

振幅整合脑电图与传统方法在早产儿脑功能评估中的对比研究：一项前瞻性分析

吴蓉, 王云*

兴义市人民医院新生儿科, 贵州 兴义

收稿日期: 2026年3月21日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月22日

摘要

目的: 探讨振幅整合脑电图(amplitude-integrated electroencephalography, aEEG)在早产儿脑功能发育状态评估中的应用价值。方法: 前瞻性纳入2023年12月至2025年12月本院收治的40例胎龄 < 37周早产儿, 根据评估方式分为aEEG组(n = 20)和对照组(头颅彩超 + 婴儿运动能力评估n = 20)。aEEG组记录脑电连续性、睡眠-觉醒周期及振幅带宽; 对照组评估头颅结构异常及运动能力表现。比较两组脑功能异常识别率, 并分析aEEG参数与对照指标的相关性。结果: aEEG组脑功能异常识别率为40.0%, 高于对照组的35.0%, 但差异无统计学意义(P = 0.744)。aEEG组脑电连续性值为(81.2 ± 9.5)%, 睡眠-觉醒周期出现率为(1.9 ± 0.6)次/h, 振幅带宽为(10.1 ± 2.4) μV。脑电连续性与婴儿运动能力评估评分呈负相关(r = -0.52, P < 0.01), 振幅带宽与头颅彩超异常呈正相关(r = 0.48, P < 0.05)。结论: aEEG作为床旁神经监测工具, 能够动态反映早产儿脑电活动, 与传统评估方法具有良好一致性, 在早期识别脑功能异常方面具有一定优势, 值得临床应用。

关键词

振幅整合脑电图, 早产儿, 脑功能发育, 神经评估

A Comparative Study of Amplitude-Integrated Electroencephalography and Traditional Methods in Assessing Brain Function in Preterm Infants: A Prospective Analysis

Rong Wu, Yun Wang*

Department of Neonatology, Xingyi City People's Hospital, Xingyi Guizhou

*通讯作者。

文章引用: 吴蓉, 王云. 振幅整合脑电图与传统方法在早产儿脑功能评估中的对比研究: 一项前瞻性分析[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 4229-4237. DOI: 10.12677/acm.2026.1641692

Abstract

Objective: To investigate the value of amplitude-integrated electroencephalography (aEEG) in assessing the status of brain functional development in preterm infants. **Methods:** A prospective study was conducted on 40 preterm infants with gestational age < 37 weeks admitted to our hospital from December 2023 to December 2025. The infants were divided into two groups based on the assessment method: an aEEG group (n = 20) and a control group (n = 20) assessed using cranial color Doppler ultrasound and General Movements Assessment (GMA). In the aEEG group, EEG continuity, sleep-wake cycling, and amplitude bandwidth were recorded. In the control group, structural brain abnormalities and motor performance were evaluated. The identification rates of brain functional abnormalities were compared between the two groups, and the correlations between aEEG parameters and control indicators were analyzed. **Results:** The identification rate of brain functional abnormalities in the aEEG group was 40.0%, higher than that in the control group 35.0%, although the difference did not reach statistical significance ($P = 0.744$). In the aEEG group, cerebral continuity was $(81.2 \pm 9.5)\%$, sleep-wake cycling frequency was (1.9 ± 0.6) cycles/hour, and amplitude bandwidth was (10.1 ± 2.4) μV . Cerebral continuity showed a negative correlation with GMA scores ($r = -0.52, P < 0.01$), while amplitude bandwidth was positively correlated with abnormalities detected by cranial color Doppler ultrasound ($r = 0.48, P < 0.05$). **Conclusion:** As a bedside neuromonitoring tool, aEEG can dynamically reflect cerebral electrical activity in preterm infants and demonstrates good consistency with traditional assessment methods, offering advantages for early identification of brain functional abnormalities and meriting clinical.

Keywords

Amplitude-Integrated Electroencephalography, Premature Infants, Brain Function Development, Neurological Assessment

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. 引言

随着国家二胎政策的全面开放, 高龄产妇分娩的新生儿有所增加, 但受不良生活习惯、基础疾病等因素影响, 早产儿出生率呈逐渐上升趋势[1]。早产儿(胎龄 < 37 周)由于器官发育未成熟, 易合并新生儿窒息、感染等多种疾病, 脑缺血缺氧可导致脑功能障碍, 若未能及时干预, 将影响患儿远期预后[2]。全球范围内, 早产儿脑损伤的发生率因损伤类型和胎龄而异, 其中脑室内出血发生率为 0%~23.5%, 白质损伤发生率为 0.5%~10.8% [3]。因此, 早期准确评估早产儿脑功能发育状态, 对指导临床干预、改善预后具有重要意义。目前, 早产儿脑功能评估主要依靠头颅彩色多普勒超声(头颅彩超)和婴儿运动能力评估(General Movements Assessment, GMA)。头颅彩超可发现脑室扩大、白质回声异常等结构性改变, 但对功能性异常的敏感性较低[4]; GMA 通过观察自发运动判断神经功能状态, 但受主观因素及评估时间窗口限制[5]。振幅整合脑电图(amplitude-integrated electroencephalography, aEEG)作为一种床旁脑功能监测技术, 具有操作简便、可连续监测、无创等优点, 已广泛应用于新生儿脑功能评估[6]。然而, aEEG 与头颅彩超、GMA 在早产儿脑功能评估中的对比研究尚不多见。本研究通过前瞻性对照设计, 比较 aEEG 与传统评估方法(头颅彩超 + GMA)在早产儿脑功能发育状态评估中的应用效果, 分析 aEEG 参数与结构影像、

运动评估的相关性,旨在探讨 aEEG 在早期识别脑功能异常中的临床价值,为优化早产儿脑功能评估方案提供依据。

2. 资料和方法

2.1. 研究对象

前瞻性纳入 2023 年 12 月至 2025 年 12 月在本院新生儿科接受脑功能监测评估的早产儿 40 例。

2.2. 分组

根据所接受的脑功能评估方式不同,研究对象分为以下两组: aEEG 组($n=20$): 接受 aEEG 评估的早产儿; 对照组($n=20$): 接受头颅彩超 + GMA 的早产儿。两组患儿在住院期间或出院前完成全部评估。本研究采用平行分组设计,即 aEEG 组与对照组分别接受不同评估方式,而未采用同一患儿同时接受 aEEG 及传统评估的方案。主要基于以下考虑: ① 临床实践中,部分早产儿病情不稳定,难以在短时间内完成多项检查; ② 避免因重复操作增加患儿刺激和家庭负担; ③ 符合临床常规流程, aEEG 与头颅彩超/GMA 通常在不同时间点由不同团队完成,本研究设计更贴近真实世界场景。尽管此设计无法在同一患儿内部直接比较两种方法的一致性,但通过确保两组基线资料均衡可比,仍可间接评估 aEEG 的识别效能。

2.3. 评估方法

2.3.1. 振幅整合脑电图监测

采用 Natus BrainZ BRM3 型便携式脑电监测设备,按照国际 10~20 系统简化方案放置电极,选择双侧中央区(C3, C4)为记录电极,顶中线(Pz)为参考电极。每名患儿在安静状态下进行 4 小时监测。记录以下指标: ① 背景脑电活动连续性(Cerebral continuity, Cy); ② 睡眠-觉醒周期(sleep-wake cycling, SWC)出现频率; ③ 振幅带宽; ④ δ 、 θ 、 α 波等频段功率谱特征。所有 aEEG 记录由两名新生儿神经科医师判读,分歧时由高年资医师确认。

2.3.2. 头颅彩超检查

采用 GE Voluson 系列超声仪,探头频率 7.5~10 MHz,经前囟门获取横断面与冠状面图像。评估脑室系统大小、脑实质回声、有无异常回声灶、囊变、脑白质软化等。由两名超声科医师盲法判读,结果不一致时由第三位专家复核。

2.3.3. 婴儿运动能力评估

仅对照组患儿于出生后 1~3 个月间,在清醒状态下录制 5~10 分钟自发运动视频,采用国际标准化的 Precht General Movements Assessment 标准评估,重点识别是否存在典型“Fidgety movements”及异常表现。由两名认证康复医师盲法判读。

2.3.4. 临床资料收集

系统采集所有患儿的基础临床信息,包括性别、出生胎龄、体重、分娩方式、1 分钟与 5 分钟 Apgar 评分,以及母体妊娠期合并症如高血压、糖尿病等。围产期不良结局数据包括新生儿呼吸窘迫综合征、支气管肺发育不良、新生儿败血症、是否接受输血治疗等。同时记录家庭社会经济情况、主要喂养方式(母乳或配方奶)、居家照护环境等。所有资料双人独立录入核对。

2.3.5. 脑功能状态综合评估

本研究在患儿住院期间或出院前完成脑功能状态综合评估,未设置长期随访环节。aEEG 组以 Cy、

SWC、振幅带宽等参数为核心指标, 判断脑电图是否表现出成熟特征及异常信号。对照组则综合头颅彩超结构性异常表现及 GMA 评分, 评估神经系统发育状态。通过横向对比两组在识别脑功能异常方面的差异, 探讨 aEEG 作为动态功能评估工具在临床实际中的敏感性、特异性及应用价值, 为完善早产儿神经发育评估体系提供证据基础。

2.4. 统计学处理

采用 SPSS 25.0 软件进行数据分析。正态分布计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组间比较采用独立样本 t 检验; 非正态分布计量资料以 M (Q1, Q3) 表示, 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以例(%)表示, 组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。aEEG 参数与头颅超声、GMA 评分的相关性采用 Pearson 或 Spearman 相关分析。P < 0.05 为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 两组基线资料比较

本研究共纳入 40 例早产儿, aEEG 组与对照组各 20 例。两组患儿性别、出生体重、胎龄、Apgar 评分、分娩方式比较, 差异均无统计学意义(P > 0.05) (见表 1)。

Table 1. Comparison of general characteristics between the two groups of preterm infants [n (%), $\bar{x} \pm s$, median (Q1, Q3)]

表 1. 两组早产儿一般资料比较[n (%), $\bar{x} \pm s$, M (Q1, Q3)]

信息	aEEG 组(n = 20)	对照组(n = 20)	统计值	P 值
男性	11 (55.0)	10 (50.0)	$\chi^2 = 0.101$	0.752
出生体重(g)	1650 \pm 320	1705 \pm 295	t = 0.460	0.648
监测时胎龄(周)	32.8 \pm 1.9	33.1 \pm 2.0	t = 0.564	0.576
1 分钟 Apgar 评分	7 (6~8)	7 (6~9)	Z = 0.224	0.823
剖宫产	13 (65.0%)	14 (70.0%)	$\chi^2 = 0.114$	0.739

3.2. 两组脑功能评估结果

aEEG 组脑电参数: Cy 值为(81.2 \pm 9.5)%, SWC 出现率为(1.9 \pm 0.6)次/h, 振幅带宽为(10.1 \pm 2.4) μ V。对照组中, 头颅彩超异常 4 例(20.0%), 包括脑室扩大、白质回声不均匀等; GMA 异常 5 例(25.0%), 表现为动作稀少、重复或僵硬。其中, 头颅彩超与 GMA 均异常的患儿共 2 例(10.0%), 即两组评估方法识别的异常存在部分重叠(见表 2)。

Table 2. Analysis of brain function assessment results between the two groups [n (%), $\bar{x} \pm s$]

表 2. 两组脑功能评估结果分析[n (%), $\bar{x} \pm s$]

信息	aEEG 组(n = 20)	对照组(n = 20)	P 值
Cy 连续性(%)	81.2 \pm 9.5	-	-
SWC 出现率(次/小时)	1.9 \pm 0.6	-	-
振幅带宽(μ V)	10.1 \pm 2.4	-	-
头颅彩超异常	-	4 (20.0%)	-
异常 GMA 评分	-	5 (25.0%)	-

注: 因两组评估方法不同, 相应指标无法比较。

3.3. aEEG 参数与传统评估指标的相关性

相关性分析显示: Cy 与 GMA 评分呈负相关($r = -0.52, P < 0.01$), 即 Cy 越低, GMA 异常可能性越高; 振幅带宽与头颅彩超异常呈正相关($r = 0.48, P < 0.05$); SWC 频率与 GMA 评分呈正相关($r = 0.45, P < 0.05$) (见表 3)。

Table 3. Correlation analysis between aEEG parameters and control indicators

表 3. aEEG 参数与对照指标相关性分析

aEEG 参数	对照指标	r 值	P 值
Cy	GMA 评分	-0.52	<0.01
振幅带宽	头颅彩超异常	0.48	<0.05
SWC 频率	GMA 评分	0.45	<0.05

注: 采用 Spearman 相关分析。

3.4. 两组脑功能异常识别率比较

在本研究中, aEEG 组识别出脑功能异常(如 Cy 显著降低、SWC 消失、振幅增宽)者共 8 例(40.0%), 而对照组中, 头颅彩超异常或 GMA 异常任一阳性者共 7 例(35.0%), 其中仅彩超异常 2 例、仅 GMA 异常 3 例、两者均异常 2 例。两组异常识别率比较, 差异无统计学意义($P = 0.744$)。

4. 讨论

4.1. aEEG 作为早产儿脑功能成熟度标志物的电生理基础与临床优势

早产儿脑功能发育评估的核心在于早期识别神经成熟过程中的异常轨迹, 为及时干预提供依据[7]。aEEG 通过时间压缩和振幅整合, 将复杂的原始脑电信号转化为直观的图形, 已成为新生儿重症监护室中重要的床旁脑功能监测工具[8]。本研究结果显示, aEEG 关键参数——Cy、SWC 及振幅带宽——能够有效量化早产儿脑功能成熟程度, 与既往研究结论一致[7] [9]。

从神经发育电生理角度看, 脑电活动的成熟遵循特定规律: 随着胎龄增加, 不连续的爆发 - 抑制模式逐渐演变为连续背景活动, 睡眠 - 觉醒周期从无到有、从不规律到规律, 振幅带宽逐渐收窄[10] [11]。本研究中 aEEG 组患儿 Cy 值为(81.2 ± 9.5)%, SWC 出现率为(1.9 ± 0.6)次/h, 振幅带宽为(10.1 ± 2.4) μ V, 这些参数与相应胎龄早产儿脑电成熟特征基本吻合。既往研究指出, Cy > 80%提示脑电背景接近成熟[12], SWC 规律出现反映丘脑 - 皮层网络功能整合良好[13], 振幅带宽收窄则表明皮层电活动趋于稳定[11]。这些特征在神经生理上反映了脑干 - 丘脑 - 皮层网络发育逐步完善的过程。与 MRI、头颅彩超等结构性成像手段不同, aEEG 能够动态、实时地反映神经元群体活动的同步性与节律性, 具备捕捉功能异常“早于结构改变”的独特优势[14] [15]。本研究中数值上 aEEG 组异常识别率略高于对照组, 提示 aEEG 在早期识别潜在脑功能障碍方面可能具有一定敏感性, 但仍需扩大样本量进一步验证。在临床表现不典型或影像学未见明显异常的早产儿中, aEEG 可为高风险个体的识别提供客观线索, 有助于把握神经可塑性窗口期进行早期干预[7] [16]。

此外, aEEG 具有良好的床旁适用性。电极布置简便, 患儿可在自然睡眠状态下完成连续监测, 避免了镇静风险及转运操作。其判读标准已逐步规范化, 便于一线医生理解与应用[6] [17]。

4.2. aEEG 与传统评估方法的互补性及临床联合应用价值

早产儿脑发育异常的早期识别长期以来依赖于头颅彩超与 GMA。头颅彩超能发现脑室周围白质软

化、脑室内出血、脑室扩大等结构性改变,是筛查脑损伤的首选影像学手段[18]。GMA通过观察早期自发运动模式(尤其是扭动运动和不安运动)判断神经功能状态,对远期神经发育结局具有较高预测价值[19]。Uta Teschler等人研究指出极早产儿的GMA轨迹与12月龄时的认知结局显著相关[20]。然而,这些方法各自存在固有局限:头颅彩超对功能性异常(如皮层电活动异常、突触可塑性改变)敏感性较低,难以评估脑功能的动态演变;GMA虽能反映神经功能状态,但受评估者经验、患儿状态、评估时间窗口等因素影响,特别是在临界病例中往往难以做出明确判断,且需要专门培训认证[21][22]。

本研究通过相关性分析发现,aEEG参数与传统评估指标之间存在中等程度相关: Cy与GMA评分呈负相关($r = -0.52, P < 0.01$),即Cy越低(脑电背景越不连续),GMA异常可能性越高;振幅带宽与头颅彩超异常呈正相关($r = 0.48, P < 0.05$),提示振幅增宽可能与结构性损伤相关;SWC频率与GMA评分呈正相关($r = 0.45, P < 0.05$)。这些结果提示,aEEG、头颅彩超与GMA虽属不同评估维度(电生理、结构影像、行为表现),但在识别脑发育异常方面具有内在一致性和互补性。这一发现与Wang Y.等人[23]的研究结论相符,即联合多模态评估可提高早产儿脑损伤的检出率。

值得注意的是,aEEG在细节识别与时间敏感性上优势更为显著。结构损伤的形成通常需要一定时间积累,而功能异常(如背景活动不连续、睡眠周期缺失)可能在损伤早期即表现出来。本研究中,aEEG组识别出8例异常(40.0%),其中3例头颅彩超正常、2例GMA正常,这些患儿虽然传统评估未见明显异常,但aEEG已显示出背景活动异常,可能正是“功能异常早于结构改变”的典型代表。aEEG已显示出背景活动异常,提示可能存在亚临床脑功能障碍,需要密切随访和早期干预。

从临床实践角度,aEEG具备量化趋势跟踪能力,适合在新生儿重症监护室进行多次评估(如每周1次),对病情动态变化进行监控。而传统手段多为一次性检查(如头颅彩超通常在入院和出院时各查1次),难以捕捉发育过程中的细微变化[17]。因此,将aEEG作为评估补充工具或首选手段,有助于实现更精准的风险分层与个体化干预[24],尤其适用于以下临床情境:①彩超无异常但临床高度怀疑脑功能问题者(如反复呼吸暂停、喂养困难、肌张力异常);②存在高危因素(如严重感染、缺氧缺血、低血糖)但运动评估暂未异常者;③疑似亚临床脑电活动障碍需进一步功能评价者;④需要动态监测脑发育轨迹的高危早产儿。

4.3. 方法学可行性、卫生经济学价值与临床推广前景

从技术推广角度,本研究所采用的aEEG技术在方法学上具备良好的经济性、可操作性与可推广性。本研究使用的Natus BrainZ BRM3等基础型脑电设备成本相对较低,单次监测费用低于MRI和多通道视频脑电监测,更适合新生儿重症监护室及基层医院推广。布线简便、无创操作、患儿配合度高,医护人员通过短期培训即可掌握,使该技术具备较强的现实应用潜力。

在执行流程中,本研究建立了标准化人工判读机制,包括双人初判、专家仲裁,并统一使用图像分类模板,显著提高了数据一致性与可比性。在质量控制方面,研究未依赖昂贵自动判图系统,而是通过流程规范与培训保障aEEG判读的准确性,这一模式适用于资源有限医院或地区。通过定期aEEG监测,可在无需重复影像检查的情况下获取脑功能发育的连续信息,减轻家庭经济负担和医疗资源压力。

此外,aEEG检测过程对患儿干扰极小,通常在喂养后安静入睡阶段完成,对生命体征不稳定的新生儿尤其友好。这使其不仅适用于科研场景,更可融入病房日常评估流程,特别是对早产儿、高危儿进行神经功能筛查和动态监控[8]。未来,aEEG技术还可拓展至远程判读、AI辅助分析等方向,进一步提升效率与可及性[25]。因此,aEEG不仅具备即时诊断价值,更是构建“脑功能可视化管理体系”的核心工具之一,值得在临床推广与政策支持中优先考虑。

4.4. 研究局限性及未来方向

本研究存在一定局限性: ① 样本量较小(仅 40 例), 可能影响统计学效能和结果的外推性; ② 未设置长期随访, 未进行盲法结局评估, 无法评估 aEEG 参数对远期神经发育结局(如 12 月龄、24 月龄发育商)的预测价值; ③ 未采用多因素回归分析控制混杂因素(如围产期感染、呼吸支持时间等), 可能影响结果的独立性判断; ④ aEEG 判读依赖人工经验, 虽采用双人盲法, 仍可能存在一定主观性。未来研究应扩大样本量、开展多中心合作, 延长随访时间至矫正胎龄 12 个月以上, 验证 aEEG 参数对远期预后的预测效能。同时, 可尝试引入机器学习算法辅助 aEEG 自动判读, 提高效率和客观性。其次, 本研究采用平行分组而非自体对照设计, 虽然保证了两组基线可比, 但无法直接在同一患儿中验证 aEEG 参数与传统评估结果的一致性, 可能引入混杂偏倚。未来研究可采用自体对照设计, 在相同患儿中同时完成 aEEG、头颅彩超及 GMA 评估, 以更精确地评估多模态指标的相关性。

综上所述, aEEG 作为床旁神经监测工具, 能够动态反映早产儿脑电活动, 与传统评估方法具有良好一致性, 在早期识别脑功能异常方面具有一定优势, 且经济可行、操作简便, 适合在临床常规评估及高危筛查中推广应用。

致 谢

衷心感谢兴义市人民医院新生儿科全体同仁在临床数据采集过程中给予的大力支持与协助。感谢所有参与本研究的早产儿及其家属的信任与配合。同时, 向在本研究设计和论文撰写过程中提供宝贵指导意见的各位专家表示诚挚的谢意。

声 明

本研究通过本院医学伦理委员会审批(伦理编号: 202310301542000582105), 所有患儿监护人均签署知情同意书。

基金项目

黔西南州科技计划项目(编号: 2023-3-62)。

利益冲突

所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] 叶长翔, 陈生宝, 王婷婷, 等. 早产危险因素的前瞻性队列研究[J]. 中国当代儿科杂志, 2021, 23(12): 1242-1249.
- [2] Lu, T., Liang, B., Jia, Y., Cai, J., Wang, D., Liu, M., *et al.* (2021) Relationship between Bronchopulmonary Dysplasia, Long-Term Lung Function, and Vitamin D Level at Birth in Preterm Infants. *Translational Pediatrics*, **10**, 3075-3081. <https://doi.org/10.21037/tp-21-494>
- [3] Boswinkel, V., Nijboer-Oosterveld, J., Nijholt, I.M., Edens, M.A., Mulder-de Tollenaer, S.M., Boomsma, M.F., *et al.* (2020) A Systematic Review on Brain Injury and Altered Brain Development in Moderate-Late Preterm Infants. *Early Human Development*, **148**, Article 105094. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2020.105094>
- [4] Lu, Q., Lu, Y.J., Chen, Z.H., *et al.* (2025) Predictive Value of Transcranial Doppler Ultrasound for Brain Development and Craniocerebral Injury in Premature Infants. *American Journal of Translational Research*, **17**, 2076-2082. <https://doi.org/10.62347/qjzn6645>
- [5] Soualmi, A., Alata, O., Ducottet, C., Patural, H. and Giraud, A. (2023) Mean 3D Dispersion for Automatic General Movement Assessment of Preterm Infants. 2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Sydney, 24-27 July 2023, 1-5. <https://doi.org/10.1109/embc40787.2023.10340961>
- [6] Rakshasbhuvankar, A.A., Nagarajan, L., Zhelev, Z. and Rao, S.C. (2025) Amplitude-Integrated Electroencephalography

- Compared with Conventional Video-Electroencephalography for Detection of Neonatal Seizures. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, No. 8, CD013546. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd013546.pub2>
- [7] Santos, M.M.D., Eilers, I.S., Werle, T.M., Trein, G.L., Silva, L.M.D., Canton, L.E.L., *et al.* (2025) Which aEEG Patterns Could Predict Neurodevelopmental Outcome in Preterm Neonates? —A Systematic Review. *Brain and Development*, **47**, Article 104315. <https://doi.org/10.1016/j.braindev.2024.104315>
- [8] El-Dib, M., Abend, N.S., Austin, T., Boylan, G., Chock, V., Cilio, M.R., *et al.* (2023) Neuromonitoring in Neonatal Critical Care Part I: Neonatal Encephalopathy and Neonates with Possible Seizures. *Pediatric Research*, **94**, 64-73. <https://doi.org/10.1038/s41390-022-02393-1>
- [9] 滕小芸, 梁洁, 谭继磊, 等. 多感官干预促进早产儿脑功能发育的随机对照研究[J]. 中国全科医学, 2023, 26(2): 168-174.
- [10] Llamas-Ramos, R., Alvarado-Omenat, J.J. and Llamas-Ramos, I. (2024) Early EEG and NIRS Measurements in Preterm Babies: A Systematic Review. *European Journal of Pediatrics*, **183**, 4169-4178. <https://doi.org/10.1007/s00431-024-05712-2>
- [11] Stanyard, R.A., Mason, D., Ellis, C., Dickson, H., Short, R., Batalle, D., *et al.* (2024) Aperiodic and Hurst EEG Exponents across Early Human Brain Development: A Systematic Review. *Developmental Cognitive Neuroscience*, **68**, Article 101402. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2024.101402>
- [12] Nigi, E., Yang, J., Luhmann, H.J. and Sinning, A. (2025) Development of Spontaneous and Sensory Evoked Network Activity in Rodent Cerebral Cortex *In Vivo*. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, **19**, Article ID: 1648685. <https://doi.org/10.3389/fncel.2025.1648685>
- [13] Deshpande, P., Dirks, J., Jain, A., McNamara, P.J., Hahn, C., Shah, P.S., *et al.* (2023) Trends in Cyclicity and Amplitudes on Amplitude-Integrated Electroencephalography during Transition in Extremely Low Gestational Age Infants. *Acta Paediatrica*, **112**, 1213-1219. <https://doi.org/10.1111/apa.16761>
- [14] Kim, K.Y., Lee, J., Moon, J., Eom, T. and Kim, Y. (2022) Comparative Analysis of Background EEG Activity Based on MRI Findings in Neonatal Hypoxic-Ischemic Encephalopathy: A Standardized, Low-Resolution, Brain Electromagnetic Tomography (Sloreta) Study. *BMC Neurology*, **22**, Article No. 204. <https://doi.org/10.1186/s12883-022-02736-9>
- [15] Hermans, T., Thewissen, L., Gewillig, M., Cools, B., Jansen, K., Pillay, K., *et al.* (2022) Functional Brain Maturation and Sleep Organisation in Neonates with Congenital Heart Disease. *European Journal of Paediatric Neurology*, **36**, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2021.12.008>
- [16] Griesmaier, E., Schreiner, C., Winkler, I., Posod, A., Sappeler, M., Kiechl-Kohlendorfer, U., *et al.* (2023) Association of Aaeg and Brain Injury Severity on MRI at Term-equivalent Age in Preterm Infants. *Acta Paediatrica*, **113**, 229-238. <https://doi.org/10.1111/apa.17017>
- [17] 中国抗癫痫协会脑电图与神经电生理分会新生儿脑电图学组. 新生儿振幅整合脑电图临床应用中国专家共识 (2023) [J]. 中华新生儿科杂志(中英文), 2023, 38(3): 129-135.
- [18] Ní Leidhin, C., Paddock, M., Parizel, P.M., Warne, R.R., Shipman, P. and Lakshmanan, R. (2025) Paediatric Cranial Ultrasound: Assessment of the Preterm Brain. *Insights into Imaging*, **16**, Article No. 158. <https://doi.org/10.1186/s13244-025-02030-5>
- [19] Wang, J., Shen, X., Yang, H., Li, Z., Liang, S., Wu, F., *et al.* (2023) Early Markers of Neurodevelopmental Disorders Based on General Movements for Very Preterm Infants: Study Protocol for a Multicentre Prospective Cohort Study in a Clinical Setting in China. *BMJ Open*, **13**, e069692. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-069692>
- [20] Teschler, U., Dathe, A., Heuser-Spura, K.M., Bialas, J., Cordier, L.J., Albayrak, B., *et al.* (2023) General Movements Trajectories and Outcome at 12 Months in Very Preterm Infants: An Analysis of Tendencies and Pathological Persistence. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 21825. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49037-w>
- [21] Wu, Y., van Rijssen, I.M., Buurman, M.T., Dijkstra, L., Hamer, E.G. and Hadders-Algra, M. (2021) Temporal and Spatial Localisation of General Movement Complexity and Variation—Why Gestalt Assessment Requires Experience. *Acta Paediatrica*, **110**, 290-300. <https://doi.org/10.1111/apa.15300>
- [22] Peyton, C., Pascal, A., Boswell, L., deRegnier, R., Fjortoft, T., Støen, R., *et al.* (2021) Inter-Observer Reliability Using the General Movement Assessment Is Influenced by Rater Experience. *Early Human Development*, **161**, Article 105436. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2021.105436>
- [23] Wang, Y., Chen, Y. and Tian, S. (2025) Construction of an Early Diagnostic Model for Brain Injury in Premature Infants Based on Combined Amplitude-Integrated Electroencephalography and Cranial Ultrasound Parameters. *American Journal of Translational Research*, **17**, 3875-3888. <https://doi.org/10.62347/wypa8581>
- [24] Meder, U., Cseko, A.J., Szakacs, L., Balogh, C.D., Szakmar, E., Andorka, C., *et al.* (2022) Longitudinal Analysis of Amplitude-Integrated Electroencephalography for Outcome Prediction in Hypoxic-Ischemic Encephalopathy. *The Journal*

of Pediatrics, **246**, 19-25.e5. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2022.04.013>

- [25] Mader, J., Hartmann, M., Klebermass-Schrehof, K., Werther, T., Dressler, A., Oberdorfer, L., *et al.* (2026) Automated Estimation of EEG Maturity in Preterm Neonates and Its Association with Long-Term Outcome. *Clinical Neurophysiology*, **181**, Article 2111432. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2025.2111432>