

# 负面情绪的脑电特征及功能连接环路的研究进展

李 铮综述, 陈 欣, 树海峰审校

**【摘要】** 负面情绪是焦虑、紧张、愤怒、沮丧、悲伤和痛苦等情绪的统称, 与人们的身心健康密切相关。脑电图(EEG)是测量情绪活动的常用工具, 额叶 alpha 波的不对称性、不同的频谱功率及事件相关电位的差异性负面情绪在 EEG 上的特征性表现。负面情绪的脑电特征表明, 负面情绪的产生是不同脑区相互作用的结果。通过对脑区间的解剖连接及功能相关性研究, 表明了杏仁核、海马、前额叶皮层等大脑区域与负面情绪密切相关。文章主要对负面情绪的脑电特异性表现及相关神经功能环路的研究进展进行综述。

**【关键词】** 负面情绪; 脑电图; 脑电特征; 连接环路

**【中图分类号】** R741 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1672-271X(2023)03-0307-05

**【DOI】** 10.3969/j.issn.1672-271X.2023.03.017

## Research progress on EEG characteristics and functional connection circuits of negative emotions

LI Zheng reviewing, CHEN Xin, SHU Haifeng checking

(Department of Neurosurgery, General Hospital of the Western Theater Command of the PLA, Chengdu 610083, Sichuan, China)

**【Abstract】** Negative emotions are a collective term for emotions such as anxiety, tension, anger, frustration, sadness, and pain, which are closely related to people's physical and mental health. Electroencephalography (EEG) is a common tool for measuring emotional activity. The asymmetry of frontal lobe alpha waves, different spectral power and differences in event-related potentials are the characteristic manifestations of negative emotions on EEG. The EEG characteristics of negative emotions show that the generation of negative emotions is the result of the interaction of different brain regions. Through the study of the anatomical connection and functional correlation of brain regions, it is shown that brain regions such as amygdala, hippocampus and prefrontal cortex are closely related to negative emotions. This article mainly reviews the EEG-specific manifestations of negative emotions and the related neural functional loops.

**【Abstract】** negative emotions; electroencephalogram; EEG features; connection loops

## 0 引 言

情绪是人们身体和心理活动的状态结合体, 由主观与客观因素之间的相互作用构成, 与认知过程、生理变化和适应性行为相关<sup>[1]</sup>。情绪体验是与感觉、意识和行为相关的神经生物学活动的复杂

过程, 反映了事物、事件或事态的个人意义<sup>[2]</sup>。负面情绪是焦虑、紧张、愤怒、沮丧、悲伤和痛苦等情绪的统称, 会让身体产生不适感, 甚至威胁人们的身心健康。负面情绪调节不当会增加内化性障碍的风险, 包括焦虑障碍、抑郁症和惊恐障碍等<sup>[3]</sup>。研究负面情绪的产生机制和加工过程, 探索负面情绪在不同脑区的电生理活动及相关连接环路, 对于理解、识别和调节负面情绪具有重要意义。

## 1 负面情绪的脑电特征

随着科技的进步, 脑成像技术为观测不同情绪

**基金项目:** 军事医学创新工程专项(21WQ040); 西部战区总医院院管课题(2019LH01; 2021-XZYG-B22; 2021-XZYG-B21)

**作者单位:** 610083 成都, 西部战区总医院神经外科(李 铮、陈 欣、树海峰)

**通信作者:** 树海峰, E-mail: shuhaifeng@swjtu.edu.cn

状态下的脑电信号提供了帮助,也为揭示负面情绪背后的生理机制做出了贡献。目前用于测量大脑情绪活动的方法主要包括功能性磁共振成像、正电子发射断层扫描、近红外脑功能成像、脑磁图、脑电图(electroencephalogram, EEG)等。而 EEG 以其时间分辨率高、便携性强、价格低廉等优点成为一种广泛用于情绪分析的工具。而脑电记录时以刺激前脑电行基线校正,设定固定阈值进行伪影去除,以带通滤波器排除缓慢变化、高频效应及眼球运动伪影<sup>[4]</sup>,数据分析采用回归方法、小波变换、主成分分析、盲源分离等数学模型行降噪处理,从而让 EEG 更能反映真实的大脑神经活动。

**1.1 额叶脑电的不对称性特征** 从发现大脑前部激活的不对称性与情绪密切相关后,额叶脑电信号的不对称性被广泛用作衡量人类情绪状态的关键指标<sup>[5]</sup>。不对称的额叶皮层活动在脑电图上表现为左右脑区间 alpha 波功率(8~13 Hz)活动水平的差异性,研究表明 alpha 波功率大小与大脑活动水平呈负相关,较高的 alpha 波功率是皮层活动抑制的指标。额叶 alpha 不对称性(frontal alpha asymmetry, FAA)与许多临床心理疾病密切相关,如抑郁症、焦虑症、精神分裂症、双向情感障碍等<sup>[6]</sup>。情感效价模型和动机方向模型受到关于 FAA 是否反映情绪状态或与接近、退缩行为动机相关的持续争论。

支持情感效价模型的研究表明,左侧额叶的相对活动较多与积极情绪有关,而右侧额叶活动较强则与消极情绪相关,如右侧额叶相对活动较多的个体对负面情绪诱导电影的反应更强烈,而右侧额叶相对活跃的婴儿更可能因与母亲分离而哭泣,有临床医师观察到左侧额叶皮层受损的人更容易患上抑郁症,而右额叶皮层受损的个体容易出现躁狂症状<sup>[7]</sup>。然而 Papousek 等<sup>[8]</sup>使用与愤怒相关的刺激来评价情感效价模型时,他们发现愤怒与相对较大的左额叶活动有关,这与情感效价模型预测的结果不符,这表明相对额叶的不对称将人格特质反映为动机方向,而不仅仅是情绪状态。为验证上述猜想,Ekman 等<sup>[9]</sup>指示参与者在测量情绪相关脑电时,做出特定的面部情绪表情,结果表明与非真诚的喜悦微笑相比,真诚的喜悦微笑与更大的相对左额叶活动相关,这支持了动机方向模型。当然对于许多心理特征和状态,这两个模型在对观察结果的预测和解释上趋于一致,这是因为大多数积极情绪

与趋近动机相关,而大多数消极情绪与退缩动机相关。另外在负面情绪状态下,婴儿额叶脑电的共振频率在右半球显著增加表明额叶不对称是负面情绪加工的关键<sup>[10]</sup>。分析额叶脑电的不对称性,有助于了解对称大脑中,与负面情绪相关脑区的不对称分布情况。

**1.2 频谱功率分析的频段特征** 频谱功率分析在基于 EEG 的情绪识别中起主导作用, Li 等<sup>[11]</sup>研究发现不同情绪在各频段中存在显著网络差异,研究表明在消极情绪状态下, gamma 频段的网络连接最密集,这些连接主要位于额叶、颞叶、顶叶和枕叶区域<sup>[12]</sup>。偏头痛患者在 gamma 频段的负性情绪刺激期间,前额叶到颞叶皮质的有效连接显著增强<sup>[13]</sup>。恐惧认知障碍的精神病患者在观看负面情绪电影后,其右前额叶和颞叶以及双侧下顶叶中的 gamma 频段显著下降<sup>[14]</sup>。Zheng 等<sup>[15]</sup>研究了不同情绪状态在四个频段的网络特征,他们发现厌恶状态下的网络连接主要表现在 gamma 频段。而一项关于频率依赖性的情绪网络研究表明,负性刺激下的杏仁核、内侧前额叶皮层(medial prefrontal cortex, mPFC)、眶额叶皮层(orbitofrontal cortex, OFC)表现出更大的 gamma 频段活性<sup>[16]</sup>。以上研究表明,分析不同频段的网络连接特征对于揭示情绪的神经机制具有重要作用,也有助于对产生负面情绪的主责脑区进行时空定位。

**1.3 事件相关电位的特征** 负面情绪的即时处理是一个动态过程,而事件相关电位(event-related potential, ERP)在探索个体大脑对负面情绪调节的影响方面具有独特的优势<sup>[17]</sup>。ERP 多起源于突触后电位,当大量朝向近似的神经元在同一时刻出现突触后电位时,他们会相互叠加并快速穿过大脑、脑膜和头骨到达头皮,ERP 为神经递质所介导的神经活动提供了一个直接、实时、毫秒级的测量手段。先前的 ERP 研究使用冲突控制任务来探究冲突决策,发现了 P1、N2、P3 和晚期正电位(late positive potential, LPP)等 ERP 成分是与负面情绪处理相关的重要脑电图指标<sup>[18]</sup>。研究 ERP 各组分的代表含义及脑区分布情况,对于理解负面情绪的脑区来源及其调节过程有着重大意义。

P1 是纹状体外起源的早期视觉诱发电位, P1 增加反映了视觉系统针对刺激进行了高度的优化,其可作为分配给最高优先级刺激的注意力标志<sup>[19]</sup>。

威胁检测范式中 P1 视觉诱发电位的振幅在面对威胁刺激时更大<sup>[20]</sup>。而将 ERP 振幅差异与父母和儿童的社会情感能力相关联的研究发现,相对于中性表情,愤怒表情能诱发更大的 P1 振幅<sup>[21]</sup>。总之, P1 反映了早期的注意力处理,其振幅大小与感官的受激强度和情绪刺激的效价密切相关<sup>[22]</sup>。

N2 表现为前电极的负性, N2 与自上而下有意识地对刺激采取相应行动的过程有关,例如注意力抑制、新颖性检测或冲突监控。Ma 等<sup>[23]</sup>发现与中性情绪相比,在消极情绪启动的积极框架下选择某些选项会产生更大的 N2 振幅,表明了 N2 振幅与冲突呈正相关。而与中性视频相比,负性视频诱发的 N2 振幅更大,也支持了情绪效价影响反应冲突的观点<sup>[24]</sup>。另外在期末考试中,高焦虑的考生表现出对考试相关威胁性词语的注意偏向,脑电表现为 N2 振幅的变大<sup>[25]</sup>,且情绪相关的 N2 振幅变化主要发生在大脑右半球,是因为负面情绪信息主要通过占用右脑半球的注意力资源,从而干扰正在进行的认知任务<sup>[26]</sup>。

P3 是刺激后约 300 毫秒出现的积极成分,表明了个体对情绪刺激的注意力分配和评估, P3 的振幅与所呈现刺激的动机显着性和选择性注意力分配相关。与中性刺激相比,负性刺激常会引起较小的 P3 振幅,这可能与任务无关干扰信息的认知控制有关,反映了认知控制的增强<sup>[27]</sup>。P3 也通常被视为解决任务所必需的额顶叶网络活动的指标,可分为 P3a 和 P3b, P3a 具有相对较短的峰值潜伏期,主要分布在额中央区域,表示对刺激的注意处理,而 P3b 分布于中央顶叶区域,主要反映了刺激后的记忆存储<sup>[28]</sup>。P3 常被概念化为反应抑制和干扰的直接指标,与高阶认知资源相关。

LPP 是 ERP 中的一个正向成分,通常沿后中线分布,常在中央-顶叶部位达到最大值,并且可以在情绪刺激呈现的整个过程中持续存在<sup>[29]</sup>。LPP 的早期成分代表了注意力捕获、识别和刺激评估,从生存的角度来看,与威胁相关的负面图片在早期常引起了更大的 LPP 振幅<sup>[30]</sup>。增加的 LPP 振幅反映了在处理涉及退缩动机、负面情绪的刺激时会有更多的注意力资源分配<sup>[31]</sup>。也有研究表明 LPP 与情绪的调节相关。总之,探究 ERP 各组分在不同脑区的特征,可能为探索负面情绪的产生区域及相关连接环路提供新的发现。

## 2 负面情绪的脑功能连接环路

功能分化和功能整合是人脑功能的两大组织原则。大脑的不同区域支配着不同的功能,而一项简单任务的完成需要多个脑区的共同协调。情绪活动涉及记忆、反应、思维等高级认知功能,需要复杂的脑功能网络来处理,利用情绪脑电数据构建一个相位同步的脑功能网络是研究情绪活动的新方向。Wyczesany 等<sup>[32]</sup>通过分析正、负情绪的面部图片所诱发的脑电信号发现额区、注意网络(前额叶和顶叶内沟)、视觉枕区和颞区之间存在较强的功能联系,联系主要集中在右侧半球。Parvizi 等<sup>[33]</sup>发现,当重复的单脉冲刺激传递到下丘脑时,杏仁核、海马体、腹内侧前额叶和眶额叶皮质、前扣带回以及腹前和背后岛叶会引起显着电生理反应,这些诱发反应到达第一个峰值时间各不相同,其传播速度与静息状态 EEG 功能连通性和结构连通性相关。一项功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究发现,不愉快图片在杏仁核、海马、海马旁回、颞叶、视觉皮层、梭状回、前额叶皮层和前扣带回中表现出显着的血氧水平依赖性信号增强<sup>[34]</sup>。大量研究表明,杏仁核、海马体、前额叶皮层与负面情绪的产生、传播、调节关系最为密切。

杏仁核是反应负面情绪的关键结构,与许多情感障碍相关<sup>[35]</sup>。杏仁核受损后,人们对恐惧、愤怒等情绪的识别能力受损,证实了杏仁核是负面情绪认知、行为和处理的关键组成部分。杏仁核与多个脑区存在正向和反向的投影通路。杏仁核通常从前额叶皮层区域接收有关视、听觉的信号,也接收来自初级感官的信息,如体感刺激和嗅觉刺激,之后杏仁核将产生处理信号的相关脑电活动<sup>[36]</sup>。一项 fMRI 研究确定了一条人类功能性上丘-枕-杏仁核通路,这一通路的活动编码了对负面图像、声音的情绪反应强度<sup>[37]</sup>。另外在负面情绪状态下,岛叶与杏仁核的脑电活动存在显着的共同激活,而当杏仁核对可怕刺激做出反应时,杏仁核和视觉皮层之间的脑血流量变化呈显着正相关。不难看出,杏仁核与多个脑区存在着广泛的功能连接,他们相互联系,共同作用于负面情绪的产生过程。Rolls 等<sup>[38]</sup>认为杏仁核的关键输出通路是脑干系统,涉及自主反应和行为反应,杏仁核的另一个关键输出是基底

前脑,其中含有投射到新皮质的胆碱能神经元,这使杏仁核在皮质觉醒、注意力和记忆巩固方面发挥重要作用。早期的许多研究都只关注了杏仁核对负面情绪的感知力,却忽略了其与关键情绪回路的相互作用,通过分析杏仁核与皮层区域以及一些皮层下区域的连通性,有利于揭示杏仁核在负面情绪的产生、传播、调节过程中的作用机制。

早期研究表明,背侧海马体与学习、记忆密切相关,而腹侧海马体的神经元活动与负面情绪的产生以及情绪的调节相关<sup>[39]</sup>。临床研究发现选择性的颞叶海马体切除是焦虑症的有效治疗方式之一。海马体与边缘系统和前额叶的各组分相互连接,因此其非孤立地发挥作用,如海马体与杏仁核的广泛有效连接,可能有助于将负面情绪和奖励事件纳入情景记忆,并在检索记忆时产生自主和相关的反应。一项扩散纤维束成像研究也表明,眶额皮质与海马系统、前扣带回、后扣带回直接相连,提供用于记忆和目标导航的奖励信号。这些皮质区域的受损可能会破坏胆碱能对新皮质和海马体的影响,从而导致记忆障碍<sup>[40]</sup>。总之对海马及相关区域的研究有助于探究记忆、学习的相关机制,同时为成瘾、自闭症和焦虑症等疾病的治疗提供新的选择。

前额叶皮层对情绪处理和调节至关重要。OFC 主要负责接收来自视觉、听觉、体感、味觉和嗅觉皮质区域的输入信号,将信号输出到参与学习和行动的前扣带回。另外 OFC 也与短期记忆、计划和语言的前额叶皮层区域相连,参与情绪的陈述性报告<sup>[36]</sup>。mPFC 常与杏仁核协同工作,来调节恐惧和焦虑等负面情绪的表达,研究表明 mPFC 对杏仁核的活动施加自上而下的抑制性控制,从而来调节边缘和内分泌系统,限制其输出,从而抑制负面情绪<sup>[41]</sup>。另外 mPFC 也与岛叶、海马和丘脑等脑区有着广泛的功能与解剖联系。当然,不同脑区之间的连接方式及相关程度,仍需要进一步的研究,而产生负面情绪的主责脑区及传递通路也有待进一步验证。

### 3 结语与展望

EEG 以毫秒级的时间分辨率、无创性、低成本等优点,成为情绪脑电研究的常用工具之一。不同情绪在 EEG 上的特点存在显著差异,这对区分情绪类别有着重大意义。在负面条件刺激下,不同脑区

表现出了相同的脑电特征,间接证明了负面情绪与脑网络密切相关。利用 fMRI 的毫米级空间分辨率,研究与负面情绪相关脑区的空间分布,对探索负面情绪在不同脑区的功能连接环路有着重大意义。而拥有极高时间和空间分辨率的 SEEG,不仅能揭示各种情绪背后的特定频率和时间差异,也能明确不同脑电信号的真实来源,为负面情绪的脑电研究提供了新的研究方向。

### 【参考文献】

- [1] Xu Z, Zhu R, Shen C, *et al.* Selecting pure-emotion materials from the International Affective Picture System (IAPS) by Chinese university students: A study based on intensity-ratings only[J]. *Heliyon*, 2017, 3(8): e00389.
- [2] Long Z, Liu G, Xiao Z, *et al.* Improvement of Emotional Response to Negative Stimulations With Moderate-Intensity Physical Exercise[J]. *Front Psychol*, 2021, 12: 656598.
- [3] Gaffrey MS, Barch DM, Luby JL, *et al.* Amygdala Functional Connectivity Is Associated With Emotion Regulation and Amygdala Reactivity in 4- to 6-Year-Olds[J]. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, 2021, 60(1): 176-85.
- [4] Dehghani A, Soltanian-Zadeh H, Hossein-Zadeh GA. Probing fMRI brain connectivity and activity changes during emotion regulation by EEG neurofeedback[J]. *Front Hum Neurosci*, 2023, 16:988890.
- [5] Metzen D, Genç E, Getzmann S, *et al.* Frontal and parietal EEG alpha asymmetry: a large-scale investigation of short-term reliability on distinct EEG systems[J]. *Brain Struct Funct*, 2021, 227(2): 725-740.
- [6] Zhang D, Allen JJB. A comparison of nomothetic and individualized alpha frequency approaches to measuring frontal EEG alpha asymmetry[J]. *Psychophysiology*, 2023, 60(1): e14149.
- [7] Harmon-Jones E, Gable PA. On the role of asymmetric frontal cortical activity in approach and withdrawal motivation: An updated review of the evidence[J]. *Psychophysiology*, 2018, 55(1). doi: 10.1111/psyp.12879.
- [8] Papousek I, Aydin N, Rominger C, *et al.* DSM-5 personality trait domains and withdrawal versus approach motivational tendencies in response to the perception of other people's desperation and angry aggression[J]. *Biol Psychol*, 2018, 132: 106-115.
- [9] Takehara H, Ishihara S, Iwaki T. Comparison Between Facilitating and Suppressing Facial Emotional Expressions Using Frontal EEG Asymmetry[J]. *Front Behav Neurosci*, 2020, 14: 554147.
- [10] Bolinger E, Ngo HV, Kock V, *et al.* Affective Cortical Asymmetry at the Early Developmental Emergence of Emotional Expression[J]. *eNeuro*, 2020, 7(4): ENEURO.0042-20.
- [11] Li P, Liu H, Si Y, *et al.* EEG Based Emotion Recognition by Combining Functional Connectivity Network and Local Activations[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2019, 66(10): 2869-2881.
- [12] Yang K, Tong L, Shu J, *et al.* High Gamma Band EEG Closely

- Related to Emotion; Evidence From Functional Network [J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 89.
- [13] Ren J, Yao Q, Tian M, *et al.* Altered effective connectivity in migraine patients during emotional stimuli: a multi-frequency magnetoencephalography study[J]. *J Headache Pain*, 2022, 23(1): 6.
- [14] Maffei A, Polver S, Spironelli C, *et al.* EEG gamma activity to emotional movies in individuals with high traits of primary "successful" psychopathy[J]. *Brain Cogn*, 2020, 143: 105599.
- [15] He Z, Yang K, Zhuang N, *et al.* Processing of Affective Pictures: A Study Based on Functional Connectivity Network in the Cerebral Cortex [J]. *Comput Intell Neurosci*, 2021, 2021: 5582666.
- [16] Sonkusare S, Qiong D, Zhao Y, *et al.* Frequency dependent emotion differentiation and directional coupling in amygdala, orbitofrontal and medial prefrontal cortex network with intracranial recordings[J]. *Mol Psychiatry*, 2023, 28(4): 1636-1646.
- [17] Liu Y, Zhang L, Jackson T, *et al.* Effects of negative mood state on event-related potentials of restrained eating subgroups during an inhibitory control task [J]. *Behav Brain Res*, 2020, 377: 112249.
- [18] Draschkow D, Heikel E, Vö ML, *et al.* No evidence from MVPA for different processes underlying the N300 and N400 incongruity effects in object-scene processing[J]. *Neuropsychologia*, 2018, 120: 9-17.
- [19] Okruszek Ł, Wichniak A, Jarkiewicz M, *et al.* Social and nonsocial affective processing in schizophrenia - An ERP study[J]. *Int J Psychophysiol*, 2016, 107: 54-62.
- [20] Leblanc-Sirois Y, Chouinard-Gauette L, Grégoire L, *et al.* Perceptual processing of stimuli related to an analogue traumatic event: An ERP study[J]. *Brain Cogn*, 2021, 153: 105774.
- [21] Naumann S, Bayer M, Dziobex I. Preschoolers' Sensitivity to Negative and Positive Emotional Facial Expressions: An ERP Study[J]. *Front Psychol*, 2022, 13: 828066.
- [22] Schermerhorn AC. Children's appraisals of interparental conflict predict event-related potential components [J]. *Dev Neuropsychol*, 2018, 43(3): 235-255.
- [23] Ma Q, Pei G, Wang K. Influence of negative emotion on the framing effect[J]. *NeuroReport*, 2015, 26(6): 325-332.
- [24] Abid A, Middlebrooks M, Rawls E, *et al.* Impact of emotionally-charged images and trial order on downstream cognitive processing: An ERP study [J]. *Neuropsychologia*, 2021, 162: 108031.
- [25] Liu J, Fan L, Jiang J, *et al.* Evidence for dynamic attentional bias toward positive emotion-laden words: A behavioral and electrophysiological study[J]. *Front Psychol*, 2022, 13: 966774.
- [26] Su J, Duan D, Zhang X, *et al.* The effect of negative emotion on multiple object tracking task: An ERP study[J]. *Neurosci Lett*, 2017, 641: 15-20.
- [27] Liu X, Liu Y, Shi H, *et al.* Regulation of Mindfulness-Based Music Listening on Negative Emotions Related to COVID-19: An ERP Study [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(13): 7063.
- [28] Yan C, Ding Q, Wang Y, *et al.* The effect of cognitive reappraisal and expression suppression on sadness and the recognition of sad scenes: An event-related potential study[J]. *Front Psychol*, 2022, 13: 935007.
- [29] Cao D, Li Y, Niznikiewicz M A. Neural characteristics of cognitive reappraisal success and failure: An ERP study[J]. *Brain Behav*, 2020, 10(4): e01584.
- [30] Yang H, Li J, Zheng X. Different Influences of Negative and Neutral Emotional Interference on Working Memory in Trait Anxiety[J]. *Front Psychol*, 2021, 12: 570552.
- [31] Liu Y, Zhao J, Zhang X, *et al.* Overweight adults are more impulsive than normal weight adults: Evidence from ERPs during a chocolate-related delayed discounting task[J]. *Neuropsychologia*, 2019, 133: 107181.
- [32] Wyczesany M, Capotosto P, Zappasodi F, *et al.* Hemispheric asymmetries and emotions: Evidence from effective connectivity [J]. *Neuropsychologia*, 2018, 121: 98-105.
- [33] Parvizi J, Veit MJ, Barbosa DAN, *et al.* Complex negative emotions induced by electrical stimulation of the human hypothalamus [J]. *Brain Stimul*, 2022, 15(3): 615-623.
- [34] Aldhafeeri FM, Mackenzie I, Kay T, *et al.* Regional brain responses to pleasant and unpleasant IAPS pictures: different networks[J]. *Neurosci Lett*, 2012, 512(2): 94-98.
- [35] Tang TY, Luan Y, Jiao Y, *et al.* Disrupted Amygdala Connectivity Is Associated With Elevated Anxiety in Sensorineural Hearing Loss[J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 616348.
- [36] Rolls ET, Deco G, Huang CC, *et al.* Human amygdala compared to orbitofrontal cortex connectivity, and emotion[J]. *Prog Neurobiol*, 2023, 220: 102385.
- [37] Kragel PA, Ceko M, Theriault J, *et al.* A human colliculus-pulvinar-amygdala pathway encodes negative emotion [J]. *Neuron*, 2021, 109(15): 2404-2412. e5.
- [38] Rolls E T. The hippocampus, ventromedial prefrontal cortex, and episodic and semantic memory [J]. *Prog Neurobiol*, 2022, 217: 102334.
- [39] Hong I, Kaang BK. The complexity of ventral CA1 and its multiple functionalities [J]. *Genes Brain Behav*, 2022, 21(7): e12826.
- [40] Rolls ET, Deco G, Huang CC, *et al.* The human orbitofrontal cortex, vmPFC, and anterior cingulate cortex effective connectome: emotion, memory, and action[J]. *Cereb Cortex*, 2022, 33(2): 330-356.
- [41] Sun S, Yu H, Yu R, *et al.* Functional connectivity between the amygdala and prefrontal cortex underlies processing of emotion ambiguity[J]. *bioRxiv*, 2023. doi: 10.1101/2023.01.24.525116.

(收稿日期:2023-04-12;修回日期:2023-05-21)

(责任编辑:刘玉巧; 英文编辑:吕鏊烽)