材变化趋势更加明显,表明矿工大脑由觉醒进入紧张状态,从而产生高的警惕性。此结论可为矿工应急能力的提升方面提供依据,煤矿安全管理者应该通过宣传标语的内容来加强矿工对危险的警惕性,从而保证煤矿生产安全。

3) 本文仅对矿工脑电一部分数据进行分析,应急反应能力受个体、组织、工作环境等多方面的影响,其认知加工过程及规律复杂多变,后续可考虑更加详细的脑电数据分析等技术对此进一步研究。

### 参考文献

- [1] 田水承,张利华,王莉.煤矿瓦斯爆炸3类危险源系统的SD[J].西安科技大学学报,2011,31(6):689-692.  
TIAN Shuicheng, ZHANG Lihua, WANG Li. Research on three classes of hazards system of gas explosion based on SD [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(6): 689-692.
- [2] 张江石,傅贵,陈娜,等.矿工应急处置能力评估方法研究[J].煤炭学报,2012,37(2):290-294.  
ZHANG Jiangshi, FU Gui, CHEN Na, et al. Study on the evaluation method of the emergency disposal ability of miners [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 290-294.
- [3] 赵鹏飞,聂百胜,贺阿红.煤矿企业员工心理应急能力评价方法研究[J].矿业安全与环保,2015,42(2):121-124.  
ZHAO Pengfei, NIE Baisheng, HE Ahong. Study on evaluation method of psychological emergency ability of employees in coal [J]. Mine Enterprise Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(2): 121-124.

- [4] HAMMAD K S ,ARBON P.Emergency nurses and disaster response: An exploration of South Australian emergency nurses' knowledge and perceptions of their roles in disaster[J].Nursing Journal ,2011 ,2 ( 14) : 87-94.
- [5] 李颖洁,邱意弘,朱贻盛.脑电信号分析方法及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [6] 郭孜政,潘毅润,吴志敏,等.疲劳对高铁司机持续性注意影响机制的 ERP 试验研究[J].中国安全科学学报,2015 ,25( 8) : 81-86. GUO Zizheng ,PAN Yirun ,WU Zhimin ,et al. ERP-based study on influencing mechanism of fatigue on high-speed railway drivers' sustained attention[J].China Safety Science Journal ,2015 ,25( 8) : 81-86.
- [7] 牛亚峰,薛澄岐,彭宁玥,等.基于 ERP 技术的数字界面布局认知与评估[J].东南大学学报( 自然科学版),2016 ,46( 3) : 470-475. NIU Yafeng ,XUE Chengqi ,PENG Ningyue ,et al. Cognition and evaluation of digital interface layouts based on event-related potential technique[J].Journal of Southeast University( Natural Science Edition) ,2016 ,46( 3) : 470-475.
- [8] 李乃文,张丽,牛莉霞.不同作业阶段矿工安全注意力的事件相关电位研究[J].中国安全生产科学技术,2017 ,13( 8) : 96-101. LI Naiwen ,ZHANG Li ,NIU Lixia. Study on event-related potentials for safety attention of miners in different operation stages [J].Journal of Safety Science and Technology ,2017 ,13( 8) : 96-101.
- [9] 王金娥,任国防.维持注意与选择注意具有不同的脑机制:来自事件相关电位的证据[J].中国组织工程研究,2016 ,22( 33) : 4993-4997. WANG Jine ,REN Guofang. Maintenance attention and choice attention have different brain mechanism: the evidence from event-related potential [J].Chinese Organization Engineering Research ,2016 ,22 ( 33) : 4993-4997.
- [10] 李红霞,薛建文,杨妍.疲劳对矿工不安全行为影响的 ERP 实验研究[J].西安科技大学学报,2015 ,35( 3) : 376-380. LI Hongxia ,XUE Jianwen ,YANG Yan. ERP experiment research on impact of fatigue on unsafe behaviors of miners [J].Journal of Xi'an University of Science and Technology ,2015 ,35( 3) : 376-380.
- [11] CARRETIE' L ,MERCADO F ,TAPIA M ,et al. Emotion ,attention and the 'negativity bias' ,studied through event-related potentials [J].International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology ,2001 ,41( 1) : 75-85.
- [12] LIU B ,XIN R ,JIN R ,et al. Emotional facilitation effect in the picture-word interference task: An ERP study [J].Brain Cogn ,2010 ,72( 2) : 289-299.
- [13] SIEGFRIED H ,HERMANN P. Alkylation and redox behavior of a squaric amidine [J]. Angewandte Chemie International Edition ,1973 ,12( 2) : 149-150.
- [14] 郭伏,丁一,张雪峰,等.事件相关电位 N1 和 N2 用于智能手机用户体验评价的研究[J].信息系统学报,2016( 1) : 12-26. GUO Fu ,DING Yi ,ZHANG Xuefeng ,et al. Study on the application of event-related potentials N1 and N2 in the evaluation of smart-phone user experience [J].China Journal of Information Systems ,2016( 1) : 12-26.
- [15] 杨仁桓,宋爱国,徐宝国.基于谐波小波包变换的脑电波基本节律分析[J].东南大学学报( 自然科学版),2008 ,38( 6) : 996-999. YANG Renhuan ,SONG Aiguo ,XU Baoguo. Analysis of EEG basic rhythms based on discrete harmonic wavelet packet transform [J]. Journal of Southeast University( Natural Science Edition) ,2008 ,38 ( 6) : 996-999.
- [16] 彭金歌,郭滨,沙文青,等.基于 EEG 的音乐舒缓紧张情绪的研究[J].长春理工大学学报( 自然科学版),2019 ,42( 1) : 106-112. PENG Jinge ,GUO Bin ,SHA Wenqing ,et al. Research on EEG-Based music relieving occupational stress [J].Journal of Changchun University of Science and Technology( Natural Science Edition) ,2019 ,42( 1) : 106-112.

( 责任编辑:靳晓颖)