

术后谵妄患者围术期脑电特征及临床研究进展

张轶涵¹, 张二飞^{2*}

¹延安大学延安医学院, 陕西 延安

²延安大学附属医院麻醉与围术期医学中心, 陕西 延安

收稿日期: 2026年8月21日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月21日

摘要

术后谵妄(Postoperative Delirium, POD)是围术期常见的急性脑功能障碍综合征, 以意识波动、注意力不集中及认知功能急性改变为核心特征, 尤其好发于老年患者、大手术后及重症监护环境。POD不仅显著延长住院时间、增加医疗费用, 还与长期认知功能下降及术后死亡率升高密切相关。近年来, 脑电图(Electroencephalogram, EEG)凭借无创、高时间分辨率及可实时动态监测大脑功能状态的优势, 已成为POD神经电生理标志物研究的重要工具。大量研究证实, 围术期EEG特征性改变——包括 α 振荡功率降低、慢波活动增多、爆发抑制频发及脑区功能连接减弱——与POD的发生、发展轨迹及严重程度存在强关联。本文基于中国知网、PubMed等主流数据库近年刊发的优质文献, 系统综述了不同年龄分层、不同手术类型及围术期各阶段(术前、术中、苏醒期、术后)患者EEG特征的异同, 重点聚焦于 α 振荡慢化、慢波活动增多、爆发抑制及功能连接减弱等核心电生理标志物。在此基础上, 本文对未来研究方向提出展望, 主要包括: 建立标准化的EEG分析流程以提升研究可比性; 开发便携式无线监测设备便于临床推广应用; 融合多组学与人工智能技术构建多模态预测模型; 以及开展靶向脑电异常的干预试验等。通过系统整合当前证据, 本文旨在为术后谵妄的早期识别、风险分层及精准防治提供理论依据与临床参考, 同时客观评述现有研究的争议与不足, 并展望精准围术期脑功能保护的未来发展方向。

关键词

术后谵妄, 围术期脑电特征, 麻醉深度监测, 预测模型

Perioperative EEG Characteristics and Clinical Research Progress in Patients with Postoperative Delirium

Yihan Zhang¹, Erfei Zhang^{2*}

¹Yan'an Medical College, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Center of Anesthesiology and Perioperative Medicine, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

*通讯作者。

文章引用: 张轶涵, 张二飞. 术后谵妄患者围术期脑电特征及临床研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(9): 2162-2171.
DOI: 10.12677/acm.2026.1693261

Abstract

Postoperative delirium (POD) is a common acute brain dysfunction syndrome in the perioperative period, characterized by fluctuations in consciousness, inattention, and acute changes in cognition. It is particularly prevalent in elderly patients, after major surgery, and in intensive care settings. POD not only significantly prolongs hospital stays and increases medical costs but is also strongly associated with long-term cognitive decline and increased postoperative mortality. In recent years, electroencephalography (EEG), owing to its non-invasiveness, high temporal resolution, and ability to provide real-time dynamic monitoring of brain functional status, has become an important tool in the study of neurophysiological biomarkers for POD. A large body of research has confirmed that characteristic perioperative EEG changes—including reduced alpha oscillation power, increased slow-wave activity, frequent burst suppression, and decreased functional connectivity between brain regions—are strongly associated with the occurrence, trajectory, and severity of POD. Based on high-quality literature published in recent years from mainstream databases such as CNKI and PubMed, this article systematically reviews the similarities and differences in EEG characteristics across different age strata, surgical types, and perioperative phases (preoperative, intraoperative, emergence, and postoperative), with a focus on core electrophysiological markers including alpha oscillation slowing, increased slow-wave activity, burst suppression, and decreased functional connectivity. On this basis, this article proposes future research directions, including: establishing standardized EEG analysis procedures to improve study comparability; developing portable wireless monitoring devices to facilitate clinical application; integrating multi-omics and artificial intelligence technologies to construct multimodal predictive models; and conducting intervention trials targeting EEG abnormalities. By systematically synthesizing current evidence, this article aims to provide a theoretical basis and clinical reference for the early identification, risk stratification, and precise prevention and treatment of POD, while objectively discussing the controversies and limitations of existing research and envisioning future directions for precision perioperative brain function protection.

Keywords

Postoperative Delirium, Perioperative EEG Characteristics, Anesthesia Depth Monitoring, Prediction Models

Copyright © 2026 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. 研究背景

1.1. 术后谵妄的临床定义与流行病学

术后谵妄是一种急性发作、病情波动的神经精神综合征,其核心特征包括:① 注意障碍(无法集中、维持或转移注意力);② 意识水平改变(过度警觉、嗜睡或昏迷);③ 认知功能全面紊乱(记忆缺陷、定向障碍、语言障碍、知觉障碍) [1]。根据精神障碍诊断与统计手册第五版(DSM-5),谵妄常由躯体疾病、手术创伤、药物或多种因素共同诱发。在临床实践中,意识模糊评估法(Confusion Assessment Method, CAM)

及其 ICU 专用版 CAM-ICU [2]是最常用的筛查工具, 但均依赖临床观察, 存在主观性强、时效性滞后等不足。

POD 的发生率因手术类型、患者年龄、诊断方法不同而存在较大差异[3]。在 65 岁以上的老年大手术患者中, POD 发生率约为 10%~50%; 其不仅延长住院时间(平均延长 5~10 天), 还显著增加医疗成本[4], 更为严重的是, POD 与术后长期认知功能下降(术后认知功能障碍, POCD)、痴呆发生率升高及 1 年内死亡率增加存在独立相关性[5]。

1.2. 围术期脑电监测的必要性与优势

传统 POD 风险预测主要依赖临床评分(如术前认知评估、衰弱指数、ASA 分级)及血液生物标志物(如 IL-6、CRP、S100 β), 但上述指标均为间歇性、滞后性, 无法实时反映大脑功能状态的动态变化。EEG 通过头皮电极记录大脑皮层锥体神经元突触后电位的总和活动, 可提供毫秒级时间分辨率的神经电生理信息, 且完全无创、可床旁连续监测[6]。EEG 信号按频率可分为 δ (0.5~4 Hz)、 θ (4~8 Hz)、 α (8~13 Hz)、 β (13~30 Hz) 及 γ (>30 Hz) 频段, 各频段与特定的神经生理过程密切相关。例如, α 节律主要起源于丘脑-皮层回路的同步振荡, 反映静息状态下皮层的抑制性调控状态; 而 δ/θ 慢波则与深度睡眠、脑损伤或代谢抑制相关[7]。

近年来, 随着处理脑电图(processed EEG, pEEG)设备(如 BIS、Narcotrend、Entropy)在麻醉深度监测中的普及, 围术期 EEG 的获取已变得极为便捷。然而, pEEG 算法主要为评估麻醉中的意识水平而设计, 并非直接针对 POD 风险识别[8]。因此, 越来越多的研究开始采用原始 EEG 或定量 EEG (qEEG) 分析, 提取频域功率、频谱边缘频率、爆发抑制率、功能连接(如相位滞后指数、相干性)等参数, 以寻找更精准的 POD 神经标志物[6] [9]。

1.3. 围术期脑电监测技术的分类与特征对比

原始 EEG 指直接从头皮电极采集的未经处理的时域电信号, 以波形图形式呈现, 保留了全部频域和时域信息。其优势在于信息完整, 可供神经生理专家进行视觉判读(如识别爆发抑制、棘波、三相波等特征性波形), 是 EEG 分析的“金标准”参照。其劣势亦显而易见: 数据量大、解读高度依赖专业培训、难以实现自动化实时分析。在 POD 研究中, 原始 EEG 通常作为离线精细分析的数据来源, 用于提取功率谱、功能连接等衍生指标[6]。

定量 EEG (qEEG) 是对原始 EEG 进行数学变换和特征提取后获得的量化参数集合, 包括频域指标(各频段绝对/相对功率、频谱边缘频率 SEF、 α 峰值频率)、时域指标(爆发抑制率、振幅整合 EEG)、时频联合指标(频谱图)以及功能连接指标(相干性、相位滞后指数 PLI、图论参数)等。qEEG 的优势在于将复杂波形压缩为可量化的特征值, 便于统计分析、趋势监测和机器学习建模; 其劣势是信息高度降维, 可能丢失与 POD 相关的细微时域模式(如周期性放电)。在 POD 研究中, qEEG 是目前最主流的分析范式, 绝大多数关于 α 功率降低、慢波增多的证据均来自 qEEG 分析[9] [10]。

处理脑电图(pEEG)是指通过专有算法将原始 EEG 进一步简化为单一无量纲指数(如 BIS、Narcotrend 指数、熵指数)或少量趋势参数, 旨在为临床麻醉医生提供直观的“意识深度”读数。其优势极为突出: 操作简单、结果直观、已广泛集成于主流麻醉监护平台。然而, 其劣势同样不可忽视: 算法黑箱化(原始 EEG 信息经过专有变换不可逆丢失)、主要针对意识水平校准而非 POD 相关特征优化, 且不同厂商的 pEEG 算法之间缺乏可比性。例如, BIS 指数在丙泊酚和七氟烷麻醉下的表现存在显著差异[8]。在 POD 研究中, pEEG 主要用于评估麻醉深度与 POD 的剂量-效应关系(如 BIS 值与 POD 风险的关联), 但因其信息丢失严重, 不适合用于发掘新的神经电生理标志物。

2. 术后谵妄的危险因素与发病机制

POD 的发生是患者基线脆弱性、围术期应激及医源性因素共同作用的结果。根据时间轴, 危险因素可分为术前易感因素、术中诱发因素和术后触发因素[11]。

2.1. 主要危险因素: 术前易感、术中诱发与术后触发

2.1.1. 术前易感因素

年龄: ≥ 65 岁是 POD 最明确的独立危险因素。每增加 5 岁, POD 风险约升高 1.5 倍。年龄相关的大脑结构改变(脑萎缩、白质高信号)、神经递质储备下降(乙酰胆碱合成减少)、血管调节功能减退及炎症免疫衰老构成了脆弱基础[11]。

认知储备下降: 术前存在轻度认知障碍(MCI)、痴呆、阿尔茨海默病病史的患者, POD 风险升高 2~4 倍。脑萎缩(尤其是海马、前额叶萎缩)、脑白质病变、既往脑卒中史也显著增加易感性[12]。

精神与神经疾病: 帕金森病、抑郁症、长期失眠、焦虑障碍等均与 POD 风险增加相关, 可能与基底节-皮层环路功能异常及单胺能神经递质紊乱有关[11]。

躯体基础疾病: 糖尿病(血糖波动、血管病变)、高血压(脑血管自动调节受损)、肝肾功能不全(药物代谢清除下降)、营养不良(低白蛋白、维生素缺乏)、视听障碍(感觉剥夺加重定向障碍)均为独立危险因素。

不良生活史与药物: 长期酗酒(维生素 B1 缺乏、神经退行性变)、吸烟(脑小血管病)、长期服用苯二氮草类药物、抗胆碱能药物、阿片类药物均可导致神经递质系统适应性改变, 停药或麻醉期间再暴露易诱发谵妄[11]。

衰弱与功能状态: 衰弱是一种多维度生理储备下降状态, Meta 分析显示衰弱患者 POD 风险是非衰弱患者的 2.1~3.3 倍[13]。日常生活活动能力(ADL)评分低、步速减慢、握力下降也是重要预测因子。

2.1.2. 术中诱发因素

麻醉因素: 使用高剂量抗胆碱药(阿托品、东莨菪碱)、氯胺酮、苯二氮草类药物(尤其咪达唑仑)可直接影响胆碱能及 GABA 能系统。麻醉过深(BIS < 35)、麻醉时间过长(>3 小时)、苏醒延迟均增加 POD 风险[11]。

血流动力学异常: 术中低血压(MAP < 65 mmHg 持续超过 10 分钟)、脑氧饱和度(rSO₂)低于基线值 20% 或绝对值 < 50%、低血红蛋白(<70 g/L)、低体温(<35.5℃)可导致脑灌注不足及能量代谢障碍[12]。

手术创伤: 大手术(心脏、大血管、胸腹部、骨科)、手术时长超过 3 小时、大量失血(>500 mL)、体外循环(炎症激活、微栓子)均为重要诱因[11]。

2.1.3. 术后触发因素

疼痛与镇痛: 重度疼痛(尤其静息痛)是 POD 的强触发因素, 但阿片类镇痛药过量本身也可致谵妄(尤其是哌替啶、吗啡)。区域阻滞联合低剂量阿片方案可降低 POD 风险。

睡眠剥夺: ICU 环境噪音、灯光、频繁护理操作导致睡眠结构破碎(REM 睡眠减少、慢波睡眠减少), 直接损害大脑清除代谢废物(如 A β)的功能, 并降低癫痫阈值。

感染与代谢紊乱: 术后感染(肺炎、尿路感染、败血症)、发热、脱水、电解质紊乱(低钠、高钠、低镁)、高血糖或严重低血糖均可诱发谵妄。

药物残留与多药叠加: 镇静药、抗胆碱药、抗组胺药、糖皮质激素等联合使用可产生中枢副作用叠加[11]。

2.2. 主要发病机制: 从分子到网络

POD 的确切发病机制尚未完全阐明, 但多因素、多通路共同致病已形成共识。目前主流假说包括神

经炎症、神经递质失衡、脑能量代谢障碍及神经网络连接断裂, 四者相互关联、互为因果[1]。

3. 术后谵妄患者围术期脑电特征

3.1. 频域特征: α 振荡慢化与慢波增多

频域分析通过快速傅里叶变换(FFT)或小波变换将原始 EEG 分解为不同频率成分的能量密度。POD 患者最稳定、最可重复的发现是 α 功率降低及 α 峰值频率减慢, 其次是 δ/θ 相对功率升高, 即“频谱慢化”现象[9]。

3.1.1. α 振荡功率降低

α 节律(8~13 Hz)在清醒闭眼静息状态下以枕区最为突出, 其产生依赖于完整的丘脑 - 皮层回路——丘脑网状核(GABA 能)通过节律性抑制投射至皮层锥体细胞, 诱发的兴奋性突触后电位经体积传导在头皮形成 α 振荡[7]。任何损害丘脑 - 皮层回路完整性的因素(如衰老、神经炎症、胆碱能缺陷、麻醉药物)均可导致 α 功率下降。

3.1.2. 慢波功率异常

δ 波(0.5~4 Hz)和 θ 波(4~8 Hz)在深度睡眠、脑损伤、麻醉状态下占主导。POD 患者围术期往往表现为 δ/θ 相对功率升高, 频谱边缘频率(SEF95, 即 95%能量所在频率上限)降低。然而, 部分研究发现 δ 功率与 POD 的关联受麻醉药物类型及监测深度影响, 不如 α 功率稳健[9]。这可能因为 δ 波对麻醉药浓度高度敏感, 且老年人基线 δ 功率已相对增高, 导致组间差异被稀释。

3.2. 时域特征: 爆发抑制

爆发抑制是指 EEG 信号中持续的电静息(抑制期, 通常 > 0.5 秒, 振幅 < 5 μ V)与高波幅爆发活动(慢波 + 棘/尖波)交替出现的模式, 代表皮层神经元电活动处于深度抑制状态[14]。爆发抑制可由麻醉药物(尤其是挥发性麻醉药和丙泊酚)、低温、缺氧、严重低血压及代谢性脑病诱发。

3.3. 功能连接特征: 网络断裂的量化证据

功能连接指不同脑区 EEG 信号之间的统计依赖性, 常用指标包括相干性(coherence)、相位锁定值(PLV)、相位滞后指数(PLI)及图论参数(聚类系数、特征路径长度)。POD 患者普遍存在脑区功能连接减弱, 尤以 α 频段、默认模式网络及额 - 顶叶通路为著[15]。

3.4. 不同围术期阶段的脑电特征差异

3.4.1. 术前基线

术前静息态 EEG 可发现隐性脑网络脆弱性。Kim 等[16]发现, 术前额区静息 EEG 慢化(δ/θ 能量增加, α/β 能量减少)与老年患者 POD 风险独立相关。Ning 等[17]进一步指出, 枕区 α 功率降低及 α 衰减试验(睁眼 - 闭眼)中 α 衰减幅度减弱, 提示丘脑 - 皮层回路的功能不全。

3.4.2. 术中

麻醉诱导后早期(5~15 min)是观察 α 功率下降的窗口期。POD 高危患者对麻醉药物的反应呈现“过度抑制”——即丙泊酚或七氟烷诱导后 α 功率增幅不明显, 甚至出现快速 β 活动缺失。维持期若出现长时间爆发抑制、持续 α 功率降低、SEF95 减慢, 提示大脑对麻醉的耐受性差, POD 风险显著升高[9][18]。此外, 多个研究显示术中脑电异常的程度与 POD 发生率存在正相关趋势。

3.4.3. 苏醒期

从停用麻醉药到气管拔管、定向力恢复的过程, EEG 应从慢波主导转变为 α/β 主导。若苏醒期 EEG 仍以 δ 波为主, 缺乏 α 优势活动, 则 POD 风险显著增加[19]。Dragovic 等[20]发现, 苏醒期 EEG 总功率及 α/β 功率呈负斜率(即随苏醒进展逐步下降)的患者 POD 发生率显著降低(2% vs 21%), 提示大脑能够高效地从麻醉状态切换到清醒状态; 相反, 正斜率(功率上升)可能反映延迟苏醒或反常兴奋。

3.4.4. 术后

谵妄发作时, EEG 通常表现为全脑性慢化(δ/θ 功率显著升高)、 α 功率持续抑制、快活动缺失。Guay 等[21]对 26 例大手术患者的连续 EEG 监测发现, 术后第 1 天的 δ 功率与谵妄严重程度(CAM 评分)呈剂量依赖性正相关(斜率 0.57, $P = 0.002$), 而枕区 α 相对功率则与谵妄严重程度呈负相关(斜率 -0.67, $P = 0.01$)。部分研究提示, 谵妄消退后 EEG 异常可能在一定程度上恢复, 但具体恢复轨迹尚需进一步研究。

4. 特殊人群与手术类型的脑电特征

4.1. 心脏手术患者

心脏手术 POD 发生率最高(30%~50%), 与其使用体外循环(CPB)、大血管操作、温度波动、微栓子及全身炎症反应有关。该类患者的 EEG 特征包括: CPB 复温阶段出现 δ 波暴发、 α/β 功率恢复延迟、术中爆发抑制持续时间较长。Khalifa 等[22]专门针对心脏手术队列发现, 术中额叶 α 功率降低仍是最稳健的 POD 预测因子, 且与 CPB 时长无关。

4.2. 骨科手术(髌/膝置换、髌部骨折)

髌部骨折患者多为高龄、合并衰弱、骨质疏松及多种慢性病。脊柱麻醉下进行手术时, 镇静深度与 POD 的关系存在争议。Sieber 等[23]发现, 在轻镇静组(BIS 80) POD 发生率显著低于深镇静组(BIS 50); 而 Brown 等[24]的 SHARP 试验则显示, 基于 BIS 靶向镇静的脊髓麻醉与全麻相比未降低 POD 发生率, 但亚组分析提示 MMSE < 27 的患者可能从脊髓麻醉中获益。这些患者的 EEG 特征: 术前 α 功率已明显降低(年龄相关), 术中给予丙泊酚或右美托咪定后 α 功率增幅极小, 爆发抑制出现阈值更低。

4.3. 儿童患者

虽然儿童 POD(又称苏醒期谵妄, Emergence Delirium, ED)发生率也较高(30%~50%), 但其机制与老年人不同, 更多与麻醉药物快速代谢、兴奋性神经递质反弹有关[25]。儿童 ED 的 EEG 特征表现为: 苏醒期出现以 δ/θ 慢波为主导的脑电活动, 快波(α/β)活动明显减少, 缺乏成人的典型 α 节律模式。由于儿童脑电随年龄快速成熟, 研究较少。

5. 围术期脑电监测的临床价值

5.1. 早期风险预测

围术期 EEG 特征, 尤其是术前枕区 α 功率、术中 α 功率降幅及爆发抑制存在与否, 均是 POD 的独立预测因子[9]。多变量模型整合 EEG 参数与临床评分后, AUC 可达 0.90 以上。Ning 等[17]的机器学习模型(α 功率 + MoCA)在独立队列中 AUC 0.94; Bao 等[26]将术前 BIS 与 MMSE、贫血、肾功能、ADL 结合, AUC 达 0.87。

5.2. 优化麻醉管理: pEEG 引导的争议与共识

基于处理 EEG (如 BIS、Narcotrend)的麻醉深度监测已被广泛用于避免术中知晓及麻醉过深。

MacKenzie 等[27]的荟萃分析显示, pEEG 引导麻醉可降低 38% 的 POD 风险(OR 0.62, 95% CI 0.51~0.76)。然而, 随后发表的 ENGAGES 试验[28] (n = 1232) 未发现 pEEG 引导显著降低 POD 发生率; 而 BALANCED 研究的谵妄亚组[29] (n = 655) 则发现, 靶向浅麻醉(BIS 50)较深麻醉(BIS 35)可显著降低 POD 发生率(18.9% vs 25.2%, $P = 0.038$)。这种矛盾可能原因包括: ① pEEG 算法本为意识监测设计, 并非优化 POD 相关脑电特征(如 α 功率、慢波密度); ② 对照组的麻醉管理已较规范, 暴发抑制时间本身较短, 进一步缩短的获益有限; ③ POD 是多因素疾病, 单纯减少麻醉深度不足以完全预防。

尽管如此, 多数指南仍建议高危患者采用脑电监测以避免不必要的深麻醉(BIS < 40), 尤其应避免长时间暴发抑制。靶向 BIS 50~60 的浅麻醉策略在部分 RCT 中显示出降低 POD 的效果[30]。

5.3. 指导分层干预

基于脑电特征可将患者分为“高神经脆弱型”(术前 α 功率低、术中暴发抑制易感)与“相对稳健型”。高脆弱型患者应优先采用区域阻滞或局部麻醉 + 右美托咪定镇静, 避免使用抗胆碱药和长效苯二氮草类, 术后应强化非药物干预(定向恢复、白天光照、夜间耳塞、早期活动、疼痛管理)。术前认知障碍(MMSE < 27)的髋部骨折患者, 采用浅镇静椎管内麻醉较深镇静可显著降低 POD 风险[23]。此外, 对于术后 EEG 持续慢化的患者, 应筛查潜在感染、代谢紊乱或药物过量, 并考虑尽早启动谵妄集束化干预。

5.4. 机器学习与多模态整合

随着人工智能技术的发展, 基于 EEG 的 POD 预测正从单一特征走向多模态融合。Zhang 等[31]比较了 9 种机器学习模型(逻辑回归、SVM、随机森林、XGBoost 等), 发现 XGBoost 模型在预测退行性脊柱疾病患者 POD 时表现最佳(AUC 0.928)。Mulkey 等[32]将有限导联 EEG (4 通道)与深度学习视觉转换器(Vision Transformer)结合, POD 检测具有较高准确性。未来可整合 EEG 频谱特征、功能连接、临床评分、血液生物标志物(NFL, GFAP, IL-6)以及神经影像(术前白质高信号体积), 构建真正的个体化预测模型, 并通过便携式干电极 EEG 设备实现床旁实时预警。

6. 研究争议与局限性

6.1. 脑电异常是病因还是标志物?

这是当前最大的理论争议。部分学者认为术中 EEG 异常(尤其是 α 功率降低及暴发抑制)直接导致或加重了神经认知损伤, 理由包括: ① 药物诱导的 α 振荡与记忆编码干扰有关; ② 暴发抑制期间的神经元电沉默可能阻碍突触稳态维持[33]。但 ENGAGES 试验对暴发抑制的主动干预未能减少 POD, 削弱了因果关系[28]。另一种观点认为, 围术期脑电异常更多是“大脑脆弱性”的电生理表现——术前存在的神经退行性变、白质损伤、突触减少决定了患者对麻醉和手术应激的反应方式, 脑电只是暴露了这种脆弱性[34]。目前较为主流的看法是两者兼有: EEG 异常既是脆弱性的标志物, 也可能在易感个体中通过机制(如长时间暴发抑制后突触可塑性改变)进一步加重损伤。

6.2. 研究异质性与标准缺失

各研究的 EEG 采集电极位置(单通道额叶 vs. 多通道全头)、麻醉药物种类(丙泊酚 vs. 七氟烷)、分析技术(绝对功率 vs. 相对功率 vs. 频谱边缘频率)、POD 诊断工具(CAM, CAM-ICU, DRS)差异较大, 导致荟萃分析中部分指标的置信区间较宽, 结论不一。以暴发抑制为例, 围术期麻醉诱导的暴发抑制脑电图目前尚缺乏统一的定义与判读标准, 这进一步限制了多中心数据的整合。

6.3. 干预研究的阴性结果

除 ENGAGES 试验外, ADAPT-2 试验[35]同样显示, 主动减少术中脑电抑制并未显著降低 POD 发生率。这些阴性结果提示, 单纯依靠 EEG 反馈调整麻醉策略可能不足以阻断 POD 的多因素病理链。未来的干预性研究可能需要同时靶向多个环节, 例如抗炎、改善脑灌注、优化术后睡眠结构、减少抗胆碱能药物使用等。

6.4. 技术与推广障碍

常规 EEG 的解读需要经过专业培训的技术人员及神经生理医师, 术中实时分析的临床门槛较高。pEEG 设备虽已普及, 但其算法主要面向意识水平评估设计, 在 POD 相关的精细特征分析中存在信息损失。便携式高密度干电极 EEG 系统目前仍处于积极研发阶段[36]。此外, EEG 信号易受电刀、肌电、心电等多种伪迹干扰, 术中自动去除伪迹的算法仍需进一步改进。

6.5. 技术挑战的潜在解决方案

术中 EEG 受电刀、肌电、心电等伪迹干扰严重。主流去噪算法包括: ① 独立成分分析(ICA)——分离并剔除生理伪迹成分, 静息态效果良好, 但肌电剧烈时可能过度分离; ② 小波阈值去噪——对高频细节系数设置自适应阈值抑制噪声, 计算效率高, 但阈值选择影响结果; ③ 多通道自适应滤波——利用参考通道(如心电图)自适应减除噪声, 对电刀干扰效果突出, 但需额外传感器。建议围术期 EEG 研究优先采用 ICA + 小波阈值组合策略(ICA 去除节律性伪迹, 小波阈值抑制宽带噪声), 并明确报告去噪参数以提升可比性。

7. 总结与展望

经过系统整合现有证据, 我们可以得出结论: 围术期脑电特征——尤其是术前静息态 α 功率降低、术中 α 振荡抑制、爆发抑制频发以及脑区功能连接减弱——是 POD 风险的重要神经电生理标志物。这些特征可在术前识别高危个体、术中指导麻醉管理避免过度抑制、术后评估谵妄严重程度及预测恢复轨迹。尽管存在争议与技术限制, 但 EEG 作为客观、实时、可重复的脑功能监测手段, 在围术期神经保护领域具有不可替代的价值。

总之, EEG 已经从一个纯研究工具逐步走向围术期临床实践的核心舞台。随着信号处理技术、人工智能算法及硬件设备的不断进步, 我们有理由相信, 在不久的将来, 基于 EEG 的精准围术期脑功能监测将成为老年患者麻醉管理的标准组成部分, 为降低 POD 发生率、改善术后长期认知预后提供有力武器。

参考文献

- [1] 中国老年医学学会麻醉学分会. 中国老年患者术后谵妄防治专家共识[J]. 国际麻醉学与复苏杂志, 2023, 44(1): 1-27.
- [2] Inouye, S.K., van Dyck, C.H., Alessi, C.A., Balkin, S., Siegel, A.P. and Horwitz, R.I. (1990) Clarifying Confusion: The Confusion Assessment Method. *Annals of Internal Medicine*, **113**, 941-948. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-113-12-941>
- [3] Inouye, S.K., Westendorp, R.G. and Saczynski, J.S. (2014) Delirium in Elderly People. *The Lancet*, **383**, 911-922. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)60688-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)60688-1)
- [4] Yan, E., Veitch, M., Saripella, A., Alhamdah, Y., Butris, N., Tang-Wai, D.F., et al. (2023) Association between Postoperative Delirium and Adverse Outcomes in Older Surgical Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Anesthesia*, **90**, Article 111221. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2023.111221>
- [5] Goldberg, T.E., Chen, C., Wang, Y., Jung, E., Swanson, A., Ing, C., et al. (2020) Association of Delirium with Long-Term Cognitive Decline: A Meta-Analysis. *JAMA Neurology*, **77**, 1373-1381.

- <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2020.2273>
- [6] Koch, S., Windmann, V., Chakravarty, S., Kruppa, J., Yürek, F., Brown, E.N., *et al.* (2021) Perioperative Electroencephalogram Spectral Dynamics Related to Postoperative Delirium in Older Patients. *Anesthesia & Analgesia*, **133**, 1598-1607. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000005668>
- [7] Ching, S., Cimenser, A., Purdon, P.L., Brown, E.N. and Kopell, N.J. (2010) Thalamocortical Model for a Propofol-Induced A-Rhythm Associated with Loss of Consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**, 22665-22670. <https://doi.org/10.1073/pnas.1017069108>
- [8] Fahy, B.G. and Chau, D.F. (2018) The Technology of Processed Electroencephalogram Monitoring Devices for Assessment of Depth of Anesthesia. *Anesthesia & Analgesia*, **126**, 111-117. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002331>
- [9] Xu, A., Arnaout, B., Scott, D.A. and McGuigan, S. (2025) Intraoperative Electroencephalogram-Derived Measures and Their Association with Postoperative Delirium: A Systematic Review and Meta-Analysis. *British Journal of Anaesthesia*, **135**, 1684-1703. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2025.08.038>
- [10] 肖春娅, 王彬. 围术期脑电监测预测术后谵妄的研究进展[J]. 临床麻醉学杂志, 2026, 42(2): 179-183.
- [11] Aldecoa, C., Bettelli, G., Bilotta, F., Sanders, R.D., Audisio, R., Borozdina, A., *et al.* (2017) European Society of Anaesthesiology Evidence-Based and Consensus-Based Guideline on Postoperative Delirium. *European Journal of Anaesthesiology*, **34**, 192-214. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000000594>
- [12] Jin, Z., Hu, J. and Ma, D. (2020) Postoperative Delirium: Perioperative Assessment, Risk Reduction, and Management. *British Journal of Anaesthesia*, **125**, 492-504. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2020.06.063>
- [13] Liu, C., Gong, N. and Liu, W. (2022) The Association between Preoperative Frailty and Postoperative Delirium: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of PeriAnesthesia Nursing*, **37**, 53-62.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jopan.2020.12.006>
- [14] Ching, S., Purdon, P.L., Vijayan, S., Kopell, N.J. and Brown, E.N. (2012) A Neurophysiological-Metabolic Model for Burst Suppression. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 3095-3100. <https://doi.org/10.1073/pnas.1121461109>
- [15] Hanna, A., Jirsch, J., Alain, C., Corvinelli, S. and Lee, J.S. (2023) Electroencephalogram Measured Functional Connectivity for Delirium Detection: A Systematic Review. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article ID: 1274837. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1274837>
- [16] Kim, J., Park, S., Kim, K., Ha, Y., Shin, S., Cha, W., *et al.* (2023) Resting-State Prefrontal EEG Biomarker in Correlation with Postoperative Delirium in Elderly Patients. *Frontiers in Aging Neuroscience*, **15**, Article ID: 1224264. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2023.1224264>
- [17] Ning, M.H., Rodionov, A., Ross, J.M., Ozdemir, R.A., Burch, M., Lian, S.J., *et al.* (2025) Prediction of Postoperative Delirium in Older Adults from Preoperative Cognition and Occipital Alpha Power from Resting-State Electroencephalogram. *Age and Ageing*, **54**, afaf330. <https://doi.org/10.1093/ageing/afaf330>
- [18] Gutierrez, R., Egaña, J.I., Saez, I., Reyes, F., Briceño, C., Venegas, M., *et al.* (2019) Intraoperative Low Alpha Power in the Electroencephalogram Is Associated with Postoperative Subsyndromal Delirium. *Frontiers in Systems Neuroscience*, **13**, Article No. 56. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2019.00056>
- [19] Lutz, R., Müller, C., Dragovic, S., Schneider, F., Ribbe, K., Anders, M., *et al.* (2022) The Absence of Dominant Alpha-Oscillatory EEG Activity during Emergence from Delta-Dominant Anesthesia Predicts Neurocognitive Impairment- Results from a Prospective Observational Trial. *Journal of Clinical Anesthesia*, **82**, Article 110949. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2022.110949>
- [20] Dragovic, S., Schneider, G., García, P.S., Hinzmann, D., Sleight, J., Kratzer, S., *et al.* (2023) Predictors of Low Risk for Delirium during Anesthesia Emergence. *Anesthesiology*, **139**, 757-768. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000004754>
- [21] Guay, C.S., Kafashan, M., Huels, E.R., Jiang, Y., Beyoglu, B., Spencer, J.W., *et al.* (2023) Postoperative Delirium Severity and Recovery Correlate with Electroencephalogram Spectral Features. *Anesthesia & Analgesia*, **136**, 140-151. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000006075>
- [22] Khalifa, C., Lenoir, C., Robert, A., Watremez, C., Kahn, D., Mastrobuoni, S., *et al.* (2023) Intra-Operative Electroencephalogram Frontal Alpha-Band Spectral Analysis and Postoperative Delirium in Cardiac Surgery: A Prospective Cohort Study. *European Journal of Anaesthesiology*, **40**, 777-787. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000001895>
- [23] Sieber, F.E., Zakriya, K.J., Gottschalk, A., Blute, M., Lee, H.B., Rosenberg, P.B., *et al.* (2010) Sedation Depth during Spinal Anesthesia and the Development of Postoperative Delirium in Elderly Patients Undergoing Hip Fracture Repair. *Mayo Clinic Proceedings*, **85**, 18-26. <https://doi.org/10.4065/mcp.2009.0469>
- [24] Brown, C.H., Edwards, C., Lin, C., Jones, E.L., Yanek, L.R., Esmaili, M., *et al.* (2021) Spinal Anesthesia with Targeted Sedation Based on Bispectral Index Values Compared with General Anesthesia with Masked Bispectral Index Values to Reduce Delirium: The SHARP Randomized Controlled Trial. *Anesthesiology*, **135**, 992-1003. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000004015>

- [25] Gao, X., Li, Z., Chai, J., Li, S., Pan, X., Liu, J., *et al.* (2024) Electroencephalographic Insights into the Pathophysiological Mechanisms of Emergence Delirium in Children and Corresponding Clinical Treatment Strategies. *Frontiers in Pharmacology*, **15**, Article ID: 1349105. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1349105>
- [26] Bao, L., Liu, T., Zhang, Z., Pan, Q., Wang, L., Fan, G., *et al.* (2023) The Prediction of Postoperative Delirium with the Preoperative Bispectral Index in Older Aged Patients: A Cohort Study. *Aging Clinical and Experimental Research*, **35**, 1531-1539. <https://doi.org/10.1007/s40520-023-02408-9>
- [27] MacKenzie, K.K., Britt-Spells, A.M., Sands, L.P. and Leung, J.M. (2018) Processed Electroencephalogram Monitoring and Postoperative Delirium: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Anesthesiology*, **129**, 417-427. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000002323>
- [28] Wildes, T.S., Mickle, A.M., Ben Abdallah, A., Maybrier, H.R., Oberhaus, J., Budelier, T.P., *et al.* (2019) Effect of Electroencephalography-Guided Anesthetic Administration on Postoperative Delirium among Older Adults Undergoing Major Surgery: The ENGAGES Randomized Clinical Trial. *JAMA*, **321**, 473-483. <https://doi.org/10.1001/jama.2018.22005>
- [29] Evered, L.A., Chan, M.T.V., Han, R., Chu, M.H.M., Cheng, B.P., Scott, D.A., *et al.* (2021) Anaesthetic Depth and Delirium after Major Surgery: A Randomised Clinical Trial. *British Journal of Anaesthesia*, **127**, 704-712. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2021.07.021>
- [30] Radtke, F.M., Franck, M., Lendner, J., Krüger, S., Wernecke, K.D. and Spies, C.D. (2013) Monitoring Depth of Anaesthesia in a Randomized Trial Decreases the Rate of Postoperative Delirium but Not Postoperative Cognitive Dysfunction. *British Journal of Anaesthesia*, **110**, i98-i105. <https://doi.org/10.1093/bja/aet055>
- [31] Zhang, Y., Wan, D.H., Chen, M., Li, Y., Ying, H., Yao, G., *et al.* (2023) Automated Machine Learning-Based Model for the Prediction of Delirium in Patients after Surgery for Degenerative Spinal Disease. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, **29**, 282-295. <https://doi.org/10.1111/cns.14002>
- [32] Mulkey, M.A., Huang, H., Albanese, T., Kim, S. and Yang, B. (2023) Supervised Deep Learning with Vision Transformer Predicts Delirium Using Limited Lead EEG. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 7890. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35004-y>
- [33] Jegarl, A.M., Walline, M.C., Goldstein, P.A. and Safavynia, S.A. (2026) Is Electroencephalographic Burst-Suppression Good, Bad, or Indifferent for Brain Health? Context Matters. *Anesthesia & Analgesia*, **142**, 1169-1179. <https://doi.org/10.1213/ane.00000000000007739>
- [34] Fritz, B.A., King, C.R., Ben Abdallah, A., Lin, N., Mickle, A.M., Budelier, T.P., *et al.* (2020) Preoperative Cognitive Abnormality, Intraoperative Electroencephalogram Suppression, and Postoperative Delirium: A Mediation Analysis. *Anesthesiology*, **132**, 1458-1468. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000003181>
- [35] Tang, C.J., Jin, Z., Sands, L.P., Pleasants, D., Tabatabai, S., Hong, Y., *et al.* (2020) ADAPT-2: A Randomized Clinical Trial to Reduce Intraoperative EEG Suppression in Older Surgical Patients Undergoing Major Noncardiac Surgery. *Anesthesia & Analgesia*, **131**, 1228-1236. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000004713>
- [36] Shivaraja, T.R., Remli, R., Kamal, N., Wan Zaidi, W.A. and Chellappan, K. (2023) Assessment of a 16-Channel Ambulatory Dry Electrode EEG for Remote Monitoring. *Sensors*, **23**, Article 3654. <https://doi.org/10.3390/s23073654>