

脑电图在成人意识障碍中的应用专家共识

中国人体健康科技促进会重症脑损伤专业委员会

通信作者: 潘速跃, 南方医科大学南方医院神经内科, 广州 510515, Email: pansuyue82@qq.com; 张艳, 首都医科大学宣武医院神经内科, 北京 100053, Email: zhangylq@sina.com

【摘要】 意识障碍(DoC)是由严重脑损伤等多种病因所致的复杂临床综合征, 疾病分型及疗效精准评估是其临床管理的核心难点之一。现阶段针对 DoC 的主要评估手段包括临床行为学评估与脑电图(EEG)检查等。其中, 临床行为学评估易受各类混杂因素干扰, 存在较高的误诊风险。EEG 作为一种无创、可床旁动态监测的神经电生理技术, 能够实时捕捉大脑皮层电活动, 是 DoC 临床评估的重要辅助手段。但目前 EEG 在 DoC 临床应用中仍存在诸多不规范之处, 如操作流程与判读标准不统一、临床应用方案同质化较差等; 同时, 任务态 EEG、经颅磁刺激联合 EEG、脑深部电刺激同步 EEG 记录等前沿技术也暂无统一的标准化应用规范。基于此, 本共识整合国内外循证医学证据与专家经验, 系统梳理常规及前沿 EEG 技术在成人 DoC 诊疗中的应用要点, 针对 DoC 分型诊断、病情评估、预后预测、疗效评价及 DoC 相关癫痫样电活动监测等核心临床问题形成规范化推荐意见, 以推动 EEG 在 DoC 全程管理中的规范化应用与创新性探索。

【关键词】 意识障碍; 脑电图; 评估; 诊断; 专家共识

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC3606900、2024YFC3606901)

实践指南注册: 国际实践指南注册与透明化平台(PREPARE-2026CN279)

DOI:10.3760/cma.j.cn115354-20260330-00174

Expert consensus on application of electroencephalogram in adult patients with disorders of consciousness

Professional Committee for Severe Brain Injury, China Association for Promotion of Health Science and Technology

Corresponding authors: Pan Suyue, Department of Neurology, Nanfang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China, Email: pansuyue82@qq.com; Zhang Yan, Department of Neurology, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100053, China, Email: zhangylq@sina.com

【Abstract】 Disorders of consciousness (DoC) are complex clinical syndromes resulting from various etiologies, including severe brain injury. Accurate classification and evaluation of treatment outcomes remain key challenges in clinical management. Currently, the main assessment methods for DoC include clinical behavioral evaluations and electroencephalography (EEG). Clinical behavioral assessments are prone to interference from numerous confounding factors and carry a high risk of misdiagnosis. EEG, as a non-invasive neurophysiological technique capable of continuous bedside monitoring, can capture cortical electrical activity in real time and serves as an important adjunct in clinical evaluation of DoC. However, current clinical application of EEG in DoC still faces many inconsistencies, such as lack of standardized operating procedures and interpretation criteria, and poor homogeneity in clinical protocols. Moreover, advanced techniques like task-based EEG, transcranial magnetic stimulation combined with EEG, and simultaneous EEG recording during deep brain stimulation currently lack unified standardization. Based on this, this consensus integrates international and domestic evidence-based medicine data and expert experience to systematically summarize the key points of conventional and emerging EEG technologies in the diagnosis and treatment of adult patients with DoC. It provides standardized recommendations addressing core clinical issues, including DoC classification, disease severity assessment, prognosis prediction, treatment efficacy evaluation, and monitoring of seizure-like electrical activity associated with DoC, aiming to promote standardized application and innovative exploration of EEG throughout the entire management process of DoC.

【Key words】 Disorder of consciousness; Electroencephalogram; Assessment; Diagnosis;

Expert consensus

Fund program: National Key Research and Development Plan (2024YFC3606900, 2024YFC3606901)

Practice guideline registration: Practice Guideline Registration for Transparency (PREPARE-2026CN279)

DOI:10.3760/cma.j.cn115354-20260330-00174

意识障碍(disorder of consciousness, DoC)指因严重脑损伤等多种病因导致觉醒水平和意识内容不同程度受损的状态。根据 DoC 持续时间,其可分为急性 DoC 和慢性 DoC,前者持续时间<28 d,后者持续时间≥28 d。2022 年的一项流行病学数据显示,英、美两国昏迷的年发病率为 201/10 万人,患病率为 20/10 万人^[1]。目前,我国成人 DoC 的流行病学特征尚不明确,相关高质量数据极为匮乏。

DoC 主要包括昏迷、植物状态/无反应觉醒综合征(vegetative state/unresponsive wakefulness syndrome, VS/UWS)和微意识状态(minimally conscious state, MCS)(表 1)^[2-3]。此外,认知运动分离(cognitive motor dissociation, CMD)是一种隐蔽意识状态,指患者由于运动通路受损,行为学上对指令无反应,通常表现为昏迷、VS/UWS 或 MCS⁻,但其认知功能(如理解指令、想象行为)完好或部分保留,任务态脑电图(electroencephalogram, EEG)或功能 MRI 可检测到其大脑对任务的自主应答^[4-5]。

对 DoC 患者进行精准评估具有重要的临床意义,其可直接影响医疗决策,特别是治疗干预强度的抉择;若出现诊断偏差或预后判断失误,极有可能导致具备救治潜力的 DoC 患者被过早终止生命支持^[3]。但不同意识水平患者的临床行为学特征可能存在重叠,难以区分。现有数据显示仅依靠临床行为学评估,例如最常用的修订版昏迷恢复量表(coma recovery scale-revised, CRS-R),32%~39%的 DoC 患者存在误诊风险,其中 MCS、CMD 或闭锁综

合征患者的鉴别诊断更是临床难点^[6-8]。此外,非惊厥性癫痫持续状态(non-convulsive status epilepticus, NCSE)是一种以 DoC 或神经功能缺损为特征,但不伴随明显肢体抽搐的癫痫持续状态(status epilepticus, SE)^[9],临床医生常难以通过体征快速识别。

EEG 作为一种无创、可床旁连续动态监测、时间与空间分辨率高、检测成本较低的神经电生理技术,能够实时反映大脑皮层功能状态,评估脑损伤严重程度、明确发作性症状的性质、协助诊断 DoC 病因及预测预后,在一定程度上弥补临床行为学评估无法准确判断患者意识水平的不足^[4]。近年来关于任务态 EEG、经颅磁刺激联合 EEG(transcranial magnetic stimulation-EEG, TMS-EEG)和脑深部电刺激 EEG 同步记录(deep brain stimulation-EEG, DBS-EEG)的研究也发现,任务态 EEG 能实时捕捉大脑在执行特定任务时的电活动变化,对诊断 CMD 极具优势^[10];TMS-EEG 可不受感觉、运动障碍的限制评估皮层有效连接和脑网络复杂度^[11-12];DBS-EEG 可提供特定脑区更长时程的动态随访信息^[13],三者区分不同意识状态和评估促醒疗效方面具有重要的辅助价值和应用前景。然而,目前临床实践中 EEG 应用存在诸多不规范之处,如判读标准不统一,临床应用方案同质化差;任务态 EEG、TMS-EEG 和 DBS-EEG 等前沿技术缺乏标准化应用指引,导致 EEG 的临床价值未能充分发挥。

基于此,本共识系统整合国内外相关研究证据

表 1 不同类型 DoC 的觉醒、觉知水平及关键行为特征

Tab.1 Awakening and awareness levels, and key behavioral characteristics of different types of DoC

类型	觉醒水平 ^a	觉知水平 ^b	关键行为特征
昏迷	无	无	无任何有目的的自发或刺激诱发行为
VS/UWS	存在	无	有反射性动作(如咀嚼、眨眼、吞咽),但无遵嘱反应、交流、物体使用能力
MCS	存在	存在,但波动、不连续	有明确、可重复的行为证据表明对自我或环境存在有限的觉知,但无法持续或进行功能性交流
MCS ⁻	存在	存在,但波动、不连续	仅有非反射性动作(如视觉追踪、疼痛定位),无遵嘱反应
MCS ⁺	存在	存在,但波动、不连续	可执行简单指令(如“动一下大拇指”),无功能性交流

a: 自发睁眼及睡眠觉醒周期; b: 大脑对自身、外界环境信息的感知、识别、理解与主观体验能力; DoC: 意识障碍; VS/UWS: 植物状态/无反应觉醒综合征; MCS: 微意识状态

及专家经验,以规范 EEG 在成人 DoC 中的应用:一方面明确 EEG 的适用情况、操作流程、判读指标及应用价值,为神经内科、神经外科、神经重症科、重症医学科、急诊科、康复科等科室的临床实践提供指导;另一方面梳理任务态 EEG、TMS-EEG、DBS-EEG 等前沿技术的要点与优势,以促进 EEG 在 DoC 领域的规范化应用与科研探索。

一、共识制订方法学

(一)共识制订专家组

本共识由中国人体健康科技促进会重症脑损伤专业委员会发起和组织,全国 20 个省区市的 57 名相关领域(神经内科、神经外科、神经重症科、重症医学科、急诊科、康复科等)专家参与论证与标准制订,起草过程遵循国际通用共识制订流程。

(二)文献检索策略

系统检索 EEG 应用于成人 DoC 患者的相关研究文献。检索数据库包括 PubMed、MEDLINE、Embase、Web of Science、Cochrane Library、中国知网、万方数据库,检索时间范围为 2000 年 1 月至 2025 年 10 月,中文关键词为“脑电图”“意识障碍”“脑损伤”“昏迷”“植物状态”“无反应觉醒”“微意识状态”“非惊厥性癫痫”“非惊厥性癫痫持续状态”,

英文关键词为“electroencephalogram”“disorders of consciousness”“brain injury”“coma”“vegetative state”“unresponsive wakefulness”“minimally conscious state”“non-convulsive epilepsy”“non-convulsive status epilepticus”,纳入研究类型包括中英文系统评价或荟萃分析、随机对照试验(RCT)、队列研究、病例对照研究、病例系列研究。

(三)共识撰写方法与步骤

共识撰写方案由执笔组起草,并于 2025 年 10 月 17 日经制订专家组会议审议通过。由执笔组基于临床问题及文献检索结果完成初稿撰写及 3 轮修改,参照 2009 版牛津循证医学中心标准对证据进行等级(表 2)和推荐强度划分(表 3)。随后组织制订专家组进行两轮线上咨询与讨论,所有条目推荐意见同意率超过 75% 即视为达成共识。2026 年 3 月 10 日,组织全体制订专家组成员召开定稿会议,经再次充分讨论后确定终稿。

二、DoC 患者行 EEG 监测的临床应用场景

(一)急性期病因未明的 DoC

急性 DoC 的早期病因诊断对其临床治疗至关重要^[14]。一些观察性研究提示,在不明原因的 DoC 患者中,急诊 EEG 对 DoC 不同病因诊断和管理的贡

表 2 2009 版牛津大学循证医学中心的证据等级

Tab.2 Levels of evidence according to the 2009 Oxford Centre for Evidence-based Medicine

证据等级	研究设计/证据来源	说明
1a	基于 RCT 的系统评价/荟萃分析	纳入的研究均为高质量且结果一致的 RCT
1b	单个高质量的 RCT	结果精确(置信区间窄)
1c	“全或无”的研究证据	干预前全部死亡/治疗失败,干预后有存活;或干预前有存活,干预后全部死亡(罕见)
2a	基于队列研究的系统评价/荟萃分析	纳入研究均为高质量且结果一致的队列研究
2b	单个队列研究(包括低质量 RCT)	前瞻性观察性队列研究或质量较差的 RCT(如随访率<80%)
2c	效果研究/生态学研究	基于人群结局数据的研究(如卫生服务研究)
3a	基于病例对照研究的系统评价/荟萃分析	纳入研究均为高质量且结果一致的病例对照研究
3b	单个病例对照研究	-
4	病例系列报告(包括低质量队列/病例对照研究)	无对照组或对照组质量差;描述性研究
5	专家意见(未经严格评估)	缺乏方法学评估的专家观点

RCT:随机对照试验

表 3 2009 版牛津大学循证医学中心的推荐强度

Tab.3 Grades of recommendations according to the 2009 Oxford Centre for Evidence-based Medicine

推荐强度	描述
A	具有结果一致的 1 级研究
B	具有结果一致的 2 级、3 级研究,或由 1 级研究外推得到*
C	4 级研究,或由 2 级、3 级研究外推得到*
D	5 级证据,或任意级别证据存在严重不一致、结论不确定

*:外推指将研究数据应用于与原始研究场景存在潜在重要临床差异的情况



献率分别为 62.9%~100.0%、75.7%~96.1%^[15-16];对于病因未明、意识波动,或停用镇静药物后意识仍未恢复且无法完全用药物残余效应解释的 DoC 患者,EEG 有助于鉴别是否存在非惊厥性癫痫发作(non-convulsive seizures, NCS)或 NCSE、药物相关脑病及广泛性脑功能抑制^[17-20]。此外,针对急性 DoC 患者的多中心 RCT 结果显示,连续 EEG 较常规 EEG 具有更高的发作间期癫痫样放电检出率(69.2%比 55.7%)、更高的电发作/NCSE 检出率(15.7%比 4.4%)^[18]。

(二)急性期特定病因的 DoC

对于经心肺复苏后持续昏迷的缺血缺氧性脑病患者,一些前瞻性观察性研究和系统评价显示 EEG 是神经功能多模态评估的重要组成部分,可用于识别癫痫和预测预后^[21-26]。一项纳入 4 894 例 DoC 患者的荟萃分析显示,EEG 检出的 NCS、NCSE 患病率及二者总患病率较高(心肺复苏后患者中分别为 20.0%、17.3%、22.6%,中枢神经系统感染患者中分别为 23.9%、18.1%、23.9%);与常规 EEG 相比,连续 EEG 检出 NCS/NCSE 的条件对数比值比为 2.57^[27]。几项基于前瞻性多中心研究及观察性队列研究的系统评价显示,对于急性脑血管病,EEG 可辅助脑功能评估、电发作监测及预后预测^[28-31]。一些观察性队列研究证实,对于感染性脑炎/自身免疫性脑炎患者,EEG 有助于鉴别其癫痫发作与单纯精神障碍、不自主运动^[17,19,32-35];对于急性创伤性脑损伤患者,EEG 可辅助预测其癫痫发生风险及预后^[36-37];对于疑似代谢性脑病、中毒或药物相关 DoC 患者,尤其当意识水平与代谢异常程度不匹配、存在意识波动时,EEG 可用于评估脑功能障碍的严重程度及预测预后^[38-44]。

(三)慢性 DoC

慢性 DoC 主要包括 VS/UWS 和 MCS,仅依据临床行为学评估,其误诊率高达 39%^[7]。EEG 能提供客观依据辅助诊断,联合应用 CRS-R 可进一步降低 VS/UWS 与 MCS 的误诊率^[45-47]。一项系统评价显示,定量 EEG 区分 VS 和 MCS 的敏感度和特异度分别为 90%(95%CI: 69%~97%)和 80%(95%CI: 66%~90%)^[47]。此外,定量 EEG 还可实现脑功能状态的动态量化评估和预后预测^[48]。除定量 EEG 外,任务态 EEG、TMS-EEG 亦可评估皮层有效连接和脑网络复杂度,在识别 CMD、区分不同意识状态和评估促醒疗效方面具有辅助价值^[12-13,49];在 DBS 神经调控期间,DBS-EEG 可提供特定脑区长时程动态随访信息^[50-52]。

(四)伴 SE/NCS/NCSE 的 DoC

DoC 患者出现微小癫痫发作、怀疑 NCS/NCSE、已知癫痫病史患者出现 DoC、EEG 筛查发现电发作等情况时,均建议监测 EEG。具体而言,常规 EEG 有助于提高癫痫样放电的检出率^[53];SE 治疗期间尽早开展 EEG 监测,可以指导药物调整,尤其是在难治性 SE 的全程诊治中^[54-58];EEG 指导的麻醉镇静药物剂量调整可降低癫痫复发风险^[55]。对于惊厥性 SE、难治性 SE 及超级难治性 SE 控制后仍存在 DoC,表现为微小发作征象或高度怀疑 NCSE 的患者,建议尽早开始连续 EEG 监测,根据脑电活动形式指导药物调整,预测癫痫复发风险及预后^[18,54-57,59-64]。此外,在电发作停止后,对于接受静脉麻醉药物治疗的难治性 SE 患者,于撤药后至少进行 24 h 的 EEG 监测^[56,58,64-66]。需要注意的是,对于难治性 SE 的电发作及发作控制情况的评估,EEG 监测的最佳时机与持续时间目前仍存在争议,最好根据患者的诊断和临床情况进行个体化监测^[58,67]。

推荐意见 1:对于病因未明、意识波动或持续 DoC 不恢复的急性 DoC 患者,以及停用麻醉镇静药物后意识仍未恢复且不能完全由药物残余效应解释的 DoC 患者,推荐尽早行 EEG 监测;对于高度怀疑 NCS 或 NCSE 者,建议进行连续 EEG 监测(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 2:对于心肺复苏后(证据级别 1b, A 级推荐)、急性脑血管病(证据级别 2a~2b, B 级推荐)、脑炎(证据级别 2b, B 级推荐)、创伤性脑损伤(证据级别 2b, B 级推荐)等相关 DoC,以及疑似代谢性脑病、中毒或药物相关 DoC(证据级别 2b, B 级推荐)患者,建议根据病情行 EEG 监测以辅助评估脑功能、监测电发作和预测预后。

推荐意见 3:EEG 可作为慢性 DoC 患者意识状态分类及预后评估的重要辅助工具,推荐与 CRS-R 联合应用,以提高对 VS/UWS 与 MCS 的鉴别准确性(证据级别 2b, B 级推荐)。对于需进行动态脑功能监测、促醒疗效评估或预后预测的慢性 DoC 患者,可应用定量 EEG、任务态 EEG、TMS-EEG 及 DBS-EEG 等技术进行评估(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 4:对于癫痫发作后意识未恢复、惊厥性 SE 控制后仍伴 DoC 或疑似 NCSE 患者,推荐进行 EEG 监测,以发现不同形式的电发作并指导抗癫痫治疗、预测复发及预测预后(证据级别 2b, B 级推荐)。对于难治性 SE 或超级难治性 SE 患者,推荐尽早启动 EEG 监测,并以脑电活动作为治疗方案调整的重要依据(证据级别 2a, B 级推荐)。有条件时,对



于接受静脉麻醉药物治疗的难治性SE患者,建议撤药后予EEG监测24 h及以上,以评估SE复发风险(证据级别2b,B级推荐)。

三、静息态EEG在DoC中的应用

(一)静息态EEG检测

1. 反应性检测:DoC患者记录EEG的同时应进行EEG反应性检测。EEG反应性是指给予受试者声、光、痛觉等刺激后,EEG背景活动在电压和(或)频率上出现的特异性变化(单纯的肌电伪迹或眨眼动作不应计为反应性);常用刺激方式包括视觉(如闪光)、听觉(如耳旁拍手或呼唤患者姓名)或痛觉(如按压胸骨柄、眶上或指甲床)刺激。

2. 影响因素:重症监护病房中的仪器设备(如心电监护仪、呼吸机、气垫床等)可能对EEG记录产生干扰,可通过采用独立电源、稳压器、直流电源供电的EEG设备等方式规避^[68-69]。此外,治疗性或自发性低体温可导致全脑功能抑制,当核心体温低于30℃时,EEG可能会出现间断模式,表现为近连续(抑制比例1%~9%)或不连续(抑制比例10%~49%),严重时可出现爆发抑制(抑制比例50%~99%)或广泛抑制模式^[70-71];而在治疗性低体温(32~35℃)患者中,虽不会出现严重EEG异常,但低温治疗过程中EEG模式可能发生演变,复温后的EEG可能出现主要背景节律的变化^[72]。同样,大剂量麻醉药物的使用可影响EEG,可能诱导出爆发抑制,甚至全面抑制,影响EEG的临床解读^[22,73-74]。

3. 判读要点:需重点关注EEG背景活动特征,包括背景频率、波幅、连续性、对称性、后头部优势节律是否存在,以及EEG反应性是否存在^[75]。DoC患者可出现多种异常EEG模式,包括 α 和 β 节律减少或消失、广泛性慢波(δ/θ 波占主导)、三相波、 α 昏迷、 θ 昏迷、纺锤波昏迷、周期性放电、癫痫样放电、SE、爆发抑制、广泛抑制、电静息等^[76]。有研究将EEG异常模式分级用于DoC的评估,其中以Synek分级(表4)的应用较广泛^[77]。该分级水平与DoC的预后密切相关,级别越高提示脑功能损伤越重、预后越差^[78]。

然而,上述常规EEG判读的可靠性受判读者专业水平限制,影响了其标准化应用。相比之下,定量EEG采用数字信号处理和数学建模方法对脑电活动进行客观分析,可将原始EEG信号转化为直观的量化指标。定量EEG可通过功率谱、脑电微状态、功能连接及复杂度等方法,从多个维度反映脑功能状态:(1)不同频段EEG功率谱分析可定量评估脑电背景活动和频率特征,是定量EEG中常用的方法之一。利用多频段功率谱峰值组合,可进一步提高DoC量化评估的准确性,例如,基于 δ 、 θ 、 α 和 β 频段组合的ABCD神经元恢复模型(以下简称“ABCD模型”,表5)的效能,已在多项前瞻性队列研究中得到验证:该模型由A型到D型共分为四型,分型越高提示患者意识状态越好,远期预后越佳^[79-81]。(2)脑电微状态指多通道脑电地形图在短时间内(60~120 ms)呈现的相对稳定的拓扑结构,与静息态脑功能网络活动密切相关^[82]。微状态通常可分为A~F六类(表6),常用参数包括各型微状态的平均持续时间、发生频率、覆盖率、全局解释方差以及不同微状态间的转换率等^[83-87]。DoC患者的微状

表4 EEG异常模式的Synek分级

Tab.4 Synek scale grading of abnormal EEG patterns

Synek 分级	EEG 特征
I 级	规律的 α 节律,伴少量 θ 波,有反应性
II 级	以 θ 活动为主
a	波幅正常,有反应性
b	低波幅,无反应性
III 级	弥漫性 δ 活动
a	广泛节律性 δ 活动,有反应性
b	纺锤波昏迷
c	低波幅、不规则 δ 活动,无反应性
d	中波幅 δ 活动,多无反应性,可伴孤立尖波
IV 级	恶性EEG模式(爆发抑制、 α 昏迷、 θ 昏迷、低电压 δ)
a	爆发抑制(可伴癫痫样活动)
b	α 昏迷
c	θ 昏迷
d	低电压 δ 活动(<20 μ V)
V 级	电静息($\leq 2 \mu$ V)

EEG:脑电图

表5 ABCD神经元恢复模型的分型与意义

Tab.5 Classification and significance of ABCD neuronal recovery model

分型	描述	丘脑-皮层网络连接	行为学表现
A	δ 频段(0.5~4.0 Hz)单一谱峰	完全断开	昏迷、VS/UWS
B	θ 频段(4~8 Hz)单一谱峰	严重断开	昏迷、VS/UWS、MCS
C	θ 频段与 β 频段(13~30 Hz)双谱峰	中度断开	MCS、意识恢复
D	α 频段(8~13 Hz)与 β 频段双谱峰	完整连接	清醒

VS/UWS:植物状态/无反应觉醒综合征;MCS:微意识状态

表 6 脑电微状态的分类及相关脑功能网络

Tab.6 Classification of EEG microstates and their associated functional brain networks

分类	空间拓扑构型	相关脑功能网络
A	右额-左枕向	颞叶及听觉相关感觉处理网络
B	左额-右枕向	枕叶视觉相关网络
C	中线额-枕向	突显网络
D	额中央	注意及执行控制网络
E	左右对称	默认模式网络
F	枕中央	在空间分布上与 C 部分重叠, 可能与默认模式网络活动相关

态平均持续时间延长,特定微状态发生频率、覆盖率、全局解释方差降低,特定微状态间转换异常等,均提示其脑网络的时空动态连接及完整性受损^[88-90]。(3)脑功能连接反映脑网络的整合能力和信息传递水平,其可通过分析 EEG 不同电极间信号的耦合进行评估,常用指标包括相干性、加权符号互信息等。 θ 频段较高的相干性对 DoC 患者的意识改善具有显著预测价值, α 频段较高的加权符号互信息亦表现出良好的预测效能^[91]。可用于 DoC 评估的脑电复杂度指标包括近似熵、样本熵、排列熵、多尺度熵、加权熵、Lempel-Ziv 复杂度等^[92-95]。脑功能连接减弱和脑电复杂度降低提示脑网络整合能力及神经活动信息丰富度下降,而较高水平的功能连接和相对保留的复杂度则可能提示较好的意识恢复潜能。

(二)静息态 EEG 在 DoC 脑功能评估中的应用

1. 诊断与鉴别诊断:(1)急性 DoC 的病因鉴别:某些病因导致的 DoC 的 EEG 可呈现出特征性模式,有助于快速诊断。例如,代谢性或中毒性脑病的典型 EEG 表现为弥漫性、对称性慢波活动(如 θ 或 δ 节律),严重时可出现三相波,尤其见于肝性脑病、肾性脑病等^[96-97];缺血缺氧性脑病的 EEG 表现为从弥漫性慢波到爆发抑制甚至电静息等不同级别,通常可采用标准化分级系统(如 Synek 分级)或 ABCD 模型对其进行分级^[77,98];脑炎的 EEG 表现为弥漫性/局灶性慢波、癫痫样放电等,其中极端 δ 刷被认为是抗 N-甲基-D-天冬氨酸(NMDA)受体脑炎较为特征性的波形^[99];创伤性脑损伤、卒中因存在局灶性病变,EEG 表现为非对称性的异常,以病变侧异常为著,如无 δ 波的区域性减弱模式是大面积脑梗死的特殊 EEG 表现形式,发病 24 h 内该模式出现率达 76.9%^[100]。(2)UWS 与 MCS 的鉴别:以下 EEG 特征具有鉴别 UWS 与 MCS 的重要价值:MCS 患者保留 EEG 反应性的比例显著高于 UWS 患者^[101]。患者若

存在后头部优势节律,通常提示皮层功能相对保留,其多见于 MCS 或更高水平的意识状态^[102]。睡眠纺锤波的出现,强烈提示丘脑-皮层环路的功能完整性尚存,是区分 UWS 与 MCS 的关键指标之一^[101]。非快速眼动睡眠期慢波睡眠模式持续时间与 CRS-R 评分呈正相关,该指标可有效鉴别 UWS 和 MCS,对 78.8% 的 DoC 患者完成正确分类^[103-104]。两项定量 EEG 相关研究也显示,较高的 α/δ 比值与更好的意识水平相关,有助于区分 UWS 与 MCS^[81,105]。(3)癫痫发作的诊断与鉴别:关于 DoC 与癫痫发作的鉴别、NCSE 的诊断标准与鉴别诊断见后文第四节“EEG 监测在昏迷伴 SE 诊疗中的应用”。

2. 预后预测:(1)急性 DoC 的预后预测:①EEG 存在反应性通常提示 DoC 患者预后良好。一项关于缺氧后昏迷患者的前瞻性队列研究表明,入院第 1~2 天对听觉刺激存在 EEG 反应性者,更有可能在苏醒后短期内恢复基本认知功能,且 3 个月时预后良好^[106]。另一项同类型研究也发现,在未使用镇静药物的情况下,无 EEG 反应性预测缺氧后昏迷患者不良结局的阳性预测值达 98.3%^[107]。②EEG 的不同模式也可用于 DoC 的预后预测(表 7)。一项针对创伤性脑损伤患者的回顾性队列研究证实,后头部优势节律存在者(提示其丘脑-皮层网络功能相对保留)的住院存活率、术后恢复率及出院时扩展格拉斯哥预后量表评分均显著高于无后头部优势节律者^[102]。一项针对心肺复苏后昏迷患者的多中心前瞻性队列研究显示,连续正常电压背景 EEG 预测良好预后的敏感性为 77%、特异性为 80%^[108]。另有研究显示,心肺复苏后昏迷患者发病 8~14 d 时的 EEG 慢波模式预测觉醒的准确性(100%, 95%CI: 0.75~1.00)、敏感性(100%, 95%CI: 0.46~1.00)及特异性(100%, 95%CI: 0.63~1.00)均很高^[109]。一项针对 DoC 患者的前瞻性队列研究显示,EEG 觉醒(定义为同时存在 EEG 反应性和睡眠纺锤波)和格拉斯哥昏迷量表评分均是患者行为觉醒的独立预测因素,且 EEG 觉醒的预测效能优于 EEG 反应性、睡眠纺锤波及格拉斯哥昏迷量表评分^[110]。此外,形态良好的睡眠纺锤波与 CMD 高度相关,且出现时间更早是早期意识恢复和远期功能良好的独立预测因子^[111];与之相反的是,72 h 内 EEG 显示后头部优势节律不存在、N2 期睡眠瞬态波消失、 δ 活动占优势以及 EEG 背景不连续,均与预后不良、延迟苏醒独立相关^[112]。③EEG 显示任何癫痫样放电均提示预后不良。一项针对心肺复苏后昏迷患者的回顾性队列研究显示,存在癫痫样放电患者的预后良好率(出



表7 DoC患者的常见EEG特征及其临床意义

Tab.7 Common EEG features and their clinical significance in DoC patients

EEG特征	具体表现	临床意义
后头部优势节律存在	枕区为主的优势 α 节律	提示枕区优势 α 背景活动存在,但其独立预测预后价值有限
脑电反应性存在	声、光、痛觉等刺激后,EEG背景活动在波幅和(或)频率上出现变化	提示大脑对外界刺激反应能力相对保留,通常与较高的意识恢复概率相关
连续或近连续背景	衰减或抑制时段占记录时间的比例<10%	提示背景连续性相对保留,反映脑功能受损较轻
不连续背景	衰减或抑制时段占记录时间的比例为10%~49%	提示背景连续性受损,可见于中重度脑功能障碍
慢波背景	背景活动主要由 θ 波和(或) δ 波组成	提示脑功能广泛异常,但缺乏病因特异性,需结合反应性、连续性、动态演变综合判断
发作-发作间期连续谱活动	包括癫痫样放电、周期性放电、节律性 δ 活动及脑电发作等异常放电模式	提示皮层兴奋性增高或癫痫发作风险增加;不同模式的临床意义和预后预测价值存在差异,需结合具体模式及临床背景综合判断
纺锤波昏迷	昏迷状态下,EEG整体为慢波背景(θ/δ 波),叠加12~14 Hz纺锤样节律间断或成串出现,通常不受外界刺激影响,并非常规生理性睡眠波	提示相对较轻的大脑半球广泛受损,以脑干上段(中脑、脑桥)、丘脑通路受累为主,总体预后优于 α 昏迷、 θ 昏迷、爆发抑制;部分研究提示纺锤波为预后良好指标
α 昏迷	昏迷状态下,EEG以8~13 Hz的 α 样节律为主要背景活动,广泛分布且无反应性	提示脑功能广泛受损,大多数预后不良
θ 昏迷	昏迷状态下,EEG以5~8 Hz的 θ 样节律为主要背景活动,广泛分布且无反应性	提示脑功能广泛受损,大多数预后不良
爆发抑制或抑制背景	爆发抑制指抑制时段占记录时间的比例为50%~99%,并与较高波幅活动交替出现;抑制背景指抑制时段占记录时间比例>99%,脑电活动极微弱	提示严重脑功能受损;在心脏骤停复苏后昏迷患者中,排除镇静、低温及其他混杂因素后,属于高度恶性EEG特征

DoC:意识障碍;EEG:脑电图;EEG特征的临床意义及预后预测价值受昏迷病因、记录时间、动态演变以及麻醉镇静药物、低温、代谢或中毒等影响,除少数已经验证的特定EEG模式外,不应依据单一EEG特征判断预后,应结合多模态评估预测预后

院时改良 Rankin 量表评分0~2分)、苏醒率及存活率均显著低于无癫痫样放电患者^[113]。此外,EEG广泛抑制也提示预后不良,其最严重的形式为电静息(波幅 $\leq 2 \mu V$),亦是脑死亡判定标准之一^[21,25,114-115]。

④定量 EEG 同样可用于预后预测。有回顾性研究显示睡眠周期消失、相对 α 变异较小提示非创伤性昏迷患者出院后3个月时预后不良^[116]。而噪声刺激后 δ 频带相位滞后指数功能连接的变化与觉醒有关,以及与3个月后CRS-R量表评分的改善独立相关^[117]。对急性大面积脑梗死患者的定量EEG和脑网络特征分析显示:意识越好, α 和 β 振荡越多, δ 和 θ 振荡越少,近似熵、排列熵、大脑总连接性和小世界性越高,信号分布范围越广^[118]。同时,ABCD模型级别较高、 α 与 β 振荡较多、微状态C的发生频率与覆盖率以及微状态A向C转换率较高,与出院后6个月预后良好有关,且ABCD模型级别高(例如C、D型)和更高的微状态A向C转换率是良好预后的独立预测指标,两者联合可明显提高预测效能^[119]。(2)慢性DoC的预后预测:慢性DoC患者预后预测的核心在于判断患者是否存在恢复潜力,EEG反应性及模式、定量EEG等在该方面具有重要的应用价值。一项系统评价表明EEG反应性、 α 优势节律、睡眠纺锤波可预测慢性DoC患者的意识恢复或改善

(如UWS向MCS转化或MCS患者意识恢复)^[101]。一些定量EEG研究也显示,较高的 α/δ 比值与更好的预后相关^[95,105];EEG所示的额叶与顶叶连接性可预测DoC患者从UWS恢复到MCS,表现为意识改善患者的顶叶 δ 、 θ 相干性以及额叶与顶叶 δ 、 θ 、 α 、 β 相干性均显著增高^[120]。还有荟萃分析发现CRS-R量表对慢性DoC患者预后的预测效能仅为中等,而EEG功能连接和脑网络指标的预测准确性较高,预测效能也优于EEG功率谱分析^[121]。此外,EEG复杂度分析同样展示出预测潜力^[122]。一项探索DoC患者恢复过程中EEG复杂度纵向变化的研究表明,随着意识水平提高,如从UWS转变为MCS时,EEG复杂度会增加,近似熵、样本熵和Lempel-Ziv复杂度均出现由低向高的拐点^[94]。一项纳入昏迷患者的前瞻性队列研究显示,随着意识水平提高,EEG复杂度增加,基于排列熵、多尺度熵等特征的MCS与UWS分类准确率可达90.3%^[93]。

3. 疗效评估:EEG能够连续记录大脑皮层神经元电活动的时空动态变化特征,因此EEG模式、定量EEG的动态评估在DoC促醒疗效评估中具有重要价值。一项对心肺复苏后昏迷患者的回顾性研究表明,随着药物治疗后意识状态的改善,一些不良EEG特征(如无反应性、背景不连续、周期性放



电、爆发抑制、肌阵挛性 SE 或癫痫样放电)亦随之改善^[123]。两项针对 DoC 的神经调控促醒 RCT 采用 EEG 评估疗效,结果显示 EEG 分级改善与治疗有效相关,治疗前后 EEG 分级的差异有统计学意义($P < 0.05$)^[124-125]。一项针对 UWS/MCS 患者的 RCT 表明,6 个月时预后良好及意识恢复与 ABCD 模型级别升高相关^[126]。一项关于脊髓电刺激促醒的前瞻性病例系列研究也证实,DoC 患者意识状态改善的同时,其 ABCD 模型级别从 B 型向更优的 C 型、D 型转换^[127]。

推荐意见 5: 建议 EEG 评估脑功能前核查患者的药物使用情况,注意镇痛镇静药物的影响(证据级别 1b, A 级推荐)。

推荐意见 6: 建议对急性 DoC 患者进行 EEG 检测以辅助病因鉴别,并评估 EEG 模式、反应性,以及采用 EEG 功率谱、脑电复杂度和功能连接等方法评估急性 DoC 患者的脑功能状态(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 7: 建议采用以下 EEG 特征预测急性 DoC 患者预后良好:正常电压背景($\geq 20 \mu V$ 且任何时间间隔无癫痫样放电等恶性特征)、反应性存在、觉醒与睡眠特征存在、慢波模式以及后头部优势节律存在(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 8: 建议采用以下 EEG 特征预测急性 DoC 患者预后不良:无反应性、爆发抑制模式、低电压模式($< 20 \mu V$)、背景活动不连续、睡眠周期消失、相对 α 变异较小、后头部优势节律缺失、 δ 活动优势、癫痫样放电(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 9: 建议采用以下 EEG 特征区分 UWS 与 MCS、预测慢性 DoC 患者的意识恢复:反应性存在、 α 优势节律、睡眠纺锤波存在(证据级别 2a, B 级推荐),以及非快速眼动睡眠中慢波睡眠模式持续时间、 α/δ 比值、额顶叶与顶叶的不同频段相干性、多种类型的熵等(证据级别 2b~3b, B 级推荐)。

推荐意见 10: 以下 EEG 特征提示促醒治疗有效:高频节律恢复和慢波活动减少(证据级别 1b, A 级推荐),不良 EEG 模式(如无反应性、背景不连续、

周期性放电、爆发抑制、癫痫样放电等)减少(证据级别 3b, C 级推荐)。

四、EEG 监测在昏迷伴 SE 诊疗中的应用

(一)昏迷相关 NCSE 的诊断

昏迷相关 NCSE 多见于惊厥性 SE 控制后的患者,其是 DoC 中一种隐匿但具有重要临床意义的病理状态,视频 EEG 对其检出率为 8%~37%^[128-129]。一些系统评价和前瞻性队列研究提出,临床上控制惊厥性 SE 后,对患者应维持至少 24~48 h 的视频 EEG 监测,以评估是否出现 NCSE,此为识别和管理“昏迷相关 NCSE”的核心环节^[54, 64-65]。需要说明的是,无癫痫病史但首次发作即出现昏迷的 NCSE 情形极为罕见^[129]。鉴于此,本文主要聚焦于惊厥性 SE 基础上演变而来的昏迷相关 NCSE。

由于 NCSE 缺乏可识别的临床发作表现,其诊断主要依赖于 EEG。为此,国际抗癫痫联盟专家组于 2013 年首次提出了 NCSE 的萨尔茨堡诊断标准(Salzburg consensus criteria, SCC)(表 8),并在 2016 年对该标准进行了进一步验证^[130-132]。该标准通过明确癫痫样放电的频率阈值、动态演变特征以及患者对抗癫痫治疗的反应,将 EEG 表现与临床表现相结合,形成了一套可操作的诊断框架,已在多中心研究与临床实践中得到广泛应用与验证。2024 年一项前瞻性外部验证研究显示,SCC 诊断“确切/可能 NCSE”的敏感性为 94%,特异性为 77%,但阳性预测值仅 34%,而阴性预测值高达 99%;“确切 NCSE”的假阳性多见于连续性发作、刺激诱发节律性/周期性/发作期放电、局灶性皮质发育不良,而“可能 NCSE”的假阳性主要见于缺氧/代谢/中毒/脓毒症性脑病、创伤性脑损伤、脑炎/脑膜脑炎及癫痫发作后状态^[133]。由此可见,SCC 在临床实践中具有极高的敏感性,有助于快速排除 NCSE,但其特异性有限,在昏迷及危重患者中假阳性风险较高,需要结合临床情境和病因学信息谨慎解读其结果。

2021 年美国临床神经生理学会制订的《重症脑电监测标准术语》(以下简称“术语”)^[75]未提供单一

表 8 NCSE 的萨尔茨堡诊断标准

Tab.8 Salzburg consensus criteria for NCSE

既往史	EEG 特征	频率/条件	附加证据*
无癫痫性脑病	癫痫样放电	$> 2.5 \text{ Hz}$, 持续 $\geq 10 \text{ s}$	无需
	癫痫样放电	$\leq 2.5 \text{ Hz}$, 持续 $\geq 10 \text{ s}$	①~③任一项
	节律性 δ/θ 活动	$> 0.5 \text{ Hz}$, 持续 $\geq 10 \text{ s}$	①~③任一项
癫痫性脑病	与基线相比,癫痫样放电或节律性 δ/θ 活动增加、或频率增快	持续 $\geq 10 \text{ s}$	③或④

*:附加证据包括:①典型时空演变;②细微临床发作表现;③静脉抗癫痫药物后 EEG 及临床同步改善;④较基线 EEG 明显恶化;NCSE:非惊厥性癫痫持续状态;EEG:脑电图



的“NCSE 诊断标准”,而是定义了构成 NCSE 的一系列 EEG 模式(表 9),包括“脑电发作持续状态”、“电-临床癫痫持续状态”、“发作期-发作间期连续体”(这是诊断 NCSE 的模糊地带)等。其中值得注意的是,“术语”中明确将“发作期-发作间期连续体”定义为“可能的脑电发作持续状态”的同义词,判定要点包括:(1)频率 >1.0 Hz 且 ≤ 2.5 Hz 的周期性放电或棘慢波/尖慢波持续时间 ≥ 10 s;(2)频率 ≥ 0.5 Hz 且 ≤ 1.0 Hz,并伴附加模式或波动的周期性放电或棘慢波/尖慢波持续时间 ≥ 10 s,低频模式需结合修饰特征提高准确判断发作的可能性;(3)频率 >1.0 Hz,并伴附加模式或波动的偏侧性节律性 δ 活动持续时间 ≥ 10 s;(4)不满足电发作或“脑电发作持续状态”的标准,但经静脉抗癫痫药物试验后 EEG 与临床均改善,判定为“电-临床癫痫发作”/“电-临床癫痫持续状态”;仅 EEG 改善而临床无改善,判定为“可能的电-临床癫痫持续状态”。

(二)昏迷伴 SE 的疗效评估与用药指导

对于 SE 患者,药物治疗不仅要终止临床发作,还需警惕脑电发作是否持续。此时,EEG 是评估治疗反应的关键客观依据,治疗目标应包括 EEG 中癫痫样放电停止^[54,64-65]。对两项 RCT 的前瞻性分析表明,惊厥性 SE 患者中,特定的 EEG 模式是预测其进展为难治性 SE 的独立危险因素;与节律性背景活动相比,发作间期癫痫样放电、周期性放电或持续性癫痫样放电与更高的难治性 SE 发生率显著相关^[57]。

对于惊厥性 SE 后昏迷并进入难治性 SE 阶段、需使用静脉麻醉药物的患者,基于 EEG 设定的麻醉深度目标对其预后的影响尚存在争议。一项纳入 171 例患者的回顾性队列研究提示,与更温和的 EEG 目标(如仅抑制癫痫样放电)相比,以抑制背景

活动至“电静息”为目标的深度麻醉治疗,可能与死亡风险升高(风险比为 2.88)及更高的感染发生率(43% 比 11%)相关^[134]。一项针对 467 例 SE 患者的研究进一步证实,以“爆发抑制”为目标的深度麻醉/镇静,是患者死亡风险增加 9.1 倍、感染发生率增加及住院时间延长的独立危险因素^[135]。然而,将不良结局简单归咎于 EEG 抑制模式本身,可能存在归因偏差。反对观点指出:病情越危重、SE 越难以控制的昏迷患者,越需要接受深度麻醉,这自然导致该类患者预后更差。有研究在矫正此类混杂因素后发现,达到“爆发抑制”模式可显著降低 70% 的突破性癫痫发作风险,且与长期不良预后无直接关联,由此提示“爆发抑制”模式是控制难治性 SE 较为安全和可靠的 EEG 目标^[55]。

推荐意见 11:对于临床发作终止后仍处于昏迷状态的惊厥性 SE 患者,建议继续进行 24~48 h 的视频 EEG 监测,以明确或排除 NCSE(证据级别 2b, B 级推荐)。如果存在癫痫样放电、周期性放电或持续癫痫样放电,提示病情可能进展为难治性 SE 或控制失败(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 12:SCC 在诊断昏迷相关 NCSE 中具有良好的敏感性与可重复性,建议用于明确或排除 NCSE(证据级别 2b, B 级推荐)。但 SCC 在复杂脑病背景下存在敏感性波动与特异性不足的局限,建议临床应用时结合患者具体病因、EEG 动态演变及治疗反应进行综合判断,以提高诊断可靠性并避免过度治疗(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 13:在 SCC 基础上,建议将 EEG 中癫痫样放电持续时间 ≥ 10 min 或在任何 60 min 记录期内占比 $\geq 20\%$ 作为诊断昏迷相关 NCSE 的补充标准(证据级别 5, C 级推荐)。

表 9 《重症脑电监测标准术语》中与 NCSE 相关的 EEG 术语

Tab.9 EEG terminology related to NCSE in Standardized Critical Care EEG Terminology

术语	核心定义	EEG 判定要点	时间阈值	临床相关性/药物反应
脑电发作持续状态	符合 SCC 脑电发作标准的活动达到持续状态阈值	需先满足 SCC 脑电发作标准	持续 ≥ 10 min 或任意 60 min 记录期内占比 $\geq 20\%$	不要求存在时间锁定的临床表现,可用于界定纯脑电层面的持续状态
电-临床癫痫持续状态	EEG 模式与时间锁定的临床发作相关,或静脉抗癫痫药物后 EEG 与临床同步改善	EEG 模式满足临床相关性或药物反应条件之一	持续 ≥ 10 min 或任意 60 min 记录期内占比 $\geq 20\%$	关键为时间锁定的临床表现和静脉抗癫痫药物后 EEG 与临床同步改善
发作期-发作间期连续体相关模式	未达到脑电发作持续状态标准,但可能具有发作期意义的 EEG 模式	包括特定频率范围的周期性放电、棘慢/尖慢波或偏侧性节律性 δ 活动,并结合附加刺激、演变、波动等修饰特征综合判断	频率 ≥ 2 Hz 且持续 ≥ 2 h,或持续 ≥ 10 min/任意 60 min 记录期内占比 $\geq 20\%$	静脉抗癫痫药物后 EEG 与临床均改善,支持电-临床癫痫发作或电-临床癫痫持续状态;仅 EEG 改善而无临床改善,支持可能的电-临床癫痫持续状态

NCSE:非惊厥性癫痫持续状态;EEG:脑电图;SCC:萨尔茨堡诊断标准



推荐意见 14: 建议昏迷伴 SE 的治疗目标为临床发作和 EEG 中癫痫样放电均终止(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 15: 在难治性 SE 治疗中,“爆发抑制”可作为部分患者麻醉治疗的 EEG 目标之一,但应结合病因、发作控制情况、麻醉药物并发症风险及多学科评估个体化决定,不宜作为所有患者的常规目标(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 16: 不建议盲目追求完全抑制 EEG 中“发作期-发作间期连续体”相关模式,应结合患者症状体征及药物试验结果综合判断,避免过度治疗(证据级别 5, C 级推荐)。

五、EEG 前沿技术在 DoC 中的应用

(一)任务态 EEG

1. 概述:任务态 EEG 是在记录 EEG 的同时,要求受检者遵循指令完成特定任务或接受特定刺激的一种检查方法。根据指令或刺激方式的不同,可分为语言范式、音乐范式及运动想象范式,譬如遵循指令进行运动想象(如想象“张开手”或“握紧手”)、空间导航(如想象“穿过房间”)等^[10,136]。任务态 EEG 能实时捕捉大脑在执行特定任务时的电活动变化,直接观察大脑在任务状态下的激活模式、功能连接变化,发现行为上无法反应但大脑仍有活动的情况,从而在一定程度上弥补临床行为学评估 DoC 的局限。然而,该技术目前仍面临以下问题:(1)受镇静药物、头部运动、注意力不集中或入睡等因素影响,假阴性率较高;(2)对于存在严重听觉或认知障碍的患者,其检查结果的准确性可能受到影响;(3)不同患者对指令所产生的 EEG 反应存在较大异质性;(4)范式设计、数据分析(常需借助多种机器学习方法与分析算法)及统计处理方面均具有较高的技术挑战^[136]。

2. 在 DoC 中的应用:一项前瞻性观察性研究对急性重症创伤性脑损伤患者进行了临床行为学评估(CRS-R 量表)以及基于语言、音乐和运动想象范式的任务态 EEG 检测,根据刺激前后 EEG 功率谱变化,判定大脑皮层是否存在反应,结果显示,在伴有语言相关行为证据的 DoC 患者中,对语言和音乐刺激的反应较运动想象任务更为敏感(62.5%~80.0% 比 33.3%~42.9%),但运动想象任务的诊断特异性最高(100.0%),能检出床旁行为学评估无法识别的 CMD^[136]。一项前瞻性观察性队列研究利用任务态 EEG 筛查 DoC 患者是否存在 CMD,并进一步分析其预测预后效能,结果表明,基于运动想象范式的

任务态 EEG 筛查出的 CMD 是患者预后良好的独立预测因素^[137]。

(二)TMS-EEG

1. 概述:目前多数研究中 TMS 刺激强度为静息运动阈值的 90%~100%,刺激靶点多选择双侧前额叶背外侧或顶下小叶,刺激次数通常为 100~200 次,刺激间隔时间为 2~10 s^[12,138-140]。在 TMS-EEG 分析指标方面,主要包括 TMS 诱发电位、TMS 诱发的神经振荡、TMS 诱发的脑网络连接和扰动复杂性指数(perturbational complexity index, PCI)等。其中,PCI 是一个反映丘脑-皮层活动整合程度的指标;通过计算 TMS 触发大脑皮质产生的脑电数据的 Lempel-Ziv 复杂度,得到一个 0~1 之间的数值,即为 PCI,其为评估大脑皮质对 TMS 干扰的综合反应提供了个体化的量化标准。从临床应用优势看, TMS-EEG 可直接探测与意识相关的神经环路,无需依赖完整的感受或运动通路,亦无需患者主动配合,因此在 DoC 评估中具有独特优势^[141]。在安全性方面,在无 TMS 禁忌证受试者中 TMS-EEG 的安全性已得到证实,在低频模式下 TMS 诱发癫痫发作的风险低于千分之一^[142]。

2. 在 DoC 中的应用:2012 年 TMS-EEG 首次被应用于 DoC 患者的诊断分类与意识恢复研究,结果发现,VS/UWS 患者的有效连接出现中断,而 MCS 患者表现出复杂的激活反应,其激活依次涉及刺激部位同侧和对侧的远端皮质区域^[140]。从神经振荡和信息流动角度分析,DoC 患者脑层面的神经响应在时间和空间上均受到抑制,且额叶与顶叶皮层间的双向定向信息流明显弱于健康人,甚至在刺激额叶、运动皮层和顶叶时完全消失;不过, MCS 患者的交互率仍显著高于 VS/UWS 患者^[143-144]。在诊断效能方面,区分清醒与无意识状态的 PCI 最佳界值是 0.31,其诊断 MCS 的敏感性达到 94.7%^[139]。此外,随着患者意识水平的恢复,PCI 逐渐增高,在判断意识水平方面具有很高的敏感性^[11]。在治疗预测方面,一项对接受 TMS 促醒治疗的 MCS 患者的交叉 RCT 发现,治疗改善组基线时的 PCI 显著高于无改善组,提示 PCI 在评估和预测 TMS 治疗效果方面具有潜在价值^[12]。

(三)DBS-EEG

1. 概述:DBS-EEG 是神经调控(通过 DBS 干预脑功能)与 EEG 的一项融合创新技术,其核心在于可获取多源脑电信号:一类是来自 DBS 靶点的局部场电活动,通常为多触点柱状电极记录到的 EEG;另一类是在实施 DBS 后头皮电极记录到的 EEG。



DBS-EEG 采用高分辨率立体定向导航系统实现 DoC 患者大脑的个体化靶点定位,确保电极以亚毫米级精度植入目标靶点,通常采用交叉对照设计范式,在 DBS 开启与关闭状态下同步记录静息态或任务态 EEG。DBS-EEG 的价值在于实施 DBS 神经调控的同时,实时探测深部脑区及皮层-皮层下交互活动的神经生理变化,具有高时间分辨率和高空间精确度的优势^[145]。该技术不仅能够建立与 DoC 患者预后相关的量化参数,还能提供特定脑区长时程动态随访信息,便于根据病情和脑功能状态调整刺激方案,将神经调控从持续的开环干预模式,转变为可被实时评估并进行优化的闭环自适应反馈范式。然而,该技术目前仍面临以下问题:(1)患者筛选标准不统一;(2)DBS 本身固有的手术风险;(3)DBS 产生的高强度、高频电脉冲可造成巨大的电学伪迹干扰,严重影响甚至完全掩盖患者真实的神经活动。DBS-EEG 的禁忌证主要包括:未控制的凝血功能障碍、活动性颅内或全身感染、严重脑萎缩导致靶点解剖结构辨识不清、存在严重共患病无法耐受手术^[146-147]。

2. 在 DoC 中的应用:DBS-EEG 的应用优势主要在于意识动态变化的纵向高敏监测和机制探索。目前 DBS-EEG 的最佳植入靶点选择尚处于经验积累阶段,常用信号采集靶点主要基于神经调控植入靶点而建立,包括中央丘脑、丘脑中央中核-束旁核复合体和丘脑腹后外侧核,其中以单侧半球(尤其是左侧半球)电极植入为主流^[50,52]。一些回顾性研究结果显示:丘脑中央中核-束旁核复合体中的电生理特征,如高频发放、 γ 频段的多单位活动高功率、 α 频段归一化功率和 θ 振荡的稳定性,与 DoC 患者的意识恢复程度呈正相关^[13];经过机器学习筛选,中央丘脑中 θ 频段的多单位活动稳定性或高功率,以及 γ 频段的多单位活动尖峰同步性或稳定性,可作为预测 DoC 患者意识恢复的特征指标^[148]。然而,目前 DBS-EEG 的临床应用仍处于探索阶段,相关结果主要来自样本量有限的观察性研究、回顾性分析或机制性研究,缺乏大规模多中心 RCT 的证据支持^[52]。

推荐意见 17: 鉴于设备可及性、操作要求及判断标准等尚未统一,目前任务态 EEG、TMS-EEG 和 DBS-EEG 尚不宜作为临床常规检测项目,有条件的医院在应用相关技术评估 DoC 时,也需结合临床、影像学等评估,并考虑所处病程阶段,予以综合判断,防止出现误判(证据级别 5, D 级推荐)。

推荐意见 18: 对于有条件使用任务态 EEG 的医

院,推荐应用基于运动想象范式的任务态 EEG 评估 DoC 患者是否存在 CMD,常用参数包括 EEG 功率谱和脑电微状态(证据级别 3a, B 级推荐)。

推荐意见 19: 对于有条件使用 TMS-EEG 的医院,推荐将 TMS-EEG 用于评估 DoC 患者的意识水平,常用参数包括 TMS 诱发的神经振荡、脑网络连接和 PCI 等(证据级别 2b, B 级推荐)。

推荐意见 20: 推荐依据医院硬件及人员配备条件,在 DBS 治疗的同时进行 DBS-EEG 探索性应用,其可为意识水平的长时程动态监测及干预策略的优化提供独特路径(证据级别 4, C 级推荐)。

六、临床实践流程

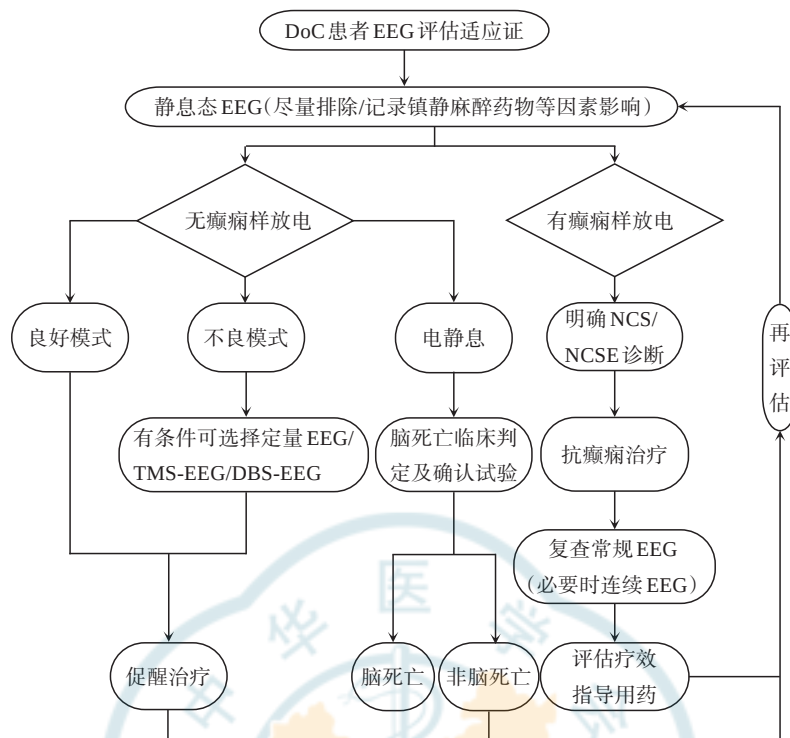
应用 EEG 评估 DoC 患者脑功能及预测预后时,建议遵循以下临床实践流程:(1)进行临床评估,排查并纠正所有干扰意识的混杂因素。除 SE 等需要药物治疗的情况外,尽量停用麻醉镇静药物,同时纠正严重电解质紊乱、低血糖/高血糖、药物中毒等影响意识判断和 EEG 表现的情况^[3]。(2)选择 EEG 技术时,通常首选静息态 EEG;按需选择视频 EEG,例如需要筛查 NCS/NCSE、指导用药和药物疗效评估等;必要时进行定量 EEG 分析,例如功率谱、ABCD 模型等。(3)结合医院条件按需进阶前沿 EEG 技术检查,例如任务态 EEG、TMS-EEG 或 DBS-EEG。(4)根据评估结果给予分层个体化干预,例如药物、神经调控、康复等,治疗后还应进行疗效评估。具体内容见图 1。

七、展望

脑机接口(brain-computer interface, BCI)作为连接大脑与外部设备的跨学科技术,展现出巨大的临床应用潜力。其将反映大脑活动的 EEG 信号转化为输出指令,以作为患者与外界交流的工具,从而改变中枢神经系统与身体其他部位或外部环境的交互方式。近年来,越来越多的研究将 BCI-EEG 技术应用于 DoC 患者的意识评估、苏醒预测和康复促醒等领域^[149]。然而,BCI 技术仍处于初步探索阶段,且因 DoC 患者存在意识波动、注意力集中时间短等问题,研究结果存在较大异质性;同时,其在 EEG 信号质量与解码效率的技术突破、临床场景的适配性与安全性验证、相关伦理规范的建立健全等多方面仍面临挑战。因此,该领域仍需开展更高质量的研究,为其在 DoC 中的应用提供充分证据。

由于不同个体的 EEG 特征存在差异,且 DoC 的病因、严重程度等各不相同,基于 EEG 的诊断和预





DoC: 意识障碍; EEG: 脑电图; NCS: 非惊厥性癫痫发作; NCSE: 非惊厥性癫痫持续状态; TMS-EEG: 经颅磁刺激联合 EEG; DBS-EEG: 脑深部电刺激 EEG 同步记录

图1 EEG评估DoC患者的临床实践流程

Fig.1 Clinical practice workflow for EEG assessment in patients with DoC

后预测模型的普适性受到一定限制,单纯依赖 EEG 甚至可能造成误判,例如 MCS 患者中残留的 α 波可能与睡眠或病理性昏迷的 α 节律混淆。因此,目前相关研究正尝试将 EEG 与临床评估、功能 MRI、功能性近红外光谱监测等多源信息进行联合处理与分析,开发基于深度学习的多模态信息整合模型,自动识别与 DoC 相关的特征模式,以期提高 DoC 诊断的自动化水平与准确性^[150]。然而,即便开发出上述多模态整合模型,若要将其真正用于临床,仍需构建标准化的 EEG 采集、处理及分析范式,并依托大规模多中心前瞻性临床研究,证实模型具备可靠的性能与临床效用。

本共识仅代表参与专家组的观点,旨在为临床医师实践提供参考,不具备法律效力。本共识的推荐意见仅反映该领域阶段性研究结果与认识水平,如有新的临床研究证据将适时更新,以更好地满足临床实践需要。

本共识专家组名单

执笔: 范琳琳(首都医科大学宣武医院神经内科)、张艳(首都医科大学宣武医院神经内科)、刘刚(首都医科大学宣武医院神经内科)、田飞(首都医科大学宣武医院神经内科)、杨庆林(首都医科大学附属北京同仁医院神经内科)、何延波(北京市回民医院重症医学科)、柴树婷(首都医科大学宣武医院神经内科)、郑锐哲(复旦大学附属华山医院神经外科)、成斯琪(首都医科大学宣武医院神经内科)

审定专家: 王玉平(首都医科大学宣武医院神经内科)

专家委员会成员(按姓氏汉语拼音排序): 曹杰(吉林大学第一医院神经内科)、常虹(内蒙古自治区人民医院神经内科)、陈晶(大庆龙南医院神经内科)、陈胜利(重庆大学附属三峡医院神经内科)、高亮(上海冬雷脑科医院神经外科)、郭栋(聊城市人民医院神经内科)、郭涛(宁夏医科大学总医院神经内科)、郝芳(聊城市人民医院神经内科)、何江弘(首都医科大学附属北京天坛医院神经外科)、何延波(北京市回民医院重症医学科)、胡晓(贵州省人民医院神经内科)、胡雅娟(安徽医科大学第一附属医院神经内科)、江荣才(首都医科大学宣武医院神经外科)、李红燕(新疆维吾尔自治区人民医院神经内科)、李燕华(广西壮族自治区人民医院神经内科)、刘芳(首都医科大学宣武医院神经内科)、吕玉丹(吉林大学第一医院神经内科)、马桂贤(广东省人民医院神经内科)、马联胜(山西医科大学第二医院神经内科)、马玉宝(解放军总医院第一医学中心神经内科)、毛玲(华中科技大学同济医学院附属协和医院神经内科)、裴少芳(苏州市立医院神经内科)、潘速跃(南方医科大学南方医院神经内科)、邱菊(安徽医科大学第二附属医院神经内科)、曲鑫(首都医科大学宣武医院神经外科)、石际俊(苏州大学附属第二医院神经内科)、史中华(首都医科大学三博脑科医院重症医学科)、谭红(长沙市第一医院神经内科)、唐子人(首都医科大学附属北京朝阳医院急诊科)、田飞(首都医科大学宣武医院神经内科)、田佳(河北医科大学第一医院神经内科)、王春梅(首都医科大学宣武医院重症医学科)、王芙蓉(华中科技大学同济医学院附属同济医院神经内科)、王亮(重庆医科大学附属第一医院神经内科)、王勤周(山东大学齐鲁医院神经内科)、王姝瑶(通辽市人民医院神经内科)、王彦(唐山市人民医院神经内科)、吴雪海(复旦大学附属华山医院神经外科)、吴永明(南方医科大学南方医院神经内科)、谢秋幼(南方医科大学珠江医院康复医学科)、徐光军(聊城市人民医院脑科医院神经内科)、徐跃峤(首



都医科大学宣武医院神经内科)、杨飞(解放军总医院第一医学中心神经内科)、杨庆林(首都医科大学附属北京同仁医院神经内科)、杨中华(首都医科大学附属北京天坛医院神经内科)、游明瑶(贵州医科大学附属医院神经内科)、张乐(中南大学湘雅医院神经内科)、张蕾(云南省第一人民医院神经内科)、张丽娜(中南大学湘雅医院重症医学科)、张奇志(济南市第五人民医院神经内科)、张馨(南京鼓楼医院神经内科)、张艳(首都医科大学宣武医院神经内科)、张永巍(海军军医大学第一附属医院神经内科)、赵滨(天津医科大学总医院神经内科)、周高雅(湖南省第二人民医院神经内科)、周立新(北京协和医院神经内科)

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Kondziella D, Amiri M, Othman MH, et al. Incidence and prevalence of coma in the UK and the USA[J]. *Brain Commun*, 2022, 4(5): fcac188. DOI: 10.1093/braincomms/fcac188.
- [2] Edlow BL, Claassen J, Schiff ND, et al. Recovery from disorders of consciousness: mechanisms, prognosis and emerging therapies [J]. *Nat Rev Neurol*, 2021, 17(3): 135-156. DOI: 10.1038/s41582-020-00428-x.
- [3] Bodien YG, Busl KM, Chang C, et al. Disorders of consciousness diagnosis, interventions, and prognostication for the intensivist: report of the 2025 ISICEM roundtable[J]. *Intensive Care Med*, 2026, 52(1): 42-62. DOI: 10.1007/s00134-025-08224-1.
- [4] Bodien YG, Allanson J, Cardone P, et al. Cognitive motor dissociation in disorders of consciousness[J]. *N Engl J Med*, 2024, 391(7): 598-608. DOI: 10.1056/NEJMoa2400645.
- [5] Kazazian K, Monti MM, Owen AM. Functional neuroimaging in disorders of consciousness: towards clinical implementation[J]. *Brain*, 2025, 148(7): 2283-2298. DOI: 10.1093/brain/awaf075.
- [6] Stender J, Gosseries O, Bruno MA, et al. Diagnostic precision of PET imaging and functional MRI in disorders of consciousness: a clinical validation study[J]. *Lancet*, 2014, 384(9942): 514-522. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)60042-8.
- [7] van Erp WS, Lavrijsen JC, Vos PE, et al. The vegetative state: prevalence, misdiagnosis, and treatment limitations[J]. *J Am Med Dir Assoc*, 2015, 16(1): 85.e9-85.e14. DOI: 10.1016/j.jamda.2014.10.014.
- [8] Wannez S, Heine L, Thonnard M, et al. The repetition of behavioral assessments in diagnosis of disorders of consciousness[J]. *Ann Neurol*, 2017, 81(6): 883-889. DOI: 10.1002/ana.24962.
- [9] 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(2): 133-137. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2013.02.017. Chinese Society of Electroencephalography and Epilepsy, Chinese Medical Association. Expert consensus on the treatment of non-convulsive status epilepticus[J]. *Chin J Neurol*, 2013, 46(2): 133-137. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2013.02.017.
- [10] Gui P, Jiang Y, Zang D, et al. Assessing the depth of language processing in patients with disorders of consciousness[J]. *Nat Neurosci*, 2020, 23(6): 761-770. DOI: 10.1038/s41593-020-0639-1.
- [11] Arai N, Nakanishi T, Nakajima S, et al. Insights of neurophysiology on unconscious state using combined transcranial magnetic stimulation and electroencephalography: a systematic review[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2021, 131: 293-312. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2021.09.029.
- [12] Xu C, Yuan Z, Chen Z, et al. Perturbational complexity index in assessing responsiveness to rTMS treatment in patients with disorders of consciousness: a cross-over randomized controlled trial study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 167. DOI: 10.1186/s12984-024-01455-1.
- [13] He J, Zhang H, Dang Y, et al. Electrophysiological characteristics of CM-pf in diagnosis and outcome of patients with disorders of consciousness[J]. *Brain Stimul*, 2023, 16(5): 1522-1532. DOI: 10.1016/j.brs.2023.09.021.
- [14] Prud'hon S, Amiel H, Zanin A, et al. EEG and acute confusional state at the emergency department[J]. *Neurophysiol Clin*, 2024, 54(4): 102966. DOI: 10.1016/j.neucli.2024.102966.
- [15] Scarpino M, Verna MT, Grippo A, et al. The role of EEG in the emergency department: its contribution to the patient's diagnostic-therapeutic pathway. The EMINENCE study[J]. *Clin Neurophysiol Pract*, 2025, 10: 70-77. DOI: 10.1016/j.cnp.2025.02.010.
- [16] Scarpino M, Grippo A, Verna MT, et al. Contribution of the EEG in the diagnostic workup of patients with transient neurological deficit and acute confusional state at the emergency department: the EMINENCE study[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2025, 15(7): 863. DOI: 10.3390/diagnostics15070863.
- [17] Herman ST, Abend NS, Bleck TP, et al. Consensus statement on continuous EEG in critically ill adults and children, part I: indications[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2015, 32(2): 87-95. DOI: 10.1097/WNP.000000000000166.
- [18] Rossetti AO, Schindler K, Sutter R, et al. Continuous vs routine electroencephalogram in critically ill adults with altered consciousness and no recent seizure: a multicenter randomized clinical trial[J]. *JAMA Neurol*, 2020, 77(10): 1225-1232. DOI: 10.1001/jamaneurol.2020.2264.
- [19] Sonnevile R, Azabou E, Bailly P, et al. Management of severe acute encephalopathy in the ICU: an expert consensus statement from the French Society of Intensive Care Medicine[J]. *Ann Intensive Care*, 2025, 15(1): 37. DOI: 10.1186/s13613-025-01436-0.
- [20] Anadure RK, Goel J, Saxena R, et al. A study on the clinical and electrographic profile of nonconvulsive status epilepticus (NCSE) in comatose ICU patients using portable electroencephalography (EEG) [J]. *Med J Armed Forces India*, 2023, 79(3): 292-299. DOI: 10.1016/j.mjafi.2021.06.027.
- [21] Westhall E, Rosén I, Rundgren M, et al. Time to epileptiform activity and EEG background recovery are independent predictors after cardiac arrest[J]. *Clin Neurophysiol*, 2018, 129(8): 1660-1668. DOI: 10.1016/j.clinph.2018.05.016.
- [22] Sivaraju A, Gilmore EJ, Wira CR, et al. Prognostication of post-cardiac arrest coma: early clinical and electroencephalographic predictors of outcome[J]. *Intensive Care Med*, 2015, 41(7): 1264-1272. DOI: 10.1007/s00134-015-3834-x.



- [23] Sandroni C, D'Arrigo S, Cacciola S, et al. Prediction of poor neurological outcome in comatose survivors of cardiac arrest: a systematic review[J]. *Intensive Care Med*, 2020, 46(10): 1803-1851. DOI: 10.1007/s00134-020-06198-w.
- [24] Sandroni C, D'Arrigo S, Cacciola S, et al. Prediction of good neurological outcome in comatose survivors of cardiac arrest: a systematic review[J]. *Intensive Care Med*, 2022, 48(4): 389-413. DOI: 10.1007/s00134-022-06618-z.
- [25] Tjepkema-Cloostermans MC, Hofmeijer J, Hom HW, et al. Predicting outcome in postanoxic coma: are ten EEG electrodes enough? [J]. *J Clin Neurophysiol*, 2017, 34(3): 207-212. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000337.
- [26] Rossetti AO, Tovar Quiroga DF, Juan E, et al. Electroencephalography predicts poor and good outcomes after cardiac arrest: a two-center study[J]. *Crit Care Med*, 2017, 45(7): e674-e682. DOI: 10.1097/CCM.0000000000002337.
- [27] Limotai C, Ingsathit A, Thadanipon K, et al. How and whom to monitor for seizures in an ICU: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Crit Care Med*, 2019, 47(4): e366-e373. DOI: 10.1097/CCM.0000000000003641.
- [28] Sutcliffe L, Lumley H, Shaw L, et al. Surface electroencephalography (EEG) during the acute phase of stroke to assist with diagnosis and prediction of prognosis: a scoping review[J]. *BMC Emerg Med*, 2022, 22(1): 29. DOI: 10.1186/s12873-022-00585-w.
- [29] Kondziella D, Friberg CK, Wellwood I, et al. Continuous EEG monitoring in aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a systematic review[J]. *Neurocrit Care*, 2015, 22(3): 450-461. DOI: 10.1007/s12028-014-0068-7.
- [30] Benghanem S, Kubis N, Gayat E, et al. Prognostic value of early EEG abnormalities in severe stroke patients requiring mechanical ventilation: a pre-planned analysis of the SPICE prospective multicenter study[J]. *Crit Care*, 2024, 28(1): 173. DOI: 10.1186/s13054-024-04957-5.
- [31] Rosenthal ES, Biswal S, Zafar SF, et al. Continuous electroencephalography predicts delayed cerebral ischemia after subarachnoid hemorrhage: a prospective study of diagnostic accuracy[J]. *Ann Neurol*, 2018, 83(5): 958-969. DOI: 10.1002/ana.25232.
- [32] Morano A, Fanella M, Cerulli Irelli E, et al. Seizures in autoimmune encephalitis: findings from an EEG pooled analysis [J]. *Seizure*, 2020, 83: 160-168. DOI: 10.1016/j.seizure.2020.10.019.
- [33] Schmitt SE, Pargeon K, Frechette ES, et al. Extreme delta brush: a unique EEG pattern in adults with anti-NMDA receptor encephalitis[J]. *Neurology*, 2012, 79(11): 1094-1100. DOI: 10.1212/WNL.0b013e3182698cd8.
- [34] Giri YR, Parrill A, Damodar S, et al. Anti-*N*-methyl-*D*-aspartate receptor (NMDAR) encephalitis in children and adolescents: a systematic review and quantitative analysis of reported cases[J]. *J Can Acad Child Adolesc Psychiatry*, 2021, 30(4): 236-248.
- [35] Vogrig A, Gigli GL, Nilo A, et al. Seizures, epilepsy, and NORSE secondary to autoimmune encephalitis: a practical guide for clinicians[J]. *Biomedicine*, 2022, 11(1): 44. DOI: 10.3390/biomedicine11010044.
- [36] Pease M, Gupta K, Moshé SL, et al. Insights into epileptogenesis from post-traumatic epilepsy[J]. *Nat Rev Neurol*, 2024, 20(5): 298-312. DOI: 10.1038/s41582-024-00954-y.
- [37] Pease M, Elmer J, Shahabadi AZ, et al. Predicting posttraumatic epilepsy using admission electroencephalography after severe traumatic brain injury[J]. *Epilepsia*, 2023, 64(7): 1842-1852. DOI: 10.1111/epi.17622.
- [38] Sutter R, Kaplan PW. Clinical and electroencephalographic correlates of acute encephalopathy[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2013, 30(5): 443-453. DOI: 10.1097/WNP.0b013e3182a73bc2.
- [39] Bersagliere A, Raduazzo ID, Schiff S, et al. Ammonia-related changes in cerebral electrogenesis in healthy subjects and patients with cirrhosis[J]. *Clin Neurophysiol*, 2013, 124(3): 492-496. DOI: 10.1016/j.clinph.2012.08.014.
- [40] Zhang P, Zhou L, Chen L, et al. Electroencephalography signatures for hepatic encephalopathy in cirrhosis patients treated with proton pump inhibitors: an exploratory pilot study [J]. *Biomedicine*, 2022, 10(12): 40. DOI: 10.3390/biomedicine10123040.
- [41] Beuchat I, Danish HH, Rubin DB, et al. EEG findings in CAR T-cell-associated neurotoxicity: clinical and radiological correlations[J]. *Neuro Oncol*, 2022, 24(2): 313-325. DOI: 10.1093/neuonc/noab174.
- [42] Maan G, Keitoku K, Kimura N, et al. Cefepime-induced neurotoxicity: systematic review[J]. *J Antimicrob Chemother*, 2022, 77(11): 2908-2921. DOI: 10.1093/jac/dkac271.
- [43] Azabou E, Magalhaes E, Braconnier A, et al. Early standard electroencephalogram abnormalities predict mortality in septic intensive care unit patients[J]. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0139969. DOI: 10.1371/journal.pone.0139969.
- [44] Gilmore EJ, Gaspard N, Choi HA, et al. Acute brain failure in severe sepsis: a prospective study in the medical intensive care unit utilizing continuous EEG monitoring[J]. *Intensive Care Med*, 2015, 41(4): 686-694. DOI: 10.1007/s00134-015-3709-1.
- [45] Estraneo A, Loreto V, Guarino I, et al. Standard EEG in diagnostic process of prolonged disorders of consciousness[J]. *Clin Neurophysiol*, 2016, 127(6): 2379-2385. DOI: 10.1016/j.clinph.2016.03.021.
- [46] Forgacs PB, Conte MM, Fridman EA, et al. Preservation of electroencephalographic organization in patients with impaired consciousness and imaging-based evidence of command-following[J]. *Ann Neurol*, 2014, 76(6): 869-879. DOI: 10.1002/ana.24283.
- [47] Bender A, Jox RJ, Grill E, et al. Persistent vegetative state and minimally conscious state: a systematic review and Meta-analysis of diagnostic procedures[J]. *Dtsch Arztebl Int*, 2015, 112(14): 235-242. DOI: 10.3238/arztebl.2015.0235.
- [48] Wutzi B, Golaszewski SM, Leibnitz K, et al. Narrative review: quantitative EEG in disorders of consciousness[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(6): 697. DOI: 10.3390/brainsci11060697.
- [49] Estraneo A, Pascarella A, Moretta P, et al. Repeated transcranial direct current stimulation in prolonged disorders of consciousness: a double-blind cross-over study[J]. *J Neurol Sci*,



- 2017, 375: 464-470. DOI: 10.1016/j.jns.2017.02.036.
- [50] Yang Y, Cao TQ, He SH, et al. Revolutionizing treatment for disorders of consciousness: a multidisciplinary review of advancements in deep brain stimulation[J]. *Mil Med Res*, 2024, 11(1): 81. DOI: 10.1186/s40779-024-00585-w.
- [51] Chudy D, Deletis V, Paradžik V, et al. Deep brain stimulation in disorders of consciousness: 10 years of a single center experience [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 19491. DOI: 10.1038/s41598-023-46300-y.
- [52] Cao T, He S, Wang L, et al. Clinical neuromodulatory effects of deep brain stimulation in disorder of consciousness: a literature review[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(6): e14559. DOI: 10.1111/cns.14559.
- [53] Lejeune N, Zasler N, Formisano R, et al. Epilepsy in prolonged disorders of consciousness: a systematic review[J]. *Brain Inj*, 2021, 35(12-13): 1485-1495. DOI: 10.1080/02699052.2021.1973104.
- [54] Fisch U, Jünger AL, Baumann SM, et al. Association between induced burst suppression and clinical outcomes in patients with refractory status epilepticus: a 9-year cohort study[J]. *Neurology*, 2023, 100(19): e1955-e1966. DOI: 10.1212/WNL.0000000000207129.
- [55] Phabphal K, Chisurajinda S, Somboon T, et al. Does burst-suppression achieve seizure control in refractory status epilepticus? [J]. *BMC Neurol*, 2018, 18(1): 46. DOI: 10.1186/s12883-018-1050-3.
- [56] Jose J, Keni RR, Hassan H, et al. Predictors of outcome in super refractory status epilepticus[J]. *Epilepsy Behav*, 2021, 118: 107929. DOI: 10.1016/j.yebeh.2021.107929.
- [57] Tian F, Su Y, Chen W, et al. RSE prediction by EEG patterns in adult GCSE patients[J]. *Epilepsy Res*, 2013, 105(1-2): 174-182. DOI: 10.1016/j.eplesysres.2013.02.007.
- [58] Claassen J, Hirsch LJ, Emerson RG, et al. Treatment of refractory status epilepticus with pentobarbital, propofol, or midazolam: a systematic review[J]. *Epilepsia*, 2002, 43(2): 146-153. DOI: 10.1046/j.1528-1157.2002.28501.x.
- [59] Trinka E, Leitinger M. Which EEG patterns in coma are nonconvulsive status epilepticus? [J]. *Epilepsy Behav*, 2015, 49: 203-222. DOI: 10.1016/j.yebeh.2015.05.005.
- [60] De Stefano P, Baumann SM, Fisch U, et al. Impact of etiology on mortality and recovery in patients with status epilepticus[J]. *Neurology*, 2026, 106(5): e214624. DOI: 10.1212/WNL.0000000000214624.
- [61] Laccheo I, Sonmez Turk H, Bhatt AB, et al. Non-convulsive status epilepticus and non-convulsive seizures in neurological ICU patients[J]. *Neurocrit Care*, 2015, 22(2): 202-211. DOI: 10.1007/s12028-014-0070-0.
- [62] Punia V, Garcia CG, Hantus S. Incidence of recurrent seizures following hospital discharge in patients with LPDs (PLEDs) and nonconvulsive seizures recorded on continuous EEG in the critical care setting[J]. *Epilepsy Behav*, 2015, 49: 250-254. DOI: 10.1016/j.yebeh.2015.06.026.
- [63] Bitar R, Khan UM, Rosenthal ES. Utility and rationale for continuous EEG monitoring: a primer for the general intensivist [J]. *Crit Care*, 2024, 28(1): 244. DOI: 10.1186/s13054-024-04986-0.
- [64] Jaitly R, Sgro JA, Towne AR, et al. Prognostic value of EEG monitoring after status epilepticus: a prospective adult study[J]. *J Clin Neurophysiol*, 1997, 14(4): 326-334. DOI: 10.1097/00004691-199707000-00005.
- [65] Rossetti AO, Milligan TA, Vulliemoz S, et al. A randomized trial for the treatment of refractory status epilepticus[J]. *Neurocrit Care*, 2011, 14(1): 4-10. DOI: 10.1007/s12028-010-9445-z.
- [66] Muhlhofer WG, Layfield S, Lowenstein D, et al. Duration of therapeutic coma and outcome of refractory status epilepticus[J]. *Epilepsia*, 2019, 60(5): 921-934. DOI: 10.1111/epi.14706.
- [67] Cornwall CD, Piilgaard H, Engedal TS, et al. Fast acute sedation at intensive care vs. high-dose IV anti-seizure medication for treatment of non-convulsive status epilepticus: a randomized, multicenter trial[J]. *Crit Care Explor*, 2025, 7(9): e1311. DOI: 10.1097/CCE.0000000000001311.
- [68] Young GB. Continuous EEG monitoring in the ICU: challenges and opportunities[J]. *Can J Neurol Sci*, 2009, 36 Suppl 2: S89-91.
- [69] Neurocritical Care Committee of the Chinese Society of Neurology (NCC/CSN). Recommendations for electroencephalography monitoring in neurocritical care units[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2017, 130(15): 1851-1855. DOI: 10.4103/0366-6999.211559.
- [70] Stecker MM, Cheung AT, Pochettino A, et al. Deep hypothermic circulatory arrest: I. Effects of cooling on electroencephalogram and evoked potentials[J]. *Ann Thorac Surg*, 2001, 71(1): 14-21. DOI: 10.1016/s0003-4975(00)01592-7.
- [71] Levy WJ, Pantin E, Mehta S, et al. Hypothermia and the approximate entropy of the electroencephalogram[J]. *Anesthesiology*, 2003, 98(1): 53-57. DOI: 10.1097/0000542-200301000-00012.
- [72] Crepeau AZ, Rabinstein AA, Fugate JE, et al. Continuous EEG in therapeutic hypothermia after cardiac arrest: prognostic and clinical value[J]. *Neurology*, 2013, 80(4): 339-344. DOI: 10.1212/WNL.0b013e31827f089d.
- [73] Triltsch AE, Welte M, von Homeyer P, et al. Bispectral index-guided sedation with dexmedetomidine in intensive care: a prospective, randomized, double blind, placebo-controlled phase II study[J]. *Crit Care Med*, 2002, 30(5): 1007-1014. DOI: 10.1097/00003246-200205000-00009.
- [74] Au YK, Kananeh MF, Rahangdale R, et al. Treatment of refractory status epilepticus with continuous intravenous anesthetic drugs: a systematic review[J]. *JAMA Neurol*, 2024, 81(5): 534-548. DOI: 10.1001/jamaneurol.2024.0108.
- [75] Hirsch LJ, Fong M, Leitinger M, et al. American Clinical Neurophysiology Society's standardized critical care EEG terminology: 2021 version[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2021, 38(1): 1-29. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000806.
- [76] Rollnik JD. Clinical neurophysiology of neurologic rehabilitation[J]. *Handb Clin Neurol*, 2019, 161: 187-194. DOI: 10.1016/B978-0-444-64142-7.00048-5.
- [77] Synek VM. Prognostically important EEG coma patterns



- in diffuse anoxic and traumatic encephalopathies in adults[J]. *J Clin Neurophysiol*, 1988, 5(2): 161-174. DOI: 10.1097/00004691-198804000-00003.
- [78] Curley WH, Comanducci A, Fecchio M. Conventional and investigational approaches leveraging clinical EEG for prognosis in acute disorders of consciousness[J]. *Semin Neurol*, 2022, 42(3): 309-324. DOI: 10.1055/s-0042-1755220.
- [79] Zhang H, Chai S, Shan D, et al. Combining quantified EEG with clinical measures to better predict outcomes of acute disorders of consciousness[J]. *Neurophysiol Clin*, 2025, 55(2): 103048. DOI: 10.1016/j.neucli.2025.103048.
- [80] Forgacs PB, Allen BB, Wu X, et al. Corticothalamic connectivity in aneurysmal subarachnoid hemorrhage: relationship with disordered consciousness and clinical outcomes[J]. *Neurocrit Care*, 2022, 36(3): 760-771. DOI: 10.1007/s12028-021-01354-6.
- [81] Forgacs PB, Frey HP, Velazquez A, et al. Dynamic regimes of neocortical activity linked to corticothalamic integrity correlate with outcomes in acute anoxic brain injury after cardiac arrest[J]. *Ann Clin Transl Neurol*, 2017, 4(2): 119-129. DOI: 10.1002/acn3.385.
- [82] Britz J, Van De Ville D, Michel CM. BOLD correlates of EEG topography reveal rapid resting-state network dynamics[J]. *Neuroimage*, 2010, 52(4): 1162-1170. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.02.052.
- [83] Milz P, Faber PL, Lehmann D, et al. The functional significance of EEG microstates--associations with modalities of thinking[J]. *Neuroimage*, 2016, 125: 643-656. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.08.023.
- [84] Li Y, Gao J, Yang Y, et al. Temporal and spatial variability of dynamic microstate brain network in disorders of consciousness [J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(2): e14641. DOI: 10.1111/cns.14641.
- [85] Michel CM, 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. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.11.062.
- [86] Li H, Zhang X, Sun X, et al. Functional networks in prolonged disorders of consciousness[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1113695. DOI: 10.3389/fnins.2023.1113695.
- [87] Coste CP, Kleinschmidt A. Cingulo-opercular network activity maintains alertness[J]. *Neuroimage*, 2016, 128: 264-272. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2016.01.026.
- [88] Chen C, Han J, Zheng S, et al. Dynamic changes of brain activity in different responsive groups of patients with prolonged disorders of consciousness[J]. *Brain Sci*, 2022, 13(1): 5. DOI: 10.3390/brainsci13010005.
- [89] Toplutaş E, Aydın F, Hanoğlu L. EEG microstate analysis in patients with disorders of consciousness and its clinical significance[J]. *Brain Topogr*, 2024, 37(3): 377-387. DOI: 10.1007/s10548-023-00939-y.
- [90] Ling Y, Wen X, Tang J, et al. Effect of topographic comparison of electroencephalographic microstates on the diagnosis and prognosis prediction of patients with prolonged disorders of consciousness[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(3): e14421. DOI: 10.1111/cns.14421.
- [91] Stefan S, Schorr B, Lopez-Rolon A, et al. Consciousness indexing and outcome prediction with resting-state EEG in severe disorders of consciousness[J]. *Brain Topogr*, 2018, 31(5): 848-862. DOI: 10.1007/s10548-018-0643-x.
- [92] Lei L, Liu K, Yang Y, et al. Spatio-temporal analysis of EEG features during consciousness recovery in patients with disorders of consciousness[J]. *Clin Neurophysiol*, 2022, 133: 135-144. DOI: 10.1016/j.clinph.2021.08.027.
- [93] Wang Y, Niu Z, Xia X, et al. Application of fast perturbational complexity index to the diagnosis and prognosis for disorders of consciousness[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2022, 30: 509-518. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3154772.
- [94] Altıntop ÇG, Latifoğlu F, Akın AK, et al. Classification of depth of coma using complexity measures and nonlinear features of electroencephalogram signals[J]. *Int J Neural Syst*, 2022, 32(5): 2250018. DOI: 10.1142/S0129065722500186.
- [95] Della Bella GA, Zang D, Gui P, et al. Detection of EEG dynamic complex patterns in disorders of consciousness[J]. *Commun Biol*, 2025, 8(1): 1204. DOI: 10.1038/s42003-025-08666-9.
- [96] Amodio P, Montagnese S. Clinical neurophysiology of hepatic encephalopathy[J]. *J Clin Exp Hepatol*, 2015, 5(Suppl 1): S60-68. DOI: 10.1016/j.jceh.2014.06.007.
- [97] Faigle R, Sutter R, Kaplan PW. Electroencephalography of encephalopathy in patients with endocrine and metabolic disorders[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2013, 30(5): 505-516. DOI: 10.1097/WNP.0b013e3182a73db9.
- [98] Curley WH, Bodien YG, Zhou DW, et al. Electrophysiological correlates of thalamocortical function in acute severe traumatic brain injury[J]. *Cortex*, 2022, 152: 136-152. DOI: 10.1016/j.cortex.2022.04.007.
- [99] Zhang Y, Liu G, Jiang MD, et al. Analysis of electroencephalogram characteristics of anti-NMDA receptor encephalitis patients in China[J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128(7): 1227-1233. DOI: 10.1016/j.clinph.2017.04.015.
- [100] 杨庆林, 宿英英. 急性大面积脑梗死的脑电图RAWOD模式的应用价值 [J]. *中华神经科杂志*, 2007, 40(1): 8-10. DOI: 10.3760/j.issn:1006-7876.2007.01.004.
- Yang QL, Su YY. Application value of RAWOD pattern of electroencephalography in acute massive cerebral infarction[J]. *Chin J Neurol*, 2007, 40(1): 8-10. DOI: 10.3760/j.issn:1006-7876.2007.01.004.
- [101] Kotchoubey B, Pavlov YG. A systematic review and Meta-analysis of the relationship between brain data and the outcome in disorders of consciousness[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 315. DOI: 10.3389/fneur.2018.00315.
- [102] Cleri NA, Saadon JR, Zheng X, et al. Predicting traumatic brain injury outcomes using a posterior dominant rhythm[J]. *J Neurosurg*, 2023, 139(6): 1523-1533. DOI: 10.3171/2023.4.JNS23569.
- [103] Rossi Sebastiano D, Visani E, Panzica F, et al. Sleep patterns associated with the severity of impairment in a large cohort of patients with chronic disorders of consciousness[J]. *Clin Neurophysiol*, 2018, 129(3): 687-693. DOI: 10.1016/j.clinph.



- 2017.12.012.
- [104] Toppi J, Quattrocioni I, Riccio A, et al. EEG-derived markers to improve prognostic evaluation of disorders of consciousness [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2024, 28(11): 6674-6684. DOI: 10.1109/JBHI.2024.3445118.
- [105] Ma X, Qi Y, Xu C, et al. How well do neural signatures of resting-state EEG detect consciousness? A large-scale clinical study[J]. *Hum Brain Mapp*, 2024, 45(4): e26586. DOI: 10.1002/hbm.26586.
- [106] Juan E, De Lucia M, Tzovara A, et al. Prediction of cognitive outcome based on the progression of auditory discrimination during coma[J]. *Resuscitation*, 2016, 106: 89-95. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2016.06.032.
- [107] Benghanem S, Paul M, Charpentier J, et al. Value of EEG reactivity for prediction of neurologic outcome after cardiac arrest: insights from the Parisian registry[J]. *Resuscitation*, 2019, 142: 168-174. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2019.06.009.
- [108] Backman S, Cronberg T, Friberg H, et al. Highly malignant routine EEG predicts poor prognosis after cardiac arrest in the target temperature management trial[J]. *Resuscitation*, 2018, 131: 24-28. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2018.07.024.
- [109] Jiang M, Su Y, Liu G, et al. EEG pattern predicts awakening of comatose patients after cardiopulmonary resuscitation[J]. *Resuscitation*, 2020, 151: 33-38. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2019.11.013.
- [110] Kang XG, Yang F, Li W, et al. Predictive value of EEG-awakening for behavioral awakening from coma[J]. *Ann Intensive Care*, 2015, 5(1): 52. DOI: 10.1186/s13613-015-0094-4.
- [111] Carroll EE, Shen Q, Kansara V, et al. Sleep spindles as a predictor of cognitive motor dissociation and recovery of consciousness after acute brain injury[J]. *Nat Med*, 2025, 31(5): 1578-1585. DOI: 10.1038/s41591-025-03578-x.
- [112] Lee H, Mizrahi MA, Hartings JA, et al. Continuous electroencephalography after moderate to severe traumatic brain injury[J]. *Crit Care Med*, 2019, 47(4): 574-582. DOI: 10.1097/CCM.0000000000003639.
- [113] Faro J, Coppler PJ, Dezfulian C, et al. Differential association of subtypes of epileptiform activity with outcome after cardiac arrest[J]. *Resuscitation*, 2019, 136: 138-145. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2018.11.022.
- [114] Pan J, Wu J, Liu J, et al. A systematic review of sleep in patients with disorders of consciousness: from diagnosis to prognosis[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(8): 72. DOI: 10.3390/brainsci11081072.
- [115] 韩霖, 王艳娟, 王海峰, 等. 成人脑死亡自主呼吸激发试验的研究进展[J]. *中华神经医学杂志*, 2023, 22(7): 740-746. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20221202-00877.
- Han L, Wang YJ, Wang HF, et al. Recent advance in apnea test in adult brain death[J]. *Chin J Neuromed*, 2023, 22(7): 740-746. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20221202-00877.
- [116] Qin N, Cao Q, Li F, et al. A nomogram based on quantitative EEG to predict the prognosis of nontraumatic coma patients in the neuro-intensive care unit[J]. *Intensive Crit Care Nurs*, 2024, 83: 103618. DOI: 10.1016/j.iccn.2023.103618.
- [117] Bouchereau E, Marchi A, Hermann B, et al. 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(2): e225-e232. DOI: 10.1016/j.bja.2022.09.005.
- [118] Huang H, Niu Z, Liu G, et al. Early consciousness disorder in acute large hemispheric infarction: an analysis based on quantitative EEG and brain network characteristics[J]. *Neurocrit Care*, 2020, 33(2): 376-388. DOI: 10.1007/s12028-020-01051-w.
- [119] 柴树婷, 张慧敏, 刘刚, 等. 量化脑电图在急性卒中意识障碍患者脑功能评估与预后预测中的应用价值[J]. *中国医师杂志*, 2026, 28(1): 6-12. DOI: 10.3760/cma.j.cn431274-20251229-01551.
- Chai ST, Zhang HM, Liu G, et al. Application of quantitative EEG in brain function assessment and prognostic prediction of acute stroke patients with disorders of consciousness[J]. *Journal of Chinese Physician*, 2026, 28(1): 6-12. DOI: 10.3760/cma.j.cn431274-20251229-01551.
- [120] Schorr B, Schlee W, Arndt M, et al. Coherence in resting-state EEG as a predictor for the recovery from unresponsive wakefulness syndrome[J]. *J Neurol*, 2016, 263(5): 937-953. DOI: 10.1007/s00415-016-8084-5.
- [121] Szirmai D, Zabihi A, Kóti T, et al. EEG connectivity and network analyses predict outcome in patients with disorders of consciousness - a systematic review and Meta-analysis[J]. *Heliyon*, 2024, 10(10): e31277. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31277.
- [122] Bai Y, Xia X, Wang Y, et al. Electroencephalography quadratic phase self-coupling correlates with consciousness states and restoration in patients with disorders of consciousness[J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(8): 1235-1242. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.04.710.
- [123] Steinberg A, Rittenberger JC, Baldwin M, et al. Neurostimulant use is associated with improved survival in comatose patients after cardiac arrest regardless of electroencephalographic substrate[J]. *Resuscitation*, 2018, 123: 38-42. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2017.12.002.
- [124] Liu YS, Liu ZB, Yang Z, et al. Clinical efficacy of hyperbaric oxygen combined with different timings of right median-nerve electrical stimulation in patients with brain injury-induced disorders of consciousness[J]. *Brain Behav*, 2022, 12(9): e2716. DOI: 10.1002/brb3.2716.
- [125] Xiong Q, Le K, Tang Y, et al. Effect of single and combined median nerve stimulation and repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with prolonged disorders of consciousness: a prospective, randomized, single-blinded, controlled trial[J]. *Front Aging Neurosci*, 2023, 15: 1112768. DOI: 10.3389/fnagi.2023.1112768.
- [126] Chen R, Gao Q, Wu DW, et al. Effect of cerebellar stimulation on awareness recovery in disorders of consciousness (CARE-DoC): a randomized, sham-controlled, crossover clinical trial[J]. *Neurotherapeutics*, 2025, 22(5): e00635. DOI: 10.1016/j.neurot.2025.e00635.
- [127] Sun J, Yan J, Zhao L, et al. Spinal cord stimulation for prolonged



- disorders of consciousness: a study on scalp electroencephalography[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(12): e70180. DOI: 10.1111/cns.70180.
- [128] Towne AR, Waterhouse EJ, Boggs JG, et al. Prevalence of nonconvulsive status epilepticus in comatose patients[J]. *Neurology*, 2000, 54(2): 340-345. DOI: 10.1212/wnl.54.2.340.
- [129] Friedman D, Claassen J, Hirsch LJ. Continuous electroencephalogram monitoring in the intensive care unit[J]. *Anesth Analg*, 2009, 109(2): 506-523. DOI: 10.1213/ane.0b013e3181a9d8b5.
- [130] Beniczky S, Hirsch LJ, Kaplan PW, et al. Unified EEG terminology and criteria for nonconvulsive status epilepticus[J]. *Epilepsia*, 2013, 54 Suppl 6: 28-29. DOI: 10.1111/epi.12270.
- [131] Leitinger M, Beniczky S, Rohrer A, et al. Salzburg consensus criteria for non-convulsive status epilepticus-approach to clinical application[J]. *Epilepsy Behav*, 2015, 49: 158-163. DOI: 10.1016/j.yebeh.2015.05.007.
- [132] Leitinger M, Trinka E, Gardella E, et al. Diagnostic accuracy of the Salzburg EEG criteria for non-convulsive status epilepticus: a retrospective study[J]. *Lancet Neurol*, 2016, 15(10): 1054-1062. DOI: 10.1016/S1474-4422(16)30137-5.
- [133] Ulvin LB, Nilsen KB, Taubøll E, et al. Sensitivity and specificity of the Salzburg EEG criteria for nonconvulsive status epilepticus [J]. *Ann Clin Transl Neurol*, 2024, 11(10): 2685-2695. DOI: 10.1002/acn3.52184.
- [134] Sutter R, Marsch S, Fuhr P, et al. Anesthetic drugs in status epilepticus: risk or rescue? A 6-year cohort study[J]. *Neurology*, 2014, 82(8): 656-664. DOI: 10.1212/WNL.0000000000000009.
- [135] Marchi NA, Novy J, Faouzi M, et al. Status epilepticus: impact of therapeutic coma on outcome[J]. *Crit Care Med*, 2015, 43(5): 1003-1009. DOI: 10.1097/CCM.0000000000000881.
- [136] Edlow BL, Chatelle C, Spencer CA, et al. Early detection of consciousness in patients with acute severe traumatic brain injury [J]. *Brain*, 2017, 140(9): 2399-2414. DOI: 10.1093/brain/awx176.
- [137] Claassen J, Doyle K, Matory A, et al. Detection of brain activation in unresponsive patients with acute brain injury[J]. *N Engl J Med*, 2019, 380(26): 2497-2505. DOI: 10.1056/NEJMoa1812757.
- [138] Bertazzoli G, Esposito R, Mutanen TP, et al. The impact of artifact removal approaches on TMS-EEG signal[J]. *Neuroimage*, 2021, 239: 118272. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2021.118272.
- [139] Casarotto S, Comanducci A, Rosanova M, et al. Stratification of unresponsive patients by an independently validated index of brain complexity[J]. *Ann Neurol*, 2016, 80(5): 718-729. DOI: 10.1002/ana.24779.
- [140] Rosanova M, Gosseries O, Casarotto S, et al. Recovery of cortical effective connectivity and recovery of consciousness in vegetative patients[J]. *Brain*, 2012, 135(Pt 4): 1308-1320. DOI: 10.1093/brain/awr340.
- [141] Tremblay S, Rogasch NC, Premoli I, et al. Clinical utility and prospective of TMS-EEG[J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(5): 802-844. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.01.001.
- [142] Rossi S, Hallett M, Rossini PM, et al. Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research [J]. *Clin Neurophysiol*, 2009, 120(12): 2008-2039. DOI: 10.1016/j.clinph.2009.08.016.
- [143] Bai Y, Gong A, Wang Q, et al. Breakdown of oscillatory effective networks in disorders of consciousness[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(3): e14469. DOI: 10.1111/cns.14469.
- [144] Bai Y, Yang L, Meng X, et al. Breakdown of effective information flow in disorders of consciousness: insights from TMS-EEG[J]. *Brain Stimul*, 2024, 17(3): 533-542. DOI: 10.1016/j.brs.2024.04.011.
- [145] Seeber M, Cantonas LM, Hoevels M, et al. Subcortical electrophysiological activity is detectable with high-density EEG source imaging[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 753. DOI: 10.1038/s41467-019-08725-w.
- [146] Sheth SA, Shofty B, Allawala A, et al. Stereo-EEG-guided network modulation for psychiatric disorders: surgical considerations[J]. *Brain Stimul*, 2023, 16(6): 1792-1798. DOI: 10.1016/j.brs.2023.07.057.
- [147] 中国医师协会神经修复专业委员会意识障碍与促醒学组. 慢性意识障碍诊断与治疗中国专家共识[J]. *中华神经医学杂志*, 2020, 19(10): 977-982. DOI: 10.3760/cma. j. cn115354-20200701-00525.
- Group of Disorders of Consciousness and Conscious-promotion, Professional Committee of Neurorepair of Chinese Medical Doctor Association. Diagnoses and treatments of prolonged disorders of consciousness: an experts consensus[J]. *Chin J Neuromed*, 2020, 19(10): 977-982. DOI: 10.3760/cma. j. cn115354-20200701-00525.
- [148] Zhang H, Ge Q, Liu X, et al. A shared central thalamus mechanism underlying diverse recoveries in disorders of consciousness[J]. *Nat Commun*, 2025, 16(1): 10400. DOI: 10.1038/s41467-025-65360-4.
- [149] Zhang H, Jiao L, Yang S, et al. Brain-computer interfaces: the innovative key to unlocking neurological conditions[J]. *Int J Surg*, 2024, 110(9): 5745-5762. DOI: 10.1097/JS9.0000000000002022.
- [150] Wang N, Si J, He Y, et al. Cerebral neurovascular networks may serve as potential targets for identifying disorders of consciousness: a synchronous electroencephalography and functional near-Infrared spectroscopy study[J]. *MedComm* (2020), 2025, 6(12): e70530. DOI: 10.1002/mco2.70530.

(收稿日期:2026-03-30)

(本文编辑:刘凯)

