

doi:10.3969/j.issn.1005-3697.2026.05.007

✧ 临床医学研究 ✧

多模态超声评估颈动脉易损斑块与脑卒中发病的相关性

张青, 马宁帅, 吴静, 于粒粒

(川北医学院附属医院超声科, 四川 南充 637000)

【摘要】目的: 探讨多模态超声技术评估颈动脉易损斑块特征的价值, 并分析其与脑卒中发病的相关性。**方法:** 选取收治的经临床确诊为脑卒中的患者作为脑卒中组($n=70$); 同时选取同期门诊就诊的颈动脉斑块患者(排除脑卒中病史)作为非脑卒中组($n=23$)。所有受试者均接受常规超声、超声造影(CEUS)及剪切波弹性成像(SWE)检查。比较两组患者斑块的形态学、增强强度(EI)、曲线下面积(AUC)及杨氏模量值差异, 采用 Logistic 回归分析筛选脑卒中发病的独立危险因素。**结果:** 脑卒中组斑块的厚度更大, 且低回声、不规则形态、纤维帽不完整的比例均更高($P<0.05$)。CEUS 显示, 脑卒中组斑块的 EI 和 AUC 均高于非脑卒中组($P<0.05$)。SWE 测得脑卒中组斑块的杨氏模量值低于非脑卒中组($P<0.05$)。多因素 Logistic 回归分析显示, EI($OR=1.432, 95\%CI: 1.152\sim 1.781$)和 SWE 杨氏模量值($OR=0.921, 95\%CI: 0.883\sim 0.961$)是脑卒中发病的独立影响因素。**结论:** 多模态超声联合应用能全面评估颈动脉斑块的易损性。斑块内新生血管丰富(EI 增高)和质地柔软(SWE 杨氏模量值降低)是脑卒中发病的独立影响因素, 未来需开展前瞻性研究进一步探索其因果关系。

【关键词】 多模态超声; 颈动脉易损斑块; 脑卒中; 超声造影; 剪切波弹性成像; 危险因素

【中图分类号】 R743.3; R445.1 **【文献标志码】** A

Correlation between multimodal ultrasound assessment of carotid vulnerable plaque and the onset of stroke

ZHANG Qing, MA Ning-shuai, WU Jing, YU Li-li

(Department of Ultrasonography, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan, China)

【Abstract】Objective: To investigate the value of multimodal ultrasound technology in assessing the characteristics of carotid vulnerable plaques and analyze its correlation with the onset of ischemic stroke. **Methods:** A total of 93 patients were selected as study subjects, including 70 in the stroke group and 23 in the control group (without a history of stroke). All participants underwent conventional ultrasound, contrast-enhanced ultrasound (CEUS), and shear wave elastography (SWE) examinations. The differences in morphological features, enhanced intensity (EI), area under the curve (AUC), and Young's modulus values of plaques between the two groups were compared. Logistic regression analysis was used to identify independent risk factors for stroke onset. **Results:** The maximum plaque thickness was greater in the stroke group, with a higher proportion of hypoechoic, irregularly shaped, and fibrous cap defects ($P<0.05$). CEUS showed that the EI and AUC of plaques in the stroke group were higher than those in the control group ($P<0.05$). SWE measurements revealed that the Young's modulus values of plaques in the stroke group were lower than those in the control group ($P<0.05$). Multivariate Logistic regression analysis indicated that EI ($OR=1.432, 95\%CI: 1.152\sim 1.781$) and SWE Young's modulus value ($OR=0.921, 95\%CI: 0.883\sim 0.961$) were independent influencing factors for stroke onset. **Conclusion:** The combined application of multimodal ultrasound provides a comprehensive assessment of carotid plaque vulnerability. Rich intraplaque neovascularization (increased EI) and soft plaque texture (decreased SWE Young's modulus value) are independent influencing factors of stroke onset. Prospective studies should be conducted in the future to further explore the causal relationship.

【Key words】 Multimodal ultrasound; Carotid vulnerable plaque; Ischemic stroke; Contrast-enhanced ultrasound (CEUS); Shear wave elastography (SWE); Risk factors

脑卒中是我国首位致残和致死性疾病, 其中缺血性脑卒中是其最常见类型, 占全部脑卒中的 70%

~80%^[1]。研究^[2]证实,颈动脉粥样硬化斑块的形成为缺血性脑卒中的发生密切相关,然而,并非所有斑块都具有同等的风险。斑块的稳定性,即易损性,是决定临床预后的关键因素^[3]。易损斑块通常具有薄纤维帽、大脂质坏死核心、炎症细胞浸润及丰富的新生血管等特点,极易发生破裂、脱落,继而引发血栓栓塞事件^[4]。影像学评估是识别易损斑块的主要手段^[5]。尽管数字减影血管造影、高分辨率磁共振成像等被视为评估斑块特征的参考标准^[6-7],但其有创性、高成本或操作复杂性限制了其广泛应用。超声检查因其无创、简便、可重复及实时等独特优势,已成为筛查和评估颈动脉斑块的首选影像学方法^[8]。超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)通过微泡造影剂可无创地评估斑块内新生血管情况,为揭示斑块的炎症活动提供了功能学信息^[9-10]。剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)则能定量检测斑块的硬度(杨氏模量值),从生物力学角度客观评估纤维帽的机械强度和脂质核心的稳定性^[11-14]。然而,单一超声模态仅能反映斑块易损性的某一个侧面,存在其固有的局限性^[15]。多模态超声融合方案将形态学、功能学和力学特性评估相结合,理论上能够更全面、精准地评估斑块易损性,但目前尚缺乏系统的研究来验证其联合应用的价值。因此,本研究旨在探讨多模态超声参数与脑卒中发病的相关性,以期筛选出影响斑块易损性及脑卒中风险的独立超声影像学指标,为临床早期识别高危患者、制定干预策略提供更为可靠的影像学依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2023年3月至2025年3月川北医学院附属医院收治并经临床确诊为脑卒中的患者作为脑卒中组($n=70$);同时选取同期门诊就诊的颈动脉斑块患者(排除脑卒中病史)作为非脑卒中组($n=23$)。非脑卒中组患者均为因头晕、胸闷、高血压随访等非脑血管疾病就诊,或健康体检时发现颈动脉斑块者,无明确神经系统症状及脑卒中既往史。纳入标准:(1)脑卒中组经头颅CT或MRI确诊为缺血性脑卒中,且颈动脉超声检出斑块;(2)非脑卒中组颈动脉超声检出斑块,无脑卒中病史及神经系统症状;(3)年龄40~80岁,性别不限。排除标准:(1)严重心、肝、肾功能不全;(2)造影剂过敏史;(3)颈动脉重度狭窄($>70\%$)或闭塞;(4)未能完成全部超声检查者。所有研究对象均签署知情同意书,本研究经医院伦理委员会审核批准。

1.2 方法

两组患者均接受同等强度的危险因素系统评估,包括详细采集房颤病史、抗血小板药物(如阿司匹林、氯吡格雷等)使用情况、他汀类药物(如阿托伐他汀、瑞舒伐他汀等)使用情况,以及高血压、糖尿病、吸烟史等其他相关危险因素,确保一般资料收集的一致性与完整性。所有研究对象均接受多模态超声检查,包括常规二维超声、CEUS及SWE。

1.2.1 常规超声检查 用Philips EPIQ 7或Siemens Acuson Sequoia彩色多普勒超声诊断仪,线阵探头频率5~12 MHz。所有患者均仅分析1个目标斑块,斑块选择原则明确如下:(1)脑卒中组:优先选择与缺血性卒中责任血管同侧的“责任斑块”(定义为颈动脉斑块导致血管狭窄 $\geq 50\%$,且与头颅CT/MRI所示梗死灶供血区域一致);若同侧无明确责任斑块或存在多发斑块,则选择最大厚度 ≥ 2.0 mm且满足“低回声/混合回声、形态不规则、纤维帽不完整”中至少两项的“最易损斑块”;(2)对照组:若存在多发斑块,选择最大厚度 ≥ 2.0 mm的斑块;若双侧颈动脉均有斑块,优先选择厚度更大或回声更低(提示易损性更高)的斑块;(3)所有目标斑块均避开钙化灶、血管分叉处伪影区域,确保超声参数测量的准确性。记录斑块最大厚度、回声类型(低回声、混合回声、强回声)、形态(规则/不规则)、纤维帽完整性等参数。

1.2.2 超声造影(CEUS)检查 采用SonoVue造影剂(Bracco公司,意大利),经肘静脉团注2.4 mL后,立即以5 mL生理盐水冲管,实时动态观察斑块内造影剂增强过程,连续记录30 s动态影像并存储。由两名具有5年以上血管超声检查经验的医师(医师A、医师B)采用盲法独立分析影像:在斑块增强最明显区域选取感兴趣区(ROI),避开血管腔及钙化灶,使用超声仪器自带分析软件计算增强强度(enhancement intensity, EI, dB)及EI-时间曲线下面积(AUC)。为评估测量重复性,医师A在1周后对同一批影像再次进行重复测量,分别计算观察者内一致性相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)及观察者间ICC。结果显示, EI及AUC的观察者内ICC分别为0.86、0.84,观察者间ICC分别为0.82、0.80,均提示一致性良好($ICC > 0.75$)。最终数据以两位医师首次测量结果的平均值计入统计。

1.2.3 剪切波弹性成像(SWE) 使用SuperSonic Imagine Aixplorer超声系统,线阵探头频率4~15 MHz,在常规超声定位斑块后,切换至SWE模式,将感兴趣区覆盖斑块实质部分(避开钙化、纤维化及

血管腔),稳定成像 3 s 后冻结图像。由上述两名医师采用盲法独立测量斑块杨氏模量值(kPa),每位医师在同一斑块的不同区域重复测量 3 次,取平均值作为该医师的测量结果;医师 A 在 1 周后对同一批图像进行再次复测。分别计算杨氏模量值的观察者内 ICC 及观察者间 ICC。结果显示,观察者内 ICC 为 0.88,观察者间 ICC 为 0.83,一致性良好 (ICC>0.75)。最终数据以两位医师首次测量平均值计入统计。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析。计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,组间比较采用独立样本 t 检验;计数资料以[$n(\%)$]表示,组间比较采用独立样本 χ^2 检验。筛选易损斑块的独立影响因素采用多因素 Logistic 回归分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者一般资料比较

两组患者在年龄、性别、高血压病史、糖尿病史、吸烟史及血脂水平(LDL-C)等一般资料方面比较,差异均无统计学意义($P > 0.05$)。见表 1。

2.2 两组患者斑块多模态超声特征比较

在常规超声方面,脑卒中组患者斑块的厚度大于非脑卒中组($P < 0.05$),且斑块表现为低回声、不规则形态及纤维帽不完整的比例均高于非脑卒中组($P < 0.05$)。在 CEUS 方面,脑卒中组患者斑块内的 EI 和曲线下面积(AUC)均高于非脑卒中组($P < 0.001$)。在 SWE 方面,脑卒中组斑块的杨氏模量值低于非脑卒中组($P < 0.001$)。见表 2。

2.3 不同亚组脑卒中患者的多模态超声参数比较

在脑卒中组内,男性与女性患者之间在斑块最大厚度、EI、CEUS-AUC 及 SWE 杨氏模量值等核心超声参数上均未表现出差异($P > 0.05$)。同样,在脑卒中组内,吸烟者与非吸烟者之间的上述多模态超声参数比较,差异也无统计学意义($P > 0.05$)。见表 3。

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

资料	脑卒中组 ($n=70$)	非脑卒中组 ($n=23$)	χ^2/t 值	P 值
年龄(岁)	65.34±8.27	63.78±7.91	0.802	0.425
男性	42(60.00)	12(52.17)	0.448	0.503
高血压病史	48(68.57)	13(56.52)	1.116	0.291
糖尿病史	25(35.71)	6(26.09)	0.735	0.391
吸烟史	33(47.14)	9(39.13)	0.450	0.502
LDL-C (mmol/L)	3.15 ± 0.72	2.98 ± 0.68	1.003	0.319

表 2 两组患者颈动脉斑块多模态超声参数比较 [$n(\%)$, $\bar{x} \pm s$]

检查方法与参数	脑卒中组 ($n=70$)	非脑卒中组 ($n=23$)	χ^2/t 值	P 值
常规超声				
最大厚度 (mm)	3.82±0.91	2.45 ± 0.63	6.871	<0.001
低回声斑块	51(72.86)	8(34.78)	11.724	0.001
不规则形态斑块	47(67.14)	7(30.43)	9.832	0.002
纤维帽不完整	43(61.43)	6(26.09)	8.990	0.003
超声造影 (CEUS)				
EI (dB)	12.45±3.27	6.78±2.15	8.094	<0.001
曲线下面积 (AUC)	485.36±125.42	287.59±89.67	7.543	<0.001
剪切波弹性成像 (SWE)				
杨氏模量值 (kPa)	35.68±12.47	78.25±18.36	-11.593	<0.001

表 3 脑卒中组内不同性别及吸烟状态患者的超声参数比较 ($\bar{x} \pm s$)

参数	性别		t 值	P 值	吸烟		t 值	P 值
	男 ($n=42$)	女 ($n=28$)			吸烟 ($n=33$)	不吸烟 ($n=37$)		
最大厚度(mm)	3.91±0.95	3.68±0.84	1.022	0.311	3.88±0.97	3.76±0.86	0.538	0.592
EI(dB)	12.68±3.41	12.11±3.02	0.701	0.486	12.71±3.55	12.22±2.98	0.623	0.536
CEUS-AUC	497.23±130.15	468.51±118.32	0.937	0.352	492.18±132.47	478.91±119.64	0.442	0.660
杨氏模量(kPa)	34.92±13.15	36.84±11.49	-0.623	0.536	35.21±13.42	36.11±11.68	-0.299	0.766

2.4 颈动脉易损斑块与脑卒中关联的多因素 Logistic 回归分析

以是否发生脑卒中为因变量(是=1,否=0),将单因素分析中有统计学差异的变量(斑块厚度、回声类型、EI、杨氏模量)作为自变量进行多因素 Logistic 回归分析。结果显示,EI($OR=1.432,95\% CI: 1.152 \sim 1.781$)和剪切波杨氏模量值($OR=0.921,95\% CI: 0.883 \sim 0.961$)是脑卒中发病的独立影响

因素($P < 0.01$)。见表 4。

表 4 影响脑卒中发病的多因素 Logistic 回归分析

变量	β 值	Wald 值	P 值	OR 值	95% CI
EI	0.359	10.217	0.001	1.432	1.152~1.781
杨氏模量值	-0.082	13.894	<0.001	0.921	0.883~0.961
斑块厚度	0.271	2.875	0.090	1.311	0.958~1.794
低回声斑块	0.714	3.211	0.073	2.041	0.932~4.471

3 讨论

缺血性脑卒中作为我国首位致残致死性疾病,占全部脑卒中的70%~80%^[1],其核心致病环节是颈动脉易损斑块的破裂与血栓栓塞^[16]。然而,临床对“易损斑块”的评估长期面临困境:传统数字减影血管造影(DSA)虽能显示血管狭窄程度,却无法反映斑块内部病理特征;高分辨率磁共振成像(HR-MRI)虽可评估纤维帽厚度、脂质核心大小等^[6],但因设备成本高、检查耗时久,难以作为基层筛查手段;常规超声仅能提供斑块厚度、回声类型等形态学信息,无法量化斑块的炎症活性与生物力学稳定性^[8]。这种“评估维度单一”与“临床需求全面”的矛盾,凸显了开发无创、多维度评估工具的迫切性。本研究通过联合常规超声、CEUS与SWE,系统分析颈动脉斑块的形态学、功能学及生物力学特征,不仅验证了多模态超声对易损斑块的评估价值,更从病理机制层面阐明了超声参数与脑卒中发病的内在关联,为临床风险分层提供了可落地的影像学解决方案。

本研究发现,脑卒中组斑块的EI高于非脑卒中组,且多因素分析证实EI是脑卒中的独立影响因子。其本质是EI与斑块内新生血管病理特征的深度耦合。斑块内新生血管并非单纯的“血管增生”,而是斑块进入“易损阶段”的核心标志。从病理机制看,当动脉粥样硬化进展至炎症期,巨噬细胞分泌的血管内皮生长因子会诱导新生血管从外膜向斑块内部生长,这些新生血管具有内皮细胞连接松散、基底膜不完整的特点^[17-18]:一方面,其高通透性为单核细胞、脂质颗粒的浸润提供了“通道”,加速脂质核心扩大与纤维帽降解;另一方面,血管壁的结构缺陷使其极易破裂,引发斑块内出血(intraplaque hemorrhage,IPH)^[19]。van Dam-Nolen等^[19]研究指出,含IPH的颈动脉斑块患者复发缺血性卒中或短暂性脑缺血发作的风险较无IPH者升高,而EI正是通过微泡造影剂的渗漏程度,间接量化了新生血管的密度与通透性,高EI意味着更高的IPH风险,进而增加斑块破裂与血栓形成的概率。黄玮等^[10]的研究也印证了这一逻辑,其发现颈动脉斑块CEUS的“高增强模式”与TIA患者后续脑卒中发生风险相关,与本研究结果形成跨中心呼应。值得注意的是,常规超声中的“低回声斑块”虽在单因素分析与脑卒中有关联,但多因素分析中未成为独立影响因子,这恰恰说明“低回声”仅为斑块易损性的间接提示,而EI直接靶向“新生血管”这一核心病理环节,能更精准地捕捉斑块的炎症活性与出血风险,填补了常规超声无法评估斑块内部“功能状态”的空白。

本研究中,脑卒中组斑块的SWE杨氏模量值低于非脑卒中组,且多因素分析显示,其为脑卒中的独立保护因素,即杨氏模量值每降低1kPa,脑卒中风险升高约8%。该结果的核心是生物力学机制与斑块病理结构的深度关联,斑块的抗破裂能力主要取决于纤维帽的机械强度,而纤维帽的强度又由其胶原含量与交联程度决定^[14]。当纤维帽中I型胶原含量减少、厚度变薄,或脂质核心占比超过40%时,斑块整体的弹性模量会降低,在脉压波动产生的剪切力作用下,纤维帽易发生裂隙甚至完全破裂,释放脂质核心成分触发血栓形成^[14,20]。

Marlevi等^[14]通过HR-MRI验证发现,SWE杨氏模量值与斑块纤维帽厚度呈正相关,与脂质核心体积呈负相关,证实低杨氏模量值对应的斑块更易被HR-MRI判定为“易损斑块”。朱珊等^[12]的研究进一步拓展了这一结论,其发现颈动脉斑块的杨氏模量值与冠状动脉病变Gensini评分负相关。提示动脉粥样硬化斑块的力学特性具有跨血管床的一致性,也为本研究中杨氏模量值影响脑卒中发生的合理性提供了“系统生物学”层面的支持。相较于常规超声对斑块“软/硬”的主观判断,杨氏模量值将生物力学特征转化为客观量化指标,有效减少了操作者间的误差。刘波等^[11]研究也证实,SWE参数联合生物标志物可提升脑梗死预测效能,进一步凸显了力学量化指标的临床价值。

本研究的核心创新在于突破了单一超声模态的“信息孤岛”问题,构建了“形态学-功能学-生物力学”三位一体的评估体系。从临床实践角度看,这种联合方案具有优势:(1)评估维度的互补性:常规超声提供斑块厚度、形态等基础信息,CEUS通过EI揭示新生血管这一“炎症活性指标”,SWE通过杨氏模量值量化力学稳定性,三者结合可避免“漏判”(如小而硬的斑块可能稳定,大而软且新生血管丰富的斑块才是高危)与“误判”(如低回声斑块若无高EI与低杨氏模量,未必是易损斑块);(2)设备的普适性:CEUS与SWE均基于现有超声平台,无需额外购置高端设备,尤其适合基层医疗机构开展大规模筛查,Golemati等^[8]的研究也证实,超声技术在社区卒中预防中的高可及性。

此外,多因素分析中“斑块厚度”未成为独立影响因子,这一结果挑战了“斑块越大风险越高”的传统认知,也印证了“易损性取决于斑块成分与力学特性,而非单纯大小”的现代观点。Bos等^[4]研究指出,小而富含新生血管、脂质核心大的斑块,其脑卒中风险远高于大而钙化明显、新生血管少的斑块。与本研究结论高度一致,进一步证实多模态超声联

合评估能更深刻地揭示斑块的易损本质。

尽管本研究为多模态超声的临床应用提供了初步循证依据,但仍存在三个方面需完善。第一,本研究为单中心横断面研究,样本量虽满足初步分析需求,但横断面设计仅能建立参数与脑卒中的相关性,无法确立“EI 升高/杨氏模量降低”与“脑卒中发生”的因果关系。未来需开展多中心前瞻性队列研究,以 EI 和杨氏模量值为基线指标,随访 1~3 年,观察其对新发脑卒中的预测价值,同时纳入 Framingham 风险评分等传统危险因素,构建“超声参数+临床指标”的联合预测模型^[19];第二,本研究未获取颈动脉内膜剥脱术(CEA)或尸检标本,无法将 EI 与病理新生血管密度、杨氏模量值与纤维帽胶原含量进行直接关联。Lioznovs 等^[17]的研究已证实,CEUS 参数与斑块病理特征的相关性,未来可通过收集 CEA 标本,建立超声参数与病理指标的“量化对应关系”,提升超声评估的病理解释力;第三,本研究未纳入斑块表面溃疡、斑块内钙化分布等易损特征,这些指标也可能影响脑卒中风险。未来可将这些指标纳入多模态体系,结合人工智能技术开发自动识别算法,进一步优化风险预测模型。

综上,多模态超声联合评估可无创、全面、量化地揭示颈动脉斑块的易损特性。其中,超声造影 EI 与剪切波弹性成像杨氏模量值是脑卒中发生的独立影像学标志物。该联合方案有望成为一种高效的筛查工具,用于识别高风险人群,为临床早期干预、制定个体化防治策略提供关键影像学依据,从而有效降低脑卒中的发病率。

参考文献

- [1] Herpich F, Rincon F. Management of acute ischemic stroke [J]. *Critical Care Medicine*, 2020, 48(11):1654-1663.
- [2] Golemati S, Cokkinos DD. Recent advances in vascular ultrasound imaging technology and their clinical implications [J]. *Ultrasonics*, 2022, 119:106599.
- [3] Zhou Y, Yang P, He H, et al. DAB2IP: unifying cardiovascular pathogenesis and cardiovascular brain crosstalk [J]. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 2026, 13:1660204.
- [4] Bos D, Arshi B, van den Bouwhuijsen QJA, et al. Atherosclerotic carotid plaque composition and incident stroke and coronary events [J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2021, 77(11):1426-1435.
- [5] van der Toorn JE, Bos D, Ikram MK, et al. Carotid plaque composition and prediction of incident atherosclerotic cardiovascular disease [J]. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 2022, 15(3):e13602.
- [6] 董雪佳, 刘雅虹, 海俊杰, 等. 高分辨 MRI 与超声造影在颈动脉

- 粥样硬化斑块稳定性中的应用 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2023, 31(8):803-807.
- [7] Li S, Wang Y, Zhu X, et al. Lipid on stroke in intracranial artery atherosclerotic stenosis: a mediation role of glucose [J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2024, 15:1322114.
- [8] Golemati S, Patelaki E, Gastouniotti A, et al. Motion synchronisation patterns of the carotid atheromatous plaque from B-mode ultrasound [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10:11221.
- [9] 王渠, 康彧, 何兰芳, 等. 超声造影对糖尿病足微血管损害与中医辨证分型的相关性研究 [J]. *中国超声医学杂志*, 2022, 38(3):333-337.
- [10] 黄玮, 聂维齐, 李晓庆, 等. 颈动脉斑块 CEUS 增强模式与 TIA 患者脑卒中发生的相关性 [J]. *中国超声医学杂志*, 2022, 38(2):121-124.
- [11] 刘波, 郭晓敏, 袁丹. 剪切波弹性成像联合循环血中性粒细胞对粥样硬化性脑梗死的预测价值 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2023, 31(6):658-662.
- [12] 朱珊, 孙楠, 陶宏宇, 等. 剪切波弹性成像评估颈动脉斑块与冠状动脉病变程度的相关性 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2023, 31(4):326-331.
- [13] Qu Y, Ma T, He Y, et al. Miniature probe for mapping mechanical properties of vascular lesions using acoustic radiation force optical coherence elastography [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:4731.
- [14] Marlevi D, Mulvagh SL, Huang R, et al. Combined spatiotemporal and frequency-dependent shear wave elastography enables detection of vulnerable carotid plaques as validated by MRI [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10:403.
- [15] Wu Y, Li X, Wang Z, et al. Real-time elastography and contrast-enhanced ultrasound for evaluating adventitia in the early diagnosis of vulnerable plaques: an exploratory study based on histopathology [J]. *Translational Stroke Research*, 2024, 15(3):545-555.
- [16] Nies KPH, Aizaz M, van Dam-Nolen DHK, et al. Signal intensity and volume of carotid intraplaque hemorrhage on magnetic resonance imaging and the risk of ipsilateral cerebrovascular events: The Plaque At RISK (PARISK) study [J]. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 2024, 26(2):101049.
- [17] Lioznovs A, Radzina M, Saule L, et al. What is the added value of carotid CEUS in the characterization of atherosclerotic plaque? [J]. *Medicina*, 2024, 60(3):375.
- [18] Wen C, Lan Q, Wang Y, et al. Interferon signaling pathways in health and disease [J]. *Molecular Biomedicine*, 2025, 6(1):135.
- [19] van Dam-Nolen DHK, Truijman MTB, van der Kolk AG, et al. Carotid plaque characteristics predict recurrent ischemic stroke and TIA the PARISK (plaque At RISK) study [J]. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 2022, 15(10):1715-1726.
- [20] Chen L, Shi Y, Xiao D, et al. NR4A1 deficiency promotes carotid plaque vulnerability by activating integrated stress response via targeting Bcat1 [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2025, 82(1):91.

(收稿日期: 2025-09-25

修回日期: 2025-11-09)