



电子、语音版

· 论 著 ·

颈部血管超声评估颅内段椎动脉狭窄与症状性缺血性脑血管病的相关性研究

赵娜, 柳标, 韩丽, 周晓东

上海交通大学医学院苏州九龙医院超声科, 江苏 苏州 215028

摘要:目的 通过颈部血管超声评估颅内段椎动脉狭窄,探讨其与症状性缺血性脑血管病(ICVD)的相关性。方法 纳入2023年4月至2025年3月于上海交通大学医学院苏州九龙医院进行颈部血管超声检查,并经计算机体层血管成像和(或)数字减影血管造影证实存在单侧椎动脉颅内段狭窄的患者(180例)作为研究组,回顾性收集其临床、影像学及超声资料。另纳入同期超声检查正常的健康体检者(60名)作为对照组。依据狭窄程度将研究组分为轻度狭窄组(81例)、中度狭窄组(54例)、重度狭窄组(45例);依据有无ICVD的相关症状分为无症状组(75例)与症状组(105例)。比较各组血流参数;采用多因素 Logistic 回归分析评估症状性 ICVD 的影响因素;采用受试者操作特征(ROC)曲线及曲线下面积(AUC)评估各参数诊断效能;采用限制性立方样条模型分析血流参数与重度狭窄患者症状性 ICVD 发生风险之间的剂量-反应关系。结果 随椎动脉狭窄程度加重,收缩期峰值流速(PSV)、舒张末期流速(EDV)、椎动脉直径(VAD)、血流量逐渐下降($P<0.05$);血管的阻力指数(RI)逐渐升高($P<0.05$)。患侧 PSV、EDV、VAD、血流量低于健侧($P<0.05$);RI 高于健侧($P<0.05$)。ROC 曲线分析显示,各指标联合诊断时,对诊断中/重度狭窄的 AUC 为 0.864,重度狭窄的 AUC 为 0.891。症状组 PSV、EDV、血流量低于无症状组($P<0.05$);RI 高于无症状组($P<0.05$)。多因素 Logistic 回归分析显示,PSV <50.03 cm/s、EDV <20.12 cm/s、RI ≥ 0.60 、血流量 <101.31 mL/min 及重度狭窄是症状性 ICVD 的危险因素($P<0.05$)。剂量-反应关系显示,上述参数与重度狭窄患者症状性 ICVD 发生风险呈非线性关联。结论 PSV、EDV、RI、血流量与椎动脉颅内段狭窄程度及症状性 ICVD 风险相关,各指标联合评估有助于临床筛查和风险评估。

关键词:缺血性脑血管病;颈部血管超声;椎动脉;狭窄程度

中图分类号:R743.3

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2026.04.008

Correlation between intracranial vertebral artery stenosis assessed by cervical vascular ultrasound and symptomatic ischemic cerebrovascular disease

ZHAO Na, LIU Biao, HAN Li, ZHOU Xiaodong

Department of Ultrasound, Suzhou Kowloon Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Suzhou, Jiangsu 215028, China

Corresponding author: ZHOU Xiaodong, Email: jacky75008@163.com

Abstract: **Objective** To evaluate intracranial vertebral artery stenosis using cervical vascular ultrasound and explore its correlation with symptomatic ischemic cerebrovascular disease (ICVD). **Methods** From April 2023 to March 2025, 180 patients who underwent cervical vascular ultrasound examination at Suzhou Kowloon Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, and were confirmed to have unilateral stenosis or occlusion of the intracranial segment of the vertebral artery by computed tomography angiography and/or digital subtraction angiography were selected as the study group. Their clinical, imaging, and ultrasound data were retrospectively collected. In addition, 60 healthy individuals with normal ultrasound examination findings during the same period were included as the control group. Based on the degree of stenosis, patients in the study group were divided into mild ($n=81$), moderate ($n=54$), and severe ($n=45$) stenosis groups; based on the presence or absence of ICVD-related symptoms, they were divided into an asymptomatic group

基金项目:苏州市应用基础研究(医疗卫生)科技创新项目(SYWD2024092)。

收稿日期:2026-02-04;修回日期:2026-07-17

作者简介:赵娜(1987—),女,本科,主治医师,主要从事心脏和血管超声的研究。Email:zhaona8701080@186.com。

通信作者:周晓东(1979—),男,本科,副主任医师,主要从事颈脑血管超声的研究。Email:jacky75008@163.com。

($n=75$) and a symptomatic group ($n=105$). The blood flow parameters were compared among groups. Multivariable Logistic regression analysis was used to evaluate the factors influencing symptomatic ICVD. Receiver operating characteristic curves and the area under the curve (AUC) were used to evaluate the diagnostic efficacy of these parameters. A restricted cubic spline model was used to analyze the dose-response relationship between blood flow parameters and the risk of symptomatic ICVD in patients with severe stenosis. **Results** As the degree of vertebral artery stenosis increased, the peak systolic velocity (PSV), end-diastolic velocity (EDV), vertebral artery diameter, and blood flow gradually decreased ($P<0.05$), while the vascular resistance index (RI) gradually increased ($P<0.05$). The PSV, EDV, vertebral artery diameter, and blood flow on the affected side were lower than those on the healthy side ($P<0.05$), whereas the RI was higher than that on the healthy side ($P<0.05$). Receiver operating characteristic curve analysis showed that when the parameters were combined for diagnosis, the AUC for the diagnosis of moderate/severe stenosis was 0.864, and the AUC for severe stenosis was 0.891. The PSV, EDV, and blood flow in the symptomatic group were lower than those in the asymptomatic group ($P<0.05$), while the RI was higher than that in the asymptomatic group ($P<0.05$). Multivariable Logistic regression analysis showed that PSV <50.03 cm/s, EDV <20.12 cm/s, RI ≥ 0.60 , blood flow <101.31 mL/min, and severe stenosis were independent risk factors for symptomatic ICVD ($P<0.05$). The dose-response relationship showed that the above parameters had a non-linear association with the risk of ICVD in patients with severe stenosis. **Conclusions** PSV, EDV, RI, and blood flow are correlated with the degree of intracranial vertebral artery stenosis and the risk of symptomatic ICVD. A combined of these parameters is helpful for clinical screening and risk assessment.

Keywords: ischemic cerebrovascular disease; cervical vascular ultrasound; vertebral artery; degree of stenosis

缺血性脑血管病 (ischemic cerebrovascular disease, ICVD) 是脑血管病中常见且危害严重的临床亚型,其发病率较高,多伴有明确的神经功能缺损表现,极大地损害患者的生存质量,并对患者的长期预后造成不利影响,已成为当前脑血管病防治中的重要临床挑战^[1]。椎动脉颅内段出现狭窄是引发后循环缺血的关键病因之一,该病变可引起血流动力学异常,从而引发头晕、肢体麻木、共济失调等后循环缺血症状,严重时可进展为脑梗死,进一步加重疾病负担与诊疗难度^[2-3]。目前,数字减影血管造影 (digital subtraction angiography, DSA) 和计算机体层血管成像 (computed tomography angiography, CTA) 是评估椎动脉狭窄的影像学金标准,可提供精确的形态学信息^[4]。但其检查成本较高、部分需使用造影剂及产生电离辐射,限制了其在大规模社区筛查和动态随访中的广泛应用^[5]。相比之下,磁共振血管成像和经颅多普勒虽无辐射,但磁共振血管成像成本较高,而经颅多普勒则对操作者经验依赖性强,且部分患者存在颞窗穿透不良。颈部血管超声作为一种无创、便捷、经济的检查手段,常规用于颅外段颈动脉及椎动脉起始段的评估^[6]。通过测量椎动脉颅外段(椎间段)的血流参数可间接反映椎动脉颅内段狭窄的血流动力学改变,但目前对此尚缺乏系统研究。因此,本研究旨在探索这一间接评估方法的可行性及其与症状性 ICVD 的临床关联,以期临床早期诊断与干预提供可靠参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性纳入 2023 年 4 月至 2025 年 3 月于上海交通大学

医学院苏州九龙医院接受颈部血管超声检查,并经 CTA 和(或)DSA 证实存在椎动脉颅内段不同程度狭窄的患者(180 例)作为研究组。纳入同期进行颈部血管超声检查,且结果未见明显异常的 60 名健康体检者作为对照组。

纳入标准:(1)经 CTA 和(或)DSA 评估为单侧椎动脉颅内段狭窄性病变;(2)影像学资料完整;(3)年龄 >18 岁。

排除标准:(1)合并脑肿瘤、颅内创伤或出血病史;(2)颅外段椎动脉狭窄或闭塞为主要病变;(3)有超声检查禁忌证。

研究组患者依据 CTA 和(或)DSA 检查结果按椎动脉颅内段狭窄程度分为轻度狭窄组(81 例)、中度狭窄组(54 例)、重度狭窄组(45 例)。分组依据:按椎动脉颅内段狭窄程度分为轻度狭窄组(狭窄程度 $<50\%$)、中度狭窄组($50\% \sim 69\%$)、重度狭窄组($70\% \sim 99\%$)^[7]。

根据颅内段狭窄性病变部位与小脑后下动脉 (posterior inferior cerebellar artery, PICA) 关系,将狭窄性病变分为 PICA 分出前组(83 例)和 PICA 分出后组(97 例)。

根据《中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2018》^[7]对 ICVD 症状的定义,将存在肢体无力、麻木、言语障碍、视觉障碍或短暂性脑缺血发作等与目标斑块相关的临床脑缺血症状或体征的患者纳入症状组(105 例),否则为无症状组(75 例)。

本研究为回顾性研究,已通过上海交通大学医学院苏州九龙医院医学伦理委员会审批(伦理编号:KY-2025-013),豁免了患者知情同意。本研究在医学研究登记备案信息系统已经备案(备案编号:MR-32-25-059191)。

1.2 资料收集

收集所有受试者的一般资料,包括年龄、性别、体重指数(body mass index, BMI)、饮酒史、吸烟史、糖尿病史、高血压史、高脂血症史,以及头晕、恶心呕吐、肢体无力等症状的发生情况。

采集所有受试者的空腹静脉血,每份4 mL,经离心处理(4 000 r/min, 10 min)后,提取血清。采用全自动生化分析仪(上海江莱生物科技有限公司, OLYMPUS AU640)及配套试剂检测总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、C反应蛋白(C-reactive protein, CRP)。

采用全自动血细胞分析仪(武汉医捷迅安商贸有限公司, BC-5380)检测血红蛋白(hemoglobin, Hb)。

1.3 影像学检查方法及指标

1.3.1 CTA检查

采用SOMATOM Drive双源CT(德国西门子股份公司)进行横断面螺旋扫描。首先对患者进行CT平扫。注射对比剂后,嘱其静息5 min,待颅内外血管对比剂廓清后,继而进行头颈部双能量CTA扫描,扫描范围为主动脉弓以上血管。完成三维重建后,由2名具有5年以上影像诊断经验的医师对影像资料进行独立评估。

1.3.2 DSA检查

采用WIMMEDIC 2000型血管造影机[乐普(北京)医疗装备有限公司],对患者实施主动脉联合全脑血管造影。检查过程中对狭窄病变进行放大显影,并依据病变具体部位调整投照角度,常规采集正侧位及双斜位图像。由具有5年以上临床经验的影像科医师负责评估椎动脉颅内段狭窄情况。

1.3.3 颈部血管超声检查

采用CX 50型彩色多普勒超声诊断仪(飞利浦超声有限责任公司),超宽频线阵探头,频率3.0~9.0 MHz。受检者取仰卧位,头偏向对侧,探头置于胸锁乳突肌内侧缘,沿椎动脉走行方向进行纵切面扫查。因常规颈部血管超声无法直接清晰显示椎动脉颅内段,本研究实际测量目标为椎动脉颅外段(C2~C6椎间段)。在清晰显示该段血管长轴后,启用彩色多普勒血流显像,将取样容积置于血管腔中央,调整声束与血流方向夹角 $\leq 60^\circ$,获取稳定的多普勒频谱。

记录颅外段椎动脉的收缩期峰值流速(peak systolic velocity, PSV)、舒张末期流速(end diastolic velocity, EDV)、时间平均峰值流速(time-averaged peak flow

velocity, TAPV)及椎动脉直径(vertebral artery diameter, VAD)。所有参数均由资深血管超声医师重复测量3次,取平均值作为最终结果。

阻力指数(resistance index, RI)计算公式: $RI = (PSV - EDV) / PSV$; 血流量(mL/min) = $\pi \times (VAD/2)^2 \times TAPV$ 。

1.4 统计学方法

采用SPSS 25.0软件进行数据分析。正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,两组间比较采用独立样本 t 检验,健侧与患侧比较采用配对 t 检验,多组间比较采用单因素方差分析;计数资料以例数和百分率[例(%)]表示,组间比较采用 χ^2 检验。采用多因素Logistic回归分析评估症状性ICVD的危险因素。采用受试者操作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线及其曲线下面积(area under curve, AUC)来评估不同血流参数对于不同狭窄程度的症状性ICVD的诊断效能。采用限制性立方样条模型,分析PSV、EDV、RI、血流量与重度狭窄程度症状性ICVD患者发生风险之间的剂量-反应关系。采用Kappa分析计算颈部血管超声评估颅内段狭窄与CTA和(或)DSA的一致性。Kappa值一致性标准如下:Kappa值 ≤ 0.4 ,表示一致性较差;Kappa值为 $>0.4 \sim <0.75$,表示一致性中等;Kappa值 >0.75 ,表示一致性较好。连续变量(PSV、EDV、血流量等)在纳入多因素Logistic回归分析前的截断值,通过约登指数最大化原则,由ROC曲线分析确定。本研究涉及多组间的多重比较,尽管未进行正式的Bonferroni校正(如校正后 P 值阈值将为0.017),但考虑到所有主要比较的 P 值均 <0.001 ,结论仍具稳健性。

2 结果

2.1 对照组与研究组基线资料比较

对照组与研究组在年龄、性别、BMI、饮酒史、吸烟史、糖尿病史、高血压史、高脂血症史及各项实验室指标(TC、TG、LDL-C、HDL-C、Hb、CRP)方面比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。见表1。

2.2 研究组不同狭窄程度患者基线资料比较

轻度狭窄组、中度狭窄组、重度狭窄组患者在年龄、性别、BMI、饮酒史、吸烟史、糖尿病史、高血压史、高脂血症史及各项实验室指标方面比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。3组间恶心呕吐、肢体无力的发生率比较,差异有统计学意义($P<0.05$),其中重度狭窄组恶心呕吐的发生率最高(51.11%);轻度狭窄组肢体无力的发生率最高(48.15%)。头晕的发生率在3组间比较,差异未达到统计学意义($P=0.053$),但仍呈现重度狭窄组最高的趋势(44.44%)。见表2。

表1 对照组与研究组基线资料比较

指标	对照组(n=60)	研究组(n=180)	χ^2/t 值	P值
年龄/岁;($\bar{x}\pm s$)	64. 23±8. 73	63. 61±7. 48	0. 533	0. 595
性别[例(%)]			0. 146	0. 702
男	38(63. 33)	109(60. 56)		
女	22(36. 67)	71(39. 44)		
BMI/(kg/m ²);($\bar{x}\pm s$)	23. 14±1. 15	23. 10±1. 16	0. 232	0. 817
饮酒史[例(%)]	29(48. 33)	87(48. 33)	0. 000	1. 000
吸烟史[例(%)]	34(56. 67)	97(53. 89)	0. 143	0. 705
糖尿病史[例(%)]	17(28. 33)	42(23. 33)	0. 607	0. 436
高血压史[例(%)]	43(71. 67)	131(72. 78)	0. 028	0. 867
高脂血症史[例(%)]	22(36. 67)	66(36. 67)	0. 000	1. 000
TC/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	4. 72±1. 09	4. 81±1. 17	0. 525	0. 600
TG/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	1. 95±0. 31	2. 03±0. 37	1. 507	0. 133
LDL-C/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	2. 65±0. 42	2. 55±0. 46	1. 489	0. 138
HDL-C/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	1. 25±0. 20	1. 31±0. 22	1. 870	0. 063
Hb/(g/L);($\bar{x}\pm s$)	126. 05±11. 86	122. 97±11. 39	1. 795	0. 074
CRP/(mg/L);($\bar{x}\pm s$)	8. 21±1. 16	8. 16±1. 27	0. 270	0. 788

注:BMI=体重指数;TC=总胆固醇;TG=甘油三酯;LDL-C=低密度脂蛋白胆固醇;HDL-C=高密度脂蛋白胆固醇;Hb=血红蛋白;CRP=C反应蛋白。

表2 研究组不同狭窄程度患者基线资料比较

指标	轻度狭窄组(n=81)	中度狭窄组(n=54)	重度狭窄组(n=45)	χ^2/F 值	P值
年龄/岁;($\bar{x}\pm s$)	63. 51±7. 15	63. 78±7. 64	63. 36±7. 78	0. 065	0. 937
性别[例(%)]				0. 014	0. 993
男	49(60. 49)	33(61. 11)	27(60. 00)		
女	32(39. 51)	21(38. 89)	18(40. 00)		
BMI/(kg/m ²);($\bar{x}\pm s$)	22. 96±1. 03	23. 35±1. 29	23. 28±1. 10	2. 266	0. 107
饮酒史[例(%)]				0. 335	0. 846
有	41(50. 62)	25(46. 30)	21(46. 67)		
无	40(49. 38)	29(53. 70)	24(53. 33)		
吸烟史[例(%)]				0. 206	0. 902
有	44(54. 32)	30(55. 56)	23(51. 11)		
无	37(45. 68)	24(44. 44)	22(48. 89)		
糖尿病史[例(%)]				0. 099	0. 952
有	18(22. 22)	13(24. 07)	11(24. 44)		
无	63(77. 78)	41(75. 93)	34(75. 56)		
高血压史[例(%)]				0. 155	0. 925
有	60(74. 07)	39(72. 22)	32(71. 11)		
无	21(25. 93)	15(27. 78)	13(28. 89)		
高脂血症史[例(%)]				0. 298	0. 861
有	28(34. 57)	21(38. 89)	17(37. 78)		
无	53(65. 43)	33(61. 11)	28(62. 22)		
头晕[例(%)]				5. 893	0. 053
有	26(32. 10)	12(22. 22)	20(44. 44)		
无	55(67. 90)	42(77. 78)	25(55. 56)		
恶心呕吐[例(%)]				9. 234	0. 010
有	21(25. 93)	15(27. 78)	23(51. 11)		
无	60(74. 07)	39(72. 22)	22(48. 89)		
肢体无力[例(%)]				12. 634	0. 002
有	39(48. 15)	11(20. 37)	13(28. 89)		
无	42(51. 85)	43(79. 63)	32(71. 11)		
TC/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	4. 83±1. 12	4. 67±1. 23	4. 96±1. 18	0. 793	0. 454
TG/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	1. 98±0. 35	2. 11±0. 30	2. 04±0. 42	2. 170	0. 117
LDL-C/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	2. 54±0. 44	2. 60±0. 50	2. 52±0. 45	0. 439	0. 645
HDL-C/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	1. 30±0. 22	1. 28±0. 19	1. 34±0. 25	0. 986	0. 375
Hb/(g/L);($\bar{x}\pm s$)	124. 58±11. 29	121. 62±11. 54	120. 76±11. 47	2. 033	0. 133
CRP/(mg/L);($\bar{x}\pm s$)	8. 15±1. 33	8. 07±1. 24	8. 29±1. 18	0. 397	0. 673

注:BMI=体重指数;TC=总胆固醇;TG=甘油三酯;LDL-C=低密度脂蛋白胆固醇;HDL-C=高密度脂蛋白胆固醇;Hb=血红蛋白;CRP=C反应蛋白。

2.3 不同狭窄程度患者血流参数比较

不同狭窄程度患者的PSV、EDV、VAD、血流量、RI比较,差异有统计学意义($P<0.05$),且随着椎动脉狭窄程度

的加重,PSV、EDV、VAD、血流量均呈现逐步下降趋势,而RI随狭窄程度加重而逐渐升高。见表3。

表3 不同狭窄程度患者血流参数比较 ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	PSV/(cm/s)	EDV/(cm/s)	VAD/mm	RI	血流量/(mL/min)
轻度狭窄组	81	58.47±11.04	22.96±4.32	3.61±0.21	0.59±0.04	120.87±21.21
中度狭窄组	54	54.31±10.12	16.48±3.55	3.52±0.28	0.65±0.05	75.63±15.29
重度狭窄组	45	48.63±10.24	11.29±2.36	3.30±0.32	0.72±0.03	45.42±12.15
F值		12.595	152.350	20.303	146.228	285.992
P值		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注:PSV=收缩期峰值流速;EDV=舒张末期流速;VAD=椎动脉直径;RI=阻力指数。

2.4 患侧与健侧血流参数比较

患侧与健侧PSV、EDV、VAD、RI、血流量比较,差异具有统计学意义($P<0.05$)。其中,患侧PSV、EDV、VAD、血流量明显低于健侧,而患侧RI明显高于健侧。见表4。

表4 患侧与健侧血流参数比较 ($\bar{x}\pm s$)

指标	患侧($n=180$)	健侧($n=180$)	t 值	P 值
PSV/(cm/s)	41.13±9.16	59.64±10.20	18.115	<0.001
EDV/(cm/s)	12.15±1.14	20.23±2.07	45.873	<0.001
VAD/mm	3.29±0.38	4.01±0.53	14.812	<0.001
RI	0.61±0.07	0.43±0.02	33.172	<0.001
血流量/(mL/min)	87.20±18.24	137.62±21.10	24.254	<0.001

注:PSV=收缩期峰值流速;EDV=舒张末期流速;VAD=椎动脉直径;RI=阻力指数。

2.5 PICA分出前组与PICA分出后组血流参数比较

PICA分出前组与PICA分出后组比较,VAD差异无统计学意义($P>0.05$);PSV、EDV、血流量、RI差异具有统计学意义($P<0.05$)。其中,PICA分出前组PSV、EDV、血流量明显低于PICA分出后组,而RI高于PICA分出后组($P<0.05$)。见表5。

表5 PICA分出前组与PICA分出后组血流参数比较 ($\bar{x}\pm s$)

指标	PICA分出前组($n=83$)	PICA分出后组($n=97$)	t 值	P 值
PSV/(cm/s)	31.84±8.96	50.21±10.18	12.748	<0.001
EDV/(cm/s)	12.15±1.14	19.38±1.23	40.654	<0.001
VAD/mm	2.88±0.33	2.79±0.36	1.737	0.084
RI	0.79±0.07	0.61±0.04	21.551	<0.001
血流量/(mL/min)	86.11±17.19	127.63±20.40	14.263	<0.001

注:PSV=收缩期峰值流速;EDV=舒张末期流速;VAD=椎动脉直径;RI=阻力指数。

2.6 血流参数与狭窄程度的ROC曲线分析

以PSV、EDV、VAD、RI、血流量以及各指标联合作为诊断指标,以患者狭窄程度作为状态变量。单独使用

PSV、EDV、VAD、RI、血流量均具有一定的诊断价值。各指标联合使用时,其诊断价值显著高于单一指标,其中AUC在中/重度狭窄组为0.864,在重度狭窄组为0.891。见表6、图1。

表6 血流参数对狭窄程度(中/重度、重度)的ROC分析

指标	中/重度狭窄组		重度狭窄组	
	AUC	95%CI	AUC	95%CI
PSV	0.767	0.643~0.891	0.791	0.634~0.948
EDV	0.742	0.615~0.869	0.787	0.686~0.888
VAD	0.735	0.662~0.808	0.762	0.617~0.907
RI	0.760	0.639~0.881	0.721	0.655~0.787
血流量	0.753	0.636~0.870	0.785	0.648~0.922
联合指标	0.864	0.794~0.934	0.891	0.748~1.000

注:PSV=收缩期峰值流速;EDV=舒张末期流速;VAD=椎动脉直径;RI=阻力指数。

2.7 颈部血管超声与CTA和(或)DSA的一致性检验

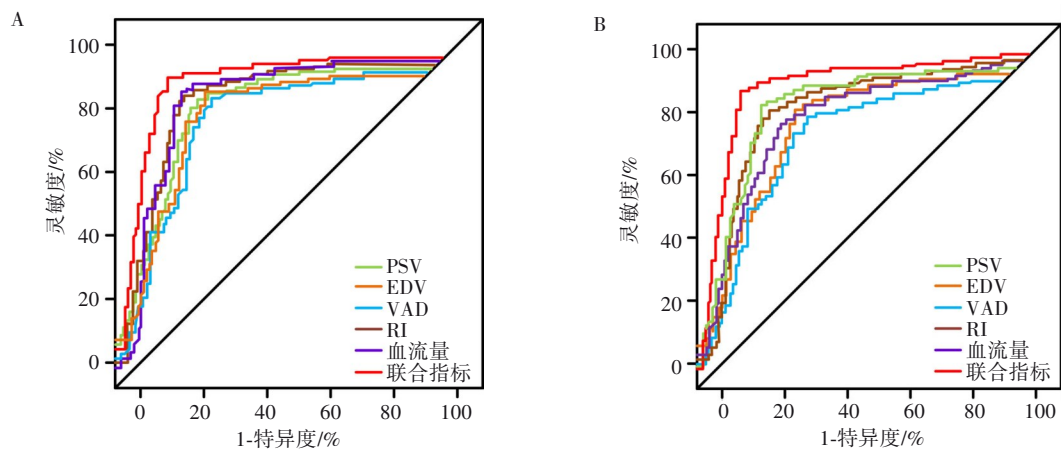
颈部血管超声评估颅内段狭窄与CTA和(或)DSA的一致性较好(Kappa值为0.832, $P<0.05$)。

2.8 无症状组与症状组患者的基线资料比较

无症状组与症状组患者的年龄、性别、BMI、饮酒史、吸烟史、糖尿病、高血压、高脂血症、TC、TG、LDL-C、HDL-C、Hb、CRP、VAD比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。头晕、恶心呕吐、肢体无力、PSV、EDV、RI、血流量比较,差异具有统计学意义($P<0.05$),其中症状组患者PSV、EDV、血流量明显低于无症状组($P<0.05$),而RI高于无症状组($P<0.05$)。见表7。

2.9 多因素Logistic回归分析评估症状性ICVD的危险因素

将表7中 $P<0.05$ 的指标作为自变量,将症状性ICVD作为因变量,纳入多因素Logistic回归分析。结果显示,PSV<50.03 cm/s、EDV<20.12 cm/s、RI≥0.60、血流量<101.31 mL/min以及重度狭窄是患者发生症状性ICVD的危险因素($P<0.05$)。见表8。



A:PSV、EDV、VAD、RI、血流量及联合指标对中 / 重度狭窄组患者的诊断价值;B:上述指标对重度狭窄组患者的诊断价值。

图1 ROC曲线分析血流参数与狭窄程度(中 / 重度、重度)的关系

表7 无症状组与症状组患者基线资料比较

指标	无症状组(n=75)	症状组(n=105)	χ^2/t 值	P值
年龄/岁;($\bar{x}\pm s$)	63.41 $\pm$ 7.12	63.58 $\pm$ 7.35	0.155	0.877
性别[例(%)]			0.017	0.897
男	45(60.00)	64(60.95)		
女	30(40.00)	41(39.05)		
BMI/(kg/m ²);($\bar{x}\pm s$)	23.53 $\pm$ 1.02	23.45 $\pm$ 1.14	0.485	0.628
饮酒史[例(%)]			0.006	0.940
有	36(48.00)	51(48.57)		
无	39(52.00)	54(51.43)		
吸烟史[例(%)]			0.016	0.899
有	40(53.33)	57(54.29)		
无	35(46.67)	48(45.71)		
糖尿病史[例(%)]			0.032	0.858
有	17(22.67)	25(23.81)		
无	58(77.33)	80(76.19)		
高血压史[例(%)]			0.020	0.887
有	55(73.33)	76(72.38)		
无	20(26.67)	29(27.62)		
高脂血症史[例(%)]			0.025	0.875
有	28(37.33)	38(36.19)		
无	47(62.67)	67(63.81)		
头晕[例(%)]			3.980	0.046
有	18(24.00)	40(38.10)		
无	57(76.00)	65(61.90)		
恶心呕吐[例(%)]			7.643	0.006
有	16(21.33)	43(40.95)		
无	59(78.67)	62(59.05)		
肢体无力[例(%)]			5.281	0.022
有	19(25.33)	44(41.90)		
无	56(74.67)	61(58.10)		
TC/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	4.79 $\pm$ 1.20	4.86 $\pm$ 1.15	0.395	0.693
TG/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	2.13 $\pm$ 0.39	2.06 $\pm$ 0.42	1.135	0.258
LDL-C/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	2.53 $\pm$ 0.41	2.45 $\pm$ 0.48	1.170	0.244
HDL-C/(mmol/L);($\bar{x}\pm s$)	1.30 $\pm$ 0.15	1.34 $\pm$ 0.17	1.633	0.104
Hb/(g/L);($\bar{x}\pm s$)	125.43 $\pm$ 10.58	123.61 $\pm$ 10.79	1.125	0.262
CRP/(mg/L);($\bar{x}\pm s$)	8.18 $\pm$ 1.47	8.26 $\pm$ 1.23	0.396	0.692
PSV/(cm/s);($\bar{x}\pm s$)	53.67 $\pm$ 11.14	44.76 $\pm$ 10.25	5.545	<0.001
EDV/(cm/s);($\bar{x}\pm s$)	23.10 $\pm$ 4.69	15.37 $\pm$ 4.43	11.262	<0.001
VAD/mm;($\bar{x}\pm s$)	3.47 $\pm$ 0.31	3.40 $\pm$ 0.24	1.707	0.090
RI($\bar{x}\pm s$)	0.53 $\pm$ 0.03	0.67 $\pm$ 0.06	18.604	<0.001
血流量/(mL/min);($\bar{x}\pm s$)	71.14 $\pm$ 17.62	53.71 $\pm$ 14.69	7.217	<0.001

注:BMI=体重指数;TC=总胆固醇;TG=甘油三酯;LDL-C=低密度脂蛋白胆固醇;HDL-C=高密度脂蛋白胆固醇;Hb=血红蛋白;CRP=C反应蛋白;PSV=收缩期峰值流速;EDV=舒张末期流速;VAD=椎动脉直径;RI=阻力指数。

表8 多因素Logistic回归分析评估症状性ICVD的影响因素

变量	赋值	B值	SE值	Wald χ^2 值	OR值	95%CI	P值
头晕	是=1;否=0	0.663	0.417	2.530	1.941	0.857~4.396	0.112
恶心呕吐	是=1;否=0	0.087	0.235	0.138	1.091	0.689~1.729	0.710
肢体无力	是=1;否=0	0.635	0.329	3.719	1.887	0.990~3.598	0.054
PSV	<50.03 cm/s=1;≥50.03 cm/s=0	0.571	0.236	5.841	1.565	1.356~1.898	0.016
EDV	<20.12 cm/s=1;≥20.12 cm/s=0	0.855	0.321	7.074	1.425	1.227~1.799	0.008
RI	≥0.60=1;<0.60=0	0.801	0.289	7.670	2.228	1.264~3.927	0.006
血流量	<101.31 mL/min=1;≥101.31 mL/min=0	1.317	0.381	11.925	1.268	1.127~1.566	<0.001
狭窄程度	重度狭窄=1;轻、中度狭窄=0	1.834	0.869	4.454	6.261	1.140~34.399	0.035

注:PSV=收缩期峰值流速;EDV=舒张末期流速;RI=阻力指数。

2.10 血流参数对不同狭窄程度症状性ICVD的诊断效能分析 指标的诊断效能普遍随狭窄程度加重而提升,其中重度狭窄时联合指标的AUC可达0.951,诊断价值最高,各项指标中联合指标的综合诊断能力最佳,且所有见表9。

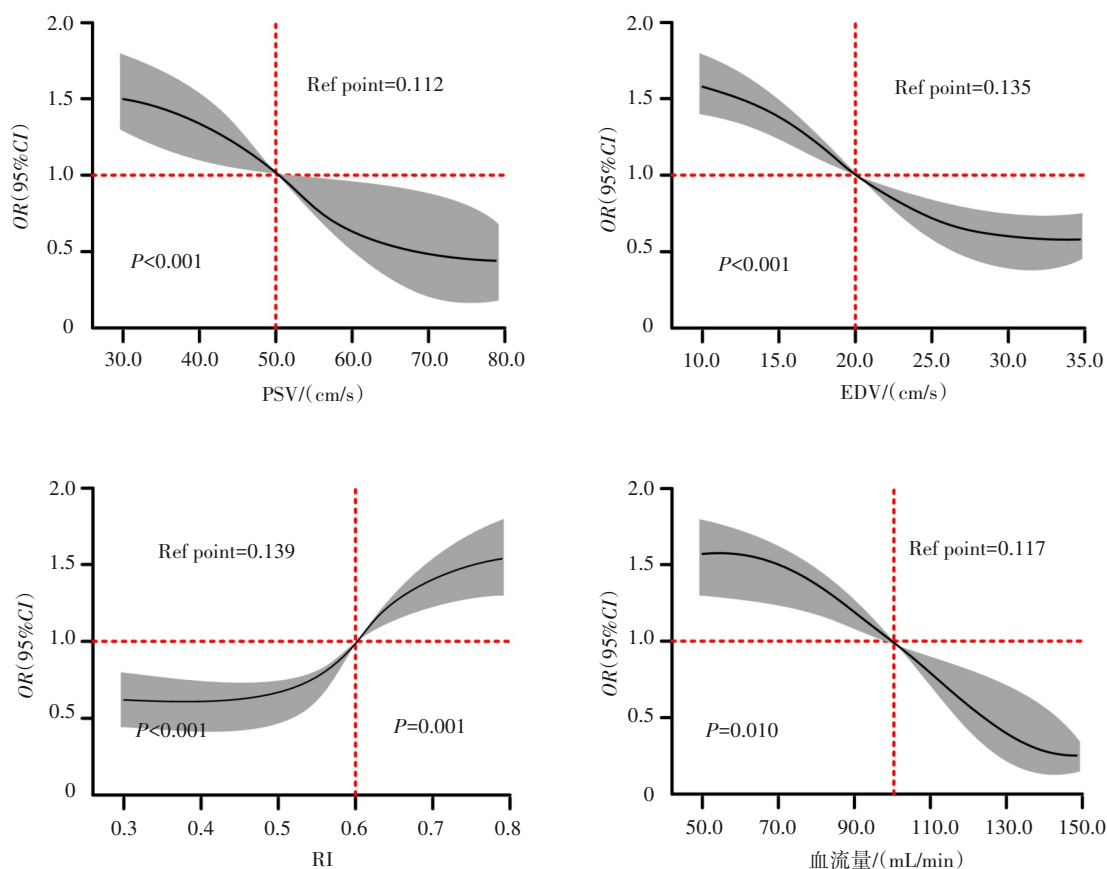
表9 血流参数对不同狭窄程度症状性ICVD的诊断效能分析

狭窄程度	指标	灵敏度	特异度	准确度	AUC	95%CI
轻度狭窄	PSV	0.752	0.734	0.743	0.760	0.714~0.798
	EDV	0.674	0.651	0.663	0.685	0.601~0.732
	RI	0.746	0.720	0.733	0.754	0.695~0.812
	血流量	0.776	0.754	0.765	0.789	0.711~0.837
	联合指标	0.880	0.825	0.853	0.896	0.830~0.943
中度狭窄	PSV	0.796	0.771	0.784	0.806	0.775~0.864
	EDV	0.623	0.635	0.629	0.704	0.674~0.803
	RI	0.739	0.718	0.729	0.832	0.735~0.893
	血流量	0.785	0.764	0.775	0.795	0.694~0.885
	联合指标	0.923	0.867	0.895	0.914	0.835~0.961
重度狭窄	PSV	0.810	0.784	0.797	0.826	0.795~0.873
	EDV	0.746	0.723	0.735	0.765	0.710~0.834
	RI	0.819	0.776	0.798	0.862	0.736~0.901
	血流量	0.803	0.789	0.796	0.841	0.771~0.889
	联合指标	0.940	0.918	0.932	0.951	0.848~0.987

注:PSV=收缩期峰值流速;EDV=舒张末期流速;RI=阻力指数。

2.11 血流参数与重度狭窄程度症状性ICVD发生风险的剂量-反应关系 发生风险之间存在非线性剂量-反应关系($P<0.05$)。随着PSV、EDV、血流量下降和RI升高,重度狭窄程度症状性ICVD发生的风险呈现出相应的增加趋势。见图2。

PSV、EDV、RI、血流量与重度狭窄程度症状性ICVD



PSV:收缩期峰值流速;EDV:舒张末期流速;RI:阻力指数。

图2 血流参数与症状性ICVD发生风险关联强度的剂量-反应关系

3 讨论

近些年,脑血管疾病于全球范围内已跃升为导致残疾和病死的主要因素之一,其中颅内动脉狭窄是症状性ICVD重要的病理基础^[8-9]。颅内动脉狭窄的早期准确评估,对临床治疗与预后判断至关重要^[10]。颈部血管超声作为一种无创、便捷、可重复的影像学检查手段,已广泛应用于颅外段血管评估。近年来,该技术逐渐被用于颅内段椎动脉的形态学及血流动力学观察^[11]。本研究旨在探讨基于颈部血管超声评估的颅内段椎动脉狭窄与症状性ICVD之间的相关性,以期为该类疾病的早期识别及临床干预提供影像学依据。

本研究采用颈部血管超声测量椎动脉颅外段(C₂~C₆椎间段)的血流参数,进而间接评估颅内段椎动脉的狭窄状态,其方法学可行性基于以下血流动力学原理。椎动脉作为后循环的主要供血血管,其颅内段与颅外段属于同一侧支代偿的连续管道系统。当颅内段发生显著狭窄时,狭窄局部的血流阻力增加,导致狭窄远端灌注压下降。根据流体力学泊肃叶定律,在血流量相对恒定的前提下,管腔半径的减小必然导致血流速度的代偿性改

变。这一血流动力学效应并非局限于狭窄局部,而是沿血管纵向传导,使狭窄近端的颅外段血流速度同样出现特征性减低^[12]。因此,通过检测颅外段椎动脉的流速参数,可间接推断颅内段的狭窄状态。这一原理与经颅多普勒通过检测颅内动脉流速来评估脑血管痉挛或狭窄的机制类似,只是测量窗口从颅内换至颅外段。本研究采用的综合血流参数(PSV、EDV、RI、血流量)较单一速度指标更能全面反映下游阻力的变化。RI的数值高低主要取决于舒张末期流速,而后者直接受远端微循环床阻力的影响。当颅内段椎动脉狭窄导致下游灌注压下降时,远端血管床通过自动调节机制代偿性扩张以维持脑血流量,但狭窄程度超过代偿极限后,微循环阻力代偿性增高,表现为EDV下降和RI升高。这一阻力变化同样逆向传导至颅外段,使超声能够捕捉到这一血流频谱的改变^[13]。本研究结果中患侧RI显著高于健侧,以及RI随狭窄程度加重而逐级升高,均验证了这一传导机制的存在。此外,本研究通过Kappa一致性检验证实,颈部血管超声评估结果与CTA/DSA金标准的一致性较好,进一步从统计学层面验证了通过颅外段测量间接评估颅内段狭窄的

可行性。这一结果提示,在无法普及CTA/DSA筛查的基层医疗机构或大规模社区人群中,颈部血管超声可作为一种有效的初筛工具,通过颅外段血流参数的异常变化来预警颅内段椎动脉狭窄的可能。当然,这一间接评估方法存在其固有的局限性。颅外段椎动脉的血流参数受多种因素影响,包括全身血压波动、心率变化、颅外段血管自身有无狭窄或发育不良以及侧支循环的开放程度等,这些因素均可能干扰对颅内段狭窄的准确判断。因此,颈部血管超声的评估结果应结合患者的临床症状、体征及其他影像学资料进行综合解读,不宜作为独立的诊断依据。

血流动力学参数能够定量分析动脉频谱形态,为临床评估提供客观依据^[14]。当动脉发生重度狭窄或闭塞时,其血流动力学状态均可能发生变化,而超声所测得的血流动力学指标能够准确反映上述改变^[15]。本研究通过颈部血管超声评估颅内段椎动脉狭窄,系统分析了相关血流动力学参数与狭窄程度及症状性ICVD的关联。结果显示,随着椎动脉狭窄程度的加重,PSV、EDV、VAD、血流量均呈现逐步下降趋势,而RI随狭窄程度加重而逐渐升高,与既往研究^[12,16]结论相符。进一步对患侧PICA分出前组和PICA分出后组血流参数进行比较分析,结果显示,PICA分出前组PSV、EDV、血流量明显低于PICA分出后组,而RI高于PICA分出后组。这一研究结果的可能机制为椎动脉颅内段狭窄导致血管腔截面积减小,狭窄处血流阻力显著增加,进而引起狭窄近端的血流动力学代偿性改变。狭窄后远端脑血管床灌注压下降,通过自动调节机制使血流速度减低,表现为PSV和EDV的逐步下降。下游血管阻力升高导致舒张期血流减少,使得RI反射性增高。而血流量减少的幅度与狭窄程度呈正相关,反映了脑组织实际灌注不足。PICA分出前、后参数差异的机制在于,椎动脉颅内段狭窄若位于PICA分出点近端,则分出前段直接受狭窄影响,血流灌注压最低,流速和血流量显著减低;而分出后段可能通过PICA自身血流或侧支循环获得部分代偿,使PSV、EDV和血流量相对保留,RI则因下游阻力分布不均而较低^[13]。这凸显了狭窄定位对局部血流分布具有关键作用,以及代偿机制在延缓缺血性事件中的潜在意义。

症状性ICVD指因动脉粥样硬化等病变导致脑血流不足,引发神经功能缺损^[17]。常见危险因素包括高血压、糖尿病、吸烟、酗酒等,这些因素通过损伤血管内皮、影响血流稳定,加剧脑组织缺血缺氧,从而诱发症状。本研究多因素Logistic回归分析结果显示,PSV<50.03 cm/s、EDV<20.12 cm/s、RI≥0.60、血流量<101.31 mL/min以及重度狭窄是患者发生症状性ICVD的危险因素,与既往研究^[18-19]相符。这一研究结果可能的机制为PSV降低反映了收缩期血流灌注不足,提示椎动脉颅内段可能存在狭窄或梗

阻,导致脑灌注压下降,进而减少脑组织氧供。EDV下降则表明舒张末期血流速度减缓,常与远端小血管阻力增高相关,影响脑微循环的持续灌注,加剧缺血风险^[20-21]。RI升高直接体现了血管阻力的增加,可能与动脉壁硬化或狭窄后血流动力学改变有关,导致脑血流自动调节功能受损,进一步诱发脑缺血事件。血流量减少则反映整体脑血流供应不足,与椎动脉狭窄所致的血流动力学紊乱相吻合,最终因脑氧代谢率下降而诱发病理性ICVD。限制性立方样条模型分析表明,随着PSV、EDV、血流量下降和RI升高,重度狭窄患者症状性ICVD发生风险呈现出相应的增加。这进一步验证了血流动力学紊乱在后循环缺血病理生理过程中的重要作用。这些参数为早期筛查提供了量化标准,有助于识别高危人群,并指导个体化干预策略,从而降低后循环卒中及相关残疾的发生率。

本研究初步探讨了颅内段椎动脉狭窄与症状性ICVD的相关性,但仍存在一定局限性:其一,本研究为单中心、小样本设计,其结果的外部推广性可能受限;其二,颈部血管超声对颅内段的评估受骨窗限制,且对操作者的依赖性较强,可能导致测量误差。未来需通过多中心、大样本的研究对本结论进行验证,并结合经颅彩色多普勒超声或高分辨率磁共振管壁成像进行多模态评估,提高颅内段病变检测的准确性。

综上所述,PSV、EDV、RI、血流量与椎动脉颅内段狭窄程度及症状性ICVD风险相关,联合这些指标的诊断效能最优,为临床筛查和风险评估提供了有益的补充工具。

参 考 文 献

- [1] LUCCI C, RISSANEN I, DE JONG P A, et al. Ischemic stroke recurrence and mortality in different imaging phenotypes of ischemic cerebrovascular disease: the SMART-MR study[J]. *Eur Stroke J*, 2023, 8(2): 522-531.
- [2] ELDER T A, WHITE T G, WOO H H, et al. Future of endovascular and surgical treatments of atherosclerotic intracranial stenosis[J]. *Stroke*, 2024, 55(2): 344-354.
- [3] 王皓,宋冰欣,白雪松,等. 椎动脉颅内段发育不良影像学评估及其与后循环缺血性卒中关系的研究进展[J]. *中国脑血管病杂志*, 2024, 21(8): 559-564.
- [4] 夏岩,王嵘,张蕾,等. 经颅彩色多普勒超声联合经颅超声造影与磁共振血管成像在颅内动脉狭窄诊断中的相关性及应用价值[J]. *首都医科大学学报*, 2025, 46(4): 694-701.
- [5] CHANG S H, ZHANG W W, WANG M, et al. Clinical significance of MRA, TCD and electroencephalogram in the diagnosis of intracranial artery stenosis in ischemic cerebrovascular disease[J]. *Biotechnol Genet Eng Rev*, 2024, 40(3): 2380-2392.
- [6] 黄亚琴,刘雨森,杨甲,等. 单侧颈内动脉颅外段-重度狭窄患者发生缺血性卒中的影响因素分析及列线图模型构建[J]. *中国脑血管病杂志*, 2025, 22(6): 363-372.

- [7] 中华医学会神经病学分会,中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性缺血性脑卒中诊治指南2018[J]. 中华神经科杂志, 2018, 51(9): 666-682.
- [8] 程任捷,王伟,唐文成,等. CDUS、CTA 评估颈动脉狭窄程度及斑块形态与DSA的一致性分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22(6): 40-42.
- [9] CHEN Z M, LIU J, WANG A Q, et al. Hemodynamic impairment of blood pressure and stroke mechanisms in symptomatic intracranial atherosclerotic stenosis[J]. Stroke, 2024, 55(7): 1798-1807.
- [10] REGENHARDT R W, NOLAN N M, DAS A S, et al. Transcranial Doppler cerebrovascular reactivity: thresholds for clinical significance in cerebrovascular disease[J]. J Neuroimaging, 2024, 34(3): 348-355.
- [11] 杨炆,王欣,雷丹,等. TCD无创评估颈动脉重度狭窄及闭塞患者颅内侧支循环开放的血流动力学特征与临床预后相关性研究[J]. 现代生物医学进展, 2025, 25(13): 2195-2200, 2207.
- [12] 袁晓峰,惠晶晶,颜燕红,等. 椎动脉椎间段血流动力学参数评估椎动脉颅内段狭窄性病变的效能及可行性研究[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2024, 21(4): 399-407.
- [13] 张峰,华扬,刘一铭,等. 双侧椎动脉不对称性与椎动脉起始段狭窄的相关性分析[J]. 中国脑血管病杂志, 2024, 21(5): 312-318.
- [14] 刘霞,商玮珉,范洁,等. CT血管成像联合颈部血管超声在脑梗死患者颅外段颈动脉斑块诊断中的应用价值[J]. 哈尔滨医科大学学报, 2025, 59(2): 163-167.
- [15] LIU S, HUANG Z L, SUN Y R, et al. Application value of transcranial contrast - enhanced ultrasonography in evaluating middle cerebral artery stenosis[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2023, 27(1): 224-232.
- [16] 张奇,郭翀,范光亮,等. CTA联合超声血流参数评估颈动脉斑块稳定性[J]. 放射学实践, 2025, 40(5): 567-572.
- [17] 刘新华,邓建中,吕高鹏. 血管内支架植入术治疗缺血性脑血管病颈动脉狭窄患者的临床效果分析[J]. 实用临床医药杂志, 2024, 28(13): 87-91, 97.
- [18] 拜钱,王强,赵国强,等. 颈部血管超声联合经颅多普勒超声对缺血性脑血管病患者侧支循环的诊断价值[J]. 中国医学装备, 2025, 22(5): 67-71.
- [19] 马文渊,徐琦,马亚美,等. 基于颈动脉斑块内新生血管构建列线图评估症状性缺血性脑血管病发病风险[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2024, 26(11): 1310-1314.
- [20] 唐镜,韩鹏,刘成惠,等. 经颅双功能彩色多普勒超声在老年急性缺血性脑卒中患者血管内治疗后的临床应用价值[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2025, 27(3): 337-342.
- [21] 郑欣悦,王少君. 血流动力学参数预测有症状颅内动脉粥样硬化性疾病患者的卒中复发[J]. 国际脑血管病杂志, 2024, 32(5): 354-358.

责任编辑:龚学民