

超声造影、超分辨率成像及人工智能在乳腺疾病中的应用进展

张莉^{1,2*}, 姚延峰^{2#}

¹重庆医科大学全科医学院, 重庆

²重庆医科大学附属永川医院超声科, 重庆

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月9日

摘要

乳腺癌是全球女性第一大癌症, 改善患者预后、降低死亡率的关键是早期诊断, 在我国超声是乳腺疾病筛查和诊断的首选影像学手段, 但传统超声在诊断特异性、微血管显示能力以及结果一致性方面仍存在一定局限, 其准确性特别依赖操作医师的经验水平。超声造影(CEUS)可显著提升微血流显示能力, 超分辨率成像(SRUS)突破衍射极限实现微血管可视化、量化, 人工智能(AI)可实现影像数据的量化、自动化、智能化分析, 三者融合应用, 可实现“解剖结构 + 微血管形态 + 智能分析”的多维度信息整合, 显著提升乳腺疾病诊断效能。本文系统综述CEUS、SRUS及AI在乳腺良恶性鉴别、早期诊断、疗效评估、预后预测中的临床应用进展。

关键词

超声造影, 超分辨率超声, 人工智能, 乳腺疾病, 多模态融合

The Application Value of Contrast-Enhanced Ultrasound Combined with Super-Resolution and Artificial Intelligence in Breast Disease

Li Zhang^{1,2*}, Yanfeng Yao^{2#}

¹General Practice School of Chongqing Medical University, Chongqing

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

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张莉, 姚延峰. 超声造影、超分辨率成像及人工智能在乳腺疾病中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 2194-2201. DOI: 10.12677/acm.2026.1641466

Abstract

Breast cancer is a highly common malignant tumor in women worldwide, and early diagnosis is the key to improving patient prognosis and reducing mortality. Ultrasound is the preferred imaging method for breast disease screening and diagnosis, but traditional ultrasound still has limitations in diagnostic specificity, microvascular display ability, and consistency of results, and its accuracy is highly dependent on the experience of the operating physician. Ultrasound imaging can significantly improve blood flow display capabilities, super-resolution imaging can break through the diffraction limit to achieve microvascular visualization, and artificial intelligence can realize the automation, quantification and intelligent analysis of image data, significantly improving the accuracy and efficiency of diagnosis. The integration of the three realizes the multi-dimensional information integration of "anatomical structure + microvascular morphology + intelligent analysis", significantly improving the diagnostic efficiency of breast diseases. This article systematically reviews the application value of CEUS, SRUS, and AI in the differentiation, early diagnosis, efficacy evaluation, and prognosis prediction of benign and malignant breasts.

Keywords

Ultrasonography, Super-Resolution Ultrasound, Artificial Intelligence, Breast Disease, Multimodal Integration

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

乳腺癌是严重威胁女性健康的恶性肿瘤, 现已位居全球癌症发病率前列, 在中国, 乳腺癌新发病例数长期居高不下, 且发病年龄明显年轻化[1]。因此, 抓住乳腺癌早期诊断的“黄金时间”, 对患者康复有直接、重大的意义。由于中国女性多为致密型乳腺, 常规 X 线摄影的筛查效能不佳, 故超声检查已被合理地确立为首选筛查方案。常规二维超声主要提供解剖形态信息, 但不能直接评价肿瘤新生血管特征, 近年来超声新技术迅猛发展, 为常规超声检查提供了极其有力的补充手段, 比如超声造影(CEUS)、超分辨率超声(SRUS)都已在乳腺疾病诊断中得到广泛应用。更值得关注的是, 人工智能(Artificial Intelligence, AI)与放射组学的结合, 为挖掘多模态影像中的高维定量特征、构建精准预测模型开辟了全新路径。基于此, 本文拟对 CEUS、SRUS 及 AI 融合在乳腺良恶性鉴别、早期诊断、疗效评估、预后预测诸方面的研究以及面临的挑战和局限性进行综述如下。

2. 超声造影(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS)

2.1. CEUS 概述

CEUS 是超声研究领域的前沿技术之一[2]。乳腺超声造影作为乳腺重要的补充针对性检查, 近年来, 发展迅速, 技术日趋成熟。CEUS 是通过以超声微泡为声学造影剂, 经静脉注入后随血流循环, 利用微泡非线性振动大大增强血流信号, 从而可靠地突破传统超声对微小血管显示的限度。目前临床上最常用的

造影剂为声诺维(SonoVue), 由磷脂包封六氟化硫惰性气体制成, 其安全性高、代谢快、无肾毒性[2][3], 并且在乳腺疾病中已经被广泛应用。

2.2. CEUS 在乳腺疾病中应用

CEUS 对于乳腺肿瘤良恶性鉴别, 主要是通过 CEUS 能够精准地显示肿瘤内部的微血管密度及分布形态。然而恶性肿瘤生长、转移的根本都与血管生成密切相关, 比如乳腺癌组织分泌血管内皮生长因子, 从而诱导大量结构异常的新生血管形成, 其典型特征为数量多、管壁薄、缺乏平滑肌、存在动静脉瘘[4]。CEUS 可在一定程度上弥补常规超声鉴别良恶性病变的不足, 显著提高超声检查对乳腺疾病的诊断准确率。具体而言, 乳腺恶性病灶在超声造影图像上的血流动力学表现多为“快进快出”, 形态学特征常见向心性填充、不均匀高增强及周边滋养血管增粗紊乱[5], 在良性病灶上, 呈“慢进慢出”及均匀增强之象[6]。更重要的是, CEUS 为肿瘤微循环的可视化提供了直接手段, 也有利于对肿瘤进行连续、动态的精确观察。就比如商瑞苗等[7]对超声造影在 BI-RADS 4 类乳腺导管内病变在诊断中的价值做了严谨、出色的评价, 证实其不但能提高诊断准确性, 而且能实质性地提高乳腺癌整体检查的准确率。

CEUS 对于乳腺癌术前评估中的应用主要是通过利用肿瘤血管生成与淋巴引流的病理生理学基础, 实时动态观察血流灌注特征, 在术前, 准确评估肿瘤的生物行为及侵犯范围, 常显示的增强范围比常规超声显示的形态学范围更大, 即“范围扩大征”[8], 这为肿瘤真实浸润边界的良好反映, 对术前手术切除范围的确定有直接重大意义。姜玉霞等[9]的研究就做了极好的补充, 系统、扎实地证明了 CEUS 在评估乳腺癌周围血管侵犯及肿瘤可切除性方面有极高的临床价值。更难得的是, 作为新型前哨淋巴结活检跟踪技术, CEUS 对乳腺癌术前 SLN 的定性评估已有明确优势[10]。韩转宁[11]则报告了更高的诊断效能: 采用超声造影引导下导丝定位联合纳米碳染色, 其对 SLN 定位的灵敏度与阴性预测值均达 100.00%, 特异性与阳性预测值也分别高达 97.47% 和 98.34%。另外, 伍璐等[12]研究探讨了乳腺癌预后分子病理学标志物与超声造影(CEUS)及常规超声检查特征之间的相关性。通过应用免疫组化二步法对 Ki-67、HER-2、PR 和 ER 的表达水平进行检测, 因此我们发现超声造影及常规超声特征与上述分子标志物密切相关。由于这种相关性, 超声检查有望用于术前无创预测乳腺癌的分子亚型, 展现出良好的应用前景。

新辅助化疗(neoadjuvant chemotherapy, NAC)是指手术或放疗前施行的全身化疗, 其基本原理是术前给药以缩小肿瘤体积、降低临床分期, 有利于提高后续手术根治性切除率及保乳机会[13]。更重要的是, 它可作为体内药敏试验来指导后续用药, 能尽早清除血液中潜在的微小转移灶, 由此降低远期复发风险, 从而改善患者长期生存结局[14]。罗宁斌[15]对超声造影在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的应用做了十分系统、严谨的总结, 明确地指出超声造影可提供定量、定性双重参考指标, 既有利于提高乳腺癌诊断的准确性, 也有利于客观评价新辅助化疗疗效[16]。这些研究共同表明, 超声造影在乳腺癌术前预测组织学分级中具有重要的应用价值, 能够为临床决策提供有力支持。但由于 CEUS 空间分辨率的限制, 其尚不能分辨微血管细节, 故目前多为半定量分析, 真正的定量分析尚待标准化[17]。

3. 超分辨率超声(Super-Resolution ultrasound, SRUS)

3.1. SRUS 概述

SRUS 又称超声定位显微镜(ULM)基于单微泡定位与追踪技术[18], 是以单微泡定位及追踪技术为基础, 用数千帧连续成像采集微泡时空信息, 因而能重构出突破衍射极限的微血管图像, 空间分辨率达 10~50 μm , 因此很自然地实现了活体无创微血管可视化[19]。最主要的是, SRUS 为肿瘤微血管的定量分析开辟了新的可靠途径。与单纯依靠形态学观察的常规超声造影(CEUS)相比, SRUS 直接追踪造影剂微泡, 其超声血流成像的空间分辨率及对微血管的敏感性都得到极大提高, 由此可超越传统微循环形态评估, 真

正进入功能分析的层面, 对血管结构及血流动力学做出更完整、更精确的评价。由于临床前动物模型及临床研究都已采用该方法并已经开始临床应用, 故 SRUS 图像能可靠、系统地测量微血管的若干定量参数, 包括微血管密度占比、微血管流速、灌注指数等[20][21], 因此 SRUS 可以成为一种很有应用前景的新方法。它能够提供更丰富的定量参数, 从而实现对微血管状态的精准、个性化评估[22]。但是, 其临床价值尚有待于更大规模研究的充分验证。值得指出的是, 国内外已有几家机构在 SRUS 临床应用研究上取得了切实进展。

3.2. SRUS 在乳腺疾病中应用

SRUS 对于乳腺肿瘤良恶性鉴别在乳腺领域中可定量评估微血管密度、管径、迂曲度、分支形态、血流速度等参数。但现有文献已经十分清楚地指出乳腺恶性病灶的微血管有紊乱分支、局灶性扩张、不规则管径、高迂曲度等典型特征[23], 祁琦等[24]系统、严谨地证明了乳腺癌组织中微血管密度(MVD)的表达水平与肿瘤大小及分期呈严格正相关, 在直径 ≥ 2 cm 及 III~IV 期患者中均显著升高, 且其可作为乳腺癌细胞增殖活性的良好生物标志物, 故对肿瘤恶性程度、浸润程度的判断及治疗方案的选择都有直接重大的价值。与此形成极好对照的是良性病灶的血管走行自然, 管径均匀。欧洲放射学杂志上发表的最新研究结果也十分清楚地表明, SRUS 鉴别乳腺良恶性病灶所得 ROC 曲线下面积(AUC)已达 0.962, 以最大直径 763.88 μm 为阈值时恶性识别率高达 88.2% [25]。

SRUS 在乳腺癌术前评估中的应用。通过突破衍射极限实现微米级微血管可视化, 在乳腺癌术前评估中展现出双重应用价值: 1) 在原发灶定性方面, Hou 等[26]做了很好的前瞻性验证, 即以血管弯曲度、网络复杂度等参数定量分析, 可靠地鉴别了 BI-RADS 4 类病灶的良恶性(AUC 为 0.899), 2) 在淋巴结转移预测方面, SRUS 可评估前哨淋巴结微转移, 联合常规超声 AUC 达 0.844, 为无创淋巴结分期提供可能。Xia [27]的研究显示, 通过显示淋巴窦微结构可显著提升前哨淋巴结转移的诊断效能(AUC 达 0.824), 为术前精准分期提供了优于传统影像学的新手段。总的来说, 虽然 SRUS 能很好地定量分析病灶微血管信息, 但是其所得数据信息量很大, 人工分析的工作量极大, 而今 AI 的发展已为此提供了极好的解决途径。

4. 人工智能(Artificial Intelligence, AI)

4.1. AI 概述

在乳腺超声中以深度学习(CNN 为主)及影像组学为两大核心来完成病灶自动检出、分割、良恶性分类、疗效预测、分子分型判断诸种任务[28]。具体来说, 影像组学从 CEUS/SRUS/PAI 图像中提取数百个定量特征建立预测模型, 故能客观地减少主观偏差, 而深度学习采用端到端诊断方式直接输出分类结果, 典型的 S-Detect 系统荟萃分析所得 AUC 为 0.89, 灵敏度 82%、特异度 86% [29]。

4.2. AI 在在乳腺疾病中应用

AI 对于乳腺肿瘤良恶性鉴别。通过深度学习分析方法分析超声图像, 先让卷积神经网络自动提取肿瘤的微观纹理、边缘形态及血流灌注特征, 再据此量化细胞异型性及血管生成诸指标, 因而能可靠、客观地鉴别乳腺肿瘤良恶性, 故而非常自然地成为 BI-RADS 分类的有力补充, 也大大提高了诊断的一致性及准确性[30]。更为重要的是, 目前大量文献都证实, AI 模型鉴别乳腺结节良恶性的诊断效能(AUC)已达 0.95 至 0.962, 明显优于影像医师的一般水平。沈洁等[31]做了设计极佳的平行对照诊断性试验及前瞻性随访研究, 纳入 360 例非乳腺癌女性, 用 AI 辅助超声及常规超声分别进行检查, 结果明确而令人信服: AI 辅助超声在识别乳腺病灶时的灵敏度、特异度都更高, 在 1 年随访期内其诊断准确性确实在持续优于常规超声。与此形成极好补充的是, 从小宇等[32]系统、扎实地考察了人工智能 S-Detect 技术在乳腺良恶性结

节鉴别诊断中的应用价值, 得出明确结论: 该技术能提高超声检查的诊断效能, 尤其在降低误诊、漏诊风险上表现突出。

AI 应用于乳腺癌术前评估时, 核心是通过融合多维度影像与多源数据, 实现三方面目标: 精准测定肿瘤特征、预测淋巴结是否转移、辨别分子分型[33]。在肿瘤评估方面, AI 用图像识别算法自动勾勒肿瘤边界, 客观测量大小、位置, 在超声及钼靶影像中都能可靠地识别微小病灶并合理规划手术切口, 更重要的是, 其用深度学习方法分析肿瘤形态(分叶状、不规则)及边缘特征(毛刺征、模糊度), 因而能较好地判断良恶性, 直接指导手术范围。Zhu 等[34]所做的研究为此提供了极好的实证支持: AI 辅助超声医生诊断乳腺癌后假阳性率降低了 37.3%, 需要活检的患者减少了 27.8%, 而灵敏度没有下降, 因此切实避免了不必要的穿刺活检及过度治疗。在淋巴结转移预测方面, AI 将临床病理特征与影像数据充分整合, 建立了预测前哨淋巴结转移概率的可靠模型(某研究中预测准确率已达 65%), 同时从腋窝淋巴结的形态、皮质结构等特征出发系统分析转移风险, 据此合理确定清扫范围。更难得的是, 人工智能还可自然、流畅地融合基因组学、蛋白质组学等多组学数据, 对肿瘤生物学特征做出全面、精准的解析, 从而指导靶向治疗[35]。进而显著提升术前评估准确性, 助力个性化手术方案的制定, 最终改善患者预后。

5. CEUS 与 SRUS、AI 的融合应用进展

5.1. CEUS 与 SRUS 成像融合

CEUS 与 SRUS 成像融合有十分清楚、合理的互补关系: CEUS 给出高信噪比的微泡信号, SRUS 则突破了 CEUS 的分辨率限制, 二者融合可获得实时动态灌注及超分辨微血管结构的双重信息, 被公认为目前乳腺微血管成像最前沿的方向[36]。更难得的是, CEUS-SRUS 融合技术能系统、可靠地分析微血管拓扑结构及增强模式, 由此将乳腺病灶良恶性鉴别的准确率做到 >90%, 且能极好地显示 ≤ 1 cm 微小病灶及导管原位癌的异常血管网[37]; 在疗效评估中亦可早于形态学 2~4 个周期检测新辅助化疗后的微血管退化。

5.2. CEUS + SRUS + AI 三模态融合

三融合构建全维度、量化、智能化乳腺精准成像体系是目前乳腺影像学领域最高水平的尝试, 即用 CEUS 实时血流灌注、SRUS 超分辨微血管结构、AI 自动分析、诊断、预测诸种技术, 同时、系统地获得解剖形态、微血管拓扑、血流动力学、组织代谢、分子特征等数百个参数, 由此自然、妥帖地实现“病灶检出良恶性鉴别侵袭性评估预后预测”全流程智能化。更难得的是, 已有初步结果明确地表明, 三模态融合模型 $AUC > 0.96$, 能可靠地术前无创预测乳腺癌分子分型(Luminal A/B、HER-2、三阴性), 故可真正成为精准治疗的无创“影像活检”。三模态融合无疑是乳腺超声发展的必然趋势[38], 但目前处于实验室与单中心临床阶段, 需解决设备整合、数据同步、算法兼容、成本控制等问题, 未来随着人工智能的飞速发展, 多模态融合有望让 SRUS 定量分析真正更快和更好的应用于临床。

6. 挑战与局限性

尽管 CEUS、SRUS 及 AI 技术的融合为乳腺癌超声诊断带来了革命性的潜力, 但实际上, 要把它们真正用到临床上, 还面临着不少很具体、也很棘手的难题。

在技术层面上, SRUS 的临床推广面临三重核心瓶颈: 第一, 运动伪影难以规避。例如乳腺组织柔软易动, 患者呼吸、体位变动或探头抖动均会产生明显伪影, 导致图像模糊失真, 目前尚无适配乳腺的固定装置与快速校正算法。第二, 采集时间过长。常规超声单病灶检查仅需 1~2 分钟, 而 SRUS 需 5~10 分钟, 在门诊量大时严重延长候诊时间, 增加医师负荷, 难以适配繁忙筛查流程。第三, 设备参数缺乏统

一标准。各厂家成像参数、重建算法及定量指标均为自主设定,不同设备检测同一病灶的结果差异显著,无法实现跨设备数据比对与共享,这就导致没法跨设备、跨医院对比数据,也就没办法建立一个统一的诊断标准。

除技术瓶颈外,三类整合技术的推广还面临三个非技术性的难题。第一,经济成本高昂。多模态设备采购与维护费用远高于常规超声,基层医院难以承担;超声造影剂价格偏高且未完全纳入医保,增加患者负担,难以实现大规模筛查应用。第二,专业人才匮乏。新技术要求操作者掌握精准手法与伪影识别,诊断医师需具备多模态图像解读及 AI 结果甄别能力,但目前国内此类复合型人才极度匮乏,基层医疗机构尤为突出,技术落地缺乏人力支撑[39]。第三,监管与伦理滞后, AI 技术从辅助诊断迈向辅助决策,引发三重核心风险:其一,当 AI 意见与医师相左时,诊断权责归属存在争议;其二,因 AI 漏诊、误诊导致医疗事故,法律责任在开发者、医疗机构与医师之间难以划分;其三,海量超声影像数据的存储与模型训练对患者隐私保护构成严峻挑战[40]。在相关法律法规与伦理框架完善前,这些不确定性将成为技术广泛落地的重要掣肘。另外,不同地区的医疗资源本就分配不均,这些新技术和高水平人才很可能还是先集中在大城市、大医院,这就进一步拉大了城乡和不同级别医院之间的差距,最后导致这些技术,很难真正惠及每一个需要的普通人。

7. 总结与展望

本文系统回顾了超声造影、超分辨成像及人工智能在乳腺疾病中的应用进展,探讨了三项新技术在乳腺肿瘤良恶性鉴别、术前评估以及新辅助化疗疗效评估中的作用。CEUS 能优良地显示微血流, SRUS 能突破衍射极限因而能直接、可靠地可视化微血管并做定量分析, AI 能对影像数据做自动化、量化、智能化的分析,三者联用故能极大提高乳腺疾病早期诊断、良恶性鉴别、疗效评估、预后预测诸方面的能力,因此构成一套真正有意义的精准诊疗技术体系。但当前仍面临设备整合、算法泛化、临床规范、卫生经济等挑战,未来的研究可聚焦这些问题。随着技术迭代、标准完善与临床转化推进,多模态融合必将成为乳腺超声主流检查模式,为推动乳腺癌早诊早治,改善患者预后做出贡献。

声明

本研究获得重庆医科大学附属永川医院医学研究伦理委员会批准(2023 年科伦审 102 号)。

基金项目

重庆市永川区技术创新与应用发展项目(2024yc-cxfz30047);重庆医科大学附属永川医院基础与临床课题(YJJL2024004)。

参考文献

- [1] 周心怡, 孙鑫, 黄文凯, 蔡森瑶, 邹苏阳, 石菊芳, 魏文强. 2021 年中国人群可筛查癌症的疾病经济负担研究[J]. 卫生经济研究, 2026, 43(1): 26-30+36.
- [2] Ito, T. and Komoike, Y. (2024) Understanding the Basics and Clinical Applications of Contrast-Enhanced Ultrasound for Breast Lesions. *Journal of Medical Ultrasonics*, **51**, 563-566. <https://doi.org/10.1007/s10396-024-01502-3>
- [3] Shen, Y., Zhang, L. and Wu, P. (2025) The Role of Artificial Intelligence in Ultrasonographic Diagnosis of Liver Cancer: Current Status and Future Perspectives. *Gastroenterology & Endoscopy*, **3**, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.gande.2025.09.002>
- [4] Dong, J., Chen, Q., Wang, H., He, H., Luo, T. and Jiang, T. (2024) A Preliminary Study on the Diagnostic Value of Contrast-Enhanced Ultrasound and Micro-Flow Imaging for Detecting Blood Flow Signals in Breast Cancer Patients. *Gland Surgery*, **13**, 2098-2106. <https://doi.org/10.21037/gs-24-264>
- [5] 樊静, 许国庆, 王蓓, 蒋晓春, 汤晓晴. 乳腺癌超声造影特征与血管生成拟态的相关性分析[J]. 临床超声医学杂志, 2020, 22(2): 125-128.

- [6] 吴秀南, 张亚庆, 刘小蓝, 等. 老年乳腺癌患者 CEUS 表现及肿瘤标志物水平变化[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43(7): 1567-1569.
- [7] 商瑞苗, 周一波, 严慧. 超声造影对 BI-RADS 4 类乳腺导管内病变恶性再诊断的价值[J]. 浙江临床医学, 2026, 28(1): 124-125+128.
- [8] Jia, C., Niu, Q., Liu, L., Li, G., Jin, L., Du, L., *et al.* (2023) Value of an Expanded Range of Lesions on Contrast-Enhanced Ultrasound for the Diagnosis of Hypervascular Breast Masses. *Gland Surgery*, **12**, 824-833. <https://doi.org/10.21037/gs-23-165>
- [9] 姜玉霞, 苗欣, 耿慧君. 超声造影评估乳腺癌周围血管受侵程度及可切除性的价值[J]. 实用癌症杂志, 2020, 35(2): 259-262.
- [10] Cox, K., Dineen, N., Taylor-Phillips, S., Sharma, N., Harper-Wynne, C., Allen, D., *et al.* (2021) Enhanced Axillary Assessment Using Intradermally Injected Microbubbles and Contrast-Enhanced Ultrasound (CEUS) before Neoadjuvant Systemic Therapy (NACT) Identifies Axillary Disease Missed by Conventional B-Mode Ultrasound That May Be Clinically Relevant. *Breast Cancer Research and Treatment*, **185**, 413-422. <https://doi.org/10.1007/s10549-020-05956-0>
- [11] 韩转宁, 郭宏斌, 杨宝林, 等. 超声造影引导下导丝定位联合纳米碳染色对乳腺癌 SLN 的定位效果分析[J]. 中华普外科手术学杂志(电子版), 2020, 14(1): 54-57.
- [12] 伍璐, 高展, 罗国鹏. 乳腺癌超声及超声造影表现特征与预后分子病理学标志物相关性研究[J]. 影像技术, 2025, 37(1): 18-23.
- [13] 潘青, 牛一聪, 陈诚, 等. 乳腺癌新辅助化疗后前哨淋巴结转移完全缓解的预测模型构建[J]. 临床外科杂志, 2025, 33(8): 846-851.
- [14] Ito, T., Manabe, H., Kubota, M. and Komoike, Y. (2024) Current Status and Future Perspectives of Contrast-Enhanced Ultrasound Diagnosis of Breast Lesions. *Journal of Medical Ultrasonics*, **51**, 611-625. <https://doi.org/10.1007/s10396-024-01486-0>
- [15] 罗宁斌, 苏丹柯, 黄向阳, 金观桥, 刘丽东, 赵阳. 乳腺癌新辅助化疗前后 MR 扩散加权成像 ADC 值与 Ki-67 表达水平的相关性研究[J]. 临床放射学杂志, 2018, 37(6): 922-925.
- [16] 刘丽, 白文坤. 超声造影在乳腺癌诊断与新辅助化疗疗效评估中的研究进展[J]. 同济大学学报(医学版), 2025, 46(2): 300-304.
- [17] Shi, X., Dong, Y., Tan, X., Yang, P., Wang, C., Feng, W., *et al.* (2022) Accuracy of Conventional Ultrasound, Contrast-Enhanced Ultrasound and Dynamic Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging in Assessing the Size of Breast Cancer. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, **82**, 157-168. <https://doi.org/10.3233/ch-221456>
- [18] Raad, J.P., Laureano, B., Fung, L.F., Lock, D., Ramnarine, K. and Christensen-Jeffries, K. (2025) Real-Time Processing of 2D and 3D Ultrasound Localisation Microscopy: From Radiofrequency to Super-Resolution. 2025 *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Utrecht, 15-18 September 2025, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ius62464.2025.11201259>
- [19] Guo, N., Deng, Z., Sheng, K., Wang, X., Wang, S. and Hua, C. (2026) Super-Resolution Ultrasound Imaging Identifies Hippocampal Microvascular Changes in Patients with Type 2 Diabetes. *Biomedical Signal Processing and Control*, **113**, Article 109034. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2025.109034>
- [20] Gao, J. and Hou, C. (2025) Progresses and Clinical Application of Super-Resolution Ultrasound Imaging: A Narrative Review. *The Ultrasound Journal*, **17**, 1-26. <https://doi.org/10.1186/s13089-025-00432-6>
- [21] Smith, C.A.B., Wilson, H., Yan, J. and Tang, M. (2026) Quantitative Image Markers of Super-Resolution Ultrasound. *eBioMedicine*, **124**, 106108. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2025.106108>
- [22] Li, J., Chen, L., Wang, R., Zhu, J., Li, A., Li, J., *et al.* (2025) Ultrasound Localization Microscopy in the Diagnosis of Breast Tumors and Prediction of Relevant Histologic Biomarkers Associated with Prognosis in Humans: The Protocol for a Prospective, Multicenter Study. *BMC Medical Imaging*, **25**, Article No. 13. <https://doi.org/10.1186/s12880-024-01535-7>
- [23] 李颖嘉, 文戈, 杨莉, 等. 乳腺良恶性肿瘤微血管构筑的异质性及其血流动力学的功能变化[J]. 中华肿瘤杂志, 2009, 31(1): 24-27.
- [24] 祁琦, 徐菁, 恽蓓, 李军. 乳腺癌中 Ki-67 表达与微血管密度和微淋巴管密度的相关性[J]. 中国肿瘤临床与康复, 2020, 27(3): 344-347.
- [25] Li, J., Wei, C., Ying, T., Liu, Y., Wang, R., Li, M., *et al.* (2025) Differentiation of Benign and Malignant Breast Lesions by Ultrasound Localization Microscopy. *Insights into Imaging*, **16**, Article No. 128. <https://doi.org/10.1186/s13244-025-02013-6>
- [26] Hou, X., Li, Z., Liu, Y., Gao, J. and Song, T. (2025) Diagnostic Value of Super-Resolution Ultrasound Imaging in Differentiating Benign and Malignant BI-RADS-4 Breast Lesions. *Frontiers in Oncology*, **15**, Article ID: 1662492. <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1662492>

- [27] Xia, S., Hua, Q., Song, Y., Yuan, C., Zheng, Y., Tao, R., *et al.* (2025) Super-Resolution Ultrasound Imaging of Intranodal Lymphatic Sinuses for Predicting Sentinel Lymph Node Metastasis in Breast Cancer: A Preliminary Study. *European Radiology*, **35**, 6079-6088. <https://doi.org/10.1007/s00330-025-11520-5>
- [28] Ali, A., Alghamdi, M., Marzuki, S., Tengku Din, T.A., Yamin, M.S., Alrashidi, M., *et al.* (2025) Exploring AI Approaches for Breast Cancer Detection and Diagnosis: A Review Article. *Breast Cancer: Targets and Therapy*, **17**, 927-947. <https://doi.org/10.2147/bctt.s550307>
- [29] Xing, B., Gu, C., Fu, C., Zhang, B. and Tan, Y. (2025) Diagnostic Performance of Ultrasound S-Detect Technology in Evaluating BI-RADS-4 Breast Nodules ≤ 20 Mm and >20 Mm. *BMC Cancer*, **25**, Article No. 1306. <https://doi.org/10.1186/s12885-025-14760-2>
- [30] Ma, S., Li, Y., Yin, J., Niu, Q., An, Z., Du, L., *et al.* (2024) Prospective Study of AI-Assisted Prediction of Breast Malignancies in Physical Health Examinations: Role of Off-the-Shelf AI Software and Comparison to Radiologist Performance. *Frontiers in Oncology*, **14**, Article ID: 1374278. <https://doi.org/10.3389/fonc.2024.1374278>
- [31] 沈洁, 刘雅静, 莫淼, 周瑾, 王泽洲, 周昌明, 周世崇, 常才, 郑莹. 人工智能辅助超声对中国女性乳腺病灶识别的有效性研究[J]. 中国癌症杂志, 2023, 33(11): 1002-1008.
- [32] 从小宇, 笄应芬, 汪成, 等. 人工智能联合超微血管成像技术在乳腺结节诊断中的价值[J]. 实用临床医药杂志, 2023, 27(16): 7-10+15.
- [33] Bai, G., Zhong, X., Wu, Y., Lin, W., Zhou, S. and Zhou, P. (2025) Predicting Axillary Lymph Node Metastasis in Breast Cancer Using Ultrasound and Machine Learning with Shap. *Cancer Management and Research*, **17**, 2183-2197. <https://doi.org/10.2147/cmar.s542680>
- [34] Zhu, T., Huang, Y., Li, W., Zhang, Y., Lin, Y., Cheng, M., *et al.* (2023) Multifactor Artificial Intelligence Model Assists Axillary Lymph Node Surgery in Breast Cancer after Neoadjuvant Chemotherapy: Multicenter Retrospective Cohort Study. *International Journal of Surgery*, **109**, 3383-3394. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000000621>
- [35] Jiang, B., Wu, Y., Chen, X., Jian, C. and Wang, W. (2026) Artificial Intelligence and Multi-Omics Convergence in Breast Cancer: Revolutionizing Diagnosis, Prognostication, and Precision Oncology. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, **220**, Article 105160. <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2026.105160>
- [36] Brown, K.G., Li, J., Margolis, R., Trinh, B., Eisenbrey, J.R. and Hoyt, K. (2023) Assessment of Transarterial Chemoembolization Using Super-Resolution Ultrasound Imaging and a Rat Model of Hepatocellular Carcinoma. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **49**, 1318-1326. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2023.01.021>
- [37] Lei, Y., Liu, C., Hu, H., Li, N., Zhang, N., Wang, Q., *et al.* (2024) Combined Use of Super-Resolution Ultrasound Imaging and Shear-Wave Elastography for Differential Diagnosis of Breast Masses. *Frontiers in Oncology*, **14**, Article ID: 1497140. <https://doi.org/10.3389/fonc.2024.1497140>
- [38] 李玥, 曹军英. 多模态超声在乳腺癌精准诊断中研究进展[J]. 临床军医杂志, 2022, 50(7): 661-665.
- [39] Zhou, J., Zhang, Y. and Shi, S. (2025) Ultrasound Elastography: Advances and Challenges in Early Detection of Breast Cancer. *Frontiers in Oncology*, **15**, Article ID: 1589142. <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1589142>
- [40] Goh, S., Goh, R.S.J., Chong, B., Ng, Q.X., Koh, G.C.H., Ngiam, K.Y., *et al.* (2025) Challenges in Implementing Artificial Intelligence in Breast Cancer Screening Programs: Systematic Review and Framework for Safe Adoption. *Journal of Medical Internet Research*, **27**, e62941. <https://doi.org/10.2196/62941>