

单、双指数模型 DWI 在良恶性肺结节鉴别诊断中的应用

洪琴, 江建芹, 崔磊, 胡春洪, 王玉玲, 徐高峰

【摘要】 目的:比较磁共振单、双指数模型 DWI 定量参数对肺结节良恶性的鉴别诊断价值。**方法:**对 32 例肺结节患者(男 15 例,女 17 例;良性 11 例,恶性 21 例;直径 1.5~2.9 cm)行 3.0T 磁共振单指数($b=0, 300$ 和 800 s/mm^2)及体素内不相干运动(IVIM)双指数(10 个 b 值, $b=0\sim 1000 \text{ s/mm}^2$)DWI 扫描。两位测量者分别在 DWI($b=800 \text{ s/mm}^2$)、ADC 图及 IVIM 图像上测量病灶/脊髓信号比值(LSR_{800})、 ADC_{mean} 、 ADC_{min} 、 D 、 D^* 和 f 值。采用组内相关系数(ICC)评价测量者间的一致性。采用独立样本 t 检验(正态分布)比较各参数值在良恶性肺结节间的差异。使用 ROC 曲线分析获得鉴别肺结节良恶性的最佳参数和最佳阈值。**结果:**IVIM 灌注参数中 D^* 的测量者间可重复性相对较差($\text{ICC}=0.710$)。恶性肺结节的 ADC_{mean} 明显低于良性肺结节 $[(1.25 \pm 0.21) \times 10^{-3} \text{ vs } (1.51 \pm 0.33) \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}; t=2.749, P=0.010]$,其余参数值在两组间的差异无统计学意义($P=0.081\sim 0.491$)。以 $\text{ADC}_{\text{mean}}=1.44 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ 为阈值,诊断恶性肺结节的敏感度为 81.0%、特异度为 72.7%,ROC 曲线下面积为 0.788。**结论:**建议采用单层 ROI 法测得的 ADC 均值进行肺结节的诊断,尚需改进 IVIM 扫描及后处理策略来提高其对肺部小病灶的诊断能力。

【关键词】 肺结节; 肺肿瘤; 磁共振成像; 扩散加权成像; 体素内不相干运动

【中图分类号】 R734.2; R445.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2018)12-1256-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2018.12.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Value of diffusion-weighted imaging based on monoexponential and biexponential models in differentiating benign and malignant lung nodules HONG Qin, JIANG Jian-qin, CUI Lei, et al. Department of Radiology, the First People's Hospital of Yancheng City, Jiangsu 224000, China

【Abstract】 Objective: To compare the value of quantitative parameters of diffusion-weighted imaging based on monoexponential and biexponential models in differentiation diagnosis of benign and malignant pulmonary nodules. **Methods:** Thirty-two patients with lung nodules (15 male and 17 female; 11 benign and 21 malignant; size 1.5~2.9cm) underwent diffusion-weighted imaging based on monoexponential model ($b=0, 300$, and 800 s/mm^2) and intravoxel incoherent motion (IVIM) technique (10 b -values, $0\sim 1000 \text{ s/mm}^2$) at a 3.0T MR scanner. Regions of interest were outlined along the borders of the lesions on DWI ($b=800 \text{ s/mm}^2$), ADC maps and IVIM images to obtain LSR_{800} , ADC_{mean} , ADC_{min} , D , D^* and f values by two independent observers. Interobserver reproducibility was assessed by interclass correlation coefficients (ICCs). Independent sample t -test (normality) was used to compare the differences of DWI parameters between benign and malignant lung nodules. Receiver operating characteristic (ROC) curves were generated to obtain the preferred parameter and its threshold. **Results:** Compared with the other IVIM parameters, the interobserver agreement of D^* was relatively poor ($\text{ICC}=0.710$). The ADC_{mean} of malignant pulmonary nodules was significantly lower compared with that of benign pulmonary nodules $[(1.25 \pm 0.21) \times 10^{-3} \text{ vs } (1.51 \pm 0.33) \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}; t=2.749, P=0.010]$, while the other parameters revealed no significant differences ($P=0.081\sim 0.491$). When the ADC_{mean} threshold was $1.44 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, the sensitivity was 81.0% and the specificity was 72.7%, and the area under the curve (AUC) was 0.788. **Conclusion:** The ADC_{mean} value obtained by

作者单位: 224000 江苏, 盐城市第一人民医院影像科(洪琴、江建芹、王玉玲、徐高峰); 226001 江苏, 南通大学第二附属医院影像科(崔磊); 215006 江苏, 苏州大学附属第一医院影像科(胡春洪)

作者简介: 洪琴(1983-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主治医师, 主要从事胸部影像诊断工作。

通讯作者: 徐高峰, E-mail: xugaofengradiology@163.com

基金项目: 江苏省 2017 年高层次卫生人才“六个一工程”拔尖人才项目资助课题(LGY2017037); 盐城市医学科技发展计划项目(YK2017021)

single-slice ROI has the best diagnostic efficacy for the differentiation diagnosis of lung nodules. It is necessary to improve the IVIM scan and post-processing strategies to improve its diagnostic ability of small lung lesions.

【Key words】 Lung nodule; Pulmonary tumor; Magnetic resonance imaging; Diffusion-weighted imaging; Intravoxel incoherent motion

肺结节的诊断一直是临床的重点及难点。早期肺癌的 5 年生存率为 77%~92%，中晚期及晚期肺癌的 5 年生存率不足 40%^[1]，因此，早期诊断是决定患者预后的关键因素。磁共振扩散加权成像（diffusion-weighted imaging, DWI）是在传统 MRI 形态学诊断的基础上，对组织内水分子运动进行定量评估的功能成像技术，是一种无创、无辐射和无需对比剂的检查方法。近年来已有相关研究结果表明，DWI 定量参数如表观扩散系数（apparent diffusion coefficient, ADC）及病灶/脊髓信号比值等在良恶性肺部病灶的鉴别诊断中有潜在应用价值^[2-4]。

但是由于 b 值设定的限制，单指数模型法测量的 ADC 值不同程度地混入了组织的灌注效应。DWI 的体素内不相干运动（intravoxel incoherent motion, IVIM）模型中利用了多个从低到高的 b 值，可以将水分子的真性扩散与微循环灌注形成的假性扩散区分开，得到纯扩散参数（D），且可在不使用外源性对比剂的情况下得到组织灌注的相关参数（D*）和灌注分数（f），可为肺结节的评估提供更多的信息^[5]。目前，已有数篇文献报道了 IVIM 对良恶性肺部病灶的诊断价值，但这些研究结果间存在争议^[6-9]。肺结节是指肺内直径小于 3 cm 的孤立性类圆形病灶^[10]。目前，还没有学者在研究中将肺结节单独进行比较。

因此，本研究旨在评价 DWI 单指数模型定量参数及 IVIM 参数在良恶性肺结节中的鉴别诊断价值，为肺结节的临床评估提供理论依据。

材料与方法

1. 一般资料

本研究获得本院伦理委员会批准，所有受检者检查前签署了知情同意书。纳入标准：①CT 拟诊为孤立性肺结节，病灶最大径≥1.5 cm 但≤3 cm，且磨玻璃、钙化、坏死和空洞成分小于病灶体积的 1/3^[11]；②检查前未行任何抗肿瘤治疗及穿刺、支气管镜等侵入性检查，检查后一个月内有组织病理学结果；③无 MRI 检查禁忌，并且能配合完成检查者。排除标准^[12-13]：图像质量差，存在严重的磁敏感伪影或运动伪影（3 例）；病理结果为交界性肿瘤，如炎性肌纤维母细胞瘤（1 例）。

2015 年 8 月—2017 年 7 月共 32 例患者（32 个病

灶）纳入本研究。其中男 15 例，女 17 例；年龄 44~77 岁，平均年龄（59.3±11.9）岁。所有患者均经病理证实，其中经手术证实 20 例，经皮肺穿刺活检证实 5 例，经纤维支气管镜活检 5 例，胸水找到癌细胞 2 例。病灶直径 1.5~2.9 cm，平均（2.27±0.35）cm。

2. 检查方法

使用 Siemens Verio Tim 3.0T 磁共振扫描仪和 8 通道相控阵体表线圈。患者取仰卧位头先进，扫描范围自胸廓入口至肺下界。扫描序列包括常规平扫、DWI 及 IVIM，扫描参数如下。①冠状面单次激发 FSE T₂WI：TR 1200 ms，TE 83 ms，矩阵 288×288，视野 36 cm×36 cm，层厚 6.0 mm，层间距 7.2 mm，扫描层数 20，两次屏气完成扫描；②横轴面脂肪抑制 T₁WI 容积内插屏气扫描（volumetric interpolated breath hold examination, VIBE）：TR 4.22 ms，TE 1.9 ms，矩阵 288×288，视野 38 cm×31 cm，层厚 3 mm，层间距 3 mm，扫描层数 72，一次屏气完成扫描；③横轴面呼吸触发脂肪抑制 T₂WI：TR 2000 ms，TE 90 ms，矩阵 320×320，视野 36 cm×36 cm，层厚 5.0 mm，层间距 6.5 mm，扫描层数 28。④单指数 DWI 及 IVIM-DWI 的扫描参数见表 1。

表 1 单指数 DWI 及 IVIM-DWI 的扫描参数

参数	DWI	IVIM
b 值(s/mm ²)	0,300,800	0,50,100,150,200,250,300,500,800,1000
采集方式	自由呼吸	自由呼吸
TR/TE(ms)	7300/71	7600/67
带宽(Hz/pixel)	2314	2442
矩阵	128×160	128×160
视野(mm)	380×310	360×310
层厚(mm)	5.0	6.0
层间距(mm)	1.0	0.6
并行采集因子*	2	2
采集时间(s)	226	661

注：DWI 序列均联合基于 K 空间算法的并行采集技术（generalized autocalibrating partially parallel acquisition, GRAPPA）。

3. 数据处理及分析

选择 DWI（b=800 s/mm²）上病灶信号强度（signal intensity, SI）最高的层面，沿着病灶的边缘勾勒 ROI，测量病灶的 SI；同时，在同一层面沿着脊髓的边缘勾画圆形 ROI，测量脊髓的 SI。计算病灶与脊髓 SI 的比值（ratio of SI_{lesion}-to-SI_{spinal cord}, LSR₈₀₀）。

参考 T₂WI 及 DWI 图像，确定肿瘤的最大层面，

在相应的 ADC 图上沿着病灶的边缘手动勾画 ROI^[11,14],避开肉眼所见的钙化、血管、坏死和伪影等,记录软件自动计算所得的 ADC 均值(ADC_{mean})和 ADC 最小值(ADC_{min}),测量 3 次取平均值。

使用德国癌症研究中心开发的图像处理软件(medical imaging interaction toolkit, MITK)进行图像后处理,将多 b 值 DWI 图像($b=0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 500, 800$ 和 1000 s/mm^2)加载到 MITK 软件的 IVIM 模块下,将 b 值调至 200 s/mm^2 进行测量。ROI 选择方法同 ADC 值,即在病灶的最大层面沿着病灶的边缘手动勾勒,避开肉眼所见的钙化、血管、坏死和伪影等,记录软件自动计算所得的 f、D 和 D^* 值,测量 3 次取平均值。

以上 ROI 均由两位测量者(测量者 A 有 10 年 MRI 阅片经验,测量者 B 有 4 年 MRI 阅片经验)分别独立进行测量并记录各参数值。每位测量者每次扫描图像均测量 2 次,间隔至少 2 周。

4. 统计学分析

使用 SPSS 20.0 统计学软件进行数据分析。测量者间及测量者不同时间测量值的一致性使用组内相关系数(intraclass coefficient, ICC)进行评价, $ICC > 0.75$ 认为一致性较好。所有参数采用 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验,随后采用独立样本 t 检验(正态分布)或非参数检验(非正态分布)比较各参数值在良恶性肺部病灶间的差异。通过 ROC 曲线分析,获得鉴别良恶性肺结节/肿块的最佳参数和最佳阈值。

结 果

1. 病理结果

32 例中良性病变 11 例,其中硬化性肺细胞瘤 4 例、肉芽肿性炎 3 例、结核和局灶性炎症各 2 例;恶性病变 21 例,其中腺癌 16 例、鳞癌 3 例、小细胞癌 2 例。良性组中患者平均年龄为(59.6 ± 9.7)岁,恶性组为(59.2 ± 13.5)岁,组间差异无统计学意义($t=0.077$, $P=0.939$);良性组中病灶直径为(2.15 ± 0.42) mm,恶性组为(2.34 ± 0.29) mm,组间差异无统计学意义($t=-1.525$, $P=0.138$)。良性组中位于右肺上叶、中叶和下叶及/左肺上叶、下叶的病灶数分别为 1、2、3、3 和 2 个,恶性组中相应部位的病灶数分别为 7、2、6、2 和 4 个。

2. 各参数值在测量者间的一致性

除了 D^* 值($ICC=0.716$),其它参数的测量值(ADC_{mean} 、 ADC_{min} 、D、 D^* 、f 和 LSR_{800})显示出较好的测量者间一致性(ICC 分别为 0.848、0.936、0.824、0.939、0.710 和 0.870)。

3. 各参数值在良恶性肺部肿块间的差异

恶性肺结节的 ADC_{mean} 显著低于良性肺结节,差异有统计学意义($t=2.749$, $P=0.010$);而 LSR_{800} 、 ADC_{min} 、D 及 f 值在良恶性肺结节间的差异无统计学意义(图 1~2)。相关测量值及统计分析结果见表 2。

4. ADC 均值诊断良恶性肺结节的效能

ROC 曲线分析结果显示, ADC_{mean} 诊断良恶性肺

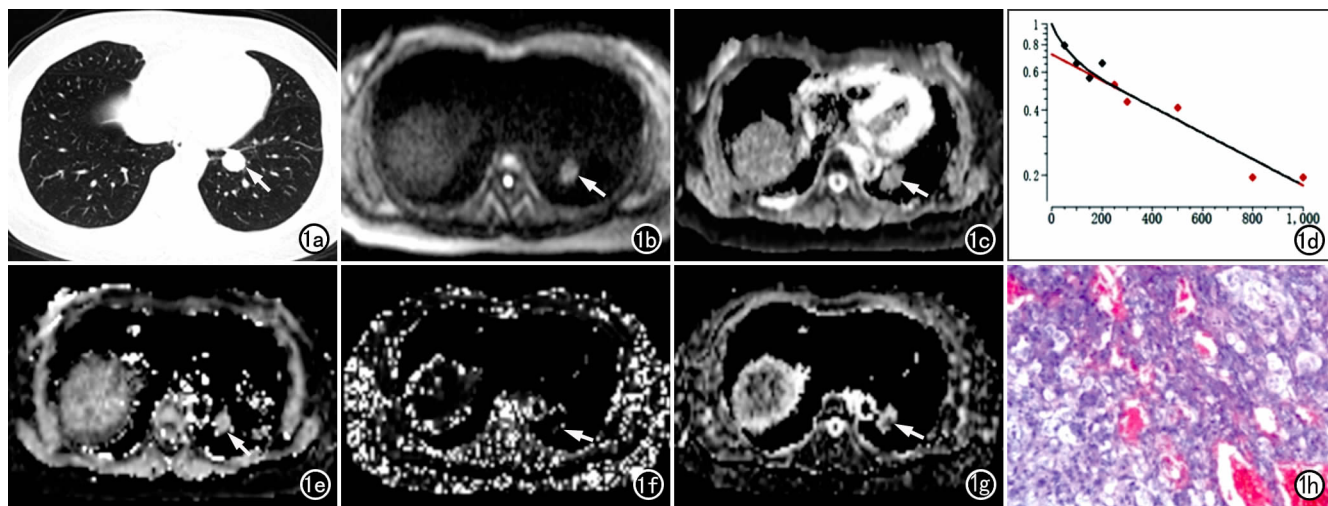


图 1 左肺下叶硬化性细胞瘤。a) CT 显示左肺下叶小结节,边缘光滑,密度均匀(箭); b) DWI 图像($b=800 \text{ s/mm}^2$),显示病灶呈等信号(箭),由于病灶偏小比并靠近膈肌,受呼吸伪影的影响较大,病灶轻微变形, $LSR_{800}=0.571$; c) ADC 图像,显示病灶等信号(箭); d) IVIM 生成的非线性最小二乘法拟合模型(nonlinear least squares, NLLS)曲线图,显示随 b 值的增大病灶信号强度的变化情况,可见有数个点偏离了曲线,提示其数据拟合可能存在误差; e) D 值图像,显示病灶呈等信号(箭); f) D^* 值图像,显示病灶呈低信号(箭); g) f 值图像,显示呈高信号(箭); h) 病理片镜下示肿瘤内可见乳头状区、硬化区和出血区($\times 100$, HE)。

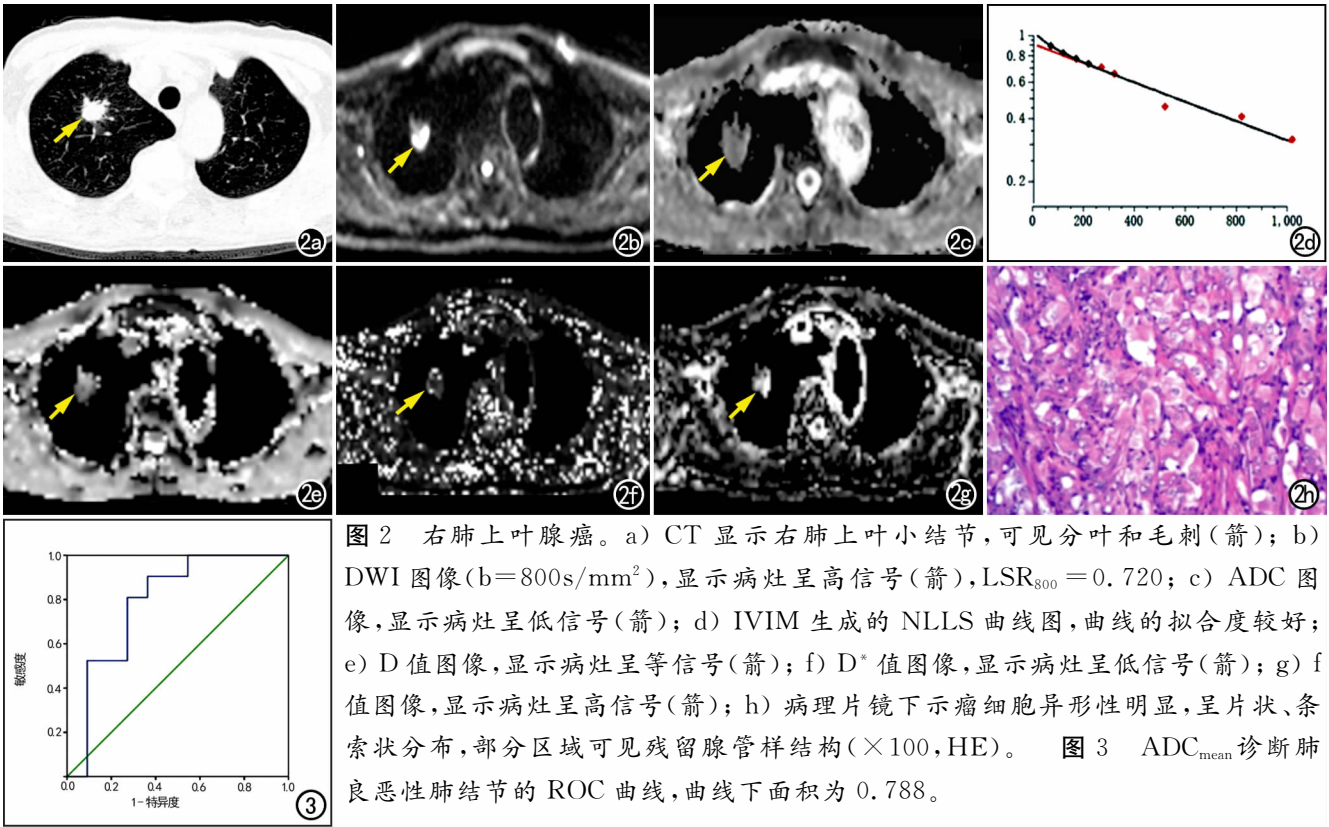


图 2 右肺上叶腺癌。a) CT 显示右肺上叶小结节,可见分叶和毛刺(箭); b) DWI 图像($b=800\text{s/mm}^2$),显示病灶呈高信号(箭), $LSR_{800}=0.720$; c) ADC 图像,显示病灶呈低信号(箭); d) IVIM 生成的 NLLS 曲线图,曲线的拟合度较好; e) D 值图像,显示病灶呈等信号(箭); f) D^* 值图像,显示病灶呈低信号(箭); g) f 值图像,显示病灶呈高信号(箭); h) 病理片镜下示瘤细胞异形性明显,呈片状、条索状分布,部分区域可见残留腺管样结构($\times 100$, HE)。图 3 ADC_{mean} 诊断肺良恶性肺结节的 ROC 曲线,曲线下面积为 0.788。

结节的曲线下面积(area under ROC curve, AUC)为 0.788(图 3),以 $1.44\times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$ 为临界值,诊断恶性肺结节的敏感度为 81.0%、特异度为 72.7%。

表 2 良恶性肺结节各参数测量值及统计分析结果

参数	恶性	良性	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
LSR_{800}	1.04 ± 0.41	0.76 ± 0.44	-1.807	0.081
$ADC_{mean}(\times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s})$	1.25 ± 0.21	1.51 ± 0.33	2.749	0.010
$ADC_{min}(\times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s})$	0.64 ± 0.23	0.70 ± 0.28	0.697	0.491
$DC(\times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s})$	1.14 ± 0.28	1.23 ± 0.42	0.746	0.462
f (%)	19.72 ± 10.36	23.73 ± 8.65	1.099	0.281

讨 论

1. ADC 值

由于恶性肿瘤细胞密度高,水分子扩散受限,在 DWI 图像上表现为高信号,ADC 图上呈低信号;而良性病灶的 ADC 值明显高于恶性肿瘤,在 ADC 图上多表现为相对高信号^[4,15]。目前大多数研究中选择的是病灶的 ADC 均值进行分析,且良恶性病灶的 ADC 值差异已被较多研究所证实,相关的 Meta 分析亦显示这些研究结果间的一致性^[2,4,6,16]。本研究结果与文献报道基本一致,证实了 ADC 均值可作为预测肺结节良恶性的有价值的生物学指标。本研究中对病灶的分析采用的是单层面 ROI 勾画法,也有研究者认为容积 ROI 法所测量的 ADC 值诊断准确性更高^[9]。但本研究考虑到对于较小的肺结节,所包含的层数较少,而病灶的边缘层面受部分容积效应的影响较大,故采用的是单层 ROI 勾画法。未来需要进一步比较不同

ROI 画法所得的 ADC 值对肺结节诊断效能的差异。

2. ADC 最小值

有研究者认为, ADC_{min} 比 ADC_{mean} 更能代表病灶内水分子扩散受限的程度,且其研究结果显示恶性肺结节的 ADC_{min} 显著低于良性肺结节,而且 ADC_{min} 的诊断效能高于 PET^[4,17]。但目前尚未有研究者对 ADC_{mean} 和 ADC_{min} 在鉴别良恶性肺结节中的诊断价值进行对比分析。本研究结果显示, ADC_{min} 在良恶性肺结节间的差异并无统计学意义。笔者分析认为,可能的原因是本研究中患者的肺结节直径均小于 3 cm,而 ADC_{min} 是个极值,容易受到测量误差的影响。

3. LSR

本研究结果显示,尽管恶性肺结节的病灶与脊髓信号的比值(LSR)有高于良性肺结节的趋势,但 LSR 在良恶性肺结节的鉴别诊断方面并未显示出明显的诊断优势,与相关研究结果较为不一致^[8,18,19]。但这些研究中均未根据病灶的大小进行分组。笔者认为,较小的肺结节,病灶内往往不同程度地混入了空气,且测量时受容积效应的影响较大^[8];此外, DWI 信号还与病灶的病理类型、分化程度及肿瘤分期等因素有关。因此,对于较小的肺结节, LSR 的诊断价值有待商榷。

4. IVIM 参数值

IVIM 是采用双指数模型将水分子扩散和微循环灌注效应区分开,可获得纯扩散参数 D 及灌注参数 D^* 和 f。理论上, D 值比 ADC 值更能反映水分子的扩

散运动状况。Yuan 等^[6]和 Wan 等^[7]研究也证实, D 值的诊断价值高于 ADC 值。但也有研究结果显示 IVIM 参数值在肺病灶良恶性鉴别方面价值不大^[8], 与本研究结果较为一致。可能的原因是肺部 MRI 检查容易受到磁敏感效应以及心跳、呼吸等运动伪影的影响, 图像信噪比较低; 其次是由于 IVIM 扫描时间偏长, 容易因呼吸运动的影响, 病灶的位置发生错配, 从而影响病灶的信号及 IVIM 曲线的拟合, 最终引起 IVIM 参数值的变化, 而这种误差在较小的肺结节中尤为明显^[12]。有多项研究结果显示, 对于 <3 cm 的肺结节, ADC 值及 IVIM 参数值的可重复性相对较差^[12,20]。因此, 未来需要改进 IVIM 扫描及后处理策略, 提高 IVIM 对肺部小病灶的诊断能力。

5. 本研究的局限性

本研究存在一定的局限性: ①样本量偏少, 还需要进一步增大样本量进行更深入的研究; ②由于设备和扫描时间的限制, 选取的 b 值的数量偏少; ③未纳入小于 1.5 cm 的病灶, 是考虑到小于 1.5 cm 的病灶信噪比较低^[11]; ④仅仅比较了病灶的良恶性, 未对病灶的病理类型、分化程度和生物学行为等进行进一步比较。

参考文献:

- [1] Goldstraw P, Chansky K, Crowley J, et al. The IASLC lung cancer staging project: proposals for revision of the TNM stage groupings in the forthcoming (eighth) edition of the TNM classification for lung cancer[J]. *J Thorac Oncol*, 2016, 11(1): 39-51.
- [2] Shen G, Ma H, Liu B, et al. Diagnostic performance of DWI with multiple parameters for assessment and characterization of pulmonary lesions: a meta-analysis[J]. *AJR*, 2018, 210(1): 58-67.
- [3] Chen L, Zhang J, Bao J, et al. Meta-analysis of diffusion-weighted MRI in the differential diagnosis of lung lesions[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2013, 37(6): 1351-1358.
- [4] Shen G, Jia Z, Deng H. Apparent diffusion coefficient values of diffusion-weighted imaging for distinguishing focal pulmonary lesions and characterizing the subtype of lung cancer: a meta-analysis[J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(2): 556-566.
- [5] Le BD, Breton E, Lallemand D, et al. Separation of diffusion and perfusion in intravoxel incoherent motion MR imaging[J]. *Radiology*, 1988, 168(2): 497-505.
- [6] Yuan M, Zhang YD, Zhu C, et al. Comparison of intravoxel incoherent motion diffusion-weighted MR imaging with dynamic contrast-enhanced MRI for differentiating lung cancer from benign solitary pulmonary lesions[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 43(3): 669-679.
- [7] Wan Q, Deng YS, Zhou JX, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted MR imaging in assessing and characterizing solitary pulmonary lesions[J/OL]. *Sci Rep*, 2017, 7: e43257. DOI: 10.1038/srep43257.
- [8] Koyama H, Ohno Y, Seki S, et al. Value of diffusion-weighted MR imaging using various parameters for assessment and characterization of solitary pulmonary nodules[J]. *Eur J Radiol*, 2015, 84(3): 509-515.
- [9] Yuan M, Zhong Y, Zhang YD, et al. Volumetric analysis of intravoxel incoherent motion imaging for assessment of solitary pulmonary lesions[J]. *Acta Radiol*, 2017, 58(12): 1448-1456.
- [10] Austin JH, Müller NL, Friedman PJ, et al. Glossary of terms for CT of the lungs: recommendations of the nomenclature committee of the fleischner society[J]. *Radiology*, 1996, 200(2): 327-331.
- [11] Wang LL, Lin J, Liu K, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted MR imaging in differentiation of lung cancer from obstructive lung consolidation: comparison and correlation with pharmacokinetic analysis from dynamic contrast-enhanced MR imaging[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(8): 1914-1922.
- [12] Jiang J, Yin J, Cui L, et al. Lung cancer: short-term reproducibility of intravoxel incoherent motion parameters and apparent diffusion coefficient at 3T[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 47(4): 1003-1012.
- [13] Jo VY, Fletcher CDM. WHO classification of soft tissue tumours: an update based on the 2013 (4th) edition[J]. *Pathology*, 2014, 46(2): 95-104.
- [14] Cui Y, Zhang C, Li X, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted magnetic resonance imaging for monitoring the early response to ZD6474 from nasopharyngeal carcinoma in nude mouse[J/OL]. *Sci Rep*, 2015, 5: e16389. DOI: 10.1038/srep16389.
- [15] 陈光祥, 屈春晖, 郑婷, 等. MR 扩散加权成像鉴别肺良恶性病变[J]. *放射学实践*, 2013, 28(7): 763-766.
- [16] Henz CN, Watte G, Marchiori E, et al. Magnetic resonance imaging of pulmonary nodules: accuracy in a granulomatous disease-endemic region[J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(9): 2915-2920.
- [17] Çakmak V, Ufuk F, Karabulut N. Diffusion-weighted MRI of pulmonary lesions: comparison of apparent diffusion coefficient and lesion-to-spinal cord signal intensity ratio in lesion characterization[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45(3): 845-854.
- [18] Uto T, Takehara Y, Nakamura Y, et al. Higher sensitivity and specificity for diffusion-weighted imaging of malignant lung lesions without apparent diffusion coefficient quantification[J]. *Radiology*, 2009, 252(1): 247-254.
- [19] Nomori H, Cong Y, Sugimura H, et al. Comparing diffusion-weighted imaging and positron emission tomography for pulmonary nodules measuring from 1 to 3 cm in size[J]. *Surg Today*, 2015, 45(12): 1535-1541.
- [20] 江建芹, 蔡荣芳, 崔磊, 等. 肺癌短期重复扫描 ADC 值和 IVIM 参数值的测量可重复性[J]. *放射学实践*, 2017, 32(11): 1141-1147.

(收稿日期: 2018-03-19 修回日期: 2018-06-15)