

doi:10.3969/j.issn.1005-3697.2026.02.022

✦ 临床医学研究 ✦

经颅多普勒超声血流显像联合 aEEG 参数预测急性脑卒中预后的效能

王子懿

(首都医科大学附属北京积水潭医院神经内科脑电图室,北京 100020)

【摘要】目的: 探讨经颅多普勒超声血流显像(TCD-FI)联合振幅整合脑电图(aEEG)参数预测急性脑卒中预后的效能。**方法:** 选取 121 例急性脑卒中患者资料,依据改良 Rankin 评分(mRS)评估预后,mRS 评分 <2 分设为预后良好组($n=87$),mRS 评分 ≥ 2 分设为预后不良组($n=34$)。比较两组患者一般资料、TCD-FI 脑血流动力学参数[收缩期峰值血流速度(V_s)、舒张末期血流速度(V_d)、阻力指数(RI)]、aEEG 脑电活动(上、下边界电压);受试者工作特征(ROC)曲线分析 TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后的预测效能;Pearson 相关系数分析各参数与 mRS 评分的相关性。**结果:** 两组患者年龄、梗死面积、血管狭窄程度比较,差异有统计学意义($P<0.05$)。预后不良组患者 V_s 、 V_d 及上、下边界电压低于预后良好组,RI 高于预后良好组($P<0.05$)。ROC 曲线分析显示,TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后预测效能的曲线下面积(AUC)为 0.873,敏感度为 52.94%,特异度为 100%。相关性分析显示, V_s 、 V_d 及上、下边界电压均与 mRS 评分负相关($P<0.05$),RI 与 mRS 评分正相关($P<0.05$)。**结论:** TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后预测效能高,可为临床治疗提供参考。

【关键词】 经颅多普勒超声血流显像;振幅整合脑电图;急性脑卒中;预后

【中图分类号】 R743.3 **【文献标志码】** A

Efficiency of transcranial Doppler ultrasound flow imaging combined with aEEG parameters on predicting the prognosis of acute stroke

WANG Zi-yi

(Electroencephalogram Room, Department of Neurology, Beijing Jishuitan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100020, China)

【Abstract】Objective: To explore the efficiency of transcranial Doppler ultrasound flow imaging (TCD-FI) combined with amplitude integrated electroencephalogram (aEEG) parameters on predicting the prognosis of acute stroke. **Methods:** The data of 121 patients with acute stroke were retrospectively analyzed. The prognosis was evaluated by modified Rankin score (mRS). Patients whose mRS score was less than 2 points were incorporated into good prognosis group ($n=87$), and patients with mRS score ≥ 2 points were enrolled as poor prognosis group ($n=34$). The general data, TCD-FI cerebral hemodynamic parameters [peak systolic blood flow velocity (V_s), end-diastolic blood flow velocity (V_d), resistance index (RI)] and aEEG brain electrical activity (upper and lower boundary voltages) were compared between the two groups. Receiver operating characteristic (ROC) curve was utilized to analyze the predictive efficiency of TCD-FI combined with aEEG parameters on the prognosis of acute stroke. Pearson correlation analysis was used to analyze the correlation between each parameter and mRS score. **Results:** Statistical differences were found in age, infarction size and vascular stenosis degree between the two groups ($P<0.05$). The V_s , V_d , upper boundary voltage and lower boundary voltage in poor prognosis group were lower than those in good prognosis group while the RI was higher compared to good prognosis group ($P<0.05$). ROC curve analysis revealed that the area under the curve (AUC), sensitivity and specificity of TCD-FI combined with aEEG parameters were 0.873, 52.94% and 100%. Correlation analysis showed that V_s , V_d , upper boundary voltage and lower boundary voltage all exhibited negative correlations with mRS score ($P<0.05$), and RI showed a positive correlation with mRS score ($P<0.05$). **Conclusion:** TCD-FI combined with aEEG parameters has high predictive efficiency on prognosis of acute stroke, and it can provide reference for clinical treatment.

【Key words】 Transcranial Doppler ultrasound flow imaging; Amplitude integrated electroencephalogram; Acute stroke; Prognosis

基金项目: 首都医科大学附属北京积水潭医院临床研究计划项目(LC202502)

作者简介: 王子懿(1991-),女,初级技师。E-mail:15501051150@163.com

急性脑卒中是常见且严重威胁人类健康的脑血管病,发病率在全球范围内逐年升高,使社会和家庭的负担不断加重。急性脑卒中主要分为缺血性脑卒中和出血性脑卒中两类,前者因脑血管堵塞致脑组织缺血坏死所致,后者由脑血管破裂出血压迫损伤周围脑组织所致,两类脑卒中均有高致残率与死亡率^[1]。大量患者即使经救治存活,也常遗留肢体运动、语言表达、认知等功能障碍,严重降低生活质量,阻碍其回归正常社会生活^[2]。早期精准判断患者的预后情况,能为患者规划出更具合理性与个性化特征的治疗方案,选择适宜的康复介入时机和手段,进而提升患者生存质量,减少致残与死亡风险。经颅多普勒超声血流显像(TCD-FI)凭借无创的检测特性,能精确检测脑血流动力学参数,直观反映脑血管的功能状态,包括血管是否存在狭窄或闭塞等异常情况,为临床医生评估脑血流灌注提供重要依据^[3]。振幅整合脑电图(aEEG)则用直观的手段对脑电图的活动状态予以记录,通过上、下边界电压等参数,清晰呈现脑功能的变化^[4]。部分研究单独运用经颅多普勒超声(TCD)评估急性缺血性卒中责任血管及脑血流量;也有利用常规脑电图(EEG)、定量脑电图(QEEG)等脑电指标评估缺血性脑卒中预后,但将 TCD-FI 联合 aEEG 参数用于预测急性脑卒中预后的研究较少。本研究旨在探讨 TCD-FI 联合 aEEG 参数预测急性脑卒中预后的效能。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2022 年 12 月至 2023 年 12 月首都医科大学附属北京积水潭医院收治的 121 例急性脑卒中患者为研究对象,依据预后不同分为预后良好组($n=87$)和预后不良组($n=34$)。本研究经医院医学伦理委员会审批。纳入标准:(1)契合急性脑卒中的诊断准则^[5],并通过头颅 CT 或 MRI 检查得以确诊;(2)从发病至入院时长在 72 h 以内;(3)均为急性缺血性脑卒中;(4)均行静脉溶栓治疗。排除标准:(1)伴随心脏等的严重功能失常;(2)既往有脑部器质性病变;(3)患有精神类疾病;(4)曾有脑部肿瘤病史。

1.2 方法

1.2.1 预后判定标准 采用改良 Rankin 评分(mRS 评分)^[6]评估。分值为 0~6 分,其中 0 分为完全无症状;1 分为患者存在一定症状,但未出现明显功能障碍,能够正常进行各项日常活动;2 分为患者有轻度残疾状况,无法像患病前一样完成所有活动,能自理日常事务;3 分为有中度残疾,需一定帮助,但能够独立行走;4 分为处于重度残疾状态,患

者丧失独立行走功能,日常活动都得依靠他人协助;5 分为极重度残疾,患者卧床,存在大小便失禁情况,需持续照料;6 分为患者死亡。mRS 评分 <2 分为预后良好,mRS 评分 ≥ 2 分为预后不良。

1.2.2 TCD-FI 检测 采用 TCD-FI 诊断仪(德国 DWL 公司)检测,探头频率为 2 MHz。脑血流动力学参数包括大脑中动脉收缩期峰值血流速度(V_s)、舒张末期血流速度(V_d)及阻力指数(RI)。

1.2.3 aEEG 监测 采用 NicoletOne 脑电监护仪进行,按照国际 10~20 系统标准,选择双极导联组合(如 P3-O1 和 P4-O2),电极间阻抗控制 $<5\text{ k}\Omega$,滤波范围 0.5~30 Hz。入院后 24 h 内启动监测,连续记录 $\geq 72\text{ h}$,选择生命体征平稳(血压波动 $\leq 20\%$ 基础值)、无临床事件(抽搐/躁动)的连续 2 h 数据进行分析,从 aEEG 图像获取上边界电压、下边界电压。

1.3 观察指标

(1)一般资料收集:包括患者性别、年龄、体质量指数(BMI)、血压、吸烟史、酗酒史、糖尿病病史、高血压病史、卒中种类、梗死面积、血管狭窄程度等。(2)TCD-FI 参数:包括 V_s 、 V_d 、RI。(3)aEEG 参数:包括上边界电压及下边界电压。(4)TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后的预测效能。(5)TCD-FI 及 aEEG 参数与 mRS 评分的相关性。

1.4 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行处理与分析。计量资料符合正态分布且方差齐性,以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示,组间比较行独立样本 t 检验;计数资料以 $[n(\%)]$ 表示,组间比较行独立样本 χ^2 检验;预测效能采用受试者工作特征(ROC)分析;相关性采用 Pearson 相关系数分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者一般资料比较

两组年龄、梗死面积、血管狭窄程度比较,差异有统计学意义($P < 0.05$);其他资料比较,差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表 1。

2.2 两组患者 TCD-FI 参数比较

预后不良组患 V_s 及 V_d 低于预后良好组;RI 高于预后良好组,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。见表 2。

2.3 两组患者 aEEG 参数比较

预后不良组患者上边界电压及下边界电压低于预后良好组,差异有统计学意义($P < 0.05$)。见表 3。

表 1 两组患者一般资料比较 $[\bar{x} \pm s, n(\%)]$

资料	预后不良组($n=34$)	预后良好组($n=87$)	t/χ^2 值	P 值
年龄(岁)	68.56±7.34	62.12±6.89	4.537	<0.001
性别			0.005	0.944
男	19(55.88)	48(55.17)		
女	15(44.12)	39(44.83)		
BMI(kg/m ²)	25.32±2.15	24.87±2.36	0.966	0.336
吸烟史	12(35.29)	27(31.03)	0.203	0.652
酗酒史	8(23.53)	16(18.39)	0.406	0.524
高血压病史	22(64.71)	49(56.32)	0.709	0.400
糖尿病病史	14(41.18)	28(32.18)	0.872	0.350
收缩压(mmHg)	142.34±15.23	140.12±16.34	0.684	0.495
舒张压(mmHg)	85.45±8.67	83.21±9.12	1.231	0.221
卒中种类			0.041	0.840
大动脉粥样硬化性	26(76.47)	65(74.71)		
心源性卒中	8(23.53)	22(25.29)		
梗死面积(cm ²)	13.25±1.12	14.35±1.89	3.178	0.002
血管狭窄程度(%)	65.34±10.23	51.99±9.56	6.770	<0.001

表 2 两组患者 TCD-FI 参数比较 $(\bar{x} \pm s)$

组别	Vs(cm/s)	Vd(cm/s)	RI
预后不良组($n=34$)	72.56±10.23	38.21±5.89	0.53±0.08
预后良好组($n=87$)	85.67±12.34	45.32±6.54	0.47±0.06
t 值	5.497	5.522	4.483
P 值	<0.001	<0.001	<0.001

表 3 两组患者 aEEG 参数比较 $(\bar{x} \pm s, \mu V)$

组别	上边界电压	下边界电压
预后不良组($n=34$)	42.34±8.65	11.34±2.89
预后良好组($n=87$)	53.43±8.21	12.67±3.21
t 值	6.579	2.105
P 值	<0.001	0.037

2.4 TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后的预测效能

TCD-FI 联合 aEEG 参数预测急性脑卒中预后不良的曲线下面积(AUC)为 0.873, 敏感度为 52.94%, 特异度为 100%。见图 1 及表 4。

2.5 TCD-FI 及 aEEG 参数与 mRS 评分的相关性

相关性分析显示, Vs、Vd、上边界电压、下边界电压与 mRS 评分均呈负相关关系($P<0.05$); RI 与 mRS 评分正相关($P<0.05$)。见表 5。

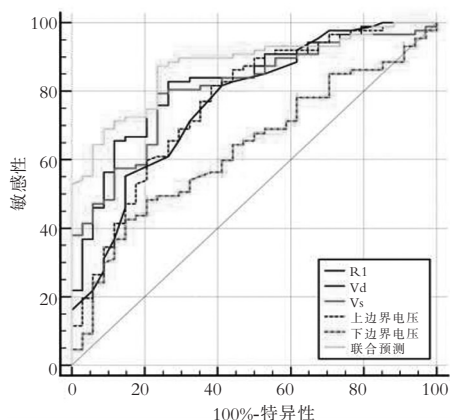


图 1 TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后预测效能的 ROC 曲线

表 4 TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后的预测效能

指标	AUC 值	95%CI	敏感度(%)	特异度(%)	截断值
RI	0.765	0.679~0.837	55.17	85.29	0.47
Vd	0.824	0.745~0.887	82.76	73.53	39.99 cm/s
Vs	0.806	0.725~0.872	79.31	76.47	79.87 cm/s
上边界电压	0.766	0.680~0.838	81.61	61.76	45.33 μV
下边界电压	0.632	0.540~0.718	42.53	85.29	13.27 μV
联合预测	0.873	0.800~0.927	52.94	100	—

表 5 TCD-FI 及 aEEG 参数与 mRS 评分的相关性

参数	r 值	95%CI	P 值
RI	0.523	0.362~0.594	<0.001
Vd	-0.587	-0.639~-0.335	<0.001
Vs	-0.502	-0.653~-0.351	<0.001
上边界电压	-0.538	-0.677~-0.388	<0.001
下边界电压	-0.361	-0.598~-0.275	<0.05

3 讨论

急性缺血性脑卒中由脑部血管阻塞致局部脑组织缺血缺氧引发^[7]。血管阻塞后, 脑细胞缺葡萄糖和氧气, ATP 生成剧减, 神经细胞膜电位失衡, 谷氨酸大量释放产生兴奋性毒性, 钙离子内流, 触发细胞凋亡等。同时, 线粒体钙超载产自由基, 损伤细胞结构, 激活炎症反应, 破坏血脑屏障, 加重神经损伤^[8]。

急性脑卒中预后情况与患者本身健康状况等多种因素相关^[9-10]。本研究结果显示, 两组患者年龄、梗死面积及血管狭窄程度比较, 差异有统计学意义($P<0.05$), 表明年龄越大、梗死面积越大、血管狭窄程度越严重患者的预后情况越差。高龄患者机体修复能力减退, 常合并心肺功能下降等基础问题, 影响脑血流灌注与神经功能修复, 且对卒中中相关并发症(如感染、脑水肿)耐受力更差; 大面积梗死直接造成大量神经元坏死, 运动、语言、认知等功能区损伤更严重, 且易引发脑水肿、颅内压升高等危及生命的并发症, 神经功能代偿恢复难度显著增加; 严重血管狭窄导致脑组织长期低灌注, 缺血半暗带难以逆转, 还易因斑块脱落或血流动力学改变再次梗死, 形成恶性循环, 加重脑损伤, 最终导致预后不良。

随着超声和脑电图等技术的进步, TCD-FI 和 aEEG 逐渐成为评估急性脑卒中预后的重要工具。本研究中, 预后不良组患者 Vs、Vd 低于预后良好组($P<0.05$); RI 高于预后良好组($P<0.05$); 上边界电压、下边界电压低于预后良好组($P<0.05$), 提示急性脑卒中患者预后不良时, 脑血流灌注不足且血管阻力增加, 脑电活动受到抑制, 脑功能受损更为严重。研究表明, EEG 参数的超急性变化和低灌注组织的程度存在紧密联系, 突出了定量 EEG 作为评估

中风严重程度的可能补充工具的价值^[11]。粥样硬化斑块不断堆积,使血管内径变窄,血液流经此处时,根据流体力学原理,流速必然降低,所以 V_s 、 V_d 下降。同时,狭窄的血管和血管壁因病变失去弹性,导致血管阻力增大,RI 升高。而低灌注状态下,缺血半暗带内的细胞因得不到充足的氧和营养物质, $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ 泵功能障碍,细胞内 Na^+ 、 Cl^- 和水滞留,引发细胞毒性脑水肿,进一步压迫周围微血管,加重血流不畅^[12-13]。脑血流灌注不足致使神经元能量代谢障碍,ATP 生成急剧减少,无法维持正常的离子平衡,在细胞膜发生去极化的过程中,诸如谷氨酸之类的大量兴奋性神经递质会得以释放。过度激活的谷氨酸受体使 Ca^{2+} 大量内流,引发一系列级联反应,导致线粒体功能受损,过量自由基生成并对细胞内蛋白质、脂质、DNA 进行攻击,导致神经元的结构被破坏,功能出现异常,使得脑电活动受到强烈抑制,上下边界电压降低^[14-16]。ROC 曲线分析显示,TCD-FI 联合 aEEG 参数预测急性脑卒中预后不良的 AUC 为 0.873,敏感度为 52.94%,特异度为 100%,具有较高的预测效能。相关性分析显示, V_s 、 V_d 、上边界电压、下边界电压与 mRS 评分均呈负相关关系 ($P < 0.05$); RI 与 mRS 评分呈正相关 ($P < 0.05$),进一步证实了 TCD-FI 和 aEEG 参数与急性脑卒中预后密切相关。Shahid 等^[17] 研究也显示,脑电图明显减慢与不良预后相关,且可以预测中风患者的预后情况。

综上,TCD-FI 联合 aEEG 参数对急性脑卒中预后具有较高的预测效能,能够给临床治疗方案的规划供应参考支撑。本研究性质为回顾性剖析,所选取的样本数量偏少,且均来自单一机构,未来还需要开展前瞻性、大样本的研究进一步验证。

参考文献

[1] Alsbrook DL, Di Napoli M, Bhatia K, *et al.* Neuroinflammation in acute ischemic and hemorrhagic stroke[J]. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 2023, 23(8): 407-431.

[2] Toyoda K, Yoshimura S, Nakai M, *et al.* Twenty-year change in severity and outcome of ischemic and hemorrhagic strokes [J]. *JAMA Neurology*, 2022, 79(1): 61-69.

[3] Jarrett CL, Shields KL, Broxterman RM, *et al.* Imaging transcranial Doppler ultrasound to measure middle cerebral artery blood flow: the importance of measuring vessel diameter [J]. *American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2020, 319(1): R33-R42.

[4] Dilela R, Raviglione F, Cantalupo G, *et al.* Consensus protocol for

EEG and amplitude-integrated EEG assessment and monitoring in neonates[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2021, 132(4): 886-903.

- [5] Liu L, Chen W, Zhou H, *et al.* Chinese Stroke Association guidelines for clinical management of cerebrovascular disorders: executive summary and 2019 update of clinical management of ischaemic cerebrovascular diseases [J]. *Stroke and Vascular Neurology*, 2020, 5(2): 159-176.
- [6] Preszler M, Smith L, Newton J, *et al.* The relationship of modified rankin score and risk factors with stroke mortality in the south Dakota native American population: a descriptive study[J]. *South Dakota Medicine*, 2023, 76(6): 258-266.
- [7] 任毅, 王程晓, 杨立波. 机械血栓切除术治疗前后循环急性大血管闭塞性缺血性卒中患者的效果及预后的影响因素[J]. *中国实用神经疾病杂志*, 2024, 27(9): 1088-1092.
- [8] Li C, Xing Y, Zhang Y, *et al.* Neutrophil extracellular traps exacerbate ischemic brain damage [J]. *Molecular Neurobiology*, 2022, 59(1): 643-656.
- [9] Roberts B, Makar AE, Canaan R, *et al.* Effect of occipitotantal decompression on cerebral blood flow dynamics as evaluated by Doppler ultrasonography [J]. *Journal of Osteopathic Medicine*, 2021, 121(2): 171-179.
- [10] Meder U, Cseko AJ, Szakacs L, *et al.* Longitudinal analysis of amplitude-integrated electroencephalography for outcome prediction in hypoxic-ischemic encephalopathy [J]. *The Journal of Pediatrics*, 2022, 246: 19-25.
- [11] Ajčević M, Furlan G, Miladinović A, *et al.* Early EEG alterations correlate with CTP hypoperfused volumes and neurological deficit: a wireless EEG study in hyper-acute ischemic stroke [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2021, 49(9): 2150-2158.
- [12] Dickey AS, Mitsias PD, Olango WM, *et al.* The prognostic value of quantitative EEG in patients undergoing mechanical thrombectomy for acute ischemic stroke [J]. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2022, 39(4): 276-282.
- [13] 潘梦雄, 闵晶晶, 沈旭峰, 等. 术前 D-二聚体水平对急性大血管闭塞性缺血性脑卒中血管内治疗预后的预测价值分析 [J]. *现代实用医学*, 2024, 36(12): 1591-1594.
- [14] Fleseriu CM, Sultan I, Brown JA, *et al.* Role of intraoperative neurophysiological monitoring in preventing stroke after cardiac surgery [J]. *The Annals of Thoracic Surgery*, 2023, 116(3): 623-629.
- [15] 陈光, 付森. 急性缺血性脑卒中患者脑血管储备功能与其急诊治疗结局相关性分析 [J]. *陕西医学杂志*, 2023, 52(1): 53-56.
- [16] 赵颖, 刘甜, 巩雯, 等. 急性缺血性脑卒中患者血清 LRRK2、CHI3L1 水平与神经缺损程度及预后的关系 [J]. *保健医学研究与实践*, 2024, 21(12): 39-44.
- [17] Shahid R, Zafar A, Nazish S, *et al.* The relative impact of clinical and investigational factors to predict the outcome in stroke patients [J]. *Annals of African Medicine*, 2024, 23(4): 548-555.

(收稿日期: 2025-07-02

修回日期: 2025-09-13)