

李宸芮, 吴毅明, 陈新旺, 等. 脑电静息微状态在广泛性焦虑症中的应用与研究进展 [J]. 中国比较医学杂志, 2025, 35(2): 158-164.

Li CR, Wu YM, Chen XW, et al. Application and research progress of electroencephalographic resting microstates in generalized anxiety disorder [J]. Chin J Comp Med, 2025, 35(2): 158-164.

doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2025.02.017

脑电静息微状态在广泛性焦虑症中的应用 与研究进展

李宸芮¹, 吴毅明^{1,2*}, 陈新旺^{1,2}, 和亚勇¹, 南山竹¹

(1. 河南中医药大学, 郑州 450046; 2. 河南中医药大学第三附属医院, 郑州 450008)

【摘要】 近年来, 在复杂的社会环境下, 广泛性焦虑障碍 (generalized anxiety disorder, GAD) 的发病率处于逐年上升阶段。目前该疾病的诊断常依赖于 DSM-5 和 ICD-10 的标准, 存在一定主观性和局限性, 而了解大脑网络功能和结构连接的内在活动已被证明是当代神经科学研究的一个重要目标。脑电图 (electroencephalogram, EEG) 微状态能够观测到宽泛的频率成分, 捕捉大脑活动的动态变化, 以此为 GAD 诊断的准确性提供一种新思路。本文深入探讨 EEG 微状态特征, 探讨 GAD 患者在大脑功能网络方面存在的异常现象, 旨在进一步为 GAD 患者提供明确诊断、优化治疗效果并提高医疗质量。

【关键词】 广泛性焦虑障碍; 脑电图; 微状态

【中图分类号】 R-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856 (2025) 02-0158-07

Application and research progress of electroencephalographic resting microstates in generalized anxiety disorder

LI Chenrui¹, WU Yiming^{1,2*}, CHEN Xinwang^{1,2}, HE Yayong¹, NAN Shanzhu¹

(1. Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China.

2. the Third Affiliated Hospital of Henan University of Traditional Chinese Medicine, Zhengzhou 450008)

【Abstract】 The incidence of generalized anxiety disorder (GAD) has recently been increasing year by year, in a complex social environment. The diagnosis of GAD currently often relies on DSM-5 and ICD-10 criteria, which include subjectivity and limitations. Understanding the intrinsic activity of brain network functions and structural connectivity is an important goal of contemporary neuroscience research. Electroencephalographic microstates are capable of observing broad frequency components and capturing dynamic changes in brain activity, thus providing a novel perspective on the accuracy of GAD diagnosis. This review considers the electroencephalographic microstate

【基金项目】 2022 年度省级科技研发计划联合基金 (222301420083); 河南省中医药科学研究专项课题 (2022ZYD12); 河南省“双一流”创建学科中医学科学研究专项 (HSRP-DFCTCM-T-10)。

【作者简介】 李宸芮 (1998—), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 脊柱病中医康复的临床研究。E-mail: li15236786908@163.com

【通信作者】 吴毅明 (1982—), 男, 硕士, 副主任医师, 硕士生导师, 研究方向: 脊柱病中医康复的临床研究。

E-mail: wuyimingsir@163.com

features and explores the abnormalities in the functional brain network in patients with GAD, with the aim of providing a clear diagnosis, optimizing the therapeutic efficacy, and improving the quality of medical care for patients with GAD.

【Keywords】 generalized anxiety disorder; electroencephalogram; microstates

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

广泛性焦虑障碍 (generalized anxiety disorder, GAD) 是一种以焦虑为主要表现的精神障碍^[1], 常伴有心悸、紧张、易怒、敏感、睡眠障碍等植物神经症状, 由于其发病程度被严重低估, 经常会出现诊断及治疗不足的情况。据调查显示, 在当下复杂的社会环境中, 尤其是新冠肺炎疫情过后, 人们生活、学习和工作等各方面压力增大, 导致 GAD 的患病率逐渐增加^[2]。《柳叶刀》杂志于 2019 年在中国首次展开全国性精神障碍流行病学调查, 结果显示 GAD 的患病率是 4.98%, 在所有类型的精神疾病中位列首位^[3]。此外, 该疾病往往与其他疾病高度共存, 随着病情发展, 失眠、抑郁、药物滥用的风险将明显增加, 更甚者会患上严重的身体疾病从而导致患者的生活质量下降^[4], 给患者及其家庭、社会带来了严重的负担。

目前, GAD 的常规诊断主要根据 DSM-5 和 ICD-10 标准采用症状诊断法^[5-6]。通常来说, 医生会根据心理评估工具、自我评估问卷和患者的访谈记录作出综合判断。然而, 这种评估方法存在的问题也较为明显, 比如会由于医生经验不足或患者自身选择偏向出现强烈的主观性、诊断深度不足、泛化性有限以及缺乏量化标准等^[7-8]。故而, 寻找可靠的诊断标志物、深入探究 GAD 的发病机制已经成为目前研究的重点方向。近年来, 随着数字技术的快速发展, 神经影像学的进步为揭示 GAD 患者大脑功能及其发病机制提供了新的研究方向, 吸引越来越多学者的关注^[9-10]。因此, 根据时间分辨率较高的多通道脑电图 (electroencephalogram, EEG) 进行静息态微状态分析有助于研究人员和临床医生全面了解大脑皮层神经元的电生理活动, 弥补传统诊断的局限性, 提高疾病的诊断准确率, 并能综合探究 GAD 患者大脑结构及其功能状态^[11]。本文从 EEG 静息微状态的原理、EEG 在 GAD 中的临床应用及进展方面进行综述, 并对 EEG 静息微状态诊断 GAD 的未来进行展望。

1 EEG 的设备特点及静息微状态特征

1.1 EEG 的发展与特点

德国精神科医生 Hans Berger 通过特制的电极从人的头皮上采集到首个脑电信号^[12], 他将其命名为 EEG, 即脑电图。随着计算机及相关科技的发展, EEG 的通道数量已从最初的 1~2 位扩展到多达 512 位, 大幅提升了脑电记录的空间分辨率。然而, 电极数量过多不仅增加了成本, 而且更大可能会形成噪声干扰^[13]。为平衡空间分辨率、测试时间和噪声控制, 当前临床上最常用的 EEG 配置为 32 位或 64 位电极系统^[14], 这种方案在优化效果与效率之间达到了较好的平衡。此外, EEG 设备各通道的信号采样率也从早期的 100 Hz 大幅提升到如今的 20 000 Hz, 极大地改善了采集信号的精度和质量。更高的采样率使得研究者能够捕捉到更细微的神经活动, 揭示大脑功能变化的更多细节。为了确保电极能够有效记录脑电信号, 研究者通常会在受试者的头皮上涂抹导电膏, 这不仅提高了导电性能, 还减少了信号传输中的干扰, 从而使脑电信号更加清晰、稳定^[15]。这些技术上的进步, 不仅提升了 EEG 的实用性, 还为临床诊断和科学研究提供了更加可靠的工具, 推动了神经科学和心理健康研究的发展。

EEG 通过在头皮上放置电极, 记录大脑皮质中锥体神经元及其顶树突的突触后电位变化, 来探索神经元活动。由于 EEG 具有极高的时间分辨率, 能够以毫秒级精度捕捉神经活动, 这与神经传导的时间尺度相匹配。这种精确的时间分辨率使 EEG 能够实时反映大脑在动态活动期间的功能变化。EEG 捕捉的自发脑电信号能够体现大脑皮层神经元细胞群在进行自发性、节律性的活动, 这蕴含了大量的生理病理学信息, 不仅适用于研究正常脑功能, 还能够检测异常活动,

如癫痫发作、抑郁症、焦虑症等精神疾病的特征性脑电模式^[16-17]。由于其低成本、易操作以及灵活的感兴趣区域配置,EEG 已被广泛应用于揭示各种精神障碍类疾病的病因^[18]。与此同时,通过分析 EEG 信号的波幅、功率等参数绘制的 EEG,已成为某些精神疾病的重要诊断工具^[19]。综上,由于 EEG 的无创性、简便性以及实时监测性等特点使得其在神经科学和临床诊断领域中,尤其是在探索精神病理学方面,发挥着不可替代的作用。

1.2 EEG 与其他神经影像技术的区别

近几十年来,神经影像技术的进步推动着脑科学研究、脑认知技术的不断更新^[20]。目前临床上常用于检测和分析 GAD 的神经影像技术主要涵盖了功能性磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI)、正电子发射计算机断层扫描 (positron emission tomography, PET)、结构磁共振成像 (structural magnetic resonance imaging, sMRI)、近红外光谱成像 (functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 和 EEG,致力于从多个尺度与维度深入揭示 GAD 患者大脑在功能与结构上的异常表现。其中, fMRI 虽然具有较高的空间分辨率,但时间分辨率较低,并且容易受到多种干扰因素的影响,限制了其在快速神经活动检测中的应用^[21-22]。PET 虽然空间分辨率同样出色,但其存在一定的安全隐患,如需要注射放射性示踪剂,且成本高昂,成像时间较长,不适合常规或频繁使用^[23-25]。fNIRS 通常用于任务状态下的大脑活动检测,但其探测深度有限,难以捕捉到大脑皮层的深层结构和皮层下核团的活动,临床应用也相对较少,同时相关校正算法仍有待完善^[26]。相较而言,尽管 EEG 存在空间分辨率较低、信噪比稍差以及数据分析复杂等不足,但其在神经科学研究和临床诊断中仍扮演着不可或缺的角色^[27]。首先, EEG 的时间敏感度强,不仅能够实时记录大脑活动,还能发现一些隐藏的脑电信号,及时反映大脑动态活动时的功能变化,在动态监测神经活动、研究脑电节律以及诊断各类神经和精神障碍等方面表现出独特的优势。其次, EEG 具有检测时间短、无创性、不存在安全隐患等特点,使得患者更易接受。此外, EEG 设备精密,体积小巧,便于携带,可适用于临床环境、实验室内等多种情境,进一步提升了其实用性^[28]。

因此, EEG 凭借其操作简便、成本较低、无创以及检测耗时短等显著优势,在神经科学研究中占据着重要位置,并在临床诊断中得以广泛应用,成为研究大脑功能与疾病机制的关键工具之一^[29]。

1.3 EEG 静息微状态的特征

LEHMANN 等^[30]于 1987 年首次将 8~12 Hz 频段的脑电活动自适应地细分为一系列暂时稳定的、离散的头皮电位地图,并将其称为“微状态 (microstates)”。具体而言,静息状态下的大脑自发性宽频脑电活动 EEG 微状态可以通过限定的头皮电场图来详尽描述。这些头皮电场图能够在极短的时间内 (介于 60~120 ms) 维持着一种相对恒定的状态,随后快速变为另一个稳定的地形图。也就是说, EEG 微状态特指通过多通道脑电图记录所获取到的头皮电场图中所呈现的全局性特征模式^[31],这些模式在时间维度上表现出一种结构化的动态变迁过程。相较于其他脑电信号研究方法, EEG 微状态分析法特殊之处在于能够同步纳入全部电极捕捉到的 EEG 信号,并据此构建出对脑部功能状态的全局性、综合性表征。这些短暂的拓扑稳定阶段揭示了头皮电位场的瞬时变化,反映了神经元活动的全局协调性随时间的动态变化。微状态的研究使用多通道 EEG 阵列来捕捉大脑活动的亚秒级动态变化,这反映了大脑处理信息的基本步骤,是实时大脑功能网络活动的表现。尽管没有外界刺激,不同的 EEG 微状态仍在不断切换,这表明大脑即便在静息状态下,也并非简单的静止不动,而是在进行有组织的内部活动,以优化其对未来刺激的反应能力。这种微状态的动态变化暗示了大脑以全局神经元协调的方式运作。EEG 微观状态中最经典的地形图是通过地形聚类技术分为微状态 A、B、C 和 D,分别与“听觉”“视觉”“显著性”和“注意力”网络的激活有关^[32],微状态特征 (如持续时间、发生率、覆盖率和转换概率) 可作为精神和神经系统疾病以及心理社会特征的神经标志物^[33-34]。微状态的切换可以看作是大脑内部不同功能网络之间的协调与切换,为我们理解大脑在不同认知或静息状态下的功能组织提供了重要线索。EEG 微状态因此成为揭示大脑实时功能网络活动和探索认知功能及精神障碍机制的重要工具。

2 EEG 微状态在 GAD 中的应用

2.1 EEG 微状态量化 GAD 的意义

EEG 微状态分析是一种近年来兴起的脑电分析技术,旨在揭示多通道 EEG 地形图的全局拓扑模式,具备高时间分辨率和良好的重测可靠性,除了能够检测个体的高级认知功能,还能够反映个体的反应及其情绪变化,在 GAD 的诊断和治疗过程中展现出显著的潜力^[11]。随着微状态分析方法的不断发展与完善,其为脑电信号量化提供了新的方法。王海力等^[35]总结发现,不同脑疾病和脑认知状态会直接影响 EEG 微状态的时间序列特征,由此可见,EEG 微状态分析能够反映脑电信号的多种神经生理学特征,已成为研究脑疾病及认知产生原理和发展机制的有效方法。还有研究表明,特定微状态的动态特征可以将自闭症谱系障碍^[36]、双相情感障碍^[37]、意识障碍^[38]、精神分裂症^[39],以及抑郁症^[40]的个体与健康、典型发展人群样本区分开来。总的来说,了解自发 EEG 微状态的典型和非典型动态对于利用微状态作为生物标志物以区分个体的心理健康、疾病或认知功能至关重要,通过综合利用 EEG 微状态的多项特征信息有助于研究人员深入理解疾病的发生与发展。

2.2 GAD 患者的 EEG 微状态特征

深入研究 GAD 状态下微状态的变化,有助于我们全面理解该疾病的发生和发展过程。通过观察微状态随时间的动态变化,能够识别大脑网络在不同状态下的表现,从而揭示潜在的病理生理机制^[41]。已有研究表明,健康个体的微观状态 A 持续时间较短,而 GAD 患者的 D 类微状态发生频率显著增加,这一现象反映了 GAD 患者在大脑网络连接性或神经活动的某些方面存在异常^[42]。具体而言,这种变化可能表明患者在处理情绪、认知和行为反应时,大脑功能网络的协调和整合能力受到影响,从而影响整体心理健康。这种理解不仅有助于掌握 GAD 的具体表现,还可能为制定更有效的干预和治疗策略提供理论依据。

不仅如此,既往研究揭示了 GAD 患者的多维度 EEG 特征发生了显著的异常变化,且特定大脑区域间的信息出现了异常交流^[43]。同时也有脑电研究者观察到,GAD 患者表现出 PSD 的 β 节

律显著增加和 α_1 节律减少,同时所有频段中额叶与其他脑区之间的远程功能连接 (functional connectivity, FC) 降低^[44]。这些发现支持了先前关于精神疾病中不连通性的假设,并进一步阐明了异常时频 EEG 特征的分布模式,这可能为 GAD 的自动诊断提供潜在应用。

同时也有学者基于离散 EEG 的连接网络研究揭示了焦虑症亚型的一些同质性特征:在静息状态下,GAD 表现出增强的网络复杂性和 θ 网络效率,而社交焦虑障碍则显示出明显的强直性过度兴奋,并扩展到任务相关的功能状态,也就是说焦虑发作会导致 GAD 患者的 δ 和 β 连接网络失调^[45]。这说明从微观和宏观的 EEG 网络科学视角重新审视与焦虑相关的病因、维持机制及治疗,能够推动该领域的发展并深化对焦虑的理解。

2.3 EEG 微状态对 GAD 患者的病情评价

据研究显示,多样的心理状态与思维类型与各类微状态拓扑结构间潜伏着相关性^[46]。故而有学者将微状态视为情感与认知构成的基本心理生理学单位,并形象地称为“思想的原子”^[47]。在这一理论框架下,意识流的主观连续性由所辨识的“状态单元”所构成,正常与异常的内心状态可能由此展现出各异的微状态序列模式。依据这一理论框架,得以借助微状态的频率、持续时长以及序列组合来阐释 GAD 患者心理异常症状及特殊行为模式的出现,进而迅速并精准地反映患者的真实认知情况。由于情绪波动与情感障碍可能对患者微状态特征产生即时且同步的动态变化,近年来,EEG 微状态分析技术已成为探测大脑活动潜在异常状态的重要工具,并得到了广泛应用。

根据以上国内外研究,通过监测微状态的变化,临床医生可以更准确地评估患者的病情,进而优化治疗方案,监测治疗效果。这不仅提高了对 GAD 的诊断精确性,也为个性化治疗提供了重要依据。因此,EEG 微状态的研究不仅丰富了我们对于 GAD 的理解,还有助于推动相关领域的发展,为患者带来更好的治疗效果。

3 EEG 微状态在评估 GAD 时的不足

综上所述,EEG 在辅助诊断方面展现出一定

的潜力,通过 EEG 评估疾病的病程可以帮助医生及时干预,并预测疾病的治疗效果。然而,目前在头皮区域多通道 EEG 信号的采集与预处理技术中仍存在一些问題。首先,头发的遮蔽会影响 EEG 信号的质量,使得信号容易受到身体活动、吞咽、眨眼等因素的干扰,从而产生伪迹^[48]。虽然目前已有去除伪迹的相关技术,但对于 EEG 想要广泛应用到临床中仍会受到些许限制。其次,由于结果的不稳定性和个体差异性,大多数研究仍然局限于实验室环境,真正能直接用于临床诊断的案例较少。本文从知网、PubMed 和 Web of Science 数据库检索以获取符合条件的记录。使用搜索词“GAD, EEG and microstate”或“brain and microstate”或“GAD and EEG”。时间范围为 2000 年 1 月 1 日至 2024 年 10 月 20 日。对系统搜索得到的标题和摘要进行筛选,以确定可能被纳入分析的潜在研究。经筛选归纳,目前仅有几篇文献与之相关,且文章标准不一,对临床参考意义不大。

故而,关于 GAD 的微状态特征,学界尚未达成明确且一致的界定,并且目前尚缺乏自动化辅助诊断的模型设计与开发所需的技术指导,以至于临床上对于 GAD 的早期识别与精准诊断仍面临显著挑战。因此,未来的研究应致力于填补这一空白,通过发展静息态下的 EEG 微状态研究,构建更为有效的诊断和治疗模型,以进一步提升 GAD 的临床诊断能力和治疗效果。这将为医生提供更加可靠的工具,同时帮助 GAD 患者改善健康状况,并推动焦虑症相关研究的深入发展。

4 总结与展望

随着神经电生理学技术与计算机科学的不断发展,具有高时间分辨率的 EEG 作为一种先进的神经影像学技术,逐渐成为获取大规模神经网络功能实时动态信息的核心工具。尽管是在头皮上进行信号采集,但仍能反映大脑深部神经元的活动。在亚秒级的时间精度上,EEG 微状态能够描述头皮电位地形图的准稳态特征,既保留了脑电信号的时域变化信息,又展示了分布在头皮上的电位空间特性。EEG 微状态反映了神经元之间的协调性和信息处理过程,通过解决如何有效捕捉和解读大脑内部动态活动的问题,使得

经过分析的脑电信号能够从解剖学上解释大脑活动,具备潜在的神经生理学相关性,其序列中蕴含大量的病理语义内容以此为 GAD 的诊断和治疗开辟了新的可能。

尽管 EEG 在 GAD 的辅助诊断方面展现出潜力,但由于其不稳定、个体差异较大,在技术和应用层面仍存在一定不足。因此,未来可以考虑结合 EEG 分析、心理学和神经功能影像学等方法,深入探讨 GAD 的发病机制和治疗策略。这将有助于填补现有研究的空白,推动 EEG 微状态研究的进一步发展,为理解 GAD 患者情绪背后的神经机制提供了一条全新的解释路径,从而提高 GAD 的临床诊断和治疗效果,为患者提供更优质的医疗支持。

参考文献:

- [1] SZUHANY K L, SIMON N M. Anxiety disorders: a review [J]. JAMA, 2022, 328(24): 2431-2445.
- [2] COVID-19 Mental Disorders Collaborators. Global prevalence and burden of depressive and anxiety disorders in 204 countries and territories in 2020 due to the COVID-19 pandemic [J]. Lancet, 2021, 398(10312): 1700-1712.
- [3] HUANG Y, WANG Y, WANG H, et al. Prevalence of mental disorders in China: a cross-sectional epidemiological study [J]. Lancet Psychiatry, 2019, 6(3): 211-224.
- [4] 刘冰,王红梅,余雨滋,等. 广泛性焦虑障碍心理治疗研究进展 [J]. 全科护理, 2021, 19(19): 2612-2615.
LIU B, WANG H M, YU Y Z, et al. Research progress on psychotherapy for patients with generalized anxiety disorder [J]. Chin Gen Pract Nurs, 2021, 19(19): 2612-2615.
- [5] PARK S C, KIM Y K. Anxiety disorders in the DSM-5: changes, controversies, and future directions [J]. Adv Exp Med Biol, 2020, 1191: 187-196.
- [6] GAEBEL W, STRICKER J, KERST A. Changes from ICD-10 to ICD-11 and future directions in psychiatric classification [J]. Dialogues Clin Neurosci, 2020, 22(1): 7-15.
- [7] VU V, CONANT-NORVILLE D. Anxiety: recognition and treatment options [J]. Psychiatr Clin North Am, 2021, 44(3): 373-380.
- [8] DEGEORGE K C, GROVER M, STREETER G S. Generalized anxiety disorder and panic disorder in adults [J]. Am Fam Physician, 2022, 106(2): 157-164.
- [9] ABI-DARGHAM A, MOELLER S J, ALI F, et al. Candidate biomarkers in psychiatric disorders: state of the field [J]. World Psychiatry, 2023, 22(2): 236-262.

- [10] 李潇然, 仲顺安. 神经电信号记录与刺激系统在深部脑电刺激治疗中的应用 [J]. 中国比较医学杂志, 2017, 27(2): 93-97.
- LI X R, ZHONG S A. Application of neuroelectrical signal recording and neural stimulation system in deep brain stimulation therapy [J]. Chin J Comp Med, 2017, 27(2): 93-97.
- [11] WANG D, WEN W, ZHANG X, et al. Analysis of altered brain dynamics during episodic recall and detection of generalized anxiety disorder [J]. Neuroscience, 2023, 524: 37-51.
- [12] İNCE R, ADANIR S S, SEVMEZ F. The inventor of electroencephalography (EEG): Hans Berger (1873-1941) [J]. Childs Nerv Syst, 2021, 37(9): 2723-2724.
- [13] LUCK S J. An introduction to the event-related potential technique [M]. Cambridge, Mass: MIT Press, 2005.
- [14] AURLIEN H, GJERDE I O, AARSETH J H, et al. EEG background activity described by a large computerized database [J]. Clin Neurophysiol, 2004, 115(3): 665-673.
- [15] TOPOR M, OPITZ B, DEAN P J A. In search for the most optimal EEG method: a practical evaluation of a water-based electrode EEG system [J]. Brain Neurosci Adv, 2021, 5: 23982128211053698.
- [16] GALLINAT J, MULERT C, LEICHT G. Significance of clinical electroencephalogram in psychiatry [J]. Nervenarzt, 2016, 87(3): 323-339.
- [17] LARSEN P M, WÜSTENHAGEN S, TERNEY D, et al. Seizure provocation in EEG recordings: a data-driven approach [J]. Epileptic Disord, 2024, 26(3): 322-331.
- [18] 柏亚妹, 吕玉婵, 宋玉磊, 等. 脑电图在认知功能障碍疾病早期筛查中的应用价值 [J]. 护理学, 2024, 13(6): 770-776.
- BAI Y M, LYU Y C, SONG Y L, et al. Electroencephalogram in the application status of cognitive function disorder [J]. Nurs Sci, 2024, 13(6): 770-776.
- [19] 汤翔嵘, 王晓刚, 陈桃林, 等. 精神障碍的神经电生理循证医学证据 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2021, 48(10): 1157-1176.
- TANG X R, WANG X G, CHEN T L, et al. Evidence-based medicine biomarkers of neuroelectrophysiology for mental disorders [J]. Prog Biochem Biophys, 2021, 48(10): 1157-1176.
- [20] SHACKMAN A J, FOX A S. Two decades of anxiety neuroimaging research: new insights and a look to the future [J]. Am J Psychiatry, 2021, 178(2): 106-109.
- [21] SADRAEE A, PAULUS M, EKHTIARI H. fMRI as an outcome measure in clinical trials: a systematic review in clinicaltrials. gov [J]. Brain Behav, 2021, 11(5): e02089.
- [22] SINDERMAN L, REDLICH R, OPEL N, et al. Systematic transdiagnostic review of magnetic-resonance imaging results: Depression, anxiety disorders and their co-occurrence [J]. J Psychiatr Res, 2021, 142: 226-239.
- [23] WU J C, BUCHSBAUM M S, HERSHEY T G, et al. PET in generalized anxiety disorder [J]. Biol Psychiatry, 1991, 29(12): 1181-1199.
- [24] HOOKER J M, CARSON R E. Human positron emission tomography neuroimaging [J]. Annu Rev Biomed Eng, 2019, 21: 551-581.
- [25] 涂清强. 动物分子影像技术在心肌梗死研究中的应用 [J]. 中国比较医学杂志, 2020, 30(7): 145-150.
- TU Q Q. Application of animal molecular imaging in myocardial infarction [J]. Chin J Comp Med, 2020, 30(7): 145-150.
- [26] RAHMAN M A, SIDDIK A B, GHOSH T K, et al. A narrative review on clinical applications of fNIRS [J]. J Digit Imaging, 2020, 33(5): 1167-1184.
- [27] GREENBLATT A S, BENICZKY S, NASCIMENTO F A. Pitfalls in scalp EEG: Current obstacles and future directions [J]. Epilepsy Behav, 2023, 149: 109500.
- [28] ARMAND LARSEN S, KLOK L, LEHN-SCHIÖLER W, et al. Low-cost portable EEG device for bridging the diagnostic gap in resource-limited areas [J]. Epileptic Disord, 2024, 26(5): 694-700.
- [29] ZHANG H, ZHOU Q Q, CHEN H, et al. The applied principles of EEG analysis methods in neuroscience and clinical neurology [J]. Mil Med Res, 2023, 10(1): 67.
- [30] LEHMANN D, OZAKI H, PAL I. EEG alpha map series: brain micro-states by space-oriented adaptive segmentation [J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1987, 67(3): 271-288.
- [31] TARAILIS P, KOENIG T, MICHEL C M, et al. The functional aspects of resting EEG microstates: a systematic review [J]. Brain Topogr, 2024, 37(2): 181-217.
- [32] BRITZ J, VAN DE VILLE D, MICHEL C M. BOLD correlates of EEG topography reveal rapid resting-state network dynamics [J]. Neuroimage, 2010, 52(4): 1162-1170.
- [33] SCHILLER B, SPERL M F J, KLEINERT T, et al. EEG microstates in social and affective neuroscience [J]. Brain Topogr, 2024, 37(4): 479-495.
- [34] KLEINERT T, KOENIG T, NASH K, et al. On the reliability of the EEG microstate approach [J]. Brain Topogr, 2024, 37(2): 271-286.
- [35] 王海力, 尹宁, 徐桂芝. 脑电图微状态分析及应用研究进展 [J]. 生物医学工程学杂志, 2023, 40(1): 163-170.

- WANG H L, YIN N, XU G Z. Advances in methods and applications of electroencephalogram microstate analysis [J]. *J Biomed Eng*, 2023, 40(1): 163–170.
- [36] TAKARAE Y, ZANESCO A, KEEHN B, et al. EEG microstates suggest atypical resting-state network activity in high-functioning children and adolescents with autism spectrum development [J]. *Dev Sci*, 2022, 25(4): e13231.
- [37] DAMBORSKÁ A, PIGUET C, AUBRY J M, et al. Altered electroencephalographic resting-state large-scale brain network dynamics in euthymic bipolar disorder patients [J]. *Front Psychiatry*, 2019, 10: 826.
- [38] ZHANG C, YANG Y, HAN S, et al. The temporal dynamics of Large-Scale brain network changes in disorders of consciousness: a Microstate-Based study [J]. *CNS Neurosci Ther*, 2023, 29(1): 296–305.
- [39] SUN Q, ZHOU J, GUO H, et al. EEG microstates and its relationship with clinical symptoms in patients with schizophrenia [J]. *Front Psychiatry*, 2021, 12: 761203.
- [40] 薛奕童, 李奎良, 张晶轩, 等. 不同抑郁程度个体的静息态脑电微状态特点研究 [J]. *第三军医大学学报*, 2021, 43(24): 2609–2617.
- XUE Y T, LI K L, ZHANG J X, et al. Characteristics of resting-state electroencephalogram microstates in individuals with different levels of depressive symptoms [J]. *J Third Mil Med Univ*, 2021, 43(24): 2609–2617.
- [41] MICHEL C M, KOENIG T. EEG microstates as a tool for studying the temporal dynamics of whole-brain neuronal networks: a review [J]. *Neuroimage*, 2018, 180(Pt B): 577–593.
- [42] BASSETT D S, XIA C H, SATTERTHWAITE T D. Understanding the emergence of neuropsychiatric disorders with network neuroscience [J]. *Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging*, 2018, 3(9): 742–753.
- [43] STAM C J, NOLTE G, DAFFERTSHOFER A. Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources [J]. *Hum Brain Mapp*, 2007, 28(11): 1178–1193.
- [44] SHEN Z, LI G, FANG J, et al. Aberrated multidimensional EEG characteristics in patients with generalized anxiety disorder: a machine-learning based analysis framework [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(14): 5420.
- [45] SCHOENBERG P L A. Linear and nonlinear EEG-based functional networks in anxiety disorders [J]. *Adv Exp Med Biol*, 2020, 1191: 35–59.
- [46] MILZ P, FABER P L, LEHMANN D, et al. The functional significance of EEG microstates—Associations with modalities of thinking [J]. *Neuroimage*, 2016, 125: 643–656.
- [47] LEHMANN D, STRIK W K, HENGGELE B, et al. Brain electric microstates and momentary conscious mind states as building blocks of spontaneous thinking: I. Visual imagery and abstract thoughts [J]. *Int J Psychophysiol*, 1998, 29(1): 1–11.
- [48] SWEENEY K T, WARD T E, MCLOONE S F. Artifact removal in physiological signals—practices and possibilities [J]. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, 2012, 16(3): 488–500.

[收稿日期]2024–11–07