

影像组学：开启乳腺癌淋巴结转移术前评估的新视野

邹妍娜, 赵 玲, 李慕贞, 姜霁洋, 陈伟彬*

华北理工大学附属医院医学影像中心, 河北 唐山

收稿日期: 2025年11月29日; 录用日期: 2025年12月22日; 发布日期: 2025年12月31日

摘 要

乳腺癌是全球女性高发恶性肿瘤，腋窝淋巴结转移状态直接关联患者预后评估与个体化治疗方案制定，其术前精准评估对改善患者生存质量至关重要。传统超声、X线、MRI等影像学检查依赖医师主观经验判断，对微小或隐匿性转移灶诊断准确性有限，易导致误诊漏诊。影像组学通过高通量提取影像定量特征，结合机器学习、深度学习算法构建预测模型，可客观量化肿瘤生物学特征，显著提升淋巴结转移评估精准度。本文综述超声、X线、MRI影像组学在乳腺癌术前淋巴结转移评估中的研究进展，分析各模态技术优势与应用局限，为影像组学技术临床转化及优化乳腺癌诊疗策略提供参考。

关键词

乳腺癌, 影像组学, 腋窝淋巴结转移

Imaging: A New Vision for Preoperative Evaluation of Lymph Node Metastasis in Breast Cancer

Yanna Zou, Ling Zhao, Muzhen Li, Jiyang Jiang, Weibin Chen*

Medical Imaging Center of Affiliated Hospital of North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: November 29, 2025; accepted: December 22, 2025; published: December 31, 2025

Abstract

Breast cancer is a high-incidence malignant tumor among women all over the world. Axillary lymph

*通讯作者。

文章引用: 邹妍娜, 赵玲, 李慕贞, 姜霁洋, 陈伟彬. 影像组学: 开启乳腺癌淋巴结转移术前评估的新视野[J]. 临床医学进展, 2026, 16(1): 112-118. DOI: 10.12677/acm.2026.161016

node metastasis is directly related to the prognosis evaluation and individualized treatment plan, and its accurate preoperative evaluation is very important to improve the quality of life of patients. Traditional imaging examinations, such as ultrasound, X-ray and MRI, rely on doctors' subjective experience and judgment, and the accuracy of diagnosis for tiny or occult metastases is limited, which easily leads to misdiagnosis and missed diagnosis. Imaging genomics can extract the quantitative features of images by Qualcomm, and build a prediction model by combining machine learning and deep learning algorithms, which can objectively quantify the biological features of tumors and significantly improve the accuracy of lymph node metastasis assessment. This paper reviews the research progress of ultrasound, X-ray and MRI imaging in preoperative lymph node metastasis assessment of breast cancer, analyzes the advantages and application limitations of each modality technology, and provides reference for clinical transformation of imaging technology and optimization of breast cancer diagnosis and treatment strategy.

Keywords

Breast Cancer, Imaging Axillary, Lymph Node Metastasis

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(Breast Cancer, BC)是全球女性最常见的恶性肿瘤之一, 这对女性的健康和生命造成严重威胁[1]。据世界卫生组织国际癌症研究机构(IARC)发布的 2020 年全球癌症数据, 女性乳腺癌的发病率已超过肺癌, 居首位[2]。在中国, 乳腺癌的发病率也逐年攀升, 且发病年轻化[3]。

腋窝淋巴结转移(Axillary Lymph Node Metastasis, ALNM)是影响乳腺癌患者预后的重要因素之一, 其状态不仅与患者生存期有关, 还对临床治疗方案的选择起着重要作用[4]。准确地评估乳腺癌淋巴结转移情况, 有助于医生制定个性化的治疗方案, 提高患者的生存概率和生活质量。目前, 腋窝淋巴结清扫术(ALND)是诊断淋巴结转移的金标准, 但该手术会导致上肢疼痛、感觉异常、淋巴水肿等并发症, 严重影响患者的术后生活质量。因此, 术前准确评估淋巴结转移状态, 避免不必要的侵入性检查, 成为乳腺癌诊疗领域的研究热点。

传统的影像学检查方法, 如超声、X 线、MRI 等, 在评估乳腺癌淋巴结转移方面存在一定的局限性。这些方法主要依赖于医生对图像的主观观察和经验判断, 对于微小转移灶或隐匿性转移的诊断准确性较低。随着计算机技术和医学影像学的快速发展, 影像组学技术应运而生。影像组学是指从医学影像中高通量地提取大量的定量特征, 这些特征能够反映肿瘤的生物行为学和分子特征, 从而实现对肿瘤的精准诊断、预后预测和疗效评估[5]。影像组学技术的出现, 为乳腺癌淋巴结转移的术前评估提供了新的思路[6]。

近年来, 基于超声、X 线、MRI [7]等不同影像模态的影像组学研究在乳腺癌淋巴结转移评估方面取得了显著进展[8]。通过提取和分析影像中的纹理、形状、强度等特征, 并结合机器学习、深度学习等数据分析方法, 构建预测模型, 能够提高对术前乳腺癌淋巴结转移的预测的准确性。本文将对超声影像组学、X 线影像组学、MRI 影像组学在术前评估乳腺癌淋巴结转移的研究进展进行综述, 旨在为临床医生提供更全面的信息, 推动影像组学技术在乳腺癌诊疗中的应用。

2. 超声影像组学在术前评估乳腺癌淋巴结转移中的应用

超声影像组学从超声图像中提取多种特征,如形态学特征、纹理特征等,这些特征能够反映肿瘤的生物学特性,如纹理特征可以体现肿瘤内部细胞排列和组织结构,而形态学特征则反映肿瘤的生长方式和侵袭性[9],这将共同形成更加全面的超声信息。

近年来,众多研究聚焦于超声影像组学预测乳腺癌淋巴结转移,并取得了显著成果。Sha [10]等从 135 例乳腺癌患者超声图像的感兴趣区域(ROI)中提取出 1562 个影像组学特征,并使用斯皮尔曼相关系数、最小绝对收缩和选择算子(LASSO)以及最小冗余最大相关性(mRMR)进行特征选择,最终筛选出 30 个特征。再利用 18 种机器学习算法构建影像组学模型,其中 SVM 模型具有最高的 AUC 值,在训练集和测试集分别为 0.937 和 0.932;同时基于乳腺癌患者的 B3GALT4 mRNA 水平构建临床模型,其 AUC 值为 0.904 和 0.887;此外,通过整合 B3GALT4 和影像组学特征构建的联合预测模型,该模型的 AUC 分别为 0.991 和 0.975,显著优于单纯影像组学模型和临床模型。通过 Hosmer-Lemeshow 检验、校准曲线和决策曲线分析曲线(DCA)分析表明,联合模型具有更好的临床实用性。另有学者[11]运用类似方法回顾性分析女性乳腺癌 T1 期患者 443 例,在有明确病理的患者中建立影像组学评分(Radiomics score, Rad-score);腋窝超声检查阳性、高回声晕及病灶内部血供丰富确定为预测腋窝淋巴结转移的独立危险因素,共同构建联合模型,并绘制列线图。此联合模型在训练集和测试集上 AUC 为 0.822 和 0.846,表明其能够有效预测 T1 期乳腺癌同侧腋窝淋巴结转移,具有很高的临床预测效能。

大部分肿瘤细胞呈高度侵袭性,这将破坏肿瘤周围实质组织的正常结构,因此瘤周影像组学在肿瘤良恶性鉴别、转移预测、疗效评估中也具有潜在价值[12]。杜瑶等[13]回顾性分析 312 例乳腺癌患者术前超声图像,基于瘤内 ROI 及适形自动外扩不同范围(1、2、3、4、5 mm)绘制瘤周感兴趣区,提取并筛选影像组学特征,构建瘤内、不同瘤周范围(1~5 mm)及瘤内 + 瘤周影像组学模型。结果显示瘤内 + 3 mm 瘤周模型预测 ALNM 效能最优,训练集与测试集 AUC 分别达 0.873、0.780,且具有良好临床净收益。

上述研究成果表明,超声影像组学术前预测淋巴结转移状态前景良好。但是,多数研究都是基于单一的超声图像。剪切波弹性成像[14](SWE),可以量化组织弹性模量,间接反映肿瘤的硬度特征,是有前述的超声指标,以后应更加深入地探究基于 SWE 影像组学与乳腺癌淋巴结转移的关系。

3. X 线影像组学在术前评估乳腺癌淋巴结转移中的应用

乳腺 X 线摄影(俗称“钼靶”,MG)是乳腺癌筛查与诊断中不可或缺的影像学技术,凭借对乳腺微小钙化灶的高检出灵敏度,成为早期乳腺癌筛查的首选手段,但评估腋窝淋巴结是否存在转移的准确性较低[15]。钼靶图像中与肿瘤病理特性密切相关的微小钙化分布、病灶密度异质性、边缘形态及结构扭曲等视觉特征,可通过影像组学技术转化为可量化的纹理特征(如灰度共生矩阵参数、小波变换特征)、形态学特征(如圆形成度、毛刺指数)及密度特征,结合机器学习算法构建诊断模型,实现对术前乳腺癌淋巴结转移状态预测。

一项研究[16]回顾性分析了 728 例经病理证实的浸润性乳腺癌患者,将 413 个患者按 7:3 的比例随机分为训练集和测试集,余下 315 位患者作为外部验证集。对比分析双乳内外斜位(MLO)和头尾位(CC)图像,选取病变横截面积最大的钼靶图像用科研平台进行图像分割及影像组学特征提取,应用 LASSO 回归筛选出 8 个与腋窝淋巴结转移相关的组学特征,并使用支持向量机(SVM)分类器构建影像组学预测模型。该模型的预测效能在训练组、验证组和外部测试组分别为 0.807、0.790 和 0.753,决策曲线证实了该模型的临床实用性。这表明基于数字化乳腺 X 线影像组学对浸润性乳腺癌腋窝淋巴结转移的预测具有较高效能。另有研究[17]开发了一种基于乳腺 X 线摄影(MG)的融合后模型,结合临床、放射组学和深度学习模

型,以评估乳腺癌患者前哨淋巴结(SLN)的状态,其在内部验证集和测试集的 AUC 分别为 0.845 和 0.825,表现出预测乳腺癌 SLN 转移的前景。

上述研究表明,基于乳腺 X 线影像组学模型能够较好地预测淋巴结转移状态,可以将肿瘤异质性可视化。而且,部分加入了外部验证集,可以有效减少过拟合、验证模型泛化能力,增强研究结果的可信度与临床适用性。然而,此种单模态模型的局限性明显:钼靶组学擅长捕捉钙化特征,但对致密型乳腺病灶漏诊率高。因此,未来应该纳入多种模态,以整合不同影像技术的互补信息,进一步提高影像组学模型的效能。

4. MRI 影像组学在术前评估乳腺癌淋巴结转移中的应用

MRI 具有多参数、多方位成像的优势,可提供 T1 加权成像(T1WI)、T2 加权成像(T2WI)、扩散加权成像(DWI)、动态对比增强成像(DCE-MRI)等多种序列图像。MRI 影像组学基于 MRI 多序列成像技术,通过对不同序列图像的分析,能够全面、深入地挖掘肿瘤的特征信息[18]。在 MRI 影像组学分析流程中,首先要进行图像采集,确保图像质量符合要求。随后进行图像预处理,如去除噪声、校正图像的几何变形和强度不均匀性等,以提高图像的质量和一致性。

Zhang [19]等研究发现肿瘤直径是乳腺癌淋巴结转移的独立危险因素,结合 DCE-MRI 图像中提取的影像组学特征,对 ALNM 有较好的预测价值,在训练集、测试集和外部验证集中的 AUC 分别为 0.884、0.822 和 0.813。有研究[20]创建并验证一个临床放射组学列线图,该列线图将动态对比增强磁共振成像(DCE-MRI)的放射组学特征与标准临床预测因子相结合,以提高预测年轻乳腺癌患者 ALNM 的准确性。Wu [21]等研究基于 DCE-MRI 图像,引入生境分析方法,将肿瘤内部分为三个亚区域,全面捕捉肿瘤的异质性及其微环境信息。研究纳入了 426 例乳腺癌患者,提取肿瘤内部及其周围不同距离(2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm)的影像组学特征。结果表明,4 mm 瘤周区域为预测腋窝淋巴结转移的最佳范围,4 mm 瘤周模型在训练集和测试集中的 AUC 分别达到 0.871 和 0.773,显著优于肿瘤内部及其他周围区域的模型。同时,结合病理因素、生境分析与瘤周 4 mm 影像组学的联合模型显示出更优异的预测性能,AUC 值分别为 0.973 和 0.854。又有 Chen [22]等通过 DenseNet121 的预训练神经网络,从扩散加权成像-定量测量表观扩散系数(DWI-ADC)成像和动态对比增强 MRI (DCE-MRI)中提取深度学习特征,并联合临床因素(LN 触诊、MRI 中肿瘤大小、Ki-67 水平)构建列线图模型,在训练集和测试集上其 AUC 分别为 0.80 和 0.71,在测试队列中,敏感性、特异性和准确性分别为 65%、80%和 75%。

由研究结果可得,基于 DCE-MRI 的影像组学模型可以为 ALNM 的预测提供更多生物学信息。瘤周不同范围的加入也为影像组学提供了新的关注点,并且当前研究显示出其在 BC 患者 ALNM 预测方面较单独瘤内影像组学模型有更好的预测效能。生境分析通过将肿瘤划分为不同功能亚区域并量化各亚区域特征差异,精准捕捉肿瘤异质性及微环境状态,为乳腺癌淋巴结转移状态的预测提供更精准的量化依据,提升模型效能。

5. 多模态影像组学在术前评估乳腺癌淋巴结转移中的应用

不同影像模态能够提供互补的信息。超声影像组学侧重于观察肿瘤的形态、大小、血流情况以及淋巴结的皮质增厚、髓质消失等形态学改变;X 线影像组学则主要关注肿瘤的钙化特征和整体形态;MRI 影像组学能够提供肿瘤的内部结构、血流动力学和水分子扩散等多方面信息。通过整合这些不同来源的信息,可以更全面地了解肿瘤的生物行为,提高对乳腺癌淋巴结转移的预测准确性。

张舒妮等人[23]在 224 例患者 T2WI 图像和动态对比增强 MRI 第二期图像的病灶最大层面及同一病灶的钼靶头尾位、内外斜位图像上勾画感兴趣区,并且最终提取、筛选 14 个影像组学特征,利用 5 种机

器学习分类器(SVM, KNN, XGBoost, LRRF)构建单、多模态影像组学模型, 最终发现多模态影像组学模型以训练集 AUC=0.899, 测试集 AUC=0.864 胜出, 再联合淋巴结触诊和 MRI_ALN 两个独立危险因素构建的临床模型, AUC 进一步提升(0.941, 0.926)。

王文娟[24]探讨基于乳腺癌原发灶超声图像和动态对比增强磁共振成像(DCE-MRI)构建的双模态影像组学模型对乳腺癌腋窝淋巴结(ALN)转移负荷的预测价值, 采用极端梯度提升(XGBoost)算法构建超声模型、MRI 模型及超声 + MRI 联合模型, 分两步预测乳腺癌 ALN 转移负荷: (1) 预测乳腺癌 ALN 有无转移: 超声 + MRI 模型训练组和验证组 AUC 分别为 0.865、0.871, 高于单模态模型; (2) 预测 ALN 转移负荷: 超声 + MRI 模型性能最佳, AUC 分别为 0.867、0.893。联合超声与 DCE-MRI 的双模态影像组学模型, 可高效评估乳腺癌 ALN 转移负荷。

有研究[25]尝试将影像组学和深度学习模型联合构建多模态联合组学来预测乳腺癌淋巴结转移。该研究收集了 270 例乳腺癌患者的 MG 和 MRI 图像, 分别提取并融合了放射组学和深度学习(3D-Resnet18)特征, 包括 MG 影像组学特征(如形态学特征、纹理特征等)和 MRI 影像组学特征(基于 T2WI、DCE-MRI 和 DWI 序列), 再分别构建影像组学模型、深度学习模型、影像组学 - 深度学习联合模型。结果显示, 影像组学 - 深度学习联合模型在测试集 AUC 为 0.846 优于其他两种模型(0.756, 0.712)。这表明此研究开发的多模态放射组学和深度学习模型, 为 BC ALNM 的术前预测提供了重要的价值。

综上所述, 超声、MRI 及钼靶多模态联合, 可整合各模态互补信息, 覆盖转移相关宏微观及功能特征, 弥补单一模态盲区。结合深度学习算法能提升模型预测性能, 实现无创风险分层, 为腋窝管理及个体化治疗提供可靠依据, 对改善预后、避免过度治疗意义重大。

6. 影像组学研究流程中的关键挑战

影像组学在乳腺癌淋巴结转移评估中的研究流程涉及图像采集、ROI 分割、特征选择及模型构建等核心环节, 各环节的技术瓶颈直接影响研究结果的可靠性与临床转化价值。

图像采集标准化不足是首要挑战, 不同医疗机构的影像设备型号、扫描参数(如超声频率、MRI 序列参数)及重建算法存在显著差异, 导致同一病灶在不同影像中呈现的灰度、纹理等特征缺乏一致性, 直接降低了特征的可比性与模型泛化能力。ROI 分割的可重复性问题同样突出, 目前分割多依赖医师手动或半自动化操作, 受主观经验、病灶边界模糊度等影响, 不同操作者或同一操作者不同时间的分割结果易出现偏差, 进而导致提取的特征存在波动, 干扰模型稳定性。特征选择的稳定性也同样面临考验, 影像组学高通量提取的特征中存在大量冗余信息, 现有 LASSO、mRMR 等特征选择算法对数据分布敏感, 小样本或数据异质性较高时易筛选出虚假关联特征, 影响模型预测效能。过拟合是模型构建的核心风险, 单中心小样本研究中, 模型易过度学习数据中的噪声信息, 导致在训练集表现优异而在外部验证集中效能显著下降, 难以满足临床实际应用需求。

这些挑战相互关联, 均可能导致研究结果出现偏差, 需通过统一影像采集协议、优化自动化分割算法、采用多算法交叉验证特征及扩大样本量并加入外部验证等策略, 提升影像组学研究的科学性与可靠性。

7. 小结与展望

综上所述, ALNM 是乳腺癌重要的预后生物标志物, 其术前无创预测有助于乳腺癌患者后续个性化治疗方式的选择。不同的影像技术及影像组学方法在评价 ALNM 上均具有一定价值, 影像组学模型在大数据的加持下, 具有更稳定的模型效能。但是当前大部分研究也面临挑战: 如影像组学发展受数据共享障碍制约显著。医学影像含患者隐私, 受法规严格保护, 跨机构共享受限, 且不同医疗机构数据格式、

存储及管理系统差异大, 增加整合难度。这导致研究多局限于单中心小样本数据, 难以构建大规模高质量数据集, 限制模型训练验证, 降低研究结果可靠性与普适性。再如, 影像组学特征标准化也面临显著挑战。不同影像设备、扫描参数及重建算法存在差异, 导致特征缺乏一致性与可比性, 影响模型稳定性及泛化能力。同时, 影像组学特征的定义、计算方法尚未统一, 特征提取软件与算法各异, 进一步加剧了标准化困难。为了克服以上障碍, 需要各大医疗机构之间统一影像数据的采集、构建标准化影像协议以使数据获取最大化, 统一后处理图像使数据标准化。

另外, 影像组学模型从科研走向临床实践, 仍需突破多维度转化瓶颈, 其核心在于解决“信任-适配-验证”三大关键问题。在模型可解释性层面, 当前多数预测模型因“黑箱”特性难以获得临床医师信任, 而 SHAP (SHapley Additive exPlanations)、LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) 等可解释性工具可通过可视化热力图、特征贡献度排序, 直观呈现关键影像特征(如特定纹理参数、瘤周信号)与淋巴结转移风险的关联, 将抽象模型决策过程转化为临床可理解的依据, 进而增强医师对模型的接纳度。模型部署的技术适配性是转化落地的重要障碍。在临床工作流程中, 影像设备格式差异、PACS 系统数据接口不统一, 以及模型对实时计算资源的需求, 均可能导致模型难以无缝融入现有诊疗流程。需开发轻量化模型算法, 优化与临床影像系统的兼容性, 并建立标准化数据传输与计算模块, 确保模型在临床场景中实现高效、稳定的实时预测。此外, 现有研究多聚焦模型准确性(如 AUC 值), 却忽视对临床效用(clinical utility)的验证, 即模型是否真正改善诊疗决策、降低过度医疗(如减少不必要的 ALND)或提升患者预后。未来需设计前瞻性、多中心临床试验, 以“是否优化治疗方案选择”“是否降低并发症发生率”等临床终点为评价指标, 而非单纯依赖影像诊断效能参数, 从而全面验证影像组学模型的临床价值, 推动其从技术创新转化为切实改善乳腺癌诊疗质量的工具。

未来, 随着人工智能技术的不断进步, 影像组学与人工智能的深度融合将成为必然趋势, 有望实现影像组学特征的自动提取和分析。多模态影像组学的融合以及影像组学与临床病理特征、基因表达数据、生境分析等多组学数据的融合, 将为乳腺癌淋巴结转移的术前评估提供更全面、更精准的信息。同时, 开展更多的前瞻性、多中心临床研究, 验证影像组学模型的有效性和安全性, 加强影像组学相关临床指南和规范的制定, 推动影像组学与临床实践的紧密结合, 将有助于实现乳腺癌的精准诊疗, 提高患者的生存率和生活质量。影像组学在术前评估乳腺癌淋巴结转移方面具有广阔的发展前景, 有望为乳腺癌的临床诊疗带来新的突破。

参考文献

- [1] Breast Cancer Committee and China Anti-Cancer Association (2025) [Chinese Clinical Practice Guideline for Genetic Testing in Advanced Breast Cancer (2025 Edition)]. *Chinese Journal of Oncology*, **47**, 946-960.
- [2] 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>
- [3] Wang, X., Xia, C., Wang, Y., Qi, Y., Qi, X., Zhao, J., *et al.* (2023) Landscape of Young Breast Cancer under 35 Years in China over the Past Decades: A Multicentre Retrospective Cohort Study (YBCC-Catts Study). *eClinicalMedicine*, **64**, Article ID: 102243. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.102243>
- [4] 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>
- [5] Lambin, P., Rios-Velazquez, E., Leijenaar, R., Carvalho, S., van Stiphout, R.G.P.M., Granton, P., *et al.* (2012) Radiomics: Extracting More Information from Medical Images Using Advanced Feature Analysis. *European Journal of Cancer*, **48**, 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2011.11.036>
- [6] 赵楠楠, 朱芸, 汤晓敏, 等. 基于瘤内及瘤周 MRI 影像组学列线图预测乳腺癌腋窝淋巴结转移[J]. 磁共振成像, 2023, 14(3): 81-87, 94.

- [7] 王贇霞, 尚怡研, 郭亚欣, 等. DCE-MRI 影像组学特征在预测乳腺癌腋窝淋巴结转移中的价值[J]. 磁共振成像, 2023, 14(3): 21-27.
- [8] 汪媛媛, 余建群. 乳腺癌腋窝淋巴结转移的影像及影像组学研究进展[J]. 放射学实践, 2023, 38(5): 662-666.
- [9] Wei, M., Du, Y., Wu, X., Su, Q., Zhu, J., Zheng, L., *et al.* (2020) A Benign and Malignant Breast Tumor Classification Method via Efficiently Combining Texture and Morphological Features on Ultrasound Images. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, **2020**, Article ID: 5894010. <https://doi.org/10.1155/2020/5894010>
- [10] Sha, Y., Ge, S., Wang, Y., Cai, S., Wang, C., Zhuang, H., *et al.* (2025) Ultrasound-Based Radiomics Combined with B3GALT4 Level to Predict Sentinel Lymph Node Metastasis in Primary Breast Cancer. *Frontiers in Oncology*, **15**, Article 1570493. <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1570493>
- [11] 魏伟, 冯慧俊, 王晔, 等. 基于超声影像组学列线图预测 T1 期乳腺癌同侧腋窝淋巴结转移的价值[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(8): 796-802, 808.
- [12] Wang, Z., Zhang, H., Lin, F., Zhang, R., Ma, H., Shi, Y., *et al.* (2023) Intra- and Peritumoral Radiomics of Contrast-Enhanced Mammography Predicts Axillary Lymph Node Metastasis in Patients with Breast Cancer: A Multicenter Study. *Academic Radiology*, **30**, S133-S142. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2023.02.005>
- [13] 杜瑶, 吴萌, 王玉华, 等. 基于乳腺癌原发灶瘤内及瘤周超声影像组学特征预测腋窝淋巴结转移[J]. 中国医学影像学杂志, 2025, 33(10): 1056-1062.
- [14] Liu, X., Li, J., He, Y., *et al.* (2024) Correlation between SWE Parameters and Histopathological Features and Immunohistochemical Biomarkers in Invasive Breast Cancer. *Journal of Central South University. Medical Sciences*, **49**, 1941-1952.
- [15] 乔江华, 朱立元, 韦伟. 数字化钼靶检查在判断乳腺癌腋窝淋巴结转移中的价值探讨[J]. 临床外科杂志, 2007(11): 751-752.
- [16] 谢玉海, 马培旗, 王小雷, 等. 基于数字化乳腺 X 线影像组学预测浸润性乳腺癌腋窝淋巴结转移的多中心研究[J]. 放射学实践, 2024, 39(1): 31-36.
- [17] Liu, X., Ruan, Y., Cao, S., Zhao, M., Shi, Z., Jin, Y., *et al.* (2025) Development and Internal Validation of a Mammography-Based Model Fusing Clinical, Radiomics, and Deep Learning Models for Sentinel Lymph Node Metastasis Prediction in Breast Cancer. *Frontiers in Medicine*, **12**, Article 1659422. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1659422>
- [18] Han, Y., Huang, M., Xie, L., Cao, Y. and Dong, Y. (2025) The Value of Intratumoral and Peritumoral Radiomics Features Based on Multiparametric MRI for Predicting Molecular Staging of Breast Cancer. *Frontiers in Oncology*, **15**, Article 1379048. <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1379048>
- [19] Zhang, J., Zhang, Z., Mao, N., Zhang, H., Gao, J., Wang, B., *et al.* (2023) Radiomics Nomogram for Predicting Axillary Lymph Node Metastasis in Breast Cancer Based on DCE-MRI: A Multicenter Study. *Journal of X-Ray Science and Technology: Clinical Applications of Diagnosis and Therapeutics*, **31**, 247-263. <https://doi.org/10.3233/xst-221336>
- [20] Dong, X., Meng, J., Xing, J., Jia, S., Li, X. and Wu, S. (2025) Predicting Axillary Lymph Node Metastasis in Young Onset Breast Cancer: A Clinical-Radiomics Nomogram Based on DCE-MRI. *Breast Cancer: Targets and Therapy*, **17**, 103-113. <https://doi.org/10.2147/bctt.s495246>
- [21] Wu, P., Guo, F., Wang, J., Gao, Y., Feng, S., Chen, S., *et al.* (2024) Development and Validation of a Dynamic Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging-Based Habitat and Peritumoral Radiomic Model to Predict Axillary Lymph Node Metastasis in Patients with Breast Cancer: A Retrospective Study. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 8211-8226. <https://doi.org/10.21037/qims-24-558>
- [22] Chen, Y., Wang, L., Dong, X., Luo, R., Ge, Y., Liu, H., *et al.* (2023) Deep Learning Radiomics of Preoperative Breast MRI for Prediction of Axillary Lymph Node Metastasis in Breast Cancer. *Journal of Digital Imaging*, **36**, 1323-1331. <https://doi.org/10.1007/s10278-023-00818-9>
- [23] 张舒妮, 赵楠楠, 李阳, 等. 多模态影像组学列线图术前预测乳腺浸润性导管癌腋窝淋巴结转移的价值[J]. 磁共振成像, 2024, 15(4): 78-87.
- [24] 王文娟, 王倩倩, 郑琪, 等. 基于超声和 DCE-MRI 的双模态影像组学模型预测乳腺癌腋窝淋巴结转移负荷[J]. 中国超声医学杂志, 2025, 41(10): 1103-1107.
- [25] Guo, F., Sun, S., Deng, X., Wang, Y., Yao, W., Yue, P., *et al.* (2024) Predicting Axillary Lymph Node Metastasis in Breast Cancer Using a Multimodal Radiomics and Deep Learning Model. *Frontiers in Immunology*, **15**, Article 1482020. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1482020>