甲状腺与乳腺超声弹性成像：从临床应用到人工智能驱动的标准化进展

倪益军[1]，范莉芳[2,3]
[1]杭州市萧山区第二人民医院超声科，浙江 杭州 311241；[2]皖南医科大学医学影像学院，安徽 芜湖 241002；[3]安徽省肿瘤演进及智能诊疗重点实验室（蚌埠医科大学），安徽 蚌埠 233030

摘要：超声弹性成像（UE）通过定量或半定量评估组织的生物力学特性，为浅表器官疾病的无创诊断与风险评估提供重要的功能学信息。由于乳腺和甲状腺解剖位置表浅，且其相关恶性肿瘤通常具有明显的硬度异质性，UE已逐渐发展为常规超声检查的重要补充手段。本文系统综述应变弹性成像（SE）与剪切波弹性成像（SWE）在乳腺和甲状腺疾病中的临床应用价值，重点总结硬环征在乳腺良恶性病变鉴别中的意义、甲状腺中间风险结节的风险再分层作用，以及UE在实际应用中常见的技术陷阱与干扰因素。在乳腺领域，UE可辅助乳腺影像报告与数据系统（BI-RADS）分级优化，减少不必要的良性活检；在甲状腺领域，国内甲状腺影像报告与数据系统（C-TIRADS）在4类结节及细针穿刺细胞学灰区结节的评估中显示出重要临床价值。本文进一步总结人工智能在自动感兴趣区选取、实时质量控制及多模态诊断中的最新进展，并结合国内多中心研究与指南制定现状，探讨UE向标准化、可重复及精准化方向发展的未来趋势。
关键词：甲状腺；乳腺；弹性成像；人工智能

Thyroid and breast ultrasound elastography: progress from clinical applications to AI-driven standardized

NI Yijun[1], FAN Lifang[2,3]
[1]Department of Ultrasound, the Second People's Hospital of Xiaoshan District, Hangzhou 311241, China; [2]School of Medical Imageology, Wannan Medical University, Wuhu 241002, China; [3]Anhui Provincial Key Laboratory of Tumor Evolution and Intelligent Diagnosis and Treatment, Bengbu Medical University, Bengbu 233030, China

Abstract: Ultrasound elastography (UE) enables quantitative or semi-quantitative assessment of tissue biomechanical properties, providing important functional information for the noninvasive diagnosis and risk stratification of superficial organ diseases. Given the superficial anatomical location of the breast and thyroid, and the fact that their associated malignancies typically exhibit marked stiffness heterogeneity, UE has gradually evolved into an important adjunct to conventional ultrasound examination. This review systematically summarizes the clinical value of strain elastography (SE) and shear wave elastography (SWE) in breast and thyroid diseases, with particular emphasis on the significance of the stiff rim sign in differentiating benign and malignant breast lesions, the role of UE in the risk re-stratification of intermediate-risk thyroid nodules, as well as common technical pitfalls and confounding factors encountered in clinical practice. In breast imaging, UE can assist in optimizing Breast Imaging Reporting and Data System (BI-RADS) categorization and reducing unnecessary biopsies of benign lesions. In thyroid imaging, the Chinese Thyroid Imaging Reporting and Data System (C-TIRADS) has demonstrated important clinical value in the evaluation of category 4 nodules and nodules with indeterminate fine-needle aspiration cytology. In addition, recent advances in artificial intelligence (AI) for automated region-of-interest selection, real-time quality control, and multimodal diagnosis are summarized. In the context of domestic multicenter studies and guideline development, the future direction of UE toward greater standardization, reproducibility, and precision is further discussed.
Keywords: thyroid; breast; elastography; artificial intelligence

超声弹性成像（UE）通过探测组织在内部或外部激励作用下的生物力学响应，对组织硬度进行定量或半定量评估，被称为医学影像中的电子触诊[1-3]。由于乳腺和甲状腺位置表浅，解剖位置固定，既便于施加受控的外部机械压迫，也适合接受声辐射力激励；同时，其常见恶性肿瘤（如乳腺浸润性导管癌和甲状腺乳头状癌）在组织学上常伴有明显的纤维化及组织硬度增高，因此超声弹性成像在浅表器官中的技术成熟度最高，且具有重要的临床应用价值[4,5]。

尽管常规灰阶超声在形态学评估方面已具备较高的空间分辨率，但在鉴别乳腺影像报告与数据系统4类（BI-RADS 4）乳腺肿块和甲状腺影像报告与数据系统4类（TI-RADS 4）甲状腺结节时，特异性较低，临床上也因此存在一定比例的不必要穿刺活检。作为一种功能成像技术，超声弹性成像能够提供独立于声阻抗差异的组织生物力学信息，已逐渐发展为提升诊断特异性、优化风险分层和辅助临床决策的重要工具[6]。

收稿日期：2026-01-03
基金项目：教育部产学合作协同育人项目（220603731205201）；安徽省教育厅省级质量工程项目（2023xsxx256）；安徽省肿瘤演化与智能诊断与治疗重点实验室开放项目（KFKT202509）
作者简介：倪益军，副主任医师，E-mail: niyijun19831102@163.com
通信作者：范莉芳，博士，讲师，E-mail: 18895348832@163.com

基于此，本综述将系统梳理应变弹性成像（SE）和剪切波弹性成像（SWE）在乳腺和甲状腺疾病中的诊断效能，重点总结其在临床实践中的应用价值、常见技术陷阱及影响因素，并从证据一致性、方法学局限和临床可推广性等角度，对人工智能（AI）推动超声弹性成像标准化发展的现状与挑战进行辩证分析。

1 乳腺超声弹性成像：从定性评估到风险分层

乳腺癌是全球女性中发病率最高的恶性肿瘤，其早期诊断和精准风险评估对改善患者预后具有重要意义[7-9]。尽管常规灰阶超声在乳腺病灶的检出具有较高敏感性，但其对良、恶性病变的鉴别能力主要依赖形态学特征，特异性相对有限。世界超声医学与生物学联合会发布的相关指南明确指出，应将超声弹性成像作为乳腺超声检查的重要补充手段，纳入常规工作流程，以提高BI-RADS分类的准确性，尤其是在BI-RADS 4类病变的风险再分层中发挥关键作用。超声弹性成像通过反映组织的生物力学特性，为乳腺肿块提供区别于声阻抗差异的功能学信息。大量研究证实[10-12]，弹性成像参数与乳腺癌的组织学分级、侵袭性及分子生物学行为密切相关。将弹性成像与常规超声联合应用，可实现从单纯定性判断向半定量乃至定量风险评估的转变，有助于在保证恶性肿瘤检出率的前提下，对低风险病变进行合理降级处理，从而减少不必要的穿刺活检和过度医疗。

1.1 三维剪切波弹性成像（3D-SWE）

传统二维剪切波弹性成像（2D-SWE）通常基于单一或有限切面进行弹性评估，其测量结果在一定程度上依赖于操作者对切面的选择，可能无法全面覆盖肿瘤内部及其周边高硬度区域，尤其是形态不规则或生物力学异质性明显的乳腺肿瘤，常存在低估肿瘤侵袭性的风险[13, 14]。3D-SWE通过容积探头对病灶进行多平面、全容积数据采集，可在冠状面上直观显示肿瘤与周围组织之间的空间结构关系。这一成像方式能够更清晰地呈现肿瘤对邻近组织的牵拉、汇聚及结构重塑现象，即所谓的“汇聚征”，为评估肿瘤的浸润范围提供新的视角[15]。既往研究表明[16, 17]，将2D-SWE与3D-SWE的弹性参数进行联合分析，有助于更全面地反映乳腺肿瘤的整体硬度分布及其空间异质性。临床实践中，这种多维度弹性评估策略在BI-RADS 4a类病变的管理中显示出明显优势，可在不降低恶性肿瘤检出率的前提下，使活检率降低约50%，从而有效减少不必要的侵入性检查。

1.2 恶性乳腺肿瘤的特征性弹性表现：硬环征

在剪切波弹性成像中，乳腺恶性肿瘤的典型弹性特征不仅表现为病灶内部硬度升高，且在病灶周缘形成一圈连续或不连续的高硬度带，即硬环征。这一征象被认为是当前乳腺SWE中最具特异性的影像学表现之一[18]。从病理学角度分析，硬环征的形成主要与肿瘤向周围组织的浸润生长及其诱发的促结缔组织增生反应密切相关。肿瘤细胞侵入周围间质后，可激活成纤维细胞并促进胶原纤维沉积，导致肿瘤边缘及邻近间质组织的机械强度增加。此外，肿瘤周边淋巴管扩张、间质压力升高以及局部微循环重塑等因素，也可能进一步加重该区域的硬化程度[19]。相关多项研究证实[18, 20, 21]，硬环征在鉴别乳腺良、恶性肿块方面的阳性预测值优于肿瘤内部平均弹性值。在部分内部伴有坏死或黏液变性的恶性肿瘤中，病灶中心区域的硬度可能并未明显升高，而周缘硬环结构则成为识别恶性的关键影像线索。在预后评估方面，有研究发现硬环的厚度及其最大弹性值与肿瘤侵袭性生物学行为密切相关，硬环征明显的乳腺癌更易发生腋窝淋巴结转移和淋巴管浸润，并与Ki-67高表达呈正相关[22, 23]，表明硬环征可能作为一种无创的影像标志物，用于预测肿瘤的侵袭性和潜在预后。

然而，尽管硬环征被认为是乳腺SWE中较具特征性的恶性征象之一，但不同研究对其诊断增益的报道并不完全一致。这种差异一方面可能与研究对象构成不同有关，例如部分研究纳入的良性病变中纤维化、硬化性腺病或脂肪坏死比例较高，易导致假阳性增加；另一方面也与设备厂商、弹性参数获取方式、感兴趣区设置及阈值选择不统一相关。此外，目前多数研究仍以单中心回顾性设计为主，样本量相对有限，且对不同病理亚型乳腺癌的分层分析尚不充分，因此硬环征虽具有较好应用潜力，但其在不同临床场景中的稳定性及可重复性仍需更多高质量研究验证。

1.3 诊断陷阱与挑战

尽管超声弹性成像在乳腺肿瘤的鉴别诊断中显示出较高的临床价值，但在实际应用过程中仍不可避免地存在一定的误诊风险，主要表现为假阴性和假阳性两大类诊断陷阱。假阴性中最具代表性的情况是蓝色癌症。在常规弹性成像彩色编码模式中，恶性肿瘤通常表现为高硬度信号，但部分恶性病变却反常地呈现为低硬度区域。其中，黏液癌因富含细胞外黏液成分，组织结构相对疏松，其机械强度较低，在弹性成像中易显示为低硬度，从而与良性纤维腺瘤产生显著重叠[24]。这类病变的准确诊断需高度依赖灰阶超声的形态学特征，如分叶状边缘、后方回声增强等，并结合临床病史进行综合判断[25]。此外，在部分高度致密的肿瘤（如硬癌）中，剪切波可能因快速衰减而无法有效传播，陈旧设备可能将无信号区误显示为低硬度区域；而新一代SWE系统通常将此类区域标记为不可信或显示为黑色缺失区，从而为操作者提供重要的风险提示。假阳性最常见于乳腺脂肪坏死。脂肪坏死多由外伤、手术或放疗引起，其弹性

表现随病程演变而发生明显变化。早期阶段可表现为低硬度的油性囊肿，而随着纤维化、机化及钙化形成，病灶硬度显著升高。在SWE图像上，陈旧性脂肪坏死的弹性值可能与恶性肿瘤高度重叠，增加误诊风险。鉴别诊断时应结合患者既往病史，并重点关注灰阶超声中具有提示意义的征象，如液脂平面或边缘环状钙化。

2 甲状腺弹性成像：TI-RADS系统的有力补充

甲状腺结节在人群中极为常见，但其总体恶性率相对较低，因此，在保证恶性结节检出率的同时，避免对大量良性结节进行不必要的细针穿刺已成为临床管理的核心问题[26]。现有TI-RADS体系主要基于灰阶超声特征进行风险分层，在TI-RADS 3类和4类结节中仍存在较大的诊断不确定性。在此背景下，超声弹性成像的核心临床价值在于通过提供结节生物力学信息，进一步提升对TI-RADS 3类和4类结节的风险分层能力，从而减少良性结节的过度穿刺，并优化临床决策流程[27-29]。

2.1 诊断效能与TI-RADS的整合应用

恶性甲状腺结节，尤其是甲状腺乳头状癌，常因内部纤维化、肿瘤间质反应以及沙粒体钙化的存在，表现出明显高于良性结节的组织硬度[30-32]。这一生物力学特征为弹性成像在甲状腺结节鉴别诊断中的应用奠定了理论基础。相关研究显示，联合TI-RADS评分与SWE平均弹性值构建的综合模型，其效能优于单独使用TI-RADS进行评估[33]。这提示弹性成像在TI-RADS体系中可作为一种有效的修正参数，用于细化中间风险结节的管理策略。对于细胞学结果为Bethesda IV类（可疑滤泡性肿瘤）的结节，临床决策尤为困难。既往研究表明[34]，高硬度弹性参数是预测该类结节恶性的独立危险因素，有助于在细胞学灰区中识别真正需要手术干预的患者，从而避免不必要的诊断性甲状腺切除。

2.2 技术局限与干扰因素

尽管超声弹性成像在甲状腺结节评估中具有良好应用前景，但由于甲状腺解剖位置特殊，图像易受多种生理和技术因素的干扰，操作者必须充分认识这些局限性，以避免误判[35]。首先，甲状腺紧邻颈动脉，颈动脉搏动可通过机械波形式传递至甲状腺实质，产生周期性的运动伪影。在SWE图像中，这类伪影常表现为与心跳同步的红蓝交替条纹，严重影响硬度测量的稳定性与可重复性。临床检查中通常建议患者短暂屏气，并选择远离明显搏动期的图像帧进行测量，以降低该因素的影响。其次，气管衰减是影响内侧甲状腺结节评估的重要因素。由于气管内空气可导致超声波全反射，不仅形成声影，还可能干扰剪切波的正常传播，从而造成结节内侧区域测量失败或弹性值失真[36]。此外，钙化与纤维化是导致弹性成像假阳性的常见原因。良性结节中存在的粗大钙化灶本身硬度极高（可达数百kPa），同时可遮挡后方组织，导致SWE测量值异常升高[37]。实际操作中应尽量避开明显钙化区域，选择结节实质部分进行测量，以提高结果的可靠性。在合并桥本氏甲状腺炎的患者中，甲状腺实质常发生弥漫性纤维化，背景组织硬度普遍升高[38]。这使得基于结节/背景比较的应变比失去参考意义。在此情况下，直接测量结节的绝对剪切波速度（m/s）或弹性值，往往比使用比率参数更为可靠[37]。因此，滤泡性甲状腺癌与良性滤泡性腺瘤在组织学和生物力学特性上高度相似，其质地通常较软，弹性成像在鉴别这两类病变时表现有限，假阴性发生率较高，其被认为是当前弹性成像在甲状腺领域中尚未解决的关键盲区之一[39]。

总体而言，弹性成像可为甲状腺中间风险结节提供有价值的补充信息，但其临床效能并非在所有病理类型和应用场景中均表现稳定。尤其对于滤泡性肿瘤，由于良恶性病变在组织结构和力学特性上存在明显重叠，弹性成像的鉴别能力相对有限，这也是当前公认的研究难点之一。此外，不同研究中采用的SE评分体系、SWE测量参数及最佳截断值差异较大，使现有结果在横向比较和临床推广中受到一定限制。现阶段弹性成像更适合作为TI-RADS或C-TIRADS的辅助修正手段，而非独立替代传统风险分层体系。

3 AI驱动的标准化与质量控制

近年来，AI在超声弹性成像中的应用不断拓展，已涉及图像分割、质量评估、参数提取及辅助诊断等多个环节。但现有研究在算法、样本规模、验证方式及结果解释方面差异较大，研究结论的可比性有限，AI在弹性成像中的实际增益及临床应用价值仍需进一步明确。

3.1 智能感兴趣区（ROI）选取

目前，超声弹性成像相关研究主要集中在病灶分割、良恶性判断及多信息综合分析三个方面。由于不同方法的研究目的和评价标准不同，其结果之间往往难以直接比较。传统弹性成像中ROI的选取主要依赖操作者的主观判断，容易误包含钙化灶、囊性变或坏死区域，从而导致弹性参数失真，降低诊断稳定性。基于深度学习的自动分割算法（如U-Net架构）可对乳腺或甲状腺结节进行精准边界识别，并在此基础上自动生成标准化ROI[40, 41]。研究显示[42]，AI算法能够主动规避结节内的粗大钙化（高硬度伪影）及囊性成分（无有效信号区），仅针对具有诊断意义的实质部分行弹性测量，其测量重复性和一致性明显优于人工选取，尤其在微小结节（<1 cm）的评估中优势更为突出。此外，AI还可在整幅弹性图像中自动定位最硬区域。该功能对于捕捉乳腺癌特有的硬环征具有重要意义。研究表明[43-45]，结合AI辅助提取

的SWE参数(如E_{max}),在鉴别BI-RADS 3、4类病变时可明显提高诊断特异性,从而增强弹性成像在临床决策中的价值。

3.2 实时质量控制与置信度图

在传统弹性成像中,图像质量的判断高度依赖操作者经验,而AI的引入使这一过程首次实现量化评估[46]。置信度图是近年来高端超声系统中逐步应用的重要功能之一。该技术通过分析剪切波传播的波形完整性、传播一致性及信噪比,实时生成颜色编码的质量分布图,并自动剔除低置信度区域的像素值,从而避免因运动伪影或信号衰减导致的不可靠测量结果被纳入计算[47]。此外,AI还可在实时成像中辅助筛选图像质量较好的帧用于测量。相关算法能够在连续视频流中动态监测图像质量,自动筛选探头压力最稳定、受呼吸运动干扰最小的最佳帧供医师测量(如Auto ElastQ)。这一策略不仅能够缩短检查时间,也有效降低了帧间变异性,提升弹性参数的重复性和临床可用性[48]。

3.3 基于深度学习的超声计算机辅助诊断

目前,部分商业化AI系统已开始尝试将弹性成像信息纳入计算机辅助诊断流程,其中具有代表性的是一种基于深度学习的超声计算机辅助诊断系统(S-Detect),其已在甲状腺和乳腺疾病评估中得到广泛应用[49]。S-Detect的核心优势在于对灰阶超声形态学特征的自动识别,通常表现出较高的敏感性。近年来的研究进一步探索将S-Detect与弹性成像参数相结合的可行性。结果显示,尽管S-Detect在形态学分析方面表现出色,但在特异性方面,单纯依赖AI形态学判断仍存在一定局限;相比之下,由放射科医生综合解读并结合SWE参数的模式在整体诊断性能上往往优于单一AI模型[50]。因此,在当前阶段,AI在弹性成像中的角色更多体现为决策支持工具,尤其有助于经验不足的操作者减少明显误判,而非完全取代人工判断。除诊断效能外,结果的可解释性也是临床应用的重要前提。当前不少研究更重视性能指标,而对判断依据讨论不足。若结果无法与临床常用征象或参数变化相对应,其推广应用仍会受到限制。

尽管AI为超声弹性成像的标准化与质量控制提供新的技术路径,但目前相关研究总体仍处于快速发展阶段,证据基础尚不充分。因此,现阶段AI更适合作为提升检查一致性与辅助决策的工具,其真正实现大规模临床转化,仍依赖于标准化数据库建设、多中心前瞻性验证以及可解释性框架的进一步完善。

4 国内研究背景与现状:从指南共识到AI多中心验证

近年来,国内在浅表器官超声弹性成像领域的研究已由早期的技术引进和单中心探索,逐步转向以指南制定、本土人群验证及AI创新为核心的发展阶段。依托庞大的病例资源和广泛的临床应用场景,国内学者在甲状腺和乳腺弹性成像的标准化、多模态整合及多中心验证方面取得一系列具有国际影响力的成果,为该技术在临床环境中的推广提供重要循证依据。

4.1 甲状腺C-TIRADS指南的建立与弹性成像权重的探索

鉴于ACR TI-RADS等国际指南在中国人群中的适用性存在一定差异,中华医学会超声医学分会浅表器官和血管学组于2020年发布了《甲状腺结节超声恶性危险分层中国指南:C-TIRADS》[51]。该指南基于中国多中心大样本数据制定,强调在保证风险分层准确性的同时,简化评分体系,以提高临床可操作性。尽管C-TIRADS主要以灰阶超声特征为评分基础,但国内学者围绕弹性成像在其中的增量价值开展大量研究,探索其作为风险修正参数的可行性。哈尔滨医科大学附属肿瘤医院高小强团队的研究显示,联合应用常规超声、SWE及CEUS构建的多模态模型,在区分甲状腺良、恶性结节方面,其敏感度、特异度及准确率均高于单一模态检查,而漏诊率和误诊率降低($P<0.05$)[52]。在细针穿刺细胞学结果不确定的Bethesda III~IV类结节中,弹性成像的临床价值尤为突出。2025年发表的一项国内多中心Meta分析表明,超声弹性成像在区分Bethesda III~IV类结节良恶性方面具有较高的诊断效能,其敏感性和特异性分别达到0.81和0.83,为减少不必要的诊断性手术提供有力证据[53]。

4.2 致密型乳腺背景下的弹性成像研究

国内女性乳腺癌发病年龄相对较早,且致密型乳腺比例较高,导致钼靶检查的敏感性受限,使得超声在乳腺癌筛查和初诊评估中占据重要地位。在此背景下,弹性成像作为超声的重要功能补充,在国内女性乳腺疾病管理中显示出独特优势。上海交通大学医学院附属仁济医院团队开展的前瞻性多中心研究基于世界超声医学与生物学联合会指南验证了弹性成像在国内真实世界临床场景中的应用价值,研究结果显示,利用SWE的硬环征相关参数对BI-RADS 4a类结节进行降级处理,可使61.9%的良性结节避免不必要的活检,且未漏诊任何恶性肿瘤,明显优化临床管理策略[54]。此外,国内研究还不断拓展弹性成像在乳腺癌治疗评估中的应用场景。有研究显示,SWE与SMI的联合应用可在新辅助化疗早期阶段更敏感地反映肿瘤微环境变化,用于预测病理完全缓解(pCR),为个体化治疗方案的动态调整提供重要影像学依据[55]。

4.3 医工结合:AI与大数据的国内力量

依托庞大的人口基数、丰富的病例资源及成熟的超

声应用体系，国内在超声AI领域的发展速度和规模均处于国际前列。由多家国内顶级医疗机构联合发起的中国甲状腺与乳腺超声人工智能联盟构建全球规模领先的标准化超声影像数据库。基于该数据库训练的AI模型，在结节自动分割及良恶性分类任务中的性能已达到甚至超过高年资超声医生水平，为多中心一致性评估和算法泛化能力提供坚实基础[56]。在此基础上，多模态AI诊断模型逐渐成为研究热点。首都医科大学附属北京友谊医院团队开发的系统整合S-Detect、弹性成像及临床信息，实现对乳腺可疑结节的综合评估。研究结果表明，该多模态AI系统在提高诊断特异性、减少不必要乳腺活检方面明显优于单一模态分析，充分展现了AI+功能成像在精准超声诊断中的应用潜力[57]。

虽然目前国内相关研究进展迅速，但仍以单中心回顾性研究为主；且不同中心在设备平台、检查流程及结果判读等方面尚未统一，也影响了结果的可比性。因此，仍需多中心、大样本、前瞻性研究进行验证。

5 结论

超声弹性成像已成为甲状腺和乳腺疾病评估的重要功能补充手段，并在风险分层优化、活检决策辅助及部分预后评估中展现出较高临床应用价值。在乳腺领域，基于硬环征等关键弹性特征并结合质量控制策略，弹性成像成为BI-RADS分级降级及避免不必要良性活检的重要依据，尤其适用于致密型乳腺人群；在甲状腺领域，其在C-TIRADS 4类结节及Bethesda IV类细胞学灰区结节的风险评估中展现出一定价值，但仍需关注钙化及背景甲状腺炎等干扰因素。从临床实践出发，C-TIRADS指南的建立及多中心研究对弹性成像附加价值的验证，结合AI驱动的大数据分析，正在推动该技术向更符合国内人群特征的标准化应用模式发展。展望未来，随着AI深度融入成像流程，从自动化ROI选取到实时质量控制，超声弹性成像的操作依赖性将进一步降低，其数据客观性与可重复性有望进一步提升，从而为精准医疗提供稳定、可推广的生物力学影像标志物。

参考文献：

[1] Wang BH, Jiang TA, Huang M, et al. Evaluation of the response of breast cancer patients to neoadjuvant chemotherapy by combined contrast-enhanced ultrasonography and ultrasound elastography[J]. Exp Ther Med, 2019, 17(5): 3655-63.

[2] Covington MF. Ultrasound elastography may better characterize BI-RADS 3 and BI-RADS 4A lesions to decrease false-positive breast biopsy rates and enable earlier detection of breast cancer[J]. J Am Coll Radiol, 2022, 19(5): 635-6.

[3] Fu Q, Wan F, Lu Q, et al. Correlation analysis of ultrasound elastography score with invasive breast cancer and biological prognostic factors[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2022, 2022: 1174541.

[4] Wang J, Ben ZF, Gao SS, et al. The role of ultrasound elastography and virtual touch tissue imaging in the personalized prediction of lymph node metastasis of breast cancer[J]. Gland Surg, 2021, 10(4): 1460-9.

[5] Lee NR, Oh HK, Jeong YJ. Clinical significance of ultrasound elastography and fibrotic focus and their association in breast cancer[J]. J Clin Med, 2022, 11(24): 7435.

[6] Zhou J, Zhang Q, Zhang Q, et al. Evaluation of the property of axillary lymph nodes and analysis of lymph node metastasis factors in breast cancer by ultrasound elastography[J]. Comput Math Methods Med, 2022, 2022: 8066289.

[7] Pantiora E, Tasoulis MK, Valachis A, et al. Evolution and refinement of magnetically guided sentinel lymph node detection in breast cancer: meta-analysis[J]. Br J Surg, 2023, 110(4): 410-9.

[8] Pesapane F, De Marco P, Rapino A, et al. How radiomics can improve breast cancer diagnosis and treatment[J]. J Clin Med, 2023, 12(4): 1372.

[9] Verghese G, Li MY, Liu FF, et al. Multiscale deep learning framework captures systemic immune features in lymph nodes predictive of triple negative breast cancer outcome in large-scale studies[J]. J Pathol, 2023, 260(4): 376-89.

[10] Kheirkhah N, Kornecki A, Czarnota GJ, et al. Enhanced full-inversion-based ultrasound elastography for evaluating tumor response to neoadjuvant chemotherapy in patients with locally advanced breast cancer[J]. Phys Med, 2023, 112: 102619.

[11] Liu HR, He YJ, Wang TT, et al. Diagnostic value of ultrasound elastography in benign and malignant breast cancer nodules[J]. Minerva Surg, 2024, 79(6): 669-72.

[12] Xiang W, Sun X, Cheng Y, et al. Ultrasound elastography features as promising predictors of pathological complete response in patients with HER2-positive breast cancer undergoing neoadjuvant therapy[J]. Am J Transl Res, 2025, 17(10): 7803-15.

[13] Tian J, Liu QQ, Wang X, et al. Application of 3D and 2D quantitative shear wave elastography (SWE) to differentiate between benign and malignant breast masses[J]. Sci Rep, 2017, 7: 41216.

[14] Barr RG, Engel A, Kim S, et al. Improved breast 2D SWE algorithm to eliminate false-negative cases[J]. Invest Radiol, 2023, 58(10): 703-9.

[15] Chen YH, Lu JR, Li J, et al. Evaluation of diagnostic efficacy of multimode ultrasound in BI-RADS 4 breast neoplasms and establishment of a predictive model[J]. Front Oncol, 2022, 12: 1053280.

[16] Ma BX, Fan ZN, Wu G. The application of 3-dimensional shear wave elastography in the therapeutic effect evaluation of neoadjuvant chemotherapy for Her-2 positive breast cancer patients[J]. Chin J Oncol, 2020, 42(12): 1049-54.

[17] Xu JS, Zhang L, Wen W, et al. Evaluation of standard breast ultrasonography by adding two-dimensional and three-dimensional shear wave elastography: a prospective, multicenter trial[J]. Eur Radiol, 2024, 34(2): 945-56.

[18] Xu YJ, Gong HL, Hu B, et al. Role of "Stiff Rim" sign obtained by shear wave elastography in diagnosis and guiding therapy of breast cancer[J]. Int J Med Sci, 2021, 18(15): 3615-23.

[19] Park HS, Shin HJ, Shin KC, et al. Comparison of peritumoral stromal tissue stiffness obtained by shear wave elastography between benign and malignant breast lesions[J]. Acta Radiol, 2018, 59(10): 1168-75.

[20] Kong WT, Wang Y, Zhou WJ, et al. Can measuring perilesional tissue stiffness and stiff rim sign improve the diagnostic performance between benign and malignant breast lesions [J]. J Med Ultrason, 2021, 48(1): 53-61.

[21] Xu SJ, Wang Q, Hong Z. The correlation between multi-mode ultrasonographic features of breast cancer and axillary lymph node metastasis[J]. Front Oncol, 2024, 14: 1433872.

[22] Liu JJ, Wang XC, Hu MS, et al. Development of an ultrasound-based radiomics nomogram to preoperatively predict Ki-67 expression level in patients with breast cancer[J]. Front Oncol, 2022, 12: 963925.

[23] Zhang HT, Dong YJ, Jia XH, et al. Comprehensive risk system based on shear wave elastography and BI-RADS categories in assessing axillary lymph node metastasis of invasive breast cancer: a multicenter study[J]. Front Oncol, 2022, 12: 830910.

[24] Yang BB, Shen ML, Sun B, et al. Clinicopathological features and prognosis of mucinous breast carcinoma with a micropapillary structure[J]. Thorac Cancer, 2024, 15(36): 2530-9.

[25] Sun Y, Gu W, Wang G, et al. The clinicopathological and prognostic characteristics of mucinous micropapillary carcinoma of the breast [J]. Histol Histopathol, 2022, 37(7): 691-8.

[26] Uçan B, Şahİn M, Önal B, et al. Assessment of diagnostic value of preoperative elastography in thyroid nodules having indeterminate cytology results[J]. Turk J Med Sci, 2021, 51(6): 2924-30.

[27] Wang RL, Yu ZH, Li J, et al. High-frequency ultrasound elastography improves the effect of determining the nature of lesions during the diagnosis of Hashimoto's thyroiditis and thyroid cancer [J]. Minerva Med, 2023, 114(2): 267-9.

[28] Latia M, Borlea A, Mihuta MS, et al. Impact of ultrasound elastography in evaluating Bethesda category IV thyroid nodules with histopathological correlation[J]. Front Endocrinol, 2024, 15: 1393982.

[29] Yao XH, Tang MM, Lu M, et al. Interpretable machine learning models for predicting skip metastasis in CN0 papillary thyroid cancer based on clinicopathological and elastography radiomics features[J]. Front Oncol, 2025, 14: 1457660.

[30] Petersen M, Schenke SA, Firla J, et al. Shear wave elastography and thyroid imaging reporting and data system (TIRADS) for the risk stratification of thyroid nodules: results of a prospective study[J]. Diagnostics, 2022, 12(1): 109.

[31] Zhao L, Zhao L, Chen H, et al. Diagnostic value of FNA, ultrasound elastography and CEUS in thyroid carcinoma[J]. Afr Health Sci, 2024, 24(3): 188-93.

[32] Liu HH, Liang S, Zhang SW, et al. Strain elastography: a non-invasive modality for extrathyroidal extension assessment in papillary thyroid cancer[J]. J Clin Ultrasound, 2025, 53(5): 1196-204.

[33] Chambara N, Lo X, Chow TCM, et al. Combined shear wave elastography and EU TIRADS in differentiating malignant and benign thyroid nodules[J]. Cancers, 2022, 14(22): 5521.

[34] Ren TT, Jiang MF, Wu JW, et al. Clinical value of grayscale ultrasound combined with real-time shear wave elastography nomogram in risk prediction of thyroid cancer[J]. BMC Med Imaging, 2023, 23(1): 123.

[35] Yi D, Fan LB, Zhu JB, et al. The diagnostic value of a nomogram based on multimodal ultrasonography for thyroid-nodule differentiation: a multicenter study[J]. Front Oncol, 2022, 12: 970758.

[36] Jia SN, Wang D, Zhao ZX, et al. Shear wave elastography combined with high-frequency ultrasound for predicting the presence of occult carcinoma contralateral to unilateral papillary thyroid cancer[J]. Surg Oncol, 2025, 62: 102267.

[37] Latia M, Bena A, Moisa-Luca L, et al. Shear wave elastography for thyroid nodule evaluation in patients with chronic autoimmune thyroiditis[J]. Endocrine, 2025, 88(2): 482-90.

[38] Zhang P, Xu QJ, Jiang F. The diagnostic value of convolutional neural networks in thyroid cancer detection using ultrasound images [J]. Front Oncol, 2025, 15: 1534228.

[39] Liu BJ, Liu YY, Wan J, et al. New thyroid imaging reporting and data system (TIRADS) based on ultrasonography features for follicular thyroid neoplasms: a multicenter study[J]. Ultrasound Med Biol, 2025, 51(8): 1343-51.

[40] Zhu XY, Chen CC, Guo Q, et al. Deep learning-based recognition of different thyroid cancer categories using whole frozen-slide images [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 857377.

[41] Wu SH, Li MD, Tong WJ, et al. Adaptive dual-task deep learning for automated thyroid cancer triaging at screening US[J]. Radiol Artif Intell, 2025, 7(3): e240271.

[42] Shen PC, Yang ZY, Sun JJ, et al. Explainable multimodal deep learning for predicting thyroid cancer lateral lymph node metastasis using ultrasound imaging[J]. Nat Commun, 2025, 16: 7052.

[43] Kim J, Ko S, Kim M, et al. Deep learning prediction of TERT promoter mutation status in thyroid cancer using histologic images [J]. Medicina, 2023, 59(3): 536.

[44] Slabaugh G, Beltran L, Rizvi H, et al. Applications of machine and deep learning to thyroid cytology and histopathology: a review[J]. Front Oncol, 2023, 13: 958310.

[45] Yao SQ, Shen PC, Dai F, et al. Thyroid cancer central lymph node metastasis risk stratification based on homogeneous positioning deep learning[J]. Research, 2024, 7: 432.

[46] Dov D, Elliott Range D, Cohen J, et al. Deep-learning ‐ based screening and ancillary testing for thyroid cytopathology[J]. Am J Pathol, 2023, 193(9): 1185-94.

[47] Zhang Q, Song S, Xiao Y, et al. Dual-mode artificially-intelligent diagnosis of breast tumours in shear-wave elastography and B-mode ultrasound using deep polynomial networks[J]. Med Eng Phys, 2019, 64(1): 1-6.

[48] Bauer DJM, De SilvestriI A, Mare R, et al. Two-dimensional shear wave elastography (ElastQ) accurately rules out liver fibrosis and rules in advanced chronic liver disease across liver disease etiologies: a prospective multicenter study[J]. Ultrasonography, 2023, 42(4): 544-54.

[49] 谌 兰, 王 义. 探讨人工智能S-Detect技术联合弹性成像在乳腺不良病变超声诊断中的应用价值研究[J]. 现代医用影像学, 2022, 31

(2): 366-9.

[50] 程扬眉, 夏 群, 王 俊, 等. 超声S-Detect技术在乳腺肿块诊断中的价值[J]. 南方医科大学学报, 2022, 42(7): 1044-9.

[51] 中华医学会超声医学分会浅表器官和血管学组, 中国甲状腺与乳腺超声人工智能联盟. 2020甲状腺结节超声恶性危险分层中国指南: C-TIRADS[J]. 中华超声影像学杂志, 2021, 30(3): 185-200.

[52] 钟 迪, 唐 棣, 高小强, 等. 多模态超声与超声引导下细针穿刺抽吸活检鉴别C-TIRADS 4类甲状腺良、恶性结节[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(2): 182-5.

[53] Sun CF, Wu D, Sun JY, et al. Diagnostic performance of ultrasound elastography alone and in combination with conventional ultrasonography for Bethesda III–IV thyroid nodules: a systematic review and meta-analysis[J]. Quant Imaging Med Surg, 2025, 15 (10): 9613-30.

[54] Tang L, Wang YQ, Chen PP, et al. Clinical use and adjustment of ultrasound elastography for breast lesions followed WFUMB guidelines and recommendations in the real world[J]. Front Oncol, 2022, 12: 1022917.

[55] Lee EJ, Chang YW. Prediction of complete response after neoadjuvant chemotherapy for invasive breast cancers: The utility of shear wave elastography and superb microvascular imaging in pretreatment breast ultrasound[J]. Eur J Radiol, 2024, 175: 111432.

[56] 刘鸿基, 廖春雁, 赵丽娜, 等. 机器学习联合C-TIRADS及BRAF V600E诊断Bethesda Ⅰ/Ⅲ类甲状腺结节的价值[J]. 中国超声医学杂志, 2025, 41(10): 1099-102.

[57] 张苗苗, 高子逸, 吴 琼, 等. C-TIRADS和人工智能辅助诊断系统在甲状腺结节诊断中的价值[J]. 实用肿瘤杂志, 2025, 40(5): 447-51.

（编辑：郎 朗）