

脑电图与体感诱发电位在意识障碍患者诊断及预后评估中的应用

唐云乐, 肖 农*

重庆医科大学附属儿童医院康复科, 国家儿童健康与疾病临床医学研究中心, 儿童发育疾病研究教育部重点实验室, 儿科学重庆市重点实验室, 重庆

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月2日; 发布日期: 2025年5月9日

摘 要

意识障碍(Disorders of Consciousness, DoC)是指严重脑损伤导致的觉醒与觉知功能受损状态, 包括昏迷、植物状态(VS/UWS)和微小意识状态(MCS)。意识障碍一直是神经科学领域的重要研究课题, 其诊断与预后评估对临床决策、医疗资源分配及患者家庭支持具有深远意义, 这也是临床实践中的难点。传统的行为学量表评估方法存在主观性强、误诊率高的问题, 难以满足现代医学对客观、精准诊断的需求。近年来, 脑电图(Electroencephalography, EEG)和体感诱发电位(Somatosensory Evoked Potentials, SSEPs)等神经电生理技术因其具备无创性、可重复性、床旁监测便利性及高时间分辨率的优势, 逐渐成为意识障碍评估的关键工具。本文旨在系统梳理脑电图与体感诱发电位在意识障碍诊断及预后中的应用现状, 分析其优势与局限性, 并探讨未来研究方向。

关键词

意识障碍, 脑电图, 体感诱发电位, 诊断, 预后

Application of Electroencephalography and Somatosensory Evoked Potentials in the Diagnosis and Prognostic Evaluation of Patients with Disorders of Consciousness

Yunle Tang, Nong Xiao*

Department of Rehabilitation, Children's Hospital of Chongqing Medical University, National Clinical Research Center of Child Health and Disorders, Ministry of Education Key Laboratory of Child Development and Disorders, Chongqing Key Laboratory of Child Neurodevelopment and Cognitive Disorders, Chongqing

*通讯作者。

文章引用: 唐云乐, 肖农. 脑电图与体感诱发电位在意识障碍患者诊断及预后评估中的应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 306-313. DOI: 10.12677/acm.2025.1551372

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 2nd, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

Disorders of consciousness (DoC) are clinically defined as pathological states of disrupted arousal and awareness caused by severe brain injury, encompassing coma, vegetative state/unresponsive wakefulness syndrome (VS/UWS), and minimally conscious state (MCS). As a pivotal research focus in neuroscience, the diagnostic stratification and prognostic stratification of DoC carry substantial implications for evidence-based clinical management, optimized healthcare resource utilization, and targeted family counseling, while remaining a persistent challenge in clinical practice. Conventional behavioral assessment scales (e.g., CRS-R) are critically limited by inherent subjective limitations and elevated misdiagnosis rates, failing to meet modern medicine's demand for objective and precise diagnostics. Recent advances in multimodal neuroelectrophysiological monitoring—particularly electroencephalography (EEG) and somatosensory evoked potentials (SSEPs), have emerged as critical tools for consciousness assessment due to their non-invasive nature, reproducibility, bedside monitoring feasibility, and high temporal resolution. This article systematically reviews current applications of EEG and SSEPs in the diagnosis and prognosis of DoC, analyzes their strengths and limitations, and explores future research directions.

Keywords

Disorders of Consciousness (DoC), Electroencephalography (EEG), Somatosensory Evoked Potentials (SSEPs), Diagnosis, Prognosis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 简介

意识障碍是指严重脑损伤导致的觉醒与觉知功能受损状态,包括昏迷、植物状态(VS/UWS)和微小意识状态(MCS)[1]。认知运动分离(Cognitive Motor Dissociation, CMD)是意识障碍领域近年来一个很重要的概念,它的内涵可以理解为意识障碍患者的行为表现无法反映其潜在认知活动的状态[2]。具体表现为患者在临床评估过程中对指令无反应,但通过功能性磁共振成像(fMRI)或脑电图(EEG)等神经生理学技术能检测到其执行认知任务时的脑活动[3]。CMD的出现挑战了传统的基于行为评估的意识状态判断标准,为更准确地诊断和预测意识障碍患者的预后提供了新的视角。这提示我们部分意识障碍患者可能存在“隐蔽性意识”(covert consciousness),即患者虽然无法通过行为表达意识,但其大脑活动表明他们可能具有一定的潜在认知能力[4]。这就对意识障碍患者的评估提出了更高的要求。

常规脑电图作为一种非侵入性的神经电生理技术,在评估意识障碍患者的脑功能状态方面具有重要的应用价值,尤其是在重症监护环境中,EEG能够监测脑功能的动态变化,为临床决策提供重要信息[5]。体感诱发电位同样作为一种无创性的神经电生理检查技术,通过刺激周围神经,记录大脑皮层对刺激产生的电位变化,能够提供关于感觉通路完整性的客观信息,从而帮助鉴别不同的意识状态,并与其他诊断工具相互补充,提高诊断的准确性[6]。本篇综述将重点介绍脑电图与体感诱发电位在意识障碍诊断与预后评估领域中的研究和作用。

2. 脑电图在意识障碍诊断与预后评估中的应用

2.1. 脑电背景与脑电反应

静息态脑电图的背景活动反映了大脑皮层整体的兴奋性和同步性, 其频率、振幅和节律性在不同意识状态下存在差异。背景活动的连续性和半球对称性是评估脑功能完整性的重要指标, 背景活动的持续存在通常预示着较好的预后, 而非对称性背景活动则可能提示单侧脑损伤。郑小春[7]的研究指出左半球损伤患者的静息态脑电图复杂度显著低于右半球损伤患者, 且左半球损伤患者的预后更差, 表明脑电不对称性可能是意识障碍预后的重要标志。脑电频谱中 δ , θ 和 α 频段是评估微小意识状态和植物状态的重要频段, α 和 θ 节律在自我意识的产生中起关键作用, 外部刺激后大脑皮层的 θ 活动与编码新信息有关, α 活动与长时程记忆提取有关[8]。特定的脑电图模式, 如爆发抑制、电静息、周期性放电和抑制性背景, 与意识障碍患者的不良预后相关。值得注意的是, 虽然某些脑电图模式具有较高的特异性, 但其敏感性相对较低[9]。目前临床上具有代表性的 EEG 分级标准有 Young 分级标准[10]、Synek 分级标准[11]等。然而, 各标准对不同病因的预后判断能力各有不同而且都存在一定缺陷, Synek 分级标准没有体现脑电反应的重要性, 而重症患者出现的慢波无法在 Young 分级中得到区分。近些年 Hofmeijer 等[12]-[14]研究者对美国临床神经生理学会术语进行了修改, 将 EEG 分为高度恶性、恶性和良性三大类。高度恶性模式包括抑制、周期性放电抑制和爆发抑制, 这些模式被认为是缺氧缺血性脑损伤预后不良的指标之一。良性模式被定义为连续或接近连续和没有任何放电的正常电压背景, 这些特征可预测良好预后。尽管常规脑电图在意识障碍的诊断中具有重要价值, 但其也存在一定的局限性。常规脑电图的记录时间较短, 可能无法捕捉到间歇性的痫性放电或其他异常活动。脑电图结果也容易受到药物、代谢等因素的影响。因此, 在临床实践中, 应结合患者的病史、体格检查和其他辅助检查结果, 对脑电图结果进行综合分析和判断。

脑电图反应性(electroencephalographic reactivity, EEG-R)是指外界刺激后脑电活动产生的变化, 是评估大脑皮层整合功能的重要指标。在意识障碍患者中, 脑电图反应性可以反映大脑皮层的兴奋性和调节能力, 存在脑电反应性往往提示大脑皮层仍具有一定的功能整合能力, 预示着较好的恢复潜力。常用的刺激类型包括: 听觉刺激、视觉刺激、体感刺激、多感觉联合刺激。一般来说, 在脑损伤后早期(如一周内)出现脑电图反应性, 提示患者更有可能恢复意识; 复杂刺激(如语言)的反应相比于简单刺激(如闪光)的反应, 更能预测较好的预后; 持续的稳定的反应相较于间断的不稳定的反应来说, 预示着更好的恢复潜力[15][16]。同样地, 镇静剂、麻醉剂、抗癫痫药物、中枢神经系统兴奋剂等药物可能会影响脑电图的反应性, 从而影响对意识障碍患者的评估。

在意识障碍患者中, 除了评估脑电背景与脑电反应外, 脑电图睡眠周期、睡眠纺锤波的存在与否以及形态特征, 也可以提供有价值的诊断和预后信息。Gottshall 等[17]发现在亚急性意识障碍患者中, 具备完整的生理性睡眠-觉醒周期和睡眠模式与较好的预后相关。有完整结构的快速眼动(REM)睡眠、非快速眼动(NREM)睡眠阶段以及存在睡眠纺锤波与患者意识恢复有关。在慢性意识障碍患者中, 脑电图睡眠成分可能反映了其支持意识的大脑网络的完整性以及这些网络在清醒状态下的参与程度。睡眠纺锤波的缺失可能提示丘脑或皮层功能严重受损, 预示着较差的预后[16][18]。需要注意的是, 某些药物(如巴比妥类)可能诱发或增强睡眠纺锤波, 从而影响评估结果。

2.2. 定量脑电图(qEEG)

定量脑电图通过提取出反映大脑活动特征的功率谱、熵等参数, 对脑电信号进行数学和统计分析, 提供了一种客观评估脑功能的手段, 从而弥补了常规脑电图在意识障碍诊断中的一些局限性。昏迷患者

的qEEG特征与正常清醒状态存在显著差异,主要表现为脑电活动的抑制和特定模式如爆发抑制的出现。UWS患者的qEEG表现出背景活动减慢、反应性降低和脑电连接减弱等特征,这些特征可以作为UWS诊断的辅助指标。而MCS患者的qEEG表现出比UWS患者更丰富的特征,包括部分脑电反应性、特定脑电节律、脑电复杂性和同步性的改变。qEEG还在发现认知运动分离方面具有重要的应用价值,它可以捕捉到部分意识障碍患者在执行特定认知任务时大脑产生的微弱电活动变化,从而揭示其隐匿的意识,例如,通过要求患者进行想象活动或听从指令,qEEG可以检测到与这些认知活动相关的脑区激活模式,从而判断患者是否具备一定的意识能力。常用的qEEG分析方法有以下5种:功率谱分析(Power Spectral Analysis, PSA)、复杂性分析(Complexity Analysis)、连接性分析(Connectivity Analysis)、熵分析(Entropy Analysis)、图论分析(Graph Theory Analysis)。功率谱分析通过将脑电信号分解成不同频率成分,并计算每个频率成分的功率,从而反映特定频段的活动强度。DoC患者的脑电功率谱通常表现出慢波活动增加,快波活动减少的特征。 δ 波相对功率的增加与 α 波相对功率的降低,与谵妄或昏迷的脑电图特征密切相关[19]。另有研究发现, β/δ 功率比值与双侧丘脑和苍白球的萎缩程度呈负相关,而这些区域的萎缩常见于慢性意识障碍患者[20]。复杂性分析用于评估脑电信号的非线性特征,反映大脑活动的复杂程度和信息处理能力,常用的复杂性指标包括Lempel-Ziv复杂度(LZC)和排列Lempel-Ziv复杂度(PLZC)。有研究发现,DoC患者的脑电复杂性降低,且PLZC在区分不同意识水平的患者中具有较高的敏感性。PLZC与改良昏迷恢复评估量表(CRS-R)评分显著相关,提示其与DoC患者残余意识水平相关[21]。刘艳[22]采用排列熵算法研究静息态脑电复杂度,发现意识障碍患者大脑活动复杂度较健康对照明显降低,熵值越高提示大脑功能越完整。连接性分析旨在研究大脑不同区域之间的功能联系,通过量化脑电信号在不同电极之间的同步性或相关性,评估大脑网络的整合程度。常用的连接性分析方法包括相位滞后指数(Phase Lag Index, PLI)和Granger因果关系等。有研究表明与UWS组相比,在MCS组中与相位滞后指数相关的大脑连接性测量指标显著升高,并且大脑区域之间的功能连接性增强[23]。有研究还发现在意识障碍组中,双半球之间在相同阈值下的定向连接强度显著降低[24]。另有研究对比了基于包络和基于相位的两种功能连接测量方法(即幅度包络相关性AEC和加权相位滞后指数wPLI)在意识状态分类中的应用,结果表明AEC在检测麻醉诱导后的意识丧失方面更有优势[25]。此外,综合基于脑电图指标(θ 波段的中值加权符号互信息)的功能连接评估和基于脑MRI指标(各向异性分数)的结构连接评估可以有效区分出植物状态患者和微小意识状态患者,且功能连接和结构连接之间存在显著的正相关。熵是信息论中的一个概念,用于衡量信号的不确定性和随机性。在脑电分析中,熵可以反映大脑活动的混乱程度,常见的熵指标包括样本熵(Sample Entropy, SampEn)和近似熵(Approximate Entropy, ApEn)。一般来说,意识水平越好,脑电信号的熵值越高。图论分析则通过将大脑皮层不同区域视为节点,脑区间的功能连接强度作为边界,构建脑网络,分析脑网络的拓扑结构和功能,可以提供关于大脑整合和信息传递效率的关键发现。qEEG提供了一种客观的量化指标,有助于提高意识障碍诊断的准确性和一致性;它提取的多种参数从不同角度反映大脑功能,提供了更全面的评估手段。但qEEG也不可避免地存在一些局限性:qEEG的分析方法和参数选择尚未完全标准化,不同研究之间的数据可比性有限;脑电信号容易受到肌肉活动、眼动和电极接触不良等各种伪影的影响,需要对数据进行处理和校正;个体之间的脑电活动存在差异,qEEG结果的解释需要结合患者的年龄、病程和病因等因素综合解读。

2.3. TMS-EEG

TMS与脑电图的结合应用为研究意识障碍患者大脑皮层的信息传递和整合提供了新的方向[26]。有研究发现与健康受试者相比,意识障碍患者在接受TMS刺激后,大脑皮层的信息流显著减弱,尤其是在无反应觉醒综合征(UWS)患者中,额叶、运动皮层和顶叶的TMS刺激引起的双向信息流均消失。该研究

还发现, TMS 诱导的信息流网络交互率与意识障碍临床评分相关, 提示皮层信息流的破坏可能是患者意识丧失的重要标志[27]。

3. 体感诱发电位在意识障碍诊断和预后评估中的应用

N20 波是 SSEPs 中一个重要的皮层成分, 反映了体感刺激到达大脑皮层后的神经活动。N20 波的存在与否及振幅大小可以反映大脑皮层的功能完整性, 并与意识障碍患者的预后密切相关[28]。刘华等[29]研究发现体感诱发电位分级与意识障碍患儿预后呈负相关, 其与改良昏迷恢复量表(CRS-R)联合应用可提高预测价值。一篇综述指出, 在心跳骤停后 7 天内评估, SEP 的 N20 波缺失与患者神经系统不良预后(死亡、植物状态或严重残疾)有关, 具有 0% 的假阳性率[30]。Aalberts 等[31]的回顾性多中心研究发现在 706 例心跳骤停昏迷患者中, 99.2% 双侧皮层 N20 波缺失的患者预后不良。近年来 N20 波的振幅也逐渐受到关注, 其振幅的大小可能比单纯的存在与否更能准确地预测预后。在上述的回顾性多中心研究中, 研究者发现预后良好患者的皮层 SEP 最小振幅为 0.5 μ V, 而 429 名预后不良的患者中, 有 184 名(42.9%)振幅低于此值[31]。尽管双侧 N20 波缺失是预测不良预后的一个强力指标, 但在解释 SSEPs 结果时仍需谨慎。N20 波的缺失并不等同于脑死亡, 一些患者仍有可能在较长时间后恢复意识。SSEPs 结果也可能受到药物、体温、代谢状态等多种因素的影响。针对不同病因导致的意识障碍, N20 波的预测价值可能存在差异。在缺氧缺血性脑损伤中, N20 波缺失的预测价值较高, 但在其他病因(如创伤性脑损伤)中, 其预测价值可能较低[32]。

定量体感诱发电位(qSSEPs)克服了传统 SSEPs 中 N20 波单纯有或无的二分法的局限, 通过提取 SSEPs 波形的多种参数, 例如潜伏期、振幅、面积和形态等, 能提供更全面的脑功能信息[33], 为早期识别有恢复潜力的患者提供了可能。qSSEPs 还可以用于跟踪意识障碍患者的脑功能恢复情况, 通过连续监测 qSSEPs 参数的变化, 可以评估治疗效果, 指导治疗策略的调整, 这对于优化患者管理策略和改善患者长期结局具有重要意义[33]。尽管 qSSEPs 展现出良好的应用前景, 但目前的研究仍处于初步阶段, 未来的研究需要进一步探索其在不同病因导致的意识障碍中的应用价值, 开发标准化的 qSSEPs 分析方法, 以提高不同研究之间的可比性。

需要额外关注的是, 儿童与成人 SSEPs 在波形成分、波幅和潜伏期等方面存在显著差异。二者在 Fz 电极的 SSEPs 波形特征相似, 但在 C3' 电极的波形特征存在明显差异, 具体而言, 儿童在 C3' 电极记录到的 SSEPs 波形不仅包含标准的 P12、N18、P22、N27、P45 和 N60 成分, 还在 N27 和 P45 之间观察到额外的正向(P3)和负向(N3)成分, 而这些成分在成人中并未发现。儿童在 C3' 电极记录到的 P22 波幅明显大于成人, 表明儿童在体感处理过程中神经活动存在过度兴奋/反应的情况; 而在 Fz 电极记录到的 N15 波幅和在 C3' 电极记录到的 N27 波幅儿童均小于成人, 提示儿童的神经体感系统尚未成熟。除此之外, 儿童在 Fz 电极记录到的 P12、N15 和 N18 波形的潜伏期以及在 C3' 电极记录到的 P12 和 N18 波形的潜伏期均显著短于成人, 且这种差异与身高有关。这些差异反映了儿童神经体感系统的发育过程和神经活动的可塑性, 因此, 利用 SSEPs 评估儿童 DoC 患者时, 应在充分考虑儿童自身年龄特点后对结果进行精准的差异化分析。

4. 脑电图和体感诱发电位联合评估在意识障碍中的应用

单一的电生理学检查, 例如 EEG 或 SSEPs, 可能无法完全反映意识障碍患者的复杂神经状态。脑电图易受药物、代谢和环境因素的影响, 而 SSEPs 主要评估感觉通路的功能, 对于更高级的认知功能的评估有限。而多模态评估能够整合不同来源的信息, 提高预测的准确性[33][34]。多模态评估是指结合多种手段(例如临床评估、神经影像学、神经电生理学和血液生物标志物)来评估意识障碍患者的脑功能状态。王瑾等[35]对 48 例意识障碍患者进行多模态神经电生理检查, 发现脑电图与患者预后的相关性最强,

脑干听觉诱发电位及体感诱发电位次之, 联合检测的准确率显著高于单一指标。有研究对现有的预后模型进行了系统的回顾和评估, 纳入了总共 1201 名意识障碍患者的 21 个预后模型, 发现结合了多种技术(包括脑电图和功能磁共振成像)的混合模型在预测意识改善方面的敏感度和特异度均优于任何单一技术[36]。尽管多模态评估优势明显, 但其也面临着检查结果不一致、成本高昂、操作难度高、数据处理复杂、缺乏标准化评估方案等一系列挑战。在临床实践中, 应根据患者的具体情况选择合适的多模态评估方案。

5. 未来研究方向与展望

5.1. 人工智能与机器学习

人工智能(AI)和机器学习(ML)正在意识障碍的诊断和预后领域发挥越来越重要的作用。它们能够通过直接分析大数据, 识别神经电生理检查中的复杂模式, 从而潜在地提高了诊断和预测预后的准确性。目前人工智能和机器学习已被广泛应用于分析意识障碍患者的脑电图和功能性神经影像数据, 以区分无反应觉醒综合征和微小意识状态[37]。传统机器学习方法(如支持向量机、随机森林等)通常用于构建模型, 而非常规的深度学习算法通常侧重于从脑电图中提取新的特征, 以提高意识分类的准确性。机器学习还可用于预测患者对特定治疗干预(如唑吡坦或经颅直流电刺激)的反应[37]。深度学习算法在处理复杂的神经电生理信号方面具有优势, 但现在仅停留在对单模态信号的分析, 并未纳入多模态数据, 未来期望综合分析多模态数据以进一步提高意识障碍诊断和预后的准确性。

5.2. 脑 - 心交互作用

心跳诱发反应(HERs)是指大脑对每次心跳产生的神经反应, 它反映了个体对自身内部生理状态的感知。Candia 等[38]发现 HERs 能够揭示意识障碍患者的残余意识状态, 甚至可以区分显性与隐性最小意识状态。这意味着 HERs 可能成为一种有价值的床旁诊断工具, 用以检测无法交流的患者的残余意识。该研究针对健康状态、闭锁综合征、最小意识状态、植物状态/无反应觉醒综合征、昏迷和脑死亡患者, 评估了这些人群的 HERs 和非心跳锁定的脑电图, 发现 HERs 的某些特征可以区分有意识和无意识状态。意识存在时, HER 的方差和 HER 的额叶分离程度往往更高, 结合这些指标与心率变异性共同分析时, 有可能增强对不同意识水平的区分能力。

心率变异性(HRV)作为一种非侵入性的指标, 反映了自主神经系统对心脏的调节能力, 进而反映了身体内部环境的稳定性和适应性。HRV 与意识水平之间存在显著关联, 较高的 HRV 值通常与更好的意识水平相关。一项研究纳入了 82 名 DOC 患者的研究结果显示[39], 在区分无反应觉醒综合征(UWS)和最小意识状态(MCS)患者时, HRV 指标具有显著差异, MCS 患者的 HRV 值更高。将 HRV 指标与标准临床脑电图(EEG)描述相结合, 可以显著提高 UWS 和 MCS 诊断的区分度。这表明, HRV 可以作为一种低成本的工具, 辅助多模态意识评估, 支持临床决策。

脑 - 心交互为理解和评估意识障碍提供了一个新的手段, 将脑 - 心交互的多维度评估纳入意识障碍的评估体系中, 可能有助于更全面地了解患者的意识状态, 有望将其转化为更易于临床实践的诊断方法。HERs 在意识障碍中的应用目前仍处于起步阶段, 需要进一步的研究来验证其有效性和可靠性。标准的事件相关电位分析可能无法充分捕捉 HERs 的复杂特征, 未来需要开发新的分析方法, 例如时频分析、微状态分析等, 以提取更多可利用的信息。将 HERs 与脑电图、体感诱发电位等其他神经电生理指标一起纳入意识障碍多模态分析中, 可进一步确定 HERs 在临床工作中的应用价值。

总而言之, 在意识障碍的评估中, 脑电图和体感诱发电位都是重要的辅助检查手段, 能够提供有价值的诊断及预后信息, 并影响治疗决策。然而, 临床医生需要充分认识到其局限性, 尽可能进行多模态评估, 并结合患者的具体情况, 制定个体化的治疗方案。值得注意的是, 对于儿童患者, 因为可能受到

年龄和发育阶段的影响,二者在神经预后预测的应用难度更大[33][40]。这要求临床医生需要谨慎解读检查结果,并结合患儿的临床表现和其他检查结果,进行综合评估。

参考文献

- [1] Threlkeld, Z.D., Bodien, Y.G. and Edlow, B.L. (2025) A Scientific Approach to Diagnosis of Disorders of Consciousness. *Handbook of Clinical Neurology*, **207**, 49-66. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13408-1.00003-8>
- [2] Lin, P. and Yu, H. (2024) Advancing Our Knowledge of Cognition in Disorders of Consciousness: A Critical Revisit. *Acta Neurologica Taiwanica*, **33**, 1-3. https://doi.org/10.4103/ant.33-1_review
- [3] Bodien, Y.G., Allanson, J., Cardone, P., Bonhomme, A., Carmona, J., Chatelle, C., *et al.* (2024) Cognitive Motor Dissociation in Disorders of Consciousness. *New England Journal of Medicine*, **391**, 598-608. <https://doi.org/10.1056/nejmoa2400645>
- [4] Young, M.J., Edlow, B.L. and Bodien, Y.G. (2024) Covert Consciousness. *NeuroRehabilitation*, **54**, 23-42. <https://doi.org/10.3233/nre-230123>
- [5] Hoedemaekers, C., Hofmeijer, J. and Horn, J. (2023) Value of EEG in Outcome Prediction of Hypoxic-Ischemic Brain Injury in the ICU: A Narrative Review. *Resuscitation*, **189**, Article ID: 109900. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2023.109900>
- [6] Leithner, C. and Endisch, C. (2025) Evoked Potentials in Patients with Disorders of Consciousness. *Handbook of Clinical Neurology*, **207**, 147-164. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13408-1.00002-6>
- [7] 郑小春. 基于 EEG 的慢性意识障碍患者脑不对称性及其与预后的相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2024.
- [8] Meiron, O., Barron, J., David, J. and Jaul, E. (2021) Neural Reactivity Parameters of Awareness Predetermine One-Year Survival in Patients with Disorders of Consciousness. *Brain Injury*, **35**, 453-459. <https://doi.org/10.1080/02699052.2021.1879398>
- [9] Perera, K., Khan, S., Singh, S., Kromm, J., Wang, M., Sajobi, T., *et al.* (2021) EEG Patterns and Outcomes after Hypoxic Brain Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neurocritical Care*, **36**, 292-301. <https://doi.org/10.1007/s12028-021-01322-0>
- [10] Young, G.B., McLachlan, R.S., Kreeft, J.H. and Demelo, J.D. (1997) An Electroencephalographic Classification for Coma. *Canadian Journal of Neurological Sciences/Journal Canadien des Sciences Neurologiques*, **24**, 320-325. <https://doi.org/10.1017/s0317167100032996>
- [11] Synek, V.M. (1988) Prognostically Important EEG Coma Patterns in Diffuse Anoxic and Traumatic Encephalopathies in Adults. *Journal of Clinical Neurophysiology*, **5**, 161-174. <https://doi.org/10.1097/00004691-198804000-00003>
- [12] Hofmeijer, J., Beernink, T.M.J., Bosch, F.H., Beishuizen, A., Tjepkema-Cloostermans, M.C. and van Putten, M.J.A.M. (2015) Early EEG Contributes to Multimodal Outcome Prediction of Postanoxic Coma. *Neurology*, **85**, 137-143. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000001742>
- [13] Gaspard, N., Hirsch, L.J., LaRoche, S.M., Hahn, C.D. and Westover, M.B. (2014) Interrater Agreement for Critical Care EEG Terminology. *Epilepsia*, **55**, 1366-1373. <https://doi.org/10.1111/epi.12653>
- [14] Sethi, N.K. (2016) Standardized EEG Interpretation Accurately Predicts Prognosis after Cardiac Arrest. *Neurology*, **87**, 1631-1631. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000003276>
- [15] Ballanti, S., Campagnini, S., Liuzzi, P., Hakiki, B., Scarpino, M., Macchi, C., *et al.* (2022) EEG-Based Methods for Recovery Prognosis of Patients with Disorders of Consciousness: A Systematic Review. *Clinical Neurophysiology*, **144**, 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.09.017>
- [16] Wang, J., Chen, X., Zhou, L., Liu, Z., Xia, Y., You, J., *et al.* (2022) Assessment of Electroencephalography and Event-Related Potentials in Unresponsive Patients with Brain Injury. *Neurophysiologie Clinique*, **52**, 384-393. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2022.07.007>
- [17] Gottshall, J.L. and Rossi Sebastiano, D. (2020) Sleep in Disorders of Consciousness: Diagnostic, Prognostic, and Therapeutic Considerations. *Current Opinion in Neurology*, **33**, 684-690. <https://doi.org/10.1097/wco.0000000000000870>
- [18] Kondziella, D., Bender, A., Diserens, K., van Erp, W., Estraneo, A., Formisano, R., *et al.* (2020) European Academy of Neurology Guideline on the Diagnosis of Coma and Other Disorders of Consciousness. *European Journal of Neurology*, **27**, 741-756. <https://doi.org/10.1111/ene.14151>
- [19] Williams Roberson, S., Azeez, N.A., Fulton, J.N., Zhang, K.C., Lee, A.X.T., Ye, F., *et al.* (2023) Quantitative EEG Signatures of Delirium and Coma in Mechanically Ventilated ICU Patients. *Clinical Neurophysiology*, **146**, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.11.012>

- [20] Lutkenhoff, E.S., Nigri, A., Rossi Sebastiano, D., Sattin, D., Visani, E., Rosazza, C., *et al.* (2020) EEG Power Spectra and Subcortical Pathology in Chronic Disorders of Consciousness. *Psychological Medicine*, **52**, 1491-1500. <https://doi.org/10.1017/s003329172000330x>
- [21] Liu, Y., Zeng, W., Pan, N., Xia, X., Huang, Y. and He, J. (2023) EEG Complexity Correlates with Residual Consciousness Level of Disorders of Consciousness. *BMC Neurology*, **23**, Article No. 140. <https://doi.org/10.1186/s12883-023-03167-w>
- [22] 刘艳. 静息态脑电复杂度对意识障碍患者预后判别的价值研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 空军军医大学, 2023.
- [23] Ma, X., Qi, Y., Xu, C., Weng, Y., Yu, J., Sun, X., *et al.* (2024) How Well Do Neural Signatures of Resting-State EEG Detect Consciousness? A Large-scale Clinical Study. *Human Brain Mapping*, **45**, e26586. <https://doi.org/10.1002/hbm.26586>
- [24] Wu, Y., Li, Z., Qu, R., Wang, Y., Li, Z., Wang, L., *et al.* (2023) Electroencephalogram-Based Brain Connectivity Analysis in Prolonged Disorders of Consciousness. *Neural Plasticity*, **2023**, Article ID: 4142053. <https://doi.org/10.1155/2023/4142053>
- [25] Duclos, C., Maschke, C., Mahdid, Y., Berkun, K., Castanheira, J.D.S., Tarnal, V., *et al.* (2021) Differential Classification of States of Consciousness Using Envelope- and Phase-Based Functional Connectivity. *NeuroImage*, **237**, Article ID: 118171. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118171>
- [26] Ridha, M., Kumar, A. and Claassen, J. (2025) Electrophysiology in Disorders of Consciousness. *Handbook of Clinical Neurology*, **207**, 129-146. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13408-1.00013-0>
- [27] Bai, Y., Yang, L., Meng, X., Huang, Y., Wang, Q., Gong, A., *et al.* (2024) Breakdown of Effective Information Flow in Disorders of Consciousness: Insights from TMS-EEG. *Brain Stimulation*, **17**, 533-542. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2024.04.011>
- [28] Sandroni, C., Grippo, A. and Westhall, E. (2023) The Role of the Electroencephalogram and Evoked Potentials after Cardiac Arrest. *Current Opinion in Critical Care*, **29**, 199-207. <https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000001031>
- [29] 刘华, 谭亚琼, 胡继红, 等. 体感诱发电位联合改良昏迷恢复量表对儿童重症脑损伤恢复期意识障碍的预后评价[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2023, 26(1): 67-71.
- [30] Sandroni, C., D'Arrigo, S., Cacciola, S., Hoedemaekers, C.W.E., Kamps, M.J.A., Oddo, M., *et al.* (2020) Prediction of Poor Neurological Outcome in Comatose Survivors of Cardiac Arrest: A Systematic Review. *Intensive Care Medicine*, **46**, 1803-1851. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-06198-w>
- [31] Aalberts, N., Westhall, E., Johnsen, B., Hahn, K., Kenda, M., Cronberg, T., *et al.* (2023) Cortical Somatosensory Evoked Potential Amplitudes and Clinical Outcome after Cardiac Arrest: A Retrospective Multicenter Study. *Journal of Neurology*, **270**, 5999-6009. <https://doi.org/10.1007/s00415-023-11951-4>
- [32] Pruvost-Robieux, E., Marchi, A., Martinelli, I., Bouchereau, E. and Gavaret, M. (2021) Evoked and Event-Related Potentials as Biomarkers of Consciousness State and Recovery. *Journal of Clinical Neurophysiology*, **39**, 22-31. <https://doi.org/10.1097/wnp.0000000000000762>
- [33] Lachance, B., Wang, Z., Badjatia, N. and Jia, X. (2020) Somatosensory Evoked Potentials and Neuroprognostication after Cardiac Arrest. *Neurocritical Care*, **32**, 847-857. <https://doi.org/10.1007/s12028-019-00903-4>
- [34] Wang, J., Lai, Q., Han, J., Qin, P. and Wu, H. (2024) Neuroimaging Biomarkers for the Diagnosis and Prognosis of Patients with Disorders of Consciousness. *Brain Research*, **1843**, Article ID: 149133. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2024.149133>
- [35] 王瑾, 陈道朋, 冯应君, 等. 多模态神经电生理指标对意识障碍的预后评估价值[J]. 生命科学仪器, 2024, 22(3): 149-153.
- [36] Song, M., Yang, Y., Yang, Z., Cui, Y., Yu, S., He, J., *et al.* (2020) Prognostic Models for Prolonged Disorders of Consciousness: An Integrative Review. *Cellular and Molecular Life Sciences*, **77**, 3945-3961. <https://doi.org/10.1007/s00018-020-03512-z>
- [37] Lee, M. and Laureys, S. (2024) Artificial Intelligence and Machine Learning in Disorders of Consciousness. *Current Opinion in Neurology*, **37**, 614-620. <https://doi.org/10.1097/wco.0000000000001322>
- [38] Candia-Rivera, D. and Machado, C. (2023) Multidimensional Assessment of Heartbeat-evoked Responses in Disorders of Consciousness. *European Journal of Neuroscience*, **58**, 3098-3110. <https://doi.org/10.1111/ejn.16079>
- [39] Liuzzi, P., Campagnini, S., Hakiki, B., Burali, R., Scarpino, M., Macchi, C., *et al.* (2023) Heart Rate Variability for the Evaluation of Patients with Disorders of Consciousness. *Clinical Neurophysiology*, **150**, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2023.03.007>
- [40] Smith, A.E. and Friess, S.H. (2020) Neurological Prognostication in Children after Cardiac Arrest. *Pediatric Neurology*, **108**, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2020.03.010>