

临床脑电图技术发展历程与前沿展望

于森 刘秀云 岳伟

【摘要】 脑电图是神经科学领域重要的科研和诊断工具,可以直观监测并记录脑组织神经元群的电活动。凭借无创性、便捷性、实时性和连续性等优势,脑电图技术历经百年发展与革新。随着计算机技术和多模态成像技术的发展以及跨学科的融合,脑电图技术在癫痫、睡眠障碍和重症监护等多领域具有重要应用价值。本文回顾临床脑电图技术的百年发展历程,综述脑电图技术的临床应用,展望发展前沿,旨在提高临床对脑电图技术的理解和应用。

【关键词】 脑电描记术; 癫痫; 睡眠觉醒障碍; 危重病人医疗; 医学史; 综述

The history and frontiers of clinic electroencephalography technology

YU Miao¹, LIU Xiu-yun², YUE Wei¹

¹Department of Neurology, Tianjin Huanhu Hospital; Clinical College of Neurology, Neurosurgery and Neurorehabilitation, Tianjin Medical University, Tianjin 300350, China

²School of Pharmaceutical Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Corresponding author: YUE Wei (Email: hhyuewei2008@163.com)

【Abstract】 Electroencephalography (EEG), which can intuitively monitor and record the discharge activities of neuronal groups in the brain, is a crucial scientific and clinical diagnostic technique in the field of neuroscience. EEG has been developed and innovated for nearly a century, and it offers advantages of non-invasiveness, convenience, real-time, and continuity. The rapid advancement and multidisciplinary integration of computer technology and other imaging techniques has led to the application of EEG technology in a wide range of areas, including epilepsy, sleep disorders, and critical care. The purpose of this article is to enhance clinical comprehension and implementation of EEG technology by reviewing its development history, clinical applications, and future prospects.

【Key words】 Electroencephalography; Epilepsy; Sleep wake disorders; Critical care; History of medicine; Review

This study was supported by Tianjin Key Medical Discipline (Specialty) Construction Project (No. TJYXZDXK-052B).

Conflicts of interest: none declared

早在 18 世纪,意大利解剖学家 Luigi Galvani 在研究青蛙腿部肌肉与电流之间的联系时发现了生物电现象^[1],极大地促进了生理学和物理学的发展。脑电图(EEG)作为一种记录生物电活动的技术,可以直观记录并监测神经元群的电活动^[2]。脑电图记录的电信号由大脑皮质 IV ~ V 层锥体神经元树突膜

的离子电流产生^[3],通过头皮表面电极或颅内植入电极记录离子电流产生的电压波动,再应用电子放大技术将随时间变化的脑组织电压波动放大并描记在纸上或显示在示波屏上,从而更直观地理解生理和病理状态下脑电活动。同时,脑电图还催生出诱发电位等多种相关电生理检测技术。凭借其便捷性、实时性和可重复性等优势^[4],临床脑电图技术的发展已历经百年。本文回顾临床脑电图技术的发展历程,综述其临床应用与前沿进展,以期提高临床对脑电图技术的应用和判读。

一、临床脑电图技术的发展历程

脑电图技术的发展始于德国精神病学家 Hans Berger 的研究,1924 年他将电极置入颅脑创伤患者

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2024.12.014

基金项目:天津市医学重点学科(专科)建设项目(项目编号:TJYXZDXK-052B)

作者单位:300350 天津市环湖医院神经内科 天津医科大学神经内外科及神经康复临床学院(于森,岳伟);300072 天津大学药物科学与技术学院(刘秀云)

通讯作者:岳伟,Email:hhyuewei2008@163.com

创伤处大脑皮质,成功记录到规律性电活动^[5]。随后他又通过无线电设备放大脑电活动并记录在方格纸上,首次使用“脑电图”这一术语;他还发现脑电波可随受试者意识状态的改变而发生节律性变化,并将正常人安静闭目时主要出现于枕区和顶区的 10 Hz、50 μ V 波形命名为“ α 波”,而当受试者睁眼注视物体时, α 波消失,代以 18~20 Hz、20~30 μ V 波形,称为“ β 波”^[6]。该研究于 1929 年正式发表,奠定了现代脑电图技术的基础,但当时未引起关注。直至 1934 年,英国神经病学家 Edgar Douglas Adrian 和 Brian Matthews 证实了 Hans Berger 的发现^[7],才引起对脑电频率和振幅的深入研究。1935 年,Frederic A. Gibbs 率先描述特征性 3 Hz 棘慢复合波与失神发作之间的相关性,开创临床脑电图领域^[8];1937 年,Frederic A. Gibbs 和 William G. Lennox 进一步对失神发作、全面性强直-阵挛发作(GTCS)和部分性发作等脑电模式进行描述和区分,同时对发作间期痫样放电及局灶性放电进行描述^[9]。20 世纪 30 年代末,脑电图逐渐被神经疾病和精神疾病领域所认识并接受。1941 年,Gibbs 夫妇绘制第一版《脑电图谱》;1947 年,他们首次提出睡眠可以诱发大脑异常放电,从而提高异常放电的脑电图检出率^[9]。1945 年,首届国际脑电图会议在英国伦敦召开,标志着脑电图研究进入新的阶段^[10]。1958 年,Herbert Jasper 提出国际 10-20 系统^[11],通过标准化电极放置位置,确保脑电图检测的可重复性和可对比性,使得不同实验室和医疗中心的脑电数据可以有效比较和分析,从而提高数据的一致性和可靠性。此外,20 世纪 50~60 年代,放大器和滤波器技术显著改进,使得脑电信号的记录更加稳定,信噪比更高,从而捕捉到更细微的脑电活动;多通道脑电描记仪的出现可以同时记录多个脑区电活动,从而更全面了解神经功能;随着数字化和计算机技术的引入,得以快速执行复杂脑电信号的处理任务,如快速傅里叶转换(FFT)技术,使得脑电信号可以数字化形式保存以用于进一步分析。20 世纪 50~70 年代是脑电图技术迅速发展的时期,通过导联系统标准化、设备改进、数字化和计算机技术引入,脑电信号的记录和分析更加客观精确。1960 年以后,陆续出现立体定向脑电图(SEEG)、定量脑电图(QEEG)等新技术。1982 年,Ernst Niedermeyer 主编的《脑电图:基本原理、临床应用及相关领域》首次出版并作为脑电图领域的标准教科书,目前该著作

已更新至第七版^[12]。1949 年 7 月,南京脑科医院引入国内首台 4 导联脑电描记仪,并于 1951 年获得首份脑电图记录。进入 20 世纪 50 年代,全国各地医院相继开展临床脑电图检查。伍正谊教授、冯应琨教授以及周孝达教授是我国首批脑电图专家。1963 年,冯应琨教授创造性应用毫针蝶骨电极,极大地提高脑深部结构异常放电的检出率^[13]。在 1985 年 11 月中华医学会神经精神科学会脑电图学组年会上,国内 33 所医疗中心共同协作的《北京地区 2357 例各年龄组脑电图正常值》作为大会报告发布^[14],自此,我国有了自己的正常脑电图数据。1996 年,全国癫痫与脑电图专题研讨会召开,吴逊教授、谢光洁教授、孟昭义教授等共同研讨癫痫的诊断、难治性癫痫的诊断与治疗以及癫痫持续状态的治疗^[15]。2008 年成立中国抗癫痫协会脑电图与神经电生理分会,并于 2022 年发布《临床脑电图技术操作指南》^[16]。2012 年,首都医科大学三博脑科医院癫痫中心引进并开展立体定向脑电图技术,用于致痫灶的精准定位。随后清华大学玉泉医院与清华大学生物工程医学系开展合作,自主研发出基于 Leksell 框架系统的立体定向脑电图技术,并于 2013 年完成首例癫痫患者立体定向脑电图电极植入^[17]。从最初的设备引进到逐步实现创新与突破,标志着我国临床脑电图技术正在向更高水平发展。

二、脑电图技术在癫痫领域的临床应用

1. 癫痫诊断与分型 脑电图自 19 世纪 30 年代被发明以来,一直用于癫痫的诊断与指导治疗^[18],动态记录癫痫发作期和发作间期的脑电变化,是明确癫痫发作类型和癫痫分类、特定癫痫综合征的重要依据。局灶性发作的痫样放电通常局限于单个脑叶区域,全面性发作则可见双侧大脑半球广泛性痫样放电^[19];发作间期痫样放电有助于判断临床发作是否为癫痫发作、定位致痫灶,并对撤药时机的选择具有指导意义^[20],但常规脑电图未见发作间期痫样放电并不能排除癫痫之可能。首次无诱因癫痫发作的成年患者中,约 29% 初次脑电图检测可检测到痫样放电^[21];有癫痫发作史的患者中约 50% 初次常规脑电图检测可检测到痫样放电,经 3 次脑电图检测,痫样放电检出率增至约 90%^[19]。此外,睡眠剥夺(SD)、过度换气和闪光刺激等可提高痫样放电检出率。若仍无法明确诊断,应考虑长程脑电图或视频脑电图(VEEG)检测。研究显示,长程脑电图检测可使 58% 的诊断改变,13% 的诊断得以细化

分类^[22]。

2. 致痫灶定位 耐药性癫痫(DRE)导致神经功能障碍,严重影响患者生活质量,可考虑外科手术干预,手术疗效主要取决于致痫灶的定位精准程度。常规脑电图需患者高度配合且检测时间较短,对耐药性癫痫的检出率较低^[23]。颅内脑电图(IEEG)是致痫灶定位的“金标准”。1934年,Otfrid Foerster和Hans Altenburger发表30例术中不同脑区的脑电图描记结果,突显脑电图在脑肿瘤定位中的价值^[24]。1939年,加拿大蒙特利尔神经病学研究所(MNI)应用硬膜外电极进行首次连续的有创脑电图检测,显示出有创脑电图技术对定位致痫灶的重要性^[25]。1940年,Schwartz和Kerr证实Otfrid Foerster和Hans Altenburger的研究结果,绘制了脑肿瘤邻近皮质的特征性脑电变化,证实存在肿瘤内电静息,且脑电图可记录到浅表大脑皮质电位。1949年,Robert Hayne和Russel Meyers首次在癫痫患者中立体定向植入电极,并记录到皮质和皮质下结构同步或独立的痫样放电,提出同步研究浅表和深部脑组织的重要性^[26]。与此同时,法国神经外科医师Talairach和Bancaud在对癫痫患者立体定向植入电极过程中根据脑室位置和大小调整植入坐标,设计出一套立体定向框架系统,称为Talairach框架,从而更个性化、更优化地定位脑深部致痫灶。研究显示,经立体定向脑电图定位并切除致痫灶的癫痫患者中,约63.33%(19/30)术后1年达Engel I级(无发作),证实立体定向脑电图是一种相对安全的侵入性检测方法^[27]。

3. 抗癫痫发作药物选择和疗效评估 抗癫痫发作药物(ASM)减量过快可导致癫痫发作持续时间延长、频率增加,更易诱发全面性强直-阵挛发作^[28]。20世纪40年代以后,脑电图用于抗癫痫发作药物的选择、减量依据及疗效评估。根据患者脑电活动选择抗癫痫发作药物,发作间期尖波与癫痫发作相关,可用于咪达唑仑、地西洋、卡马西平和司替戊醇的脑电图药效学研究^[29]。Beghi等^[30]的系统综述纳入37项临床研究以检验脑电图可否作为癫痫复发的预测因素,结果显示,停药时异常脑电图提示较高的复发风险。定量药物脑电图(QPEEG)指单次服药后记录药物导致的脑电变化并进行定量分析,以评估药物对脑电活动的影响^[31]。因时间分辨率高、连续、直观等优点,在抗癫痫发作药物研发和选择中的应用尤为突出。研究显示,定量药物脑电图

在预测抗癫痫发作药物疗效、神经毒性和预后方面具有极大潜力,可用于指导药物选择^[31]。

4. 非癫痫性发作的鉴别 非癫痫性发作是一组具有与癫痫发作相似临床表现的疾病,但脑电图不伴发作同步的异常皮质放电。约20%首次癫痫门诊就诊患者最终诊断为非癫痫性发作^[32]。视频脑电图可以同步分析脑电波形和临床发作,是鉴别癫痫发作与非癫痫性发作的“金标准”^[33]。Benbadis和Tatum^[34]分析127例最终诊断为心因性非癫痫性发作(PNES)患者的诊断经过,发现过度解读脑电图而误诊为癫痫的原因主要包括较突出的背景节律、碎片化的 α 活动、门状棘波、入睡前超同步化和过度通气诱发的慢波等;此外,过度强调位相倒置也是过度解读脑电图的重要原因^[35]。

三、脑电图技术在睡眠领域的临床应用

1. 研究背景 脑电图的引入是睡眠领域研究的转折点,可以记录完整的睡眠觉醒周期。1875年,Caton的动物实验和Berger的临床研究率先发现睡眠中的脑电周期变化^[36]。1937年,Alfred Loomis首次观察到睡眠不同阶段的脑电变化,并提出A~E共5个睡眠阶段^[36];随后,Eugene Aserinsky和Nathaniel Kleitman通过脑电图监测发现并定义快速眼动睡眠期(REM),并认为REM期睡眠与梦境密切相关,呈现出独特的脑电波形^[37-38]。此后开始了对不同睡眠周期典型波形参数、起源和生理意义的系统研究,主要集中于睡眠纺锤波、K复合波和顶部尖波;1935年,Loomis等^[39]记录到睡眠中出现的有节奏、高频梭形脑电波,此种波形后被命名为睡眠纺锤波;1938年,他们将进入非快速眼动睡眠期(NREM)2期时,外界刺激诱发明显电位变化的脑电波命名为“K复合波”^[40];Schwab和Oswald发现,K复合波更易被睡眠中的外界刺激所诱发^[41];20世纪30~40年代在脑电图记录中发现顶部尖波,通常表现为突出背景的负相波,主要见于双侧中央顶区和中线部位且呈同步对称,被认为是睡眠中的过渡现象,反映进入更深睡眠阶段的脑电活动。针对睡眠纺锤波、K复合波和顶部尖波的研究,为理解睡眠各阶段的脑电特征奠定了重要基础,有助于更好地描述和分类睡眠阶段,对于临床诊断与治疗睡眠障碍具有重要意义。

2. 多导睡眠图和定量脑电图的应用 (1)多导睡眠图(PSG):20世纪50年代,Aserinsky和Kleitman^[42]联合应用脑电图、眼电图(EOG)和肌电

图(EMG)明确清醒期和睡眠期行为状态。1957年, Dement 和 Kleitman^[43]提出睡眠各阶段的正式命名法,即REM期和NREM期。“发作性睡病”的概念最早由法国神经病学家Gelineau于1880年提出^[44],他观察到某些患者表现出强烈的白天嗜睡症状,通常在无预兆的情况下突然入睡,即使是白天参与活动时也可突然进入深睡眠状态。随着多导睡眠图和脑电图技术的发展,研究人员可更好地对发作性睡病进行诊断。1976年, Carskadon 医生首次采用多次睡眠潜伏期试验(MSLT)评估嗜睡程度以及入睡后是否出现睡眠始发的快速眼动睡眠(SOREMP)^[45],目前仍是发作性睡病的辅助诊断方法,广泛应用于临床。1986年12月,北京协和医院开展多导睡眠图检测,通过对695例患者的检测结果进行分析,发现多导睡眠图可用于阻塞性睡眠呼吸暂停综合征(OSAS)的分型、严重程度评估和预后预测,且对失眠症、发作性睡病、不宁腿综合征(RLS)等睡眠呼吸障碍相关疾病的诊断与治疗具有重要意义^[46]。进入20世纪90年代,随着计算机技术的发展,数字化多导睡眠图逐渐替代传统多导睡眠图并广泛应用于睡眠障碍性疾病的临床诊断和临床研究。视频多导睡眠图(vPSG)目前已成为睡眠障碍性疾病诊断的“金标准”,最常用的定量方法是频谱分析,通过对每个频率区间进行连续测量,从而更好地区分失眠患者与睡眠模式健康人群。一项通过脑电图频谱特征检测失眠患者的Meta分析显示,清醒期和REM期脑电图绝对功率和相对功率具有相似的敏感性,而NREM期相对功率的敏感性更高;此外,失眠患者清醒期和睡眠期均可出现 β 频带功率增加,并延伸至相邻频带,提示存在持续的皮质过度唤醒现象^[47]。在2018年发表的《中国成人多导睡眠监测技术操作规范及临床应用专家共识》^[48]进一步明确了多导睡眠图的适应证,并规范了操作流程和报告书写要求。(2)定量脑电图:定量脑电图是对脑电图信号的数值分析和(或)视觉转换,通过对不同频带(α 波、 β 波、 θ 波和 δ 波)的定量评估,有助于识别睡眠与神经功能的变化,主要用于检测阻塞性睡眠呼吸暂停综合征伴睡眠碎片化、日间过度思睡、反复夜间低氧血症或者认知损害的脑电变化^[49],未治疗的阻塞性睡眠呼吸暂停综合征患者主要表现为清醒期弥漫性慢波。Xiromeritis等^[50]发现,重度阻塞性睡眠呼吸暂停综合征患者顶叶、颞叶以及枕叶 θ 和 δ 频带相对功率显著增加,而轻至中度患者各频

带相对功率无明显差异。阻塞性睡眠呼吸暂停综合征患者清醒期慢波频率增加提示困倦或警觉性降低,是睡眠呼吸暂停综合征患者的常见症状。也可能是由于低氧血症和反复的睡眠呼吸暂停导致神经功能障碍,进而引起脑电活动减慢^[49]。(3)其他:随着脑电图技术的发展,越来越强调采取可穿戴式或便携式设备进行睡眠监测,Kwon等^[51]研发的睡眠监测贴片应用简便,费用低廉,可提高受试者舒适度和系统易用性,并可提高睡眠障碍性疾病检测的准确性。

四、脑电图技术在持续重症监护中的临床应用

1. 非惊厥性癫痫持续状态监测 非惊厥性癫痫持续状态(NCSE)指脑电图呈现持续性痫样放电,临床表现为非惊厥性发作^[52],可出现失语、遗忘、行为改变、意识障碍、谵妄、躁狂等,也可出现自动症、眼球偏斜、水平眼震或面部、口周、腹部和肢体轻微抽动等^[53]。非惊厥性癫痫持续状态在神经重症患者中并不少见,成年患者中约占10%^[54]、儿童患者中达19%^[55],脑电图呈现持续时间 ≥ 10 min、频率 > 2.50 Hz或伴时空演变的痫样放电或节律性改变^[56]。由于非惊厥性癫痫持续状态的临床表现复杂多变且缺乏惊厥发作,明确诊断依靠长程脑电图。

2. 麻醉深度监测 麻醉深度监测有助于避免麻醉过深导致的复苏延迟,从而减少术后谵妄等不良反应发生率^[57]。1937年,Gibbs等^[58]发现,随着乙醚或戊巴比妥剂量的增加,患者意识水平和脑电图出现一系列变化,提示脑电图可以作为评估麻醉深度的工具。脑电图分析技术主要包括时域分析、频域分析和时频分析,其中时域分析是最直观的方法,可以迅速识别麻醉过深状态下大脑皮质的爆发抑制,特征性表现为平坦脑电图与短暂性爆发交替出现,并通过爆发抑制比量化^[59]。然而,原始脑电图数据庞杂、难以解读,随着计算机技术的发展,通过对原始脑电图数据进行量化分析,归纳出多种量化指标。目前的常见监测指标有脑电双频指数(BIS)、脑电意识深度监测系统Narcotrend和熵。脑电双频指数于1992年由美国Aspect Medical Systems公司开发,是一种由时间、频域和高阶频谱子参数组合的统计指数,将脑电图功率及其经双频分析获得的混合信息通过计算机进行数字化处理,获得0~100的量化值,指导麻醉药的应用。外科手术已经证实脑电双频指数用于监测麻醉深度的价值,并可识别癫痫持续状态患者的爆发抑制比^[60];然而,脑电双

频指数亦有其局限性,易受干扰、数据延迟、成本较高。Narcotrend 监测系统通过 Kugler 分类器将脑电波分为不同级别以监测麻醉深度。熵来源于非线性动力学和频谱熵。目前尚无证据表明某一项脑电图量化指标在监测麻醉深度和预测预后方面优于其他指标^[61]。

3. 意识障碍分级及预后预测 意识障碍主要包括植物状态(VS)和微意识状态(MCS)^[62]。临床对患者意识状态的判定主要基于行为学,误诊率高达 37%~43%^[63]。脑电图预测意识障碍患者预后的指标主要包括脑电图分级、脑电图反应性等^[64-67]。目前国际较为公认的脑电图分级标准为 Synek 分级标准^[68]和 Young 分级标准^[69]。脑电图分级越高、患者预后越差,且动态分级更具临床意义。定量脑电图的主要预测指标包括相对频带能量反应性^[70]、振幅整合脑电图(aEEG)^[70]和相对 α 变异性(PAV)。You^[71]等对昏迷 7 天患者行 6~12 小时的振幅整合脑电图检测,发现持续正常振幅整合脑电图模式与 6 个月后预后良好相关,爆发抑制或平坦脑电图与 6 个月后预后不良相关。相对 α 变异性指 α 频率占总频率的比值,是一种通过定量脑电图对脑电波进行量化压缩的趋势图谱,用于监测脑血流量和脑氧代谢^[72],相对 α 变异性越高、患者短时间内意识改善的可能性越大^[73]。

五、现代脑电图技术的发展

1. 脑电图与其他多模态成像技术结合 现代脑电图技术的发展及其与其他多模态成像技术的结合,极大地提高了对复杂神经功能障碍疾病的认知和临床诊断的精准化。EEG-fMRI 技术可以同时记录脑电活动和血氧水平,提供高时间分辨率和高空间分辨率的数据^[74]。EEG-fMRI 可用于定位有局灶性病理改变的致痫灶,Zijlmans 等^[75]通过 EEG-fMRI 对难以定位的复杂难治性癫痫进行术前决策,提高致痫灶定位的准确性和手术疗效。EEG-fMRI 在痫样放电传播途径、癫痫网络以及癫痫对认知功能影响的相关研究中亦具有指导意义。经颅磁刺激(TMS)-EEG 技术是一种可记录刺激-反应全过程的新技术,可对任意大脑皮质予以磁刺激,同步记录皮质电反应^[74]。TMS-EEG 可用于评估昏迷患者意识状态、探究阿尔茨海默病患者异常脑电图、检测帕金森病患者静息运动阈值(RMT)、评估精神分裂症不同皮质经颅磁刺激诱发的神经振荡变化等^[76]。

2. 脑机接口 脑机接口(BCI)是一种通过软硬

件结合的通信系统实现脑与外部环境直接交互的技术,主要由三部分组成,即信号采集与处理模块、解码与控制模块、反馈模块^[77]。基于脑电图的无创性和便携性,脑机接口通过捕获脑电活动并形成有效反馈,辅助患者执行任务,无需依赖残障肢体的控制^[78]。Meta 分析结果显示,基于脑机接口的训练可以提高脑卒中后上肢运动功能和日常生活活动能力量表(ADL)评分,且具有良好的安全性和耐受性^[79]。相信未来随着计算机、通信技术的进一步发展,脑机接口必将有更多的创新和突破,为神经损伤患者功能重建、生活质量改善提供更多选择。

3. 人工智能和深度学习 随着科学技术的发展,深度学习(DL)已在诸多领域取得显著成果,基于深度学习算法的脑电图分析即是其中之一,深度学习算法可以自动检测和识别脑电特征和模式,加速并简化数据分析过程。基于深度学习算法的脑电图分析的优势在于,可自动学习和理解脑电图数据中的复杂模式,提高分析的准确性和可靠性;此外,深度学习算法还可以处理大量数据,特别是传统分析方法难以处理的数据,不仅可以加速并简化数据分析过程,还可以提高分析的准确性和可靠性。例如,通过深度学习算法及时预测癫痫发作并予以干预,可以显著减少患者的意外伤害^[80]。Ahmad 等^[81]总结基于不同机器学习(ML)或深度学习算法预测癫痫发作的准确性,发现基于常规机器学习算法预测癫痫发作更具优势,高级机器学习或深度学习有助于高维特征的自动提取,核主成分分析(KPCA)是一种适宜的基于非线性多项式的特征选择方法。此外,深度学习算法还可用于多导睡眠图的数据分析,以评估睡眠质量和诊断睡眠障碍性疾病^[82]。尽管人工智能和机器学习在脑电图数据分析中展示出巨大潜力,但仍面临挑战,如数据质量、隐私保护、算法解释性等。未来随着技术的不断进步,这些挑战有望逐步解决,推动脑电图数据分析应用的进一步发展。

六、脑电图技术的局限性与展望

脑电图是重要的科研和临床诊断工具,具有操作简单、时间分辨率高且成本低廉等优点,但也存在一定的局限性,首先,脑电信号易受肌肉活动、眼球运动和外部电磁场的干扰,背景噪声强,需复杂的信号处理算法以滤除噪声;其次,脑电图的个体差异较大,增加了数据分析的复杂性和个性化处理的难度;最后,临床实践中长程监测且佩戴复杂设

备也给患者带来不适感,影响脑电图的持续监测。尽管存在上述局限性,随着技术的不断进步和跨学科的融合,脑电图技术的发展前景依然广阔,通过与多模态成像技术结合,进一步提高脑电图的空间分辨率和诊断准确性;便携式和无线脑电图设备的研发将进一步提高佩戴的便捷性和患者的舒适度;个性化数据分析方法的发展将更好地适应个体差异,提高数据分析的准确性和可靠性;同时,随着人工智能和深度学习算法的进步,脑电信号处理和解读的自动化水平将不断提高,通过制定严格的数据隐私和伦理规范,确保数据的安全性和合法性,脑电图技术将在科学研究、临床诊断与治疗、脑机接口等领域发挥更为重要的作用。

志谢 衷心感谢中国医学科学院北京协和医院金丽日教授对本文的帮助和指导

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] Schofield Z, Meloni GN, Tran P, Zeffass C, Sena G, Hayashi Y, Grant M, Contera SA, Minter SD, Kim M, Prindle A, Rocha P, Djamgoz MBA, Pilizota T, Unwin PR, Asally M, Soyer OS. Bioelectrical understanding and engineering of cell biology [J]. *J R Soc Interface*, 2020, 17:20200013.
- [2] Lafon B, Henin S, Huang Y, Friedman D, Melloni L, Thesen T, Doyle W, Buzsáki G, Devinsky O, Parra LC, A Liu A. Low frequency transcranial electrical stimulation does not entrain sleep rhythms measured by human intracranial recordings [J]. *Nat Commun*, 2017, 8:1199.
- [3] Beniczky S, Schomer DL. Electroencephalography: basic biophysical and technological aspects important for clinical applications [J]. *Epileptic Disord*, 2020, 22:697-715.
- [4] Sun TX, Tao JX, Wang Q. EEG-clinical research advances on benign electroencephalographic variants in temporal lobe [J]. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2022, 22:549-554. [孙太欣, James X. Tao, 王群. 颞叶良性脑电图变异型脑电-临床研究进展 [J]. 中国现代神经疾病杂志, 2022, 22:549-554.]
- [5] Tudor M, Tudor L, Tudor KI. Hans Berger (1873-1941): the history of electroencephalography [J]. *Acta Med Croatica*, 2005, 59:307-313.
- [6] Vergani AA. Hans Berger (1873-1941): the German psychiatrist who recorded the first electrical brain signal in humans 100 years ago [J]. *Adv Physiol Educ*, 2024, 48:878-881.
- [7] Compston A. The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man [J]. *Brain*, 2010, 133(Pt 1):3-6.
- [8] Al - Kadi MI, Reaz MB, Ali MA. Evolution of electroencephalogram signal analysis techniques during anesthesia [J]. *Sensors (Basel)*, 2013, 13:6605-6635.
- [9] Vannemreddy P, Stone JL, Slavin KV. Frederic Gibbs and his contributions to epilepsy surgery and electroencephalography [J]. *Neurosurgery*, 2012, 70:774-782.
- [10] Arjoosingh A, Jamal BC, Ganti L. History and evolution of the electroencephalogram [J]. *Cureus*, 2024, 16:e66385.
- [11] Klem GH, Lüders HO, Jasper HH, Elger C; The International Federation of Clinical Neurophysiology. The ten - twenty electrode system of the International Federation [J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*, 1999, 52:3-6.
- [12] Krumholz A. Professor Ernst Niedermeyer: electroencephalography's pioneer and world leader [J]. *Clin EEG Neurosci*, 2012, 43:255-256.
- [13] Feng YK, Xu JQ, Guo DH. Clinical application of electroencephalography with fine needle sphenoid electrodes in 2,000 cases [J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 1983, 63:93-96. [冯应琨, 徐敬琴, 郭丹华. 脑电图毫针蝶骨电极 2,000 例临床应用 [J]. 中华医学杂志, 1983, 63:93-96.]
- [14] Xu JQ. Annual meeting of the EEG group [J]. *Beijing Yi Xue*, 1986:46. [徐敬琴. 脑电图学组召开年会 [J]. 北京医学, 1986: 46.]
- [15] Li WH, Huang YG. Summary of the national symposium on epilepsy and electroencephalography [J]. *Zhonghua Shen Jing Ke Za Zhi*, 1996, 29:199-201. [李文慧, 黄远桂. 全国癫痫与脑电图专题研讨会会议纪要 [J]. 中华神经科杂志, 1996, 29:199-201.]
- [16] Electroencephalography and Neuroelectrophysiology Branch, China Association Against Epilepsy. Operation guide of clinical electroencephalography technology [J]. *Dian Xian Za Zhi*, 2022, 8:2. [中国抗癫痫协会脑电图和神经电生理分会. 临床脑电图技术操作指南 [J]. 癫痫杂志, 2022, 8:2.]
- [17] Wang KS, Yao C, Wang QY, Li SX, Liang CH, Xiao XH. Research progress on the application of stereotactic electroencephalography in preoperative evaluation and treatment of epilepsy [J]. *Dian Xian Yu Shen Jing Dian Sheng Li Xue Za Zhi*, 2022, 31:180-183. [王锴锁, 姚晨, 王圆庆, 黎思娴, 梁春华, 肖小华. 立体定向脑电图在癫痫术前评估与治疗中应用的研究进展 [J]. 癫痫与神经电生理学杂志, 2022, 31:180-183.]
- [18] Wang XF. New research progress on epilepsy [J]. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2022, 22:543-548. [王雪峰. 癫痫研究新进展 [J]. 中国现代神经疾病杂志, 2022, 22:543-548.]
- [19] Chen H, Koubeissi MZ. Electroencephalography in epilepsy evaluation [J]. *Continuum (Minneapolis)*, 2019, 25:431-453.
- [20] Liang X, Di Q. Interictal epileptiform discharges in antiepileptic drug withdrawal in patients with epilepsy [J]. *Zhonghua Shen Jing Ke Za Zhi*, 2019, 52:344-348. [梁雪, 狄晴. 发作间期癫痫样放电在癫痫患者撤药中的价值 [J]. 中华神经科杂志, 2019, 52:344-348.]
- [21] Devinsky O, Vezzani A, O'Brien TJ, Jette N, Scheffer IE, de Curtis M, Perucca P. Epilepsy [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2018, 4:18024.
- [22] Yogarajah M, Powell HW, Heaney D, Smith SJ, Duncan JS, Sisodiya SM. Long term monitoring in refractory epilepsy: the Gowers Unit experience [J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2009, 80:305-310.
- [23] Wu MN, Dai WZ, Pan YD, Fu ML, Chen XY. Clinical value of routine electroencephalogram combined with serum miR - 146a and miR - 129 - 5p levels in diagnosis of drug-resistant epilepsy patients [J]. *Tianjin Yi Yao*, 2024, 52:1207-1211. [吴美娜, 戴为正, 潘毓敦, 傅懋林, 陈晓瑜. 常规脑电图联合血清 miR-146a、miR-129-5p 水平检测对药物难治性癫痫的临床诊断价值 [J]. 天津医药, 2024, 52:1207-1211.]
- [24] Karamanou M, Tsoucalas G, Themistocleous M, Giakoumettis D, Stranjalis G, Androutsos G. Epilepsy and neurosurgery: historical highlights [J]. *Curr Pharm Des*, 2017, 23:6373-6375.
- [25] Gross RE, Sung EK, Mulligan P, Laxpati NG, Mayo DA, Rolston JD. Accuracy of frameless image-guided implantation of depth electrodes for intracranial epilepsy monitoring [J]. *J Neurosurg*, 2019, 132:681-691.
- [26] Reif PS, Strzelczyk A, Rosenow F. The history of invasive EEG

- evaluation in epilepsy patients[J]. *Seizure*, 2016, 41:191-195.
- [27] Miller C, Schatmeyer B, Landazuri P, Uysal U, Nazzaro J, Kinsman MJ, Camarata PJ, Ulloa CM, Hammond N, Pearson C, Shah V, Cheng JJ. sEEG for expansion of a surgical epilepsy program: safety and efficacy in 152 consecutive cases [J]. *Epilepsia Open*, 2021, 6:694-702.
- [28] Chen M, Wang HF, Shi MT, Yu YL. Research progress of generalized electroencephalography suppression after epileptic seizure as an electroencephalography marker of sudden unexpected death in epilepsy[J]. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2022, 22:1000-1004.[陈梅, 王后芬, 史梦婷, 于云莉. 癫痫发作后全面性脑电抑制作为癫痫猝死脑电图标志物研究进展[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2022, 22:1000-1004.]
- [29] Laurijssens BE, Greenblatt DJ. Pharmacokinetic - pharmacodynamic relationships for benzodiazepines [J]. *Clin Pharmacokinet*, 1996, 30:52-76.
- [30] Beghi E, Giussani G, Grosso S, Iudice A, La Neve A, Pisani F, Specchio LM, Verrotti A, Capovilla G, Michelucci R, Zaccara G. Withdrawal of antiepileptic drugs: guidelines of the Italian League Against Epilepsy[J]. *Epilepsia*, 2013, 54 Suppl 7:2-12.
- [31] Höller Y, Helmstaedter C, Lehnertz K. Quantitative pharmacoelectroencephalography in antiepileptic drug research [J]. *CNS Drugs*, 2018, 32:839-848.
- [32] Angus-Leppan H. Diagnosing epilepsy in neurology clinics: a prospective study[J]. *Seizure*, 2008, 17:431-436.
- [33] Liu XY. Progress on distinguishing in epileptic and non-epileptic seizure[J]. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2023, 23:100-103.[刘晓英. 癫痫发作与非癫痫性发作的鉴别诊断研究进展[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2023, 23:100-103.]
- [34] Benbadis SR, Tatum WO. Overinterpretation of EEGs and misdiagnosis of epilepsy[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2003, 20:42-44.
- [35] Benbadis SR. The EEG in nonepileptic seizures [J]. *J Clin Neurophysiol*, 2006, 23:340-352.
- [36] Davis H, Davis PA, Loomis AL, Harvey EN, Hobart G. Changes in human brain potentials during the onset of sleep[J]. *Science*, 1937, 86:448-450.
- [37] Aserinsky E. The discovery of REM sleep[J]. *J Hist Neurosci*, 1996, 5:213-227.
- [38] Liu D. The power of direct observation: discovery of REM sleep [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2024, 25:595.
- [39] Loomis AL, Harvey EN, Hobart G. Potential rhythms of the cerebral cortex during sleep[J]. *Science*, 1935, 81:597-598.
- [40] Loomis AL, Harvey, EN, Hobart GA. Distribution of disturbance-patterns in the human electroencephalogram with special reference to sleep[J]. *J Neurophysiol*, 1938, 1:413-430.
- [41] Colrain IM. The K-complex: a 7-decade history[J]. *Sleep*, 2005, 28:255-273.
- [42] Aserinsky E, Kleitman N. Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep[J]. *Science*, 1953, 118:273-274.
- [43] Dement W, Kleitman N. Cyclic variations in EEG during sleep and their relation to eye movements, body motility, and dreaming [J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1957, 9:673-690.
- [44] Schenck CH, Bassetti CL, Arnulf I, Mignot E. English translations of the first clinical reports on narcolepsy and cataplexy by Westphal and Gelineau in the late 19th century, with commentary[J]. *J Clin Sleep Med*, 2007, 3:301-311.
- [45] Carskadon MA, Dement WC, Mitler MM, Roth T, Westbrook PR, Keenan S. Guidelines for the multiple sleep latency test (MSLT): a standard measure of sleepiness [J]. *Sleep*, 1986, 9: 519-524.
- [46] Huang XZ, Wu QY, Li LY, Ma Y, Xu JQ, Luo WC. Clinical application of polysomnography [J]. *Zhonghua Nei Ke Za Zhi*, 1991, 30:758-760.[黄席珍, 吴全有, 李龙云, 马毅, 徐敬琴, 罗慰慈. 多导睡眠图的临床应用[J]. *中华内科杂志*, 1991, 30: 758-760.]
- [47] Zhao W, Van Someren EJW, Li C, Chen X, Gui W, Tian Y, Liu Y, Lei X. EEG spectral analysis in insomnia disorder: a systematic review and meta-analysis [J]. *Sleep Med Rev*, 2021, 59:101457.
- [48] Sleep Disorders Professional Committee, Neurology Branch, Chinese Medical Doctor Association; Sleep Disorders Professional Committee, Chinese Sleep Research Society; Sleep Disorders Group, Neurology Branch, Chinese Medical Association. Expert consensus on the technical operation specifications and clinical application of polysomnography monitoring in Chinese adults [J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2018, 98:3825-3831.[中国医师协会神经内科医师分会睡眠障碍专业委员会, 中国睡眠研究会睡眠障碍专业委员会, 中华医学会神经病学分会睡眠障碍学组. 中国成人多导睡眠监测技术操作规范及临床应用专家共识[J]. *中华医学杂志*, 2018, 98:3825-3831.]
- [49] Puskás S, Kozák N, Sulina D, Csiba L, Magyar MT. Quantitative EEG in obstructive sleep apnea syndrome: a review of the literature[J]. *Rev Neurosci*, 2017, 28:265-270.
- [50] Xiromeritis AG, Hatziefthimiou AA, Hadjigeorgiou GM, Gourgoulialis KI, Anagnostopoulou DN, Angelopoulos NV. Quantitative spectral analysis of vigilance EEG in patients with obstructive sleep apnoea syndrome: EEG mapping in OSAS patients[J]. *Sleep Breath*, 2011, 15:121-128.
- [51] Kwon S, Kim HS, Kwon K, Kim H, Kim YS, Lee SH, Kwon YT, Jeong JW, Trotti LM, Duarte A, Yeo WH. At-home wireless sleep monitoring patches for the clinical assessment of sleep quality and sleep apnea[J]. *Sci Adv*, 2023, 9:eadg9671.
- [52] Shorvon S. What is nonconvulsive status epilepticus, and what are its subtypes[J]? *Epilepsia*, 2007, 48 Suppl 8:35-38.
- [53] Electroencephalography and Epilepsy Group, Neurology Branch, Chinese Medical Association. Expert consensus on the treatment of nonconvulsive status epilepticus [J]. *Zhonghua Shen Jing Ke Za Zhi*, 2013, 46:133-137.[中华医学会神经病学分会脑电图与癫痫学组. 非惊厥性癫痫持续状态的治疗专家共识[J]. *中华神经科杂志*, 2013, 46:133-137.]
- [54] Kubota Y, Nakamoto H, Egawa S, Kawamata T. Continuous EEG monitoring in ICU[J]. *J Intensive Care*, 2018, 6:39.
- [55] Abend NS, Gutierrez-Colina AM, Topjian AA, Zhao H, Guo R, Donnelly M, Clancy RR, Dlugos DJ. Nonconvulsive seizures are common in critically ill children [J]. *Neurology*, 2011, 76:1071-1077.
- [56] Leitinger M, Beniczky S, Rohrer A, Gardella E, Kalss G, Qerama E, Höfler J, Hess Lindberg-Larsen A, Kuchukhidze G, Dohesberger J, Langthaler PB, Trinka E. Salzburg consensus criteria for non-convulsive status epilepticus: approach to clinical application[J]. *Epilepsy Behav*, 2015, 49:158-163.
- [57] Soehle M, Dittmann A, Ellerkmann RK, Baumgarten G, Putensen C, Guenther U. Intraoperative burst suppression is associated with postoperative delirium following cardiac surgery: a prospective, observational study [J]. *BMC Anesthesiol*, 2015, 15:61.
- [58] Gibbs FA, Gibbs EL, Lennox WG. Effect on the electroencephalogram of certain drugs which influence nervous activity [J]. *Arch Intern Med (Chic)*, 1937, 60:154-166.
- [59] Montupil J, Defresne A, Bonhomme V. The raw and processed electroencephalogram as a monitoring and diagnostic tool [J]. *J*

- Cardiothorac Vasc Anesth, 2019, 33 Suppl 1:S3-S10.
- [60] Migdady I, Rosenthal ES, Cock HR. Management of status epilepticus: a narrative review[J]. *Anaesthesia*, 2022, 77 Suppl 1:78-91.
- [61] Ni WW, Han Y, Jia JE, Li WX. Application and research progress of electroencephalogram monitoring in general anesthesia[J]. *Fudan Xue Bao (Yi Xue Ban)*, 2023, 50:606-612. [倪文文, 韩园, 贾继娥, 李文献. 脑电监测在全身麻醉中的应用及研究进展[J]. *复旦学报(医学版)*, 2023, 50:606-612.]
- [62] Craniocerebral Trauma Professional Group, Neurosurgery Branch, Chinese Medical Association; Neurological Injury Professional Group, Trauma Branch, Chinese Medical Association. Chinese expert consensus on the diagnosis and treatment of long-term coma caused by traumatic brain injury [J]. *Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2015, 31:757-760. [中华医学会神经外科学分会颅脑创伤专业组, 中华医学会创伤学分会神经损伤专业组. 颅脑创伤长期昏迷诊治中国专家共识[J]. *中华神经外科杂志*, 2015, 31:757-760.]
- [63] Schnakers C, Vanhauwenhuysse A, Giacino J, Ventura M, Boly M, Majerus S, Moonen G, Laureys S. Diagnostic accuracy of the vegetative and minimally conscious state: clinical consensus versus standardized neurobehavioral assessment [J]. *BMC Neurol*, 2009, 9:35.
- [64] Azabou E, Navarro V, Kubis N, Gavaret M, Heming N, Cariou A, Annane D, Lofaso F, Naccache L, Sharshar T. Value and mechanisms of EEG reactivity in the prognosis of patients with impaired consciousness: a systematic review [J]. *Crit Care*, 2018, 22:184.
- [65] Khazanova D, Douglas VC, Amorim E. A matter of timing: EEG monitoring for neurological prognostication after cardiac arrest in the era of targeted temperature management [J]. *Minerva Anesthesiol*, 2021, 87:704-713.
- [66] Bouchereau E, Marchi A, Hermann B, Pruvost - Robieux E, Guinard E, Legouy C, Schimpf C, Mazeraud A, Baron JC, Ramdani C, Gavaret M, Sharshar T, Turc G. Quantitative analysis of early-stage EEG reactivity predicts awakening and recovery of consciousness in patients with severe brain injury [J]. *Br J Anaesth*, 2023, 130:e225-e232.
- [67] Wang J, Huang L, Ma X, Zhao C, Liu J, Xu D. Role of quantitative EEG and EEG reactivity in traumatic brain injury [J]. *Clin EEG Neurosci*, 2022, 53:452-459.
- [68] Synek VM. Prognostically important EEG coma patterns in diffuse anoxic and traumatic encephalopathies in adults [J]. *J Clin Neurophysiol*, 1988, 5:161-174.
- [69] Young GB, McLachlan RS, Kreeft JH, Demelo JD. An electroencephalographic classification for coma [J]. *Can J Neurol Sci*, 1997, 24:320-325.
- [70] Jiang QQ, Yuan XD, Wu ZW, Lü SJ, Tao L, Li G, Zhang PP, Wang SJ. Research progress on the prognostic evaluation of patients with severe neurological disorders of consciousness using electroencephalography [J]. *Zhonghua Wei Zhong Zheng Yi Xue Za Zhi (Dian Zi Ban)*, 2017, 10:421-425. [江茜茜, 元小冬, 吴宗武, 吕淑娟, 陶莉, 李刚, 张攀攀, 王淑娟. 脑电图对神经重症意识障碍患者预后评估的研究进展[J]. *中华危重症医学杂志(电子版)*, 2017, 10:421-425.]
- [71] You W, Tang Q, Wu X, Feng J, Mao Q, Gao G, Jiang J. Amplitude-integrated electroencephalography predicts outcome in patients with coma after acute brain injury [J]. *Neurosci Bull*, 2018, 34:639-646.
- [72] Gill RE, Tang B, Smegal L, Adamek JH, McAuliffe D, Lakshmanan BM, Srivastava S, Quain AM, Sebold AJ, Lin DDM, Kossoff EH, Caffo B, Comi AM, Ewen JB. Quantitative EEG improves prediction of Sturge-Weber syndrome in infants with port-wine birthmark [J]. *Clin Neurophysiol*, 2021, 132:2440-2446.
- [73] Zhong Y, He P, Feng Z. Application of quantitative EEG features in prognostic evaluation of prolonged consciousness disorders [J]. *Zhongguo Kang Fu Yi Xue Za Zhi*, 2023, 38:1493-1498. [钟源, 何佩, 冯珍. 定量脑电图特征在慢性意识障碍预后评价中的应用研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38:1493-1498.]
- [74] Xu SJ, Xu Q, Zhang QR, Lu GM, Zhang ZQ. Synchronous electroencephalography-functional magnetic resonance imaging technology and its application in epilepsy [J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2022, 102:1478-1481. [徐舒嘉, 许强, 张其锐, 卢光明, 张志强. 同步脑电图-功能磁共振成像技术及其在癫痫中的应用[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102:1478-1481.]
- [75] Zijlmans M, Huiskamp G, Hersevoort M, Seppenwoolde JH, van Huffelen AC, Leijten FS. EEG-fMRI in the preoperative work-up for epilepsy surgery [J]. *Brain*, 2007, 130:2343-2353.
- [76] Wang TL, Yang X, Zhang HM, Liu Q, Lu YH, Chen XT, Yao LQ. Progress in the application of transcranial magnetic stimulation combined with electroencephalography in the diagnosis and treatment of neuropsychiatric disorders [J]. *Shandong Yi Yao*, 2024, 64:87-90. [王天玲, 杨雪, 张红梅, 刘倩, 陆以欢, 陈雪婷, 姚黎清. 经颅磁刺激联合脑电图在神经精神疾病诊断与治疗中的应用进展[J]. *山东医药*, 2024, 64:87-90.]
- [77] Fetz EE. Restoring motor function with bidirectional neural interfaces [J]. *Prog Brain Res*, 2015, 218:241-252.
- [78] Meng J, Zhang S, Beyko A, Olsoe J, Baxter B, He B. Author correction: noninvasive electroencephalogram based control of a robotic arm for reach and grasp tasks [J]. *Sci Rep*, 2020, 10:6627.
- [79] Xie YL, Yang YX, Jiang H, Duan XY, Gu LJ, Qing W, Zhang B, Wang YX. Brain-machine interface-based training for improving upper extremity function after stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16:949575.
- [80] Rasheed K, Qayyum A, Qadir J, Sivathamboo S, Kwan P, Kuhlmann L, O'Brien T, Razi A. Machine learning for predicting epileptic seizures using EEG signals: a review [J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2021, 14:139-155.
- [81] Ahmad I, Wang X, Zhu M, Wang C, Pi Y, Khan JA, Khan S, Samuel OW, Chen S, Li G. EEG-based epileptic seizure detection via machine/deep learning approaches: a systematic review [J]. *Comput Intell Neurosci*, 2022:6486570.
- [82] Craik A, He Y, Contreras - Vidal JL. Deep learning for electroencephalogram (EEG) classification tasks: a review [J]. *J Neural Eng*, 2019, 16:031001.

(收稿日期: 2024-10-01)

(本文编辑: 彭一帆)