论　著

Luminal A型、Luminal B型乳腺癌患者的MRI-DWI多b值双指数模型处理参数差异及其对前哨淋巴结转移的评估价值

施学成　龚俊峰*　王永杰
曾　旭
上海健康医学院附属崇明医院医学影像科(上海 202150)

【摘要】**目的** 探讨Luminal A型、Luminal B型乳腺癌患者的磁共振成像(MRI)-扩散加权成像(DWI)多b值双指数模型处理参数差异，并分析其对前哨淋巴结转移的评估价值。**方法** 回顾性分析2020年9月至2024年9月我院收治的83例乳腺癌患者的MRI影像学资料。根据乳腺癌分子分型分为Luminal A型35例和Luminal B型48例。根据前哨淋巴结转移情况分为转移52例和未转移31例。比较Luminal A型与Luminal B型乳腺癌患者不同b值条件下的表观扩散系数(ADC)，采用ROC曲线分析不同b值条件下ADC值的鉴别诊断价值。比较转移与未转移患者MRI-DWI双指数模型指标[真实扩散系数(D)、灌注系数(f)]。采用ROC曲线分析MRI-DWI双指数模型指标对乳腺癌前哨淋巴结转移的诊断价值。**结果** 当b值=50、1000、1500时，Luminal A型患者的ADC值均高于Luminal B型($P<0.05$)。随着b值升高，两组患者的ADC值逐渐降低($P<0.05$)。ROC曲线显示，当b值=1000时，ROC曲线下面积(AUC)最大，对Luminal A型与Luminal B型乳腺癌的鉴别诊断效能最好。前哨淋巴结转移患者的ADC值、D值、f值均低于未转移患者($P<0.05$)。当ADC截断值为$0.83\times10^{-3}mm^2/s$，D截断值为$0.76\times10^{-3}mm^2/s$，f截断值为$20.52\times10^{-3}mm^2/s$，诊断乳腺癌前哨淋巴结转移的灵敏度分别为90.32%、77.42%、80.65%，特异度分别为86.54%、84.62%、61.54%。**结论** MRI-DWI多b值双指数模型可较好地鉴别诊断Luminal亚型乳腺癌，当b值=1000时诊断效能最好。双指数模型能更全面地反映乳腺癌生物学特性，可为乳腺癌前哨淋巴结转移的无创评估提供重要依据。

【关键词】乳腺癌；磁共振成像；扩散加权成像；多b值；双指数模型；前哨淋巴结转移
【中图分类号】R737.9
【文献标识码】A
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.04.027

Differences in Processing Parameters of Multi-b-Value Double Exponential Model of MRI-DWI between Patients with Luminal A and Luminal B Breast Cancer and Its Value in Evaluating Sentinel Lymph Node Metastasis

SHI Xue-cheng, GONG Jun-feng*, WANG Yong-jie, ZENG Xu.
Department of Medical Imaging, Chongming Hospital Affiliated to Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Chongming, Shanghai 202150, China

ABSTRACT
Objective To investigate the differences in processing parameters of multi-b-value double exponential model of magnetic resonance imaging (MRI)-diffusion weighted imaging (DWI) between patients with luminal A and luminal B breast cancer, and analyze its value in evaluating sentinel lymph node metastasis. ***Methods*** The MRI data of 83 patients with breast cancer admitted to the hospital from September 2020 to September 2024 were retrospectively analyzed. According to molecular typing of breast cancer, 35 cases were classified as luminal A type and 48 cases as luminal B type. According to the status of sentinel lymph node metastasis, there were 52 patients with metastases and 31 patients without. The apparent diffusion coefficient (ADC) values under different b values were compared between patients with luminal A and luminal B breast cancer. ROC curve was used to analyze the value of ADC values under different b values in differential diagnosis. Parameters of MRI-DWI double exponential model [true diffusion coefficient (D) and perfusion fraction (f)] were compared between patients with metastasis and those without. ROC curve was used to analyze the diagnostic value of parameters of MRI-DWI double exponential model for sentinel lymph node metastasis of breast cancer. ***Results*** When b values were 50, 1000 and 1500, the ADC values of patients with luminal A breast cancer were higher than those of patients with luminal B breast cancer ($P<0.05$). As b value increased, the ADC values of both groups gradually decreased ($P<0.05$). ROC curve showed that when b value was 1000, the area under the ROC curve (AUC) was the largest, and the efficacy in differential diagnosis of luminal A and luminal B breast cancer was the best. The ADC, D and f values of patients with sentinel lymph node metastasis were lower than those of patients without ($P<0.05$). When cutoff values of the ADC value, D and f were $0.83\times10^{-3}mm^2/s$, $0.76\times10^{-3}mm^2/s$ and 20.52%, the sensitivities for diagnosing sentinel lymph node metastasis in breast cancer were 90.32%, 77.42% and 80.65%. The specificity was 86.54%, 84.62% and 61.54%, respectively. ***Conclusion*** MRI-DWI multi-b-value double exponential model can well help to differentiate luminal subtypes of breast cancer, and the diagnostic efficacy is the best when b value is 1000. The double exponential model can reflect the biological characteristics of breast cancer more comprehensively, providing an important basis for non-invasive assessment of sentinel lymph node metastasis of breast cancer.
Keywords: Breast Cancer; Magnetic Resonance Imaging; Diffusion-Weighted Imaging; Multi-b-Value; Double Exponential Model; Sentinel Lymph Node Metastasis

乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤之一，其分子分型与临床治疗策略及预后密切相关[1]。Luminal A型与Luminal B型乳腺癌作为激素受体阳性亚型，在乳腺癌中占比较高，如何术前准确鉴别Luminal亚型对于个体化治疗方案的制定至关重要[2]。乳腺癌的影像学方法主要包括常规磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)和扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)，但DWI单指数模型计算的表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)无法区分微循环灌注与真实扩散效应[3-4]。近年来研究发现，多b值双指数模型通过真实扩散系数和灌注系数能够更全面地反映乳腺癌微环境水分子扩散特征及血流灌注状态，为无创评估分子亚型提供了新方法[5]。不过不同b值对扩散与灌注参数的敏感度存在差异，因此对比分析多b值条件下的ADC参数变化，有助于筛选出对Luminal亚型鉴别诊断效能最优的b值阈值[6]。前哨淋巴结转移是影响乳腺癌预后的关键因素，但多b值双指数模型对前哨淋巴结转移的评估价值尚不清楚[7-8]。本研究探讨Luminal A型、Luminal B型乳腺癌的多b值双指数模型处理参数差异，并分析其对前哨淋巴结转移的评估价值，为Luminal亚型乳腺癌的鉴别诊断以及前哨淋巴结转移评估提供影像学依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析2020年9月至2024年9月我院收治的83例乳腺癌患者的MRI影像学资料。患者均为女性，年龄29~72岁，平均年龄(50.13±9.74)岁。病理类型：浸润性导管癌65例(78.31%)，浸润性小叶癌9例(10.84%)，乳头状癌7例(8.43%)，髓样癌2例(2.41%)。侧别：左侧46例(55.42%)，右侧37例(44.58%)。发病位置：外上象限33例(39.76%)，内上象限29例(34.94%)，外下象限7例(8.43%)，内下象限5例(6.02%)，

【第一作者】施学成，男，放射技师，主要研究方向：对CT与磁共振技术的研究。E-mail：sxcalty@163.com
【通讯作者】龚俊峰，男，主治医师，主要研究方向：胸、腹部影像诊断。E-mail：qs998877@163.com

中央区9例(10.84%)。绝经史：绝经患者39例(46.99%)，未绝经患者44例(53.01%)。乳腺癌分子分型：Luminal A型35例(42.17%)，Luminal B型48例(57.83%)。前哨淋巴结转移情况：转移52例(62.65%)，未转移31例(37.35%)。本研究获得医院伦理委员会批准。

纳入标准：符合乳腺癌的诊断标准[9]；年龄≥18岁；初诊患者；乳腺癌分子分型为Luminal A型或Luminal B型；单侧乳腺癌；T分期为T1~T2期；⑦接受MRI-DWI检查，采用DWI多b值双指数模型分析，且影像资料完整清晰。排除标准：非Luminal型或三阴性乳腺癌；乳腺癌远处转移；MRI-DWI检查前已接受放疗或化疗；合并严重心、肺、肝、肾功能不全；病历资料记录不全或缺失。

1.2 方法 采用uMR780型号的3.0T磁共振设备(上海联影医疗科技股份有限公司)。患者取俯卧位，使用专用乳腺线圈。扫描序列包括常规T1加权成像(T1WI)和T2加权成像(T2WI)、多b值双指数模型DWI。T1WI采用自旋回波或梯度回波序列，重复时间(TR)600 ms，回波时间(TE)为8 ms，层厚4 mm，矩阵256×256，视野(FOV)300 mm，激励次数(NEX)1次。T2WI采用快速自旋回波序列联合短时反转恢复序列，TR 3000 ms，TE 120 ms，层厚保持4 mm，矩阵可提升至512×512，FOV 300 mm，NEX 2次。扫描横断面、矢状面及冠状面评估乳腺癌病灶形态学特征，采用并行采集技术减少磁敏伪影。DWI序列b值范围50~1500 s/mm^2(包括b值=50，b值=1000，b值=1500 s/mm^2)，扫描参数：TR 4000 ms，TE 80 ms，层厚4 mm，矩阵128×128，FOV 300 mm。由两名主治以上影像学医师在肿瘤最大横截面的三个相邻层面手动勾画感兴趣区(ROI)，避开坏死、出血及血管区域，每个ROI重复测量3次取平均值。图像后处理：采用单指数模型计算不同b值条件下的ADC值。采用双指数模型分析，计算真实扩散系数(D)、灌注系数(f)、最大上升斜率(MSI)、肿瘤早期强化率(SER)。

1.3 统计学方法 使用SPSS 28.0统计分析软件。计量资料以($\bar{x}\pm s$)表示，2组患者ADC值、D值、f值、MSI值、SER值比较采用独立样本t检验，3组不同b值条件下的ADC值比较采用方差分析。P<0.05表示差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 多b值双指数模型DWI成像分析 Luminal B型乳腺癌表现为显著高信号，病灶范围较大，边缘欠光滑，不同b值的DWI信号较高，ADC值较低。Luminal A型乳腺癌DWI成像表现为中等或稍高信号，信号强度明显低于Luminal B型，病灶范围较小，边缘较光滑，与Luminal B型相比，不同b值的DWI信号较低，ADC值较高，见图1、图2。

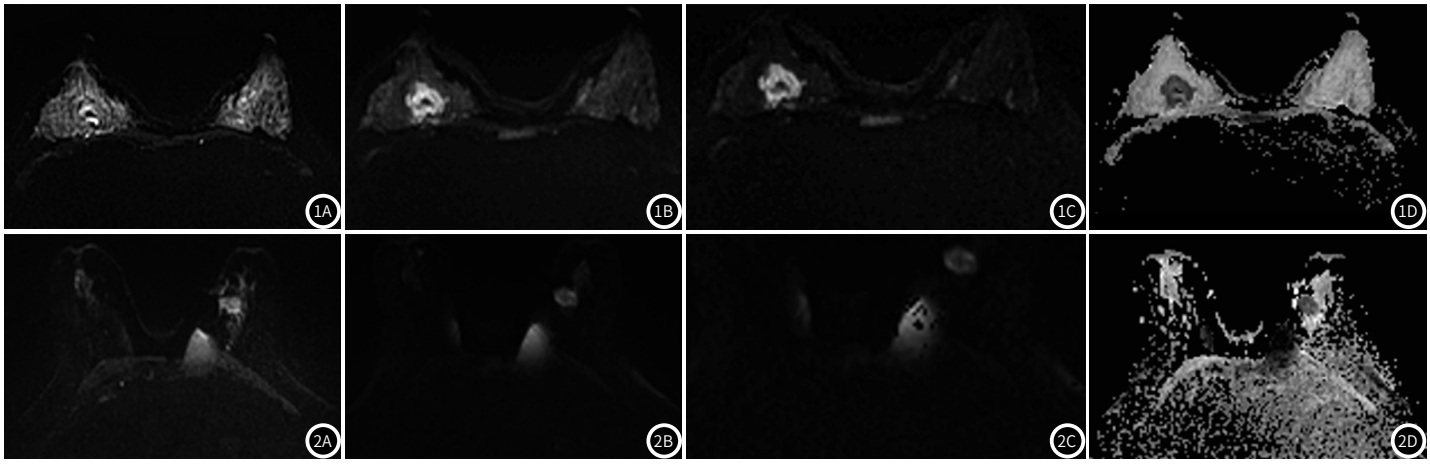


图1 右乳乳腺癌，Luminal B型，多b值DWI成像；(图1A)b值=50；(图1B)b值=1000；(图1C)b值=1500；(图1D)ADC图；多b值DWI成像显示病灶范围较大，边缘欠光滑，不同b值的DWI信号较高，ADC值较低。
图2 左乳乳腺癌，Luminal A型，多b值DWI成像；(图2A)b值=50；(图2B)b值=1000；(图2C)b值=1500；(图2D)ADC图；多b值DWI成像显示病灶范围较小，边缘较光滑，不同b值的DWI信号较低，ADC值较高。

2.2 Luminal A型与Luminal B型乳腺癌患者不同b值条件下的ADC值比较 当b值=50、1000、1500时，Luminal A型患者的ADC值均高于Luminal B型(P<0.05)。随着b值升高，两组患者的ADC值逐渐降低(P<0.05)，见表1。

2.3 不同b值条件下的ADC值诊断Luminal A型与Luminal B型乳腺癌的ROC曲线分析 由ROC曲线可知，当b值=1000时，ROC曲线下面积(AUC)最大，对Luminal A型与Luminal B型乳腺癌的鉴别诊断效能最好，此时ADC截断值为0.81×10^{-3}mm^2/s，灵敏度为82.86%，特异度为72.92%。不同b值条件下的ADC值的诊断结果具体，见表2。

表1 Luminal A型与Luminal B型乳腺癌患者不同b值条件下的ADC值比较(×10^{-3}mm^2/s)

组别	例数	b值=50	b值=1000	b值=1500	F	P
Luminal A型	35	1.25±0.20	0.93±0.15	0.82±0.13	65.989	<0.001
Luminal B型	48	1.14±0.17	0.75±0.12	0.72±0.10	108.152	<0.001
t		2.701			6.070	3.962
P		0.008			<0.001	<0.001

表2 不同b值条件下的ADC值诊断Luminal A型与Luminal B型乳腺癌的ROC曲线分析结果

指标	ADC截断值	AUC	95%CI	灵敏度(%)	特异度(%)	约登指数
b值=50	1.20	0.658	0.533-0.783	68.57	70.83	0.394
b值=1000	0.81	0.823	0.729-0.916	82.86	72.92	0.558
b值=1500	0.76	0.748	0.633-0.862	71.43	62.50	0.339

2.4 乳腺癌前哨淋巴结是否转移患者MRI-DWI双指数模型指标比较 取b值=1000时进行MRI-DWI双指数模型分析，结果显示，前哨淋巴结转移患者的ADC值、D值、f值均低于未转移患者(P<0.05)。前哨淋巴结转移与未转移患者的MSI值、SER值比较差异无统计学意义(P>0.05)，见表3。

表3 乳腺癌前哨淋巴结是否转移患者MRI-DWI双指数模型指标比较

组别	例数	ADC(×10^{-3}mm^2/s)	D(×10^{-3}mm^2/s)	f(%)	MSI	SER
转移	52	0.71±0.10	0.68±0.09	19.84±3.20	2.61±0.43	1.17±0.23
未转移	31	1.02±0.17	0.85±0.14	23.73±4.26	2.79±0.47	1.25±0.20
t		10.478	6.739	4.724	1.782	1.607
P		＜0.001	＜0.001	＜0.001	0.079	0.112

2.5 MRI-DWI双指数模型指标诊断乳腺癌前哨淋巴结转移的ROC曲线分析 取b值=1000时进行MRI-DWI双指数模型分析，将有统计学意义的ADC值、D值、f值纳入ROC曲线分析，结果显示，ADC截断值为0.83×10^{-3}mm^2/s，D截断值为0.76×10^{-3}mm^2/s，f截断值为20.52×10^{-3}mm^2/s，ROC曲线下面积(AUC)达到最大，ADC值、D值、f值诊断乳腺癌前哨淋巴结转移的灵敏度分别为90.32%、77.42%、80.65%，特异度分别为86.54%、84.62%、61.54%，见表4。

表4 MRI-DWI双指数模型指标诊断乳腺癌前哨淋巴结转移的ROC曲线分析结果

指标	截断值	AUC	95%CI	灵敏度(%)	特异度(%)	约登指数
ADC	0.83	0.940	0.882-0.999	90.32	86.54	0.769
D	0.76	0.859	0.767-0.952	77.42	84.62	0.620
f	20.52	0.769	0.663-0.875	80.65	61.54	0.422

3 讨　论

本研究结果显示，Luminal A型乳腺癌在不同b值条件下的ADC值均明显高于Luminal B型，且当b值=1000时，ADC值的鉴别诊断效能最好(AUC=0.823)，此时ADC截断值为0.81×10^{-3}mm^2/s，灵敏度为82.86%，特异度为72.92%；随着b值升高，两组患者的ADC值逐渐降低，而低b值(b值=50)和高b值(b值=1500)的诊断效能低于b值=1000。既往研究[10]也报道随着b值增加ADC值呈下降趋势，这与本研究观点相符。在DWI扫描中，b值作为核心参数，其数值与DWI敏感梯度场强度、作用时长及间隔周期密切相关。b值较高时，成像更倾向于反映水分子的扩散特性；而b值较低时，则更接近T2加权成像[11-12]。由于生物体内水分子活动程度主要受细胞膜屏障作用的制约，细胞增殖越活跃，组织密度越高，细胞膜对水分子的阻碍越明显，因此ADC值就越低。当b值=1000时，高b值有效抑制了灌注干扰，更真实反映乳腺癌微观结构的异质性，提示优化b值是提升诊断效能的关键[13]。不过由于水分子扩散受限，DWI图像呈现高信号，而ADC值则下降。ADC值能够消除T2加权成像穿透效应的干扰，弥补了低b值条件下DWI无法准确反映组织扩散受限程度的不足[14]。若b值过高(b值=1500)，会导致组织信号强度与病灶对比度信噪比逐步下降，影响成像清晰度，因此不宜采用过高的b值[15]。本研究表明，当b值=1000时，ADC值受微循环灌注干扰较小，能够更准确地评估组织内水分子的扩散特性，对Luminal亚型乳腺癌的鉴别诊断效能最好。与Luminal A型相比，Luminal B型乳腺癌的细胞增殖活跃，肿瘤细胞密度更高，细胞外间隙更狭窄，限制了水分子的真实扩散，因此ADC值较低。

不过，乳腺癌组织内水分子的运动不仅包括单纯扩散，还受到微循环及组织灌注的影响。因此单指数ADC值无法区分单纯的水分子扩散与毛细血管微循环灌注信息。D值和f值作为双指数模型的灌注相关参数，能够反映组织的微循环灌注状态[16]。本研究结果显示，前哨淋巴结转移患者的ADC值、D值、f值均低于未转移患者，这与既往研究[17]报道相似。这是因为乳腺作为血供丰富的外分泌器官，乳腺癌病灶中血供显著减少会导致其灌注水平降低，当发生前哨淋巴结转移时，乳腺癌肿瘤细胞浸润导致细胞密度升高、细胞外基质纤维化，进一步限制了水分子扩散，导致D值降低，同时微循环受阻可能降低f值[18]。因此，DWI双指数模型参数D值和f值可用于鉴别前哨淋巴结转移。本研究发现MSI值、SER值在前哨淋巴结转移评估中无统计学差异，可能是因为MSI值、SER值主要反映血管通透性，而乳腺癌前哨淋巴结转移的微循环变化更依赖扩散参数ADC值、D值、f值[19-20]。相较于单指数模型，双指数模型通过分离真实扩散与灌注效应，更全面地揭示乳腺癌组织的微观结构特征，尤其在高b值条件下能够有效区分Luminal亚型并评估前哨淋巴结转移风险，临床诊断价值高。

综上所述，MRI-DWI多b值双指数模型可较好地鉴别诊断Luminal亚型乳腺癌，当b值=1000时诊断效能最好。双指数模型能更全面地反映乳腺癌生物学特性，可为乳腺癌前哨淋巴结转移的无创评估提供重要依据。

参考文献

[1]Conti A,Duggento A,Indovina I,et al.Radiomics in breast cancer classification and prediction[J].Semin Cancer Biol,2021,7(72):238-250.
[2]Yoshitake R,Mori H,Ha D,et al.Molecular features of luminal breast cancer defined through spatial and single-cell transcriptomics[J].Clin Transl Med,2024,14(1):1548-1550.
[3]Park VY,Shin HJ,Kang BJ,et al.Diffusion-weighted magnetic resonance imaging for preoperative evaluation of patients with breast cancer:protocol of a prospective,multicenter,observational cohort study[J].J Breast Cancer,2023,26(3):292-301.
[4]Meyer HJ,Wienke A,Surov A.Diffusion weighted imaging to predict nodal status in breast cancer:A systematic review and meta-analysis[J].Breast J,2021,27(5):495-498.
[5]袁晓凡,李海歌,朱建国,等.三种不同指数模型对乳腺良恶性病变鉴别诊断效能的比较：一项基于多b值MUSE-DWI的研究[J].中国CT和MRI杂志,2024,22(1):81-84.
[6]刘阳,朱志军,曹满瑞,等.多b值DWI联合MRI动态增强在乳腺癌诊断的效能分析[J].中国CT和MRI杂志,2021,19(4):39-42.
[7]Boniface J,Filtenborg Tvedskov T,et al.Omitting axillary dissection in breast cancer with sentinel-node metastases[J].N Engl J Med,2024,390(13):1163-1175.
[8]Cserni G,Maguire A,Bianchi S,et al.Sentinel lymph node assessment in breast cancer-an update on current recommendations[J].Virchows Arch,2022,480(1):95-107.
[9]中国抗癌协会乳腺癌诊治指南与规范(2019年版)[J].中国癌症杂志,2019,29(08):609-680.
[10]黄晓妮,薛阳,刘欢,等.多b值表观扩散系数直方图分析预测乳腺癌分子分型及预后因素研究[J].临床放射学杂志,2022,41(3):439-445.
[11]何瑞红,李立,钱伟军.DCE-MRI、多b值DWI结合CA153、CEA对乳腺癌及肿块型浆细胞性乳腺炎的鉴别诊断价值研究[J].中国CT和MRI杂志,2023,21(6):89-92.
[12]Feng H,Liu H,Wang Q,et al.Breast cancer diagnosis and prognosis using a high b-value non-Gaussian continuous-time random-walk model[J].Clin Radiol,2023,78(9):660-667.
[13]DelPriore MR,Biswas D,Hippe DS,et al.Breast cancer conspicuity on computed versus acquired high b-value diffusion-weighted MRI[J].Acad Radiol,2021,28(8):1108-1117.
[14]雷鹰,王枝红,冉立,等.3.0TMRI动态增强联合多B值DWI成像技术对乳腺癌新辅助化疗的评估价值[J].影像研究与医学应用,2020,4(18):121-122.
[15]Xu C,Wang Z,Wang A,et al.Breast Cancer:Multi-b-value diffusion weighted habitat imaging in predicting pathologic complete response to neoadjuvant chemotherapy[J].Acad Radiol,2024,31(12):4733-4742.
[16]李晓芳.DWI单、双指数模型在浸润性乳腺癌预后因素中的应用价值研究[D].衡阳:南华大学,2021.
[17]田野,陈海东,刘玉涛,等.单指数、双指数模型扩散加权成像在鉴别乳腺良恶性病变的应用研究[J].中国CT和MRI杂志,2022,20(5):126-129.
[18]王铭,田为中.体素内不相干运动扩散加权成像在乳腺癌中的临床应用进展[J].临床放射学杂志,2021,40(2):401-404.
[19]石夕冉.基于多模型MRI定量参数预测乳腺癌前哨淋巴结转移状态的相关研究[D].南充:川北医学院,2024.
[20]刘琳.多模态MRI对乳腺癌前哨淋巴结转移患者的评估价值探析[J].影像研究与医学应用,2024,8(21):64-66,69.

(收稿日期：2025-05-29)
(校对：姚丽娜　排版：张鸿燊)