

脑电图在意识障碍认知运动分离中的研究进展

刘菲 石广志

首都医科大学天坛医院重症医学科, 北京 100070

通信作者: 石广志, Email: shiguangzhi@bjtth.org

【摘要】 意识障碍是重症脑损伤常见的并发症, 包括昏迷、植物状态 (UWS)/ 无反应性觉醒综合征 (VS) 和微意识状态 (MCS)。对于在床旁未表现出意识行为特征, 但在高级成像和脑电图 (EEG) 测试中有大脑激活证据的患者, 称之为认知运动分离 (CMD)。大约 25% 的行为学无反应的患者通过 EEG 和功能性磁共振成像 (fMRI) 可以检测到这种隐蔽意识。CMD 的出现与预后密切相关, 具有重要意义。EEG 作为一种无创、可床旁操作的工具, 结合多种检测方法可以反映患者的意识水平及残余意识。基于此, 本文就 EEG 在意识障碍及 CMD 诊断和预后预测方面的进展进行综述。

【关键词】 脑电图; 意识障碍; 认知运动分离; 诊断; 预后预测

基金项目: 北京市重大疫情防控重点专科项目 (2021-135)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250303-00207

Advances in electroencephalography for detecting cognitive-motor dissociation in disorders of consciousness

Liu Fei, Shi Guangzhi

Department of Critical Care Medicine, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China

Corresponding author: Shi Guangzhi, Email: shiguangzhi@bjtth.org

【Abstract】 Disorders of consciousness including coma, unresponsive wakefulness syndrome (UWS)/the vegetative state (VS), and minimally conscious state (MCS), are a prevalent complication following severe brain injury. Cognitive-motor dissociation (CMD), characterized by absent behavioral signs of consciousness but preserved neural activation detected by electroencephalography (EEG) or advanced imaging, such as functional magnetic resonance imaging (fMRI), occurs in approximately 25% of behaviorally unresponsive patients. As a non-invasive, bedside tool, EEG provides critical insights into consciousness levels and residual cognitive capacity, with CMD detection carrying significant prognostic implications. This review synthesizes recent advances in EEG-based diagnosis and prognosis of disorders of consciousness and CMD.

【Key words】 Electroencephalography; Disorder of consciousness; Cognitive-motor dissociation; Diagnosis; Prognosis prediction

Fund program: Key Specialty Project for Major Epidemic Prevention and Control of Beijing (2021-135)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250303-00207

目前临床上主要通过行为学量表评估患者意识, 但由于评估的主观性, 误诊率高达 40%。因此, 意识障碍患者的残余意识评估对临床医生而言是一个真正的诊断难题, 关系到是否撤出生命支持治疗, 具有重要的意义。近年来, 大量研究已经证明了功能性磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图 (electroencephalography, EEG)、正电子发射断层扫描 (positron emission computed tomography, PET) 等技术可用于监测意识障碍患者中的隐性意识。其中, EEG 可以捕捉大脑正常与异常的电生理活动, 能够在行为反应出现之前反映意识状态, 是对行为学评估和脑功能成像的重要补充, 同时也是识别和预测意识恢复的有效工具。与 PET 和 fMRI 等影像技术相比, EEG 具备高时间分辨率及成本低廉、便于携带、操作简便等显著优势, 广泛用于评估昏迷患者的脑功能。故本文主要讨论 EEG 在意识障碍及认知运动分离 (cognitive-motor dissociation, CMD) 诊断和预后中的价值。

1 文献筛选流程

本综述通过美国国立医学图书馆 PubMed 数据库、科学网 (Web of Science)、荷兰医学文摘 Embase 数据库、中

国知网及万方数据库进行文献检索。检索时间范围为 2005 年 1 月至 2024 年 6 月。英文检索词包括 “disorders of consciousness” “cognitive motor dissociation” “electroencephalography” “EEG” “event-related potentials” “brain-computer interface” 等; 中文检索词包括 “意识障碍” “认知运动分离” “脑电图” “事件相关电位” “脑机接口” 等。纳入与意识障碍及 CMD 相关的基础研究、临床研究和综述性文献, 排除与主题相关性不足或数据不完整的文献。

2 意识障碍与 CMD

2.1 意识障碍: 意识是一个多方面的概念, 但传统上分为觉醒和意识两个主要组成部分^[1]。觉醒能力反映了上行网状激活系统的功能^[2], 而意识则更为复杂, 被归因于大脑皮层及其皮层下连接的功能完整性^[3]。目前意识障碍的发病机制并未完全明确, 其特征为觉醒、意识或两者的中断^[4]。根据觉醒程度以及是否存在有意识的行为, 意识状态可进一步划分为昏迷、植物状态 (unresponsive wakefulness syndrome, UWS)/ 无反应性觉醒综合征 (vegetative state, VS)、微意识状态 (minimally conscious state, MCS) 或脱离微意识状态 (emerging

from the minimally conscious state, eMCS)。其中, MCS 根据是否表现出与语言相关的行为,又可分为 MCS⁺ 和 MCS⁻ 两种亚型。目前,针对不同意识状态的评估主要依赖于临床行为学量表,例如格拉斯哥昏迷量表、全面无反应性量表和昏迷恢复量表等。在这些量表中,修订版昏迷恢复量表被认为是当前诊断准确性最高且最敏感的工具。然而,尽管优质的行为学量表可降低误诊率,但过去 10 年内已发现,有少部分意识障碍患者虽无法表现出任何接受性语言相关的行为迹象,却能在精神层面对主动神经成像或电生理范式做出反应。

2.2 CMD 的概念与提出: 脑损伤后出现意识丧失的患者中,存在对运动命令的大脑激活却无命令遵循行为迹象的情况,被称为 CMD。2008 年, Owen 和 Coleman^[5] 报告了 1 例年轻女性严重脑损伤患者,在伤后 5 个月被诊断为 UWS,当执行心理意象任务时,其 fMRI 检测到的大脑活动与健康对照者相似。2010 年, Monti 等^[6] 采用相同的 fMRI 范式对 54 例患者进行测试,发现 2 例临床诊断为 VS 的患者和 3 例临床诊断为 MCS 的患者能够完成任务;其中 1 例患者可通过运动意象或空间意象对自传体问题作出“是”或“否”的回应,实现交流功能。此后,一系列针对床旁无行为学反应患者大脑活动检测的研究相继发表,证实了存在隐蔽认知的患者群体^[7-8]。另有研究表明,创伤性脑损伤患者更有可能出现 CMD^[9-10]。同时, Fernández-Espejo 等^[11] 通过 fMRI 结合纤维束造影技术,对 2 例创伤性脑损伤所致 CMD 患者进行病例对照研究,提出隐性意识患者缺乏有意运动的潜在生物标志物(即运动丘脑皮质纤维的特异性损伤),强调了丘脑对执行有意运动的重要性,且可能为行为无反应患者的恢复性治疗提供靶点。一项多中心前瞻性研究对 353 例意识障碍患者进行基于任务的 fMRI 和 EEG 检测,结果显示,241 例 UWS 患者中 60 例出现大脑激活反应,且 CMD 更易发生于年龄较小、慢性意识障碍及创伤性脑损伤患者群体^[12]。

3 EEG 技术在意识障碍中的应用

3.1 自发脑电: 在静息状态下, EEG 技术可监测到大脑皮层神经元的自发活动及其网络特性,当脑组织因各种因素受损时, EEG 可呈现异常表现。近年来,通过对静息态 EEG 数据进行时域分析、频域分析、非线性分析以及脑网络分析,可以反映意识障碍患者的意识水平。

3.1.1 时域分析、频域分析、非线性分析: 时域分析方法主要依赖于对原始脑电信号的参数提取,但意识障碍患者的脑电活动缺乏明显波动性和特征性波形。因此时域分析技术在意识障碍研究中的应用受到明显限制,其诊断价值相对有限。时域分析常与频域分析结合使用,通过在滑动时间窗口内进行频谱分解,能够获取不同频率范围内的能量随时间变化的分布特征。脑电信号具有明显的频段特征,包括 δ 、 θ 、 α 、 β 和 γ 5 个主要的脑波频段^[13-14],其中 δ 、 θ 和 α 频段是评估 MCS 和 UWS 的重要频段,在损伤较重患者的 EEG 中,可出现 θ 或 δ 脑电波形的普遍减慢,并伴有癫痫样活动、暴发抑制和 α 昏迷模式等异常抑制模式。在非线形分析领域,常用方法包括 Lyapunov 指数、Lempel-Ziv 复杂度和熵分析

等,这些技术通过量化脑电信号的复杂性和随机性特征,可以更好地评估患者的意识状态^[15]。熵和复杂度越高,表明意识障碍患者的意识水平越高^[16]。

3.1.2 脑网络分析: 基于 EEG 的脑网络分析可通过检查大脑区域之间的功能连接,识别患者大脑网络的异常模式。意识障碍患者的大脑功能连接通常会减少或受损,尤其是默认网络(default mode network, DMN)和前额叶-顶叶网络^[17-18]。利用 EEG 研究上述网络的功能连接性、有效连接性和拓扑特性,对于意识障碍的诊断和预后非常重要^[19]。Hao 等^[20] 对 178 例意识障碍患者的脑网络进行深入研究,采用图论结合高阶拓扑方法,揭示在脑网络中具有更低分离性、更高整合性及更强网络稳定性的患者预后较好。Chennu 等^[21] 利用高密度 EEG 技术,将脑电信号的频谱连通性可视化并量化为密集的脑网络,发现这些网络的关键定量指标与患者行为恢复的连续性相关,并且通过密集互连的连接中心枢纽的存在网络度量区分行为意识,其中 α 网络连接与患者的行为意识和大脑代谢呈显著正相关。

3.2 睡眠 EEG: 在睡眠阶段,纺锤波的存在可反映丘脑功能的完整性,慢波睡眠和快速眼动睡眠(rapid eye movement, REM)的出现提示脑功能完好,而睡眠模式的昼夜节律则提示下丘脑功能的完整。人类意识状态与睡眠生理过程存在显著关联性。正常睡眠结构和睡眠纺锤波的维持依赖于大脑皮层网络及其深部核团的协调运作。人类的睡眠周期主要呈现非快速眼动睡眠(non-rapid eye movement, NREM)和 REM 两种特征性状态。EEG 分析显示,特定频段的纺锤波活动是评估丘脑-皮层回路功能完整性的重要电生理指标,慢波活动与 REM 期的周期性出现则反映大脑整体功能的稳定性。此外,睡眠-觉醒周期的规律性振荡是评估下丘脑功能状态的关键生物学标志。意识障碍患者的睡眠电生理特征包括无睡眠-觉醒周期、昼夜节律紊乱及纺锤波缺失。MCS 患者的睡眠周期特征(包括睡眠纺锤波、K 复合波等标志性脑电活动)在多个神经生理学参数上与健康人群具有高度可比性,提示 MCS 患者可能保留了相对完整的睡眠-觉醒调节机制。一项针对 32 例意识障碍患者睡眠模式的研究显示,所有 UWS 患者均未表现出昼夜睡眠节律,且相较于 MCS 患者, UWS 患者更易出现睡眠-觉醒周期和纺锤波消失^[22]。因此,分析意识障碍患者的睡眠结构特征,有助于鉴别 UWS 与 MCS。Kang 等^[23] 对 106 例昏迷患者进行床旁视频 EEG 监测,分别记录患者的 EEG 反应性(EEG reactivity, EEG-R)及睡眠 EEG,发现 EEG-R 与睡眠纺锤波联合应用时,对患者行为学唤醒的预测准确性高于两者单独使用。基于此,研究者提出“脑电觉醒”的概念,即同时存在 EEG-R 和睡眠纺锤波,可作为早期预测昏迷患者行为唤醒的指标^[23]。

3.3 EEG-R: EEG-R 可定义为头皮记录的脑电活动对外部感官刺激产生的弥漫性和短暂性变化,主要表现为频率与波幅的改变,其存在依赖于外周感觉通路、脑干和皮质结构的完整性。引起 EEG-R 的外部刺激主要包括听觉、视觉及疼痛刺激。Logi 等^[24] 评估了 50 例急性脑损伤后无意识患者的

EEG-R 对意识恢复的预测价值,并根据 Synek 分类标准对 EEG 模式进行排序,其中 48% 的患者 EEG 为反应性,92% 的反应性 EEG 患者在 EEG 记录后 5 个月内恢复意识。虽然 EEG-R 可在一定程度上反映患者意识水平并提示预后,但目前临床上主要通过视觉分析对其进行评估,且缺乏规范的实施方案及评估反应性的确切时机,导致主观性较强。因此,未来需对 EEG-R 的刺激方案和判读方法进行标准化规范。

3.4 诱发脑电:事件相关电位(event-related potential, ERP)是诱发 EEG 的一部分,描述了患者对外部或环境刺激进行认知处理过程中的心理反应。目前常见的 ERP 成分为 P300 和失匹配负波(mismatch negativity, MMN)^[25]。对于意识障碍患者,最常采用的是听觉 Oddball 范式,即通过偏差刺激为行为无反应患者的认知能力提供有价值的信息。

P300 作为一种正向 ERP 成分,在受到听觉、视觉或体感刺激中的异常刺激后约 300 ms 出现,其存在主要反映大脑皮层对感觉信息的感知加工和认知处理能力。在以往的研究中,P300 潜伏期作为反映神经传递速度的指标,振幅作为反映认知能力的指标,两者相结合可对意识水平进行有效评估。Li 等^[26]对 18 例意识障碍患者进行基于试听范式的 P300 诱发,并进行 3 个月随访,发现 P300 检测准确率越高的患者修订版昏迷恢复量表评分越高,呈线性正相关;其潜伏期和振幅降低程度与患者早期良好预后显著相关,具有较高的敏感性和特异性。尽管 P300 的潜伏期和波幅的动态变化与患者的临床恢复有显著相关性,但目前对于 P300 的具体波幅和潜伏期值与意识转归的关系尚无明确定论。

MMN 是将脑电信号叠加平均后标准刺激与偏差刺激诱发的负性电位差,被认为是预测昏迷患者预后的良好指标,但敏感性较差,需定期重复评估。Boly 等^[27]采用动态 MMN 范式对比分析 21 例脑损伤患者(包括 8 例 UWS 患者和 13 例 MCS 患者)与 22 名健康对照者的脑电特征,发现健康对照组与两类意识障碍患者在 MMN 波形特征上存在显著差异,为意识障碍的神经机制研究提供了重要证据。多项研究提示,MMN 对患者预后具有较高的阳性预测价值^[28-29]。刘婉清^[30]研究发现,P300 可用于 VS 与 MCS 患者的鉴别,且联合使用 MMN 与 P300 预测意识障碍患者良好预后的准确性要高于二者单独使用。现阶段尚未确立能够有效检测缺乏明显行为反应患者的残余意识及认知能力的最佳 ERP 范式。有文献指出,在设计 ERP 任务时,宜采用主被动混合模式,并结合情感相关性刺激材料;同时,应根据患者残留认知功能的个体差异,灵活调整任务复杂度,实施个体化评估策略^[31]。

4 EEG 在评估 CMD 的应用

4.1 基于任务范式 EEG:在基于任务的 EEG 评估中,受试者需根据指令完成特定任务,如运动想象、计数任务、计算任务及空间导航等,记录任务态下的 EEG 信号,并将其与静息态脑活动进行对比分析。通过观察脑电活动的频率和振幅变化,可以识别自发性大脑活动模式。只有对任务产生响应的、由大脑皮层主动调节的活动才能作为 CMD 存在的证据。Edlow 等^[32]用运动心理想象任务,即让患者想象握紧右

手之后放松,通过 fMRI 和 EEG 检测急性重度颅脑损伤患者中的 CMD,同时进行音乐范式和语言范式,测试缺乏语言功能行为证据的患者对被动刺激的高阶皮质反应(higher-order cortex motor dissociation, HMD),研究表明,基于任务的 EEG 对语言的敏感度最高,其次是音乐和运动意象,可在对主动任务反应不明显时反映残余意识。Claassen 等^[33]的研究显示,104 例急性脑损伤无反应患者中,有 16 例(15%)患者在损伤后通过 EEG 检测到对口头运动命令有脑活动,且患者预后更好,结合机器学习分析,可以检测到特定的大脑激活模式。Bodien 等^[12]前瞻性纳入 353 例来自不同中心的意识障碍患者进行基于任务的功能 fMRI 和 EEG,以评估患者的命令执行水平(例如“想象打网球”“想象张开或握紧你的手”及视觉和听觉辨别任务),结果显示,在 241 例 UWS 患者中,60 例(25%)对想象任务有大脑激活反应,即存在 CMD,其中 88% 的 CMD 可通过基于任务范式的 EEG 进行评估。

4.2 基于 P300 的脑机接口(brain computer interface, BCI):BCI 是一种将大脑活动转化为人工输出的技术系统,可通过多种方式获取大脑信号,其中 EEG 因其成本低、操作简便和安全性高而在意识障碍患者中得到广泛应用,可评估意识障碍患者的残余意识并作为其与外界沟通的桥梁。基于 EEG 的 BCI 技术能依赖于感觉运动节律、P300、稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)或慢皮层电位,已被用于检测重型脑损伤患者的命令脑激活模式,并可有效识别 CMD,其中基于 P300 的 BCI 应用最为广泛。Lulé 等^[34]首次利用基于 EEG 的 BCI 系统检测到 MCS 患者在无临床行为反应情况下的指令跟随能力,通过简单的听觉范式结合 P300 检测,为 CMD 的评估提供了一种新方法。Li 等^[35]结合 P300 和 SSVEP,对 11 例意识障碍患者进行数字识别、比较和加减法任务测试,结果显示,2 例 VS 患者、1 例 MCS 患者和 2 例 eMCS 患者的任务准确率显著高于随机水平,且其 EEG 中检测到 P300 和 SSVEP 信号。Wang 等^[36]和 Xie 等^[37]的研究采用视听联合刺激诱发 P300 以检测患者意识,证实相比于纯视觉或纯听觉刺激,视听整合的多感觉整合效应可增强 ERP 成分,提高 BCI 系统的性能。随后该团队^[38]对 78 例意识障碍患者分别采用照片范式、数字范式和视听觉范式在线捕捉 P300 电位,其中 44% 的患者检测出 CMD,且在行为水平恢复意识的机会更大,其中 UWS 组 BCI 预测意识恢复的准确率为 82%,敏感度为 75%,特异度为 88%,强烈提示 BCI 在预测 UWS 患者临床结果方面的潜在用途。

5 展望

对于意识障碍及可能存在 CMD 的患者,目前 EEG 在临床上具有获取方便、成本相对较低且实施简便等优势。然而,关于 CMD 的研究多聚焦于慢性期意识障碍患者,仅有少数研究关注急性期患者。事实上,准确评估急性期患者的残余意识状态,对预后判断及临床决策制定有重要意义。无创 EEG 检测或可成为对急性期患者进行意识状态评估和预后预测的最优选择。利用高密度 EEG 技术进行床旁监测的个体化苏醒预测准确率可达 87%;同时,随着神经电生埋技术

的不断进步, CMD 的检出率相比以往提高了 5%~10%, 甚至更高^[12]。造成这一现象的原因可能包括患者在进行运动想象任务时的主动注意缺失、镇静药物的影响以及仅采用单一检测手段等。为进一步提高 CMD 的检出率, 未来应采用多模块监测的综合评估策略。目前关于检测 CMD 电生理范式的敏感性和特异性仍有争议, 因此需要更大样本、多中心的研究对 CMD 的检测及其预后进行充分验证, 并在此基础上逐步实现 EEG 检测方法的标准化与简化, 使其更精准地识别 CMD。随着人工智能技术的快速发展, 未来将 EEG 与机器学习及 BCI 相结合, 有望更高效地应用于 CMD 检测, 甚至实现与 CMD 患者的交流。同时, 仍需开展更多基础性创新研究, 以更深入地探究认知-运动分离的神经机制, 明确神经递质系统在恢复患者行为反应性中的潜在作用, 进而为临床干预提供新靶点, 并指导个体化治疗方案的制定。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- Laureys S. The neural correlate of (un)awareness: lessons from the vegetative state[J]. *Trends Cogn Sci*, 2005, 9(12): 556–559. DOI: 10.1016/j.tics.2005.10.010.
- Young GB. Coma[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1157: 32–47. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.04471.x.
- Bernat JL. Chronic disorders of consciousness[J]. *Lancet*, 2006, 367(9517): 1181–1192. DOI: 10.1016/S0140-6736(06)68508-5. Erratum in: *Lancet*, 2006, 367(9528): 2060.
- 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.
- Owen AM, Coleman MR. Detecting awareness in the vegetative state[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2008, 1129: 130–138. DOI: 10.1196/annals.1417.018.
- Monti MM, Vanhauzenhuyse A, Coleman MR, et al. Willful modulation of brain activity in disorders of consciousness[J]. *N Engl J Med*, 2010, 362(7): 579–589. DOI: 10.1056/NEJMoa0905370.
- Schiff ND. Cognitive motor dissociation following severe brain injuries[J]. *JAMA Neurol*, 2015, 72(12): 1413–1415. DOI: 10.1001/jamaneurol.2015.2899.
- Kondziella D, Friberg CK, Frokjaer VG, et al. Preserved consciousness in vegetative and minimal conscious states: systematic review and meta-analysis[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2016, 87(5): 485–492. DOI: 10.1136/jnnp-2015-310958.
- Schnakers C, Hirsch M, Noé E, et al. Covert cognition in disorders of consciousness: a Meta-analysis[J]. *Brain Sci*, 2020, 10(12): 930. DOI: 10.3390/brainsci10120930.
- Franzova E, Shen Q, Doyle K, et al. Injury patterns associated with cognitive motor dissociation[J]. *Brain*, 2023, 146(11): 4645–4658. DOI: 10.1093/brain/awad197.
- Fernández-Espejo D, Rossit S, Owen AM. A Thalamocortical mechanism for the absence of overt motor behavior in covertly aware patients[J]. *JAMA Neurol*, 2015, 72(12): 1442–1450. DOI: 10.1001/jamaneurol.2015.2614.
- 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.
- Chennu S, Finoia P, Kamau E, et al. Spectral signatures of reorganised brain networks in disorders of consciousness[J]. *PLoS Comput Biol*, 2014, 10(10): e1003887. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1003887.
- Bonfiglio L, Piarulli A, Olcese U, et al. Spectral parameters modulation and source localization of blink-related alpha and low-beta oscillations differentiate minimally conscious state from vegetative state/unresponsive wakefulness syndrome[J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e93252. DOI: 10.1371/journal.pone.0093252. Erratum in: *PLoS One*, 2014, 9(4): e95948.
- Brown EN, Lydic R, Schiff ND. General anesthesia, sleep, and coma[J]. *N Engl J Med*, 2010, 363(27): 2638–2650. DOI: 10.1056/NEJMra0808281.
- Li Y, Liu XP, Ling XH, et al. Mapping brain injury with symmetrical-channels' EEG signal analysis: a pilot study[J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 5023. DOI: 10.1038/srep05023.
- Coma Research Center, Besta Institute. Multimodal study of default-mode network integrity in disorders of consciousness[J]. *Ann Neurol*, 2016, 79(5): 841–853. DOI: 10.1002/ana.24634.
- Di Perri C, Bahri MA, Amico E, et al. Neural correlates of consciousness in patients who have emerged from a minimally conscious state: a cross-sectional multimodal imaging study[J]. *Lancet Neurol*, 2016, 15(8): 830–842. DOI: 10.1016/S1474-4422(16)00111-3.
- Höller Y, Thomschewski A, Bergmann J, et al. Connectivity biomarkers can differentiate patients with different levels of consciousness[J]. *Clin Neurophysiol*, 2014, 125(8): 1545–1555. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.12.095.
- Hao ZX, Xia XY, Pan Y, et al. Uncovering brain network insights for prognosis in disorders of consciousness: EEG source space analysis and brain dynamics[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2024, 32: 144–153. DOI: 10.1109/TNSRE.2023.3346947.
- Chennu S, Annen J, Wannez S, et al. Brain networks predict metabolism, diagnosis and prognosis at the bedside in disorders of consciousness[J]. *Brain*, 2017, 140(8): 2120–2132. DOI: 10.1093/brain/awx163.
- Mertel I, Pavlov YG, Barner C, et al. Sleep in disorders of consciousness: behavioral and polysomnographic recording[J]. *BMC Med*, 2020, 18(1): 350. DOI: 10.1186/s12916-020-01812-6.
- 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.
- Logi F, Pasqualetti P, Tomaiuolo F. Predict recovery of consciousness in post-acute severe brain injury: the role of EEG reactivity[J]. *Brain Inj*, 2011, 25(10): 972–979. DOI: 10.3109/02699052.2011.589795.
- EAN Panel on Coma, Disorders of Consciousness. European Academy of Neurology guideline on the diagnosis of coma and other disorders of consciousness[J]. *Eur J Neurol*, 2020, 27(5): 741–756. DOI: 10.1111/ene.14151.
- Li JC, Huang B, Wang F, et al. A potential prognosis indicator based on P300 brain-computer interface for patients with disorder of consciousness[J]. *Brain Sci*, 2022, 12(11): 1556. DOI: 10.3390/brainsci12111556.
- Boly M, Garrido MI, Gosseries O, et al. Preserved feedforward but impaired top-down processes in the vegetative state[J]. *Science*, 2011, 332(6031): 858–862. DOI: 10.1126/science.1202043.
- Chatelle C, Spencer CA, Cash SS, et al. Feasibility of an EEG-based brain-computer interface in the intensive care unit[J]. *Clin Neurophysiol*, 2018, 129(8): 1519–1525. DOI: 10.1016/j.clinph.2018.04.747.
- Fischer C, Luante J, Morlet D. Event-related potentials (MMN and novelty P3) in permanent vegetative or minimally conscious states[J]. *Clin Neurophysiol*, 2010, 121(7): 1032–1042. DOI: 10.1016/j.clinph.2010.02.005.
- 刘婉清. 事件相关电位对意识障碍水平评估及预测价值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- 宋为群. 慢性意识障碍的电生理评估与无创神经调控治疗[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(7): 921–925. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2024.07.001.
- 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.
- 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.
- Lulé D, Noirhomme Q, Kleih SC, et al. Probing command following in patients with disorders of consciousness using a brain-computer interface[J]. *Clin Neurophysiol*, 2013, 124(1): 101–106. DOI: 10.1016/j.clinph.2012.04.030.
- Li YQ, Pan JH, He YB, et al. Detecting number processing and mental calculation in patients with disorders of consciousness using a hybrid brain-computer interface system[J]. *BMC Neurol*, 2015, 15: 259. DOI: 10.1186/s12883-015-0521-z.
- Wang F, He YB, Pan JH, et al. A novel audiovisual brain-computer interface and its application in awareness detection[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 9962. DOI: 10.1038/srep09962. Erratum in: *Sci Rep*, 2015, 5: 12592. DOI: 10.1038/srep12592.
- Xie QY, Pan JH, Chen Y, et al. A gaze-independent audiovisual brain-computer interface for detecting awareness of patients with disorders of consciousness[J]. *BMC Neurol*, 2018, 18(1): 144. DOI: 10.1186/s12883-018-1144-y.
- Pan JH, Xie QY, Qin PM, et al. Prognosis for patients with cognitive motor dissociation identified by brain-computer interface[J]. *Brain*, 2020, 143(4): 1177–1189. DOI: 10.1093/brain/awaa026. Erratum in: *Brain*, 2020, 143(8): e70. DOI: 10.1093/brain/awaa113.

(收稿日期: 2025-03-03)

(本文编辑: 张耘菲)