

体素内不相干运动成像鉴别乳腺良恶性病变的价值并与定量动态增强MRI对比

孙瑞红¹, 蒋朝霞², 孟凡华¹, 尹化斌¹, 汤文琳³, 沈丽娟^{1,2*}

1. 复旦大学附属上海市第五人民医院放射科, 复旦大学上海医学院妇产科学系, 上海 200240;
2. 复旦大学附属肿瘤医院放射诊断科, 复旦大学上海医学院肿瘤学系, 上海 200032;
3. 西门子(中国)上海分公司, 上海 201600

[摘要] 背景与目的: 乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤, 体素内不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)是近年来发展的基于双指数计算模型的功能成像方法, 可反映单纯扩散和灌注两种效应。该研究旨在探讨IVIM各参数的可重复性及鉴别诊断乳腺良恶性病变的价值, 与定量动态增强MRI(dynamic contrast enhanced-magnetic resonance imaging, DCE-MRI)比较, 并探讨两种成像方法灌注参数的相关性。方法: 收集发现乳腺占位性病变并获得术后明确病理结果的患者56例, 共61个病灶, 其中良性病变30个, 恶性病变31个。患者术前均行IVIM及DCE-MRI检查。2名放射科医师独立对图像进行后处理, 获得IVIM参数(D 、 D^* 、 f 值), DCE-MRI参数(K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 值)。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficients, ICC)检测2名医师IVIM测量值的一致性; 采用独立样本 t 检验比较乳腺良恶性病变各参数值的差异; 对于差异有统计学意义的参数采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线评价其鉴别诊断乳腺良恶性病变的效能; 采用Pearson相关分析比较IVIM灌注相关参数与DCE-MRI的相关性。结果: 2名医师IVIM测量值的组内、组间重复性均较好(ICC \geq 0.730, P 均 $<$ 0.05)。乳腺恶性病变的 D 值低于良性病变, 而 f 、 K^{trans} 及 K_{ep} 值高于良性病变, 差异均有统计学意义(P $<$ 0.05), D^* 、 V_e 值差异均无统计学意义(P $>$ 0.05)。 D 、 f 、 K^{trans} 、 K_{ep} 值鉴别诊断乳腺良恶性病变的ROC下面积分别为0.896、0.677、0.796、0.847。 D 与 K^{trans} 、 K_{ep} 的ROC下面积差异无统计学意义(P $>$ 0.05)。以 1.07×10^{-3} mm²/s为诊断阈值, D 值特异度最高(86.67%), 以0.54/min为诊断阈值, K_{ep} 值的灵敏度最高(98.36%)。相关分析显示 f 与 K^{trans} 、 K_{ep} 值及 D^* 与 K^{trans} 值均呈弱正相关, 相关系数 r 分别为0.373、0.360和0.294(P 均 $<$ 0.05)。结论: IVIM参数在不同医师分析中重复性较好, IVIM与DCE-MRI均有助于鉴别诊断乳腺良恶性病变, 两种成像方法在反映组织灌注情况中存在相关性。

[关键词] 乳腺肿瘤; 磁共振成像; 对比研究; 重复性

DOI: 10.19401/j.cnki.1007-3639.2017.10.006

中图分类号: R737.9 文献标志码: A 文章编号: 1007-3639(2017)10-0795-06

Differentiation of benign and malignant breast lesions: a comparative study of intravoxel incoherent motion and quantitative dynamic contrast enhanced-magnetic resonance imaging SUN Ruihong¹, JIANG Zhaoxia², MENG Fanhua¹, YIN Huabin¹, TANG Wenlin³, SHEN Lijuan^{1,2} (1. Department of Radiology, the Fifth People's Hospital of Shanghai, Fudan University, Department of Gynecology and Obstetrics, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200240, China; 2. Department of Radiology, Fudan University Shanghai Cancer Center, Department of Oncology, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China; 3. Siemens Healthcare, Shanghai 201600, China)

Correspondence to: SHEN Lijuan E-mail: 13817959783@163.com

[Abstract] **Background and purpose:** Breast cancer is one of the most common malignant tumors among women. Intravoxel incoherent motion (IVIM) is a functional imaging technique based on the theory of biexponential model developed in recent years, which can exhibit diffusion and perfusion effects. This study aimed to investigate the

reproducibility of IVIM parameters and the value in the diagnosis of breast lesions, comparing with quantitative dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging (DCE-MRI) parameters, to explore whether correlations exist among perfusion parameters. **Methods:** A prospective study was performed in 56 patients with pathologically confirmed benign lesions ($n=30$), malignant tumors ($n=31$). All patients underwent DCE-MRI and IVIM imaging. Two radiologists measured the images independently to obtain the parameters from IVIM (D, D^*, f) and DCE-MRI ($K^{\text{trans}}, K_{\text{ep}}, V_e$). The data consistency between two observers was calculated with intraclass correlation coefficient (ICC). All parameters were statistically compared between benign lesions and malignant tumors using independent sample t test. The receiver operating characteristic (ROC) curve was used to evaluate the ability of the parameters in differentiation of benign and malignant breast lesions. Pearson correlation analyses were used among the IVIM and DCE-MRI parameters. **Results:** The agreement between 2 radiologists was good for all parameters ($\text{ICC} \geq 0.730, P < 0.05$). D value was significantly lower in malignant lesions than in benign lesions, while the f, K^{trans} and K_{ep} values were higher than those in benign lesions ($P < 0.05$). The D^* and V_e values showed no differences between benign and malignant breast lesions ($P > 0.05$). The areas under the ROC curve for D, f, K^{trans} and K_{ep} were 0.896, 0.677, 0.796 and 0.847, respectively. There was no significant difference in the area under ROC curve between D and K^{trans} , neither between the D and K_{ep} ($P > 0.05$). The D value showed higher specificity (86.67%) with the threshold of $1.07 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$. The K_{ep} value showed higher sensitivity (98.36%) with the threshold of 0.54/min. The f value exhibited a positive correlation with K^{trans} and K_{ep} value with r of 0.373 and 0.360 ($P < 0.05$), respectively. D^* was also poorly correlated positively with K^{trans} with an r of 0.294. **Conclusion:** The IVIM parameters showed good reproducibility between different radiologists. Both IVIM and DCE-MRI could be helpful in differentiating between benign and malignant breast lesions with positive correlation of the perfusion fraction.

[Key words] Breast neoplasms; Magnetic resonance imaging; Comparative study; Reproducibility

乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤之一, 早期诊断和及时治疗对疾病的发展和预后有重要的意义。磁共振成像具有软组织分辨率高、多序列及多参数成像、无辐射损伤等优点, 其中动态增强MRI(dynamic contrast enhanced-magnetic resonance imaging, DCE-MRI)通过药代动力学模型获得血流动力学参数, 可定量评价组织的血流灌注信息。研究表明, DWI有助于诊断及鉴别诊断乳腺良恶性病变^[1-4], 然而表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)没有区分微循环灌注效应的影响^[5-6]。

体素内不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)扩散加权成像技术, 可定量评价单纯扩散和微循环灌注两种信息, 能更准确的反映活体内水分子的扩散特征。IVIM技术在肿瘤疾病的诊断方面研究越来越多, 其各参数值对同一肿瘤病变的诊断阈值和诊断效能不尽相同^[7], 因此, 客观评估各参数值的可重复性非常重要。以往IVIM参数的可重复性在腹部器官中研究较多^[8-9], 目前亦有在动物乳腺肿瘤中的报道^[10], 但是在人体中却鲜见报道。该研

究旨在探讨IVIM参数的可重复性, 并比较IVIM和DCE-MRI各参数鉴别诊断乳腺良恶性病变的价值, 以及IVIM灌注相关参数与DCE-MRI的相关性。

1 资料和方法

1.1 研究对象

本研究为前瞻性研究, 且通过了复旦大学附属上海市第五人民医院伦理委员会的批准, 所有受试者检查前均签署了知情同意书。收集2015年10月—2017年4月复旦大学附属上海市第五人民医院收治的符合以下标准的患者纳入研究。纳入标准: ① MRI检查前未进行过任何治疗及穿刺活检等有创性检查; ② MRI检查后2周内经手术获得明确病理结果; ③ MRI图像完整且质量佳, 可以用于诊断。

1.2 MRI扫描方法

采用德国Siemens Avanto 3.0T超导型MR扫描仪, 8通道乳腺专用相控线圈。患者取俯卧位, 双侧乳房自然悬垂于线圈内。

先行常规定位扫描、轴位T₁WI、轴位脂肪抑制T₂WI序列扫描。IVIM序列：采用单次激发平面回波成像序列，TR 6 600 ms，TE 59 ms，矩阵192×192，FOV 340 mm×340 mm，层厚5 mm，层距1 mm。采用12个b值(0、50、100、150、200、300、400、500、600、800、1 000和1 200 s/mm²)，b值为0~400 s/mm²时，激励次数2，b值为500~1 200 s/mm²时，激励次数3，扫描时间9 min 41 s。

DCE-MRI检查采用T1时间分辨交叉随机轨道成像(TWIST)序列：

① T₁ mapping序列：TR 7.38 ms，TE 3.28 ms，矩阵192×160，FOV 340 mm×340 mm，层厚5 mm，无间距扫描，反转角6°、12°，扫描时间均为17 s。② DCE-MRI检查：反转角12°，其余参数同上，共采集40期，在第5期扫描结束之后，通过高压注射器经肘静脉注入对比剂钆喷酸葡胺，剂量为0.2 mmol每千克体质量，注射速度为3 mL/s，注射结束后追加20 mL 0.9%的NaCl溶液冲管，每期扫描时间9 s(第1期为17 s)，总扫描时间6 min 20 s。

1.3 MRI图像分析

由1名放射科主治医师和1名副主任医师对图像独立进行评估，每次分别测量两次后取平均值，一周后重复测量，最后得到4组数据。DCE-MRI定量参数：将原始图像导入德国Siemens Tissue 4D软件，选取病灶最大层面，手动绘制感兴趣区(region of interest, ROI)，尽量包括病变实性部分，面积略小于病灶来避免容积效应，尽可能避开囊变、坏死区及病变周围正常组织。采用Tofts两室模型，动脉输入函数(arterial input function, AIF)为slow，获得ROI的时间-信号强度曲线及定量参数，包括容量转移常数(K^{trans})、速率常数(K_{ep})和血管外细胞外间隙容积比(V_e)。IVIM参数：将原始图像导入MADC软件，参照DCE-MRI所选取的ROI，尽量在IVIM-DWI图像上相同部位勾画出2个大小一致的ROI，获得单纯扩散系数(D)、假性扩散系数(D^*)和灌注分数(f)。

1.4 统计学处理

应用SPSS 19.0软件和MedCalc 15.2软件进行统计学分析。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficients, ICC)比较2名医师观察者内部和观察者之间的一致性。取2名医师测量值的平均值，计量资料采用K-S检验，正态分布数据用 $\bar{x}\pm s$ 表示。采用独立样本t检验比较乳腺良恶性病变各参数值的差异。绘制ROC曲线评价各参数值的诊断效能，采用Z检验比较各参数的曲线下面积(area under roc curve, AUC)，根据Youden指数确定最佳诊断阈值。采用Pearson相关分析比较IVIM灌注参数与DCE-MRI参数的相关性($r<0.5$ 为弱相关， $0.5\leq r<0.8$ 为中等相关， $0.8\leq r<1.0$ 为强相关)。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 病理诊断

56例患者纳入研究，全部为女性患者，其中多发者5例，共61个病灶，均为肿块样病变，年龄17~72岁，平均年龄(49±11)岁。31个恶性病灶中，浸润性导管癌24个，浸润性小叶癌2个，导管原位癌4个，恶性淋巴瘤1个。30个良性病变，包括纤维腺瘤16个，腺病4个，纤维腺瘤伴腺病2个，导管内乳头状瘤6个，良性分叶状肿瘤1个，炎症反应1个。

2.2 2名放射科医师测量值的一致性

观察者内部和观察者之间D值可重复性最佳， D^* 、 f 值一致性较好，ICC值均大于等于0.730(P<0.05，表1)。

2.3 乳腺良恶性病变IVIM参数和DCE-MRI参数

乳腺恶性病变的D值低于良性病变，f值则高于良性病变，差异有统计学意义，而 D^* 值差异无统计学意义。乳腺恶性病变的 K^{trans} 、 K_{ep} 值均高于良性病变，差异有统计学意义(图1~2)；两组间 V_e 值差异无统计学意义(表2)。

2.4 IVIM和DCE-MRI各参数的诊断效能

D 、 f 、 K^{trans} 和 K_{ep} 值鉴别诊断乳腺良恶性病变的AUC分别为0.896、0.677、0.796和0.847, 其中 D 与 f 值、 f 与 K_{ep} 值、 K^{trans} 与 K_{ep} 之间AUC

差异有统计学意义($Z=2.820$ 、 2.308 、 1.982 , $P<0.05$), 而 D 与 K^{trans} 、 D 与 K_{ep} 及 f 与 K^{trans} 之间AUC差异均无统计学意义($Z=1.448$ 、 0.833 、 1.522 , $P>0.05$, 图3, 表3)。

表1 观察者内部和观察者之间IVIM参数值的可重复性比较

Tab. 1 Comparison of the repeatability of the IVIM parameters between the inter-observer and intra-observer

Item	D		D^*		f	
	ICC	95%CI	ICC	95%CI	ICC	95%CI
Intra-observer	0.990	0.983-0.994	0.886	0.810-0.931	0.934	0.891-0.961
Inter-observer	0.904	0.840-0.942	0.730	0.551-0.838	0.871	0.786-0.923

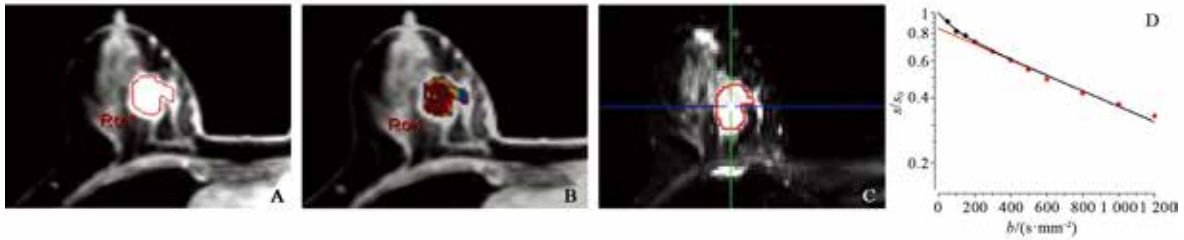


图1 乳腺恶性病变MRI诊断图像

Fig. 1 Malignant breast lesion by MRI

A 54-year-old female patient with right breast invasive ductal carcinoma. A: The lesion on DCE-MRI image with ROI placement for the lesion; B: The color image of the perfusion map and the red area in the mass indicating the high volume of blood perfusion, $K^{trans}=0.97/\text{min}$, $K_{ep}=2.00/\text{min}$, $V_e=0.49$; C: The lesion showed high signal on IVIM image with ROI placement for the lesion; D: The biexponential model fitting curve, $D=0.84 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, $D^*=9.94 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, $f=15.50\%$

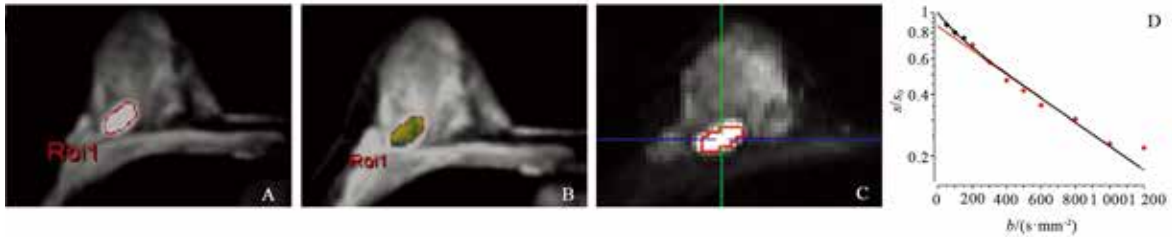


图2 乳腺良性病变MRI诊断图像

Fig. 2 Benign breast lesion by MRI

A 43-year-old female patient with right breast fibroadenoma. A: The lesion on DCE-MRI image with ROI placement for the lesion; B: The color image of the perfusion map and the yellow area in the mass indicating the low volume of blood perfusion, $K^{trans}=0.08/\text{min}$, $K_{ep}=0.33/\text{min}$, $V_e=0.19$; C: The lesion showed high signal on IVIM image with ROI placement for the lesion; D: The biexponential model fitting curve, $D=1.35 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, $D^*=8.45 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, $f=9.87\%$

表2 乳腺病变患者IVIM、DCE-MRI各参数比较

Tab. 2 The comparison of IVIM and DCE-MRI parameters in breast lesions

Item	$D/(\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s})$	$D^*/(\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s})$	$f/\%$	$K^{trans} \text{ t}/\text{min}$	$K_{ep} \text{ t}/\text{min}$	V_e
Benign	1.42±0.37	7.23±1.36	12.21±4.00	0.36±0.25	0.82±0.48	0.36±0.15
Malignant	0.90±0.18	7.52±2.17	13.97±2.34	0.70±0.36	2.14±1.53	0.38±0.13
t	7.126	-0.623	-2.099	-3.207	-4.224	-0.535
P value	<0.01	>0.05	<0.01	<0.01	<0.01	>0.05

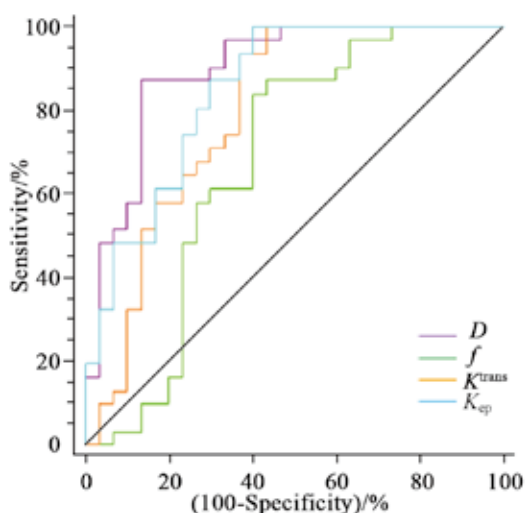


图3 各参数鉴别乳腺良恶性病变的ROC曲线

Fig. 3 Comparison of ROC curves of all parameters for breast cancers and benign lesions

表3 各参数鉴别诊断乳腺良恶性病变的效能

Tab. 3 Diagnostic performance for all parameters between benign and malignant lesions

Item	AUC	Threshold	Sensitivity/%	Specificity/%
$D/(10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s})$	0.896	1.07	87.10	86.67
$f/\%$	0.677	11.77	83.87	60.00
$K^{\text{trans}} t/\text{min}$	0.796	0.25	93.55	63.33
$K_{\text{ep}} t/\text{min}$	0.847	0.54	98.36	60.00

2.5 IVIM灌注相关参数与DCE-MRI参数的相关性

采用Pearson相关分析发现, f 与 K^{trans} 、 K_{ep} 值呈弱正相关, 相关系数 r 分别为0.373、0.360, 差异有统计学意义($P < 0.05$), D^* 与 K^{trans} 值呈弱正相关($r = 0.294$, $P = 0.021$)。而 f 与 V_e 值($r = -0.045$, $P = 0.728$)、 D^* 与 K_{ep} 值($r = 0.236$, $P = 0.067$)及 D^* 与 V_e 值($r = 0.015$, $P = 0.909$)均无相关性。

3 讨论

DWI可无创检测活体内水分子的扩散运动情况, 已经广泛应用于临床。然而体素内组织信号的衰减受组织扩散和微血管灌注共同作用, ADC值并不能真实地反映组织水分子的扩

散特征。1986年, Le Bihan等^[11]提出IVIM扩散加权成像技术, 可以定量评价水分子扩散和微循环灌注两种信息, 能更准确地反映生物组织的病理生理改变。根据双指数模型理论, 采用小 b 值成像, 微血管灌注对组织信号衰减影响较大; 采用大 b 值成像, 主要与组织细胞密度相关, 单纯水分子的扩散效应显著。

乳腺恶性肿瘤细胞异常增殖, 细胞密度增加, 细胞外间隙减小; 同时细胞膜通透性降低, 引起组织扩散受限明显, 均会导致 D 值减低。本研究结果显示, 乳腺恶性病变的 D 值低于良性病变, 差异有统计学意义。这与其他学者的研究结果一致^[12-13], 表明 D 值有助于诊断及鉴别诊断乳腺良恶性病变。 D^* 值与微循环血流速度、平均毛细血管长度相关。本研究结果显示, D^* 值在乳腺良恶性病变间差异无统计学意义。在一项有关年龄、月经状态对乳腺IVIM成像影响的研究中, 发现绝经后受试者正常乳腺组织 D^* 值明显低于绝经前, 且绝经前 D^* 值(低、中年组)随月经周期波动^[14]。然而本研究中并没有考虑年龄和月经周期等潜在的影响因素, 可能对 D^* 值的准确性有一定影响。Song等^[10]对大鼠乳腺肿瘤行IVIM检查, 发现 D^* 值的可重复性比ADC值和 D 值差, 本研究中 D^* 值的可重复性尚可。

f 值为灌注分数, 与组织微循环的血容量相关。本研究中, 乳腺良恶性病变之间 f 值差异有统计学意义, 且恶性病变 f 值高于良性病变, 这与大部分学者的研究结果一致^[15-16]。本研究同时显示 f 值的可重复性较好, f 值能较好地反映组织的血流灌注信息。然而本研究所得 f 值较低。本研究绘制ROI时避开了病灶边缘部分, 所选病灶的面积较小, 可能是导致 f 值偏低的一个原因。

对鉴别乳腺良恶性病变差异有统计学意义的参数, 采用ROC曲线分析其诊断效能, 其中 D 值AUC最大(0.896), 且 D 与 K^{trans} 、 K_{ep} 值之间AUC差异无统计学意义, 表明IVIM和DCE-MRI对鉴别乳腺良恶性病变有相似的诊断效能, 均具有较大价值。分别以 $1.07 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ 、 $0.54/\text{min}$ 为

诊断阈值, D 值特异度最高(86.67%), K_{ep} 值的灵敏度最高(98.36%)。

本研究中, 乳腺恶性病变的 f 、 K^{trans} 和 K_{ep} 值大于良性病变, 差异均有统计学意义, 且 f 与 K^{trans} 、 K_{ep} 值均呈正相关。这与Liu等^[13]的结果相似, 说明IVIM和DCE-MRI两种不同成像方法在反映组织血流灌注方面存在一致性, 亦有学者在神经系统研究中得到相似的结论^[17]。此外, 本研究中 f 、 D^* 值显示出较高的可重复性, 提示 f 、 D^* 值无需使用外源性对比剂, 为肾功能不全及对比剂过敏的患者提供了获取病变组织灌注变化的可能性。

本研究的局限性: ① 研究样本量较小, 且病理类型相对单一, 本研究恶性病变以乳腺浸润性导管癌居多, 可能存在采样误差。② 本研究采用人工手动勾画ROI, 可能存在测量误差, 在本研究的可重复性检查中发现人工勾画一致性较差。③ 本研究应用西门子核磁共振, 可选择的低 b 值($b < 200 \text{ s/mm}^2$)数量较少, 目前 b 值大小和数量的选取尚无统一参考值。④ 患者在纳入研究时没有考虑患者的年龄和月经周期等因素。以上均有待于后续过程中进一步增加样本量探讨相关的影响因素。

综上所述, IVIM参数在不同医师分析中重复性较好, IVIM与DCE-MRI对鉴别诊断乳腺恶性病变均有较大的价值, 两种成像方法均可反映组织灌注情况, 并存在正相关性。

【参 考 文 献】

- [1] 闵庆华, 杨 军, 邵康为, 等. 乳腺弥散加权成像在乳腺疾病中的作用 [J]. 中国癌症杂志, 2015(8): 602-607.
- [2] SHARMA U, SAH R G, AGARWAL K, et al. Potential of diffusion-weighted imaging in the characterization of malignant, benign, and healthy breast tissues and molecular subtypes of breast cancer [J]. Front Oncol, 2016, 6: 126.
- [3] BOZKURT B T, KOC G, SEZGIN G, et al. Value of apparent diffusion coefficient values in differentiating malignant and benign breast lesions [J]. Balkan Med J, 2016, 33(3): 294-300.
- [4] 沈丽娟, 孟凡华, 孙瑞红, 等. 采用表观扩散系数直方图分析法诊断乳腺肿块样病变的价值 [J]. 肿瘤影像学, 2017, 26(2): 114-120.
- [5] LE BIHAN D. Apparent diffusion coefficient and beyond: what diffusion MR imaging can tell us about tissue structure [J]. Radiology, 2013, 268(2): 318-322.
- [6] IIMA M, LE BIHAN D. Clinical intravoxel incoherent motion and diffusion MR imaging: past, present, and future [J]. Radiology, 2016, 278(1): 13-32.
- [7] SHEN L, ZHOU L, LIU X, et al. Comparison of biexponential and monoexponential DWI in evaluation of Fuhrman grading of clear cell renal cell carcinoma [J]. Diagn Interv Radiol, 2017, 23(2): 100-105.
- [8] BARBIERI S, DONATI O F, FROEHLICH J M, et al. Comparison of intravoxel incoherent motion parameters across MR imagers and field strengths: evaluation in upper abdominal organs [J]. Radiology, 2016, 279(3): 784-794.
- [9] DYYORNE H, JAJAMOVICH G, KAKITE S, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion imaging of the liver: optimal b -value subsampling and impact on parameter precision and reproducibility [J]. Eur J Radiol, 2014, 83(12): 2109-2113.
- [10] SONG Y S, PARK C M, LEE S M, et al. Reproducibility of histogram and texture parameters derived from intravoxel incoherent motion diffusion-weighted MRI of FN13762 rat breast Carcinomas [J]. Anticancer Res, 2014, 34(5): 2135-2144.
- [11] 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.
- [12] BOKACHEVA L, KAPLAN J B, GIRI D D, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted MRI at 3.0 T differentiates malignant breast lesions from benign lesions and breast parenchyma [J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 40(4): 813-823.
- [13] LIU C, WANG K, CHAN Q, et al. Intravoxel incoherent motion MR imaging for breast lesions: comparison and correlation with pharmacokinetic evaluation from dynamic contrast-enhanced MR imaging [J]. Eur Radiol, 2016, 26(11): 3888-3898.
- [14] 王庆军, 王代兵, 张 静, 等. 年龄、月经状态对乳腺磁共振体素内不相干运动成像的影响 [J]. 中华临床医师杂志(电子版), 2015(17): 3238-3243.
- [15] SIGMUND E E, CHO G Y, KIM S, et al. Intravoxel incoherent motion imaging of tumor microenvironment in locally advanced breast cancer [J]. Magn Reson Med, 2011, 65(5): 1437-1447.
- [16] CHO G Y, MOY L, KIM S G, et al. Evaluation of breast cancer using intravoxel incoherent motion (IVIM) histogram analysis: comparison with malignant status, histological subtype, and molecular prognostic factors [J]. Eur Radiol, 2016, 26(8): 2547-2558.
- [17] 任 彦, 庞浩鹏, 狄宁宁, 等. 脑胶质瘤体素内不相干运动弥散加权成像与T1动态对比增强磁共振成像相关性研究 [J]. 肿瘤影像学, 2016, 25(3): 223-232.

(收稿日期: 2017-04-10 修回日期: 2017-08-02)