

超声弹性成像技术联合TIRADS分类在甲状腺结节良恶性鉴别中的研究进展

张 萌¹, 孙桂明^{2*}

¹黑龙江中医药大学研究生院, 黑龙江 哈尔滨

²哈尔滨市中医医院超声科, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年3月26日; 发布日期: 2026年4月8日

摘 要

甲状腺结节是临床常见疾病, 早期准确鉴别其良恶性对临床决策至关重要。常规超声及其标准化风险评估系统(TI-RADS)虽已广泛应用, 但在某些情况下诊断效能仍有限。超声弹性成像通过评估组织硬度, 为结节良恶性鉴别提供了重要的生物力学信息。近年来, 超声弹性成像与TI-RADS的联合应用已成为研究热点。本文综述了该联合策略的最新研究进展, 指出其通过形态学与生物力学特征的互补, 可显著提高诊断的敏感性、特异性及准确度, 从而有效减少不必要的穿刺活检。文中详细阐述了应变弹性成像、剪切波弹性成像等多种弹性成像技术与各类TI-RADS系统联合应用的价值与具体诊断效能, 并分析了当前面临的挑战, 如技术标准化不足、不同TI-RADS系统间的差异, 以及对某些特殊病理类型的诊断局限性。最后展望未来, 提出个体化的甲状腺结节诊断体系是重要的发展方向。

关键词

超声弹性成像, TI-RADS分类, 甲状腺结节, 良恶性鉴别, 剪切波弹性成像, 诊断效能

Research Advances in Combining Ultrasound Elastography with TIRADS Classification for Differentiating Benign from Malignant Thyroid Nodules

Meng Zhang¹, Guiming Sun^{2*}

¹Graduate School of Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin Heilongjiang

²Ultrasound Department, Harbin Traditional Chinese Medicine Hospital, Harbin Heilongjiang

*通讯作者。

文章引用: 张萌, 孙桂明. 超声弹性成像技术联合 TIRADS 分类在甲状腺结节良恶性鉴别中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 1615-1622. DOI: 10.12677/acm.2026.1641398

Abstract

Thyroid nodules are a common clinical condition, and accurate early differentiation between benign and malignant lesions is crucial for clinical decision-making. While conventional ultrasound and its standardized risk assessment system (TI-RADS) are widely used, their diagnostic efficacy remains limited in certain scenarios. Ultrasound elastography provides important biomechanical information for distinguishing nodule malignancy by assessing tissue stiffness. In recent years, the combined application of ultrasound elastography and TI-RADS has become a research focus. This review summarizes recent advances in this combined strategy, highlighting how the complementary use of morphological and biomechanical features significantly enhances diagnostic sensitivity, specificity, and accuracy, thereby effectively reducing unnecessary needle biopsies. The paper elaborates on the value and specific diagnostic efficacy of integrating various elastography techniques, including strain elastography and shear wave elastography, with different TI-RADS systems. It also analyzes current challenges, such as insufficient technical standardization, discrepancies among TI-RADS systems, and diagnostic limitations for certain specific pathological types. Finally, it looks ahead to the future, proposing that integrating multimodal ultrasound and artificial intelligence technologies to establish an intelligent, personalized thyroid nodule diagnostic system represents a crucial developmental direction.

Keywords

Ultrasound Elastography, TI-RADS Classification, Thyroid Nodules, Benign-Malignant Differentiation, Shear-Wave Elastography, Diagnostic Efficacy

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

甲状腺结节是临床常见的内分泌疾病,其检出率随着超声体检的普及而不断升高。据流行病学资料显示,在普通人群中检出的甲状腺结节,约5%~15%为恶性病变,其中以甲状腺乳头状癌最为常见[1]-[3]。过去30年间,甲状腺癌的发病率呈显著增长趋势,已成为发病率上升最快的恶性肿瘤之一。如何在早期实现良恶性结节的准确区分,对指导治疗决策、减少过度诊治以及降低医疗资源浪费具有重要意义。常规超声检查因无创、经济、便捷而成为甲状腺结节的首选筛查手段。但由于良恶性结节的声像特征部分重叠,常规超声的敏感性和特异性有限,诊断结果易受操作者经验和主观判断影响[4]。尽管甲状腺影像报告与数据系统(TI-RADS)的引入在一定程度上提高了诊断一致性和风险评估水平,但在边界模糊、结节直径小或伴随甲状腺炎等情况下仍存在误判可能[5][6]。超声弹性成像(Ultrasound Elastography, UE)是一种通过组织硬度差异进行成像的技术,研究发现恶性结节普遍较为坚硬,因此弹性参数具有重要的诊断意义[7]。应变弹性成像、剪切波弹性成像以及三维剪切波弹性成像等近年来广泛应用于甲状腺领域,并显示出较高的诊断准确性。近年来,联合应用超声弹性成像与TIRADS分类成为研究热点。本文拟在综述现有文献基础上,总结超声弹性成像及TIRADS系统的发展现状,重点探讨两者联合应用在甲状腺结节良恶性鉴别中的临床价值、局限性及未来发展方向。

2. 超声弹性成像技术原理和 TIRADS 系统概述

2.1. 超声弹性成像技术原理

超声弹性成像的基本原理是利用不同组织在外力作用下所表现出的硬度差异进行成像[8]。恶性结节由于细胞密度增高、纤维组织增生及血供异常等因素,通常比正常组织或良性结节更硬,因此组织硬度成为良恶性鉴别的重要依据[9]。目前主要技术包括:应变弹性成像,通过比较结节与周围组织的形变程度间接反映硬度;剪切波弹性成像,通过测量剪切波传播速度计算杨氏模量,获得绝对硬度值;以及三维剪切波弹性成像,可在三维空间内全面评估组织的弹性分布。这些技术为甲状腺结节评估提供了与形态学互为补充的生物力学信息[10]。

2.2. TIRADS 系统概述

TI-RADS (甲状腺影像报告与数据系统)是一套国际通用的、标准化的甲状腺结节超声风险评估与分类系统。其核心目标在于基于结节的超声形态学特征(如成分、回声、形态、边缘、强回声灶等)对其进行风险分层,从而规范超声报告、指导临床决策(尤其是是否需要行细针穿刺活检),并最终减少不必要的穿刺[11]。目前存在多个版本,如美国放射学会的 ACRTI-RADS、韩国的 K-TIRADS、欧洲的 EU-TIRADS 和中国的 C-TIRADS [12] [13],它们在具体特征的分值和活检阈值上略有差异,但基本逻辑一致:通过积分或模式将结节分为从良性(如 TR1)到高度可疑恶性(如 TR5)的多个类别,并为每个类别提供相应的随访或穿刺建议,是实现甲状腺结节精准化、规范化管理的重要工具[14]。

3. 超声弹性成像与 TI-RADS 联合应用的临床价值与进展

超声弹性成像(UE)与 TI-RADS 系统的联合,本质上是形态学与生物力学信息的融合。TI-RADS 分类系统主要依据结节的形态学特征进行恶性风险评估,而弹性成像技术则通过测量组织硬度提供独立的生物力学信息。这两种方法在诊断机制上具有显著的互补性:TI-RADS 对典型恶性特征(如微钙化、边缘不规则)敏感,但对等回声或囊性成分较多的结节鉴别能力有限;弹性成像则能有效识别此类结节的组织硬度变化,弥补 TI-RADS 的评估盲区。形态学与生物力学的互补性根植于甲状腺结节不同的病理生长模式。常规超声(TI-RADS)主要识别肿瘤的结构异常性,如实性结构、浸润性边界、微钙化(砂粒体)等,但当肿瘤呈弥漫浸润性或伴有大量纤维间质时,其结构异常性可能被掩盖,表现为形态学的“假阴性”。相反,超声弹性成像(UE)捕捉的是肿瘤的基质反应性异常性。恶性结节诱导的促结缔组织增生反应、高细胞密度及间质压力增高,共同构成了其硬度增加的物质基础。即使在缺乏典型形态学特征时,这种生物力学的“异常”依然存在。因此,联合应用的本质是将“结构”与“基质”两个维度的病理信息相融合,从而更全面地反映结节的全貌,提高诊断的鲁棒性。而超声黏弹性等新技术的出现,进一步尝试区分“纤维化主导的硬度”与“肿瘤微环境主导的黏弹性”,为深入理解这一互补性开辟了新维度。这一核心互补性,通过以下不同技术路径的应用,转化为了显著的临床诊断价值。

3.1. 应变弹性成像技术与 TI-RADS 联合应用

应变弹性成像与 TI-RADS 的联合应用已较为成熟,其核心价值在于显著提高甲状腺结节良恶性诊断的敏感性与准确性。储荣先等(2022)的研究将传统超声弹性成像评分系统与中国 TI-RADS 结合,对 116 例患者的 126 个结节进行回顾性分析,结果显示良恶性结节在 C-TIRADS 分类与弹性评分上存在显著差异:良性结节多见于 C-TIRADS 3 类及弹性评分 2~3 分,而恶性结节则以 C-TIRADS 4B-4C 类和弹性评分 4~5 分为主。该研究证实,弹性成像联合 C-TIRADS 的诊断效能最优,其灵敏度、特异度和准确度分别达到 82.93%、97.72% 和 88.10%,显著优于单一诊断方法。这提示,弹性参数能够作为 TI-RADS 形态

学分类的重要补充, 提高系统的判别效力[15]。此外, 针对细胞学不确定甲状腺结节的研究表明, 将应变弹性成像(SRE)与韩国 K-TIRADS 联合应用, 能显著提升诊断敏感性(由 71.4% 升至 92.9%), 并显著增强阴性预测值。该结果表明, 在细胞学诊断模糊的情况下, 弹性成像可通过量化硬度信息弥补单一形态学系统的不足, 从而有效降低恶性结节漏诊率。然而, 该研究样本量有限, 且缺乏前瞻性验证, 其结论的普适性仍需进一步多中心研究支持[16]。近期, 基于常规超声、微血管血流成像(microvascular flow imaging)及应变弹性成像的多模态超声(multimodal US)系统, 也被用于与 ACR TI-RADS 的穿刺决策准确性进行比较。该方法通过多参数整合减少了主观诊断差异, 显示出将血流动力学与组织弹性信息融合可进一步优化决策模型, 但目前多模态系统的参数统一标准尚未确立[17], 如何在不同设备间实现可重复性仍是未来研究的重点。综上所述, 现有研究普遍支持应变弹性成像与 TI-RADS 联合可提高诊断性能, 但不同国家与系统(如 C-TIRADS、K-TIRADS、ACR TI-RADS)在评分标准与参数设定上存在异质性。未来研究需进一步探索跨系统整合模型, 以实现弹性参数与形态学特征的标准化结合[18]。

3.2. 剪切波弹性成像技术与 TI-RADS 联合应用

剪切波弹性成像(SWE)通过杨氏模量等客观定量参数与 TI-RADS 联合应用, 实现了甲状腺结节诊断效能的标准化与量化提升。曹柳柳等(2023)针对甲状腺微小结节开展研究, 系统评估了二维剪切波弹性成像(2D-SWE)的诊断价值。结果显示, 2D-SWE 的定量参数(如 V_s -whole-mean)的诊断 AUC 达 0.861, 显著优于单独使用 C-TIRADS, 二者联合后诊断效能进一步提高, 表明 2D-SWE 在微小结节良恶性鉴别中具有重要的辅助作用[19]。这说明, 剪切波弹性成像在检测结节局部硬度分布方面能够弥补传统 TI-RADS 仅依赖形态学特征的不足, 为早期恶性结节的识别提供了更多客观依据。相较于二维技术, 三维剪切波弹性成像(3D-SWE)通过全容积扫描可获取结节整体弹性分布信息, 从而减少取样误差, 提高结果的稳定性。一项针对 112 个 ACR TI-RADS 4 类和 5 类甲状腺结节的研究表明[20], 将 3D-SWE 测得的冠状面杨氏模量最大值(最佳临界值为 51.5 kPa)与 ACR TI-RADS 分类相结合建立的联合模型, 其 AUC 达 0.845, 显著高于单独使用 ACR TI-RADS 的 0.828 ($P < 0.05$)。该联合模型的敏感性和准确率分别达到 90.3% 和 79.5%, 均高于常规 TI-RADS 的 83.9% 和 75.9%, 而特异性保持在 66.0%。这些结果充分证明, 3D-SWE 可通过捕捉结节最硬区域的弹性信息, 有效提升诊断敏感性和整体准确度, 尤其适用于体积较大或形态不规则的结节[21][22]。总体来看, SWE 与 TI-RADS 的联合诊断模式为甲状腺结节的风险评估提供了更为客观的量化依据。二维 SWE 更适合常规筛查与微小结节的定量分析, 而三维 SWE 在复杂结节的全面评估中具有更高的诊断一致性。尽管现有研究结果一致支持 SWE 的临床价值, 但不同设备及厂商间仍存在测量差异, 标准化阈值尚未统一。未来研究应进一步探索跨平台参数一致性与多中心验证, 为剪切波弹性成像与 TI-RADS 联合诊断的临床推广提供规范化依据。

3.3. 新技术和多模态超声与 TI-RADS 联合应用

随着超声影像技术的快速发展, 超声黏弹性成像、人工智能(AI)以及多模态超声融合诊断成为甲状腺结节良恶性鉴别的研究热点。王琳等(2025)的研究采用超声黏弹性成像技术发现, 结节周边组织的最大黏性值(SI-Vmax)是区分良恶性的最优参数, 当以 3.52 Pa·s 为截断值时, 联合 TI-RADS 分类后诊断 AUC 提升至 0.893, 在开发与验证队列中均获得一致结果。该研究揭示, 黏弹性成像可反映肿瘤微环境中基质黏滞性变化, 对小结节的鉴别尤为敏感, 提示“硬度 + 黏度”双参数模式有望突破传统弹性成像仅关注硬度的局限[23]。与此同时, 基于人工智能的多模态诊断模型为 TI-RADS 体系的智能化升级提供了新的方向。相关研究通过深度学习算法融合 B 型超声与应变弹性图像, 建立了可解释的计算机辅助诊断系统, 其 AUC 在本地测试和外部验证中分别达到 0.937 和 0.927, 明显优于放射科医生的平均诊断水平[24]。该

模型生成的可视化热图与专家判断高度一致,说明 AI 不仅能在复杂特征提取中提升诊断准确率,还可辅助临床决策、减少漏诊与误诊。然而,目前 AI 模型的性能仍依赖于训练数据规模与质量,算法透明度与可解释性不足,尚需通过多中心验证和临床应用评估来进一步确认其可靠性与可推广性[25]。此外,多模态超声技术的联合应用也显示出明显优势。超声造影(CEUS)结合 ACR TI-RADS 后可显著减少不必要的细针穿刺活检(FNA),其特征参数(如增强模式和边界清晰度)能有效补充常规超声在血流与边界识别方面的不足[26]。基于 CEUS 特征构建的 CEUS-TI-RADS 模型经内部交叉验证后显示出良好的稳定性和临床可行性。特别是在边界模糊或高风险但细胞学结果不确定的结节中,该方法能显著提升诊断信心。与此同时,针对儿科人群的研究正在探索儿童特异性 TI-RADS 活检阈值,通过危险因素分层调整活检标准,不仅优化了 K-TIRADS 和 ACR TI-RADS 的敏感性 with 准确性,尤其对高度可疑结节(5类)和中度可疑结节(4类)的区分更为精准,也降低了不必要的活检率[27]。总体而言,新技术与多模态超声的引入正推动 TI-RADS 体系由传统的“形态学评估”向“多参数融合与智能分析”方向发展。黏弹性成像通过揭示结节微环境特征提供新的物理学维度, AI 模型通过深度学习实现高通量信息融合与自动化诊断,而 CEUS 则通过血流动力学信息补充形态与硬度评估。未来的研究应着重于构建可解释、可移植的多模态 AI 诊断系统,建立统一的图像采集与分析标准,并在不同人群中进行前瞻性验证,以实现甲状腺结节诊断的精准化和智能化发展。

4. 超声弹性成像技术与 TI-RADS 系统的现存不足与临床应用挑战

超声弹性成像技术与 TI-RADS 系统的结合应用,确实一定程度上提升了甲状腺结节风险分层的效能,尤其是在提高诊断特异性、减少不必要穿刺方面展现出积极价值。然而,这一联合诊断模式仍面临多重挑战与固有局限,制约了其在临床实践中的广泛与标准化应用。可大致分为以下几个方面。

4.1. 系统灵敏度与人群适用性局限

超声弹性成像与 TI-RADS 系统的结合在提高甲状腺结节风险分层特异性、减少不必要穿刺方面展现出积极价值,但其诊断灵敏度与人群适用性仍存在不足。研究显示,在细针穿刺活检(FNA)决策指导中,ACR TI-RADS 和 EU-TI-RADS 系统分别可能漏诊 31 例和 16 例癌症病例,提示现有风险分层标准在临床中并非绝对可靠[28]。此外,不同年龄组间的恶性率差异进一步揭示了 TI-RADS 系统的适用性局限。回顾性研究表明,在年轻组(<60岁)中,恶性率显著高于老年组(≥ 60 岁),尤其在 TI-RADS 4类与5类结节中差异具有统计学意义($P < 0.01$) [29]。这说明忽视年龄变量可能导致系统对恶性风险的高估或低估,影响穿刺决策的准确性。因此,在临床应用中仍需结合患者个体因素与医生经验进行综合判断,以避免漏诊与误判。

4.2. 诊断效能不稳定与技术依赖性强

尽管弹性成像的引入在一定程度上提升了 TI-RADS 的诊断性能,其效能提升仍存在不稳定性与不确定性。部分研究表明,结合三维剪切波弹性成像的 ACR TI-RADS 在曲线下面积、灵敏度及准确度方面较传统系统有所改善,但特异性提升有限;而改良版 TI-RADS 虽通过调整穿刺阈值提高了特异性与准确性,却伴随灵敏度轻微下降[30]。这一结果反映了诊断性能优化中不可避免的权衡与矛盾。

此外,系统推广受限于对设备与操作者的高度依赖。弹性成像技术需依托特定硬件与专业操作人员,不同操作者在图像获取、参数测定及结果判断中的主观差异,均可能影响诊断一致性与可重复性。更为关键的是,弹性参数及其最佳阈值尚未实现标准化,不同研究与设备采用的参数体系差异较大,导致结果解读复杂、可比性不足,限制了其在多中心推广与标准化应用中的价值[31] [32]。对于特定病理类型,

尤其是滤泡性腺瘤与滤泡性癌的鉴别, 现有 TI-RADS 及其弹性成像联合系统的表现亦不理想[33] [34]。虽然新型 F-TI-RADS 系统在此类结节中诊断性能优于传统系统, 但其鉴别能力仍仅处于中等水平[35]。

4.3. 系统复杂性与临床实用性挑战

在多模态超声联合诊断模式中, 理论上通过整合结构、血流与组织硬度等多维信息可提高诊断精确性、减少不必要活检, 但其临床实用性仍面临显著挑战[36]。首先, 该系统具有较高的操作复杂性和对操作者的强依赖性。研究表明, 即便在 AI 辅助(如 ThyGPT 等可解释性模型)下, 不同经验水平医生间的诊断性能差异仍显著[37] [38]。临床使用者不仅需具备多模态信息整合能力, 还需理解 AI 辅助系统的决策逻辑, 这导致培训周期长、学习曲线陡峭。其次, 复杂的操作流程与高昂的培训及设备成本使该系统在基层及资源受限医疗机构中的推广难度加大[39] [40]。

综上, 超声弹性成像联合 TI-RADS 系统虽在优化甲状腺结节风险分层方面展现出潜力, 但其推广仍受灵敏度限制、人群差异、技术依赖性强、参数标准化不足及系统复杂性等多重因素制约。未来研究需聚焦标准化参数设定、简化诊断流程及 AI 辅助决策优化, 在多中心临床实践中验证其可靠性与可操作性, 以推动其在甲状腺疾病诊断中的规范化与普及化应用。

5. 总结与展望

综上所述, 超声弹性成像技术通过量化组织硬度、黏度等生物力学特征, 与基于形态学特征的 TI-RADS 系统形成了互补关系, 为甲状腺结节的良恶性鉴别提供了更全面的诊断依据。大量研究表明, 两者联合应用可显著提升诊断的敏感性、特异性与总体准确率, 降低不必要的穿刺率, 具有较高的临床推广潜力。尤其是应变弹性成像、二维与三维剪切波弹性成像、黏弹性成像等多种路径的融合, 拓宽了超声影像学在甲状腺肿瘤学领域的应用边界。超声弹性成像联合 TI-RADS 通过融合形态学与生物力学信息, 显著提升了甲状腺结节的诊断效能。然而, 当前研究多停留在“形态学 + 硬度”的浅层叠加, 未能揭示生物力学特征背后的分子病理内涵, 导致对滤泡性肿瘤等特殊类型的诊断瓶颈仍未突破。未来研究的核心突破在于从物理特性的简单叠加迈向对肿瘤生物学本质的深度解码。具体而言: 一是建立“弹性图谱 - 基因表型”关联模型, 利用可解释性人工智能解析弹性图像的空间异质性特征(如硬环征、硬度梯度), 建立与 BRAF V600E、TERT、RAS 等关键驱动基因突变的无创预测模型, 从力学视角理解肿瘤的生物学异质性。二是构建可解释性多模态融合系统, 以可视化热图形式标注驱动决策的弹性与形态学特征, 并与术后病理切片进行空间对照, 形成“影像 - 病理”闭环验证, 提升临床信任度。三是针对滤泡性肿瘤、髓样癌等特殊病理类型开发专用评估模型, 利用三维弹性成像识别微小包膜浸润区的局部硬度异常, 或建立独立的弹性参数阈值, 突破乳头状癌中心范式的局限。在此基础上, 整合黏弹性参数与液体活检标志物, 构建多维生物学风险分层模型, 并通过多中心研究实现标准化验证, 最终推动甲状腺结节诊断从“经验依赖”走向“生物学驱动的个体化精准决策”。

参考文献

- [1] Huang, E.Y.F., Kao, N.H., Lin, S.Y., Jang, I.J.H., Kiong, K.L., See, A., et al. (2023) Concordance of the ACR TI-RADS Classification with Bethesda Scoring and Histopathology Risk Stratification of Thyroid Nodules. *JAMA Network Open*, **6**, e2331612. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2023.31612>
- [2] Alexander, E.K. and Cibas, E.S. (2022) Diagnosis of Thyroid Nodules. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, **10**, 533-539. [https://doi.org/10.1016/s2213-8587\(22\)00101-2](https://doi.org/10.1016/s2213-8587(22)00101-2)
- [3] Kobaly, K., Kim, C.S. and Mandel, S.J. (2022) Contemporary Management of Thyroid Nodules. *Annual Review of Medicine*, **73**, 517-528. <https://doi.org/10.1146/annurev-med-042220-015032>
- [4] Zhao, S., Chen, Y., Yang, K., Luo, Y., Ma, B. and Li, Y. (2022) A Local and Global Feature Disentangled Network:

- Toward Classification of Benign-Malignant Thyroid Nodules from Ultrasound Image. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **41**, 1497-1509. <https://doi.org/10.1109/tmi.2022.3140797>
- [5] Tang, L., Tian, C., Yang, H., Cui, Z., Hui, Y., Xu, K., *et al.* (2023) TS-DSANN: Texture and Shape Focused Dual-Stream Attention Neural Network for Benign-Malignant Diagnosis of Thyroid Nodules in Ultrasound Images. *Medical Image Analysis*, **89**, Article 102905. <https://doi.org/10.1016/j.media.2023.102905>
- [6] Bojunga, J. and Trimboli, P. (2024) Thyroid Ultrasound and Its Ancillary Techniques. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, **25**, 161-173. <https://doi.org/10.1007/s11154-023-09841-1>
- [7] Croce, L., Teliti, M., Chytiris, S., Sparano, C., Coperchini, F., Villani, L., *et al.* (2024) The American Thyroid Association Risk Classification of Papillary Thyroid Cancer According to Presurgery Cytology. *European Journal of Endocrinology*, **190**, 165-172. <https://doi.org/10.1093/ejendo/lvae012>
- [8] Mena, G., Montalvo, A., Ubidia, M., Olmedo, J., Guerrero, A. and Leon-Rojas, J.E. (2023) Elastography of the Thyroid Nodule, Cut-Off Points between Benign and Malignant Lesions for Strain, 2D Shear Wave Real Time and Point Shear Wave: A Correlation with Pathology, ACR TIRADS and Alpha Score. *Frontiers in Endocrinology*, **14**, Article 1182557. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1182557>
- [9] Chen, C. and Gu, G.X. (2023) Physics-Informed Deep-Learning for Elasticity: Forward, Inverse, and Mixed Problems. *Advanced Science*, **10**, Article 2300439. <https://doi.org/10.1002/adv.202300439>
- [10] Wang, H., Zhang, H., Da, B., Lu, D., Tamura, R., Goto, K., *et al.* (2021) Mechanomics Biomarker for Cancer Cells Unidentifiable through Morphology and Elastic Modulus. *Nano Letters*, **21**, 1538-1545. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c00003>
- [11] Hamour, A.F., Yang, W., Lee, J.J.W., Wu, V., Ziai, H., Singh, P., *et al.* (2021) Association of the Implementation of a Standardized Thyroid Ultrasonography Reporting Program with Documentation of Nodule Characteristics. *JAMA Otolaryngology—Head & Neck Surgery*, **147**, 343-349. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2020.5233>
- [12] Hoang, J.K., Asadollahi, S., Durante, C., Hegedüs, L., Papini, E. and Tessler, F.N. (2022) An International Survey on Utilization of Five Thyroid Nodule Risk Stratification Systems: A Needs Assessment with Future Implications. *Thyroid*, **32**, 675-681. <https://doi.org/10.1089/thy.2021.0558>
- [13] Kim, D.H., Kim, S.W., Basurrah, M.A., Lee, J. and Hwang, S.H. (2023) Diagnostic Performance of Six Ultrasound Risk Stratification Systems for Thyroid Nodules: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *American Journal of Roentgenology*, **220**, 791-803. <https://doi.org/10.2214/ajr.22.28556>
- [14] Jin, Z., Pei, S., Ouyang, L., Zhang, L., Mo, X., Chen, Q., *et al.* (2022) Thy-Wise: An Interpretable Machine Learning Model for the Evaluation of Thyroid Nodules. *International Journal of Cancer*, **151**, 2229-2243. <https://doi.org/10.1002/ijc.34248>
- [15] 储荣先, 彭梅. C-TIRADS 联合超声弹性成像对甲状腺结节良恶性鉴别的诊断价值分析[J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(5): 485-488.
- [16] Celletti, I., Fresilli, D., De Vito, C., Bononi, M., Cardaccio, S., Cozzolino, A., *et al.* (2021) TIRADS, SRE and SWE in INDETERMINATE Thyroid Nodule Characterization: Which Has Better Diagnostic Performance? *La radiologia medica*, **126**, 1189-1200. <https://doi.org/10.1007/s11547-021-01349-5>
- [17] Chen, J., Zhong, J., Zhuang, Y., Deng, B., Hong, J., Lin, Y., *et al.* (2025) Multimodality Ultrasound Utilizing Microvascular Flow Imaging and Shear Wave Elastography to Guide Fine-Needle Aspiration of Thyroid Lesions: A Prospective Study Validating Pattern-Based Microvascular Classification. *Thyroid*, **35**, 516-526. <https://doi.org/10.1089/thy.2024.0586>
- [18] Ma, R., Li, X. and Chen, J. (2021) An Elastic Urban Morpho-Blocks (EUM) Modeling Method for Urban Building Morphological Analysis and Feature Clustering. *Building and Environment*, **192**, Article 107646. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107646>
- [19] 曹柳柳, 彭梅, 何年安, 等. C-TIRADS 联合弹性成像对 4 类甲状腺微小结节良恶性的鉴别价值[J]. 中国超声医学杂志, 2023, 39(11): 1205-1208.
- [20] Hao, L., Liu, P., Ding, C., Li, J. and Zhang, Y. (2023) Diagnostic Value of ACR TI-RADS Combined with Three-Dimensional Shear Wave Elastography in ACR TI-RADS 4 and 5 Thyroid Nodules. *Chinese Medical Journal*, **136**, 1225-1230. <https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000002655>
- [21] Shen, Y., Dai, J., Li, J. and Lu, M. (2025) The Application of Three-Dimensional Shear Wave Elastography in the Detection of Inguinal Lymph Node Metastasis in Gynecological Malignancies. *Clinical and Experimental Obstetrics & Gynecology*, **52**, Article 27141. <https://doi.org/10.31083/ceog27141>
- [22] Chen, Y., Lu, J., Li, J., Liao, J., Huang, X. and Zhang, B. (2022) Evaluation of Diagnostic Efficacy of Multimode Ultrasound in BI-RADS 4 Breast Neoplasms and Establishment of a Predictive Model. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article 1053280. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.1053280>

- [23] 王琳, 宣之东, 钱星宇, 等. TI-RADS 联合超声黏弹性成像在甲状腺结节性质鉴别中的应用价值[J]. 中国超声医学杂志, 2025, 41(9): 965-968.
- [24] Chu, X., Wang, T., Chen, M., Li, J., Wang, L., Wang, C., *et al.* (2025) Deep Learning Model for Malignancy Prediction of TI-RADS 4 Thyroid Nodules with High-Risk Characteristics Using Multimodal Ultrasound: A Multicentre Study. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, **124**, Article 102576. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2025.102576>
- [25] Athreya, S., Melehy, A., Suthahar, S.S.A., Ivezić, V., Radhachandran, A., Sant, V.R., *et al.* (2025) Combining Ultrasound Imaging and Molecular Testing in a Multimodal Deep Learning Model for Risk Stratification of Indeterminate Thyroid Nodules. *Thyroid*, **35**, 590-594. <https://doi.org/10.1089/thy.2024.0584>
- [26] Ruan, J., Xu, X., Cai, Y., Zeng, H., Luo, M., Zhang, W., *et al.* (2022) A Practical CEUS Thyroid Reporting System for Thyroid Nodules. *Radiology*, **305**, 149-159. <https://doi.org/10.1148/radiol.212319>
- [27] Lee, D.H., Cho, Y.J., Won, J., Lee, S.B., Choi, Y.H., Jung, K.C., *et al.* (2025) Pediatric Thyroid Nodules: K-TI-RADS/ACR TI-RADS Pediatric-Specific Biopsy Cutoff Incorporating Clinical Risk Factors. *Radiology*, **315**, e241015. <https://doi.org/10.1148/radiol.241015>
- [28] Magri, F., Chytiris, S., Croce, L., Molteni, M., Bendotti, G., Grusso, G., *et al.* (2020) Performance of the ACR TI-RADS and EU TI-RADS Scoring Systems in the Diagnostic Work-Up of Thyroid Nodules in a Real-Life Series Using Histology as Reference Standard. *European Journal of Endocrinology*, **183**, 521-528. <https://doi.org/10.1530/eje-20-0682>
- [29] Walter, L.B., Fernandes, P.M., Strieder, D.L., Scheinplflug, A.L., Zanella, A.B., Faccin, C.S., *et al.* (2023) Age-Related Variation in Malignant Cytology Rates of Thyroid Nodules: Insights from a Retrospective Observational Study Assessing the ACR TI-RADS. *European Journal of Endocrinology*, **189**, 584-589. <https://doi.org/10.1093/ejendo/lvad162>
- [30] Li, X., Peng, C., Liu, Y., Hu, Y., Yang, L., Yu, Y., *et al.* (2024) Modified American College of Radiology Thyroid Imaging Reporting and Data System and Modified Artificial Intelligence Thyroid Imaging Reporting and Data System for Thyroid Nodules: A Multicenter Retrospective Study. *Thyroid*, **34**, 88-100. <https://doi.org/10.1089/thy.2023.0429>
- [31] Parlati, L., Aubé, C., Lewin, M., Boursier, J., Ronot, M., Paisant, A., *et al.* (2025) SIAD (Société d'Imagerie Abdominale et Digestive) and AFEF (Association Française pour l'Etude du Foie) best practice position paper on the implementation of ultrasound elastography in clinical practice. *Diagnostic and Interventional Imaging*, **106**, 272-279. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2025.03.010>
- [32] Morr, A.S., Herthum, H., Schrank, F., Görner, S., Anders, M.S., *et al.* (2022) Liquid-Liver Phantom: Mimicking the Viscoelastic Dispersion of Human Liver for Ultrasound and MRI-Based Elastography. *Investigative Radiology*, **57**, 502-509. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000862>
- [33] Shen, H., Pei, S., Huang, Y., Wu, S., Zhang, C., Liang, T., *et al.* (2025) Artificial Intelligence-Augmented Ultrasound Diagnosis of Follicular-Patterned Thyroid Neoplasms: A Multicenter Retrospective Study. *eClinicalMedicine*, **86**, Article 103351. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2025.103351>
- [34] Hellgren, L.S., Stenman, A., Paulsson, J.O., Höög, A., Larsson, C., Zedenius, J., *et al.* (2022) Prognostic Utility of the Ki-67 Labeling Index in Follicular Thyroid Tumors: A 20-Year Experience from a Tertiary Thyroid Center. *Endocrine Pathology*, **33**, 231-242. <https://doi.org/10.1007/s12022-022-09714-4>
- [35] Li, J., Li, C., Zhou, X., Huang, J., Yang, P., Cang, Y., *et al.* (2023) US Risk Stratification System for Follicular Thyroid Neoplasms. *Radiology*, **309**, e230949. <https://doi.org/10.1148/radiol.230949>
- [36] Wan, P., Wei, L., Zhang, S., Xue, H., Shao, W., Kong, W., *et al.* (2026) Trustworthy Multi-Modal Ultrasound Fusion via Uncertainty Calibration and Conflict Resolution. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **45**, 972-986. <https://doi.org/10.1109/tmi.2025.3615589>
- [37] Xu, D., Sui, L., Zhang, C., Xiong, J., Wang, V.Y., Zhou, Y., *et al.* (2024) The Clinical Value of Artificial Intelligence in Assisting Junior Radiologists in Thyroid Ultrasound: A Multicenter Prospective Study from Real Clinical Practice. *BMC Medicine*, **22**, Article No. 293. <https://doi.org/10.1186/s12916-024-03510-z>
- [38] Yao, J., Wang, Y., Lei, Z., Wang, K., Feng, N., Dong, F., *et al.* (2025) Multimodal GPT Model for Assisting Thyroid Nodule Diagnosis and Management. *npj Digital Medicine*, **8**, Article No. 245. <https://doi.org/10.1038/s41746-025-01652-9>
- [39] Wu, X., Tan, G., Luo, H., Chen, Z., Pu, B., Li, S., *et al.* (2024) A Knowledge-Interpretable Multi-Task Learning Framework for Automated Thyroid Nodule Diagnosis in Ultrasound Videos. *Medical Image Analysis*, **91**, Article 103039. <https://doi.org/10.1016/j.media.2023.103039>
- [40] Chen, Y., Gao, Z., He, Y., Mai, W., Li, J., Zhou, M., *et al.* (2022) An Artificial Intelligence Model Based on ACR TI-RADS Characteristics for US Diagnosis of Thyroid Nodules. *Radiology*, **303**, 613-619. <https://doi.org/10.1148/radiol.211455>