



· 论 著 ·

超微血流成像技术在乳腺BI-RADS 4类结节鉴别诊断中的应用及效能分析

胡道秀¹, 陈武¹, 曹静玮¹, 任家仪², 杨续瑞³, 李欣榕¹, 陈耀东²

1. 山西医科大学医学影像学院, 山西 太原 030001;

2. 山西医科大学第一医院超声影像科, 山西 太原 030001;

3. 山西省人民医院妇产科, 山西 太原 030001

[摘要] 目的: 探讨超微血流成像 (ultra-microangiography, UMA) 对乳腺影像报告和数据库系统 (Breast Imaging Reporting and Data System, BI-RADS) 4类乳腺结节的鉴别诊断价值。方法: 回顾并收集2023年1月—2024年2月在山西医科大学第一医院行常规二维超声、UMA检查的女性乳腺肿瘤患者。分析UMA血流像素比及血流特征在乳腺良恶性肿瘤之间的差异, 对差异有统计学意义且阳性预测值高的指标赋分, 根据赋分值制作受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线, 并选择最佳截断值调整乳腺良恶性肿瘤BI-RADS分级, 绘制调整前后ROC曲线, 研究UMA对BI-RADS 4类乳腺结节的鉴别诊断价值。结果: 共纳入101例乳腺肿瘤患者。cUMA、pUMA、sUMA血流像素比在良恶性肿瘤之间差异均无统计学意义 (Z 值分别为-0.194、-1.202、-1.117, P 值分别为0.846、0.229、0.264)。UMA血流特征中, 有无穿支血流 ($\chi^2=8.394$, $P=0.004$)、边缘血流走行是否扭曲 ($\chi^2=7.317$, $P=0.007$)、边缘血流分布 ($\chi^2=55.733$, $P<0.001$)、中央血流走行是否扭曲 ($\chi^2=4.178$, $P=0.041$)、中央是否有血流缺损 ($\chi^2=6.051$, $P=0.014$) 在乳腺良恶性肿瘤之间差异有统计学意义。当肿瘤有穿支血流、边缘血流走行扭曲、边缘血流分布为周边穿入性血流、放射状血流、中央血流走行扭曲、中央有血流缺损时赋1分, 曲线下面积 (area under curve, AUC) 为0.871, 95% CI 0.799~0.943。赋分后, BI-RADS 4类乳腺肿瘤AUC由0.741提高到0.825。结论: UMA能够提高BI-RADS 4类乳腺肿瘤良恶性的诊断准确度, 是诊断乳腺癌的有效血流检测手段。

[关键词] 乳腺肿瘤; 血管生成; 恶性肿瘤血管; 超微血流成像; 乳腺影像报告和数据库系统

中图分类号: R737.9; R445.1 文献标志码: A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2025.05.012

基金项目: 无。

利益冲突: 作者声明无利益冲突。

伦理批件: NO.KYLL-2024-034。

知情同意: 有。

引用本文: 胡道秀, 陈武, 曹静玮, 等. 超微血流成像技术在乳腺BI-RADS 4类结节鉴别诊断中的应用及效能分析 [J]. 肿瘤影像学, 2025, 34(5): 530-539.

Funding: no.

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: NO.KYLL-2024-034.

Informed consent: available.

Cite this article: HU D X, CHEN W, CAO J W, et al. Application and efficacy analysis of ultra-microangiography in the differential diagnosis of breast BI-RADS category 4 nodules [J]. Oncoradiology, 2025, 34(5): 530-539.

Application and efficacy analysis of ultra-microangiography in the differential diagnosis of breast BI-RADS category 4 nodules

HU Daoxiu¹, CHEN Wu¹, CAO Jingwei¹, REN Jiayi², YANG Xurui³, LI Xinrong¹, CHEN Yaodong² (1. Department of Medical Imaging, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China; 2. Department of Ultrasound Imaging, The First Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China; 3. Department of Gynecology and Obstetrics, Shanxi Provincial People's Hospital, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China)

Correspondence to: CHEN Yaodong E-mail: profchenyaodong@qq.com

[Abstract] **Objective:** To explore the diagnostic value of ultra-microangiography (UMA) for the classification of breast tumors categorized as Breast Imaging Reporting and Data System (BI-RADS) category 4. **Methods:** Data of female patients with breast tumors who underwent conventional two-dimensional ultrasound and UMA examinations at the First Hospital of Shanxi Medical

University from January 2023 to February 2024 were retrospectively reviewed and collected. The differences in UMA blood flow pixel ratios and blood flow characteristics between benign and malignant breast tumors were analyzed. Indicators with statistical significance and high positive predictive values were assigned scores. Based on these scores, receiver operating characteristic (ROC) curves were generated, and the optimal cutoff values were selected to adjust the BI-RADS grading for benign and malignant breast tumors. ROC curves before and after adjustment were plotted to investigate the differential diagnostic value of UMA for BI-RADS category 4 breast nodules. **Results:** A total of 101 breast patients were included. There were no statistically significant differences in the blood flow pixel ratios of cUMA, pUMA, and sUMA between benign and malignant tumors (Z -values were -0.194 , -1.202 , and -1.117 , respectively; P -values were 0.846 , 0.229 , and 0.264 , respectively). Among the UMA blood flow characteristics, the presence or absence of penetrating blood flow ($\chi^2=8.394$, $P=0.004$), whether the marginal blood flow course was distorted ($\chi^2=7.317$, $P=0.007$), the marginal blood flow distribution ($\chi^2=55.733$, $P<0.001$), whether the central blood flow course was distorted ($\chi^2=4.178$, $P=0.041$), and the presence or absence of central blood flow defects ($\chi^2=6.051$, $P=0.014$) showed statistically significant differences between benign and malignant breast tumors. One point was assigned when the tumor had penetrating blood flow, distorted marginal blood flow course, marginal blood flow distribution characterized by peripheral penetrating blood flow or radial blood flow, distorted central blood flow course, or central blood flow defects. The area under the curve (AUC) was 0.871 , with a 95% CI of 0.799 to 0.943 . After scoring, the AUC for BI-RADS category 4 breast tumors increased from 0.741 to 0.825 . **Conclusion:** UMA can improve the diagnostic accuracy of benign and malignant BI-RADS 4 breast tumors and serve as an effective blood flow imaging modality for the diagnosis of breast cancer.

[**Key words**] Breast tumor; Angiogenesis; Malignant tumor vessel; Ultra-microangiography; Breast Imaging Reporting and Data System

乳腺癌是女性发病率和死亡率极高的恶性肿瘤，严重威胁女性健康^[1-2]。肿瘤血管生成是恶性肿瘤进展的关键环节。肿瘤体积超过临界大小（ $1\sim 2\text{ mm}^3$ ）时， O_2 达到扩散极限（ $100\sim 150\ \mu\text{m}$ ），肿瘤细胞在缺氧等微环境信号的刺激下释放出多种促血管生成因子，作用于所在组织的正常微血管网，通过诱导血管内皮细胞“芽生”等方式形成肿瘤血管网，为肿瘤恶性增殖提供所需的氧气及营养物质，同时为恶性肿瘤细胞的血行转移提供了路径^[3-6]。

恶性肿瘤细胞因分化程度低、增殖率与代谢率高、有效调控机制缺失，促使肿瘤血管以一种快速、无序的方式生长，其在形态结构、密度、分布以及血流动力学上与正常组织及良性肿瘤血管具有显著差异。在形态上，肿瘤血管呈不规则蛇形生长；血管系统高度分支化，常出现三叉分支、自体环结构、密集的毛细血管网及静脉回旋等复杂形态^[7-9]。在血管密度方面，血管生成调控机制缺失推动恶性肿瘤血管内皮生长因子高表达^[3]，导致微血管密度增加。在分布上，邻近正常血管的肿瘤区域，微血管尤为密集^[5]；乳腺恶性肿瘤外周区微血管密度显著高于中央区^[10]；肿瘤边缘常可见到粗大、呈放射状延伸的血管，这些动脉与静脉负责向新生血管区域供给血液并引流^[11]；在某些肿瘤中，供血小动

脉能够深入肿瘤核心，并从中心向外分支，形成供应毛细血管的小动脉网络^[7]。在血流动力学方面，异常细胞外基质及升高的基质刚度、内间质液体压力、固体应力等使肿瘤内压力升高^[12]，且肿瘤细胞分化程度低，血管形态异常，这些原因共同导致肿瘤血管血流阻力指数上升。这些特征为影像学检查基于肿瘤血管状态开展良恶性的鉴别诊断提供了依据^[13]。

目前，主要采用彩色多普勒血流成像（color Doppler flow imaging, CDFI）检查乳腺肿瘤血流情况，然而肿瘤微血管管腔纤细、血流速度缓慢，与组织运动速度相近，两者在频率域上几乎重叠，CDFI难以对其进行有效区分，其诊断学意义多存在争议^[14]。超声造影（contrast-enhanced ultrasound, CEUS）能够显示微血管灌注情况，但其属于有创检查，具有适应证和禁忌证的限制，且其在诊断中的应用受造影剂谐振、组织背景增强后难以持续观察微血管等因素的影响，目前并无成熟标准^[15-16]。因此，亟需开发一种简单快速的微血流成像技术。

超微血流成像（ultra-microangiography, UMA）技术是一种全新的超声微血管实时显像技术。其充分利用波束合成处理能力，采用平面波和发散波等非聚焦波成像技术进行原始血流信号采集，可获得更高的采样频率，对血流形态的

显示更为连续。并采用新型的自适应时空壁滤波算法, 通过组织和血流信号的不同时空特性将其区分开来, 以识别低速运动的血流^[17-19]。

UMA技术极大地提升了血流检测的灵敏度和空间分辨力, 其提供了3种不同的血流显示方式:

① cUMA, 显示血流速度和方向信息; ② pUMA, 显示血流能量和方向信息; ③ sUMA, 显示血流能量信息, 背景组织图像强度被抑制。本研究旨在探讨UMA及其联合乳腺影像报告和数据系统 (Breast Imaging Reporting and Data System, BI-RADS) 分级对乳腺良恶性肿瘤的鉴别诊断价值。

1 资料和方法

1.1 研究对象

回顾并分析2023年1月—2024年2月在山西医科大学第一医院超声影像科就诊的女性乳腺肿瘤患者。纳入标准: 行常规二维超声、UMA检查且具有病理学检查结果的患者。排除标准: 妊娠及哺乳期患者; 患有其他恶性肿瘤或其他严重疾病的患者; 已行新辅助化疗及内分泌治疗的患者。本研究已获得山西医科大学第一医院伦理审查委员会的批准, 批件号为NO.KYLL-2024-034。

1.2 超声检查

常规二维超声及UMA检查均采用深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司的Nuewa R9 Pro超声诊断仪, 配备L15-3WU探头。患者取仰卧位, 平静呼吸, 双上肢上举, 充分暴露乳腺; 调节仪器参数达到理想状态; 观察病灶位置, 采用二维成像技术在病灶最大切面及其垂直切面进行成像并记录结节大小、二维超声特征。随后, 启动UMA (包括cUMA、pUMA、sUMA), 调节血流速度和增益, 观察结节血流成像特征, 留存UMA图像。

1.3 图像分析及评估指标

常规二维超声图像分析由2名超声科主治医师依据BI-RADS分级标准, 讨论一致确定结节分类 (3、4A、4B、4C、5), 当出现分歧时由第3

名高年资超声科主任医师分析判定。

UMA图像分析: ① 血流像素比, 选择血流最丰富的切面, 使用超声诊断仪内置分析软件, 分别在cUMA、pUMA、sUMA图像上手动勾画结节区域作为感兴趣区, 获得该病灶的血流像素比。② 穿支血流, 记录UMA探及的穿支血流, 穿支血流为由肿瘤边缘伸向肿瘤中央的血流, 见图1。③ 边缘血流, 分析乳腺结节是否有边缘血流; 若有边缘血流则进一步观察边缘血流是否扭曲 (有/无)、边缘血流分布 (周边穿入性血流/放射状血流/球型血流/点条状血流), 见图2。④ 中央血流, 分析乳腺结节是否有中央血流; 若有中央血流则进一步观察中央血流是否扭曲 (有/无)、中央血流分布 (点条状血流/网状血流/分支状血流)、中央血流是否有缺损 (有/无), 见图2。

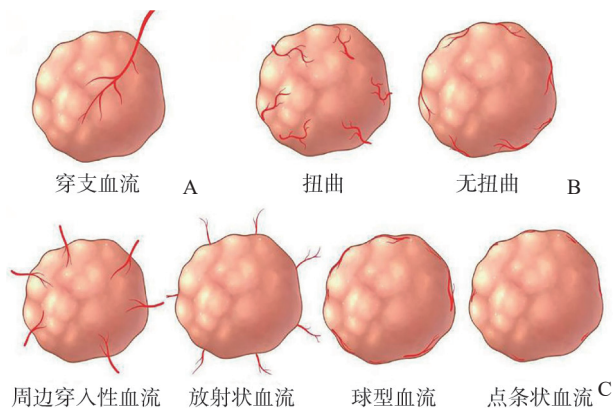


图1 穿支血流及边缘血流

Fig.1 Perforator blood flow and marginal blood flow

A: 穿支血流; B: 边缘血流是否扭曲; C: 边缘血流分布。

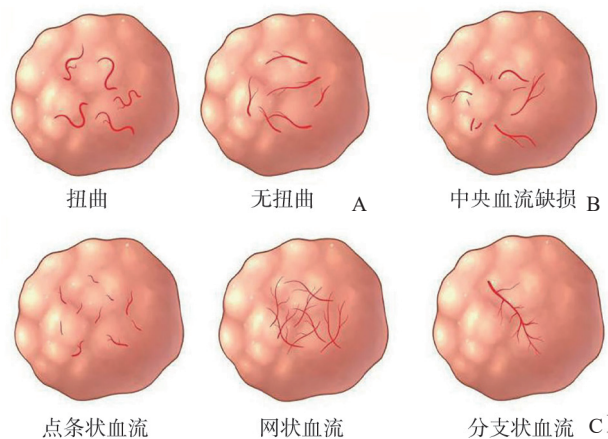


图2 中央血流

Fig.2 Central blood flow

A: 中央血流是否扭曲; B: 中央血流缺损; C: 中央血流分布。

1.4 血流特征赋分标准

根据各UMA血流特征差异是否有统计学意义及诊断乳腺恶性肿瘤的阳性预测值赋分：①当血流特征在良恶性肿瘤之间差异无统计学意义时，赋0分；②当血流特征在良恶性肿瘤之间差异有统计学意义，但阳性预测值<80%时，赋0分；③当血流特征在良恶性肿瘤之间差异有统计学意义，且阳性预测值≥80%时，赋1分。

1.5 血流特征诊断价值分析

计算各结节UMA图像总赋分值，绘制受试者工作特征（receiver operating characteristic, ROC）曲线，以约登指数最大截断点作为最佳截断值，若结节总赋分值大于等于最佳截断值，提高该结节的BI-RADS分类，例如3类升为4A类，最高不超过5类。

1.6 病理学诊断

所有手术切除或穿刺的乳腺病变组织由2名病理科主治医师作出病理学诊断，依据世界卫生

组织第五版乳腺肿瘤分类标准确定病变病理学类型。

1.7 统计学处理

采用SPSS 27.0统计学软件进行数据分析，计量资料首先采用Shapiro-Wilk检验进行正态分布检验，不符合正态分布则采用非参数检验；计数资料以n（%）描述，采用χ²检验或Fisher精确概率检验。绘制ROC曲线，分析UMA血流特征诊断乳腺良恶性病变的准确度，并对比BI-RADS分类单一诊断及联合评分法诊断乳腺BI-RADS 4类结节良恶性的诊断效能，P<0.05为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 一般资料

本研究共纳入101例女性乳腺肿瘤患者，年龄19~77岁，平均年龄（48±13）岁（图3）。

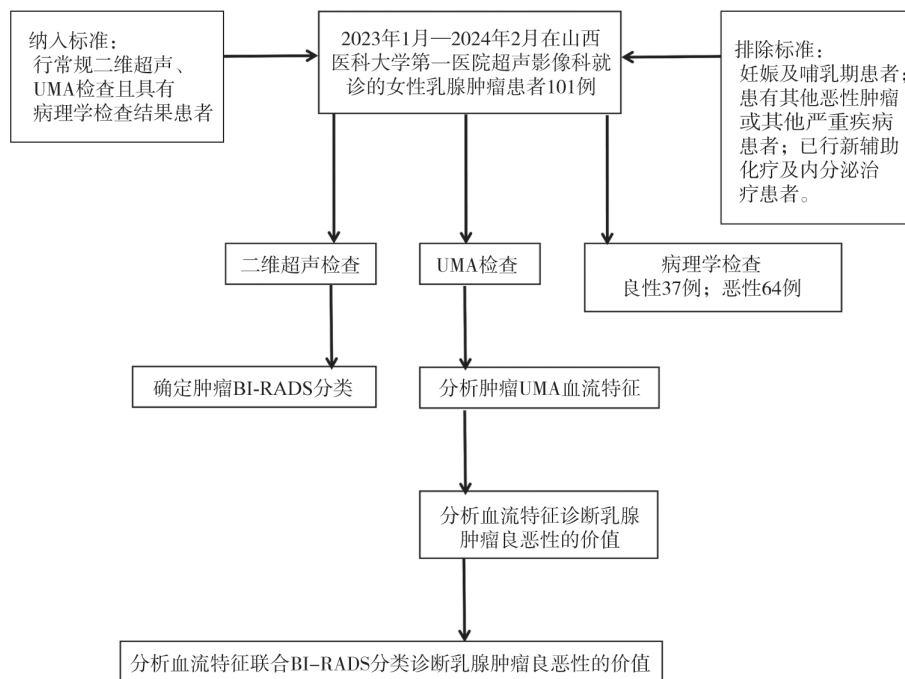


图3 研究设计流程图

Fig.3 Research design flow chart

2.2 乳腺肿瘤的病理学检查结果

本研究共纳入101例女性乳腺肿瘤患者（共101个病灶）。其中，良性乳腺肿瘤37例，恶性

乳腺肿瘤64例。良性肿瘤中乳腺纤维腺瘤11例，乳腺增生症8例，导管内乳头状瘤2例，良性叶状肿瘤2例，乳腺增生症伴纤维腺瘤12例，乳腺增

生症伴导管内乳头状瘤1例, 纤维腺瘤伴导管内乳头状瘤1例。恶性肿瘤中浸润性导管癌34例, 导管原位癌3例, 浸润性小叶癌3例, 浸润性导管癌伴导管原位癌23例, 浸润性导管癌伴浸润性微乳头状瘤1例。

2.3 乳腺良恶性肿瘤UMA血流像素比

乳腺良恶性肿瘤UMA血流像素比见表1。cUMA、pUMA、sUMA血流像素比在良恶性肿瘤之间差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。

表1 乳腺良恶性肿瘤UMA血流像素比

Tab.1 UMA blood flow pixel ratio in benign and malignant breast tumors

UMA	n (%)	血流像素比 $M (P_{25}, P_{75})$	Z值	P值
cUMA			-0.194	0.846
良性	37 (36.6)	13.58 (6.63, 23.00)		
恶性	64 (63.4)	12.35 (7.99, 19.38)		
pUMA			-1.202	0.229
良性	37 (36.6)	10.53 (5.47, 18.09)		
恶性	64 (63.4)	12.39 (8.34, 18.56)		
sUMA			-1.117	0.264
良性	37 (36.6)	11.72 (6.96, 23.13)		
恶性	64 (63.4)	15.28 (10.18, 22.54)		

2.4 乳腺良恶性肿瘤UMA穿支血流及边缘血流特征

乳腺良恶性肿瘤UMA穿支血流及边缘血流特征见表2。有无穿支血流在良恶性之间差异有统计学意义 ($P=0.004$)；是否有边缘血流差异无统计学意义 ($P=0.780$)；在100例有边缘血流的结节中, 边缘血流是否扭曲差异有统计学意义 ($P=0.007$)；从边缘血流分布来看, 良性结节多为球型血流及点条状血流, 恶性结节多为周边穿入性血流, 良恶性之间差异有统计学意义

($P<0.001$)。

2.5 乳腺良恶性肿瘤UMA中央血流特征

乳腺良恶性肿瘤UMA中央血流特征见表3。101例肿瘤中, 是否有中央血流差异无统计学意义 ($P=0.983$)；在82例有中央血流的结节中, 中央血流是否扭曲差异有统计学意义 ($P=0.041$)；从血流分布来看, 中央血流的分布差异无统计学意义 ($P=0.069$)；中央血流有无缺损在良恶性之间差异有统计学意义 ($P=0.014$)。图4、5为典型病例图像。

表2 乳腺良恶性肿瘤UMA穿支血流及边缘血流特征

Tab.2 Characteristics of UMA perforator and marginal blood flow in benign and malignant breast tumors

UMA特征	总数	良性	恶性	χ^2 值	P值
有无穿支血流				8.394	0.004
有	21 (20.8)	2 (2.0)	19 (18.8)		
无	80 (79.2)	35 (34.7)	45 (44.6)		
边缘有无血流				—	0.366
有	100 (99.0)	36 (35.6)	64 (63.4)		
无	1 (1.0)	1 (0.1)	0 (0)		
边缘血流走行				7.317	0.007
扭曲	16 (16.0)	1 (1.0)	15 (15.0)		
无扭曲	84 (84.0)	35 (35.0)	49 (49.0)		
边缘血流分布				55.733	<0.001
周边穿入性血流	55 (55.0)	4 (4.0)	51 (51.0)		
放射状血流	4 (4.0)	0 (0)	4 (4.0)		
球型血流	26 (26.0)	21 (21.0)	5 (5.0)		
点条状血流	15 (15.0)	11 (11.0)	4 (4.0)		

表3 乳腺良性肿瘤中央血流特征

Tab.3 Characteristics of central blood flow in benign and malignant breast tumors

UMA特征	总数	良性	恶性	χ^2 值	<i>P</i> 值
中央有无血流				0.000	0.983
有	82 (81.2)	30 (29.7)	52 (51.5)		
无	19 (18.8)	7 (6.9)	12 (11.9)		
中央血流走行				4.178	0.041
扭曲	13 (15.9)	1 (1.2)	12 (14.6)		
无扭曲	69 (84.1)	29 (35.4)	40 (48.8)		
中央血流分布				5.342	0.069
点条状血流	36 (43.9)	16 (19.5)	20 (24.4)		
网状血流	26 (31.7)	11 (13.4)	15 (18.3)		
分支状血流	20 (24.4)	3 (3.7)	17 (20.7)		
中央血流缺损				6.051	0.014
有缺损	21 (25.6)	3 (3.7)	18 (22.0)		
无缺损	61 (74.4)	27 (32.9)	34 (41.5)		

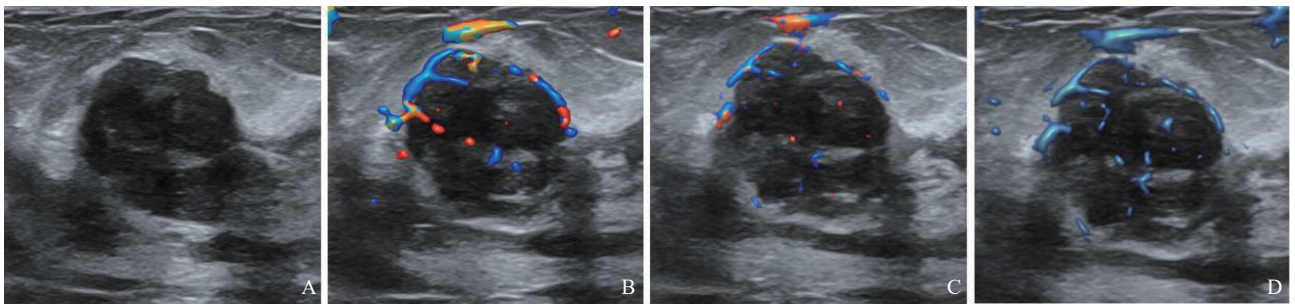


图4 典型病例1 (患者, 女性, 20岁, 乳腺纤维腺瘤) 的常规二维超声及UMA图像

Fig.4 Conventional two-dimensional ultrasound and UMA images of typical case 1 (female patient, 20 years old, breast fibroadenoma)

A: 常规二维超声; B: cUMA; C: pUMA; D: sUMA; UMA图像显示边缘血流呈球型分布, 边缘及中央血流均无扭曲。

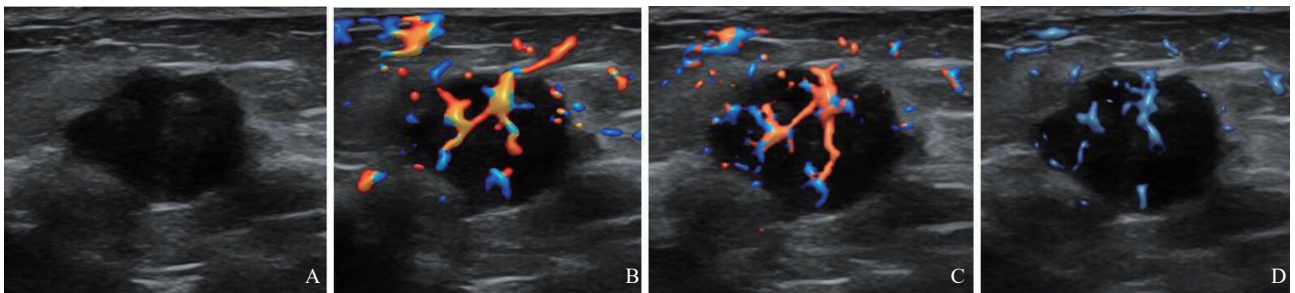


图5 典型病例2 (患者, 女性, 55岁, 浸润性导管癌) 的常规二维超声及UMA图像

Fig.5 Conventional two-dimensional ultrasound and UMA images of typical case 2 (female patient, 55 years old, invasive ductal carcinoma)

A: 常规二维超声; B: cUMA; C: pUMA; D: sUMA; UMA图像显示穿支血流, 边缘及中央血流扭曲。

2.6 乳腺良性肿瘤血流特征的诊断价值

以阳性预测值 $\geq 80\%$ 为诊断乳腺恶性病变的敏感特征, 结合良恶性肿瘤之间差异是否有统计学意义为各UMA血流特征赋分。阳性预测值及赋分见表4。有穿支血流、边缘血流走行扭曲、

边缘血流分布为周边穿入性血流、放射状血流、中央血流走行扭曲、中央有血流缺损诊断乳腺恶性病变的阳性预测值均大于80%, 当乳腺结节有这些特征时可赋1分。

表4 乳腺良恶性肿瘤血流特征诊断乳腺恶性病变的阳性预测值及

赋分

Tab.4 Positive predictive value and scoring of blood flow characteristics in differentiating malignant from benign breast tumors

UMA特征	阳性预测值/%	赋分
有无穿支血流		
有	90.5	1
无	56.3	0
边缘有无血流		
有	64.0	0
无	0	0
边缘血流走行		
扭曲	93.8	1
无扭曲	58.3	0
边缘血流分布		
周边穿入性血流	92.7	1
放射状血流	100.0	1
球型血流	19.2	0
点条状血流	26.7	0
中央有无血流		
有	63.4	0
无	63.2	0
中央血流走行		
扭曲	92.3	1
无扭曲	58.0	0
中央血流分布		
点条状血流	55.6	0
网状血流	57.7	0
分支状血流	85.0	0
中央血流缺损		
有缺损	85.7	1
无缺损	55.7	0

乳腺良恶性肿瘤UMA血流特征分值分布见图6。乳腺肿瘤赋分总分为0~5分, 恶性率随分值增加而增加。

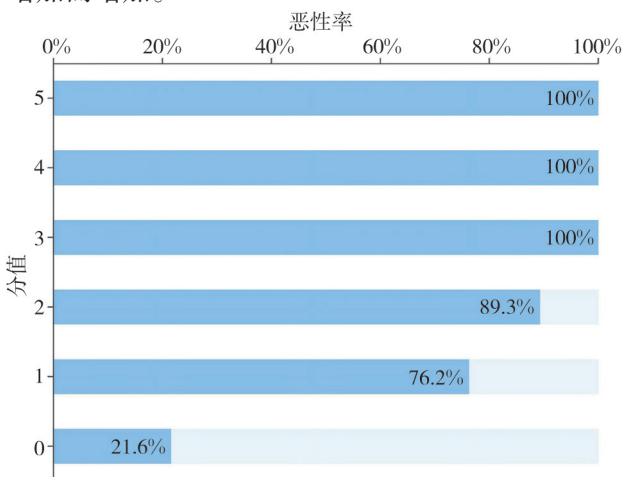


图6 乳腺良恶性肿瘤UMA血流特征分值分布图

Fig.6 Score distribution of UMA blood flow features in benign vs malignant breast tumors

根据血流特征分值制作ROC曲线(图7), 曲线下面积(area under curve, AUC)为0.871, 95% CI为0.799~0.943。以约登指数最大截断点作为最佳截断值, 即1分, 当乳腺肿瘤赋分总分大于等于1分时, 提高结节的BI-RADS分类。赋分前后乳腺良恶性结节BI-RADS分级见图8。

根据赋分前后BI-RADS 4类乳腺肿瘤绘制ROC曲线, 赋分前AUC为0.741, 赋分后为0.825。如图9所示。

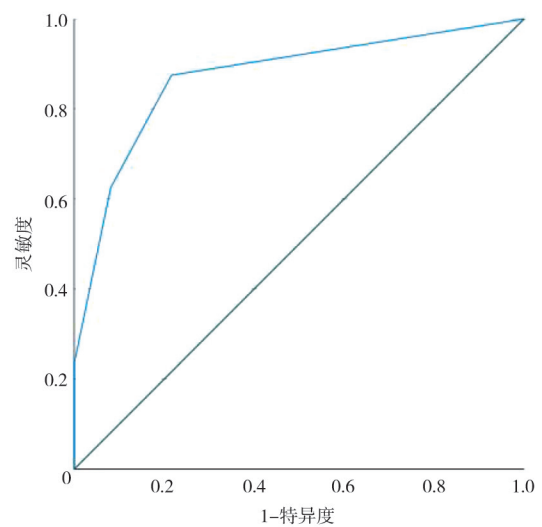


图7 乳腺良恶性肿瘤UMA血流特征分值ROC曲线

Fig.7 ROC curve of UMA blood flow feature scores for malignancy discrimination

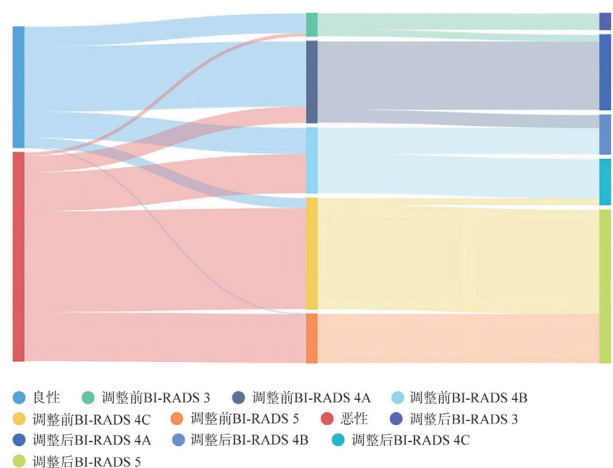


图8 赋分前后乳腺良恶性肿瘤BI-RADS分级桑基图

Fig.8 Sankey diagram of BI-RADS classification before and after vascular scoring

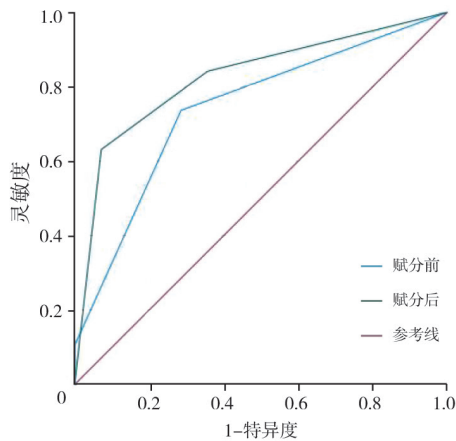


图9 赋分前后BI-RADS 4类乳腺肿瘤ROC曲线

Fig.9 ROC curves of BI-RADS category 4 tumors before and after score integration

3 讨 论

乳腺恶性肿瘤血管因生成机制等的差异在形态结构、密度、分布等方面都与正常血管及良性肿瘤血管有所不同。血管特征差异为影像学诊断乳腺恶性肿瘤提供了鉴别依据。

穿支血流是一种特殊的血流类型，其检出率不高，但对乳腺癌具有较高的诊断价值^[20]。在本研究中，有无穿支血流在良恶性之间差异有统计学意义 ($P=0.004$)，其阳性预测值为90.5%。Lee等^[21]关于彩色和功率多普勒成像的研究同样发现，穿支血流在乳腺良恶性病变之间的差异有统计学意义，有无穿支血流的恶性比为5.4 ($P<0.01$)。

Chae等^[22]的研究认为，乳腺恶性肿块血流指数明显高于良性病变。本研究结果显示，UMA血流像素比在良恶性肿瘤间差异无统计学意义。因此本研究认为血流密度并不能作为乳腺肿瘤良恶性的诊断标准。Lee等^[23]发现，乳腺纤维腺瘤和乳腺癌CEUS均可表现为高增强，因此推断在超声图像上，良恶性肿瘤血流密度不具有明显差异。但纤维腺瘤常表现为均匀高增强，乳腺癌常伴有灌注缺损。本研究结果同样显示中央血流缺损在良恶性肿瘤间差异有统计学意义 ($P=0.014$)。这可能是由于恶性肿瘤营养供应

及代谢物清除能力相对不足，其内部易出现缺血坏死^[24]。

乳腺良性肿瘤血供需求低，血流分布多与瘤体边缘平行，而恶性肿瘤生长迅速，由周边向内部放射状生长可以使血流最快速地为其提供养分^[25]。本研究中边缘血流及中央血流走行是否扭曲差异均有统计学意义。从边缘血流分布来看，良性肿瘤多为球型血流及点条状血流，恶性肿瘤多为周边穿入性血流，良恶性之间差异有统计学意义 ($P<0.001$)，但中央血流的分布差异无统计学意义 ($P=0.069$)。Weng等^[26]的研究发现，CEUS增强范围扩大在乳腺良恶性肿瘤之间差异有统计学意义，且由肿瘤周边进入内部的向心增强模式在恶性肿瘤中更为常见，据此推测乳腺恶性肿瘤边缘存在穿入性血流。

为综合评估UMA的诊断价值，本研究选择敏感特征赋分，总分越高，恶性率越高，AUC为0.871，说明UMA血流特征是评估乳腺肿瘤良恶性优良的参考指标。目前，超声科医师主要根据乳腺癌二维超声特征来确定结节BI-RADS分类，缺乏血流特征的支持。4类肿瘤良恶性跨度大，其分类常不准确^[27]，血流指标的补充可以提高其诊断准确度。本研究根据最佳截断值调整BI-RADS分类，调整前后4类乳腺肿瘤AUC由0.741提高到0.825，这表明UMA能够提高4类肿瘤良恶性的诊断准确度。

传统CDFI依赖壁滤波器消除运动伪影，但会同时滤除低速血流信号，其微血流显示能力较低。马燕等^[28]的研究显示，CDFI诊断乳腺良恶性肿瘤的AUC为0.669，这表明UMA单一诊断模式及UMA联合BI-RADS诊断模式对乳腺肿瘤的诊断效能均高于CDFI。与CEUS相比，UMA无需注射造影剂即可实现微血流成像，且CEUS的特征性表现如高增强、灌注缺损、周边放射状血流、穿支血流等在UMA上均有良好表现^[29]。邓芸霞等^[30]关于CEUS优化乳腺BI-RADS 4类结节诊断效能研究显示，其定量参数及定性特征联合诊断乳腺癌的AUC为0.894，UMA与其诊断效果相当。

综上所述, 捕捉UMA血流特征可显著提高了BI-RADS 4类乳腺肿瘤的良好鉴别能力, UMA可作为一种新的、有效的血流检测手段用于乳腺疾病的诊断。

本研究的局限性: 未设置合理的BI-RADS降级标准, 且样本量不足, 未能分别对4A、4B、4C类肿瘤进行分析。UMA是一种良好的血流检测手段, 然而其存在一定的局限性。UMA技术采用高频探头, 深部血流显示欠佳, 对于肥胖患者, UMA是否能有效地评估乳腺肿瘤血流需要进一步研究。且UMA技术需要操作者更精细地调整仪器参数, 如增益、滤波设置, 这些参数会影响UMA血流像素比等血流特征, 尤其对血流的定量分析更为困难。这些问题仍有待于今后努力解决。

第一作者:

胡道秀 (ORCID: 0009-0008-9545-756X), 硕士研究生。

通信作者:

陈耀东 (ORCID: 0000-0001-9431-2379), 博士, 副教授,
E-mail: profchenyaodong@qq.com。

作者贡献声明:

胡道秀: 提出研究目标, 设计研究思路, 图像采集, 数据收集, 撰写论文; 陈武: 文章的质量控制与审查; 曹静玮: 图像采集, 数据收集, 数据整理; 任家仪: 研究对象的选择, 图像采集, 数据收集; 杨续瑞、李欣榕: 统计学处理, 绘制图、表; 陈耀东: 最终版本修订, 对文章整体负责, 监督管理。

[参 考 文 献]

- [1] SUNG H, FERLAY J, SIEGEL R L, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(3): 209–249.
- [2] 曹梦迪, 陈万青. GLOBOCAN 2022全球癌症统计数据解读 [J]. *中国医学前沿杂志 (电子版)*, 2024, 16(6): 1–5.
CAO M D, CHEN W Q. Interpretation on the global cancer statistics of GLOBOCAN 2022 [J]. *Chin J Front Med Sci Electron Version*, 2024, 16(6): 1–5.
- [3] ELAYAT G, SELIM A. Angiogenesis in breast cancer: insights and innovations [J]. *Clin Exp Med*, 2024, 24(1): 178.
- [4] DE HEER E C, JALVING M, HARRIS A L. HIFs, angiogenesis, and metabolism: elusive enemies in breast cancer [J]. *J Clin Invest*, 2020, 130(10): 5074–5087.
- [5] DUDLEY A C, GRIFFIOEN A W. Pathological angiogenesis: mechanisms and therapeutic strategies [J]. *Angiogenesis*, 2023, 26(3): 313–347.
- [6] BIELENBERG D R, ZETTER B R. The contribution of angiogenesis to the process of metastasis [J]. *Cancer J*, 2015, 21(4): 267–273.
- [7] LESS J R, SKALAK T C, SEVICK E M, et al. Microvascular architecture in a mammary carcinoma: branching patterns and vessel dimensions [J]. *Cancer Res*, 1991, 51(1): 265–273.
- [8] PARK A Y, SEO B K, WOO O H, et al. The utility of ultrasound superb microvascular imaging for evaluation of breast tumour vascularity: comparison with colour and power Doppler imaging regarding diagnostic performance [J]. *Clin Radiol*, 2018, 73(3): 304–311.
- [9] LUO R, ZHANG Y, JIANG W, et al. Value of micro-flow imaging and high-definition micro-flow imaging in differentiating malignant and benign breast lesions [J]. *Clin Radiol*, 2024, 79(1): e48–e56.
- [10] LENG X L, HUANG G F, MA F C, et al. Regional contrast-enhanced ultrasonography (CEUS) characteristics of breast cancer and correlation with microvessel density (MVD) [J]. *Med Sci Monit*, 2017, 23: 3428–3436.
- [11] NAGY J A, CHANG S H, SHIH S C, et al. Heterogeneity of the tumor vasculature [J]. *Semin Thromb Hemost*, 2010, 36(3): 321–331.
- [12] 郭卉, 贺昱昇, 刘梦洁, 等. 肿瘤力医学 [J]. *中华肿瘤杂志*, 2024, 46(6): 536–548.
GUO H, HE Y S, LIU M J, et al. Tumor mechanomedicine [J]. *Chin J Oncol*, 2024, 46(6): 536–548.
- [13] DELORME S, KNOPP M V. Non-invasive vascular imaging: assessing tumour vascularity [J]. *Eur Radiol*, 1998, 8(4): 517–527.
- [14] 刘月霞, 姜伟. 超声诊断乳腺癌的研究进展 [J]. *现代医学影像学*, 2020, 29(3): 453–457.
LIU Y X, JIANG W. Advances in ultrasound diagnosis of breast cancer [J]. *Mod Med Imageology*, 2020, 29(3): 453–457.
- [15] LI Q, HU M, CHEN Z K, et al. Meta-analysis: Contrast-enhanced ultrasound versus conventional ultrasound for differentiation of benign and malignant breast lesions [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2018, 44(5): 919–929.
- [16] 中国抗癌协会乳腺癌专业委员会, 中华医学会肿瘤学分会乳腺肿瘤学组. 中国抗癌协会乳腺癌诊治指南与规范 (2024年版) [J]. *中国癌症杂志*, 2023, 33(12): 1092–1187.
The Society of Breast Cancer China AntiCancer Association, Breast Oncology Group of the Oncology Branch of the Chinese Medical Association. Guidelines for breast cancer diagnosis and treatment by China Anti-cancer Association (2024 edition) [J]. *China Oncol*, 2023, 33(12): 1092–1187.
- [17] ZHAO C Y, WANG Q, WANG M, et al. Ultra-microangiography in evaluating the disease activity of rheumatoid arthritis and enhancing the efficacy of ultrasonography: a preliminary study [J]. *Eur J Radiol*, 2021, 137: 109567.
- [18] XU Z K, LI R M, XIA B, et al. Combination of ultra-micro angiography and sound touch elastography for diagnosis of primary Sjögren's syndrome: a diagnostic test [J]. *Quant*

- Imaging Med Surg, 2023, 13(10): 7170–7179.
- [19] CHEN C, LIU S R, ZHAO C Y, et al. Activity of keloids evaluated by multimodal photoacoustic/ultrasonic imaging system [J] . Photoacoustics, 2021, 24: 100302.
- [20] PARK A Y, HAN M R, PARK K H, et al. Radiogenomic analysis of breast cancer by using B-mode and vascular US and RNA sequencing [J] . Radiology, 2020, 295(1): 24–34.
- [21] LEE S W, CHOI H Y, BAEK S Y, et al. Role of color and power Doppler imaging in differentiating between malignant and benign solid breast masses [J] . J Clin Ultrasound, 2002, 30(8): 459–464.
- [22] CHAE E Y, YOON G Y, CHA J H, et al. Added value of the vascular index on superb microvascular imaging for the evaluation of breast masses: comparison with grayscale ultrasound [J] . J Ultrasound Med, 2021, 40(4): 715–723.
- [23] LEE S C, TCHELEPI H, KHADEM N, et al. Imaging of benign and malignant breast lesions using contrast-enhanced ultrasound: a pictorial essay [J] . Ultrasound Q, 2022, 38(1): 2–12.
- [24] ARNER E N, RATHMELL J C. Metabolic programming and immune suppression in the tumor microenvironment [J] . Cancer Cell, 2023, 41(3): 421–433.
- [25] LUO R L, WANG Q Y, ZHANG Y, et al. Value of contrast-enhanced microflow imaging in diagnosis of breast masses in comparison with contrast-enhanced ultrasound [J] . Acad Radiol, 2024, 31(6): 2217–2227.
- [26] WENG H F, ZHAO Y N, XU Y Y, et al. A diagnostic model for breast lesions with enlarged enhancement extent on contrast-enhanced ultrasound improves malignancy prediction [J] . Ultrasound Med Biol, 2023, 49(7): 1535–1543.
- [27] ZHANG R Z, WEI W, LI R, et al. An MRI-based radiomics model for predicting the benignity and malignancy of BI-RADS 4 breast lesions [J] . Front Oncol, 2022, 11: 733260.
- [28] 马燕, 郭嵩, 李晶, 等. 超微血管成像技术联合超声BI-RADS分级在鉴别乳腺良恶性肿瘤中应用价值 [J] . 中国临床医学影像杂志, 2016, 27(1): 10–13.
MA Y, GUO S, LI J, et al. The combination of superb microvascular imaging and BI-RADS indistinguishing breast benign lesions from malignant lesions [J] . Journal of China Clinic Medical Imaging, 2016, 27(1): 10–13.
- [29] 王文利, 程颢, 商静, 等. 超声造影检查在乳腺BI-RADS 4类的乳腺肿块良恶性鉴别诊断中的价值 [J] . 现代肿瘤医学, 2018, 26(17): 2760–2764.
WANG W L, CHENG H, SHANG J, et al. Value of contrast-enhanced ultrasound in the differential diagnosis of benign and malignant breast masses of type 4 BI-RADS [J] . J Mod Oncol, 2018, 26(17): 2760–2764.
- [30] 邓芸霞, 李玲玲, 陆婵, 等. 超声造影优化乳腺BI-RADS 4类结节诊断效能的应用研究 [J] . 中国超声医学杂志, 2024, 40(11): 1228–1232.
DENG Y X, LI L L, LU C, et al. Application of contrast-enhanced ultrasound to optimize the diagnostic efficiency of breast BI-RADS 4 nodules [J] . Chin J Ultrasound Med, 2024, 40(11): 1228–1232.

(收稿日期: 2025-04-08 修回日期: 2025-06-26)