

超声影像特征在预测颈动脉斑块内出血中的价值研究

高 帅, 武 荣

鄂尔多斯市中心医院超声医学科, 内蒙古 鄂尔多斯

收稿日期: 2025年6月9日; 录用日期: 2025年7月2日; 发布日期: 2025年7月11日

摘 要

目的: 本研究旨在评估超声影像学特征, 包括斑块溃疡(PU)、临近腔黑区(JBA)和标准化壁指数(NWI)在预测颈动脉粥样硬化斑块中的斑块内出血(IPH)方面的价值, 以高分辨率磁共振血管壁成像(HRMR-VWI)作为参考标准。方法: 本研究对56名患者的70个颈动脉斑块进行回顾性分析, 这些患者均接受了常规超声、对比增强超声(CEUS)和HRMR-VWI检查。记录了斑块的超声特征, 包括斑块回声特性、PU、JBA、NWI和管腔狭窄情况。采用逻辑回归分析和受试者工作特征(ROC)曲线分析评估这些特征对IPH的诊断和预测价值。结果: PU、JBA和NWI被确认为IPH的独立风险因素, 其比值比(OR)分别为7.43 (95% CI: 2.15~25.67, $P = 0.002$)、4.90 (95% CI: 1.42~16.92, $P = 0.012$)和2.55 (95% CI: 1.19~5.45, $P = 0.016$)。在各个单独的预测因子中, NWI表现出了最高的诊断性能(AUC: 0.78, 95% CI: 0.67~0.89)。PU、JBA和NWI联合诊断模型显著提高了性能, AUC为0.86 (95% CI: 0.77~0.95), 敏感性为81.82%, 特异性为78.38%。结论: 超声影像学特征, 尤其是PU、JBA和NWI, 在预测颈动脉斑块中的IPH方面具有重要价值。这些指标的联合分析显著提高了诊断准确性。研究结果突出了超声作为一种具有成本效益、无创的工具, 在早期识别IPH和评估中风风险方面的潜力。

关键词

斑块内出血, 颈动脉粥样硬化斑块, 超声影像

A Study on the Value of Ultrasound Imaging Features in Predicting Intraplaque Hemorrhage in Carotid Arteries

Shuai Gao, Rong Wu

Department of Ultrasound Medicine, Ordos Central Hospital, Ordos Inner Mongolia

Received: Jun. 9th, 2025; accepted: Jul. 2nd, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

Objective: The purpose of this study is to evaluate the value of ultrasound imaging features, including plaque ulcer (PU), adjacent cavity black area (JBA) and standardized wall index (NWI), in predicting intra-plaque hemorrhage (IPH) in carotid atherosclerotic plaques, with high-resolution magnetic resonance angiography (HRMR-VWI) as the reference standard. **Methods:** 70 carotid plaques in 56 patients were retrospectively analyzed. These patients were examined by conventional ultrasound, contrast-enhanced ultrasound (CEUS) and HRMR-VWI. The ultrasonic characteristics of plaque were recorded, including the echo characteristics of plaque, PU, JBA, NWI and lumen stenosis. Logistic regression analysis and ROC curve analysis were used to evaluate the diagnostic and predictive value of these characteristics for IPH. **Results:** PU, JBA and NWI were identified as independent risk factors of IPH, and their odds ratios (OR) were 7.43 (95% CI: 2.15~25.67, $P = 0.002$), 4.90 (95% CI: 1.42~16.92, $P = 0.012$) and respectively. Among the individual predictors, NWI showed the highest diagnostic performance (AUC: 0.78, 95% CI: 0.67~0.89). The combined diagnosis model of PU, JBA and NWI significantly improved the performance, with AUC of 0.86 (95% CI: 0.77~0.95), sensitivity of 81.82% and specificity of 78.38%. **Conclusion:** Ultrasound imaging features, especially PU, JBA and NWI, are of great value in predicting IPH in carotid plaque. The combined analysis of these indexes significantly improved the diagnostic accuracy. The results highlight the potential of ultrasound as a cost-effective and non-invasive tool in early identification of IPH and assessment of stroke risk.

Keywords

Intra-Plaque Hemorrhage, Carotid Atherosclerotic Plaque, Ultrasound Image

Copyright © 2025 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

脑卒中是全球范围内的重大公共卫生问题,其中约 20%的缺血性中风由颈动脉粥样硬化性斑块(CAP)引起的栓塞所致。欧洲和美国的临床指南在预防脑卒中时,主要依据颈动脉狭窄程度进行定量评估。这种方法通过分级评估颈动脉粥样硬化的严重程度,从而选择相应的预防策略。然而,随着影像技术(如超声和 CT)的发展,常规监测颈动脉斑块本身的特征成为可能。越来越多的研究表明,某些类型的颈动脉斑块,称为易损斑块,无论其狭窄程度如何,都可能导致缺血性脑卒中[1]。

易损斑块通常指的是非闭塞性且无症状的动脉粥样硬化斑块,可能突然转变为闭塞性并出现症状。研究指出, CAP 的某些形态特征,如斑块内新生血管(IPN)、斑块内出血(IPH)、斑块纤维帽破裂及溃疡形成,以及存在大的脂质坏死核心(LRNC)等[2],均与脑卒中风险的增加相关。除了需要对造成严重狭窄的 CAP 进行临床积极干预外,具有上述特征的 CAP 由于其不稳定性,显著增加了脑血管事件的风险。其中, IPH 被认为是斑块从稳定向不稳定转变的重要驱动因素,其发生大大增加了斑块破裂及脑血管事件

的风险。多数学者认为, IPH 的形成源于 IPN 的破裂, 导致红细胞渗漏至斑块内。这一过程在缺氧及各种炎症刺激下, 新生血管管腔不成熟且周围基底膜受损, 进一步诱发炎症反应和新的新生血管形成, 从而增加斑块破裂的可能性。

高分辨率磁共振血管壁成像(HRMR-VWI)是检测 IPH 的最佳非侵入性影像学方法。通过识别血红蛋白的氧化状态, HRMR-VWI 利用 T1 加权成像、MPRAGE、脂肪抑制涡轮回波序列等技术, 能够在 T1 加权图像中精确显示 IPH 的高信号特征。同时, HRMR-VWI 结合黑血和亮血技术, 可清晰展现血管壁结构和斑块成分。Meta 分析显示, HRMR-VWI 诊断 IPH 的敏感性为 87%, 特异性为 92%, ROC 曲线下面积高达 0.95, 表明其具有高度的诊断准确性。同时, HRMR-VWI 检测到的 IPH 与未来缺血性卒中的风险显著相关(风险比高达 4.59), 成为卒中风险预测的重要指标。因此, MRI 不仅能够精确诊断 IPH, 还可用于卒中风险的评估及个体化治疗方案的制定[3]。

超声检查作为 CAP 检查的一线手段, 能够识别多种斑块特征; 例如, 常规二维超声(2D-US)可以观察斑块纤维帽的完整性, 结合超声造影(CEUS)可准确诊断斑块溃疡(PU) [4]。对于非严重钙化的斑块, 超声还可观察斑块内部回声, 分为低回声、等回声和高回声等不同类型。研究表明, 斑块回声越低, 越有可能为易损斑块。此外, 超声还可观察斑块内是否存在极低回声区(JBA), 这可能预示 IPH、LRNC 或斑块破裂血栓的形成[5]。超声造影(CEUS)作为超声检查的重要补充, 能够为临床提供更多 CAP 信息。多项研究证实, CEUS 可清晰显示 IPN, 并根据造影结果准确判断其存在与否。此外, CEUS 能够清晰勾勒斑块形态, 对斑块纤维帽完整性的诊断较二维超声更为敏感, 即使纤维帽的微小断裂也可做出正确诊断。然而, IPH 的诊断一直是超声检查的难点, 超声尤其难以有效区分 IPH 与 LRNC。除了颈动脉内膜剥脱术后的组织病理学检测, 目前 IPH 的诊断主要依赖于 HRMR-VWI 技术。

CAP 的发生和发展是一个连续动态的过程, 其形态学特征之间存在复杂的关联。本研究的主要目的是通过识别 CAP 的超声影像特征, 预测颈动脉 IPH 的存在, 其中 IPH 以 HRMR-VWI 检测结果作为金标准。通过本研究, 旨在提升超声在 CAP 评估中的应用价值, 促进卒中风险的早期识别与干预。

2. 研究对象与方法

本研究遵循《赫尔辛基宣言》(2013 年修订)进行, 已获鄂尔多斯市中心医院伦理委员会批准(批准号 2023-054)。伦理委员会免除了本次回顾性分析的个人同意要求。

2.1. 研究对象及分组

本研究为回顾性研究, 纳入了 2023 年 5 月至 2024 年 9 月期间在鄂尔多斯市中心医院接受常规二维超声(2D-US)、超声造影(CEUS)及高分辨率磁共振血管壁成像(HRMR-VWI)检查的 56 例颈动脉斑块患者, 共收集了 70 个颈动脉斑块的数据。在未知 HRMR-VWI 结果的情况下, 记录了患者颈动脉斑块的超声特征, 包括斑块回声(PE)、斑块内极低回声区(JBA)、斑块最大厚度(MPT)、斑块最大长度(MPL)、斑块内新生血管(IPN)、斑块溃疡(PU)、管腔狭窄率(LSR)及斑块负荷指标标准化管壁指数(NWI)。根据 HRMR-VWI 结果, 将患者分为出血组($n=33$)和未出血组($n=37$)。同时, 收集了两组患者的基本临床资料。纳入标准包括: 确诊为颈动脉粥样硬化斑块; 经过初步筛查发现颈动脉斑块, 且斑块最大厚度 ≥ 2.5 mm; 年龄 ≥ 18 岁且身体状况允许进行 CEUS 检查; 斑块钙化范围占比 $< 50\%$; 无超声造影禁忌症(如对造影剂六氟化硫过敏); 签署知情同意书且能够配合检查过程。排除标准包括: 对造影剂过敏或有严重过敏史; 严重心肺功能不全; 近期发生急性心肌梗死、脑卒中等急性疾病或全身状况不稳定; 妊娠或哺乳期女性; 无法配合检查(如无法保持固定体位或存在严重运动障碍); 以及存在造影剂禁忌症或因静脉输液困难无法完成造影剂注入的患者。

2.2. 检查方法

2.2.1. 超声检查

本研究使用的超声诊断仪器包括 Philips EPIQ 7C、Mindray Resona 9 及 Canon Aplio i900, 均使用线阵探头, 频率设定为 4~15 MHz。扫描范围从锁骨上方起始至颌下区域, 对双侧颈动脉进行全面扫描, 评估斑块的大小、位置、数量、回声类型、表面特征及狭窄程度。符合条件的斑块随后进行 CEUS 检查。造影剂选用意大利 Bracco 公司生产的 SonoVue, 使用 5 ml 0.9%氯化钠溶液稀释, 经充分振荡制备成 5 mg/ml 的白色微泡悬浮液。通过肘正中静脉注射 2.0 ml 造影剂, 随后注入 5 ml 0.9%氯化钠溶液冲管。检查过程中连续记录动态图像 120 秒并存储以供后续分析。CEUS 主要用于确定有无 IPN, 有无 PU, 同时结合 2D-US 更好的判断斑块大小、形态及管腔狭窄程度等特征。检查结果由两名具有≥5 年工作经验的超声科医生独立判定, 若有分歧, 通过讨论达成一致意见。

2.2.2. 高分辨率磁共振血管壁成像(HRMR-VWI)

使用 SIEMENS 3.0T 磁共振扫描仪及 32 通道头颈联合线圈。患者仰卧位, 扫描范围覆盖颈总动脉起始至颌下段, 包括主动脉弓至腓胝体上方。常规扫描序列包括 T1 加权、T2 加权及质子密度加权成像。针对斑块区域, 使用 T1 SPACE、T1 SPACE + C、2D TSE T1 及 T2 TSE FS 序列进行黑血成像, 重点分析斑块内部结构。影像数据由两名具有 10 年以上经验的放射科医师独立评估, 特别关注斑块内出血(IPH)、纤维帽破裂及脂质核心等高危特征, 若有分歧, 通过讨论达成一致意见。

2.3. 判定标准

2.3.1. HRMR-VWI 中 IPH 的判定

由两名具有≥10 年工作经验的放射科医师独立分析评估。若结论一致, 则确定结果; 若存在分歧, 通过讨论协商达成一致。IPH 在 HRMR-VWI 中通常表现为与周围纤维帽和脂质核心区分明显的相对边界清晰区域, 在 T1 加权成像(如 TOF-MRA 或 MPRAGE 序列)中呈高信号强度, 信号强度至少为正常肌肉组织的 1.5 倍或更高。

2.3.2. 超声影像特征的判定

斑块回声(PE): 分为低回声、等回声和高回声三类。低回声斑块内部回声低于内膜层; 等回声斑块内部回声与内膜层一致; 高回声斑块内部回声等于或略高于外膜层。斑块内极低回声区(JBA) [6]: 定义为经过图像归一化处理后, 斑块内部灰度值 < 25 的像素区域, 肉眼可见斑块内不规则的极低回声区。由两名具有≥5 年工作经验的超声科医生独立完成判定, 若有分歧, 通过讨论达成一致意见。斑块最大厚度(MPT)与最大长度(MPL): 分别在横切面和纵切面上测量。横切面选取显示斑块最大横切面积的图像, 垂直于血管壁方向测量 MPT; 纵切面选取显示斑块全貌的图像, 沿血管轴向测量 MPL。所有测量均在适当放大图像条件下进行, 以确保精确性和重复性。斑块内新生血管(IPN): 通过 CEUS 判定, 若观察到斑块内≥3 个微泡运动, 则判定存在新生血管; 否则为无新生血管。斑块溃疡(PU): 定义为斑块表面纤维帽破裂或凹陷形成深度超过 2 毫米的小腔隙, 且腔隙与血管腔相通。判定依据为横切面和纵切面二维超声及 CEUS 均观察到溃疡的存在。管腔狭窄率(LSR): 依据 2003 年北美放射年会颈动脉狭窄超声评估标准分类: 轻度狭窄: 狭窄率 $< 50\%$, $PSV < 125$ cm/s; 中度狭窄: 狭窄率 $50\% \sim 69\%$, 125 cm/s $< PSV < 230$ cm/s; 重度狭窄: 狭窄率 $70\% \sim 99\%$, $PSV \geq 230$ cm/s [7]。标准化管壁指数(NWI): 在常规超声检查中通过目标斑块最大横切面测量, 使用描述工具勾勒并计算血管最大横截面积(S1)和管腔面积(S2), 按照公式 $NWI = (S1 - S2)/S1$ 计算。当二维图像中管腔边界显示不清晰时, 借助彩色多普勒成像辅助判定管腔面积(S2)。所有测量均在适当放大图像条件下进行, 以提高准确性和可靠性。

2.4. 统计学分析

使用 SPSS 26.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 软件进行统计分析。正态性检验采用 Shapiro-Wilk 检验, 符合正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差($X \pm SD$)表示, 两组均数间比较采用 t 检验。计数资料采用率进行统计描述, 统计推断采用卡方检验。将单因素分析中具有统计学差异的变量纳入多因素 Logistic 逐步回归分析, 以探讨影响出血发生的危险因素。采用受试者工作特征曲线(ROC 曲线)评估 PU、JBA、SWI 及其联合对出血的诊断预测价值。所有统计分析均采用双侧检验, 检验水准设定为 $\alpha = 0.05$ 。

3. 结果

3.1. 临床资料比较

在一般临床特征的比较中, IPH 组($n = 33$)与非 IPH 组($n = 37$)在性别分布、BMI、糖尿病及高脂血症的患病率方面差异均无统计学意义(P 值分别为 1.000、0.987、0.958 和 0.417)。然而, IPH 组患者的平均年龄(69.09 ± 7.20 岁)显著高于非 IPH 组(65.14 ± 8.26 岁), 差异具有统计学意义($P = 0.037$)。此外, 高血压的患病率在 IPH 组(75.76%)较非 IPH 组(54.05%)有所升高, 但差异未达到统计学显著性($P = 0.059$) (表 1)。

Table 1. Comparison of clinical characteristics of IPH and Non-IPH groups

表 1. 出血组和非出血组基本特征比较

	出血组($n = 33$)	非出血组($n = 37$)	χ^2/t 值	P 值
性别, n (%)			0.000	1.000
男性	30 (90.91)	34 (91.89)		
女性	3 (9.09)	3 (8.11)		
年龄, 岁	69.09 ± 7.20	65.14 ± 8.26	2.124	0.037
BMI, kg/m^2	24.42 ± 2.29	24.43 ± 1.92	0.016	0.987
糖尿病, n (%)	10 (30.30)	11 (29.73)	0.003	0.958
高血压, n (%)	25 (75.76)	20 (54.05)	3.579	0.059
高脂脂, n (%)	21 (63.64)	20 (54.05)	0.660	0.417

3.2. 超声影像特征比较

在超声影像特征比较中, 出血组与未出血组在多个指标上存在显著差异。相较于未出血组, 出血组的斑块回声普遍更低($P < 0.001$), 这与之前的研究一致, 斑块回声越低与出血的相关性越高。斑块溃疡(PU)形成在出血组中的发生率显著高于未出血组(72.73% vs. 24.32%, $P < 0.001$), 表明斑块表面破裂可能是 IPH 的重要特征。此外, 极低回声区(JBA)在出血组中的检出率也显著升高(69.70% vs. 32.43%, $P = 0.002$)。在管腔狭窄程度方面, 出血组中重度狭窄的比例显著高于未出血组(36.36% vs. 18.92%, $P = 0.022$)。标准化管壁指数(NWI)和斑块最大厚度(MPT)在出血组中均显著高于未出血组(NWI: 0.84 ± 0.08 vs. 0.73 ± 0.10 , $P < 0.001$; MPT: 4.79 ± 1.10 mm vs. 4.21 ± 0.63 mm, $P = 0.010$)。然而, 斑块内新生血管(IPN)和斑块最大长度(MPL)在两组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。上述结果表明, 斑块回声低、PU、JBA、高 NWI 及较大 MPT 可能是预测颈动脉斑块出血的关键超声特征(表 2)。

Table 2. Comparison of ultrasound characteristics of IPH and Non-IPH groups**表 2.** 出血组和非出血组超声特征比较

	出血组(n = 33)	非出血组(n = 37)	χ^2/t 值	P 值
PE, n (%)			-	<0.001
低回声	27 (81.82)	15 (40.54)		
等回声	1 (3.03)	19 (51.35)		
高回声	5 (15.15)	3 (8.11)		
PU, n (%)			16.400	<0.001
无溃疡	9 (27.27)	28 (75.68)		
有溃疡	24 (72.73)	9 (24.32)		
IPN, n (%)			2.296	0.130
无新生血管	26 (78.79)	23 (62.16)		
有新生血管	7 (21.21)	14 (37.84)		
JBA, n (%)			9.689	0.002
无极低回声区	10 (30.30)	25 (67.57)		
有极低回声区	23 (69.70)	12 (32.43)		
LSR			7.667	0.022
轻度狭窄	8 (24.24)	21 (56.76)		
中度狭窄	13 (39.39)	9 (24.32)		
重度狭窄	12 (36.36)	7 (18.92)		
SWI	0.84 ± 0.08	0.73 ± 0.10	4.512	<0.001
MPT	4.79 ± 1.10	4.21 ± 0.63	2.663	0.010
MPL	24.12 ± 8.59	23.39 ± 9.37	0.338	0.737

3.3. 超声影像特征对 IPH 的独立影响及预测价值

为控制潜在混杂因素的影响,我们将单因素分析中 $P < 0.1$ 的变量,包括年龄、高血压、斑块回声(PE)、斑块溃疡(PU)、极低回声区(JBA)、管腔狭窄率(LSR)、斑块最大厚度(MPT)及标准化管壁指数(NWI),一同纳入多因素 Logistic 逐步回归模型。分析结果显示,在校正了其他变量后,年龄($P > 0.05$)和高血压($P > 0.05$)等临床特征并未表现为 IPH 的独立危险因素。最终模型确定,斑块溃疡(PU)、极低回声区(JBA)及标准化管壁指数(NWI)是 IPH 发生的独立危险因素(见表 3)。其中,PU 的 OR 值为 7.43 (95% CI: 2.15~25.67, $P = 0.002$),提示存在溃疡的斑块发生 IPH 的风险显著增加;JBA 的 OR 值为 4.90 (95% CI: 1.42~16.92, $P = 0.012$),表明斑块内存在极低回声区显著增加 IPH 的风险;NWI 的 OR 值为 2.55 (95% CI: 1.19~5.45, $P = 0.016$),表明 NWI 升高与 IPH 的发生显著相关。

在诊断预测价值方面,ROC 曲线分析结果显示,PU、JBA 和 NWI 的曲线下面积(AUC)分别为 0.74

(95% CI: 0.62~0.86)、0.69 (95% CI: 0.56~0.81)和 0.78 (95% CI: 0.67~0.89), 其中 NWI 单独诊断的 AUC 最高, 表明其具有较强的预测性能。三者联合诊断时, AUC 进一步提高至 0.86 (95% CI: 0.77~0.95), 灵敏度为 81.82%, 特异度为 78.38%, 显著优于单一指标的诊断性能(表 3)。

Table 3. Multivariate stepwise logistic regression analysis of bleeding risk factors and their predictive value
表 3. 影响出血发生的多因素 Logistic 逐步回归分析及预测价值

	B	S.E	P-value	ROC Area (95% CI)	截断值	敏感性(%)	特异性(%)	约登指数
PU	2.01	0.63	0.002	0.74 (0.62, 0.86)	0.50	72.72	75.68	0.48
JBA	1.59	0.63	0.012	0.69 (0.56, 0.81)	0.50	69.70	67.57	0.37
NWI*	0.94	0.39	0.016	0.78 (0.67, 0.89)	0.79	75.76	75.68	0.51
联合	--	--	--	0.86 (0.77, 0.95)	--	81.82	78.38	0.60

4. 讨论

尽管 CT 和 MRI 影像学检查已经对 IPH 有了较多研究,HRMR-VWI 被认为是当前非侵入性诊断 IPH 的最佳影像学方法[8], 但其高昂的费用、较长的检查时间及对患者体位的严格要求限制了其广泛应用。相比之下, 超声检查操作简便、快捷且费用低廉, 甚至可在床旁进行, 极大地方便了行动不便的脑梗死患者的诊断与监测。超声作为颈动脉斑块(CAP)检查的最常用一线手段[9], 其在预测 IPH 方面的潜力尚未得到充分探索。本研究首次深入探讨了超声影像特征预测颈动脉斑块内出血的能力。

研究已证实[10], HRMR-VWI 检测到的 IPH 患者, 脑血管意外事件发生率大大提高, 可见 IPH 与脑卒中密切相关, 早期、及时的识别 IPH 可以最大程度的受益患者。多数学者认为, IPH 是源于斑块内 IPN 的破裂, 导致红细胞渗漏到斑块内, 而当 IPN 破裂时, 超声造影作为血管内显像并不能显示 IPN。本研究中出血组相较于未出血组斑块厚度更厚($P = 0.010$), 管腔狭窄程度更加严重($P = 0.022$), 理论上较大的斑块内新生血管应该更多, 有趣的是, 尽管理论上更大的斑块可能含有更多的新生血管, 本研究却发现出血组的 IPN 检出率并未显著高于非出血组($P = 0.13$), 甚至数值上更低。对于这一现象, 我们提出一种可能的假说: IPH 的发生源于 IPN 的破裂, 因此在已经发生出血的斑块中, 部分新生血管可能已经破裂、闭塞, 导致 CEUS 无法探及。然而, 这仅仅是一种推测性的解释, 目前尚缺乏直接的影像学或病理学证据支持。正如一些研究所指出的, IPN 的形态、分布和密度可能比其存在与否更为重要[11]。未来的研究应致力于结合超微血管成像(Superb Microvascular Imaging, SMI)等更先进的超声技术, 或与组织病理学结果进行对照分析, 以深入探究 IPH 与 IPN 之间复杂的动态演变关系。IPH 发生后, 斑块往往迅速进展, 体积增大, 表现为 NWI 明显升高。NWI 作为斑块负荷和管腔狭窄的综合评价指标, 已在 CT 和 MRI 研究中证明与 IPH 关系密切。本研究进一步发现, 超声测量的 NWI 同样与 IPH 显著相关, 并且是 IPH 的重要独立预测指标。因此, 将 NWI 纳入常规超声评估体系, 可能有助于提高 IPH 的早期诊断率。IPH 的反生不仅增大了斑块体积及斑块负荷, 同时斑块含水量增加, 使斑块回声减低, 尤其表现为不规则的极低回声区(JBA)。本研究表明, 斑块回声越低斑块内出血的概率越大, 且极低回声区(JBA)在出血组的检出率显著高于未出血组($P = 0.002$), 其 OR 值为 4.90, 二者共同提示斑块内 IPH 存在。JBA 往往反映斑块中 LRNC 或者 IPH, 本研究发现, 脂质坏死核心往往更多的表现为规则的 JBA, 而 IPH 更多表现为不规则或者边界不清的 JBA, 但限于样本量的较小, 我们并没有做这方面的统计计算, 未来仍需要更大的样本量支持我们的猜想。斑块溃疡(PU)作为识别 IPH 的关键特征, 在本研究中被确认为最重要的危险因素

之一,这也与之前CT的研究结论相一致。IPH的发生导致斑块体积在短时间内迅速增大,斑块负荷增加,进一步削弱纤维帽的机械强度,易导致破裂和溃疡性改变,并有可能引发脑血管事件。本研究发现PU主要发生在斑块肩部,尤其是近心端肩部,同时我们观察到IPN也更多见于斑块肩部,提示PU的形成可能由局部血流动力学应力及IPN破裂共同作用所致。因此,临床在日常工作中应特别关注斑块肩部的情况,及时识别PU以提示相关风险。更为重要的是,本研究通过多指标联合诊断,显著提高了预测IPH的灵敏度和特异度。联合模型的AUC达到0.86(灵敏度81.82%,特异度78.38%),显著优于单一指标的诊断能力。这表明,PU、JBA和NWI之间存在潜在的相互作用,共同指向斑块的不稳定性和出血倾向。这种多维度、多参数的评估方法为精准医学和个体化干预提供了可能。

然而,本研究也存在一定的局限性。首先,由于本研究为单中心回顾性分析,样本量相对较小,可能对结果的普适性造成一定影响。其次,尽管超声在识别斑块特征方面具有较高的敏感性和实用性,但其对IPH的直接识别能力依然有限,需与MRI等其他影像技术联合使用,以进一步提高诊断准确性。

5. 结论

本研究表明,超声影像特征,尤其是斑块溃疡(PU)、极低回声区(JBA)和标准化管壁指数(NWI),对颈动脉斑块内出血(IPH)的预测具有重要价值。NWI表现出较强的单独诊断能力,而PU、JBA和NWI联合分析可显著提高诊断效能,为早期识别IPH及评估脑卒中风险提供了新的无创影像学依据。

参考文献

- [1] 黄越. 超声评估颈动脉狭窄程度与进展性卒中的相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2021.
- [2] 曾宇琪, 郑进, 霍桂军, 等. 多模态影像学对颈动脉斑块易损性的诊断价值[J]. 血管与腔内血管外科杂志, 2024, 10(3): 270-274.
- [3] Saba, L., Saam, T., Jäger, H.R., Yuan, C., Hatsukami, T.S., Saloner, D., *et al.* (2019) Imaging Biomarkers of Vulnerable Carotid Plaques for Stroke Risk Prediction and Their Potential Clinical Implications. *The Lancet Neurology*, **18**, 559-572. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(19\)30035-3](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(19)30035-3)
- [4] 陈文颖, 吴婷, 朱浩, 顾军. 颈动脉超声及超声造影技术评估颈动脉易损斑块的诊断价值[J]. 南通大学学报(医学版), 2022, 42(5): 459-463.
- [5] Johri, A.M., Nambi, V., Naqvi, T.Z., Feinstein, S.B., Kim, E.S.H., Park, M.M., *et al.* (2020) Recommendations for the Assessment of Carotid Arterial Plaque by Ultrasound for the Characterization of Atherosclerosis and Evaluation of Cardiovascular Risk: From the American Society of Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography*, **33**, 917-933. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.04.021>
- [6] Kakkos, S.K., Griffin, M.B., Nicolaides, A.N., Kyriacou, E., Sabetai, M.M., Tegos, T., *et al.* (2013) The Size of Juxtaluminal Hypoechoic Area in Ultrasound Images of Asymptomatic Carotid Plaques Predicts the Occurrence of Stroke. *Journal of Vascular Surgery*, **57**, 609-618.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2012.09.045>
- [7] Grant, E.G., Benson, C.B., Moneta, G.L., Alexandrov, A.V., Baker, J.D., Bluth, E.I., *et al.* (2003) Carotid Artery Stenosis: Gray-Scale and Doppler US Diagnosis—Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference. *Radiology*, **229**, 340-346. <https://doi.org/10.1148/radiol.2292030516>
- [8] Lu, Y., Cao, R., Jiao, S., Li, L., Liu, C., Hu, H., *et al.* (2023) A Novel Method of Carotid Artery Wall Imaging: Black-Blood CT. *European Radiology*, **34**, 2407-2415. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-10247-5>
- [9] 毕瀚文, 刘真. 颈动脉易损斑块的多模态超声评估现状及展望[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2024, 22(2): 227-231.
- [10] Sun, J., Balu, N., Hippe, D.S., Xue, Y., Dong, L., Zhao, X., *et al.* (2013) Subclinical Carotid Atherosclerosis: Short-Term Natural History of Lipid-Rich Necrotic Core—A Multicenter Study with MR Imaging. *Radiology*, **268**, 61-68. <https://doi.org/10.1148/radiol.13121702>
- [11] Cao, J., Zeng, Y., Zhou, Y., Yao, Z., Tan, Z., Huo, G., *et al.* (2025) The Value of Contrast-Enhanced Ultrasound in Assessing Carotid Plaque Vulnerability and Predicting Stroke Risk. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 5850. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90319-2>