论著

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

袁晓凡 李海歌* 朱建国 郭浩东 张紫燕 蔡康杰 南京医科大学第二附属医院医学影像科 (江苏南京 210011)

【摘要】目的比较基于多b值MUSE-DWI的单指数 模型、双指数模型、拉伸指数模型鉴别乳腺良恶性 病变的诊断效能。方法 回顾性分析62例经病理证实 的乳腺疾病患者的MRI检查资料。根据病理结果, 将病灶分为良恶性两组,采用单因素分析或非参数 检验比较三种指数模型定量参数的组间差异。采 用二元Logistic回归分析有组间差异的参数。采用 DeLong检验比较三种指数模型的受试者工作特征 (ROC)曲线下面积(AUC),评估三种模型诊断效能的 差异。结果 三种指数模型定量参数的值在恶性组均 低于良性组(P<0.05)。单指数模型、双指数模型参 数联合模型、拉伸指数模型参数联合模型鉴别乳腺 良恶性病变的AUC分别为0.701,0.859,0.828; 双指数模型参数联合模型与单指数模型的AUC有统 计学差异(P=0.023),拉伸指数模型参数联合模型的 AUC与双指数模型参数联合模型(P=0.52)及单指数 模型(P=0.08)无统计学差异。结论 三种不同指数模 型有助于鉴别乳腺良恶性病变; 双指数模型参数联 合模型优于单指数模型。

【关键词】乳腺病变;表观扩散系数; 双指数模型;拉伸指数模型 【中图分类号】R737.9;R445.2 【文献标识码】A DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.01.026

Comparison of the Diagnostic Efficacy of Three Different Exponential Models in Discriminating Malignant from Benign Breast Lesions: A Study Based on Multi-bvalue MUSE-DWI

YUAN Xiao-fan, LI Hai-ge^{*}, ZHU Jian-guo, GUO Hao-dong, ZHANG Zi-yan, CAI Kang-jie. Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210011, Jiangsu Province, China

ABSTRACT

Objective The objective of this study was to compare the diagnostic efficacy of three different exponential models (mono-exponential, bi-exponential, and stretched exponential) in discriminating the malignant from benign breast lesions, based on multi-b-value MUSE-DWI. Methods MRI data of 62 patients with pathologically confirmed breast diseases were retrospectively analyzed. Based on the pathological results, the lesions were divided into benign or malignant groups, and the differences between groups in the quantitative parameters of three different exponential models were compared using univariate analysis or non-parametric tests as appropriate. Binary logistic regression analysis was performed on parameters with significant intergroup differences. The DeLong test was used to compare the area under the receiver operating characteristic (ROC) curve (AUC) of the three models to evaluate the significant difference in their diagnostic efficacy. Results Intergroup comparisons showed that the values of the quantitative parameters of three different exponential models in the malignant group were lower than those in the benign group (P< 0.05). The AUC of the three models was 0.701, 0.859, and 0.828, respectively. There was a significant difference in the AUC between the combined model of the parameters of the bi-exponential mode and the mono-exponential model. The diagnostic efficacy of the combined model of the parameters of the stretched-exponential model had no significant difference with the combined model of the parameters of the bi-exponential model (P=0.52) or the mono-exponential model (P=0.08). Conclusion The three exponential models (mono-exponential, bi-exponential, and stretched exponential) can help discriminate malignant from benign breast lesions. The combined model of the parameters of the bi-exponential model had better diagnostic efficacy than the mono-exponential model.

Keywords: Breast Lesion; Apparent Diffusion Coefficient; Bi-exponential Model; Stretched-Exponential Model

乳腺癌在全球发病率逐年上升,已成为女性因癌症死亡的主要原因^[1]。早发现、 早诊断有助于帮助患者尽早选择合适的治疗方案,改善预后^[2]。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)具有良好的组织分辨率,无辐射,是诊断乳腺癌的重要影 像学方法^[2]。常规MRI通过扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)反映病 灶扩散受限情况^[3];借助动态增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging, DCE-MRI),获取病灶的血流动力学信息^[4],但对比剂会增加肾衰 及脑部钆沉积的风险^[5]。近年来,随着MRI技术的发展,引入了多b值DWI序列,无需对 比剂,通过实现三种模型,可同时评估病灶的灌注水平、扩散情况和异质性^[6-8]。使患者 从三个方面获益:提高检查时效性、降低检查成本、避免对比剂的风险。

多b值DWI的三种模型包括:单指数模型,通过表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)评估病灶的扩散水平,但单指数模型没有考虑微循环灌注的影响,不能准确地反映病灶的组织特征^[6];双指数模型分别评估病灶组织和微循环血管的质子扩散情况^[7],并将其量化,得到:慢速表观扩散系数(slow apparent diffusion coefficient, ADC_{slow})、快速表观扩散系数(fast apparent diffusion coefficient, ADC_{fast})和快速扩散成分所占比例(fraction of fast apparent diffusion coefficient, ADC_{fast}); 拉伸指数模型,基于质子在微环境中呈连续分布的假设,通过分布扩散系数(distributed diffusion coefficient, DDC)和扩散异质性值(Alpha, α),评估病灶的 异质性^[8]。

既往研究对基于多b值DWI序列得到的三种模型进行比较,发现双指数模型对肺良 恶性结节的鉴别能力优于单指数模型^[9];拉伸指数模型对肝癌和肝血管瘤的鉴别能力 ^[10]、对胶质瘤的分级评估^[11]优于双指数模型及单指数模型。在乳腺癌方面,也有研究发 现双指数模型对乳腺癌的诊断效能优于单指数模型^[12],但拉伸指数模型在乳腺良恶性病 变鉴别中的应用较少。

复合灵敏度编码扩散加权成像(multiplexed sensitivity-encoding diffusionweighted imaging, MUSE-DWI)是基于平面回波成像(echo planar imaging, EPI)序列 的新成像技术,通过在相位方向多次激发采集,可以提高扩散图像质量和分辨率^[13]。

因此,本研究旨在分析基于多b值MUSE-DWI的单指数、双指数和拉伸指数模型的

定量参数在乳腺良恶性病变的差异;并比较三种模型对乳腺良恶 性病变鉴别的诊断效能。

1 资料与方法

1.1 研究资料 本研究采用回顾性分析的方法,收集2021年11月 至2022年11月在我院就诊并接受乳腺手术的62例女性患者。

纳入标准:检查前未进行活检、化疗或其他临床干预;有完整的手术病理资料;均接受统一的多b值MUSE-DWI检查。排除标准:运动伪影较重,图像质量较差;病变直径小于1cm。

1.2 图像采集 MRI检查采用3.0 T磁共振扫描仪(GE Premier), 16通道乳腺专用相控线圈。扫描序列包括: T₁WI、T₂WI、多b值 MUSE-DWI、DCE-MRI。

扫描参数如下: T₁WI序列: TR=404ms, TE=6.9ms, 层 厚=5.0mm,间距=1.0mm, FOV=360mm×360mm,矩阵 =412×320, NEX=1; T₂WI序列: TR=4858ms, TE=85ms, 层厚=5.0mm,间距=1.0 mm, FOV=360mm×360mm,矩阵 =352×288, NEX=1;

多b值MUSE-DWI序列: TR=4239ms, TE=63.3ms, 层 厚=5.0mm,间距=1.0mm, FOV=360mm×360mm,矩阵 =130×180,b值=0,70,100,150,200,400,800,1200, 1800s/mm²,相应的NEX分别为1,1,1,1,2,2,4,10, 14,分别在频率编码、相位编码、层面(x、y、z)三个方向施 加扩散梯度;DCE-MRI序列: TR=4.2ms, TE=2.1ms, 层厚 =1.0mm, FOV=320mm×320mm,矩阵=320×320, NEX=1, 共4期,单期扫描时间为75s。

1.3 图像后处理和分析 将所有图像传输到后处理工作站 (ADW4.6),分别由两名具有5年、8年乳腺影像诊断经验的医师采 用双盲法单独评估图像。结合T₁WI、T₂WI及DCE-MRI序列图像确 定病灶位置,通过后处理工作站的后处理软件(Functool MADC), 沿病灶实体边缘、避开坏死及囊变区绘制感兴趣区(region of interest, ROI)。记录自动生成的多b值MUSE-DWI的三种模型参 数: 1.单指数模型参数ADC,基于公式S(b)/S(0)= exp($-b \times ADC$) ^[14]获得; 2.双指数模型参数ADC,基于公式S(b)/S(0)= exp($-b \times ADC$) ^[14]获得; 2.双指数模型参数ADC_{slow}、ADC_{fast}、ADC_{fraction of fast}, 基于公式S(b)/S(0)= [($1 - ADC_{fraction of fast}) \times exp(<math>-b \times ADC_{slow}$)] + [ADC_{fraction of fast} $\times exp(-b \times ADC_{fast})$]^{115]}获得; 3.拉伸模型参数DDC、 α ,基于公式 S(b)/S(0)= exp[$-(b \times DDC$)]^{α [16]}获得; 其中S(b)为 特定b值下的信号强度,S(0)为无扩散梯度时的信号强度。

1.4 统计分析 采用统计软件SPSS 26.0、Medcalc 20.0对数据进 行统计分析,P<0.05认为具有统计学差异。

المتحركية ويتحرك والمراجع المراجع

1

组内一致性检验: 计算每个参数的平均值,采用组内相关系数(Intraclass Correlation Coefficient, ICC)评价两名医师测量参数结果的一致性(ICC<0.4为一致性差,0.4≤ICC<0.75为一致性良好)。以两名医师测量的算术平均值作为最终数据,纳入统计分析。良恶性组间比较:分别对单指数模型、双指数模型及拉伸指数模型采用Kolmogorov-Smirnov检验评估病变区域各项参数,符合正态分布且组间数据方差齐同(Levene检验)使用ANOVA方差分析;否,则使用Kruskal-WallisH检验。对具有组间差异的参数,进一步采用二元Logistic回归分析,分别构建双指数模型参数的联合模型、拉伸指数模型参数的联合模型。通过DeLong检验比较单指数模型、双指数模型参数联合模型、拉伸指数模型参数联合模型的受试者工作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线下面积(area under curve, AUC),评估三种模型诊断效能的差异。

2 结 果

最终共纳入62例患者,共64个病灶。其中良性病灶28个、恶 性病灶36个(表1)。两名医师基于多b值MUSE-DWI获得的定量参 数一致性良好(ICC=0.796~0.972)(表2)。组间比较中,下列参数 在恶性组低于良性组,包括:ADC值(良性vs恶性:1.20×10⁻³s/ mm² vs 0.94×10⁻³s/mm², P=0.016)、ADC_{slow}值(良性vs恶性: 7.83×10⁻³s/mm² vs 4.45×10⁻³s/mm², P=0.011)、ADC_{fast}值(良 性vs恶性:4.05×10⁻³s/mm² vs 0.665×10⁻³s/mm², P<0.001)、 ADC_{fraction of fast}值(良性vs恶性:55.2% vs 39.5%, P=0.016)、 DDC值(良性vs恶性:1.34×10⁻³s/mm² vs 0.905×10⁻³s/mm², P<0.001)、a值(良性vs恶性:0.579 vs 0.422, P<0.001)(表 3)。双指数模型参数联合模型:Y1=67.5×ADC_{slow}+77.8×A DC_{fast}+4.48×ADC_{fraction of fast}; 拉伸指数模型参数联合模型: Y2=63.48×DDC+5.53×a。(表4)

单指数模型、双指数模型参数联合模型、拉伸指数模型参数 联合模型的AUC分别为0.701、0.859、0.828(图3)。DeLong检 验结果显示双指数模型参数联合模型与单指数模型有统计学差异 (P=0.023),拉伸指数模型参数联合模型的诊断效能与双指数模型 参数联合模型(P=0.52)、单指数模型(P=0.08)无统计学差异。拉伸 指数模型参数联合模型鉴别乳腺良恶性病变的敏感性(96.4%)高于 单指数模型(85.7%)和双指数模型参数联合模型(89.3%),双指数 模型参数联合模型鉴别乳腺良恶性病变的特异性(69.4%)高于单指 数模型(58.3%)和拉伸指数模型参数联合模型(52.8%)(表5)。

农1 孔脉反应性两趾的病理突空		农2 网名达州测量多D值MU3C-DWI多数的一致性比较			表4 二元LOgISUC回归结果				
病理类型	病灶数/个	参数	ICC	95% CI		参数	估算值	Р	95%CI
良性病灶	28	ADC	0.821	0.792~0.921	☑指数模型	ADC	67 5	0.025	54 3~73 6
纤维腺瘤	20	ADC _{slow}	0.796	0.767~0.889	MILXIX	, ID OSIOW		0.020	
腺病	6	ADC _{fast}	0.972	0.886~0.991		ADC _{fast}	77.8	0.028	68.3~85.5
导管内乳头状瘤	2	ADC _{fraction of fast}	0.871	0.811~0.903		$ADC_{fraction}offast$	4.48	0.003	12.5~17.2
恶性病灶	36	DDC	0.964	0.901~0.971	拉伸指数模型	DDC	63.4	0.021	51.3~78.3
浸润性导管癌	32	α	0.898	0.822~0.964		α	5.53	0.001	3.14~7.31
浸润性小叶癌	3	注: ICC=Intraclass correlation coefficient=组间相关系数;							

95%CI=95% confidence interval=95%置信区间。

一元在底刻目在L Churce Dung

注: 95% CI=95% confidence interval=95%置信区间。

表3 良恶性组多b值MUSE-DWI参数的比较								
参数	良性组	恶性组	Р					
$ADC(\times 10^{-3} s/mm^2)$	1.20 ± 3.83	0.940±4.28	0.016#					
$ADC_{slow}(\times 10^{-3} s/mm^2)$	7.83(1.53)	4.45(4.80)	0.011*					
$ADC_{fast}(\times 10^{-3} s/mm^2)$	4.05(36.8)	0.665(0.430)	<0.001*					
ADC _{fraction of fast} (%)	55.2(49.8)	39.5(27.0)	0.016*					
DDC(×10 ⁻³ s/mm ²)	1.34(0.543)	0.905(0.643)	<0.001*					
α	0.579(0.355)	0.422(0.300)	<0.001*					

表5 三种模型对乳腺癌诊断效能的比较 Р AUC 敏感性 特异性 95%CI 单指数模型 0.701 0.857 0.583 0.006 0.570~0.833 双指数模型参数联合模型 0.859 0.893 0.694 < 0.001 0.769~0.950 拉伸指数模型参数联合模型 0.828 0.964 0.528 < 0.001 0.728~0.929

注: AUC=area under the curve=受试者工作特性曲线下面积;

95%CI=95% confidence interval=95%置信区间。

注:[#]: ADC符合正态分布,经Levene检验,组间数据方差齐同,以均值土标准差表示, 组间比较采用单因素分析(ANOVA检验);[·]: ADC_{slow}、ADC_{fast}、ADC_{fraction of fast}、DDC、α 不符合正态分布,以中位值(四分位间距)表示,组间比较采用非参数检验(Kruskal-Wallis H检验)。

浸润性大汗腺癌



图1A-图1F 女,51岁,乳腺癌。避开坏死及囊变区勾画ROI;图1A ADC份彩图,病灶呈偏暖色调,ADC值=0.611×10⁻³s/mm²; 图1B ADC_{stow}伪彩图,病灶主体呈偏冷色调,局部呈偏暖色调,ADC_{stow}值=0.480×10⁻³s/mm²;图1C ADC_{rast} 份彩图,病灶呈偏冷色调,ADC_{rast}值=1.020×10⁻³s/mm²;图1D ADC_{fraction of fast}份彩图,病灶呈暖色调, ADC_{fraction of fast}值=0.222;图1E DDC伪彩图,病灶呈偏暖色调,DDC值=0.225×10⁻³s/mm²;图1F α伪彩图,病 灶呈偏冷色调,α值=0.634。



 图2A-图2H 女,49岁,乳腺腺病。避开坏死及囊变区勾画ROI;图2A ADC伪彩图,病灶呈偏暖色调,ADC值=0.743×10⁻³s/nm²; 图2B ADC_{stow}伪彩图,病灶呈偏暖色调,ADC_{stow}值=0.505×10⁻³s/nm²;图2C ADC_{fast}伪彩图,病灶呈偏冷色调,ADC_{fast}值=3.970×10⁻³s/nm²;图2D ADC_{fraction of fast}份彩图,病灶呈暖色调,ADC_{fraction of fast}值=0.505;图 2E DDC伪彩图,病灶呈偏暖色调,DDC值=0.753×10⁻³s/nm²;图2F α伪彩图,病灶呈偏暖色调,α值=0.737。



图3 单指数模型、双指数模型参数联合模型、拉伸指数模型参数联合模型预测 乳腺癌的ROC曲线; ROC曲线显示,单指数模型、双指数模型参数联合模型、拉伸指数模型参数联合模型鉴别乳腺良恶性病变的AUC分别为0.701、0.859、0.828; 经Delong检验比较,双指数模型参数联合模型与单指数 模型之间有统计学差异(P=0.023); 拉伸指数模型参数联合模型与双指数 模型参数联合模型(P=0.52)及单指数模型(P=0.08)之间无统计学差异。 (注: ROC=receiver operating characteristic curve=受试者工作特性曲 线; AUC=area under the curve=受试者工作特性曲线下面积)

3 讨 论

本研究以病理结果为"金标准",综合评估了单指数、双指数、拉伸指数模型的参数在乳腺良恶性病变中的差异。发现乳腺癌的ADC、ADC_{slow}、ADC_{fast}、ADC_{fraction of fast}、DDC、α值低于良性病灶;基于多b值MUSE-DWI的三种模型对鉴别乳腺良恶性病变有诊断价值;双指数模型参数联合模型的诊断效能优于单指数模型。

ADC与病灶的细胞密度相关;本研究中,乳腺癌的ADC值明 显低于良性病变,与段斌等^[17]结果一致。这可能是由于乳腺癌组 织内癌细胞异常增殖,导致局部细胞密度增大,使得细胞外间隙 变小,对质子扩散的限制更大^[17]。

ADC_{slow}和ADC_{fast}分别代表了质子在组织中的真实扩散和微循 环灌注形成的假性扩散,ADC_{fraction of fast}代表灌注分数^[18]。本研究 发现乳腺癌的ADC_{slow}值明显低于良性病变,这与既往研究^[16]结果 一致。根据Le Bihan^[7,18]的研究,通过双指数模型计算的ADC_{slow} 避免了微循环的影响,与ADC相比,可以更准确地量化恶性病变 的细胞增殖情况。ADC^{fast}值与病灶的血流速度以及病灶中的毛细 血管长度有关,ADC_{fraction of fast}反映了组织灌注中快速扩散成分的 体积分数^[18],本研究中,乳腺癌中ADC_{fast}值和ADC_{fraction of fast}值低 于良性病灶,与Tamura的结果一致^[19]。但另外两项研究^[12,20]发 现ADC_{fast}值和ADC_{fraction of fast}值在乳腺癌中较高,在良性病灶中较 低。结果出现差异的原因一方面可能是尽管乳腺癌血流增加, 但新生血管扭曲变性,分支紊乱,最终造成组织微循环灌注的 降低,进而降低快速扩散成分;另一方面可能是由于所选b值不 同,本研究中使用最大b值=1800s/mm²。

DDC反映了质子的平均扩散速率,也与组织的细胞水平有 关^[8],是具有多指数衰减特性的ADC值的加权,客观反映质子的 扩散情况^[21]。乳腺癌中DDC值低于良性病变,可能是由于较大 的细胞密度限制了组织中质子的运动,导致扩散速率降低^[22]。α 与组织的异质性程度相关^[9],范围为0~1,当α=1时,DDC等于 ADC,表明病灶内扩散均匀,呈单指数信号衰减,α越趋近于0, 表明组织内扩散异质性越高,代表复杂的多指数信号衰减。本研 究中,乳腺癌的α值低于良性病灶,与既往研究一致^[22],可能由 于乳腺癌分化程度低,其内细胞异型性大,组织异质性增加。

既往研究表明,基于单指数模型得到的ADC未考虑微循环血 管灌注的影响,并不能真实的反映组织中的质子扩散水平,而双 指数模型兼顾组织内、微循环两个独立的扩散区域,反映了肿瘤 的细胞密度和微循环情况。本研究中,双指数模型参数联合模型 诊断乳腺癌的敏感性和特异性都高于单指数模型。拉伸指数模型 在乳腺方面的研究目前较少,根据Bennett^[8]的研究,拉伸指数 模型参数考虑了质子扩散的多区间性,比双指数模型得出的参数 更客观。但在本研究中,拉伸指数模型参数联合模型与单指数模 型及双指数模型参数联合模型无统计学差异,这可能与ROI的选 取有一定的关系。既往研究^[23]认为,拉伸指数模型反映了恶性病 灶的异质性,应尽可能包括整个肿瘤病灶,包括囊变、坏死、出 血、钙化等区域,但本研究中在勾画ROI时避开了这些区域。

本研究与既往研究不同之处在于:既往研究主要评估单个模型对乳腺癌的诊断效能^[19],本研究分别对单指数、双指数、拉伸指数模型的参数进行定量分析,且比较了三种模型鉴别乳腺良恶性病灶的能力。

本研究尚存一些不足:采用了单中心的回顾性研究方法,病例 数较少,在后续研究中拟进一步扩大样本量并进行多中心验证;未纳 入浸润性非特殊类型癌的浸润程度、分子亚型等亚分型,未来将探讨 三种模型参数与浸润性非特殊类型癌浸润程度及分子亚型的相关性。

4 结 论

本研究发现,通过单指数、双指数和拉伸指数模型得到的 ADC、ADC_{slow}、ADC_{fast}、ADC_{fraction of fast}、DDC、α在乳腺癌病灶 中的值小于乳腺良性病变;单指数模型、双指数模型与拉伸指数 模型对鉴别乳腺良恶性病变有诊断价值;双指数模型参数联合模 型的诊断效能优于单指数模型。

参考文献

- [1]Katsura C, Ogunmwonyi I, Kankam HK, et al. Breast cancer: presentati on, investigation and management[J]. British Journal of Hospital Medicine, 2022, 83 (2): 1-7.
- [2] Mann RM, Balleyguier C, Baltzer PA, et al. Breast MRI: EUSOBI recommendations for women's information [J]. European Radiology, 2015, 25 (12): 3669-3678.
- [3]刘永天,周彦汝,张刚.磁共振弥散加权成像在乳腺肿块良恶性鉴别中的应用价值 [J].中国CT和MRI杂志,2023.21(6):83-85.
- [4]余海波,王春红,王珍,等.乳腺癌血流动力学DCE-MRI定量参数评价[J].中国CT和MRI 杂志,2023,20(8):96-98.
- [5] Pasquini L, Napolitano A, Visconti E, et al. Gadolinium-based contrast agent-related toxicities [J]. CNS Drugs, 2018, 32 (3): 229-240.
- [6]Bogner W, Gruber S, Pinker K, et al. Diffusion-weighted MR for differentiation of breast lesions at 3.0 T:how does selection of diffusion protocols affect diagnosis? [J]. Radiology, 2009, 253 (2): 341-351.
- [7]Le Bihan D. What can we see with IVIM MRI? [J]. Neuroimage, 2019, 187: 56-67.
 [8]Bennett KM, Schmainda KM, Bennett RT, et al. Characterization of continuously distributed cortical water diffusion rates with a stretched-exponential model [J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2003, 50 (4): 727-734.
- [9] Chen Y, Han Q, Huang Z, et al. Value of IVIM in differential diagnoses between benign and malignant solitary lung nodules and masses: a metaanalysis [J]. Frontiers in Surgery, 2022, 9: 817443.
- [10] Chen BY, Xie Z, Nie P, et al. Multiple b-value diffusion-weighted imaging in differentiating benign from malignant breast lesions: comparison of conventional mono-, bi- and stretched exponential models[J]. Clinical Radiology, 2020, 75 (8): 642. e1-642. e8.
- [11] Chen X, Jiang J, Shen N, et al. Stretched-exponential model diffusionweighted imaging as a potential imaging marker in preoperative grading and assessment of proliferative activity of gliomas[J]. American Journal of Translational Research, 2018, 10 (8): 2659-2668.
- [12] Liu C, Liang C, Liu Z, et al. Intravoxel incoherent motion (IVIM) in evaluation of breast lesions: comparison with conventional DWI[J]. European Journal of Radiology, 2013, 82 (12): e782-789.
- [13] Hu Y, Ikeda DM, Pittman SM, et al. Multishot diffusion-weighted MRI of the breast with multiplexed sensitivity encoding (MUSE) and Shot Locally Low-Rank (Shot-LLR) Reconstructions [J]. Journal of Magnetic Resonance Im aging: JMRI, 2021, 53 (3): 807-817.
- [14] Iacconi C. Diffusion and perfusion of the breast [J]. European Journal of Radiology, 2010, 76 (3): 386-390.
- [15] Dyvorne HA, Galea N, Nevers T, et al. Diffusion-weighted imaging of the liver with multiple b values: effect of diffusion gradient polarity and breathing acquisition on image quality and intravoxel incoherent motion parameters--a pilot study [J]. Radiology, 2013, 266 (3): 920-929.
- [16]Koh DM, Collins DJ, Orton MR. Intravoxel incoherent motion in body diffusion-weighted MRI: reality and challenges [J]. American Journal of Ro entgenology, 2011, 196 (6): 1351-1361.
- [17] 段斌, 王啸江, 孔玲. 3. 0TMR动态增强曲线联合ADC用于乳腺良恶性病变鉴别诊断中的研究机制[J]. 罕少疾病杂志, 2023, 30(8): 51-52.
- [18] Le Bihan D, Breton E, Lallemand D, et al. MR imaging of intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders [J]. Radiology, 1986, 161 (2): 401-407.
- [19] Tamura T, Usui S, Murakami S, et al. Biexponential signal attenuation analysis of diffusion-weighted imaging of breast [J]. Magnetic Resonance in Medical Sciences, 2010, 9 (4): 195-207.
- [20]张晶, 邹紫勤, 占丹, 等. 弥散加权成像在HER-2低表达与HER-2阳性乳腺癌的鉴别价值分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 20(12): 86-88.
- [21] Seo N, Chung YE, Park YN, et al. Liver fibrosis: stretched exponential model outperforms mono-exponential and bi-exponential models of diffusionweighted MRI[J]. European Radiology, 2018, 28 (7): 2812-2822.
- [22]Liu C, Wang K, Li X, et al. Breast lesion characterization using wholelesion histogram analysis with stretched-exponential diffusion model[J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging: JMRI, 2018, 47 (6): 1701-1710.
- [23] Bonarelli C, Teixeira PA, Hossu G, et al. Impact of ROI positioning and lesion morphology on apparent diffusion coefficient analysis for the differentiation between benign and malignant nonfatty soft-tissue lesions[J]. American Journal of Roentgenology, 2015, 205(1):W106-113.