

# 超声弹性成像在乳腺结节良恶性鉴别中的应用

周冬洁, 冉海涛\*

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

乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤, 在部分地区死亡率仍持续增长, 防治形势十分严峻。乳腺癌的早期诊断具有重要意义。常规超声检查在乳腺结节良恶性鉴别诊断中具有重要价值, 但其特异性有限。超声弹性成像(Ultrasound Elastography)作为一种新兴技术, 通过评估病变组织的硬度特性, 结合常规超声表现, 能显著提高对乳腺结节良恶性鉴别的准确性。本文综述了超声弹性成像在乳腺结节诊断中的应用进展, 探讨其临床价值及未来的发展方向。

## 关键词

超声弹性成像, 乳腺结节, 良恶性鉴别, 剪切波弹性成像, 应变弹性成像

# Application of Ultrasound Elastography in the Differential Diagnosis of Benign and Malignant Breast Nodules

Dongjie Zhou, Haitao Ran\*

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

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

## Abstract

Breast cancer is the most common malignant tumor in women, and its mortality rate continues to increase in some regions, resulting in a severe situation for prevention and treatment. Early diagnosis of breast cancer is of great importance. Conventional ultrasound plays a valuable role in the differential diagnosis of benign and malignant breast nodules, but its specificity is limited. As an emerging technique, ultrasound elastography can significantly improve the accuracy of differentiating

\*通讯作者。

benign from malignant breast nodules by evaluating the stiffness characteristics of lesions, in combination with conventional ultrasound findings. This article reviews the advances in the application of ultrasound elastography in the diagnosis of breast nodules, and discusses its clinical value and future development directions.

## Keywords

Ultrasound Elastography, Breast Nodules, Benign-Malignant Differentiation, Shear Wave Elastography, Strain Elastography

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

根据最新全球癌症数据分析, 乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤[1], 是危害人类健康的重大疾病之一[2], 早期诊断对提高患者的生存率至关重要。超声检查因其无创、便捷、经济等优势, 成为乳腺结节筛查的重要手段。然而, 传统的超声主要依赖病灶的形态学特征(如组织形态、结构、边界、回声等)[3][4], 在结节的良恶性鉴别中存在着一定的局限性。超声弹性成像通过量化组织硬度, 为乳腺结节的良恶性鉴别提供了新的补充信息, 能一定程度上提高诊断准确性。

## 2. 超声弹性成像技术概述

超声波应用于组织的机械特性成像技术被称为超声弹性成像, 该技术可以实现对深部组织、器官异常病变的定性和定量评估。1981年, Ophir团队首次提出“弹性成像”(Elastography)的概念, 通过测量组织受压后的应变分布来反映不同组织之间的硬度差异。1990年, Yamakoshi开发了一种基于静态压缩的应变弹性成像方法, 证实乳腺肿瘤与正常组织的应变比有一定的差异[5]。2013年, 超声弹性图首次被纳入ACRBI-RADS-ATLAS的超声(美国)一章中, 并引入了质硬、质中和质软等弹性评估的术语[6]。现在主要应用的超声弹性成像技术分为应变弹性成像(Strain Elastography, SE)和剪切波弹性成像(Shear Wave Elastography, SWE)两大类。

### 2.1. 应变弹性成像(SE)

应变弹性成像技术的原理是通过向受检者施加一个外部的压力, 接收同一个位置在施压前、后的两组回波信号, 分析两组回波信号得到组织的应变分布信息, 再用不同的灰阶值或者伪彩色等将组织应变的二维分布信息转化为二维的灰度或者伪彩色图像, 是一种定性和半定量检测方法[7][8]。

### 2.2. 剪切波弹性成像(SWE)

剪切波弹性成像技术的原理是通过追踪剪切波在组织中的传播速度来演算组织的弹性模量。利用声辐射力产生剪切波, 直接测量组织的杨氏模量(kPa)[9], 提供定量数据, 可以反映组织硬度和渗透压变化[10]。硬度越高, 剪切波速度越快, 例如, 恶性肿瘤的杨氏模量最大值通常显著高于良性病变。

## 3. 主流超声设备厂家弹性成像技术差异及设备特异性的重要性

不同主流超声设备厂家在弹性成像的参数设定、操作手法设计及临床推荐截止值上均存在一定的差

异, 这种差异会导致临床诊断中无法采用统一的标准, 这也是不同医疗机构诊断结果不一致的重要原因。以下通过表格对比西门子(SSI)、通用电气(GE)、飞利浦(Philips)三大厂家的弹性成像技术差异, 并阐述临床建立“设备特异性”标准的必要性。

### 3.1. 主流厂家超声弹性成像技术参数、操作及截止值对比

#### 3.1.1. 西门子(SSI)

杨氏模量测量范围: 0~500 kPa; 取样框大小: 1~10 mm 可调; 帧率  $\geq 30$  fps; 空间分辨率 0.08 mm。

操作手法要求: SE 模式: 探头轻压, 频率 1~2 次/秒, 与皮肤垂直偏差  $\leq 5^\circ$ ; SWE 模式: 无需加压, 屏气 3~5 s 完成测量, 取样框完全覆盖病灶。

乳腺结节推荐截止值(SWE): 最大弹性值: 良性  $< 50$  kPa, 恶性  $\geq 90$  kPa。

#### 3.1.2. 通用电气(GE)

杨氏模量测量范围: 0~400 kPa; 支持自动测量并取均值; 帧率 25~30 fps; 空间分辨率 0.1 mm。

操作手法要求: SE 模式: 加压幅度以病灶显示应变变化为宜, 避免过度压迫乳腺腺体; SWE 模式: 声辐射力聚操作手法要求: 聚焦于病灶中心, 取样框覆盖病灶  $\geq 80\%$ 。

乳腺结节推荐截止值(SWE): 最大弹性值: 良性  $< 45$  kPa, 恶性  $\geq 80$  kPa。

#### 3.1.3. 飞利浦(Philips)

杨氏模量测量范围: 0~300 kPa; 具备 Q-I 质量指数(剪切波信噪比  $\geq 30$  为有效测量); ROI 自动/手动双模式; 三维成像层厚 0.5 mm。

操作手法要求: SE 模式: 智能探头实时反馈压力值, 维持压力指数 1~3 为最佳; SWE 模式: 屏气中期测量, 探头与皮肤垂直  $\pm 10^\circ$ 。

乳腺结节推荐截止值(SWE): 最大弹性值: 良性  $< 48$  kPa, 恶性  $\geq 85$  kPa。

### 3.2. 临床实践中建立“设备特异性”标准的重要性

#### 3.2.1. 减少测量偏差, 提升诊断准确性

不同厂家的弹性成像技术在声辐射力强度、剪切波追踪算法、参数校准等核心环节存在技术差异, 同一乳腺结节在不同设备上的杨氏模量测量值也会出现一定的偏差[11]。如果盲目套用通用诊断阈值, 有可能会造成假阳性或假阴性诊断, 而设备特异性标准可匹配设备的技术特点, 一定程度上减少测量偏差带来的诊断误差, 使弹性成像的诊断特异性提升。

#### 3.2.2. 实现多中心诊断的可重复性

多中心临床研究、跨院转诊及乳腺疾病筛查中, 不同医疗机构所用超声设备厂家存在差异, 缺乏设备特异性标准会导致诊断结果无法相互印证。建立适配各设备的诊断阈值, 能够实现同一病灶在不同机构的可重复测量与诊断, 提升乳腺结节良恶性鉴别的临床一致性。

#### 3.2.3. 优化 BI-RADS 分类的精准性

弹性成像对 BI-RADS 3 类、4A 类结节的升级或降级是其核心临床价值[12], 而设备特异性的截止值能更精准地对结节进行风险分层, 避免因阈值不适配导致的过度穿刺或漏诊, 有效减少医疗资源浪费并提高早期乳腺癌的检出率。

#### 3.2.4. 规范临床操作与数据解读

设备特异性标准不仅包含诊断截止值, 还配套适配该设备的操作手法规范[8], 能指导临床医师根据

设备特点进行标准化操作, 同时让影像科医师基于设备参数解读弹性成像数据, 实现操作与解读的双重规范, 降低操作者依赖性带来的诊断偏差[12]。

## 4. 超声弹性成像在乳腺结节诊断中的应用

### 4.1. 提高诊断特异性

多项研究显示, 传统超声在乳腺结节良恶性鉴别中的特异性约为 60%~80%, 而联合弹性成像技术后, 特异性可显著提升至 85%~95%, 尤其在 BI-RADS 4A 类结节中表现突出[13]。Hall 等[14]证明利用弹性长度与 B 型超声长度的比值(E/B)  $\geq 1$  来作为高度怀疑恶性肿瘤的指标, 该指标对识别乳腺癌具有较高的预测价值。Ueno 等[15]利用病变周围脂肪的硬度相对恒定的特性, 首次提出了使用乳腺病变硬度与周围脂肪硬度的比值, 即应变比(Strain Ratio, SR)或脂肪与病变比值(Fat-to-Lesion Ratio, FLR), 此比值可以从数值上评价目标病变比周围脂肪相比硬多少倍来评估病变的良、恶性。在乳腺超声检查中, SWE 已被证明有助于区分乳腺良恶性病变, 有人认为 SWE 提高了超声检查的诊断性能, 潜在地提高了使用乳腺成像报告和数据系统标准的传统超声检查的特异性[13]。

### 4.2. 良恶性鉴别标准

#### 4.2.1. 应变弹性成像

常用的乳腺病变评分标准是 Itoh 等[16]提出的使用 5 分彩色标尺用于 SE 中的病变分类, 即 Tsukuba 评分, 该诊断方法基于弹性图中病变和周围区域的彩色(绿色和蓝色的平衡, 蓝色标尺代表硬度), 分值范围为 1~5, 分值越高, 恶性可能性就越大。通常认为 Tsukuba 评分  $\geq 4$  分提示恶性可能[17][18]。但是需结合二维形态学特征, 如边缘毛刺、微钙化等进行综合判断[16][17]。

#### 4.2.2. 剪切波弹性成像

绝对硬度阈值法[14]

参数	良性(kPa)	恶性(kPa)	研究支持
最大弹性值	<45~50	$\geq 80\sim 100$	BCR 2010 [19]
平均弹性值	<35	$\geq 60$	WFUMB 指南 2021
病灶/脂肪比	<3.5	$\geq 5.0$	欧洲乳腺协会共识

形态学特征法

良性: 均匀蓝色/绿色(硬度均匀), 边界渐变;

恶性: 异质性硬度(红蓝混杂); “硬环征”(病灶边缘硬度  $>$  中心); 周围组织牵拉僵硬(结构扭曲)。

### 4.3. 联合诊断策略

(1) BI-RADS 分类联合弹性成像: 弹性成像可优化 BI-RADS 4A 类结节的分类, 可以对结节进行升级或降级, 减少过度诊疗[20][21]。BI-RADS 3 类(可能良性)建议短期随访, 但仍有约 2%恶性风险; BI-RADS 4 类(可疑恶性)范围宽泛(4A-4C, 恶性风险 2%~95%), 易导致过度穿刺。

(2) 多模态超声联合应用: 常规超声与弹性成像、彩色多普勒、超声造影联合应用。常规超声: 反映组织的二维特点, 如边缘、形状、纵横比等。弹性成像: 反映病变组织的硬度, 如癌灶的纤维化或坏死。彩色多普勒: 显示病灶的血流分布, 如恶性肿瘤的异常血管形态。超声造影: 显示病灶的微血管灌注。

这几者通过整合二维特点、组织力学特性、血流动力学和微血管灌注信息, 可提高肿瘤性病变、炎症性疾病及血管异常的诊断准确性。这种多模态融合策略在临床实践中已成为精准超声诊断的重要发展方向[21]-[24]。

## 5. 临床研究进展

大量临床研究证实了超声弹性成像的价值。多项临床研究显示, 超声弹性成像平均灵敏度约 87%, 特异性约 80% [25]。一项 2022 年的 Meta 分析显示, 超声弹性成像鉴别乳腺结节良恶性的合并敏感性和特异性分别达到 89%和 92%。SWE 的最佳应用场景之一是对 BI-RADS 3 类和 4a 类乳腺肿块进行特征分析, 以期减少不必要的乳腺活检[13][26]。基于强有力的证据, 欧洲超声医学与生物学联合会等多国指南均已推荐将弹性成像作为乳腺结节诊断的常规辅助手段, 并明确提出建设设备特异性诊断标准的临床要求, 建议各医疗机构基于所用超声设备开展单中心大样本研究, 制定适配的诊断阈值与操作规范[11]。

## 6. 局限性及应对措施

尽管优势显著, 超声弹性成像仍面临一些挑战[25]:

### 6.1. 局限性

#### 6.1.1. 操作依赖性

弹性成像作为重要的超声成像技术, 其诊断准确性高度依赖于操作者的经验和手法, 这种操作依赖性是其限制其临床推广的重要因素之一。应变弹性成像需通过探头加压或患者呼吸运动产生组织形变, 加压力度、频率的微小差异会导致应变计算偏差。剪切波弹性成像依赖外部振动或声辐射力激发剪切波, 探头放置角度、耦合剂用量可能影响测量。感兴趣区域(ROI)的选择、取样框大小及位置依赖操作者经验, 不同测量可能产生 $\pm 10\% \sim 15\%$ 的弹性模量差异[6]。

#### 6.1.2. 组织异质性

部分良性病变可能表现高硬度, 导致假阳性, 如纤维腺瘤。部分恶性病变也可能表现为低硬度, 导致假阴性[25]。

#### 6.1.3. 深部结节限制

由于声束在组织传播过程中存在能量衰减效应, 弹性成像技术对深部或微小病灶的评估能力存在着一定的局限性。也就是随着探测深度的增加, 超声波在穿过不同组织界面时会发生反射、散射和吸收, 导致声波能量急剧衰减。这种衰减效应会降低深部病灶(通常指深度  $> 5 \text{ cm}$  的组织结构)的回波信号强度, 使得弹性成像所需的应变信息采集不完整。同时, 对于直径  $< 5 \text{ mm}$  的微小结节, 由于受到系统空间分辨率的限制, 其产生的弹性信号容易被周围组织的背景噪声所淹没。这些因素导致深部病灶的弹性评分可能出现假阴性, 而微小结节的弹性图则可能出现边界模糊或定量不准确等问题[6]。

#### 6.1.4. 设备间技术差异导致的诊断标准混乱

不同厂家设备的弹性成像参数、测量算法、截止值推荐不同, 而临床缺乏统一的设备特异性标准, 导致部分医疗机构盲目套用通用阈值, 造成诊断结果不一致, 影响弹性成像技术的临床可信度。

### 6.2. 解决方案

#### 6.2.1. 硬件优化

比如设计使用智能探头: 集成压力传感器(如飞利浦 EPIQ 系列), 实时反馈加压力度并自动校准。多

角度复合成像：通过矩阵阵列探头获取多平面数据，减少取样偏差。

### 6.2.2. 人工智能辅助

比如自动 ROI 选择：深度学习模型自动识别病灶并优化取样框位置。弹性值标准化：AI 补偿不同操作者导致的参数差异，降低测量的变异系数。

### 6.2.3. 标准化流程

培训操作人员按照统一标准进行相关操作，EFSUMB 操作指南：规定探头放置角度(与皮肤垂直  $\pm 10^\circ$ )、呼吸配合要求(屏气中期测量)等细节。质控模块：设备内置质量指数(Q-I 指数)，提示测量是否可靠(如剪切波信噪比  $> 30$ )。

### 6.2.4. 设备特异性诊断标准

各医疗机构基于所用超声设备，开展单中心大样本临床研究，制定适配该设备的弹性成像截止值和诊断标准；行业内推动不同厂家设备的临床数据共享，由超声医学专业委员会牵头，形成规范化的设备特异性标准指南，指导临床精准应用。

### 6.2.5. 多模态交叉验证

弹性成像与超声造影、磁共振技术等联合使用，通过多参数模型减少单一操作误差影响。

### 6.2.6. 实操建议

深部病灶(深度  $> 5$  cm)的操作优化技巧：适当降低探头频率、采用轻压慢放手法、适当提升深度增益。ROI 大小与位置的优化技巧：遵循病灶全覆盖以及少量周围正常组织原则，ROI 面积为病灶的 1.2~1.5 倍为宜，SWE 测量时将 ROI 中心对准病灶几何中心，微小结节( $< 5$  mm)选择 ROI 时可使用设备局部放大功能。

## 7. 未来发展方向

弹性成像的操作依赖性是其临床应用的主要瓶颈，但通过硬件革新、AI 辅助及标准化建设，可显著提升结果的可重复性和诊断效能。未来需进一步推动自动化技术发展，使弹性成像成为真正可推广、普及的定量工具。

### 7.1. 人工智能辅助分析

弹性成像技术在临床应用面临诸多挑战，如操作者依赖性高、图像解读主观性强，以及微小或深部病变的评估受限。结合人工智能的弹性成像在乳腺肿瘤良恶性分类中具有较高的诊断准确性，但受限于研究异质性和人群局限，需进一步通过前瞻性、多中心、多种族研究验证其广泛适用性[27]。近年来，深度学习(Deep Learning, DL)被引入弹性成像分析，以优化自动化诊断流程。深度学习技术可用于弹性图像的增强、病灶自动分割与特征提取，乃至多模态数据融合，有望显著降低操作依赖性，提高诊断的自动化水平和准确性[28]。

### 7.2. 三维弹性成像

是指在二维弹性成像的基础上，通过三维空间数据采集和重建，实现对组织弹性特性的立体可视化，可以提供更全面的组织硬度分布信息，能够更准确地评估病变的形态、体积及力学特性，减少二维弹性成像的抽样误差[29]。并且可以提高病变定位的准确性，可以有效应用于介入手术中，为临床提供更准确的位置信息，提高手术的效率 and 成功率。

### 7.3. 多模态影像融合技术

多模态影像融合(Multimodal Image Fusion)是指将不同成像模态(如超声、MRI、钼靶、CT等)获取的医学图像进行配准、融合与分析。各种影像学检查方法的原理不同,各具有其优势与局限性。多模态影像融合综合利用各模态的优势,弥补单一成像技术的局限性,可全面分析病灶特征、提高疾病检出率及良恶性鉴别能力[30]。

### 7.4. 设备特异性标准体系构建

未来将推动超声设备行业与临床医疗机构的深度合作,开展多中心、大样本、前瞻性的临床研究,针对不同厂家、不同型号的超声设备,制定统一的设备特异性诊断标准体系和行业指南,实现弹性成像诊断的标准化、规范化,消除设备间技术差异带来的临床诊断偏差[11]。同时,将临床实操技巧纳入标准体系,编制分级操作手册,助力基层医生快速掌握技术要点,提升弹性成像技术的全民普及性。

## 8. 结论

超声弹性成像技术提高了乳腺结节良恶性鉴别的准确性,尤其是在优化 BI-RADS 分类和减少不必要的活检方面具有重要的临床价值。未来随着人工智能发展、弹性成像技术的进步以及多模态影像融合技术,弹性成像技术有望成为乳腺疾病诊断的标准化工具。

## 参考文献

- [1] Bray, F., Laversanne, M., Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R.L., Soerjomataram, I., *et al.* (2024) Global Cancer Statistics 2022: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **74**, 229-263. <https://doi.org/10.3322/caac.21834>
- [2] Loibl, S., Poortmans, P., Morrow, M., Denkert, C. and Curigliano, G. (2021) Breast Cancer. *The Lancet*, **397**, 1750-1769. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)32381-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)32381-3)
- [3] 王艳, 吕宝如, 郑智. 乳腺癌患者超声弹性成像 AR 值与硬度评分与 MMP-9、BRCA1、P53 表达的相关性[J]. 分子诊断与治疗杂志, 2023, 15(3): 459-462+467.
- [4] 任玉洁. 彩色多普勒超声在乳腺癌诊断中的应用价值及准确性分析[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(10): 16-18.
- [5] Gennisson, J.L., Deffieux, T., Fink, M. and Tanter, M. (2013) Ultrasound Elastography: Principles and Techniques. *Diagnostic and Interventional Imaging*, **94**, 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2013.01.022>
- [6] Bamber, J., Cosgrove, D., Dietrich, C., Fromageau, J., Bojunga, J., Calliada, F., *et al.* (2013) EFSUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Ultrasound Elastography. Part 1: Basic Principles and Technology. *Ultraschall in der Medizin*, **34**, 169-184. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1335205>
- [7] 刘亭, 杨艳. 应变式弹性成像技术在鉴别 ACR TI-RADS 4 类中 1.5 cm 以上甲状腺结节良恶性的作用分析[J]. 影像研究与医学应用, 2023, 7(3): 110-112.
- [8] 孙瑞超, 唐亚男, 李灵, 等. 实时超声弹性成像原理与方法[J]. 中国医疗器械信息, 2013, 19(6): 1-9.
- [9] Taljanovic, M.S., Gimber, L.H., Becker, G.W., Latt, L.D., Klausner, A.S., Melville, D.M., *et al.* (2017) Shear-Wave Elastography: Basic Physics and Musculoskeletal Applications. *Radio Graphics*, **37**, 855-870. <https://doi.org/10.1148/rg.2017160116>.
- [10] 刘莹, 杨鹏, 吴剑, 等. 基于剪切波弹性成像、超声造影及免疫组化指标的联合模型预测乳腺癌新辅助化疗疗效[J]. 临床超声医学杂志, 2025, 27(11): 918-925.
- [11] Cosgrove, D., Piscaglia, F., Bamber, J., Bojunga, J., *et al.* (2013) EFSUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Ultrasound Elastography. Part 2: Clinical Applications. *Ultraschall in der Medizin*, **34**, 238-253. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1335375>
- [12] 孙艺嘉, 江峰. 超声弹性成像对乳腺 BI-RADS 4a 类微小结节选择性降级的诊断价值研究[J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2024, 45(12): 1149-1155.
- [13] Youk, J.H., Gweon, H.M. and Son, E.J. (2017) Shear-Wave Elastography in Breast Ultrasonography: The State of the Art. *Ultrasonography*, **36**, 300-309. <https://doi.org/10.14366/usg.17024>

- [14] Hall, T.J., Zhu, Y. and Spalding, C.S. (2003) *In Vivo* Real-Time Freehand Palpation Imaging. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **29**, 427-435. [https://doi.org/10.1016/s0301-5629\(02\)00733-0](https://doi.org/10.1016/s0301-5629(02)00733-0)
- [15] Ueno, E., Umemoto, T., Bando, H., *et al.* (2007) New Quantitative Method in Breast Elastography: Fat Lesion Ratio (FLR). *Radiological Society of North America 2007 Scientific Assembly and Annual Meeting*, Chicago, 25-30 November 2007.
- [16] Itoh, A., Ueno, E., Tohno, E., Kamma, H., Takahashi, H., Shiina, T., *et al.* (2006) Breast Disease: Clinical Application of US Elastography for Diagnosis. *Radiology*, **239**, 341-350. <https://doi.org/10.1148/radiol.2391041676>
- [17] Sinha, D., Sharma, S., Kundaragi, N.G. and Kale, S.K. (2020) Added Value of Strain Elastography in the Characterisation of Breast Lesions: A Prospective Study. *Ultrasound*, **28**, 164-173. <https://doi.org/10.1177/1742271x20912762>
- [18] Zhi, H., Ou, B., Xiao, X., Peng, Y., Wang, Y., Liu, L., *et al.* (2013) Ultrasound Elastography of Breast Lesions in Chinese Women: A Multicenter Study in China. *Clinical Breast Cancer*, **13**, 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.clbc.2013.02.015>
- [19] Evans, A., Whelehan, P., Thomson, K., McLean, D., Brauer, K., Purdie, C., *et al.* (2010) Quantitative Shear Wave Ultrasound Elastography: Initial Experience in Solid Breast Masses. *Breast Cancer Research*, **12**, R104. <https://doi.org/10.1186/bcr2787>
- [20] Jiang, X., Chen, L.Y., Li, J., Chen, F.Y., He, N.A. and Ye, X.J. (2024) Combination of Different Sectional Elastography Techniques with Age to Optimize the Downgrading of Breast BI-RAIDS Class 4a Nodules. *Current Medical Imaging*, **20**, e15734056307595.
- [21] 张鑫, 李金生, 杨静, 等. 超声剪切波弹性成像联合超微血管成像诊断乳腺微小癌的临床价值[J]. 河南医学研究, 2025, 34(22): 4170-4174.
- [22] 罗素凤, 招晖, 许素贞. 超声弹性成像联合高频彩超对乳腺癌的诊断效果[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(22): 164-166.
- [23] Ding, Z., Liu, W., He, N., *et al.* (2021) Value of Ultrasound Elastography Combined with Contrast-Enhanced Ultrasound and Micro-Flow Imaging in Differential Diagnosis of Benign and Malignant Breast Lesions. *American Journal of Translational Research*, **13**, 13941-13949.
- [24] Sohn, Y.M., Kim, M.J., Kim, E.K., Kwak, J.Y., Moon, H.J. and Kim, S.J. (2009) Sonographic Elastography Combined with Conventional Sonography: How Much Is It Helpful for Diagnostic Performance? *Journal of Ultrasound in Medicine*, **28**, 413-420. <https://doi.org/10.7863/jum.2009.28.4.413>
- [25] Faruk, T., Islam, M.K., Arefin, S. and Haq, M.Z. (2015) The Journey of Elastography: Background, Current Status, and Future Possibilities in Breast Cancer Diagnosis. *Clinical Breast Cancer*, **15**, 313-324. <https://doi.org/10.1016/j.clbc.2015.01.002>
- [26] Pillai, A., Voruganti, T., Barr, R. and Langdon, J. (2022) Diagnostic Accuracy of Shear-Wave Elastography for Breast Lesion Characterization in Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of the American College of Radiology*, **19**, 625-634. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2022.02.022>
- [27] Hu, W., Li, X., Tang, Y., Mao, X., Li, C., Wang, Y., *et al.* (2025) Performance of Artificial Intelligence-Assisted Ultrasound Elastography in Classifying Benign and Malignant Breast Tumors: A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Medical Imaging*, **25**, Article No. 440. <https://doi.org/10.1186/s12880-025-01982-w>
- [28] Zhang, X., Wei, Q., Wu, G., Tang, Q., Pan, X., Chen, G., *et al.* (2023) Artificial Intelligence-Based Ultrasound Elastography for Disease Evaluation—A Narrative Review. *Frontiers in Oncology*, **13**, Article 1197447. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1197447>
- [29] 胡文秀, 巢娅妮, 吴茂林. 三维剪切波弹性成像联合人工智能辅助对乳腺肿瘤良恶性鉴别的诊断价值[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(19): 168-170.
- [30] 秦乃姗, 顾雅佳. 乳腺影像学: 从技术迭代到多模态融合的革新之路[J]. 中国医学影像技术, 2025, 41(8): 1249-1252.