

# 超声评估颈动脉易损斑块及其在缺血性脑卒中风险预测中的研究进展

汤晓倩, 孙 阳\*

重庆医科大学附属第二医院超声科, 重庆

收稿日期: 2026年2月5日; 录用日期: 2026年2月27日; 发布日期: 2026年3月9日

## 摘 要

缺血性脑卒中是全球高致残致死性脑血管疾病, 颈动脉易损斑块破裂及栓子脱落是其重要致病机制之一。常规二维超声在斑块易损性精准评估方面存在一定局限, 而缺血性脑卒中的发生与易损斑块密切相关。近年来, 超声技术的快速发展推动颈动脉斑块评估由形态学向功能学和分子学层面拓展。本文综述多种超声新技术在颈动脉易损斑块评估中的研究进展, 探讨其临床应用价值与未来发展方向, 为缺血性脑卒中的风险评估与精准防控提供参考。

## 关键词

缺血性脑卒中, 颈动脉易损斑块, 超声评估, 超声造影, 超微血管成像技术

# Research Progress of Ultrasonic Evaluation of Vulnerable Carotid Plaques and Its Application in Risk Prediction of Ischemic Stroke

Xiaoqian Tang, Yang Sun\*

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

Received: February 5, 2026; accepted: February 27, 2026; published: March 9, 2026

## Abstract

Ischemic stroke is a cerebrovascular disease with high rates of disability and mortality worldwide,

\*通讯作者。

文章引用: 汤晓倩, 孙阳. 超声评估颈动脉易损斑块及其在缺血性脑卒中风险预测中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 1313-1321. DOI: 10.12677/acm.2026.163909

and the rupture of vulnerable carotid plaques followed by embolus detachment constitutes one of its crucial pathogenic mechanisms. Conventional two-dimensional ultrasound has certain limitations in the accurate assessment of plaque vulnerability, whereas the occurrence of ischemic stroke is closely correlated with vulnerable plaques. In recent years, the rapid advancement of ultrasonic techniques has promoted the shift of carotid plaque assessment from the morphological level to the functional and molecular levels. This article reviews the research progress of various novel ultrasonic technologies in the evaluation of vulnerable carotid plaques, discusses their clinical application value and future development directions, and thereby provides a reference for the risk assessment and precise prevention and control of ischemic stroke.

## Keywords

Ischemic Stroke, Vulnerable Carotid Plaque, Ultrasonic Evaluation, Contrast-Enhanced Ultrasound, Superb Microvascular Imaging

Copyright © 2026 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

脑卒中是由于大脑血液循环障碍所致的突发性神经系统功能缺损综合征,按病理类型可分为缺血性卒中与出血性卒中。其中,缺血性脑卒中(脑梗死)约占卒中患者总数的75%~85% [1],是临床最常见的卒中类型,其病理基础为局部脑组织持续性缺血导致的缺氧与坏死。缺血性脑卒中主要由脑血管堵塞或严重狭窄引起,导致脑组织血流灌注不足。该病具有高发病率、高复发率和高死亡率等特点,严重威胁患者生命安全与生活质量。其发生与高龄、微血管病变、心房颤动、心肌梗死等心血管疾病密切相关,其中颈动脉粥样硬化被认为是最重要的致病基础之一[2]。

近年来研究表明,缺血性脑卒中的发生与颈动脉粥样硬化斑块关系密切[3],约20%的缺血性脑卒中源于颈动脉易损斑块破裂后形成的栓子脱落。与单纯血管狭窄程度相比,斑块易损性在预测缺血性脑卒中发生风险方面具有更高的临床价值。超声检查因其安全、便捷、经济等优势,已成为评估颈动脉粥样硬化程度及斑块特征的首选影像学方法。本文将重点综述二维超声、三维超声、超声造影及新兴超声技术在颈动脉斑块易损性评估中的研究进展。

## 2. 易损斑块的病理特征及超声评估路径

易损斑块是指具有高破裂风险、易引发急性血栓栓塞事件的动脉粥样硬化斑块。其典型病理特征包括薄纤维帽、大脂质坏死核心(占斑块体积 > 40%)、斑块内新生血管(intraplaque neovascularization IPN)、斑块内出血(intraplaque hemorrhage IPH)、斑块表面溃疡形成以及持续的炎症细胞浸润[4]。其中,斑块内新生血管被认为是易损斑块发生与进展的关键病理基础,其异常增生与结构不成熟可促进炎症反应和斑块不稳定化过程[5]。

围绕上述病理学特征,超声影像学在斑块易损性评估中的作用,已由单纯的结构观察逐步向多维度功能与机制层面拓展。从临床风险评估需求出发,超声技术的发展可概括为三条主要路径:

- (1) 以斑块形态与组织结构为核心的形态学与定量结构评估;
- (2) 以斑块内新生微血管及局部血流特征为核心的功能影像评估;
- (3) 以斑块力学特性、生物学行为及分子过程为导向的多尺度功能与分子影像评估。

不同技术路径在斑块风险分层、卒中事件预测能力及临床可推广性方面具有明显差异,也是构建缺血性脑卒中风险预测模型的重要指标来源。

### 3. 基于斑块易损性评估的超声技术进展

#### 3.1. 二维超声

颈动脉内-中膜厚度(intima-media thickness, IMT)增厚被认为是颈动脉粥样硬化的早期影像学标志,其病理基础主要表现为颈动脉壁退行性改变及脂质等成分在动脉内膜的沉积。Ellisiv B Mathiesen 的研究表明 IMT 增厚是缺血性脑卒中的独立预测因子[6]。一般认为, IMT > 1.0 mm 提示早期动脉粥样硬化改变,而当 IMT  $\geq$  1.5 mm 时可界定为动脉粥样硬化斑块形成,是疾病进展的重要标志。

二维超声可对颈动脉斑块的位置、大小、回声特征及表面形态进行评估,其中低回声或混合回声、表面不规则及溃疡形成被认为是提示斑块易损性的重要形态学征象[7]。彩色多普勒血流成像(CDFI)可直观显示颈动脉血流方向、管腔充盈状态及血流分布特征;频谱多普勒则可通过血流速度测量,对管腔狭窄程度及远端血流灌注情况进行定量评估。Shyam Prabhakaran [8]等人所进行的前瞻性研究证明表面不规则斑块人群较规则斑块人群中患有缺血性脑卒中的风险增加三倍,并且通过二维测得的表面不规则斑块是缺血性脑卒中的独立预测因子,这有助于临床识别传统危险因素之外的中高危人群。Ajay Gupta [9]的一项荟萃分析中,他纳入了在颈动脉斑块低回声评估后明确卒中结局的前瞻性观察研究,对此进行荟萃分析,共分析了来自7项的研究数据,涉及到了7557名患者,得出在所有狭窄程度(0~99%)范围内,以低回声为主的斑块(与以高回声为主的斑块相比)与未来同侧卒中风险之间存在显著正相关关系。Ellisiv B Mathiesen [6]的研究也表明了总斑块面积比 IMT 对缺血性脑卒中的首次发生风险的预测准确性更高。

尽管常规超声已成为颈动脉粥样硬化筛查与随访的首选影像学手段,但其在评估血管壁力学特性、呈现病变的空间立体结构、显示斑块内低速微细血流、准确判断斑块稳定性等方面仍存在一定局限。近年来,随着多种超声新技术的发展与应用,颈动脉疾病的评估正逐步由单纯结构观察向功能与机制层面拓展[10]。

#### 3.2. 三维超声

三维超声(three-dimensional ultrasound, 3DUS)的核心优势在于实现血管及斑块的三维重建,从而以整体容积视角对颈动脉斑块进行观察和定量评估,弥补二维超声在空间结构呈现方面的不足。

早在2000年初, Landry 等即开始采用3DUS测量颈动脉斑块体积(plaque volume, PV),用于评估颈动脉粥样硬化的严重程度[11]。在此基础上发展起来的三维超声血管斑块定量分析技术(vascular plaque quantification, VPQ)不仅可实现斑块体积的精准测量,还可同步获取血管最大狭窄率(面积狭窄率)、标准化管壁指数(normalized wall index, NWI)等多项结构学参数。此外,VPQ技术还能自动计算斑块灰阶中位数(gray scale median, GSM)。该指标可通过分析斑块内部回声强度及其分布特征,对斑块组织成分和稳定性进行间接评估。已有研究表明[12],富含脂质或伴随斑块内出血的高风险颈动脉斑块通常表现为较低的GSM值,提示GSM在高危斑块识别中具有一定价值。Arna van Engelen [13]等人利用三维超声对斑块进行评估并观察患者的最终结局所进行的前瞻性研究,结果提示利用3D超声所测得的颈动脉斑块的质地与体积可以强烈预测血管事件风险,对于高危患者,可以采取三维超声斑块评估来预测脑卒中的发生风险。

总体而言,三维超声能够获取颈动脉及斑块的完整容积信息,更清晰地展示斑块的形态、位置、表面状态及纤维帽完整性,在斑块负荷评估及高风险斑块识别方面具有优势。然而,3DUS仍易受钙化斑块声影干扰,且对斑块内部组织成分的精细分辨能力有限,在易损斑块的功能与机制层面评估方面仍存在

一定局限。

### 3.3. 超声造影

超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)通过静脉注射超声造影剂,显著增强血流信号与周围组织之间的对比度,从而提升超声成像对微血流的敏感性。由于微泡造影剂在体内主要局限于血管腔内循环,CEUS在成像机制上体现为一种具有血池特异性的成像技术,能够有效捕捉常规超声难以显示的低速微细血流及异常灌注模式,在斑块内新生血管(intraplaque neovascularization, IPN)的可视化与定量评估方面具有不可替代的优势[14]。当颈动脉粥样硬化斑块内发生病理性新生血管形成时,微泡可随血流进入斑块内部,从而在影像学上直观反映斑块内血管化程度,为易损斑块的识别与风险分层提供重要依据,斑块易损性的程度越高,发生急性心血管事件的概率就越高,曾经 Drivelegka [15]的研究就验证了这一说法。

目前,颈动脉斑块内新生血管的CEUS评估主要采用半定量分级方法。其中,2017版《中国超声造影临床应用指南》提出的分级标准应用最为广泛[16]:0分,斑块内无增强;1分,斑块内可见点状增强;2分,介于1分与3分之间,斑块内可见点状增强并伴有1~2条短线样增强;3分,斑块内可见线状增强,可贯穿或大部贯穿斑块,或出现血液流动征象。多项研究证实,CEUS分级结果与斑块内微血管密度呈显著正相关[17]。易损斑块通常伴随更丰富的新生血管形成,CEUS评分相对较高,且与脑血管事件发生风险增加密切相关[18]。JM Baud [19]的研究表明了缺血性脑卒中患者的同侧颈动脉斑块的CEUS增强率远高于对侧。近期 Xiaowen Sun [20]基于斑块形态、回声、CEUS评分等为基础所建立的超声斑块评分系统,对缺血性脑卒中的风险预测提供了有效的办法,提高了预测的有效性,有助于识别早期的高危患者。

综合现有证据,CEUS仍是目前评估颈动脉斑块内新生血管最为成熟、且具有较充分临床证据支持的超声影像技术。然而,其对造影剂注射的依赖在一定程度上限制了其在大规模人群筛查中的应用,也提示进一步发展无创或分子靶向超声技术的必要性,为临床预测脑卒中的发生提供更为简便的方法。

### 3.4. 超微血管成像技术

超微血管成像(superb microvascular imaging, SMI)是一种新型非侵入性超声微血流成像技术,其核心优势在于对极低速血流的高灵敏显示能力。相较于常规多普勒超声,SMI不仅能够更清晰地描绘颈动脉斑块的形态与边界轮廓,还可有效显示斑块内新生血管,在多项研究中表现出与超声造影相近的诊断效能,且检查流程更为简便、耗时更短[21]。

SMI通过引入自适应滤波算法,将低速血流信号与组织运动伪影有效分离,从而在无需造影剂的情况下获取较为真实的微血管血流信息。既往 Mahtab Zamani [22]的研究显示,SMI在识别斑块内新生血管方面与CEUS具有较高一致性,但该一致性呈现明显的斑块厚度依赖性。魏小雨等[23]指出,当斑块厚度 $\geq 2.5$  mm时,两种技术在IPN检测中的一致性较好;而当斑块厚度 $< 2.5$  mm时,SMI对IPN的检测灵敏度相对下降。

与CEUS相比,SMI无需静脉注射造影剂即可实现斑块内新生血管的可视化,因而具有操作简便、安全性高、检查时间短、分辨率较高、可重复性良好且对检测角度依赖性较低等优势,显示出作为无创影像学工具的广阔应用前景。Linggang Cheng [24]等人的研究显示用SMI评估斑块内的新生血管化水平越高,发生缺血性脑卒中的风险就越高。同时 Xiuli Jin [25]的研究进一步将SMI所建立的新生血管评分与脑卒中相联系起来,证实了SMI在评估斑块的易损性及卒中风险分层具有很高的临床价值。然而,该技术亦存在一定局限:当前研究多采用分级或半定量分析方法,尚缺乏统一、标准化的定量评价体系;

其影像学表现与组织病理学特征及疾病进展之间的对应关系仍有待进一步验证;同时,对极微小血管的稳定识别能力亦存在一定不足。这些问题也导致基于 SMI 指标的预测模型尚未形成统一的构建标准,不同研究的指标赋值、模型纳入变量存在差异,影响了模型的跨中心推广。

综合现有证据,SMI 更适合作为 CEUS 之前的无创筛查或初步评估工具,是一个很好的用于评估斑块的易损性及预测脑卒中发生风险的工具,但在高风险斑块的精细化评估方面,尚难完全替代 CEUS 的临床价值,在风险预测模型中,可将 SMI 作为初筛指标,联合 CEUS 指标提升模型对高危人群的识别能力。

### 3.5. 超声弹性成像技术

超声弹性成像是一类基于组织力学特性的新兴影像技术,可对生物组织的弹性或硬度进行定量或半定量评估,在连接影像学、病理学与生物力学研究方面具有独特优势。其中,剪切波超声弹性成像(shear wave elastography, SWE)因其定量能力较强,在颈动脉粥样硬化研究中受到广泛关注[26]。

SWE 通过声辐射力激发组织内剪切波传播,并借助超快成像技术计算反映组织硬度的力学参数(如杨氏模量)。一般认为,杨氏模量值越高,组织硬度越大[27]。既往研究显示,易损斑块的杨氏模量值显著低于稳定性斑块( $P < 0.001$ ) [28],而较高的杨氏模量平均值则提示较低的斑块易损风险[18],表明斑块力学特性与其稳定性密切相关。

与常规超声主要反映结构性改变(如内-中膜厚度增厚)不同,血管壁弹性减退等力学变化往往早于明显形态学异常出现。SWE 主要聚焦于血管壁纵向弹性的量化检测,可对颈动脉壁及斑块硬度进行客观评估。将 SWE 获取的弹性参数与常规超声结构指标相结合,有助于实现对颈动脉斑块易损性的多维度评估。Linggang Cheng [24]等人的研究证明斑块的硬度越低发生缺血性脑卒中的风险就越高,并且与斑块内新生血管化程度相结合与发生缺血性脑卒中风险的相关性就越高。Luni Zhang [29]也进一步地验证了这一说法,并且证实了 SWE 可以作为缺血性脑卒中发生风险的独立预测因子,具有较高的临床价值。

SWE 具有无需外部加压、可重复性较好等优势,但仍可能受到探头加压及血管搏动等因素影响,其在临床决策中的增量价值尚需前瞻性研究进一步验证。总体而言,SWE 可作为斑块稳定性评估的重要补充手段,可以用于量化颈动脉斑块弹性及评估血管事件发生风险的工具[30],但尚难单独承担风险分层的核心角色。在风险预测模型中,弹性成像指标更适合作为联合指标,与血流灌注、形态学指标协同提升模型的预测效能。

### 3.6. 多维度无创超声技术的融合与发展

#### 3.6.1. 超声超分辨率成像(Super Resolution Imaging, SRI)

该技术受光学超分辨率成像启发,通过超快超声成像、杂波滤波、微泡定位算法等关键技术,来追踪血流中微泡(对比剂)的位置,实现其极高的时间和空间分辨率[31]。目前有初步的动物实验证明该技术可以分辨微小血管并量化血流速度、血管密度等参数,对动脉粥样硬化斑块的新生血管的评估有较高的价值。但由于其成像速度慢、需要注射对比微泡、临床超声设备的分辨力限制、运动伪影等原因,导致该技术的临床实验研究较少。Qiyang Chen 所进行的动物实验验证了 SRI 在兔动脉粥样硬化斑块中识别血管外膜小血管的能力与离体微型 CT 一致[32],因此若该技术可以广泛地用于临床,对斑块的易损性及卒中风险分层的研究将会有很大的价值[33]。其量化的微血管参数也有望成为缺血性脑卒中风险预测模型的新型核心指标,进一步提升模型的预测精度。

#### 3.6.2. 超声靶向微泡破坏(Ultrasound Targeted Microbubble Destruction, UTMD)

UTMD 是一种融合超声物理、生物材料与分子医学的新兴交叉技术,具有非侵入性、可重复性及靶

向性强等特点[34]。该技术通过将靶向微泡与超声激发相结合,在颈动脉斑块易损性的影像评估与干预调控方面展现出良好应用前景。

在评估层面,UTMD可联合靶向微泡实现对颈动脉斑块分子特征的特异性显影。动物实验研究表明,靶向微泡造影(targeted microbubbles, MBt)在动脉粥样硬化斑块显影效果及易损性评估准确性方面均优于裸微泡(control microbubbles, MBc) [35],有助于实现斑块的早期、敏感及特异性识别。其检测的斑块分子特征指标,如炎症靶点表达水平、新生血管内皮活性等,为缺血性脑卒中风险预测模型向分子层面拓展提供了可能,有望实现对斑块破裂风险的早期精准预测。

在治疗层面,UTMD可利用超声空化效应诱导靶向聚集于斑块新生血管部位的微泡发生膨胀与破裂,产生局部机械效应,从而损伤新生血管内皮、抑制异常血管生成,降低斑块出血及不稳定风险[36]。此外,微泡还可作为药物或基因递送载体,例如 Yu Wu [37]等人将 microRNA-145a-5P 传送至小鼠的局部主动脉、Lifei Yang [38]等人通过 UTMD 来控制糖原合成酶激酶(GSK)-3 $\beta$  在家兔身上的表达,将抗炎、抗血管生成或调控斑块稳定性的治疗分子精准输送至斑块局部,在超声触发下实现定点释放与局部作用,从而减轻斑块炎症反应、增强斑块稳定性。

现有动物实验结果显示,UTMD干预后斑块内新生血管密度显著降低[39],提示该技术在易损斑块无创、精准干预方面具有重要潜力,也可以降低高危患者发生脑卒中的风险。然而,其安全性、参数标准化及长期疗效仍有待进一步系统研究验证。

## 4. 挑战与未来方向

### 4.1. 当前局限性

尽管多种超声技术在颈动脉斑块易损性评估中展现出重要价值,但其临床应用仍面临若干局限。首先,对斑块内部成分的精细分辨能力有限,尤其在钙化斑块中,致密钙化产生的声影效应可显著干扰脂质核心及纤维帽等结构的准确评估。其次,定量评价体系尚未统一,不同技术的参数分析方法仍缺乏标准化,如超声造影的时间-强度曲线分析及超微血管成像的血流分级在一定程度上依赖操作者经验,影响结果的可比性与重复性。再次,现有证据多来源于单中心或小样本研究,多中心、大样本及前瞻性研究仍然不足,部分新兴技术(如 UTMD)尚处于实验研究阶段,其临床可行性与安全性有待进一步验证。最后,超声影像难以直接反映斑块内炎症活性,通常需联合血清学炎症标志物(如 hsCRP、IL-6、MMP-9)进行综合评估,以提升对斑块生物学行为的判断能力。

### 4.2. 未来发展趋势

#### 4.2.1. 多模态影像融合技术

未来,颈动脉斑块易损性的评估将逐步由单一影像手段向多模态影像融合方向发展。通过整合超声与 MRI、CTA 及 PET 等技术,可在同一评估框架内综合获取斑块的形态学、功能学及分子学信息,从而实现斑块易损性的全方位表征及对脑卒中高危人群做到更好的筛查。例如,超声联合 CTA 可同时评估斑块的组织特性与管腔狭窄程度,在提高斑块及脑卒中风险分层准确性方面显示出一定优势[40]。基于多模态影像融合的指标构建缺血性脑卒中风险预测模型,将突破单一超声技术的指标局限,实现形态、功能、分子多维度指标的协同,有望进一步提升模型的预测效能。

#### 4.2.2. 人工智能与大数据驱动的智能评估

人工智能技术,尤其是机器学习与深度学习算法,为超声影像的客观化与标准化分析提供了新的可能。目前影像组学(Radiomics)与深度学习在颈动脉斑块领域的应用已取得具体研究成果,影像组学可从

超声图像中提取数百个高通量纹理特征、灰度特征及形态特征, 通过特征筛选构建的斑块易损性分类模型, 显著高于传统的人工视觉评估, 可以降低操作者依赖性与人为误差, 提升评估结果的一致性和可重复性[41]。随着多中心数据积累与模型优化, 基于大数据的智能评估体系有望在临床中发挥更大价值。

#### 4.2.3. 分子超声成像的精准表征

分子超声成像通过开发具有特异靶向能力的微泡造影剂, 为斑块生物学行为的无创评估提供了新的手段。靶向整合素受体、血管内皮生长因子受体等分子标志物的微泡造影剂[42], 可实现对斑块内炎症反应及新生血管内皮细胞的特异性显影, 从分子水平反映斑块易损性。这一策略有望弥补常规影像技术在炎症与分子过程评估方面的不足。

#### 4.2.4. 评估 - 干预 - 监测一体化诊疗模式

随着超声技术的持续演进, 基于影像引导的“评估 - 治疗 - 监测”一体化诊疗模式逐渐成为发展方向。通过靶向微泡负载药物或生物活性分子, 在超声触发下实现对易损斑块的精准干预, 并同步利用超声成像对治疗过程及疗效进行实时监测, 有望推动颈动脉粥样硬化从风险评估向无创、精准干预的转变, 也可以有效降低高危人群发生脑卒中的风险。

## 5. 结论

超声技术在缺血性脑卒中患者颈动脉斑块易损性评估中不断发展, 已由传统二维形态学观察拓展为涵盖三维成像、超声造影及超微血管成像的多维度评估体系, 具备无创性强、灵敏度高及临床可行性好的优势。超声造影(CEUS)可较为可靠地评估斑块内新生血管, 三维超声(3DUS)有助于量化斑块体积与负荷, 超微血管成像(SMI)操作简便, 适用于初步筛查, 相关技术已广泛应用于斑块风险分层、卒中复发风险评估及疗效监测。

未来, 通过建立标准化定量体系、推进多模态融合及人工智能赋能, 可进一步提升评估精度与临床转化效率。目前, CEUS 与 SMI 仍是临床可行性较高的技术路径, 弹性成像与三维定量技术提供补充信息, 而分子超声及超分辨率成像代表发展方向, 仍需进一步验证后方可广泛应用。

## 参考文献

- [1] 孟文婷, 李东翔, 佟玲. 缺血性脑卒中的治疗研究进展[J]. 中国新药杂志, 2016, 25(10): 1114-1120.
- [2] 马力丰, 温德惠, 袁桂莉等. 缺血性脑卒中患者的超微血流显像颈动脉斑块特征分析[J]. 影像科学与光化学, 2022, 40(5): 1304-1307.
- [3] Zhou, S., Yan, Y. and Hui, P. (2024) Clinical and Carotid Plaque Features in Symptomatic and Asymptomatic Ischemic Stroke. *British Journal of Hospital Medicine*, **85**, 1-13. <https://doi.org/10.12968/hmed.2024.0406>
- [4] 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.
- [5] Kashiwazaki, D., Yamamoto, S., Akioka, N., Hori, E., Shibata, T., Kuwayama, N., *et al.* (2021) Dilated Microvessel with Endothelial Cell Proliferation Involves Intraplaque Hemorrhage in Unstable Carotid Plaque. *Acta Neurochirurgica*, **163**, 1777-1785. <https://doi.org/10.1007/s00701-020-04595-0>
- [6] Mathiesen, E.B., Johnsen, S.H., Wilsgaard, T., Bønaa, K.H., *et al.* (2011) Carotid Plaque Area and Intima-Media Thickness in Prediction of First-Ever Ischemic Stroke: A 10-Year Follow-Up of 6584 Men and Women: The Tromsø Study. *Stroke*, **42**, 972-978.
- [7] 中国医师协会超声医师分会. 超声评价颈动脉易损斑块中国专家共识(2023 版) [J]. 中华超声影像学杂志, 2023, 32(8): 645-655.
- [8] Prabhakaran, S., Rundek, T., Ramas, R., *et al.* (2006) Carotid Plaque Surface Irregularity Predicts Ischemic Stroke: The Northern Manhattan Study. *Stroke*, **37**, 2696-2701.
- [9] Gupta, A., Kesavabhotla, K., Baradaran, H., *et al.* (2015) Plaque Echolucency and Stroke Risk in Asymptomatic Carotid

- Stenosis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Stroke*, **46**, 91-97.
- [10] 马春燕, 黄品同, 张巍, 等. 洞察血管, 见微知著: 颈动脉超声临床应用进展[J]. 中国医学影像技术, 2025, 41(8): 1308-1312.
- [11] Landry, A., Spence, J.D. and Fenster, A. (2005) Quantification of Carotid Plaque Volume Measurements Using 3D Ultrasound Imaging. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **31**, 751-762. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2005.02.011>
- [12] 邢海英, 陈玉辉, 许珂等. 三维超声血管斑块定量分析技术评估颈动脉粥样硬化斑块[J]. 北京大学学报(医学版), 2022, 54(5): 991-999.
- [13] van Engelen, A., Wannarong, T., Parraga, G., Niessen, W.J., Fenster, A., Spence, J.D., *et al.* (2014) Three-Dimensional Carotid Ultrasound Plaque Texture Predicts Vascular Events. *Stroke*, **45**, 2695-2701. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.114.005752>
- [14] 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>
- [15] Drivelegka, P., Forsblad-d'Elia, H., Angerås, O., Bergström, G., Schmidt, C., Jacobsson, L.T.H., *et al.* (2020) Association between Serum Level of Urate and Subclinical Atherosclerosis: Results from the SCAPIS Pilot. *Arthritis Research & Therapy*, **22**, Article No. 37. <https://doi.org/10.1186/s13075-020-2119-0>
- [16] 中国医师协会超声医师分会. 中国超声造影临床应用指南[M]. 北京: 人民军医出版社, 2017: 64-66.
- [17] Li, C., He, W., Guo, D., Chen, L., Jin, X., Wang, W., *et al.* (2014) Quantification of Carotid Plaque Neovascularization Using Contrast-Enhanced Ultrasound with Histopathologic Validation. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **40**, 1827-1833. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.02.010>
- [18] 王学椒, 崔立刚. 超声造影及超声弹性成像评估颈动脉斑块易损性应用进展[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2020, 17(9): 911-913.
- [19] Baud, J.M., Stanciu, D., Yeung, J., Maurizot, A., Chabay, S., de Malherbe, M., *et al.* (2021) Contrast Enhanced Ultrasound of Carotid Plaque in Acute Ischemic Stroke (CUSCAS Study). *Revue Neurologique*, **177**, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2020.03.023>
- [20] Sun, X., Niu, H., Pei, Y., Wang, X. and Chen, M. (2025) Development and Validation of a Prediction Model for Acute Ischemic Stroke Based on a Novel Ultrasound-Based Carotid Plaque Scoring System and Clinical Factors. *Journal of Clinical Ultrasound*, **54**, 322-333. <https://doi.org/10.1002/jcu.70072>
- [21] Xie, X., Bai, Z.Y., Liu, Y. and Zhang, H.B. (2018) Value of Superb Micro-Vascular Imaging in Diagnosing Carotid Artery Vulnerable Plaque. *Acta Academiae Medicinae Sinicae*, **40**, 444-449.
- [22] Zamani, M., Skagen, K., Scott, H., Lindberg, B., Russell, D. and Skjelland, M. (2019) Carotid Plaque Neovascularization Detected with Superb Microvascular Imaging Ultrasound without Using Contrast Media. *Stroke*, **50**, 3121-3127. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.119.025496>
- [23] 魏小雨, 杨力, 王雪, 等. SMI 和超声造影在颈动脉斑块内新生血管的比较分析[J]. 中国超声医学杂志, 2018, 34(4): 307-309.
- [24] Cheng, L., Zheng, S., Zhang, J., Wang, F., Liu, X., Zhang, L., *et al.* (2023) Multimodal Ultrasound-Based Carotid Plaque Risk Biomarkers Predict Poor Functional Outcome in Patients with Ischemic Stroke or TIA. *BMC Neurology*, **23**, Article No. 13. <https://doi.org/10.1186/s12883-023-03052-6>
- [25] Jin, X., Yang, X. and Li, F. (2025) Prediction of Ischemic Stroke in Elderly Hypertensive Patients Using Carotid Plaque Superb Microvascular Imaging Characteristics: A Lasso-Logistic Regression Model. *Journal of Medical Ultrasonics*, **52**, 227-235. <https://doi.org/10.1007/s10396-024-01513-0>
- [26] 王艳红, 钱林学, 胡向东, 马棣, 梁思. 剪切波弹性成像技术评估颈动脉斑块硬度[J]. 临床和实验医学杂志, 2015, 14(4): 327-330.
- [27] Pitros, C.F., Manaki, V., Kakisis, J.D. and Kakkos, S.K. (2025) The Role of Shear Wave Elastography in the Assessment of Carotid Plaque Vulnerability: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Angiology*, **44**, 415-425. <https://doi.org/10.23736/s0392-9590.25.05427-6>
- [28] 杨淑丽, 戴安群, 王盈溢. 剪切波弹性成像联合甘油三酯-葡萄糖指数对颈动脉粥样硬化斑块易损性的诊断效能[J]. 中国超声医学杂志, 2025, 41(8): 854-857.
- [29] Zhang, L., Jia, C., Gu, S., Chen, J. and Wu, R. (2024) Intraplaque Neovascularization Combined with Plaque Elasticity for Predicting Ipsilateral Stroke in Patients with Asymptomatic Mild Carotid Stenosis. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 4815-4824. <https://doi.org/10.21037/qims-24-202>
- [30] Habib, A.H., Baz, A.A., Mohamed, S.F. and Al-Azayem, S.A. (2025) Diagnostic Value of Ultrasound and Shear Wave

- Elastography in Carotid Plaque Risk Stratification. *Journal of Ultrasound*, **28**, 691-700. <https://doi.org/10.1007/s40477-025-01051-6>
- [31] Chen, Q., Song, H., Yu, J. and Kim, K. (2021) Current Development and Applications of Super-Resolution Ultrasound Imaging. *Sensors*, **21**, Article 2417. <https://doi.org/10.3390/s21072417>
- [32] Chen, Q., Yu, J., Lukashova, L., Latoche, J.D., Zhu, J., Lavery, L., et al. (2020) Validation of Ultrasound Super-Resolution Imaging of Vasa Vasorum in Rabbit Atherosclerotic Plaques. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **67**, 1725-1729. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2020.2974747>
- [33] Song, P., Rubin, J.M. and Lowerison, M.R. (2023) Super-Resolution Ultrasound Microvascular Imaging: Is It Ready for Clinical Use? *Zeitschrift für Medizinische Physik*, **33**, 309-323. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2023.04.001>
- [34] 江珍珍, 刘夏天, 马彩叶, 侯传玲, 程祖胜, 夏国园. 白细胞介素 18 靶向超声微泡对动脉斑块分子成像的实验研究[J]. 中华危重症医学杂志, 2018, 11(2): 100-103.
- [35] 刘金玲. 超声微泡造影应用于疾病诊疗的研究进展[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2010, 8(5): 453-455.
- [36] 温伊林, 刘俐, 魏立亚, 等. 超声靶向微泡爆破技术诊治动脉粥样硬化的研究进展[J]. 中国心血管病研究, 2022, 20(8): 752-756.
- [37] Wu, Y., Deng, C., Xu, J., Wang, W., Chen, Y., Qin, X., et al. (2023) Enhanced Local Delivery of MicroRNA-145a-5p into Mouse Aorta via Ultrasound-Targeted Microbubble Destruction Inhibits Atherosclerotic Plaque Formation. *Molecular Pharmaceutics*, **20**, 1086-1095. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.2c00799>
- [38] Yang, L., Chen, L., Fang, Y. and Ma, S. (2021) Downregulation of GSK-3 $\beta$  Expression via Ultrasound-Targeted Microbubble Destruction Enhances Atherosclerotic Plaque Stability in New Zealand Rabbits. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **47**, 710-722. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.11.002>
- [39] 黄鑫, 邓倾, 雷雨蒙, 田怡, 胡玉刚, 张瑶, 周青. 超声超分辨率成像评估前列腺结节微血管特征的可行性研究[J]. 中国超声医学杂志, 2025, 41(2): 206-209.
- [40] 陈蝶, 陈红, 吴晶晶, 郑恩海, 关莹. 颈部血管超声、CT 血管成像及磁共振血管造影诊断急性脑梗死患者颈动脉狭窄的研究[J]. 中国医学装备, 2023, 20(4): 52-55.
- [41] Saba, L., Sanagala, S.S., Gupta, S.K., Koppula, V.K., Johri, A.M., Khanna, N.N., et al. (2021) Multimodality Carotid Plaque Tissue Characterization and Classification in the Artificial Intelligence Paradigm: A Narrative Review for Stroke Application. *Annals of Translational Medicine*, **9**, Article 1206. <https://doi.org/10.21037/atm-20-7676>
- [42] 杨振, 张明博, 罗渝昆. 超声分子靶向造影剂的应用研究进展[J]. 中国医学科学院学报, 2023, 45(2): 298-302.