

# 脑电神经反馈对情绪障碍的环路机制与网络重组



赵思宁<sup>1</sup>, 原婧然<sup>1</sup>, 白莹<sup>1</sup>, 杨子康<sup>1</sup>, 褚晓蕾<sup>2</sup>, 邢政<sup>2</sup>, 李奇<sup>2</sup>

1. 天津体育学院运动健康学院/天津市运动生理与运动医学重点实验室 (天津 300381)
2. 天津市天津医院康复科 (天津 300211)

**【摘要】**情绪调控是个体对外界或内部刺激所作出的一种适应性反应过程, 情绪调控障碍会引起抑郁症、焦虑症等多种心理健康问题, 不仅严重影响个人日常生活和社交功能, 还给家庭和社会带来沉重负担。目前, 治疗情绪调控障碍的有效手段较少, 且存在疗效不稳定及个体差异大等问题。脑电神经反馈 (EEG-NF) 是一种新兴的非侵入性神经调控技术, 具有安全、无创、副作用较少等优点, 在情绪调控中的应用受到广泛关注。本文重点综述了 EEG-NF 调控情绪的核心机制, 及其在焦虑、抑郁、自闭症谱系障碍等常见情绪障碍中的临床应用, 以期情绪障碍的精准干预提供理论参考。

**【关键词】**脑电神经反馈; 情绪障碍; 神经可塑性; 抑郁; 焦虑

**【中图分类号】** R749.05; R338.2 **【文献标识码】** A

## Circuit mechanism and network reorganization of electroencephalographic neurofeedback on emotional disorders

ZHAO Sining<sup>1</sup>, YUAN Jingran<sup>1</sup>, BAI Ying<sup>1</sup>, YANG Zikang<sup>1</sup>, LI Qi<sup>2</sup>, CHU Xiaolei<sup>2</sup>, XING Zheng<sup>2</sup>

1. School of Sports and Health, Tianjin University of Sport/Tianjin Key Laboratory of Sports Physiology and Sports Medicine, Tianjin 300381, China

2. Department of Rehabilitation Medicine, Tianjin Hospital, Tianjin 300211, China

Corresponding author: LI Qi, Email: Liqi\_82@126.com

**【Abstract】**Emotional regulation is an adaptive process through which individuals respond to external or internal stimuli. Impairments in emotional regulation are closely associated with a range of mental health problems, including depression and anxiety disorders, which not only severely disrupt daily functioning and social interactions but also impose substantial burdens on families and society. At present, effective interventions for emotional regulation disorders remain limited, and existing treatments often show unstable therapeutic outcomes and marked individual variability. Electroencephalographic neurofeedback(EEG-NF) is an emerging noninvasive neuromodulation technique characterized by safety, noninvasiveness, and minimal side effects, and has therefore attracted increasing attention in the application of emotional regulation. This review focuses on the core mechanisms underlying EEG-NF modulation of emotion, as well as its clinical applications in common emotion-related disorders such as anxiety, depression, and autism spectrum disorder, to provide a theoretical foundation for the development of precise interventions for emotional regulation disorders.

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202510043

基金项目: 国家重点研发计划“生物与信息融合 (BT与IT融合)”重点专项 (2023YFF1205200); 天津市自然科学基金面上项目 (22JCYBJC00210、22JCYBJC00220)

通信作者: 李奇, 主任医师, 硕士研究生导师, Email: Liqi\_82@126.com

**【Keywords】** Electroencephalographic neurofeedback; Emotional disorders; Neural plasticity; Depression; Anxiety

情绪会对人类的决策和行为产生重要的影响,当个体情绪体验与所处环境相违背时,需对当前情绪进行调节和控制。抑郁症、焦虑症和创伤后应激障碍(post-traumatic stress disorder, PTSD)等情绪调控障碍,已成为全球范围内影响心理健康的核心问题。这些障碍不仅严重影响患者的生活质量,还为家庭和社会带来了沉重的负担<sup>[1]</sup>。情绪调控是个体应对外界环境变化、维持心理平衡的关键能力,一旦出现情绪调控障碍,可能会导致情绪失调、认知功能下降和行为问题<sup>[2]</sup>。焦虑症特征是过度恐惧和焦虑,与之相关的神经生理应激轴和大脑唤醒回路发生功能障碍。上述疾病的病理生理学机制复杂,但其标志性特征是行为和生理过度唤醒<sup>[3]</sup>。情绪障碍治疗以药物干预和认知行为疗法为主,但存在复发率高、治疗可及性不足等问题<sup>[4-6]</sup>。现有研究表明经颅磁刺激、经颅直流电刺激等技术对情绪调控障碍患者的情感症状有明显的改善效果,但其疗效的可靠性还需进一步临床研究予以确认<sup>[7-9]</sup>。

脑电神经反馈(electroencephalographic neurofeedback, EEG-NF)技术作为一种新型的非药物、非侵入式的干预手段,因其无麻醉、操作便捷、安全性高等优点,近年来受到广泛关注<sup>[10-11]</sup>。EEG-NF通过实时监测特定脑电频段,并以视觉、听觉或触觉形式反馈给受试者,受试者根据反馈信号学习控制自身生理、心理状态,从而改善情绪与认知<sup>[12]</sup>。已有研究证实,脑电反馈对卒中后抑郁等多种情绪障碍有良好效果,可显著改善混合性焦虑抑郁障碍患者的焦虑与抑郁水平<sup>[13-14]</sup>。基于此,本文系统综述EEG-NF在情绪调控中应用的相关研究,梳理EEG-NF技术的原理、神经生理基础、应用机制以及临床效果,并探讨未来研究方向。

## 1 EEG-NF 技术原理

EEG-NF技术的实施依赖于对脑电信号特征的精准解读与实时反馈,其训练范式主要分为3类,分别基于频率功率、事件相关电位、功能连接性。其中频率功率范式依托静息态脑电特征开展训练,频段主要包括 $\delta$ 波、 $\theta$ 波、 $\alpha$ 波、 $\beta$ 波、

$\gamma$ 波等<sup>[14]</sup>。基于 $\delta$ 波(1~4 Hz)的反馈训练可缓解疲劳和紧张,改善抑郁症患者临床症状,前额 $\alpha$ 波不对称性(frontal  $\alpha$  asymmetry, FAA)训练是情绪调控中最具代表性的范式。

## 2 情绪调控的神经生理基础

### 2.1 情绪调控的相关脑区

不同的情绪调控涉及不同的神经机制,会特异性激活前额皮层(prefrontal cortex, PFC)、杏仁核(amygdala, AMY)、前扣带皮层(anterior cingulate cortex, ACC)3类核心脑区<sup>[15]</sup>。现有研究认为,PFC是认知控制和情绪调节的核心脑区;AMY主导情绪的生成、主观体验与外显表达,是情绪应答的底层核心脑区;ACC位于额叶内侧、胼胝体上方,是认知与情绪的“接口”,主要承担冲突监控和情绪评价功能<sup>[6, 16-18]</sup>。研究报道,PFC-AMY环路是情绪调控中最为关键的神经通路,该通路实现了大脑高级认知中心对初级情绪中心的调控,是认知控制情绪的神经体现<sup>[19]</sup>。焦虑症、抑郁症等情绪障碍常表现为腹内侧PFC和背外侧PFC功能减弱,而AMY则呈现过度激活,导致负性情绪泛化与持续。双相情感障碍患者腹外侧PFC和背外侧PFC激活水平显著降低,提示其自上而下的认知与情绪调控功能受损。在面对情绪性刺激时,患者的AMY等边缘系统结构则呈现过度活跃状态,PFC与AMY间负相关连接显著减弱甚至消失,表明认知调控对情绪反应的抑制机制失效<sup>[20]</sup>。PTSD的核心特征为恐惧习得和消退异常,病理基础是以AMY为核心的恐惧神经环路功能紊乱。在静息状态下,PTSD患者默认网络(default mode network, DMN)与其他脑网络连接紊乱,该异常与创伤记忆闯入、负性自我认知密切相关。同时,突显网络(salience network, SN)呈现过度激活,并与辅助运动皮层等功能区域连接异常,可能加剧患者的过度警觉与情绪高唤醒状态<sup>[21]</sup>。因此,通过EEG-NF增强PFC对AMY的控制,是纠正情绪失调的核心干预路径。

### 2.2 情绪调控的电生理指标

脑电信号具备超高时间分辨率,可为情绪障碍提供客观电生理生物标志物,也是EEG-NF干

预的训练靶点。FAA是情绪调控研究中应用最广泛的指标之一<sup>[8]</sup>。静息状态下,左侧PFC $\alpha$ 波活动优势对应积极情绪偏向与高效情绪调控能力,右侧PFC $\alpha$ 波活动优势则与焦虑、抑郁等病理性负性情绪高度相关<sup>[22]</sup>。基于该电生理规律,现有EEG-NF常通过上调左额叶 $\alpha$ 波功率、抑制右额叶 $\alpha$ 波活动,实现负性情绪的矫正<sup>[23-24]</sup>。除FAA外,PFC脑区P3电位也与情绪调控功能存在关联,相较于健康对照人群,重度抑郁症患者进行情绪调控任务时,PFC-P3电位振幅显著降低<sup>[25]</sup>。但现阶段尚未开展靶向提升PFC-P3振幅的EEG-NF干预研究,该指标可能成为情绪障碍干预的潜在新型训练靶点。

情绪调控与脑电节律的调节有关,不同频段的脑电振荡与不同的情绪状态密切相关,频段功率与比值是情绪调控的电生理标志物,如 $\alpha$ 波对应清醒放松的静息脑状态,焦虑、抑郁患者 $\alpha$ 节律频率减慢、频段功率下降、节律调幅稳定性不足; $\theta$ 波过度激活与悲伤情绪、情感冲动表达相关,是边缘情感脑区情绪表达的核心电生理载体<sup>[24, 26]</sup>。

临床干预研究证实,对重度抑郁症患者顶叶 $\theta$ 波开展EEG-NF抑制训练后,患者抑郁量表得分显著下降,抑郁症状有效缓解<sup>[26]</sup>。除单一频段节律外,快慢波功率比值同样具备评估价值。静息状态 $\delta/\beta$ 、 $\theta/\beta$ 比值与个体情绪调控能力显著负相关,比值越低代表情绪抑制能力越强。此外,后顶叶 $\alpha$ 波活动可间接表征DMN功能,高水平后顶叶 $\alpha$ 波能够维持DMN稳态,削弱外界无关信息对内部情绪加工的干扰。综上,靶向调控特定脑区、特定频段的自发脑电活动,可实现情绪加工通路的精细化干预。

### 3 EEG-NF调节情绪的机制

#### 3.1 诱导分子与突触可塑性

受试者脑电活动趋近训练预设指标(如左侧PFC $\alpha$ 波功率回升)时,实时视觉或听觉反馈作为奖励信号,触发腹侧被盖区多巴胺释放,激活PFC cAMP-PKA-CREB信号通路,进一步促进脑源性神经营养因子的表达及其与酪氨酸激酶B受体的结合,进而激活下游Ras-MAPK/ERK与PI3K-Akt通路,诱导突触长时程增强和树突棘密度与形态重塑,最终介导突触可塑性进程<sup>[27]</sup>。依

托上述即时的反馈和奖励机制,个体可逐步习得自主调控局部脑电活动的的能力,同步改善情绪调节、注意分配等认知功能。从训练时序来看,EEG-NF初期依靠操作性条件反射形成的脑活动调控能力具有暂时性,经过多轮重复反馈训练后,突触可塑性变化趋于稳定,脑活动自主调控能力也转化为长效稳定状态。

#### 3.2 神经环路功能与脑网络功能重组

大脑内部存在着广泛而复杂的纤维联系,形成神经冲动环路,参与调节本能和情感行为,PFC-AMY环路是情绪调节中的重要环路。情绪调控障碍中,PFC与AMY功能连接降低,PFC对AMY无法有效抑制AMY的过度激活,导致下丘脑-垂体-肾上腺轴被长期、过度地激活,皮质醇持续高水平释放<sup>[28]</sup>。下丘脑、海马体、PFC均为糖皮质激素敏感脑区,长期暴露于高浓度糖皮质激素刺激,会引发突触萎缩及数量减少,严重时诱发脑区神经元凋亡<sup>[29]</sup>。内分泌系统不能正常运行继而引起情绪紊乱,减弱机体正确处理刺激的能力,使人易陷入极度紧张、焦虑等负向情绪中。研究表明,针对FAA的EEG-NF训练可特异性增强腹内侧PFC与AMY之间的功能连接,从而增强PFC对AMY的抑制性控制,降低其对负性刺激的反应性<sup>[30]</sup>。

DMN、SN与中央执行网络(central executive network, CEN)的动态平衡是情绪调控的底层网络基础,3类网络功能失衡是情绪障碍的核心神经特征。DMN过度激活会加重反刍思维,CEN激活不足会损伤认知控制能力,SN调控异常则会阻碍个体脱离负性内部情绪状态<sup>[31]</sup>。

EEG-NF通过特异性调节脑电活动靶点,诱导3大核心脑网络发生可塑性重组。 $\alpha$ 波增强训练可抑制后扣带皮层等DMN核心节点的异常亢奋,缓解反刍思维并消解DMN内部过度连接; $\theta/\beta$ 节律调节训练可优化皮层唤醒水平,提升前岛叶-ACC通路连接效率,修复SN网络切换功能;感觉运动节律训练能够强化背外侧PFC与后顶叶皮层的连接,提高CEN认知调控能力<sup>[32]</sup>。EEG-NF能恢复网络间的动态平衡,重建DMN与CEN的生理性负相关,使SN有效发挥其中介作用,说明EEG-NF通过重塑脑内局部环路与全域网络连接、修复网络动态平衡,改善情绪调控缺陷,缓解情绪障碍临床症状<sup>[33]</sup>。

### 3.3 长时程结构与功能改变

EEG-NF 训练可同步诱导大脑功能与结构双重可塑性改变。反复的神经反馈训练可强化脑网络内部功能连接,优化突触传导强度,提升脑内白质纤维束连通性,还可提升 PFC、ACC 等情绪调控核心脑区的灰质密度。同时,训练干预结束后,相关脑区的功能耦合程度会随时间进一步提升,且该功能连接增强效应可在停止训练后长期维持<sup>[34]</sup>。上述结构与功能的持续性改变,本质是长时程突触重塑、神经可塑性效应不断累积的结果,也从神经生物学层面解释了 EEG-NF 具备远期稳定疗效的内在机制。

## 4 EEG-NF 在调节情绪中的应用

### 4.1 EEG-NF 在焦虑症中的应用

焦虑症患者典型临床症状为过度警觉、难以放松和情绪调控能力受损。焦虑患者的特征表现为 PFC-AMY 环路功能失衡,FAA 右偏、AMY 过度兴奋及腹内侧 PFC 功能减弱;脑电图表现为  $\alpha$  波幅降低或脑波慢化,右额叶  $\beta$  波过度活跃<sup>[35]</sup>。目前用于改善焦虑症状的 EEG-NF 干预方案主要为 FAA 矫正训练、 $\alpha/\theta$  波增强联合  $\beta$  波抑制训练。通过 FAA 矫正训练增强左 PFC 对 AMY 的抑制控制,减少过度恐惧反应。研究表明,经 FAA 反馈训练后,焦虑症患者汉密尔顿焦虑量表评分降低,且功能性磁共振成像 (fMRI) 显示其 PFC 对 AMY 的控制效能增强<sup>[30]</sup>。

Moradi 等<sup>[36]</sup>发现  $\alpha/\theta$  波增强、 $\beta$  波抑制的组合式 EEG-NF 干预可有效缓解焦虑症状。郭晓琳等<sup>[37]</sup>比较艾司西酞普兰联合 EEG-NF 与单纯艾司西酞普兰对抑郁症患者的疗效,结果发现药物联合 EEG-NF 组患者的汉密尔顿抑郁量表得分显著改善。目前国内应用 EEG-NF 干预焦虑症的研究多联合抗焦虑药物治疗,其效果较单纯药物治疗更佳。但也有文献报道 EEG-NF 联合药物治疗焦虑症与单纯药物治疗的疗效无明显差异<sup>[38]</sup>。近年来,基于脑-机接口的虚拟现实暴露疗法为焦虑症干预提供了新思路。该系统通过实时监测患者的脑电焦虑指标,并利用 EEG-NF 的方式帮助焦虑症患者缓解焦虑<sup>[39]</sup>。尽管多项研究报道了积极效果,但安慰剂效应和期望效应可能在疗效中占有相当比重。未来研究需采用更严谨的设计以明确其特异性疗效。

### 4.2 EEG-NF 在抑郁症中的应用

抑郁症是我国全年龄段高发精神障碍,临床表现为持续性心境低落、思维迟缓,其中约 15% 患者存在自杀意念,该病严重损害个体身心健康,也加重家庭照护与社会公共卫生负担<sup>[40]</sup>。FAA 与顶叶脑电不对称呈负向关联,其中 FAA 被证实是抑郁、焦虑共病的独立危险因素。结合抑郁特异性脑电异常指标,现阶段主流 EEG-NF 干预方案分为 FAA 矫正训练、P300 振幅增强训练两类,现有临床研究已初步验证两类方案的干预有效性<sup>[41-42]</sup>。Wang 等<sup>[43]</sup>应用 FAA 神经反馈或  $\beta$  下调神经反馈干预重度抑郁合并焦虑的患者,结果显示患者抑郁和焦虑症状得到有效改善,同时  $\beta$  波神经反馈显著降低了顶叶 P3 区域高  $\beta$  功率。李春梅等<sup>[44]</sup>采用提升右侧额叶  $\alpha$  相对振幅的个体化 EEG-NF 方案,证实该干预可同步改善抑郁患者情绪障碍与前额叶介导的执行功能。闭环经颅交流电刺激 (CL-tACS) 是脑-机接口在抑郁症治疗中的前沿范式,该技术构建了完整的“感知-解码-干预”智能闭环,系统实时追踪抑郁相关异常神经振荡,仅在目标振荡相位窗口期输出微弱交流电刺激,依托状态依赖性相位调控重置紊乱脑节律,进而诱导脑内神经可塑性修复<sup>[45]</sup>。但部分研究存在样本量小、盲法实施不严格、假对照设置不合理等问题,早期研究使用的“假反馈”并非完全无活性,可能导致结论偏倚<sup>[42]</sup>。因此,虽然 EEG-NF 对抑郁症展现出应用潜力,但其疗效的确定性和特异性仍需更大样本、更严谨设计的临床试验以验证。

### 4.3 EEG-NF 在自闭症谱系障碍中的应用

自闭症谱系障碍 (autism spectrum disorder, ASD) 属于先天性神经发育障碍,以社交沟通缺损、限制性重复行为两大症状为核心临床表现,超 70% 的 ASD 患者需终身接受照护,造成沉重的家庭与社会经济负担。ASD 可能与情绪问题、智力低下或癫痫症有关。Fietz 等<sup>[46]</sup>认为慢皮质电位神经反馈训练可能影响 ASD 个体的认知效率和情绪处理;Thompson 等<sup>[47]</sup>针对 ASD 兴奋-抑制失衡开展节律调控干预,通过纠正  $\alpha$  波减弱、 $\theta/\beta$  比值升高的脑电异常,有效缓解患者刻板行为,同时提升社交互动、学业执行与持续性注意能力。Kang 等<sup>[48]</sup>针对 ASD 儿童开展 EEG-NF 干预,

随访结果显示患儿认知、语言沟通及社交量表得分显著提升,脑成像结果提示干预后PFC-颞叶等核心社交脑区功能连接增强, $\delta$ 频段时域变异性回落,证明EEG-NF可修复ASD异常脑网络。采用 $\beta$ 波增强、 $\theta$ - $\alpha$ 波抑制的节律方案,能够改善ASD患者神经心理功能,缓解共病焦虑与冲动行为,但当前研究普遍存在脑电靶点、干预疗程、训练频次差异大等问题,且缺乏1年以上远期随访数据,无法验证长期疗效<sup>[49]</sup>。后续研究需结合ASD临床亚型异质性,细化分型化干预靶点,统一疗程、训练参数形成标准化方案,依托大样本随机对照试验排除混杂变量,客观验证干预有效性。

#### 4.4 EEG-NF在PTSD中的应用

脑电反馈在减轻PTSD症状方面显示出积极且具有临床意义的效果,患者在接受训练后,PTSD症状总分、闯入性回忆、回避行为、过度警觉等均得到显著缓解,情绪调节能力同步改善<sup>[50]</sup>。van der等<sup>[51]</sup>对经常规认知、暴露治疗无效的慢性PTSD患者,采用慢波、 $\beta$ 波联合抑制叠加 $\alpha$ 波增强的EEG-NF方案开展干预,结果显示干预组患者情绪调节水平、日常社会生活质量显著提升。该研究同时指出,此EEG-NF方案的临床效应量与PTSD一线干预手段(认知行为疗法、创伤暴露疗法)水平相当。Nicholson等<sup>[52-53]</sup>采用 $\alpha$ 波EEG-NF对40例PTSD患者和32例健康对照进行干预,发现EEG-NF组在PTSD症状改善方面优于假性反馈组,且症状改善程度、EEG-NF训练表现与DMN/SN连接变化显著相关。

## 5 结语

EEG-NF通过操作性条件反射原理,引导个体对特定脑电活动进行自我调节,为实现情绪障碍的非侵入性干预提供了新范式。该技术的有效性源于其诱导的多层级神经可塑性,包括分子与突触重塑、PFC-AMY环路功能连接的恢复,以及DMN、SN与CEN之间动态平衡的重建。临床研究证实,其在焦虑、抑郁等疾病中具有应用潜力,但该领域的发展受限于研究方法的异质性与训练方案缺乏标准化,安慰剂效应难以排除,结论可靠性存疑。未来EEG-NF正朝着闭环化、个体化、多模态融合的方向发展。结合脑机接口、虚拟现实、可穿戴监测等技术,有望实现“感知-解码-调控”一体化的智能干预。同时,通过

挖掘个体化神经标志物、建立标准化训练协议、深化多尺度机制研究,将推动该技术从一种探索性手段,逐步转化为情绪障碍精准医疗体系中有据可依的可靠工具。

伦理声明:不适用

作者贡献:文献查阅:白莹、杨子康;文章撰写:赵思宁、原婧然;文章修改:褚晓蕾、邢政;文章审定与经费支持:李奇、褚晓蕾、邢政

数据获取:不适用

利益冲突声明:无

致谢:不适用

#### 参考文献

- 1 Creswell C, Violato M, Fairbanks H, et al. Clinical outcomes and cost-effectiveness of brief guided parent-delivered cognitive behavioural therapy and solution-focused brief therapy for treatment of childhood anxiety disorders: a randomised controlled trial[J]. *Lancet Psychiat*, 2017, 4(7): 529-539.
- 2 Olatunji BO, Berg HE, Zhao Z. Emotion regulation of fear and disgust: differential effects of reappraisal and suppression[J]. *Cogn Emot*, 2017, 31(2): 403-410.
- 3 Hyde J, Ryan KM, Waters AM. Psychophysiological markers of fear and anxiety[J]. *Curr Psychiatry Rep*, 2019, 21(7): 56.
- 4 Owolabi MO, Leonardi M, Bassetti C, et al. Global synergistic actions to improve brain health for human development[J]. *Nat Rev Neurol*, 2023, 19(6): 371-383.
- 5 Moloud R, Saeed Y, Mahmonir H, et al. Cognitive-behavioral group therapy in major depressive disorder with focus on self-esteem and optimism: an interventional study[J]. *BMC Psychiatry*, 2022, 22: 299.
- 6 Jamieson AJ, Harrison BJ, Razi A, et al. Rostral anterior cingulate network effective connectivity in depressed adolescents and associations with treatment response in a randomized controlled trial[J]. *Neuropsychopharmacol*, 2022, 47(6): 1240-1248.
- 7 Miskowiak KW, Macoveanu J, Jørgensen MB, et al. Effect of electroconvulsive therapy on neural response to affective pictures: a randomized, sham-controlled fMRI study[J]. *Eur Neuropsychopharmacol*, 2018, 28(8): 915-924.
- 8 Melnikov MY. The current evidence levels for biofeedback and neurofeedback interventions in treating depression: a narrative review[J]. *Neural Plast*, 2021, 2021: 1-31.
- 9 Razza LB, Moffa AH, Moreno ML, et al. A systematic review and Meta-analysis on placebo response to repetitive transcranial magnetic stimulation for depression trials[J]. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*, 2018, 81: 105-113.
- 10 Tsai PC, Akpan A, Tang KT, et al. Brain computer interfaces for cognitive enhancement in older people-challenges and applications: a systematic review[J]. *BMC Geriatr*, 2025, 25(1): 36.
- 11 Fernández-alvarez J, Grassi M, Colombo D, et al. Efficacy of bio- and neurofeedback for depression: a Meta-analysis[J]. *Psychol Med*, 2022, 52(2): 201-216.
- 12 Enriquez-geppert S, Huster RJ, Herrmann CS. EEG-neurofeedback as a tool to modulate cognition and behavior: a review tutorial[J]. *Front Hum Neurosci*, 2017, 11: 51.
- 13 Lin FL, Sun CK, Cheng YS, et al. Additive effects of EEG

- neurofeedback on medications for ADHD: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 20401.
- 14 Abdian H, Rezaei M, Eskandari Z, et al. The effect of quantitative electroencephalography-based neurofeedback therapy on anxiety, depression, and emotion regulation in people with generalized anxiety disorder[J]. *Basic Clin Neurosci*, 2021, 12(2): 281–290.
- 15 Tschentscher N, Tafelmaier JC, Woll C FJ, et al. The clinical impact of real-time fMRI neurofeedback on emotion regulation: a systematic review[J]. *Brain Sci*, 2024, 14(7): 700.
- 16 Godet A, Serrand Y, Fortier A, et al. Subjective feeling of control during fNIRS-based neurofeedback targeting the DL-PFC is related to neural activation determined with short-channel correction[J]. *PLoS One*, 2023, 18(8): e0290005.
- 17 Gurevitch G, Lubianiker N, Markovits T, et al. Amygdala self-neuromodulation capacity as a window for process-related network recruitment[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2024, 379(1915): 20240186.
- 18 Goldway N, Jalon I, Keynan JN, et al. Feasibility and utility of amygdala neurofeedback[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2022, 138: 104694.
- 19 Gülber M, Nagy SA, Orsi G, et al. Hippocampal subfield and amygdala volumes are associated with difficulties in emotion regulation of depressed patients with a history of childhood maltreatment[J]. *Front Psychiatry*, 2025, 16: 1641745.
- 20 Zhang L, Opmeer EM, Van der Meer L, et al. Altered frontal-amygdala effective connectivity during effortful emotion regulation in bipolar disorder[J]. *Bipolar Disord*, 2018, 20(4): 349–358.
- 21 Askovic M, Soh N, Elhindi J, et al. Neurofeedback for post-traumatic stress disorder: systematic review and Meta-analysis of clinical and neurophysiological outcomes[J]. *Eur J Psychotraumatol*, 2023, 14(2): 2257435.
- 22 Zamfirache F, Prundaru G, Dumitru C, et al. Frontal transcranial direct current stimulation in moderate to severe depression: clinical and neurophysiological findings from a pilot study[J]. *Brain Sci*, 2025, 15(6): 540.
- 23 Brzezińska A, Kamiński J, Kamińska OK, et al. Frontal EEG alpha band asymmetry as a predictor of reasoning deficiency in depressed people[J]. *Cogn Emot*, 2017, 31(5): 868–878.
- 24 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.
- 25 Wang J, Li Q, Li Z, et al. EEG-based multivariate pattern analysis reveals the control mechanisms of emotion regulation through distancing[J]. *Int J Clin Health Psychol*, 2024, 24(1): 100423.
- 26 Linhartová P, Látllová A, Kóša B, et al. fMRI neurofeedback in emotion regulation: a literature review[J]. *Neuroimage*, 2019, 193: 75–92.
- 27 Marzbani H, Marateb HR, Mansourian M. Neurofeedback: a comprehensive review on system design, methodology and clinical applications[J]. *Basic Clin Neurosci*, 2016, 7(2): 143–158.
- 28 Sun S, Yu H, Yu R, et al. Functional connectivity between the amygdala and prefrontal cortex underlies processing of emotion ambiguity[J]. *Transl Psychiatry*, 2023, 13(1): 334.
- 29 McEwen BS, Nasca C, Gray JD. Stress effects on neuronal structure: hippocampus, amygdala, and prefrontal cortex[J]. *Neuropsychopharmacol*, 2016, 41(1): 3–23.
- 30 Dehghani A, Soltanian-zadeh H, Hossein-zadeh GA. Neural modulation enhancement using connectivity-based EEG neurofeedback with simultaneous fMRI for emotion regulation[J]. *Neuroimage*, 2023, 279: 120320.
- 31 Roberts H, Schreiner MW, Pocius S, et al. State rumination predicts inhibitory control failures and dysregulation of default, salience, and cognitive control networks in youth at risk of depressive relapse: findings from the RuMeChange trial[J]. *J Affect Disord Rep*, 2024, 16: 100729.
- 32 Lieberman JM, Rabellino D, Densmore M, et al. Posterior cingulate cortex targeted real-time fMRI neurofeedback recalibrates functional connectivity with the amygdala, posterior insula, and default-mode network in PTSD[J]. *Brain Behav*, 2023, 13(3): e2883.
- 33 Ryan NP, Catroppa C, Ward SC, et al. Association of neurostructural biomarkers with secondary attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD) symptom severity in children with traumatic brain injury: a prospective cohort study[J]. *Psychol Med*, 2023, 53(11): 5291–5300.
- 34 Rance M, Walsh C, Sukhodolsky DG, et al. Time course of clinical change following neurofeedback[J]. *Neuroimage*, 2018, 181: 807–813.
- 35 Mennella R, Patron E, Palomba D. Frontal alpha asymmetry neurofeedback for the reduction of negative affect and anxiety[J]. *Behav Res Ther*, 2017, 92: 32–40.
- 36 Moradi A, Pouladi F, Pishva N, et al. Treatment of anxiety disorder with neurofeedback: case study[J]. *Procedia Soc Behav Sci*, 2011, 30: 103–107.
- 37 郭晓琳, 韩海斌, 王婷婷, 等. 艾司西酞普兰联合脑电生物反馈对青少年抑郁疗效[J]. *青岛大学学报(医学版)*, 2025, 61(4): 588–592. [Guo XL, Han HB, Wang TT, et al. Therapeutic effects of escitalopram combined with electroencephalographic biofeedback in adolescents with depression[J]. *Journal of Qingdao University(Medical Sciences)*, 2025, 61(4): 588–592.]
- 38 单筱雯. 脑电生物反馈联合丁螺环酮片治疗广泛性焦虑障碍患者的效果[J]. *中国民康医学*, 2023, 35(13): 39–42. [Shan XW. The effect of electroencephalogram biofeedback combined with dinoloxone tablets in treating patients with generalized anxiety disorder[J]. *Chinese Community Medicine*, 2023, 35(13): 39–42.]
- 39 Eser A, Erdoğan SB. Decoding basic emotional states through integration of an fNIRS-based brain-computer interface with supervised learning algorithms[J]. *PLoS One*, 2025, 20(7): e0325850.
- 40 Hopwood M. Anxiety symptoms in patients with major depressive disorder: commentary on prevalence and clinical implications[J]. *Neurol Ther*, 2023, 12(S1): 5–12.
- 41 Krawutschke M, Teufel M, Schmidt K, et al. Neurofeedback reduces P300 amplitudes to intensely emotive pictures in depressed cancer patients[J]. *Clin EEG Neurosci*, 2025, 56(3): 217–229.
- 42 Trambaioli LR, Kohl SH, Linden DEJ, et al. Neurofeedback training in major depressive disorder: a systematic review of clinical efficacy, study quality and reporting practices[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2021, 125: 33–56.
- 43 Wang SY, Lin IM, Fan SY, et al. The effects of alpha asymmetry and high-beta down-training neurofeedback for patients with the major depressive disorder and anxiety symptoms[J]. *J Affect Disord*, 2019, 257: 287–296.
- 44 李春梅. 帕罗西汀联合生物反馈治疗抑郁症的临床效果研究[J]. *中国现代药物应用*, 2025, 19(15): 108–110. [Li CM. Study on the clinical effect of paroxetine combined with biofeedback in the treatment of depression[J]. *Chinese Journal of Modern Drug Application*, 2025, 19(15): 108–110]
- 45 Tosti B, Corrado S, Mancone S, et al. Neurofeedback training protocols in sports: a systematic review of recent advances in performance, anxiety,

- and emotional regulation[J]. *Brain Sci*, 2024, 14(10): 1036.
- 46 Fietz J, Auer G, Plener P, et al. Empathy and event related potentials before and after EEG based neurofeedback training in autistic adolescents[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 30824.
- 47 Thompson L, Thompson M, Reid A. Neurofeedback outcomes in clients with asperger's syndrome[J]. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 2010, 35(1): 63-81.
- 48 Kang J, Lv S, Li Y, et al. The effects of neurofeedback training on behavior and brain functional networks in children with autism spectrum disorder[J]. *Behav Brain Res*, 2025, 481: 115425.
- 49 Coben R, Linden M, Myers TE. Neurofeedback for autistic spectrum disorder: a review of the literature[J]. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 2010, 35(1): 83-105.
- 50 Voigt JD, Mosier M, Tendler A. Systematic review and Meta-analysis of neurofeedback and its effect on posttraumatic stress disorder[J]. *Front Psychiatry*, 2024, 15: 1323485.
- 51 van der Kolk BA, Hodgdon H, Gapen M, et al. A randomized controlled study of neurofeedback for chronic PTSD[J]. *PLoS One*, 2016, 11(12): e0166752.
- 52 Nicholson AA, Densmore M, Frewen PA, et al. Homeostatic normalization of alpha brain rhythms within the default-mode network and reduced symptoms in post-traumatic stress disorder following a randomized controlled trial of electroencephalogram neurofeedback[J]. *Brain Commun*, 2023, 5(2): fca068.
- 53 Nicholson AA, Ros T, Densmore M, et al. A randomized, controlled trial of alpha-rhythm EEG neurofeedback in posttraumatic stress disorder: a preliminary investigation showing evidence of decreased PTSD symptoms and restored default mode and salience network connectivity using fMRI[J]. *Neuroimage Clin*, 2020, 28: 102490.

收稿日期: 2025 年 10 月 14 日 修回日期: 2026 年 02 月 02 日

本文编辑: 杨室淞 曹越

引用本文: 赵思宁, 原婧然, 白莹, 等. 脑电神经反馈对情绪障碍的环路机制与网络重组[J]. 医学新知, 2026, 36(6): 686-692. DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202510043.

Zhao SN, Yuan JR, Bai Y, et al. Circuit mechanism and network reorganization of electroencephalographic neurofeedback on emotional disorders[J]. *Yixue Xinzhi*, 2026, 36(6): 686-692. DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202510043.