

血管超声在动脉粥样硬化性病变评估中的研究进展

王潇婕¹, 孙 阳^{2*}

¹重庆医科大学第二临床学院, 重庆

²重庆医科大学附属第二医院超声科, 重庆

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年3月26日; 发布日期: 2025年4月3日

摘 要

动脉粥样硬化是一种慢性进展性疾病, 主要累及大中型动脉, 是心脑血管疾病的重要病理基础, 其早期评估对预防心肌梗死、脑卒中等严重并发症至关重要。近年来, 血管超声由于其无创、实时、便捷和可重复等优点受到广泛关注, 在动脉粥样硬化病变的评估中取得了显著进展。本文结合国内外超声评估动脉粥样硬化性病变的最新研究, 探讨了超声在动脉粥样硬化病变中的潜在应用价值, 为临床实践和未来研究方向提供参考依据。

关键词

血管超声, 动脉粥样硬化, 心脑血管疾病

Research Progress of Vascular Ultrasound in the Evaluation of Atherosclerotic Lesions

Xiaojie Wang¹, Yang Sun^{2*}

¹The Second Clinical College of Chongqing Medical University, Chongqing

²Department of Ultrasound, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Mar. 26th, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

Atherosclerosis is a chronic progressive disease, which mainly involves large and medium-sized arteries. It is an important pathological basis of cardiovascular and cerebrovascular diseases, and its

*通讯作者。

文章引用: 王潇婕, 孙阳. 血管超声在动脉粥样硬化性病变评估中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(4): 692-701.
DOI: 10.12677/acm.2025.154984

early evaluation is very important to prevent serious complications such as myocardial infarction and stroke. In recent years, vascular ultrasound has been widely concerned because of its advantages of non-invasive, real-time, convenient and repeatable, and has made remarkable progress in the evaluation of atherosclerotic lesions. This paper discusses the potential application value of ultrasound in atherosclerotic lesions based on the latest research of ultrasound evaluation at home and abroad, and provides reference for clinical practice and future research direction.

Keywords

Vascular Ultrasound, Atherosclerosis, Cardiovascular and Cerebrovascular Diseases

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

动脉粥样硬化(atherosclerosis)是一种累及全身血管的慢性炎症性动脉病变,核心机制为血管内皮细胞受损、内膜脂质沉积、平滑肌细胞增殖以及纤维帽形成,最终斑块形成导致动脉管腔狭窄、血流受阻[1],严重时斑块破裂继发血栓形成,引发心肌梗死、脑梗死等致死致残后果,严重威胁人类健康[2][3]。影像学评估在动脉粥样硬化的诊断、风险分层和治疗监测中具有重要意义。早期发现动脉粥样硬化性病变、识别易损斑块、精准评估斑块稳定性是降低心脑血管事件风险的核心。然而,传统影像学技术如CT血管成像(CTA)和磁共振成像(MRI)虽能提供高分辨率解剖信息,但存在辐射暴露、成本高昂或操作复杂等局限;数字减影血管造影(DSA)虽为“金标准”,但其有创性限制了临床应用。超声技术凭借其无创性、实时性、可重复性以及经济实惠等优势,在动脉粥样硬化的评估中展现出独特价值。

2. 动脉壁弹性的超声评估

动脉粥样硬化早期主要表现为以动脉壁弹性降低、血管僵硬增加为主的功能性改变[4],主要病理变化为动脉管壁弹力蛋白含量下降和胶原蛋白含量增加[5]。动脉硬度的增加会导致中风、心肌梗塞和心力衰竭等不良心脑血管事件的风险增加。超声早期发现动脉硬化升高将能够更准确地预测风险,从而更好地进行有针对性的预防性治疗。

脉搏波传导速度(pulse wave velocity, PWV)是指超声脉搏波在血管内沿血流方向传播的速度,速度越快通常提示血管硬度越高。PWV被认为与动脉粥样硬化和心血管死亡率的风险有很强的相关性[6],是评估动脉硬度的“金标准”,但由于其易受血压变化、自主神经功能状态及体表记录点间距离误差的影响,且目前缺少统一衡量标准,临床开展尚不广泛。目前常用的测量动脉壁弹性的超声方法包括弹性成像、超声极速脉搏波(ultrafast pulse wave velocity, UFPWV)、速度矢量成像分析(velocity vector imaging, VVI)、斑点追踪技术(speckle tracking echography, STE)等[7]。

2.1. 弹性成像

弹性成像是一种利用超声技术检测组织弹性差异并将其在灰度图像上可视化的成像方法,通过施加外力或内部激励,观察组织形变来评估其弹性特性。根据施加激励的方式和测量的物理量的不同,可以分为应变弹性成像(strain elastography, SE)、剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)、声脉冲辐射力弹性成像(acoustic radiation force impulse imaging, ARFI)等。Wang等[8]应用SWE技术评估阻塞性冠心

病组和非阻塞性冠心病组的颈动脉壁弹性, 结果发现阻塞性冠心病组颈动脉壁弹性模量明显高于非阻塞性冠心病组, 颈动脉壁弹性模量是无颈动脉斑块患者阻塞性冠心病的有用预测指标。Alan 等[9]使用 ARFI 技术评估冠心病患者的颈动脉弹性, 发现冠心病患者颈动脉的剪切波速度和杨氏模量显著高于非冠心病患者, 表明颈动脉弹性与冠心病存在相关性, 这与之前的研究结果是相符的。

2.2. UFPWV

UFPWV 成像是一种集成到血管多普勒超声装置中的成像技术, 能够以高达每秒 10,000 帧的速度生成图像, 从而实现非常短事件的可视化, 可以测量收缩早期和收缩末期的局部脉搏波传导速度(PWV-BS 和 PWV-ES) [10]。Guo 等[11]证实了 UFPWV 技术测量颈动脉弹性的可行性, 并发现随着动脉硬化严重程度的增加, PWV-BS 和 PWV-ES 的值也会增加, PWV-ES 显示比 PWV-BS 更明显的变化。

2.3. VVI 和 STE

VVI 和 STE 技术均是基于斑点追踪的原理, 实时监测血管壁的运动和变形, 从而定量分析血管的弹性功能和管壁的运动特性。Li 等[12]通过 VVI 技术评估动脉高血压患者的升主动脉弹性, 发现高血压患者的升主动脉整体纵向应变(ALS)、整体周向应变(ACS)和面积变化分数(FAC)显著低于正常健康对照组, 尤其是存在升主动脉扩张(AAD)的患者。该研究结果表明, 高血压患者升主动脉的弹性受损, 且与心脏和血管损伤密切相关。王雪婷等[13]为了验证 STE 技术在代谢综合征患者中评估颈动脉弹性的能力, 将其分为高血压合并糖尿病组、高血压无糖尿病组、糖尿病无高血压组三个亚组及健康对照组, 分析测量各组颈动脉的弹性参数, 结果表明 STE 技术能够反映出颈动脉弹性的详细情况, 具有极高的临床价值。

然而, 以上方法测定动脉弹性均有各自的局限性。弹性成像目前主要用于浅表和腹部器官, 对动脉弹性的评估仍处于研究阶段, 且大多数研究仅基于血管纵向截面, 忽略了周向变化。三维弹性成像可以弥补二维弹性成像的不足, 显示血管的立体结构, 提供更加丰富的信息, 有可能成为评估血管弹性的更有前途的方法。UFPWV 技术只能计算患者单个心动周期的数据, 因此对于心动过缓者不适用; STE 和 VVI 技术测值易受周围组织牵拉和呼吸影响。目前各项技术缺乏统一标准化的定量参数, 因此还需进行更多的大样本研究以制定相关指南, 从而促进动脉弹性测量的临床应用。此外, 应用人工智能方法提高超声测量动脉弹性的图像精准度和自动化识别性能, 以及联合其它影像学检测手段, 有望进一步提升动脉弹性评估的临床应用价值。

3. 动脉内膜 - 中层厚度的超声评估

动脉内膜 - 中层厚度(intima-media thickness, IMT)是指血管壁的内膜和中层结构的总厚度。在动脉粥样硬化的早期阶段, 低密度脂蛋白(LDL)穿过受损的内皮细胞进入内膜, 被氧化修饰为氧化 LDL (Ox-LDL)后被巨噬细胞摄取, 形成泡沫细胞, 聚集在内膜下, 导致内膜增厚, 形成脂纹。动脉中膜的平滑肌细胞(SMC)在炎症因子和生长因子的作用下, 迁移到内膜并增生, 吞噬脂质后形成肌源性泡沫细胞, 进一步加重内膜的增厚[1]。因此, IMT 增厚被视为早期动脉粥样硬化的标志, 可以提示心血管疾病的风险[14]。超声测量 IMT 能够早期发现血管病变, 提示动脉粥样硬化的存在, 从而为早期干预提供依据。通常将 IMT 增厚定义为 $1.0 \text{ mm} \leq \text{IMT} < 1.5 \text{ mm}$ 。

Olli 等[15]发现在年轻人中, 通过超声检测颈动脉 IMT 和颈动脉斑块可以有效识别未来发生动脉粥样硬化性心血管疾病(ASCVD)的高风险个体。该研究发现, 传统心血管风险因素结合颈动脉 IMT 和斑块的检测结果, 能够更好地识别早期发病风险较高的年轻成人。具体而言, 低风险个体(SCORE2 风险算法预测 10 年风险 $<2.5\%$)且无斑块或高 IMT 的发病率为 1.1%, 而高风险个体($\geq 2.5\%$ 10 年风险)且有颈动脉斑块或高 IMT 的发病率为 11.0%。这表明, 颈动脉斑块和高 IMT 与 ASCVD 风险独立相关, 可在年轻人

群中用于 ASCVD 风险的早期预测和预防策略的制定。既往多项研究[16]-[18]结果表明, 颈动脉 IMT 的增加与冠心病的发生风险密切相关, 将颈动脉 IMT 评估纳入临床方案有助于及时干预和制定冠心病管理预防策略。Zhou 等[19]发现颈动脉 IMT 和低密度脂蛋白胆固醇(sdLDL-C)与急性缺血性卒中的严重程度和结局密切相关, 建立基于颈动脉 IMT 和 sdLDL-C 的模型, 有利于筛选急性缺血性卒中高风险人群。Ravikanth [20]通过单中心大系列病例对照研究发现, 急性缺血性脑卒中患者的动脉粥样硬化风险因素、斑块分类、狭窄程度以及卒中亚型与颈动脉 IMT 之间存在显著相关性, 证实了颈动脉 IMT 是急性缺血性脑卒中的独立标志物。

尽管超声测量 IMT 是一种无创、便捷的动脉粥样硬化评估工具, 但由于其测量的准确性可能受到操作者技术水平、设备分辨率以及测量角度的影响, 这可能影响对病变进展的准确评估。超声射频信号血管内中膜分析(quality intima-media thickness, QIMT)技术通过分析超声原始射频信号, 自动化测量血管内中膜-中层的厚度变化, 减少了操作者的主观依赖问题, 为 IMT 标准化测量提供了一个可靠的方案。但由于 QIMT 技术需要特定的超声设备和软件支持, 对设备要求较高, 在一定程度上限制了其临床应用。超声测量 IMT 主要关注血管壁的结构变化, 对于非常轻微的病变或病变进展缓慢的个体, IMT 敏感性可能不足, 难以早期识别潜在动脉粥样硬化风险, 此时将 IMT 测量与动脉弹性测量相结合, 联合血管结构和功能指标, 可以进一步提高对动脉粥样硬化高风险人群的识别能力。

4. 动脉粥样硬化易损斑块的超声评估

超声将斑块定义为 $IMT \geq 1.5 \text{ mm}$ 或局限性内膜增厚高于周边 IMT 50%。随着动脉粥样硬化病变的进展, 泡沫细胞进一步堆积形成脂质核心, 内膜中的泡沫细胞和 SMC 分泌胶原纤维和基质成分, 形成纤维帽, 覆盖在脂质核心上, 此时 IMT 明显增加, 形成稳定的纤维斑块。晚期, 由于炎症持续浸润, 纤维帽下的泡沫细胞和 SMC 发生坏死, 形成坏死核心, 坏死核心的生长导致纤维帽变薄, 斑块内的缺氧环境及炎性反应促使新生血管增殖, 最终将稳定的纤维斑块转变为不稳定斑块。斑块破裂、出血导致血栓形成、血栓脱落, 可引起主要器官急性血管闭塞, 导致心肌梗死、肺栓塞和缺血性脑卒中等不良心脑血管事件[1]。将以上所述不稳定斑块定义为易损斑块, 其主要特征包括富含脂质的坏死核心(lipid-rich necrotic core, LRNC)、薄的纤维帽、斑块表面溃疡、斑块内新生血管(intra-plaque neovascularization, IPN)以及大的斑块负荷等。超声是评估动脉粥样硬化易损斑块的首选检查, 不同超声技术可以依据不同病理特征来评估斑块的易损性。

4.1. LRNC

LRNC 主要由巨噬细胞凋亡、坏死后释放的游离胆固醇、胆固醇酯等脂质成分构成, 同时包含细胞碎片、钙盐沉积及炎症介质。LRNC 越大, 斑块内部结构越不稳定, 发生破裂的风险越高, 且大的 LRNC 可以侵蚀斑块表面的纤维帽, 增加纤维帽的张力, 使其更容易破裂[21]。LRNC 在常规超声上通常表现为低回声, 但难以与斑块内出血或血栓形成等的低回声鉴别。

弹性成像可以对组织硬度进行定量和无创评估, 量化斑块内部组织结构的弹性。斑块内部的 LRNC、IPN 等会影响斑块的弹性[22]。多项研究表明[23]-[25], 弹性成像(特别是 SWE)对斑块易损性的评估具有良好的准确性。申宜昊等[25]将斑块内部按照不同回声强度划分为相对低回声、相对等回声、相对高回声三个区域并进行 SWE 测量, 结果表明, SWE 不仅可以评估斑块整体的弹性, 还可以精确区分斑块内不同回声区域的弹性。Wang 等[24]的研究表明 SWE 测得的斑块弹性模量值与斑块的回声类型显著相关, 斑块回声越低, 则弹性模量越小, 斑块硬度越低, 易损性越高。朱珊等[26]应用 SWE 测量冠心病患者颈动脉斑块的弹性模量值, 发现其与冠状动脉狭窄程度呈负相关关系, 这表明 SWE 还可以为冠状动脉病变程度的预测提供参考依据。

血管内超声检查(intravascular ultrasonography, IVUS)是一种使用导管技术将微型超声换能器放入血管腔中,以产生血管形态的横截面图像,实现整个血管壁的可视化的超声检查方法,可以区分血管壁上各种斑块成分,对 LRNC 检出较为敏感[27]。射频超声反向散射信号的光谱分析称为虚拟组织学(Virtual Histology, VH)。VH-IVUS 可以用于评估体内斑块组成。Kenya 等[28]将体内 VH-IVUS 获得的冠状动脉粥样硬化斑块组织成分表征与体外组织病理学进行比较,结果表明 VH-IVUS 分析结果与组织病理学结果密切相关(其中 LRNC 预测准确性达 88.3%),且急性冠脉综合征(ACS)组 LRNC 的检出率高于稳定型心绞痛(AP)组,证实了 VH-IVUS 在冠状动脉斑块成分检测及易损性评估方面的重要价值。超声背向散射积分技术(integrated backscatter, IB)是一种基于超声波与组织相互作用的成像技术,能够更准确地反映组织的细微结构特性,可用于区分不同类型的组织。IB-IVUS 已被证实可以识别冠状动脉斑块中的脂质成份及纤维成分[29]。Suzuki 等[30]依据犯罪病变的斑块形态将 ACS 患者分为斑块破裂(PR)组和斑块侵蚀(PE)组,通过 IB-IVUS 分析经皮冠状动脉介入治疗后两组残留病灶的组织特征,发现 PE 组的血脂百分比明显低于 PR 组,这表明 IB-IVUS 可以为临床后续降脂治疗强度提供依据。

4.2. 薄的纤维帽

纤维帽的主要组成成分包括胶原纤维、平滑肌细胞、细胞外基质和少量炎性细胞,它将 LRNC 与动脉管腔分隔开,以维持斑块的稳定性。炎症细胞分泌的蛋白酶可以降解胶原纤维和细胞外基质,以及一系列生物力学因素,促进纤维帽变薄,使得斑块不稳定。

常规超声难以直接测量薄纤维帽厚度。Czernuszcwicz 等[31][32]使用 ARFI 成像证明了 ARFI 诱导的峰值位移(PD)可以用于测量纤维帽厚度,但其与组织病理学结果对比显示一定程度的高估,其可能原因是管腔和纤维帽之间以及纤维帽与潜在 LRNC 之间的边界划分不正确。Torres 等[33]利用 ARFI 加速度方差的十进对数,即 $\log(VoA)$ 来测量纤维帽的厚度,该方法改善了纤维帽的边界划分,其测量结果与组织病理学高度一致,弥补了 ARFI PD 测量纤维帽厚度的相对不足,有助于进一步寻找颈动脉斑块结构用于中风风险预测的依据。

4.3. 斑块表面溃疡

纤维帽变薄、炎症反应、斑块内出血及血流冲击等均可引起纤维帽破裂,形成溃疡斑块,斑块内部成分直接暴露在血液中,更容易引发斑块破裂和血栓形成。

目前普遍使用的针对常规超声定义斑块溃疡的标准为:① 长度和深度至少达 2 mm;② 二维模式下后壁显示清晰;③ 彩色多普勒(CDFI)模式下可以看到内部血流方向逆转[34]。Zhou 等[35]分析颈动脉内膜切除术后新发脑缺血性病变患者的颈动脉斑块超声特征,发现颈动脉斑块溃疡是术后新发脑缺血性病变的独立预测因子。

三维超声(three-dimensional ultrasound, 3D-US)是通过采集多个二维超声图像,并利用计算机软件进行处理和重建,最终生成具有深度信息的三维立体图像超声成像技术。3D-US 能够从多个角度观察斑块,提供更全面的解剖信息,直观显示斑块的形态、大小、轮廓以及表面特征,包括溃疡的深度和范围。Heliopoulos 等[36]将 3D-US 和二维超声进行对比,证实了 3D-US 在检测颈动脉斑块溃疡方面的性能优于传统的二维超声。

超声造影(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS)技术是通过向血管内注射造影剂(通常为微泡),利用其在超声场中的散射和反射特性来增强成像效果。使用造影剂可以准确描绘斑块表面,而不受缓慢血流或技术伪影的影响。ASNR 血管壁成像研究组将溃疡斑块定义为造影剂在斑块内形成的增强尺寸至少达 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ [37]。Rafailidis 等[38]的研究表明,CEUS 在诊断颈动脉斑块溃疡的准确性方面优于常规超

声, 其结果与 CT 血管成像的一致性良好。Lyu 等[39]根据造影剂在斑块内扩散的方向, 将斑块分为“由内而外”方向(造影剂从动脉管腔向斑块内部扩散)和非由内而外的方向, 与组织病理学对照发现, 造影剂“由内而外”方向扩散是斑块破裂的独立危险因素, 提示造影剂流向与斑块的组织特征相关。

4.4. IPN

炎症细胞释放的多种炎症因子(如 $\text{TNF-}\alpha$ 、 IL-1)、斑块内缺氧环境、脂质核心等因素共同作用, 能够上调血管内皮生长因子(VEGF)的表达, 从而促进 IPN 的形成。IPN 主要起源于外膜血管, 通常结构脆弱, 容易破裂出血, 导致斑块内出血和炎症加重, 进一步破坏斑块的稳定性, 增加斑块破裂和血栓形成的风险。

CEUS 是可视化 IPN 的可靠方法, 斑块内造影剂的分布反映 IPN 的分布。通常, 使用基于视觉的 3 点分级系统评估 IPN: 0 级表示斑块内部没有可移动微泡或微泡局限于外膜层; 1 级表示局限于外膜侧或斑块肩部的微泡移动; 2 级表示斑块内广泛存在微泡, 且可见明显的微泡运动, 代表大量的 IPN 形成[40]。Zhang 等[22]证实了 CEUS 评估颈动脉斑块 IPN 与病理金标准的高度一致性, 并联合 SWE 技术评估 IPN 与斑块弹性的关系, 结果表明新生血管越丰富, 斑块弹性越低, 易损性越高。最近的一项研究结果表明, CEUS 检测到颈动脉斑块 2 级 IPN 有可能成为预测轻度颈动脉狭窄患者近期和未来缺血性脑卒中的有效非侵入性生物标志物[41]。

超微血流显像(superb microvascular imaging, SMI)技术采用自适应算法, 能够识别并去除组织运动产生的杂波伪影, 同时保留对低速血流的高敏感性, 能够检测到流速低至 0.8cm/s 且内径大于 0.1mm 的微血管。与 CEUS 相比, SMI 无需使用造影剂, 具有更安全、经济的优点。Yang 等[42]的荟萃分析纳入了 10 项研究, 对比了 608 个颈动脉斑块的 SMI 与 CEUS 表现, 结果强烈表明 SMI 和 CEUS 在检测颈动脉斑块的 IPN 方面具有良好的一致性, 也就是说, SMI 可能是检测颈动脉斑块 IPN 的 CEUS 的潜在替代方案。等对颈动脉狭窄患者 CEA 术前行 SMI 检查, 并与 CEA 术中颈动脉暴露期间经颅多普勒(TCD)检查对比分析, 发现术中 TCD 检测到微栓塞信号(MES)的患者, SMI 检查识别微血流信号的发生率显著高于无 MES 患者, 提示术前颈动脉 SMI 检查可预测 CEA 颈动脉暴露期间 TCD 上 MES 的发展, 这表明 SMI 技术检测颈动脉斑块 IPN 在脑卒中危险分层方面也具有潜在的应用价值。

平面波超敏感血流成像(angio planewave ultrasensitive imaging, AngioPLUS, 简称 AP)技术是通过平面波的快速发射和接收, 显著提高了超声信号的采集帧频(可达 $25,000\text{Hz}$), 这种高帧频采集能够更灵敏地检测到微弱的血流信号, 尤其是低速血流信号, 从而实现对微血管的高分辨率成像。Zhang 等[23]发现相对于 SWE、高分辨率 MRI 而言, AP 技术对斑块脆弱性的诊断与病理结果表现出更高的一致性, 并提出可能的原因是 AP 技术可以更灵敏地显示 IPN 的低速血流信号, 从而确定新生血管的异常形态。许继梅等对比分析了急性前循环脑梗死患者与非急性脑梗死患者颈动脉斑块的 AP 表现, 结果表明急性脑梗死组患者的 IPN 评分和斑块内微血管血流(IMVF)分级更高, 提示 IPN 可能与急性脑梗死的发生有关。

4.5. 斑块体积负荷

斑块体积的变化可以反映斑块的稳定性。易损斑块通常具有较大的脂质核心和薄纤维帽, 其体积变化可能提示斑块的不稳定性和破裂风险。斑块体积是衡量斑块负荷的重要指标, 斑块负荷越大, 心血管事件的风险越高。

3D-US 可以从不同角度观察斑块, 量化斑块体积。Noflatscher 等[43]证实了 3D-US 是一种测量斑块体积的实用且重复性好的方法, 并发现股动脉、颈动脉的斑块体积与年龄、高血压等心血管危险因素有很强的相关性, 提示 3D-US 测量斑块体积有可能成为心血管风险分层的额外筛查工具。

4.6. 其它

动脉粥样硬化斑块中的微钙化来源于凋亡的巨噬细胞或平滑肌细胞释放的基质囊泡。斑块内微钙化数量与斑块易损性有关[44]。常规超声识别微钙化的能力有限。Ruan 等[45]证明了基于超声的 Micropure® 技术对颈动脉斑块内微钙化的检出能力与 ^{18}F -NaF PET-CT 扫描无显著差异, 可以作为斑块稳定性评估的潜在工具。

影像组学(Radiomics)是从医学影像中高通量地提取大量定量影像特征, 并通过统计学分析将这些特征转化为可挖掘的高维数据空间, 揭示肉眼难以识别的图像信息, 从而为疾病的诊断、预后评估和治疗预测提供支持的新兴医学影像分析方法。超声影像组学能够从超声图像中提取斑块的形态、成分、内部结构等信息, 从而更全面地评估斑块的稳定性。结合斑块影像组学特征和临床数据, 可以构建预测模型, 评估患者发生心血管事件的风险。目前已有多项基于超声影像组学评估斑块易损性并揭示其与心脑血管疾病关系的研究[46]-[48]。目前的研究多为单中心或回顾性研究, 未来需要开展大规模多中心的前瞻性研究, 以验证超声影像组学在不同人群中的有效性和可靠性。

5. 结语

综上所述, 动脉粥样硬化性病变是心脑血管疾病的重要病理基础, 超声技术凭借其无创、便捷、可重复性强等优势, 在动脉粥样硬化性病变的评估中发挥着重要作用。本文综述了超声技术在动脉弹性、IMT 以及斑块易损性评估中的研究进展。动脉弹性评估能够反映早期血管功能变化; IMT 测量是动脉粥样硬化进展的重要指标; 而多模态超声技术(如超声造影、弹性成像等)则显著提高了易损斑块识别的准确性。尽管超声技术在动脉粥样硬化性病变的评估中取得了显著进展, 但仍需进一步优化技术手段, 提高诊断的准确性和可重复性。未来, 超声影像组学和多模态超声技术的联合应用, 能够在不增加患者风险的情况下, 提供动脉粥样硬化病变的多维度信息, 有望为动脉粥样硬化性病变的精准诊断和治疗提供新的方向。

基金项目

重庆市卫生健康领域国家级后备人才项目(HBRC202404, 杰青后备专项), 重庆市卫生健康委员会, 厅局级。

参考文献

- [1] Zuo, X., Ding, X., Zhang, Y. and Kang, Y.J. (2024) Reversal of Atherosclerosis by Restoration of Vascular Copper Homeostasis. *Experimental Biology and Medicine*, **249**, Article 10185. <https://doi.org/10.3389/ebm.2024.10185>
- [2] Tsao, C.W., Aday, A.W., Almarazooq, Z.I., Alonso, A., Beaton, A.Z., Bittencourt, M.S., *et al.* (2022) Heart Disease and Stroke Statistics—2022 Update: A Report from the American Heart Association. *Circulation*, **145**, e153-e639. <https://doi.org/10.1161/cir.0000000000001052>
- [3] Nakano, S., Otake, H., Kawamori, H., Toba, T., Sugizaki, Y., Nagasawa, A., *et al.* (2021) Association between Visit-To-Visit Variability in Low-Density Lipoprotein Cholesterol and Plaque Rupture That Leads to Acute Coronary Syndrome. *Circulation Reports*, **3**, 540-549. <https://doi.org/10.1253/circrep.cr-21-0080>
- [4] Saladini, F., Rattazzi, M., Faggini, E., Palatini, P. and Puato, M. (2021) Carotid Elasticity Is Impaired in Stage 1 Hypertensive Patients with Well-Controlled Blood Pressure Levels. *Journal of Human Hypertension*, **36**, 898-903. <https://doi.org/10.1038/s41371-021-00584-7>
- [5] Zhang, Y., Lacolley, P., Protogerou, A.D. and Safar, M.E. (2020) Arterial Stiffness in Hypertension and Function of Large Arteries. *American Journal of Hypertension*, **33**, 291-296. <https://doi.org/10.1093/ajh/hpz193>
- [6] Pan, F., Yu, L., Luo, J., Wu, R., Xu, M., Liang, J., *et al.* (2018) Carotid Artery Stiffness Assessment by Ultrafast Ultrasound Imaging: Feasibility and Potential Influencing Factors. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **37**, 2759-2767. <https://doi.org/10.1002/jum.14630>

- [7] 胡文姝, 徐亮, 周畅. 颈动脉弹性超声检测的临床应用进展[J]. 浙江医学, 2025, 47(2): 208-212.
- [8] Wang, Y., Zhao, C., Meng, P., Yu, Y., Li, G., Kong, F., *et al.* (2020) Incremental Value of Carotid Elasticity Modulus Using Shear Wave Elastography for Identifying Coronary Artery Disease in Patients without Carotid Plaque. *Journal of Hypertension*, **39**, 1210-1220. <https://doi.org/10.1097/hjh.0000000000002773>
- [9] Alan, B. and Alan, S. (2022) Evaluation of Carotid Artery Stiffness in Patients with Coronary Artery Disease Using Acoustic Radiation Force Impulse Elastography. *Vascular*, **31**, 564-572. <https://doi.org/10.1177/17085381221076679>
- [10] Tanter, M. and Fink, M. (2014) Ultrafast Imaging in Biomedical Ultrasound. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **61**, 102-119. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2014.6689779>
- [11] Guo, S., Gu, C., Sun, L., Qi, Z. and Wang, B. (2024) Evaluation of Carotid Stiffness in Metabolic Syndrome by Real-Time Shear Wave Elasticity Imaging and Ultrafast Pulse Wave Velocity. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **50**, 1280-1286. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2024.05.007>
- [12] Yu, L., Xu, G., Zhou, Q., Ouyang, M., Gao, L. and Zeng, S. (2023) Biomechanical Properties of the Ascending Aorta in Patients with Arterial Hypertension by Velocity Vector Imaging. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **40**, 397-405. <https://doi.org/10.1007/s10554-023-03003-9>
- [13] 王雪婷, 江峰. 二维斑点追踪成像技术评价代谢综合征患者颈动脉弹性的可行性与准确性分析[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2024, 39(1): 96-99.
- [14] 刘娅, 邝野, 樊华, 等. 超声心动图、颈动脉内膜中层厚度联合 N 末端脑钠肽前体等指标对川崎病合并冠状动脉病变患儿诊断价值[J]. 临床军医杂志, 2023, 51(12): 1281-1283, 1287.
- [15] Raitakari, O.T., Magnussen, C.G., Juonala, M., Kartiosuo, N., Pakkala, K., Rovio, S., *et al.* (2024) Subclinical Atherosclerosis in Young Adults Predicting Cardiovascular Disease: The Cardiovascular Risk in Young Finns Study. *Atherosclerosis*, **393**, Article ID: 117515. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2024.117515>
- [16] Zhu, Y., You, J., Xu, C. and Gu, X. (2020) Predictive Value of Carotid Artery Ultrasonography for the Risk of Coronary Artery Disease. *Journal of Clinical Ultrasound*, **49**, 218-226. <https://doi.org/10.1002/jcu.22932>
- [17] Yu, J.B., *et al.* (2023) Predicting Coronary Artery Disease by Carotid Color Doppler Ultrasonography. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, **27**, 11713-11721.
- [18] Agarwal, R., Gadupati, J., Ramaiah, S.S., Babu, V.G., Jain, A. and Prakash, V.S. (2024) Carotid Artery Doppler: A Possible Non-Invasive Diagnostic Approach to Assessing the Severity of Coronary Artery Disease. *Cureus*, **16**, e62886. <https://doi.org/10.7759/cureus.62886>
- [19] Zhou, P., Shen, Y., Wang, L., Cao, Z., Feng, W., Liu, J., *et al.* (2020) Association between Carotid Intima Media Thickness and Small Dense Low-Density Lipoprotein Cholesterol in Acute Ischaemic Stroke. *Lipids in Health and Disease*, **19**, Article No. 177. <https://doi.org/10.1186/s12944-020-01353-0>
- [20] Ravikanth, R. (2020) Relevance of Carotid Intima-Media Thickness and Plaque Morphology in the Risk Assessment of Patients with Acute Ischemic Cerebral Infarcts: A Case-Control Study of Large Series from a Single Center. *Journal of Medical Ultrasound*, **28**, 29-34. https://doi.org/10.4103/jmu.jmu_5_19
- [21] Porambo, M.E. and DeMarco, J.K. (2020) MR Imaging of Vulnerable Carotid Plaque. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, **10**, 1019-1031. <https://doi.org/10.21037/cdt.2020.03.12>
- [22] Zhang, Y., Cao, J., Zhou, J., Zhang, C., Li, Q., Chen, S., *et al.* (2021) Plaque Elasticity and Intraplaque Neovascularisation on Carotid Artery Ultrasound: A Comparative Histological Study. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, **62**, 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2021.05.026>
- [23] Zhang, S., Jiang, S., Wang, C. and Han, C. (2023) Comparison of Ultrasonic Shear Wave Elastography, Angioplus Planewave Ultrasensitive Imaging, and Optimized High-Resolution Magnetic Resonance Imaging in Evaluating Carotid Plaque Stability. *PeerJ*, **11**, e16150. <https://doi.org/10.7717/peerj.16150>
- [24] Wang, B., Chen, Y., Qiao, Q., Dong, L., Xiao, C. and Qi, Z. (2023) Evaluation of Carotid Plaque Vulnerability with Different Echoes by Shear Wave Elastography and CEUS. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **32**, Article ID: 106941. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2022.106941>
- [25] 申宜昊, 饶宛婷, 邹葵花, 等. 剪切波弹性成像鉴别不均质颈动脉斑块不同回声区域硬度差异的可行性研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2022, 28(4): 423-426.
- [26] 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.
- [27] Fu, P., Wang, J., Su, Y., Liao, Y., Li, S., Xu, G., *et al.* (2023) Intravascular Ultrasonography Assisted Carotid Artery Stenting for Treatment of Carotid Stenosis: Two Case Reports. *World Journal of Clinical Cases*, **11**, 7127-7135. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v11.i29.7127>
- [28] Nasu, K., Tsuchikane, E., Katoh, O., Vince, D.G., Virmani, R., Surmely, J., *et al.* (2006) Accuracy of *in Vivo* Coronary

- Plaque Morphology Assessment: A Validation Study of *in Vivo* Virtual Histology Compared with *in Vitro* Histopathology. *Journal of the American College of Cardiology*, **47**, 2405-2412. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2006.02.044>
- [29] Sakurai, S., Takashima, H., Waseda, K., Goshō, M., Kurita, A., Ando, H., *et al.* (2015) Influence of Plaque Characteristics on Fractional Flow Reserve for Coronary Lesions with Intermediate to Obstructive Stenosis: Insights from Integrated-Backscatter Intravascular Ultrasound Analysis. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **31**, 1295-1301. <https://doi.org/10.1007/s10554-015-0699-6>
- [30] Suzuki, W., *et al.* (2024) Tissue Characteristics of Residual Lesion in Patients with Acute Coronary Syndrome Caused by Plaque Rupture versus Plaque Erosion: A Single-Center, Retrospective, Observational Study. *Nagoya Journal of Medical Science*, **86**, 189-200.
- [31] Czernuszcwicz, T.J. and Gallippi, C.M. (2016) On the Feasibility of Quantifying Fibrous Cap Thickness with Acoustic Radiation Force Impulse (ARFI) Ultrasound. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **63**, 1262-1275. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2016.2535440>
- [32] Czernuszcwicz, T.J., Homeister, J.W., Caughey, M.C., Wang, Y., Zhu, H., Huang, B.Y., *et al.* (2017) Performance of Acoustic Radiation Force Impulse Ultrasound Imaging for Carotid Plaque Characterization with Histologic Validation. *Journal of Vascular Surgery*, **66**, 1749-1757.e3. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2017.04.043>
- [33] Torres, G., Czernuszcwicz, T.J., Homeister, J.W., Farber, M.A., Caughey, M.C. and Gallippi, C.M. (2020) Carotid Plaque Fibrous Cap Thickness Measurement by ARFI Variance of Acceleration: *In Vivo* Human Results. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **39**, 4383-4390. <https://doi.org/10.1109/tmi.2020.3019184>
- [34] 崔柳平, 周福波, 潘希娟, 等. 血管超声评估颈动脉斑块易损性的研究进展[J]. 中国超声医学杂志, 2024, 40(3): 352-355.
- [35] Zhou, F., Hua, Y., Ji, X., Jia, L., Zhang, K., Li, Q., *et al.* (2021) Ultrasound-Based Carotid Plaque Characteristics Help Predict New Cerebral Ischemic Lesions after Endarterectomy. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **47**, 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.09.025>
- [36] Heliopoulos, J., Vadikolias, K., Piperidou, C. and Mitsias, P. (2011) Detection of Carotid Artery Plaque Ulceration Using 3-Dimensional Ultrasound. *Journal of Neuroimaging*, **21**, 126-131. <https://doi.org/10.1111/j.1552-6569.2009.00450.x>
- [37] Saba, L., Yuan, C., Hatsukami, T.S., Balu, N., Qiao, Y., DeMarco, J.K., *et al.* (2018) Carotid Artery Wall Imaging: Perspective and Guidelines from the ASNR Vessel Wall Imaging Study Group and Expert Consensus Recommendations of the American Society of Neuroradiology. *American Journal of Neuroradiology*, **39**, E9-E31. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a5488>
- [38] Rafailidis, V., Chrysogonidis, I., Xerras, C., Nikolaou, I., Tegos, T., Kouskouras, K., *et al.* (2018) A Comparative Study of Color Doppler Imaging and Contrast-Enhanced Ultrasound for the Detection of Ulceration in Patients with Carotid Atherosclerotic Disease. *European Radiology*, **29**, 2137-2145. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5773-8>
- [39] Lyu, Q., Tian, X., Ding, Y., Yan, Y., Huang, Y., Zhou, P., *et al.* (2020) Evaluation of Carotid Plaque Rupture and Neovascularization by Contrast-Enhanced Ultrasound Imaging: An Exploratory Study Based on Histopathology. *Translational Stroke Research*, **12**, 49-56. <https://doi.org/10.1007/s12975-020-00825-w>
- [40] Kopyto, E., Czezelewski, M., Mikos, E., Stepniak, K., Kopyto, M., Matuszek, M., *et al.* (2023) Contrast-Enhanced Ultrasound Feasibility in Assessing Carotid Plaque Vulnerability—Narrative Review. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 6416. <https://doi.org/10.3390/jcm12196416>
- [41] Zhang, L., Wu, R., Chen, J., Gu, S. and Jia, C. (2025) The Role of Intraplaque Neovascularization in Recent and Future Ischemic Stroke in Patients with Mild Carotid Stenosis. *Ultrasonography*, **44**, 62-71. <https://doi.org/10.14366/usg.24123>
- [42] Yang, F. and Wang, C. (2020) Consistency of Superb Microvascular Imaging and Contrast-Enhanced Ultrasonography in Detection of Intraplaque Neovascularization: A Meta-Analysis. *PLOS ONE*, **15**, e0230937. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230937>
- [43] Noflatscher, M., Schreinlechner, M., Sommer, P., Kerschbaum, J., Berggren, K., Theurl, M., *et al.* (2018) Influence of Traditional Cardiovascular Risk Factors on Carotid and Femoral Atherosclerotic Plaque Volume as Measured by Three-Dimensional Ultrasound. *Journal of Clinical Medicine*, **8**, Article 32. <https://doi.org/10.3390/jcm8010032>
- [44] Jinnouchi, H., Sato, Y., Sakamoto, A., Cornelissen, A., Mori, M., Kawakami, R., *et al.* (2020) Calcium Deposition within Coronary Atherosclerotic Lesion: Implications for Plaque Stability. *Atherosclerosis*, **306**, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2020.05.017>
- [45] Ruan, W., He, Y., Shao, X., Yang, S., Li, X., Ding, J., *et al.* (2021) The Ability of Micropure® Ultrasound Technique to Identify Microcalcifications in Carotid Plaques. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, **201**, Article ID: 106401. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2020.106401>
- [46] Zhang, L., Lyu, Q., Ding, Y., Hu, C. and Hui, P. (2022) Texture Analysis Based on Vascular Ultrasound to Identify the Vulnerable Carotid Plaques. *Frontiers in Neuroscience*, **16**, Article 885209. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.885209>
- [47] Zhang, R., Zhang, Q., Ji, A., Lv, P., Zhang, J., Fu, C., *et al.* (2020) Identification of High-Risk Carotid Plaque with MRI-

Based Radiomics and Machine Learning. *European Radiology*, **31**, 3116-3126.

<https://doi.org/10.1007/s00330-020-07361-z>

- [48] Wang, X., Luo, P., Du, H., Li, S., Wang, Y., Guo, X., *et al.* (2022) Ultrasound Radiomics Nomogram Integrating Three-Dimensional Features Based on Carotid Plaques to Evaluate Coronary Artery Disease. *Diagnostics*, **12**, Article 256.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics12020256>