

# 基于立体定向脑电图记录恐惧情绪的神经网络研究

王静 田小霖 王雄飞 王梦阳 栾国明

**【摘要】** 目的 探究立体定向电极进行皮质功能电刺激诱发恐惧情绪反应的神经网络机制。方法与结果 选择 2021 年 1 月至 2022 年 6 月经首都医科大学三博脑科医院明确诊断并行立体定向电极植入术的耐药性癫痫患者共 20 例,其中 7 例(35%)共计 75 个获得重建的电极触点[9.66%(75/776)]诱发出恐惧情绪反应,主要分布于颞叶[45.33%(34/75)]、岛叶[32%(24/75)]和扣带回[13.33%(10/75)];根据“种子和发现”计算方法,诱发恐惧情绪反应电极触点在 9 个通用脑网络(听觉网络、左侧执行控制网络、右侧执行控制网络、感觉运动网络、视空间网络、背侧默认模式网络、高级视觉网络、后侧突显网络和初级视觉网络)出现的概率以背侧默认模式网络最高,占 84%(63/75);检索 Neurosynth 数据库获得诱发恐惧情绪反应电极触点的全脑功能连接值,计算脑网络内功能连接值与脑网络外功能连接值的差异,发现诱发恐惧情绪反应电极触点与背侧默认模式网络匹配度最高,其次为后侧突显网络。结论 基于立体定向脑电图记录,皮质功能电刺激诱发出的恐惧情绪反应主要与背侧默认模式网络相关;海马、岛叶和扣带回是恐惧情绪反应的重要网络节点,提示电刺激诱发的恐惧情绪反应与后天条件习得恐惧之间存在共享神经回路。

**【关键词】** 恐惧; 立体定位技术; 脑电描记术; 神经网络

## Neural network of fear emotion based on stereo-electroencephalography recording

WANG Jing<sup>1</sup>, TIAN Xiao-lin<sup>2</sup>, WANG Xiong-fei<sup>2</sup>, WANG Meng-yang<sup>1</sup>, LUAN Guo-ming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Neurology, <sup>2</sup>Department of Neurosurgery, Center of Epilepsy, Sanbo Brain Hospital, Capital Medical University, Beijing 100093, China

Corresponding author: LUAN Guo-ming (Email: luangm3@163.com)

**【Abstract】 Objective** To investigate the neural network mechanism of fear induced by cortical functional electrical stimulation with stereotactic electrodes. **Methods and Results** A total of 20 patients with intractable epilepsy who were diagnosed and underwent stereotactic electrode implantation in Sanbo Brain Hospital of Capital Medical University from January 2021 to June 2022 were selected. Among them, 7 patients (35%) received 75 reconstructed electrode contacts [9.66% (75/776)] to induce fear emotional response. They were mainly distributed in temporal lobe [45.33% (34/75)], insula lobe [32% (24/75)] and cingulate gyrus [13.33% (10/75)]. According to the "seed and discovery" calculation method, the occurrence probability of evoked fear response electrode contacts in 9 general brain networks (auditory, left executive control, right executive control, sensorimotor, visuospatial, dorsal default mode, advanced vision, posterior salience and primary vision) was the highest in the dorsal default mode network, accounting for 84% (63/75). The whole brain functional connection values of the fear-inducing electrode contacts were retrieved from the neurosynth database, and the differences between the in-brain and out-brain functional connection values were calculated. It was found that the matching degree between the fear-inducing electrode contacts and the dorsal default mode network was the highest, followed by the posterior prominence network. **Conclusions** Based on stereo-electroencephalography (EEG), the fear response induced by cortical functional electrical stimulation was mainly related to the dorsal default mode network. The hippocampus, insula and cingulate gyrus are important network nodes of fear response. It is suggested

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2023.03.007

基金项目:北京市教育委员会科学研究计划项目(项目编号:KM202210025003);首都医科大学三博脑科医院自主立项课题(项目编号:2021ZZLX02)

作者单位:100093 北京,首都医科大学三博脑科医院癫痫中心神经内科(王静、王梦阳),癫痫中心神经外科(田小霖、王雄飞、栾国明)

通讯作者:栾国明,Email:luangm3@163.com

that there is a shared neural circuit between the fear response induced by electrical stimulation and the fear experience acquired through conditioning.

**【Key words】** Fear; Stereotaxic techniques; Electroencephalography; Nerve net

This study was supported by Scientific Research Project of Beijing Municipal Education Commission (No. KM202210025003), and Independent Project of Sanbo Brain Hospital of Capital Medical University (No. 2021ZZLX02).

**Conflicts of interest:** none declared

恐惧是指人类在面临某种危险情境、企图摆脱而又无能为力时产生的一种强烈的、担惊受怕的压抑情绪体验,可帮助生物规避危险并采取有效防御措施。恐惧包括先天恐惧和后天条件习得恐惧,即通过与厌恶性事件相关联而获得恐惧。巴甫洛夫恐惧条件反射模型研究显示,大脑存在一个分布式脑网络参与学习和表达恐惧情绪反应,包括杏仁核、内侧前额皮质和海马体<sup>[1]</sup>,但并不限于这些区域。已有研究发现,采用颅内电极对颞叶癫痫患者进行皮质功能电刺激诱发恐惧情绪反应时,以杏仁核和海马出现反应的比例最高<sup>[2]</sup>,但目前针对与恐惧情绪反应相关神经回路或脑网络的临床研究相对较少。基于此,本研究以耐药性癫痫患者为研究对象,通过植入立体定向电极进行皮质功能电刺激以诱发恐惧情绪反应,探讨电刺激诱发的恐惧情绪反应与已知的后天条件习得恐惧之间是否存在共同的神经回路,揭示恐惧情绪反应的神经机制,为临床治疗恐惧情绪相关疾病提供干预靶点。

## 对象与方法

### 一、观察对象

1. 纳入标准 (1) 耐药性癫痫诊断根据《国际抗癫痫联盟(ILAE)癫痫治疗策略工作组专家共识》<sup>[3]</sup>提出的“耐药性癫痫”定义。(2) 经立体定向脑电图(SEEG)明确致痫灶、手术切除范围和皮质功能定位;且立体定向电极植入范围同时包含颞叶内侧结构(杏仁核、海马头部、海马体部、海马尾部或海马旁回)中一个或以上区域,以及岛叶、扣带回、内侧前额皮质或眶额回。(3) 患者能够准确表达主观情绪反应,并配合完成皮质功能电刺激。(4) 患者对研究内容知情并签署知情同意书。

2. 排除标准 (1) 临床资料不完整,未记录到发作期视频脑电图。(2) 患者恐惧情绪为惯常癫痫发作,或继发于癫痫发作的心理反应。(3) 颅内电极植入年龄 < 10 岁。

3. 一般资料 根据上述纳入与排除标准,选择 2021 年 1 月至 2022 年 6 月于首都医科大学三博脑科医院癫痫中心行立体定向电极植入术的耐药性癫痫患者共计 20 例,男性 12 例,女性 8 例;年龄为 11~46 岁,平均(23.05 ± 8.52)岁;病程 3 个月至 40 年,中位病程 9.50(4.00, 15.00)年。术前头皮视频脑电图均记录到临床发作,发作期症状学特征分别为先兆 10 例,包括自主神经先兆 5 例、精神先兆 2 例、听觉先兆 2 例、头部非特异性先兆 1 例;自主神经症状共 12 例,包括心率增快(> 100 次/min)11 例、喉部不适 1 例;单侧强直或不伴阵挛 12 例;动作中止和(或)全身活动减少 5 例;自动运动性发作 9 例,包括口咽部 3 例、手部 2 例、口部+手部 4 例;复杂运动性发作 9 例;偏转发作 8 例;不对称性强直性肢体姿势(ATLP)6 例;局灶性进展为双侧强直-阵挛发作(FBTCS)9 例。术前 MRI 检查,12 例呈异常影像,分别为软化灶 2 例、左侧海马硬化 3 例、右侧海马硬化 2 例、左侧额叶局灶性皮质发育不良(FCD)2 例、皮质下点状高信号 1 例、枕大池扩大 1 例、左侧颞前叶异常高信号 1 例。

### 二、研究方法

1. 立体定向电极植入术 (1) 仪器与设备:采用 128 导 Nicolet 视频脑电图监测设备(美国 Natus 公司)采集立体定向脑电图。颅内电极为立体定向电极(北京华科恒生医疗科技有限公司),根据电极触点数目分为 4 种类型,即 8 触点、10 触点、12 触点和 16 触点电极,每个触点直径 0.80 mm、间隔 3.50 mm。(2) 数据选择与分析:脑电图采样频率 512 Hz,高频滤波 ≥ 100 Hz,低频滤波 off ~ 1.60 Hz,灵敏度 100~1000 μV/cm;通过 Nicvue 5.30 分析系统、双极导联联系方法对数据进行分析。(3) 电极植入脑区:采用神经外科机器人立体定向辅助系统(ROSA,法国 Medtech 公司)将颅内电极植入术前评估设定的癫痫网络相关脑区,包括颞叶(颞极、颞叶新皮质、颞叶内侧结构),额叶(额叶外侧皮质、眶额回皮质、额

叶内侧皮质),顶叶(顶叶外侧皮质和顶叶内侧皮质),岛叶(岛前小叶和岛后小叶),扣带回(前扣带回和后扣带回),枕叶(枕叶外侧面和枕叶内侧面)。植入后即行头部 CT 检查,并将其结果与术前头部 MRI 图像进行融合,判断电极各触点所在解剖位置。

2. 恐惧情绪诱发试验 (1)皮质功能电刺激时机:立体定向脑电图记录惯常癫痫发作  $\geq 3$  次且恢复抗癫痫发作药物(ASM)常规剂量 0~1 d 为皮质功能电刺激时机。(2)设备与参数:采用外接 Natus 刺激器(美国 Natus 公司)行电刺激,高频刺激 50 Hz,双相方波,脉宽 300~500 ms,持续时间 3~5 s,电流强度 1~6 mA(起始强度 1 mA,每次递增 0.50 mA,最高强度 6 mA);低频刺激 1 Hz,双相方波,脉宽 1 s,持续时间 10~30 s,电流强度 1~6 mA(同高频刺激)。(3)评价标准:皮质功能电刺激成功诱发恐惧情绪反应界定为<sup>[2]</sup>,①恐惧情绪通过面部(惊恐面容)和(或)躯体行为(躲避、逃离动作、抱人)表达,伴或不伴大叫。②仅主观口头表达“害怕、恐惧”情绪。③=①+②。符合下列条件之一即可结束刺激,刺激强度达到 6 mA;诱发出情绪反应;诱发癫痫发作先兆或症状;出现后放电。

3. 观察指标 采用 Matlab 软件(<https://www.mathworks.com/>)对皮质功能电刺激诱发的恐惧情绪反应电极触点数据进行分析。(1)诱发恐惧情绪反应电极触点的解剖部位:根据电极植入后头部 CT 和术前头部 MRI 图像进行电极重建,采用半自动颅内电极定位工具包获得电极触点在个体空间和标准空间坐标,重建大脑表面电极轨迹,便于更精确、可视化电极触点的确切位置。然后,基于体积和表面的组合配准计算方法,将术前头部 MRI 图像配准到标准脑模板[加拿大蒙特利尔神经病学研究所(MNI)模板<sup>[4]</sup>],最终将电极坐标生成 MNI 标准空间的电极坐标。(2)诱发恐惧情绪反应的电极触点出现在不同脑网络的概率:采用“种子和发现”方法<sup>[5]</sup>计算皮质功能电刺激诱发恐惧情绪反应的电极触点位于不同脑网络的概率,以评估恐惧情绪是否存在于特定脑网络,概率计算过程为,首先,常规选择听觉网络、左侧执行控制网络、右侧执行控制网络、感觉运动网络、视空间网络、背侧默认模式网络、高级视觉网络、后侧突显网络和初级视觉网络共 9 个脑网络;其次,将皮质功能电刺激诱发的恐惧情绪反应电极触点的解剖位置作为计算方法中的“种子点”,创建每个“发现”地图,并在每个“种子点”周围

创建半径 4 mm 的球形兴趣区(ROI),利用 Neurosynth 数据库(<https://www.neurosynth.org>)获得每个兴趣的平均信号时间过程(时间序列信号)与上述脑网络时间序列信号之间的相关性(Z 值);最后,以  $Z > 0.250$  为确定与兴趣区相关联的脑网络<sup>[5]</sup>。(3)诱发恐惧情绪反应电极触点全脑连接值匹配度(fitness):利用 Neurosynth 数据库获得诱发恐惧情绪反应电极触点的全脑功能连接值(FC),计算其在上述脑网络功能连接值与其他网络功能连接值的差异,即电极触点与特定网络的匹配度=网络内功能连接值-网络外功能连接值。

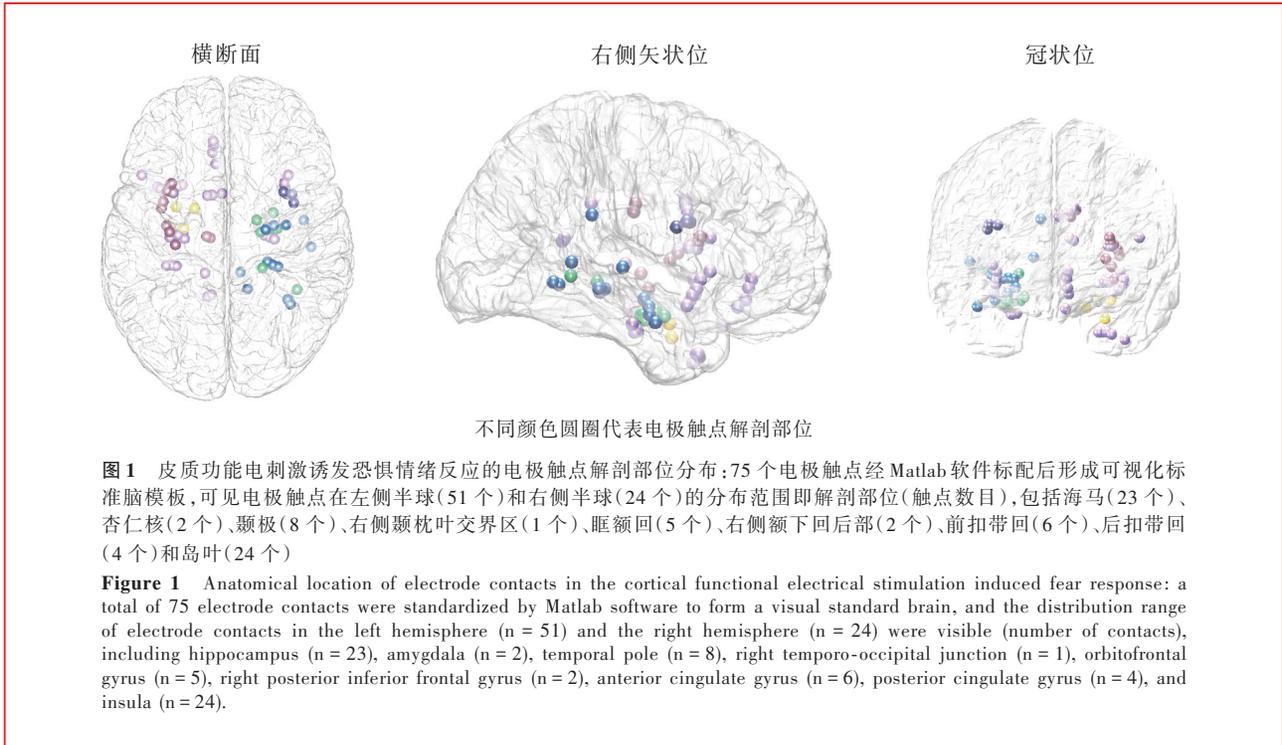
## 结 果

本组 20 例患者中 7 例经皮质功能电刺激成功诱发恐惧情绪反应,成功率 35%,均符合恐惧情绪反应标准<sup>②</sup>。男性 4 例,女性 3 例;年龄 16~33 岁,平均(24.00 $\pm$ 7.51)岁;病程 6~17 年,平均(11.57 $\pm$ 3.87)年。

对 7 例患者 776 个电极触点进行皮质功能电刺激,最终成功诱发出恐惧情绪反应的电极触点共计 75 个[9.66%(75/776)],左侧半球 51 个[68%(51/75)]、右侧半球 24 个[32%(24/75)]。75 个电极触点主要分布在颞叶、额叶、扣带回和岛叶,其中颞叶占 45.33%(34/75),包括颞叶内侧结构 33.33%(25/75,海马 23 个、杏仁核 2 个)、颞极 10.67%(8/75)、右侧颞枕叶交界区 1.33%(1/75);额叶 9.33%(7/75),包括眶额回 6.67%(5/75)和右侧额下回后部 2.67%(2/75);扣带回 13.33%(10/75,前扣带回 6 个、后扣带回 4 个);岛叶 32%(24/75,岛前小叶 19 个、岛后小叶 5 个)。通过高频 50 Hz、电流强度 1~6 mA 刺激诱发恐惧情绪反应者共 5 例计 71 个触点;通过低频 1 Hz、电流强度 1~4 mA 刺激诱发 2 例共 4 个触点,均位于右侧半球(杏仁核 1 个、额下回后部 2 个、前扣带回 1 个)。75 个电极触点经电极重建,于标准脑模板上形成精确的解剖位置可视图(图 1)。

对每个诱发恐惧情绪反应电极触点在不同脑网络的概率进行计算显示,位于背侧默认模式网络的电极触点最多占 84%(63/75),然后依次为后侧突显网络 8%(6/75)、视空间网络 5.33%(4/75)和初级视觉网络 2.67%(2/75,图 2)。

7 例患者诱发恐惧情绪反应的 75 个电极触点形成的兴趣区,在不同脑网络内的匹配度结果如图 3 所示,背侧默认模式网络红色区域最多,即该区域



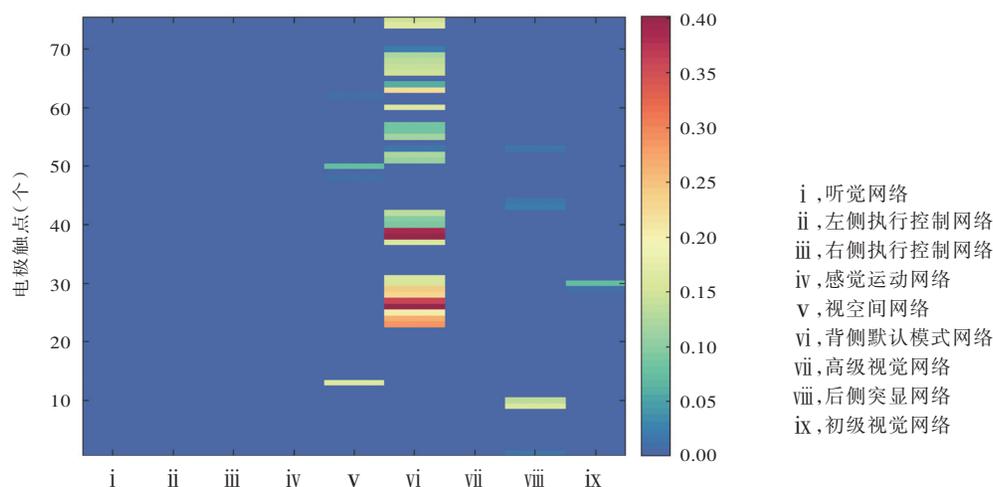
内电极触点功能连接值大于网络外功能连接值, 提示背侧默认模式网络的匹配度最高, 其次为后侧突显网络、听觉网络和感觉运动网络; 脑网络匹配度较低 (蓝色区域居多) 者为右侧执行控制网络和高级视觉网络。

### 讨 论

颅内电极皮质功能电刺激是实时因果映射<sup>[6]</sup>和探索大脑区域特异性<sup>[7]</sup>最精确的工具, 电刺激电流可扩散到刺激电极相邻脑区 (空间间距毫米级), 刺激产生的神经元电活动可传导至与刺激电极触点有功能连接或解剖连接的脑区。因此, 可通过研究诱发恐惧情绪反应电极触点在不同脑网络的匹配度, 探究电刺激诱发恐惧情绪反应的相关脑网络。然而, 皮质功能电刺激是对单个触点进行诱发, 由于刺激电流强度限制该刺激区域可能仅涉及恐惧相关脑网络的单一节点, 无法完全激活恐惧情绪产生的相关神经网络。所以, 本研究显示即使同时在恐惧情绪反应相关的解剖位置植入电极, 通过皮质功能电刺激能诱发恐惧情绪反应的电极触点仅占 9.66% (75/776), 提示通过立体定向电极刺激诱发恐惧情绪反应, 单个触点的诱发成功率受刺激电流强度和刺激范围的影响。如需提高电刺激诱发恐惧情绪反应的发生率, 则须在保证患者安全的前提下

逐步增强可用于人类皮质的电流强度和刺激范围。此外, 本研究通过皮质功能电刺激诱发恐惧情绪反应, 为单纯与情绪事件相关的主观感觉 (即情绪体验), 而非癫痫发作症状, 故可排除癫痫网络中产生症状的解剖节点对恐惧情绪反应神经网络分析的影响。

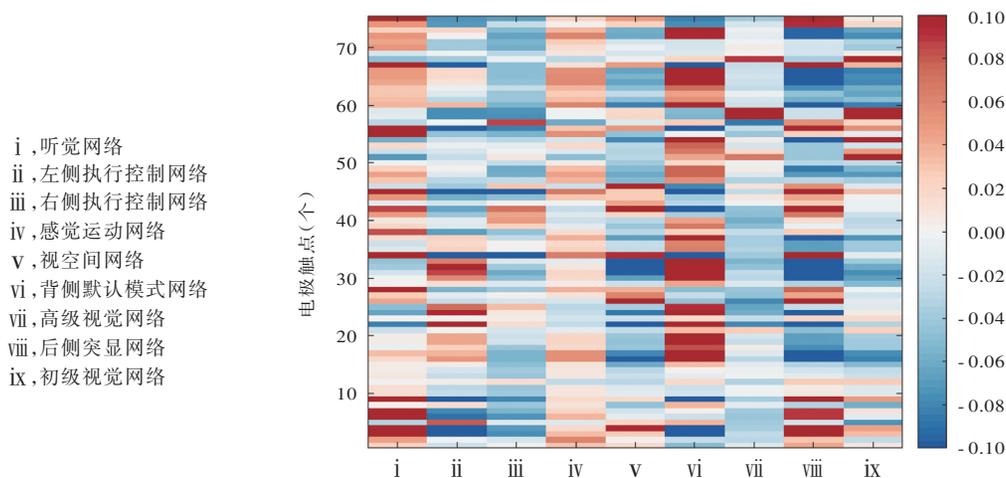
本研究计算每个诱发恐惧情绪反应电极触点出现在 9 个已知脑网络中的概率, 结果发现, 有 84% (63/75) 的触点位于背侧默认模式网络; 然后通过每个触点的全脑功能连接值, 计算每个触点在不同脑网络的功能连接值匹配度, 同样发现, 诱发恐惧情绪反应的兴趣区与背侧默认模式网络的功能连接值匹配度最高, 提示皮质功能电刺激诱发恐惧情绪反应的脑网络与已知的后天条件习得恐惧情绪体验共享通用的神经网络基础。该结果更贴近建构主义情绪理论<sup>[8]</sup>, 即不同的情绪反应 (如愉悦、悲伤、恐惧等) 本质上是一种大脑状态, 是由情绪领域内通用的核心系统如突显网络、默认模式网络、额顶控制网络等的相互作用所构建。默认模式网络是一种大脑便于应对环境变化的准备状态, 例如, 恐惧的学习过程与线索条件反射有关, 涉及杏仁核和内侧前额皮质; 焦虑的学习过程则与情境性条件反射有关, 包括海马形成和感觉运动区<sup>[9]</sup>。研究发现, 恐惧情绪反应时可见默认模式网络节点的活动<sup>[10]</sup>,



右侧条带颜色由蓝色到红色表示概率值差异,蓝色越深表示电极触点在该网络的概率越小,红色越深表示电极触点在该网络的概率越大

**图2** 诱发恐惧情绪反应的电极触点在9个脑网络的概率分别为:背侧默认模式网络84%(63/75)、后侧突显网络8%(6/75)、视空间网络5.33%(4/75)、初级视觉网络2.67%(2/75)

**Figure 2** The occurrence probability of electrode contacts to induce fear response in 9 brain networks was 84% (63/75) in the dorsal default mode network, 8% (6/75) in the posterior highlighting network, 5.33% (4/75) in the visual-spatial network, and 2.67% (2/75) in the primary visual network.



右侧条带表示各电极触点功能连接值的匹配度,红色表示正匹配,即该电极触点在对应脑网络内功能连接值大于脑网络外功能连接值,颜色越深表示位于对应脑网络的可能性越大;蓝色表示负匹配,即该电极触点在对应脑网络内功能连接值小于脑网络外功能连接值,颜色越深表示电极触点位于对应脑网络的可能性越小

**图3** 诱发恐惧情绪反应的电极触点在9个脑网络的匹配度较高者包括背侧默认模式网络、后侧突显网络、听觉网络和感觉运动网络;匹配度较低者为右侧执行控制网络和高级视觉网络

**Figure 3** The electrode contacts that induced fear emotional response were highly matched in 9 brain networks, including dorsal default mode network, posterior prominence network, auditory network and sensorimotor network. The lower matching degree is the right executive control network and the advanced visual network.

而且恐惧、悲伤和厌恶情绪均可见背侧突显网络节点的活动<sup>[11-12]</sup>。本研究7例患者诱发恐惧情绪反应的75个电极触点在不同网络的匹配度以背侧默认模式网络最为突出,其次为后侧突显网络,均属于已知的通用核心网络,与上述研究基本一致。

在皮质功能电刺激颞叶诱发的各种情绪反应

中,恐惧情绪反应占84.81%,其中80.59%是通过刺激杏仁核和海马所诱发<sup>[2]</sup>。本研究诱发恐惧情绪反应电极触点的解剖部位以颞叶最多,占45.33%(34/75),其中海马23个、杏仁核2个。研究表明,在恐惧加工过程中,海马-杏仁核通路主要参与情境性条件化恐惧反射和恐惧记忆<sup>[13-14]</sup>。而本研究诱发恐惧

情绪反应者较少的原因可能与杏仁核植入电极数目较少有关,仅 7 例患者在杏仁核植入电极(20 例均在海马植入电极),而杏仁核作为恐惧相关神经回路的枢纽,接受来自大脑皮质、丘脑中心以及海马的感觉信号传入,故杏仁核植入电极数目少可能在一定程度上影响刺激诱发恐惧情绪反应的发生率。此外,一项针对耐药性癫痫患者进行的皮质功能电刺激杏仁核的临床研究发现,刺激右侧杏仁核可诱发恐惧、悲伤等负性情绪反应,而刺激左侧杏仁核既可以产生愉悦情绪也可以诱发负性情绪反应<sup>[15]</sup>。由于本研究涉及杏仁核诱发恐惧情绪反应的电极触点较少,刺激双侧杏仁核诱发情绪反应是否存在差异有待扩大样本量进一步证实。

研究显示,内侧前额皮质主要参与调节恐惧情绪反应<sup>[1]</sup>。动物实验发现,大鼠前边缘亚区与人类背侧前扣带皮质同源,电刺激该脑区可增加恐惧体验的表达并阻止恐惧消退;其下边缘亚区与人类腹内侧前额皮质同源,电刺激该脑区可抑制恐惧情绪表达并促进其消退<sup>[16-17]</sup>。本研究通过皮质功能电刺激不仅在背侧前扣带回(3 个触点)和眶额回(5 个触点)诱发出主观“害怕”反应,还在前扣带回的运动区(3 个触点)也诱发出恐惧情绪反应,提示前扣带回和眶额回均为皮质功能电刺激诱发恐惧情绪反应的相关脑区;此外,还在后扣带回的 4 个触点诱发出主观“害怕”反应。虽然扣带回在恐惧情绪表达中的具体功能鲜有报道,但后扣带回和楔前叶属于默认模式网络的皮质簇<sup>[18]</sup>,结合本研究结果,再次突出背侧默认模式网络是电刺激诱发恐惧情绪反应的重要神经回路。

业已证实,岛前小叶和岛后小叶在条件恐惧任务的记忆巩固中发挥不同作用,岛前小叶主要参与调节暴露于创伤性事件后产生的恐惧和焦虑症状,而与情境性和语气性恐惧条件反射的恐惧记忆巩固无关<sup>[19-20]</sup>;而岛后小叶是语气性恐惧条件反射的记忆巩固回路重要组成<sup>[13-14,19]</sup>。虽然已知岛叶皮质与情绪和认知过程密切相关,但是关于人类岛叶皮质在恐惧情绪调节中的作用研究甚少。本研究结果显示,电刺激诱发恐惧情绪反应位于岛叶的电极触点占 32%(24/75),其中岛前小叶触点 19 个,主要位于第 2 岛短回背侧及相邻的额盖和第 3 岛短回中下部;岛后小叶触点 5 个,主要位于第 2 岛长回。虽然明确了岛叶亚区是恐惧情绪反应的脑网络节点,但其具体调节功能有待结合电生理学特征进一步

分析。

结合上述电极触点诱发出恐惧情绪反应的解剖位置发现,皮质功能电刺激诱发恐惧情绪反应的部位主要位于岛叶、海马和扣带回,因入组患者根据临床评估结果在杏仁核和内侧前额皮质植入的电极数目远少于岛叶、海马和扣带回数目,故研究结果主要受电极分布的影响。但本研究也发现,恐惧情绪反应的产生并非与特定神经核团有关,而是与通用核心网络内与恐惧情绪反应相关的节点被激活有关。由于本研究样本量较小,电极在重要神经核团的分布不均衡,仅从空间结构方面描述皮质功能电刺激诱发恐惧情绪的脑网络特点,今后将进一步结合电生理学特点,探究恐惧情绪反应相关各解剖部位之间的相互联系和功能连接,阐释恐惧情绪反应的神经网络机制,为今后临床治疗恐惧情绪相关疾病提供干预靶点。

利益冲突 无

#### 参 考 文 献

- [1] Marek R, Sun Y, Sah P. Neural circuits for a top-down control of fear and extinction[J]. *Psychopharmacology (Berl)*, 2019, 236: 313-320.
- [2] Meletti S, Tassi L, Mai R, Fini N, Tassinari CA, Russo GL. Emotions induced by intracerebral electrical stimulation of the temporal lobe[J]. *Epilepsia*, 2006, 47 Suppl 5:47-51.
- [3] Kwan P, Arzimanoglou A, Berg AT, Brodie MJ, Allen Hauser W, Mathern G, Moshé SL, Perucca E, Wiebe S, French J. Definition of drug resistant epilepsy: consensus proposal by the ad hoc Task Force of the ILAE Commission on Therapeutic Strategies[J]. *Epilepsia*, 2010, 51:1069-1077.
- [4] Postelnicu G, Zollei L, Fischl B. Combined volumetric and surface registration[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2009, 28:508-522.
- [5] Vincent JL, Kahn I, Snyder AZ, Raichle ME, Buckner RL. Evidence for a frontoparietal control system revealed by intrinsic functional connectivity[J]. *J Neurophysiol*, 2008, 100: 3328-3342.
- [6] Siddiqi SH, Kording KP, Parvizi J, Fox MD. Causal mapping of human brain function[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2022, 23:361-375.
- [7] Reid AT, Headley DB, Mill RD, Sanchez-Romero R, Uddin LQ, Marinazzo D, Lurie DJ, Valdés-Sosa PA, Hanson SJ, Biswal BB, Calhoun V, Poldrack RA, Cole MW. Advancing functional connectivity research from association to causation [J]. *Nat Neurosci*, 2019, 22:1751-1760.
- [8] Lebois LAM, Wilson-Mendenhall CD, Simmons WK, Barrett LF, Barsalou LW. Learning situated emotions[J]. *Neuropsychologia*, 2020, 145:106637.
- [9] Zidda F, Andoh J, Pohlack S, Winkelmann T, Dinu-Biringer R, Cavalli J, Ruttorf M, Nees F, Flor H. Default mode network connectivity of fear - and anxiety - related cue and context conditioning[J]. *Neuroimage*, 2018, 165:190-199.
- [10] Wager TD, Kang J, Johnson TD, Nichols TE, Satpute AB, Barrett LF. A Bayesian model of category - specific emotional brain responses[J]. *PLoS Comput Biol*, 2015, 11:e1004066.
- [11] Touroutoglou A, Lindquist KA, Dickerson BC, Barrett LF.

- Intrinsic connectivity in the human brain does not reveal networks for "basic" emotions [J]. Soc Cogn Affect Neurosci, 2015, 10:1257-1265.
- [12] Vytal K, Hamann S. Neuroimaging support for discrete neural correlates of basic emotions: a voxel-based meta-analysis [J]. J Cogn Neurosci, 2010, 22:2864-2885.
- [13] Kim WB, Cho JH. Encoding of contextual fear memory in hippocampal-amygdala circuit [J]. Nat Commun, 2020, 11:1382.
- [14] Terranova JI, Yokose J, Osanai H, Marks WD, Yamamoto J, Ogawa SK, Kitamura T. Hippocampal-amygdala memory circuits govern experience-dependent observational fear [J]. Neuron, 2022, 110:1416-1431.e13.
- [15] Lanteaume L, Khalfa S, Régis J, Marquis P, Chauvel P, Bartolomei F. Emotion induction after direct intracerebral stimulations of human amygdala [J]. Cereb Cortex, 2007, 17:1307-1313.
- [16] Russo AS, Parsons RG. Neural activity in afferent projections to the infralimbic cortex is associated with individual differences in the recall of fear extinction [J]. Sci Rep, 2022, 12:13703.
- [17] Qin C, Bian XL, Wu HY, Xian JY, Cai CY, Lin YH, Zhou Y, Kou XL, Chang L, Luo CX, Zhu DY. Dorsal hippocampus to infralimbic cortex circuit is essential for the recall of extinction memory [J]. Cereb Cortex, 2021, 31:1707-1718.
- [18] Wilson-Mendenhall CD, Barrett LF, Barsalou LW. Variety in emotional life: within-category typicality of emotional experiences is associated with neural activity in large-scale brain networks [J]. Soc Cogn Affect Neurosci, 2015, 10:62-71.
- [19] de Paiva JPQ, Bueno APA, Dos Santos Corrêa M, Oliveira MGM, Ferreira TL, Fornari RV. The posterior insular cortex is necessary for the consolidation of tone fear conditioning [J]. Neurobiol Learn Mem, 2021, 179:107402.
- [20] Park S, Cho J, Huh Y. Role of the anterior insular cortex in restraint-stress induced fear behaviors [J]. Sci Rep, 2022, 12:6504.

(收稿日期:2023-02-06)

(本文编辑:袁云)

## · 小词典 ·

## 中英文对照名词词汇(三)

- 抗癫痫发生 antiepileptogenesis(AEG)
- 抗癫痫发作药物 antiepileptic seizure medicine(ASM)
- 抗干燥综合征 A 型抗体  
A type Sjögren's syndrome antibody(SSA)
- 抗核抗体 anti-nuclear antibody(ANA)
- 抗溶血性链球菌 O anti-streptolysin O(ASO)
- 抗心磷脂抗体 anti-cardiolipin antibody(ACA)
- 抗中性粒细胞胞质抗体  
anti-neutrophil cytoplasmic antibody(ANCA)
- 拷贝数变异 copy number variation(CNV)
- 可提取性核抗原 extractable nuclear antigen(ENA)
- 扩散磁共振成像  
tensor-valued diffusion magnetic resonance imaging(dMRI)
- 扩散峰度成像 diffusion kurtosis imaging(DKI)
- 扩散张量成像 diffusion tensor imaging(DTI)
- 类风湿因子 rheumatoid factor(RF)
- 立体定向脑电图 stereo-electroencephalography(SEEG)
- 利物浦癫痫发作严重程度量表  
Liverpool Seizure Severity Scale(LSSS)
- 良性家族性新生儿癫痫  
benign familial neonatal epilepsy(BFNE)
- 良性家族性新生儿惊厥  
benign familial neonatal convulsion(BFNC)
- 良性家族性新生儿-婴儿癫痫  
benign familial neonatal-infantile epilepsy(BFNIE)
- 良性家族性婴儿癫痫  
benign familial infantile epilepsy(BFIE)
- 梅毒螺旋体 Treponema pallidum(TP)
- 美国食品与药品管理局  
Food and Drug Administration(FDA)
- 迷走神经刺激术 vagus nerve stimulation(VNS)
- 弥漫性星形细胞瘤 diffuse astrocytoma(DA)
- 弥漫中线胶质瘤 diffuse midline glioma(DMG)
- 米托蒽醌甲磺酸盐 mitoquinone mesylate(MitoQ)
- 面-臂肌张力障碍发作  
faciobrachial dystonic seizures(FBDS)
- 面肌痉挛 hemifacial spasm(HFS)
- 钠激活钾离子通道 sodium activated potassium(KNa)
- 耐药性癫痫 drug-resistant epilepsy(DRE)
- 脑深部电刺激术 deep brain stimulation(DBS)
- 脑源性神经营养因子  
brain-derived neurotrophic factor(BDNF)
- 脑卒中后癫痫 post-stroke epilepsy(PSE)
- 内侧颞叶癫痫 mesial temporal lobe epilepsy(mTLE)
- 内向整流钾离子通道  
inwardly-rectifying potassium channels(Kir)
- 皮质发育畸形 malformation of cortical development(MCD)
- 皮质功能电刺激 electrocortical stimulation(ECS)
- 平均峰度张量 mean kurtosis tensor(MKT)
- 平均扩散率 mean diffusivity(MD)
- 青少年肌阵挛癫痫 juvenile myoclonic epilepsy(JME)
- 丘脑底核 subthalamic nucleus(STN)
- 丘脑前核 anterior thalamic nucleus(ATN)
- 丘脑中央中核 centromedian nucleus of thalamus(CM)
- 曲线下面积 area under the curve(AUC)
- 全基因组测序 whole genome sequencing(WGS)
- 全面性强直-阵挛发作  
generalized tonic-clonic seizure(GTCS)
- 全外显子组测序 whole exome sequencing(WES)