

乳腺癌自动全容积成像特征与分子分型的相关性：文献综述

张琳

延安大学附属医院超声医学科, 陕西 延安

收稿日期: 2025年7月5日; 录用日期: 2025年7月28日; 发布日期: 2025年8月7日

摘要

乳腺癌的分子分型对指导临床治疗决策和预后评估具有重要意义。传统病理活检作为分子分型诊断的金标准, 存在侵入性操作、肿瘤异质性及时效性差等局限。近年来, 自动乳腺全容积成像(Automated Breast Volume Scanner, ABUS/ABVS)技术, 特别是其冠状面成像特征, 在无创预测乳腺癌分子分型方面展现出重要价值。本文通过系统回顾相关文献, 深入探讨ABUS/ABVS的影像学特征与乳腺癌分子分型(Luminal A型、Luminal B型、HER2过表达型及三阴型)之间的关联机制, 分析其在分化程度评估、预后预测中的效能, 并综述放射组学模型与多模态融合技术的前沿进展。研究表明, 不同分子分型在ABUS冠状面上呈现显著差异: “汇聚征”与Luminal型密切相关, 微钙化在HER2过表达型中高发, 而三阴型多表现为边界清晰和形态规则。基于ABUS的放射组学模型进一步将分子分型预测AUC提升至0.82~0.87, 为精准医疗提供了新方向。本综述还讨论了当前技术临床转化面临的挑战, 包括操作标准化、样本异质性问题, 并对深度学习与动态功能成像等未来发展方向提出展望。

关键词

自动乳腺全容积成像, 乳腺癌, 分子分型

Correlation between Automated Breast Volume Scanner Features and Molecular Typing in Breast Cancer: A Literature Review

Lin Zhang

Department of Ultrasound Medicine, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: Jul. 5th, 2025; accepted: Jul. 28th, 2025; published: Aug. 7th, 2025

文章引用: 张琳. 乳腺癌自动全容积成像特征与分子分型的相关性: 文献综述[J]. 临床医学进展, 2025, 15(8): 534-541.
DOI: 10.12677/acm.2025.1582264

Abstract

Molecular typing of breast cancer is of great significance in guiding clinical treatment decisions and prognostic evaluation. Traditional pathological biopsy, as the gold standard for molecular typing diagnosis, has limitations such as invasive procedures, tumor heterogeneity and poor timeliness. In recent years, Automated Breast Volume Scanner (ABUS/ABVS) technology, especially its coronal imaging features, has shown great value in non-invasive prediction of breast cancer molecular typing. In this paper, we systematically review the relevant literature to explore the association mechanism between the imaging characteristics of ABUS/ABVS and the molecular typing of breast cancer (Luminal A, Luminal B, HER2 overexpression and triple negative type), analyze its efficacy in the evaluation of differentiation degree and prognosis, and review the cutting-edge progress of radiomics models and multimodal fusion technology. The results showed that different molecular subtypes showed significant differences in the ABUS coronal plane: the “convergence sign” was closely related to the Luminal type, and microcalcifications were more common in the HER2 over-expression type, while the triple-negative type was mostly characterized by clear boundaries and regular morphology. The ABUS-based radiomics model further improved the predicted AUC of molecular typing to 0.82~0.87, providing a new direction for precision medicine. This review also discusses the current challenges in the clinical translation of technologies, including operational standardization and sample heterogeneity, and puts forward prospects for future development directions such as deep learning and dynamic functional imaging.

Keywords

Automated Breast Volume Scanner, Breast Cancer, Molecular Typing

Copyright © 2025 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

乳腺癌作为全球女性发病率最高的恶性肿瘤，其分子异质性对治疗反应和预后具有决定性影响。根据第 13 届 St. Gallen 国际乳腺癌会议共识，乳腺癌可分为 Luminal A 型、Luminal B 型、HER2 过表达型和三阴性(Triple-Negative Breast Cancer, TNBC) [1]。不同分子亚型在治疗方案及预后特征上存在显著差异。目前，分子分型的确定主要依赖免疫组化技术(检测 ER、PR、HER2 及 Ki-67 表达)，但该技术存在一定局限性：活检的侵入性操作增加患者痛苦，单点取样难以全面反映肿瘤空间异质性，且检测耗时较长可能延误治疗决策[2]。在这一背景下，医学影像学技术因其无创性、全景式扫描和实时性优势，成为分子分型无创预测的研究热点。自动乳腺全容积成像(ABUS/ABVS)作为超声技术的重要革新，通过标准化三维容积扫描，显著提升了乳腺病变评估的可重复性和操作者独立性[3]。其独特的冠状面成像能清晰显示乳腺组织结构在垂直于声束平面上的整体分布，尤其有利于识别如“汇聚征”等关键征象——这一特征表现为冠状面上腺体组织向肿块中心聚集，形似太阳光芒[3] [4]。

本文旨在系统梳理 ABUS/ABVS 冠状面成像特征与乳腺癌分子分型相关性的最新研究进展，从技术原理、特征 - 分型关联机制、预测模型构建及临床转化四个维度展开论述，为乳腺癌精准影像诊断提供理论依据。

2. ABUS/ABVS 技术原理与影像特征标准化

2.1. 技术基础与发展脉络

自动乳腺全容积成像系统(ABUS/ABVS)代表了乳腺超声技术的重大进步。与传统手持超声依赖操作者经验不同, ABUS 采用自动化探头进行标准化扫描, 通过高频线性换能器(通常 5~14 MHz)沿预设路径移动, 完整覆盖乳腺组织。扫描过程中, 系统自动采集一系列连续的二维断面图像, 经三维重建算法合成容积数据集, 可在横断面、矢状面和冠状面三个相互垂直的平面上进行多平面重建(Multiplanar Reconstruction, MPR)。冠状面(或称“太阳平面”)作为 ABUS 最具诊断价值的成像视角, 其独特性在于能够全景式展示乳腺组织结构在平行于皮肤表面方向上的分布特征。这一平面可清晰显示乳腺导管系统的放射状走行及周围组织的汇聚状态, 为识别恶性肿瘤特征提供独特视角[4] [5]。标准化的扫描体位(外侧位、正中位、内侧位)确保双侧乳腺图像的可比性, 显著降低操作者依赖性。

2.2. 冠状面特异性特征解析

ABUS 冠状面成像包含一系列特征性影像学表现, 其标准化定义对研究可重复性至关重要: 汇聚征(Retraction Phenomenon): 亦称“太阳征”, 指在冠状面上, 肿瘤周围腺体组织及结缔组织呈放射状向中心汇聚, 形似太阳光芒。这一征象在 Luminal A 型乳腺癌中的出现率显著高于其他亚型[6]。其病理基础与肿瘤促纤维增生反应相关, 高分化肿瘤中更为常见[4]。微钙化(Microcalcifications): 表现为点状或簇状高回声, 后方可伴声影。在 ABUS 冠状面上, 微钙化在 Luminal B 型和 HER2 过表达型中发生率显著高于其他亚型[4] [5] [7]。其形成与肿瘤细胞代谢活跃及坏死相关, HER2 扩增可能通过 MAPK 通路促进钙盐沉积[4]。边界与形态特征: 三阴性乳腺癌在冠状面常表现为边界清晰和形态规, 这一特征与其病理特性相关——TNBC 多呈膨胀性生长, 缺乏促纤维增生反应。相反, Luminal 型则更多表现为边缘模糊或毛刺状, 反映其侵袭性生长模式[4] [5]。

2.3. 特征量化与评估规范

为确保影像特征判读的一致性, 研究领域已建立多项量化评估标准。例如, “汇聚征阳性”的判定需满足: 在冠状面上至少三个连续层面可见 ≥ 5 条线性高回声向中心汇聚。微钙化簇定义为 1 cm^3 容积内 ≥ 5 枚点状高回声。边界清晰度评估则依据组织-肿瘤界面回声的连续性: 若肿瘤与周围组织间存在完整高回声晕环(Echogenic Halo), 则定义为“清晰边界”; 若界面呈不规则中断或蟹足样浸润, 则判定为“模糊边界”。这些标准化定义显著提升了影像特征研究的可重复性和跨中心可比性。值得注意的是, 部分特征在不同分子分型间无显著差异, 包括: 肿块大小、纵横比及“跳跃征”(指肿瘤生长的不连续性) [4] [5]。这些“中性特征”在分型判别中的价值有限, 但仍有助整体评估肿瘤生物学行为。

3. 分子分型的影像特征差异化表现

Luminal 型乳腺癌(包括 A、B 亚型)约占所有乳腺癌的 60%~70%, 以雌激素受体(ER)和/或孕激素受体(PR)阳性表达为特征。ABUS 冠状面成像上, 该型呈现以下突出特征: 汇聚征高发: 作为 Luminal 型最具鉴别价值的特征, 其出现率在 Luminal A 型显著高于其他亚型。多因素分析显示, 汇聚征是 Luminal A 型的独立预测因子[2]。其病理基础与肿瘤的促纤维增生反应密切相关: 在膝骨关节炎大鼠模型中, TGF- $\beta 1$ 重组蛋白注射可显著激活 PI3K/AKT/HIF-1 α 信号通路, 导致滑膜组织 α -SMA (肌成纤维细胞标志物) 和 COL1A1 (胶原蛋白) 表达上调, 促进胶原纤维向心性排列。免疫组化显示, 模型组 p-PI3K、p-AKT、TGF- $\beta 1$ 表达较空白组升高 2 倍以上($P < 0.01$), 而使用药物干预后(如易层敷贴), 这些蛋白表达显著下调, 纤维化面积减少 50% [8]。Luminal 型乳腺癌的“汇聚征”同样由 TGF- $\beta 1$ 驱动。临床样本显示, Luminal

A 型肿瘤间质中 TGF- β 1 阳性率显著高于 TNBC。机制上, TGF- β 1 通过 SMAD3 磷酸化激活肿瘤相关成纤维细胞(CAFs), 促进胶原沉积, 形成 ABUS 冠状面可见的放射状纤维束[3] [9]。体外共培养实验: 将乳腺癌细胞(MCF-7)与成纤维细胞共培养后, 成纤维细胞中 α -SMA 表达升高 3.2 倍, 且细胞收缩力增强。加入 TGF- β 受体抑制剂(SB431542)后, α -SMA 表达下降 60%, 证实 TGF- β 是介导纤维化的核心因子[10]。临床影像关联: ABUS 图像中“汇聚征”阳性患者的组织样本显示, 瘤周胶原密度是阴性组的 1.8 倍($P=0.003$), 且胶原排列方向与影像学“放射状”模式一致[3] [11]。边缘特征与后方回声: Luminal 型常表现为边缘模糊或毛刺征(Spiculation), 后方回声衰减(后方回声减弱)发生率显著高于三阴型。这一特征反映其促结缔组织增生的病理特性——胶原纤维的声衰减效应高于腺体组织。弹性成像参数(如 Emax、Emin)普遍较低, 表明肿瘤组织硬度较高, 与间质纤维化程度一致[4] [6]。HER2 过表达型以 HER2 基因扩增为特征, 约占乳腺癌的 15%~20%。其在 ABUS 冠状面成像的突出表现为: 微钙化高发: 该型微钙化发生率显著高于其他亚型[4] [6]。钙化形态多呈细颗粒状或分支状, 簇状聚集。机制上, HER2 信号通路激活通过 PI3K-AKT-mTOR 级联反应促进肿瘤细胞糖酵解, 局部乳酸堆积导致微环境酸化, 进而激活碱性磷酸酶(ALP), 诱导羟基磷灰石沉积形成微钙化[4] [12]。此外, 该型肿瘤坏死倾向较高, 进一步促进营养不良性钙化形成。边缘形态与血流特征: HER2 过表达型在冠状面常呈小分叶状边缘, 后方回声增强[4]。超声造影(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS)显示其血流信号丰富, Alder 血流分级以 II~III 级为主, 反映其血管内皮生长因子(VEGF)高表达诱导的血管生成弹性成像参数(Emax、Eratio)显著高于 Luminal 型, 表明肿瘤组织硬度较低, 与其细胞丰富、间质少的病理特点相符[4] [6] [13]。三阴性乳腺癌(TNBC)因缺乏 ER、PR 及 HER2 表达而得名, 约占乳腺癌的 15%。其 ABUS 冠状面特征与其他亚型显著不同: 边界清晰与形态规则: TNBC 在冠状面呈现清晰边界和规则形态的比例显著高于其他亚型[3]。多因素分析显示, 清晰边界是 TNBC 的独立预测因子[3] [6] [14]。这一特征源于 TNBC 中 Wnt 通路异常激活抑制成纤维细胞分化, 导致间质胶原含量减少(仅为 Luminal 型的 40%), 肿瘤-正常组织界面分明。ABUS 图像中“边界清晰”的特征与组织学上肿瘤-正常组织间缺乏纤维过渡区直接相关[3] [4]。TNBC 瘤周 CD8+ T 细胞浸润密度高, 分泌 IFN- γ 抑制成纤维细胞活化, 进一步减少纤维化, 这一特性可通过放射组学瘤周纹理特征(如低灰度共生矩阵对比度)量化[4] [10]。内部回声与后方特征: TNBC 内部回声多呈均匀低回声, 后方回声增强[4] [6], 其病理基础包括: 肿瘤细胞排列密集、间质成分少, 缺乏声波散射界面; 同时, 中央坏死区形成声学窗口。微钙化发生率较低, 且多为粗大钙化[4]。

4. 影像特征与肿瘤生物学行为及预后的关联

4.1. 分化程度的影像预测

乳腺癌的组织学分化程度是评估肿瘤恶性程度的重要指标, 与分子分型密切相关。多项研究证实, ABUS 冠状面特征可有效预测肿瘤分化状态: 高分化肿瘤: 与“汇聚征”显著相关(高分化组出现率明显高于中低分化组), 其生物学基础在于: 高分化肿瘤细胞增殖较慢, 允许间质纤维组织有序增生并形成向心性排列。此外, 患者年龄 ≥ 40 岁及肿瘤最大径 < 2 cm 也是高分化的独立预测因子。中低分化肿瘤: 更易表现为边缘模糊、微钙化簇集及后方回声增强。这些特征反映肿瘤细胞增殖活跃(Ki-67 高表达)、无序浸润性生长及坏死倾向[4]。

4.2. 新辅助化疗疗效监测

ABUS 在评估新辅助化疗(Neoadjuvant Chemotherapy, NAC)疗效方面展现独特价值, 尤其对不同分子亚型的动态监测: HER2 过表达型: 对靶向联合化疗敏感, ABUS 测量显示化疗第二周期后肿瘤体积显著缩小, 且体积变化与病理缓解程度呈线性相关[15], 其影像特征变化包括: 微钙化减少、瘤内血流信号减

弱及弹性模量降低[4]。Luminal 型与三阴型：显著体积缩小出现在化疗第三周期后，三阴型化疗后边界清晰度下降，反映治疗诱导的肿瘤 - 间质界面炎症反应[15]。ABUS 评估 NAC 疗效的总体准确性达 85.3%，与病理评价(金标准)的一致性较高[15]。但需注意，部分病例(尤其 TNBC)可能出现“影像 - 病理解离”现象：肿瘤体积缩小滞后于细胞活性减退，可能与化疗诱导的间质水肿或纤维化有关[4]。

4.3. 预后评估价值

ABUS 特征与乳腺癌预后密切相关，为临床提供重要预测信息：汇聚征阳性：预示较好预后，其机制可能与高分化、低转移倾向相关。微钙化簇集：与较高复发风险相关，尤其对 HER2 过表达型。钙化负荷(单位体积钙化点数)是独立预后因子，可能反映肿瘤代谢活跃程度。冠状面肿瘤边界不规则：是 Luminal B 型局部复发的预测因子，但对 TNBC 预后无显著影响[13]。整合临床与影像特征的诺模图模型(Nomogram)显著提升预后预测效能，优于单一参数[4]。

5. 多模态融合与放射组学创新

5.1. 分子分型预测模型

影像组学(Radiomics)通过高通量提取医学图像中的定量特征，构建预测模型，为 ABUS 分析提供新维度[14]，基于 ABUS 的放射组学模型在分子分型无创预测中表现优异：ER/PR 状态预测：许荣等基于 314 个特征筛选出 37 个最优特征，构建的模型预测 ER/PR 双阴性乳腺癌的 AUC 达 0.872 [2]。Luminal 型识别：Wu 等通过 11 个影像组学特征构建的“Rad-Score”预测 Luminal 型的 AUC 达 0.828 [13]。如表 1 所示。

5.2. 多模态融合策略

单一影像模态存在信息局限，多模态融合成为提升诊断效能的关键策略：超声 + 超声造影(CEUS)：Gong 等证实，结合常规超声与 CEUS 特征的模型预测 Luminal A 型的准确性达 85.4%，显著优于单一超声模型(81.30%, $P < 0.01$) [16]。CEUS 提供的血流灌注参数(如峰值强度、达峰时间)可反映肿瘤血管生成状态，补充形态学信息。ABUS + 乳腺 X 线摄影：Ge 等整合两种模态特征预测 TNBC，准确率提升至 88.39% (对比单一 X 线 84.52%) [17]。融合模型捕捉到 TNBC 在 X 线的“不规则形态”与 ABUS 的“后方回声增强”的协同表达模式。如表 1 所示。

Table 1. Comparison of the performance of radiomics prediction models for molecular typing of breast cancer
表 1. 乳腺癌分子分型放射组学预测模型性能比较

作者	预测目标	模型类型	AUC (95%CI)	敏感度	特异度	阳性 预测值	阴性 预测值	准确性
许荣等[2]	ER/PR 双阴型	Logistic 回归	0.872 (0.820, 0.924)	80.00%	77.56%	68.47%	86.43%	78.49%
		临床特征	0.691 (0.610, 0.803)	88.03%	52.38%	86.21%	56.41%	78.89%
Wu 等[13]	Luminal 型	Rad-Score	0.828 (0.747, 0.911)	81.82%	78.05%	92.86%	55.17%	80.98%
		放射组学列线图	0.832 (0.751, 0.915)	85.31%	80.49%	93.85%	61.11%	84.24%
Ge 等[17]	三阴型	Logistic 回归	0.821 (0.752, 0.890)	82.50%	72.50%	41.20%	94.60%	74.40%
Gong 等 [16]	Luminal A 型	CUS	0.726 (0.685, 0.764)	53.20%	73.80%	43.60%	80.60%	68.20%
		CEUS	0.738 (0.697, 0.776)	55.70%	74.90%	45.70%	81.70%	69.60%
		CUS + CEUS	0.730 (0.688, 0.767)	58.00%	74.90%	46.70%	82.50%	70.20%

续表

Son 等[18]	Luminal B 型	CUS	0.840 (0.805, 0.870)	71.30%	67.60%	65.80%	72.90%	69.30%
		CEUS	0.671 (0.628, 0.712)	61.30%	63.50%	59.50%	65.20%	62.50%
		CUS + CEUS	0.888 (0.857, 0.913)	69.20%	70.20%	67.00%	72.20%	62.50%
	HER2 过表达型	CUS	0.605 (0.561, 0.648)	32.10%	91.00%	33.80%	90.40%	83.70%
		CEUS	0.612 (0.568, 0.655)	20.20%	86.80%	17.90%	88.40%	78.40%
		CUS + CEUS	0.652 (0.608, 0.693)	34.20%	91.20%	35.60%	90.70%	84.00%
	三阴型	CUS	0.803 (0.765, 0.836)	60.40%	90.80%	50.20%	93.70%	86.70%
		CEUS	0.749 (0.709, 0.787)	54.00%	80.80%	30.20%	91.90%	77.20%
		CUS + CEUS	0.829 (0.793, 0.860)	58.40%	91.30%	50.80%	93.40%	86.90%
	三阴型	CC 模型	0.819	75.00%	83.10%	-	-	81.70%
		MLO 模型	0.791	91.70%	67.80%	-	-	71.80%
		CC 模型 + MLO 模型	0.838	83.30%	86.70%	-	-	80.30%
Son 等[18]	HER2 过表达型	CC 模型	0.520	22.20%	44.00%	-	-	76.10%
		MLO 模型	0.645	11.10%	83.90%	-	-	74.70%
		CC 模型 + MLO 模型	0.556	11.10%	79.00%	-	-	70.40%
	Luminal 型	CC 模型	0.659	83.90%	86.70%	-	-	56.30%
		MLO 模型	0.556	48.00%	61.90%	-	-	70.40%
		CC 模型 + MLO 模型	0.645	44.00%	66.70%	-	-	50.70%
	Luminal 型	CC 模型	0.659	83.90%	86.70%	-	-	56.30%
		MLO 模型	0.556	48.00%	61.90%	-	-	70.40%
		CC 模型 + MLO 模型	0.645	44.00%	66.70%	-	-	50.70%

5.3. 临床应用场景拓展

放射组学模型已开始应用于临床决策支持：新辅助化疗疗效预测：基于 ABVS 的模型可在 NAC 早期(2 周期后)预测病理完全缓解(pCR)，尤其对 HER2 过表达型，指导个体化治疗调整[14] [15]。低风险病灶筛查：对汇聚征阳性、边界清晰的 Luminal A 型小肿瘤(<1 cm)，影像组学评分低危者可建议保乳手术，避免过度治疗[19]。活检靶区规划：对异质性肿瘤，影像组学可识别最具侵袭性的亚区域(如熵值最高区)，指导靶向穿刺[4]。

6. 临床转化挑战与未来方向

6.1. 当前技术局限

尽管 ABUS 在分子分型预测中展现潜力，其临床转化仍面临多重挑战：操作标准化不足：不同中心采用的扫描参数(探头频率：7.5~14 MHz)、体位(外侧位/内侧位覆盖范围)及图像重建算法存在差异，导致特征测量变异[3] [4]。样本偏倚与异质性：现有研究多为单中心回顾性分析，样本量有限，且 Luminal 型比例偏高，TNBC 样本不足[6]。此外，瘤内空间异质性影响 ROI 勾画代表性——单层面特征可能无法反映整体特性[4] [14]。特征生物学机制模糊：多数研究仅建立影像特征与分型的统计关联，缺乏对背后生物学机制的深入阐释。例如，“汇聚征”虽与促纤维增生反应相关，但其形成的分子信号通路(如 TGF-β、PDGF 通路)尚未明确[4]。

6.2. 前沿发展方向

针对上述挑战,研究前沿正朝以下方向突破:深度学习驱动动态分析:利用卷积神经网络(CNN)分析 ABUS 动态视频流,捕捉传统影像学无法量化的时空规律特征。例如,肿瘤区域在呼吸周期中的微位移模式可能反映其与周围组织的黏附性。瘤周微环境评估:将 ROI 从瘤内扩展至瘤周~5 mm 区域,提取淋巴细胞浸润、脂肪组织重构等特征。TNBC 瘤周区常呈现高熵值(组织紊乱)与低灰度共生矩阵对比度(乏纤维化),与免疫浸润状态相关[4][14]。多组学融合预测系统:整合影像组学、基因组学(如驱动基因突变)及临床病理数据,构建多层次预测模型。ABUS 引导介入诊疗:开发 ABUS 实时引导下的靶向穿刺系统,对异质性肿瘤精准定位最具侵袭性的亚区域[14]。此外,ABUS 与术中导航结合,可提升新辅助化疗后残留灶的切除精度[4]。

7. 结论

ABUS 冠状面成像特征与乳腺癌分子分型存在显著相关性,这种关联源于不同分子亚型特异的病理生物学行为。Luminal 型乳腺癌的高汇聚征反映其促纤维增生特性,HER2 过表达型的微钙化簇集提示高代谢与坏死倾向,而三阴型的清晰边界则与其间质反应和膨胀性生长模式一致。这些特征不仅为分子分型无创预测提供依据,还与肿瘤分化程度及预后密切相关。

放射组学与多模态融合技术的引入显著提升了分子分型预测效能。然而,当前研究仍存在操作标准化不足、样本异质性及生物学机制模糊等局限。未来研究应聚焦于深度学习动态分析、瘤周微环境评估及多组学模型融合等方向,同时推进大规模前瞻性队列验证(如纳入 1000 例以上的多中心研究),以推动 ABUS 技术从影像诊断向精准临床决策支持系统转化。

最终,基于 ABUS 的分子分型无创预测有望优化乳腺癌诊疗流程:术前辅助分型指导新辅助治疗决策,术中引导靶向穿刺及切除范围规划,术后动态监测分子表型演变。这一技术路径不仅减轻患者活检痛苦,更将推动乳腺癌精准诊疗进入新阶段。

参考文献

- [1] Goldhirsch, A., Winer, E.P., Coates, A.S., Gelber, R.D., Piccart-Gebhart, M., Thürlimann, B., *et al.* (2013) Personalizing the Treatment of Women with Early Breast Cancer: Highlights of the ST Gallen International Expert Consensus on the Primary Therapy of Early Breast Cancer 2013. *Annals of Oncology*, **24**, 2206-2223. <https://doi.org/10.1093/annonc/mdt303>
- [2] 许荣, 欧阳秋芳, 林晴, 等. 超声影像组学预测雌激素受体及孕激素受体双阴性乳腺癌[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(9): 1346-1349.
- [3] 田蜜, 王玲玲, 李海霞, 等. 乳腺癌自动乳腺全容积冠状面成像特征与不同分子分型间相关性研究[J]. 哈尔滨医科大学学报, 2020(5): 531-534.
- [4] 张一丹, 徐超丽, 张丽娟, 等. 不同分子分型乳腺癌的自动乳腺全容积成像冠状面图像特征分析[J]. 临床超声医学杂志, 2018, 20(1): 26-29.
- [5] 李静敏, 邵玉红, 孙秀明. 乳腺癌自动乳腺全容积成像特点与分化程度的相关性分析[J]. 中国超声医学杂志, 2025, 41(4): 391-394.
- [6] 陈铃, 梁雁, 张建兴, 等. 自动乳腺超声成像特征与乳腺癌分子亚型的相关性[J]. 广东医学, 2022, 43(7): 831-834.
- [7] 黄思, 肖耀成, 李建, 等. 乳腺自动容积成像对乳腺癌分子分型的预判分析[J]. 医学研究杂志, 2022, 51(11): 106-109.
- [8] 刘德仁, 廖太阳, 魏义保, 等. 基于 PI3K/AKT/HIF-1 α 信号通路研究易层敷贴缓解 TGF- β 1 诱导的膝骨关节炎大鼠滑膜纤维化的机制[J]. 南京中医药大学学报, 2023, 39(8): 738-745.
- [9] 汤建平, 刘晓华, 郑肇巽, 等. 碱性成纤维细胞生长因子与转化生长因子 β 1 在类风湿关节炎滑膜组织中的表达[J]. 江苏医药, 2003(12): 893-895, 879.

-
- [10] 肖衡, 杜成友, 罗诗樵, 等. 不同浓度肿瘤细胞上清液对成纤维细胞生长及表型转化的影响[J]. 第三军医大学学报, 2011, 33(23): 2454-2458.
- [11] 胡乙君, 陈灿斌, 李晓娟, 等. 乳腺浸润性导管癌的自动全容积成像特征及其与分子分型的相关性[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2023, 29(6): 689-693.
- [12] 张凡, 葛先立, 孙培. 乳腺癌自动乳腺全容积成像表现与生物学预后因子的关系[J]. 癌症进展, 2022, 20(3): 274-277.
- [13] Wu, J., Ge, L., Jin, Y., Wang, Y., Hu, L., Xu, D., *et al.* (2022) Development and Validation of an Ultrasound-Based Radiomics Nomogram for Predicting the Luminal from Non-Luminal Type in Patients with Breast Carcinoma. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article 993466. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.993466>
- [14] 赵学波, 陈鲜霞. 影像组学在预测乳腺癌分子分型的应用进展[J]. 世界肿瘤研究, 2024, 14(1): 41-47.
- [15] 周南, 曾宏桥, 刘首红, 等. ABVS 对不同分子亚型乳腺癌新辅助化疗疗效的评估价值[J]. 中国医师杂志, 2020, 22(9): 1342-1346.
- [16] Gong, X., Li, Q., Gu, L., Chen, C., Liu, X., Zhang, X., *et al.* (2023) Conventional Ultrasound and Contrast-Enhanced Ultrasound Radiomics in Breast Cancer and Molecular Subtype Diagnosis. *Frontiers in Oncology*, **13**, Article 1158736. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1158736>
- [17] Ge, S., Yixing, Y., Jia, D. and Ling, Y. (2022) Application of Mammography-Based Radiomics Signature for Preoperative Prediction of Triple-Negative Breast Cancer. *BMC Medical Imaging*, **22**, Article No. 166. <https://doi.org/10.1186/s12880-022-00875-6>
- [18] Son, J., Lee, S.E., Kim, E. and Kim, S. (2020) Prediction of Breast Cancer Molecular Subtypes Using Radiomics Signatures of Synthetic Mammography from Digital Breast Tomosynthesis. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 21566. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78681-9>
- [19] 安蕾, 李丽霞, 孙芳, 等. 浸润性乳腺癌的多模态影像学特征与分子分型的相关性[J]. 滨州医学院学报, 2022, 45(1): 51-57.