

经颅多普勒超声评估颈内动脉颅外段重度狭窄或闭塞大脑后动脉分级代偿的应用研究

张珏堃, 钟经馨, 张昌林, 莫秀云

摘要: **目的** 目前有关颈内动脉重度狭窄或闭塞患者大脑后动脉(PCA)代偿的血流动力学研究有限,本研究旨在探究经颅多普勒超声(TCD)对评估单侧颈内动脉颅外段重度狭窄或闭塞后 PCA 代偿的应用价值。**方法** 回顾性连续性纳入 2022 年 1 月—2025 年 2 月于广东省中医院脑病中心符合单侧颈内动脉颅外段重度狭窄或闭塞的住院患者 107 例,所有患者均接受数字减影血管造影(DSA)和 TCD 检查,根据 DSA 对 PCA 代偿情况进行分组,分析 TCD 分级代偿量化参数及受试者工作特征曲线(ROC)。**结果** 107 例患者中,PCA 参与代偿组 75 例(70.1%),未代偿组 32 例(29.9%)。TCD 评估 PCA 代偿,最佳截断值为 P1 段平均流速 ≥ 65 cm/s,曲线下面积(AUC)为 0.869 (95%CI 0.785~0.953),敏感度 78.7%,特异度 84.4%,约登指数 0.630。与未代偿组比较,代偿组收缩期峰值流速、舒张末期流速和平均流速均升高($P<0.01$),血管搏动指数则减低($P<0.05$),差异有统计学意义。PCA 分级代偿情况:单纯后交通动脉代偿 57.3% (43/75),单纯由 PCA 软脑膜侧支代偿 16.0% (12/75),两种代偿模式同时存在 36.7% (20/75)。PCA-P1 段舒张末期流速 ≥ 48 cm/s 是评估后交通动脉开放的最佳截断值,AUC 为 0.813 (95%CI 0.726~0.900),敏感度 76.2%,特异度 79.5%,约登指数 0.557;评估 PCA 软脑膜侧支代偿,最佳截断值为 P2 段 MV ≥ 60 cm/s,AUC 为 0.824 (95%CI 0.723~0.925),敏感度为 71.5%、特异度为 90.7%,约登指数 0.625。**结论** 本研究针对单侧颈内动脉颅外段重度狭窄或闭塞患者,首次对 PCA 代偿模式进行血流动力学分层研究,应用 PCA-P1 段及 PCA-P2 段的血流量化指标评估 PCA 代偿,与 DSA 有较高的一致性,能可靠评估后交通动脉开放及 PCA 软脑膜侧支的代偿情况。

关键词: 颈内动脉重度狭窄或闭塞; 经颅多普勒超声; 侧支循环; 大脑后动脉

中图分类号:R445.1

文献标识码:A

Application of transcranial Doppler in evaluating graded compensation of the posterior cerebral artery in patients with severe stenosis or occlusion of the extracranial internal carotid artery ZHANG Juekun, ZHONG Jingxin, ZHANG Changlin, et al. (Department of Encephalopathy and Functional Neurology, Guangdong Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510120, China)

Abstract: **Objective** There are currently limited studies on the hemodynamics of posterior cerebral artery (PCA) compensation in patients with severe stenosis or occlusion of the internal carotid artery (ICA), and this study aims to investigate the application value of transcranial Doppler (TCD) in assessing PCA compensation after severe stenosis or occlusion of the unilateral extracranial ICA. **Methods** A retrospective analysis was performed for 107 patients who were hospitalized in Encephalopathy Center, Guangdong Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, from January 2022 to February 2025 and met the diagnostic criteria for severe stenosis or occlusion of the unilateral extracranial ICA, and all patients underwent both digital subtraction angiography (DSA) and TCD. The patients were divided into groups based on PCA compensation on DSA, and TCD quantitative parameters were analyzed. The receiver operating characteristic (ROC) curve was plotted to investigate the value of TCD in assessing graded compensation of the PCA. **Results** Among the 107 patients, there were 75 patients (70.1%) in the compensation group and 32 patients (29.9%) in the non-compensation group. The optimal cut-off value of TCD in assessing PCA compensation was a mean velocity of ≥ 65 cm/s at the PCA P1 segment, with an area under the ROC curve (AUC) of 0.869 (95% CI 0.785–0.953), a sensitivity of 78.7%, a specificity of 84.4%, and a Youden index of 0.630. Compared with the non-compensation group, the compensation group had significant increases in peak systolic velocity, end-diastolic velocity, and mean velocity ($P<0.01$) and a significant reduction in pulsatility index ($P<0.05$). As for the graded compensation of the PCA, the patients with posterior communicating artery (PCoA) compensation alone accounted for 57.3% (43/75), those with leptomeningeal collateral compensation of the PCA alone accounted for 16.0% (12/75), and those with both patterns of compensation accounted for 36.7% (20/75). An end-diastolic velocity of ≥ 48 cm/s at the PCA P1 segment was the optimal cut-off value for assessing PCoA compensation, with an AUC of 0.813 (95%CI 0.726–0.900), a sensitivity of 76.2%, a specificity of 79.5%, and a Youden index of 0.557; a mean velocity of ≥ 60 cm/s at the PCA P2 segment was the optimal cut-off value for assessing leptomeningeal collateral compensation of the PCA, with an AUC of 0.824 (95%CI 0.723–0.925), a sensitivity of 71.5%, a specificity of 90.7%, and a Youden index of 0.625. **Conclusion** This study conducts a hemodynamic stratification analysis on compensation patterns of the PCA in patients with severe stenosis or occlusion of the unilateral extracranial ICA. Quantitative blood flow indicators at the PCA-P1 and PCA-P2 segments are highly consistent with DSA in assessing PCA compensation and can reliably evaluate the compensation status of the PCoA and the leptomeningeal collaterals.

Key words: Severe stenosis or occlusion of the internal carotid artery; Transcranial Doppler; Collateral circulation; Posterior cerebral artery

收稿日期:2025-09-10;修订日期:2025-11-01

基金项目:国家中医药管理局高水平中医药重点学科建设项目(zyyzdxk-2023154);广东省中医急症研究重点实验室(2023B1212060062)

作者单位:(广东省中医院,广东 广州 510120)

通信作者:莫秀云,E-mail:windmxy@163.com

缺血性脑卒中迄今仍是威胁全球范围内人类健康的主要疾病之一,其高发病率、高复发率、高致残率及高死亡率给家庭和社会带来沉重负担^[1]。其中颈内动脉(internal carotid artery, ICA)重度狭窄或闭塞导致的脑血管疾病约占脑缺血事件的15%^[2],而颅内侧支循环建立的影响则贯穿了脑缺血事件的发生、发展、转归及预后^[3,4]。目前,对于侧支循环的评估,数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)仍是“金标准”,但作为侵入性检查,DSA可能增加血管损伤、造影剂过敏等并发症发生的风险^[5]。经颅多普勒超声(transcranial Doppler, TCD)能实时动态评估颅内血流动力学变化,具有无创、可重复等优势。已有大量研究表明,TCD对前交通动脉(anterior communicating artery, ACoA)侧支开放的评估具有较高诊断效能^[4,6],当ACoA通路受阻或代偿不足时,后交通动脉(posterior communicating artery, PCoA)和软脑膜侧支(leptomeningeal collaterals, LMCs)可作为代偿储备的重要通路。目前,TCD对大脑后动脉(posterior cerebral artery, PCA)代偿的诊断效能尚未完全明确。本研究旨在评估TCD对单侧ICA颅外段重度狭窄或闭塞患者PCA分级代偿的应用价值,以期早期识别卒中高风险患者以及血运重建术等临床决策提供客观依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性连续纳入2022年1月—2025年2月于广东省中医院脑病中心(包括总院、大学城医院及芳村医院三大院区)符合单侧ICA颅外段重度狭窄或闭塞的住院患者。纳入标准:(1)符合ICA重度狭窄/闭塞诊断标准^[7];(2)单侧ICA颅外段病变(C1~5段);(3)行DSA和TCD检查,且两种检查间隔时间不超过7 d;(4)年龄≥18岁;(5)TCD颞窗透声性良好。排除标准:(1)临床资料或影像学图像缺失、不清晰、结果不明确;(2)合并同侧ICA颅内段狭窄(≥50%),或对侧ICA重度狭窄或闭塞;(3)合并同侧大脑中动脉(middle cerebral artery, MCA)狭窄(≥50%)或闭塞;(4)颈动脉内膜切除术或介入术后,以及溶栓患者;(5)心律不齐或合并心脏瓣膜病、终末期肾病等其他系统严重疾病;(6)双侧颞窗透声不佳的患者。

1.2 方法

1.2.1 TCD检查 患者取仰卧位,使用深圳德力凯的TCD诊断仪(EMS-9T),探头频率为1.6/2 MHz,具备M模及多深度模式,由3名具有15

年以上TCD工作经验的高年资医师操作完成。按照《中国脑卒中血管超声检查指导规范》^[1],依次将探头放于患者颞窗、眼窗、枕窗检查颅底动脉环。探测同侧PCA时,探头朝向枕部,在颞窗55~70 mm深度区间清晰显示双向血流,P2段为背离探头血流,P1段为朝向探头血流(必要时结合颈总动脉压迫试验)^[1],分别记录PCA的P1段和P2段收缩期峰值流速(peak systolic velocity, PSV)、舒张末期流速(end-diastolic velocity, EDV)、平均流速(mean velocity, MV)和血管搏动指数(pulsatility index, PI)。

1.2.2 DSA检查及分组 常规DSA(德国Siemens Artis Q)由神经血管介入专科医师执行和判读。DSA执行医师每年至少完成200例血管造影操作,并对TCD原始数据以及本研究目的并不知情。ICA狭窄程度判断采用北美症状性颈动脉内膜切除术试验(North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial, NASCET)^[8],狭窄率(%)=[1-(狭窄段血管内径/狭窄远段原始管腔直径)]×100%。侧支代偿的判定如下,一级侧支:(1)ACoA开放:DSA显示健侧颈动脉系统血流通过ACoA灌流至患侧ICA-MCA;(2)PCoA开放:DSA显示椎-基底动脉系统血流通过PCoA灌流至同侧ICA系统;二级侧支:(3)PCA-LMCs循环代偿:DSA显示PCA通过LMCs与同侧MCA/大脑前动脉形成血流沟通;(4)颈内-外侧支开放:DSA显示同侧颈外动脉血流通过眼动脉逆流至患侧ICA~MCA。

1.3 观察指标

观察指标包括一般资料和血流动力学参数。一般资料:(1)人口统计学:年龄和性别;(2)缺血性卒中高危因素,包括高血压、糖尿病、高脂血症、冠心病及吸烟史;(3)入院后1 d的美国国立卫生研究院卒中量表(national institute of health stroke scale, NIHSS);(4)是否为症状性ICA重度狭窄或闭塞,表现为单侧肢体活动或感觉障碍、言语障碍、一过性黑矇、突发意识不清等一过性或持续症状。血流动力学参数:双侧MCA以及PCA-P1、P2段的PSV、EDV、MV、PI参数。

1.4 统计学方法

采用SPSS 27.0分析数据。计数资料用[n(%)]表示,行 χ^2 检验(Pearson或Fisher确切概率法);符合正态分布的计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,行t检验或方差分析;非正态分布的计量资料以中位数(四分位数间距)[M(P_{25} , P_{75})]表示,采用秩和检验(Mann Whitney U);应用受试者工作特征曲线(receiver operating

characteristic curve, ROC) 评价 TCD 量化参数在诊断单侧 ICA 重度狭窄或闭塞患者 PCA 分级代偿中的敏感性和特异性。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

研究共纳入 107 例患者, 年龄 25~89 岁, 平均 (64.78 ± 11.38) 岁, 其中男 101 例 (94.4%)、女 6 例 (5.6%); 高血压 61 例 (57.0%)、糖尿病 29 例 (27.1%)、高血脂 34 例 (31.8%)、冠心病 26 例 (24.3%), 吸烟 53 例 (49.5%); 单侧 ICA 重度狭窄 ($\geq 70\%$) 40 例 (37.4%), 闭塞 67 例 (62.6%); 病因病理

方面: 动脉粥样硬化 98 例 (91.6%), 放射性损伤 7 例 (6.5%), 动脉夹层 2 例 (1.9%); 左侧病变 43 例 (40.2%), 右侧 64 例 (59.8%); NIHSS 评分 0~20 分, 平均 (2.54 ± 3.88) 分。

2.1 颈内动脉重度狭窄组和闭塞组临床与血流动力学比较

卒中危险因素包括高血压、糖尿病、高脂血症、冠心病和吸烟, 两组差异均无统计学意义 ($P>0.05$) (见表 1)。闭塞组较重度狭窄组更年轻 ($t=2.594$, $P<0.05$)。

表 1 颈内动脉重度狭窄组和闭塞组临床资料与血流动力学比较

指标	重度狭窄组 ($n=40$)	闭塞组 ($n=67$)	统计值	P 值
年龄 ($\bar{x}\pm s$, 岁)	68.38 \pm 12.94	62.63 \pm 9.83	$t=2.594$	0.011*
男性 [$n(\%)$]	36(90)	65(97)	$\chi^2=2.329$	0.127
高血压 [$n(\%)$]	25(63)	36(54)	$\chi^2=0.786$	0.375
糖尿病 [$n(\%)$]	10(25)	19(28)	$\chi^2=0.143$	0.705
高脂血症 [$n(\%)$]	10(25)	24(36)	$\chi^2=1.353$	0.245
冠心病 [$n(\%)$]	9(23)	17(25)	$\chi^2=0.112$	0.737
吸烟 [$n(\%)$]	19(48)	34(51)	$\chi^2=0.106$	0.745
NIHSS [$P(M_{25}, M_{75})$, 分]	0(0, 3)	1(0, 4)	$Z=-0.805$	0.421
症状性 [$n(\%)$]	24(60)	42(63)	$\chi^2=0.076$	0.782
ACoA 开放 [$n(\%)$]	12(30)	45(67)	$\chi^2=13.897$	0.000 Δ
PCoA 开放 [$n(\%)$]	17(43)	46(67)	$\chi^2=7.078$	0.008 Δ
PCA-LMCs 代偿 [$n(\%)$]	8(20)	24(36)	$\chi^2=2.991$	0.084
颈内-外侧支开放 [$n(\%)$]	18(45)	39(58)	$\chi^2=1.756$	0.185
患侧 MCA-M1-MV [$P(M_{25}, M_{75})$, cm/s]	54(43, 67)	42(32, 54)	$Z=-2.883$	0.004 Δ
患侧 MCA-M1-PI ($\bar{x}\pm s$)	0.74 \pm 0.18	0.66 \pm 0.20	$t=2.077$	0.040*

注: Δ 表示 $P<0.01$, * 表示 $P<0.05$ 。

两组在 NIHSS 评分 ($Z=-0.805$, $P>0.05$) 以及是否为症状性 ICA 重度狭窄或闭塞方面差异无统计学意义 ($\chi^2=0.076$, $P>0.05$)。

脑血流动力学方面, 与重度狭窄组比较, 闭塞组一级侧支开放更多 ($P<0.01$)。二级侧支代偿中, 闭塞组 PCA-LMCs 侧支代偿相对较多 (36% vs 20%), 但两组差异无统计学意义 ($P=0.084$), 颈内-外侧支开放两组差异无统计学意义 ($P>0.05$)。两组 MCA-M1 段血流参数比较, 闭塞组 MV 更低 (中位数 42 cm/s vs 54 cm/s, $P<0.01$), PI 也更低 (均值 0.66 vs 0.74, $P<0.05$)。

2.2 PCA 分级代偿的血流动力学比较

PCA 参与代偿 75 例 (70.1%), 未代偿 32 例 (29.9%)。按照 PCA 代偿分级模式分为 4 组: (1) PCoA+LMCs 代偿; (2) 仅 PCoA 代偿; (3) 仅 LMCs 代偿; (4) 无代偿。4 组比较, 血流速度 (PSV, MV, EDV) 和 PI 具有统计学差异 (分别为 $P<0.01$ 和 $P<0.05$); 组

间比较, PCA 参与代偿 (3 组) 和无代偿组比较, 血流速度均更高 ($P<0.01$), PCoA 开放两组 (PCoA+LMCs 组及仅 PCoA 代偿组) 和 PCA 无代偿组比较, PI 更低 ($P<0.05$) (见表 2)。

2.3 PCA 分级代偿的 ROC 及最佳截断值

诊断 PCA 参与代偿, PCA-P1 段 PVS=104 cm/s、MV=65 cm/s 及 EDV=48 cm/s, AUC 分别为 0.846, 0.869 和 0.879, 其中 P1 段 MV 诊断价值最高, 约登指数 0.630、敏感度为 78.7%、特异度为 84.4%。

诊断 PCoA 开放, 采用 PCA-P1 段患侧/健侧的 PSV 比值 1.4、MV 比值 1.6、EDV 比值 1.6 诊断 PCoA 代偿, AUC 分别为 0.720, 0.720, 0.723; 而用同侧 P1 段 PSV=91 cm/s、MV=65 cm/s 以及 EDV=48 cm/s 的 AUC 值更高, 分别为 0.777, 0.802 和 0.813, 其中 P1 段 EDV 诊断价值最高, 敏感度为 76.2%、特异度为 79.5% (见表 3、图 1)。

表2 PCA 分级代偿的血流动力学比较(n=107)

血流参数	侧支分级				统计值	P 值
	PCoA+LMCs (n=20)	仅PCoA 代偿 (n=43)	仅LMCs 代偿 (n=12)	PCA 无代偿 (n=32)		
P1-PSV	146.45±55.78	138.37±49.26	124.00±38.02	82.91±44.16	Z=32.530	0.000 [▲]
P1-MV	96.75±39.04	89.12±33.68	78.08±25.83	51.31±30.14	Z=37.355	0.000 [▲]
P1-EDV	72.7±31.68	64.4±27.12	55.75±19.94	35.38±23.90	Z=39.841	0.000 [▲]
P1-PI	0.79±0.20	0.85±0.18	0.89±0.12	0.96±0.24	F=3.460	0.019 [*]

注:▲表示P<0.01,*表示P<0.05。

表3 PCA 分级代偿的ROC最佳截断值(n=107)

PCA 分级	PCA-MV(cm/s)	AUC	敏感度	特异度	约登指数
PCoA/LMCs	P1-V _m ≥65	0.869(95%CI 0.785~0.953)	78.7%	84.4%	0.630
PCoA	P1-V _d ≥48	0.813(95%CI 0.726~0.900)	76.2%	79.5%	0.557
LMCs	P2-V _m ≥60	0.824(95%CI 0.723~0.925)	71.5%	90.7%	0.625

诊断 LMCs 开放,PCA-P2 段的 PSV=91 cm/s、MV=60 cm/s 以及 EDV=43 cm/s 的 AUC 分别为 0.814,0.824 和 0.811,其中 P2 段 MV 诊断价值最高,敏感度为 71.5%、特异度为 90.7%。(见表 3、图 2)。

3 讨论

ICA 重度狭窄或闭塞,其病变程度、侧支开放和临床症状三者之间存在一定的关系^[9]。在本研究中,ICA 闭塞组和重度狭窄组比较,尽管闭塞组患侧的 MCA 水平段血流速度更低(P<0.01),但两组 NIHSS 评分及临床缺血症状的比例却无明显差异(P>0.05),考虑与侧支代偿能力相关。当颈内动脉闭塞时,侧支代偿尤其是一级侧支开放可直接影响患者脑组织灌注水平^[10]。本研究中 PCoA 开放比例闭塞组明显高于狭窄组(67% vs 43%,P<0.01),PCA-LMCs 开放比例闭塞组也高于重度狭窄组(36% vs 20%),但差异无统计学意义(P=0.084)。考虑 ICA 重度狭窄或闭塞后一级侧支循环的开放对维持颅内供血至关重要,可一定程度减少缺血性卒中出现的风险及症状^[11-13]。

目前,TCD 对 ICA 重度狭窄或闭塞后 ACoA 侧支代偿的评估准确性达 95%,特异性达 100%^[6];但是针对 PCA 代偿的相关研究相对较少,且标准不一,准确性也相对更低^[6,14]。PCA 代偿的主要方式包括 PCoA 和 LMCs,两者供血路径不一样,前者属于一级侧支代偿,通过 Willis 环由 PCA 主干顺行供血至颅底血管,而后者属于二级代偿,是通过血管末端吻合支逆行供血,后者常在慢性期逐渐建立^[15]。

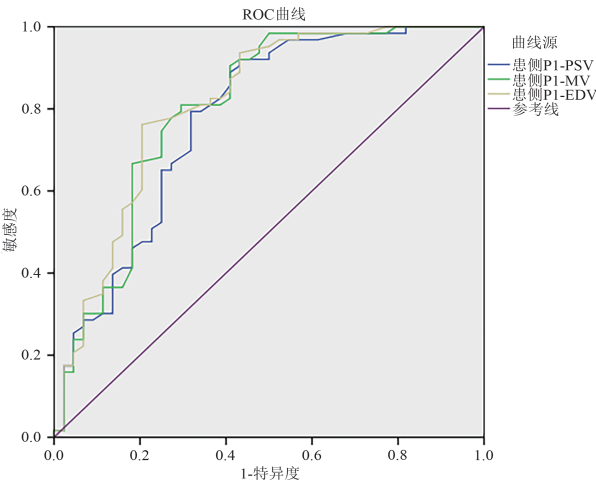


图1 PCA-P1段评估PCoA的ROC

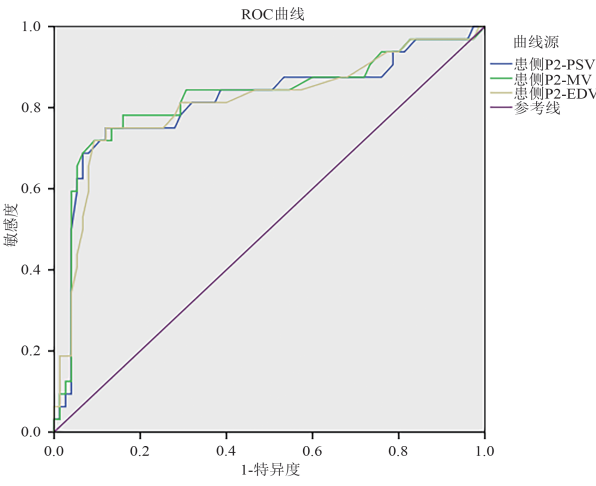
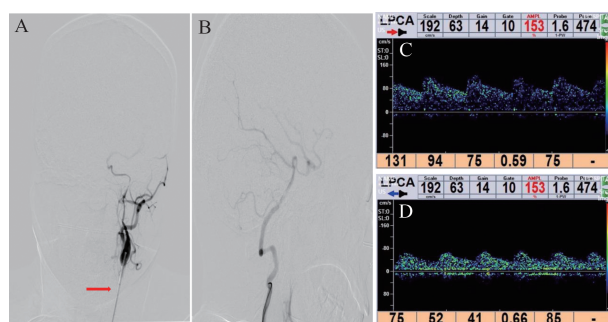


图2 PCA-P2段评估LMCs代偿的ROC

本研究表明,TCD 评估 PCoA 开放的最佳截断值是 PCA-P1 段 EDV ≥ 48 cm/s,ROC 结果显示,AUC 为 0.813,敏感度为 76.2%、特异度为 79.5%。PCoA 作为一级侧支循环,依赖 Willis 环结构性通路^[16],是连接 ICA 与椎基底动脉系统的重要血管通路,一端与 ICA 相连,另一端与 PCA 的 P1 段相连。所以,当发生 ICA 重度狭窄或闭塞时,PCoA 两端压力差不一致,促使血液从椎-基底动脉系统经 PCoA 流向 PCA-P1 段,供应 ICA 系统,此时,P1 段血流速度代偿性升高,P2 段血流则不受影响(见图 3)。考虑随着 PCA 代偿的增加,呈现血流速度增加($P<0.01$)、血流阻力减低($P<0.05$)的趋势,此时,EDV 则相应升高,因此,采用 PCA 的 EDV 指标更能反映 PCoA 侧支代偿情况。

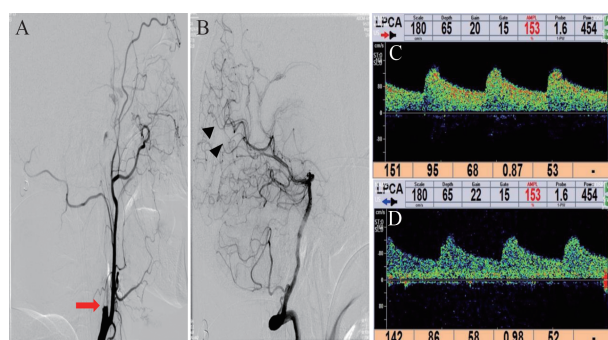
采用 TCD 评估 PCA-LMCs 代偿的研究较少,本研究发现,PCA-LMCs 开放的最佳截断值是 PCA-P2 段 MV ≥ 60 cm/s,AUC 为 0.824,敏感度为 71.5%、特异度为 90.7%。PCA-LMCs 代偿的路径不一样,PCA 的 P2 段位于环池内,主要为颞叶内侧、距状裂区域以及部分皮质提供血液供应。正常情况下,LMCs 处于相对关闭或低流量状态,当发生 ICA 重度狭窄或闭塞且 LMCs 开放时,LMCs 通过 PCA-P1 段、P2 段及远段与 MCA、ACA 的终末支形成吻合,血流经 PCA-P2 段逆向灌注 MCA、ACA 供血区,此时,PCA 的 P1 段和 P2 段血流速度均会代偿性增快(见图 4)。但如果采用 P1 段血流速度作为标准,可能会混杂部分 PCoA 开放的病例导致准确性降低;所以采用 P2 段血流评估 PCA-LMCs 代偿的针对性会更强。

虽然本研究显示,PCA-P2 段的 PSV、EDV 和 MV 对单侧 ICA 重度狭窄或闭塞患者 PCA-LMCs 代偿的评估均有一定诊断价值(ROC 曲线下面积分别为 0.814、0.811 和 0.824),但以 P2 段 MV ≥ 60 cm/s 诊断价值最高(AUC 0.824,约登指数 0.625)。考虑 LMCs 开放时,血流通过 PCA-P2 段主干及皮质吻合支逆向灌注 MCA、ACA 缺血区,而 MV 更能稳定反映远段小血管的扩张,从而准确评估 LMCs 开放情况。



注:A~D 为同一患者。A,DSA 示左侧颈内动脉重度狭窄(箭头);B,DSA 显示 PCoA 开放;C,TCD 显示左侧 PCA-P1 段血流速度代偿性增快(PSV=131 cm/s,EDV=75 cm/s,MV=94 cm/s,PI=0.59);D,TCD 示左侧 PCA-P2 段血流速度正常(PSV=75 cm/s,EDV=41 cm/s,MV=52 cm/s,PI=0.66)。

图3 左侧颈内动脉重度狭窄 PCoA 代偿的 DSA 及 TCD 图像



注:A~D 为同一患者。A,DSA 显示左侧颈内动脉闭塞(箭头所示);B,DSA 示 LPCA-LMCs 侧支代偿;C,TCD 显示左侧 PCA-P1 段血流速度代偿增快(PSV=151 cm/s,EDV=68 cm/s,MV=95 cm/s,PI=0.87);D,TCD 显示左侧 PCA-P2 段血流速度代偿性增快(PSV=142 cm/s,EDV=58 cm/s,MV=86 cm/s,PI=0.98)。

图4 左侧颈内动脉闭塞 LMCs 代偿的 DSA 及 TCD 图像

本研究的局限性:首先样本量偏少,分层研究可能会因为样本量少而出现数据偏倚。其次,本研究为回顾性研究,未来应开展前瞻性对照研究,以验证上述结果的临床应用。此外,对颈动脉重度狭窄或闭塞患者的多模态分析(如脑电、血流动力学结合灌注参数等模式的综合应用),或可为侧支开放后脑血流灌注和储备功能的评估开拓新思路^[17]。

综上所述,本研究针对单侧 ICA 颅外段重度狭窄或闭塞患者,首次对 PCA 代偿模式进行血流动力学的分层研究,应用 PCA-P1 段及 P2 段的血流量化指标能可靠评估 PCoA 开放及 PCA-LMCs 的代偿实况,与 DSA 有较好的一致性。这一发现将 TCD 评估

后循环代偿提升到了一个可量化的维度,为理解脑侧支循环的“代偿效率”而非仅仅是“代偿存在”提供了关键证据。

伦理学声明: 本研究方案经广东省中医院医院伦理委员会审批(批号:ZE2025-347-01)。

利益冲突声明: 所有作者均声明不存在利益冲突。

作者贡献声明: 张珏堃负责研究方向分析、文献收集、数据收集及论文撰写;钟经馨负责研究质控、论文指导;张昌林负责伦理学申报;莫秀云负责研究设计、数据收集及审核、统计学分析、论文修改并最终定稿。

[参考文献]

- [1] 国家卫生计生委脑卒中防治工程委员会. 中国脑卒中血管超声检查指导规范[J]. 中华医学超声杂志, 2015, 12(8): 599-610.
- [2] 朱玉萍, 濮恬宁, 张 蕾, 等. 超声造影评估颅外段颈内动脉次全闭塞价值[J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(6): 618-621.
- [3] 车 飞, 侯 备, 付金霞, 等. 双侧颈动脉狭窄或闭塞性病变的侧支循环途径[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2020, 22(11): 1140-1143.
- [4] Wang Y, Chang H, Bai P, et al. Evaluation of contralateral arterial flow compensation using transcranial Doppler in acute internal carotid artery occlusion and implications for neurological outcome[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 2998.
- [5] 吕 涛, 王小雅, 吴宇伦, 等. DSA与高分辨MRI诊断颅外段颈内动脉闭塞性病变的对比研究[J]. 临床神经病学杂志, 2020, 33(5): 334-338.
- [6] Müller M, Hermes M, Brückmann H, et al. Transcranial Doppler ultrasound in the evaluation of collateral blood flow in patients with internal carotid artery occlusion: Correlation with cerebral angiography [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 1995, 16: 195-202.
- [7] 唐 骁, 郭大乔, 符伟国, 等. 颈动脉狭窄规范化治疗争议与共识[J]. 中国实用外科杂志, 2017, 37(12): 1334-1339.
- [8] North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis[J]. N Engl J Med, 1991, 325(7): 445-453.
- [9] Pienimäki JP, Sillanpää N, Jolma P, et al. Carotid artery stenosis is associated with better intracranial collateral circulation in stroke patients[J]. Cerebrovasc Dis, 2020, 49(2): 200-205.
- [10] Kluytmans M, van der Grond J, van Everdingen KJ, et al. Cerebral hemodynamics in relation to patterns of collateral flow [J]. Stroke, 1999, 30(7): 1432-1439.
- [11] von Reutern GM, Goertler MW, Bornstein NM, et al. Grading carotid stenosis using ultrasonic methods[J]. Stroke, 2012, 43(3): 916-921.
- [12] 肖海萍, 刘慧玲, 黄 明, 等. TCD检测颈内动脉颅外段重度狭窄颅内动脉血流动力学参数的价值[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2023, 26(10): 1244-1248.
- [13] Liu R, Gao M, Zhao X. Evaluation of collateral circulation in patients with internal carotid artery occlusion: A clinical and ultrasonographic multicenter study [J]. Vasc Med, 2024, 29 (6) : 707-715.
- [14] Sebök M, van Niftrik CHB, Lohaus N, et al. Leptomeningeal collateral activation indicates severely impaired cerebrovascular reserve capacity in patients with symptomatic unilateral carotid artery occlusion[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2021, 41(11): 3039-3051.
- [15] 王 琦, 刘爱贤. 症状性颈内动脉重度狭窄或闭塞患者的侧支循环评估[J]. 卒中与神经疾病, 2020, 27(3): 385-387.
- [16] 闫灵娟, 杨宝林, 王 佳. 颈部彩色多普勒超声联合经颅彩色多普勒超声在老年急性脑梗死患者颈动脉狭窄诊断中的应用效果[J]. 海军医学杂志, 2025, 46(3): 273-279.
- [17] 刘小芳, 陈胜利. 定量脑电图与RAPID灌注参数在急性缺血性卒中取栓预后不良的研究进展[J]. 中风与神经疾病杂志, 2025, 42(6): 563-567.

引证本文:张珏堃,钟经馨,张昌林,等. 经颅多普勒超声评估颈内动脉颅外段重度狭窄或闭塞大脑后动脉分级代偿的应用研究[J]. 中风与神经疾病杂志, 2025, 42(11): 991-996.