

磁共振体素内不相干运动扩散加权成像的原理及应用进展

马彦云 张辉

030001 太原, 山西医科大学第一医院影像科

通信作者: 张辉, Email: zhanghui_mr@163.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2016.06.013

【摘要】 体素内不相干运动扩散加权成像(IVIM-DWI)不仅可以获得多种参数(D值、D*值和f值),而且还具备同时提供扩散与灌注信息、无需对比剂等诸多优势,能够更精细地显示组织微观结构的复杂性,更敏感地体现组织的病理改变,反映疾病的真实性,IVIM-DWI已成为近年来MRI新技术应用研究的热点。笔者以国内外大量文献作为依据,对该技术的基本原理、临床应用现状及进展进行较为全面而简要的阐述。

【关键词】 肿瘤;磁共振成像;体素内不相干运动;扩散加权成像

基金项目: 山西省科技公关社会发展项目(20140313011-14);山西省卫生厅科研项目(201301072);山西省研究生优秀创新基金(20143060)

The basic principle and application progress of intravoxel incoherent motion imaging Ma Yanyun, Zhang Hui

Department of Radiology, the First Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China

Corresponding author: Zhang Hui, Email: zhanghui_mr@163.com

【Abstract】 Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging (IVIM-DWI) not only determines various parameters (D value, D* value, and f value) but also provides diffusion and perfusion information without the contrast agents. IVIM-DWI can show the complexity of the tissue microstructure in a manner more sophisticated than normal and can reflect with high sensitivity the pathological changes of organization. It can confirm the authenticity of the disease. It has become the focus of research in MRI technology in the recent years. Considering data obtained from a large number of local and international studies, we described comprehensively and briefly the basic principle, status, and progress in clinical applications of IVIM-DWI.

【Key words】 Neoplasms; Magnetic resonance imaging; Intravoxel incoherent motion; Diffusion weighted imaging

Fund programs: Public Relations and Social Development of Science and Technology Project of Shanxi Science and Technology Department(20140313011-14); Scientific and Technological Project of Shanxi Province Health Department(201301072); Excellent Innovation Fund for Graduate Students in Shanxi Province(20143060)

体素内不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)是用于描述体素微观运动的一种成像方式,其概念由 Le Bihan 等^[1]首先提出,利用多b值扩散加权成像获得的定量参数,将水分子弥散和微循环血流灌注分开,得到纯扩散系数(D值)和灌注相关扩散系数(D*值)及灌注分数(f值),同时反映生物组织内水分子的弥散和微循环的灌注信息。随着

MR 成像设备和成像技术的不断发展,该技术在疾病的诊断与研究中将会发挥重要的作用。

1 IVIM 成像原理及方法

IVIM 理论基于自旋回波信号对分子运动的敏感性,成像采用梯度敏感的 MRI 技术。生物体内微观运动包括水分子的扩散和血液的微循环。该技

术的前提是假设血液的微循环和灌注是非一致性、无条理的随机运动。通过定量参数分别评价其中的扩散运动成分和血流灌注成分,其信号衰减与所用 b 值间的关系用双指数模型函数 $S_b/S_0=(1-f)\cdot\exp(-bD)+f\cdot\exp[-b(D+D^*)]$ 来表示,其中 S_b 、 S_0 分别代表 b 取某个 b 值($b\neq 0$ 及 $b=0$)时体素内的信号强度; b 值为扩散敏感梯度因子(*gradient factor*),单位为 s/mm^2 ,该参数依赖于扫描序列; f 为灌注分数(*perfusion fraction*),代表体素内微循环所致的灌注效应占总体扩散效应的容积比率,大小介于 0~1 之间; D 值为纯扩散系数(*pure diffusion coefficient*),代表体素内单纯的水分子扩散运动,单位为 mm^2/s ; D^* 值为假扩散系数(*pseudodiffusion coefficient*),代表体素内微循环灌注相关扩散运动,单位为 mm^2/s 。

IVIM 成像通过不同扩散系数对生物体微观的两种运动现象进行表达,经后处理得到灌注相关参数(f , D^*)和扩散参数 D ,从而量化扩散加权成像(*diffusion-weighted imaging*, DWI)图像中的两种运动成分。由于空间分布和分子运动速度上的不同, D^* 显著大于 D ,高 b 值($b>200 s/mm^2$)时灌注效应所产生的信号绝大部分已经衰减完毕,此时信号衰减基本与体素内单纯的水分子扩散相关;而低 b 值($0\sim 200 s/mm^2$)DWI 对微循环灌注效应更为敏感,所测信号衰减同时反映了组织内水分子的扩散和微循环毛细血管网内水分子的假性扩散^[2]。

2 IVIM 成像优势

2.1 与单指数模型 DWI 比较

经单指数模型函数 $S_b=S_0\exp(-bADC)$ 计算的表观弥散系数(*apparent diffusion coefficient*, ADC)值对组织内水分子的扩散情况进行定量检测,确实可解决很多临床问题,是目前最常用的检测组织内水分子扩散情况的方法,但不利于对组织微结构变化进行精确分析。过高 b 值导致图像信噪比明显降低,其测量数据的重复性与准确性也较低,故限制了 b 值 $>1000 s/mm^2$ 的临床应用。

IVIM 双指数模型分析所得灌注相关参数(f 值, D^* 值)和扩散参数 D 值,同时反映组织水分子扩散及微循环灌注的信息。相较单指数模型而言,IVIM 模型可以更好地描述生物体内复杂的信号衰减方式。Liu 等^[3]对比研究了单、双指数模型不同参数值对乳腺恶性肿瘤的鉴别诊断价值,认为

ADC 值、 D 值、 f 值在良恶性肿瘤中存在显著差异,联合 IVIM 模型的 D 值和 f 值进行诊断,其效能要优于 ADC 值。

2.2 与灌注技术的比较

测量灌注的检查方法有很多,但其多依赖于对外源性对比剂或示踪剂单位时间内在感兴趣组织内浓度变化的测量,如核素灌注成像、灌注加权成像检查。而 IVIM 测量的是分子运动引起的信号改变,虽然二者均能反映血流灌注情况,但考察的物理过程完全不同。Sigmund 等^[4]利用 IVIM 模型研究乳腺癌得出,灌注参数值 f 与动态对比增强 MRI (*dynamic contrast enhancement-MRI*, DCE-MRI) 的灌注参数间存在相关性,提示 IVIM 模型参数值可能更准确地反映乳腺癌新辅助化疗疗效与组织结构变化之间的关系,同时反映组织内部的水分子扩散和微循环灌注,且不需注入对比剂。

3 IVIM 技术在生物体各器官及系统的主要临床应用

3.1 在中枢神经系统中的应用

IVIM 技术目前主要应用于:①良、恶性脑肿瘤的诊断及脑胶质瘤的分级等。2013 年北美放射学年会报道指出,IVIM 有助于鉴别胶质母细胞瘤的复发和放射性坏死,其直方图分析可作为鉴别胶质母细胞瘤和放射性坏死无创的影像生物标记。Bisdas 等^[5]通过对脑胶质瘤患者行 IVIM 成像研究指出, D^* 、 f 值在高级别脑胶质瘤中显著高于低级别脑胶质瘤,而 D 值在低级别脑胶质瘤中则略高;Hu 等^[6]通过临床实验分析 D^* 、 D 及 f 值,得到了与 Bisdas 类似的结论。②评价脑损伤、脑血管性病。Federau 等^[7]对急性脑卒中患者行 IVIM 扫描,发现在梗死灶中 f 值明显降低,研究认为,IVIM 灌注参数能够反映高氧合状态所致的血管收缩和高碳酸血症所致的血管扩张^[8],这样 IVIM 可成为定量分析脑灌注有效且极具前景的成像技术。③脑功能的研究。Dong 等^[9]发现 IVIM 可揭示认知损害过程中的脑血流灌注异常,为轻度认知功能障碍的诊断及转归预测提供帮助。

3.2 在头颈部中的应用

IVIM 技术目前主要应用于鼻咽癌的评估、无创预测肿瘤治疗前分期,对患者常规 MR 灌注成像与 IVIM 成像间行相关性研究^[10]。Lai 等^[11]对 80 例诊断为未分化鼻咽癌的患者进行 IVIM 研究,探讨

鼻咽癌的 IVIM 特征及其与不同分期肿瘤间的关系, 结果发现, 鼻咽癌在不同阶段具有特异的扩散/灌注特征; 不同级别的鼻咽癌有特异的 IVIM 参数, 其有助于鼻咽癌治疗前分期。

3.3 在消化系统中的应用

IVIM 技术目前主要应用于: ①肝脏纤维化、肝硬化、肝癌等方面的研究。研究表明, 在肝纤维化进程中, D 值及 D^* 值均有改变, 可无创检测和评价肝纤维化^[12]。Luciani 等^[2]研究表明, 肝硬化患者不仅有纯水分子的扩散受限, 且灌注减低。Woo 等^[13]对肝细胞肝癌患者研究发现, D 值与高分化肝细胞肝癌病理分级间有明显的负相关性($r=-0.604$, $P<0.01$)。IVIM 在一定程度上可代替组织学检查来评价肝细胞肝癌, D^* 值、 f 值的高低均能反映肿瘤血管丰富程度, 客观反映肿瘤灌注状态, 从而达到肿瘤诊断及肿瘤恶性程度分级的目的。②在胰腺等消化腺的多种肿瘤诊断及鉴别中同样发挥着重要的作用。Kang 等^[14]对胰腺占位患者行 IVIM 扫描发现, 胰腺癌的 D 值及 f 值明显低于正常胰腺组织、神经内分泌肿瘤及慢性胰腺炎; 与良性肿瘤相比, 恶性倾向的导管内乳头状黏液性肿瘤的 D 值及 f 值明显升高; IVIM 的灌注及扩散参数不仅能鉴别胰腺良恶性肿瘤, 而且能分辨良性及恶性倾向的导管内乳头状黏液性肿瘤。

3.4 在泌尿生殖系统中的应用

IVIM 技术目前主要用于: ①肾脏肿瘤的诊断与鉴别、病理分型等。研究发现, D 值能较好地分辨肾肿瘤与肾脏正常组织, f 值对病理组织的亚组鉴别能提供有价值的信息^[15-16]。IVIM 相关参数有助于评价病理分型, 为临床诊断、治疗及评价预后提供有益信息。②前列腺癌的诊断与病理分级。研究认为, IVIM 参数中的 D 值和 f 值在肿瘤组织与良性增生组织间差异具有统计学意义, 在肿瘤组织中 D 值和 f 值分别明显降低和升高, 表明这两个参数可能成为潜在的前列腺癌的生物标志物^[17]。国内学者应用 IVIM 分析前列腺癌 Gleason 分级, 认为通过 IVIM 直方图分析前列腺癌的病理分级具有可行性, D 值比传统 ADC 值能更好地区分低、高级别肿瘤^[18]。另外, IVIM 的灌注参数在无创性评价尿路梗阻及辅助诊断宫颈癌等方面也取得了较好的效果^[19]。

3.5 在乳腺中的应用

目前, IVIM 已经初步应用于乳腺疾病的诊断

研究中。①乳腺组织信号衰减模型的研究。Liu 等^[3]研究发现, 恶性肿瘤、良性病变和正常腺体组织的 DWI 信号的衰减是按照双指数模型 (IVIM 模型) 拟合的, 而单纯囊肿 DWI 信号的衰减是按照单指数模型拟合的。②乳腺 IVIM 检查与传统 DWI、DCE-MRI 诊断效能比较研究。Sigmund 等^[4]研究指出, 正常乳腺组织与不同类型乳腺癌间 ADC 值和 D 值均存在差异, 但 D 值在各组间的差异较 ADC 值更大。国内学者研究认为, 慢 ADC 值与传统 ADC 值对诊断浸润性导管癌均有较高的诊断价值, 慢 ADC 值诊断的灵敏度、特异度及准确性均有提高; 联合 D 值和 f 值能够得到比传统 ADC 值、多期动态增强时间-信号强度曲线更好的诊断效能^[20-21]。③乳腺良、恶性肿瘤的诊断与鉴别。Bokacheva 等^[22]研究发现, ADC 值、D 值、 f 值在良恶性乳腺肿瘤间存在明显差异, 联合 D 值和 f 值进行诊断, 诊断效能优于 ADC 值, 其曲线下面积分别为 0.84 和 0.72。

3.6 在呼吸系统及其他疾病方面的应用

有学者就周围型肺癌行 IVIM 研究发现, 该技术可用于检查肺部孤立性病变, f 值在周围型肺癌及感染性肉芽肿的鉴别诊断方面具有一定价值^[23]; 另有对肺癌肺不张的 IVIM 研究发现, f 值在炎性肺不张与肺癌肺不张中差异显著, 表明该技术在肺癌肺不张的影像诊断中具有一定应用价值^[24]。此外, IVIM 技术在孕期正常胎盘血流灌注定量评价、淋巴瘤疗效评价及贲门癌等方面, 也已逐步开始初步研究。

3.7 IVIM 参数与肿瘤分级及预后因子的相关性

研究表明, 肿瘤细胞密度与 ADC 值呈负相关^[25]。Kim 等^[26]研究发现, 乳腺浸润性导管癌 ADC 值与 Ki-67、P53、孕激素受体、雌激素受体等多种预后因子均无相关性。若灌注和弥散参数与乳腺恶性肿瘤的组织病理学、分子生物学之间存在一定的关联性, 则可从影像学角度实时、无创、在体、间接判断乳腺癌的生物学行为。目前, 国内外文献尚未发现有 IVIM 各参数值用于预测肿瘤预后生物因子及新辅助化疗疗效评价和预测方面的相关报道, IVIM 各参数的价值有待进一步深入探讨。

4 IVIM 成像目前面临的主要问题

IVIM 成像结果受多种因素影响, 目前其临床应用主要面临以下问题。

4.1 b 值的选择

目前对选用 b 值的数目及大小尚无统一标准。理论上所用 b 值数目越多,数据拟合结果越准确,所获参数图像质量越好,但数据采集时间将延长,过多 b 值并不适合于临床应用。Koh 等^[27]建议使用 6~8 个 b 值并采用多次信号平均的方法,选用较少的高 b 值(2~3 个)、较多的低 b 值(4 个以上),将数据采集重点集中在灌注敏感的范围。Cohen 等^[28]研究肝脏时认为,应至少包括两个 50 s/mm² 以下的 b 值才能保证 D* 值不被低估。b 值大小的具体选择因不同组织而异,可依据受检组织 MRI 信号随 b 值升高而衰减的模式及其 ADC 值来确定^[27]。此外,部分 MRI 扫描仪只允许在有限而固定的 b 值中进行选择,不允许任意设定,也限制了 b 值数目和大小的选择。

4.2 IVIM 模型本身的局限性及其他可能影响因素

IVIM 描述组织中水分子弥散运动时考虑到了灌注效应在低 b 值时对 MRI 信号衰减的影响,并给出了较好的解释。但有时其灌注参数可能受到其他生理活动如导管内液体流动、腺体分泌等影响;这些生理活动在低 b 值时同样会引起组织信号衰减,且难同灌注效应相区别,对 IVIM 的临床应用有一定影响。此外,磁场强度和回波时间对 IVIM 参数也有影响。Cui 等^[29]发现在 3 T 和 1.5 T MRI 上肝的 D 值显示良好的可重复性,而 f 值存在一定程度的差异, D* 值的差异则更大。Bisdas 等^[30]认为,脑部病变因脑脊液、血液和肿瘤组织弛豫率的交互影响,回波时间的选取会影响 f 值的结果。

5 小结与展望

综上,IVIM 技术对于各系统器官结构和病变组织的复杂精细微观结构的显示较单指数模型 DWI 及灌注加权成像技术更具优势。虽然其目前仍存在一定问题:①该技术对 MRI 扫描仪有一定的要求;②选用 b 值的数目及大小尚无标准;③扫描参数、图像分析与处理技术有待进一步探讨和斟酌;④灌注参数由于可能受到其他生理活动的影响,可重复性较差。但 IVIM 成像在肿瘤诊断与鉴别、术前分期与疗效评估等方面有着广阔的应用前景。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 马彦云负责查阅文献、撰写综述等工作;张辉负责审阅、修改等工作。

参 考 文 献

- [1] 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. DOI:10.1148/radiology.161.2.3763909.
- [2] Luciani A, Vignaud A, Cavet M, et al. Liver cirrhosis: intravoxel incoherent motion Mr imaging—pilot study[J]. Radiology, 2008, 249(3): 891-899. DOI:10.1148/radiol.2493080080.
- [3] Liu CL, Liang CH, Liu ZY, et al. Intravoxel incoherent motion (IVIM) in evaluation of breast lesions: Comparison with conventional DWI [J/OL]. Eur J Radiol, 2013, 82(12): e [2016-06-20]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0720048X13004051782-789>. DOI:10.1016/j.ejrad.2013.08.006.
- [4] Sigmund EE, Cho GY, 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. DOI:10.1002/mrm.22740.
- [5] Bisdas S, Koh TS, Roder C, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted Mr imaging of gliomas: feasibility of the method and initial results[J]. Neuroradiology, 2013, 55(10): 1189-1196. DOI:10.1007/s00234-013-1229-7.
- [6] Hu YC, Yan LF, Wu L, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted Mr imaging of gliomas: efficacy in preoperative grading[J]. Sci Rep, 2014, 4(12): 1-7. DOI:10.1038/srep07208.
- [7] Federau C, Sumer S, Becce F, et al. Intravoxel incoherent motion perfusion imaging in acute stroke: initial clinical experience [J]. Neuroradiology, 2014, 56(8): 629-635. DOI:10.1007/s00234-014-1370-y.
- [8] Federau C, Maeder P, O'Brien K, et al. Quantitative measurement of brain perfusion with intravoxel incoherent motion Mr imaging[J]. Radiology, 2012, 265(3): 874-881. DOI:10.1148/radiol.12120584.
- [9] Dong D, Wang XY. Magnetic resonance intravoxel incoherent motion in the diagnosis patients with mild cognitive impairment[J]. J Shangdong Univ (Health Sci), 2014, 52(8): 68-71.
- [10] 郝永红, 郭林英, 潘初, 等. RSNA2014 头颈部影像学[J]. 放射学实践, 2015, 30(2): 109-112. DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2015.02.002.
Hao YH, Guo LY, Pan C, et al. RSNA2014 head and neck imaging [J]. Radiol Pract, 2015, 30(2): 109-112.
- [11] Lai V, Li X, Lee VH, et al. Nasopharyngeal carcinoma: comparison of diffusion and perfusion characteristics between different tumour stages using intravoxel incoherent motion Mr imaging[J]. Eur Radiol, 2014, 24(1): 176-183. DOI:10.1007/s00330-013-2995-7.
- [12] Chow AM, Gao DS, Fan SJ, et al. Liver fibrosis: An intravoxel incoherent motion (IVIM) study[J]. J Mag Reson Imaging, 2012, 36(1): 159-167. DOI:10.1002/jmri.23607.
- [13] Woo S, Lee JM, Yoon JH, et al. Intravoxel incoherent motion diffu-

- sion-weighted Mr imaging of hepato cellular carcinoma; correlation with enhancement degree and histologic grade[J]. *Radiology*, 2014, 270(3): 758-767. DOI: 10.1148/radiol.13130444.
- [14] Kang KM, Lee JM, Yoon JH, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted Mr imaging for characterization of focal pancreatic lesions[J]. *Radiology*, 2014, 270(2): 444-453. DOI: 10.1148/radiol.13122712.
- [15] Rheinheimer S, Stieltjes B, Schneider F, et al. Investigation of renal lesions by diffusion-weighted magnetic resonance imaging applying intravoxel incoherent motion-derived parameters—initial experience[J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(3): e310-316. DOI: 10.1016/j.ejrad.2011.10.016.
- [16] Chandarana H, Kang SK, Wong S, et al. Diffusion-weighted intravoxel incoherent motion imaging of renal tumors with histopathologic correlation[J]. *Invest Radiol*, 2012, 47(12): 688-696. DOI: 10.1097/RLI.0b013e31826a0a49.
- [17] Shinmoto H, Tamura C, Soga S, et al. An intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging study of prostate cancer[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2012, 199(4): W496-500. DOI: 10.2214/AJR.11.8347.
- [18] Zhang YD, Wang Q, Wu CJ, et al. The histogram analysis of diffusion-weighted intravoxel incoherent motion (IVIM) imaging for differentiating the gleason grade of prostate cancer[J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(4): 994-1004. DOI: 10.1007/s00330-014-3511-4.
- [19] Thoeny HC, Binser T, Roth B, et al. Noninvasive assessment of acute ureteral obstruction with diffusion-weighted Mr imaging: a prospective study[J]. *Radiology*, 2009, 252(3): 721-728. DOI: 10.1148/radiol.2523082090.
- [20] 车树楠, 崔晓琳, 李静, 等. MR 扩散加权成像体素内不相干运动模型对于乳腺良恶性病变诊断价值的研究[J]. *磁共振成像*, 2015, 6(7): 506-512. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8034.2015.07.006.
- Che SN, Cui XL, Li J, et al. The value of intravoxel incoherent motion model of diffusion weighted imaging in differentiating benign from malignant breast lesions[J]. *Chin J Magn Reson Imaging*, 2015, 6(7): 506-512.
- [21] 王庆军, 李小娟, 张静, 等. 磁共振体素内不相干运动对于肿块样乳腺良恶性病变的诊断价值[J/OL]. *中华临床医师杂志: 电子版*, 2014, 8(19): 21-25 [2016-06-20]. <http://www.cqvip.com/read/read.aspx?id=662679251>. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-0785.2014.19.005.
- Wang QJ, Li XJ, Zhang J, et al. The value of intravoxel incoherent motion in differentiating mass-like benign from malignant breast lesions[J]. *Chin J Clinicians (Electronic Edition)*, 2014, 8(19): 21-25.
- [22] Bokacheva L, Kaplan JB, Giri DD, 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. DOI: 10.1002/jmri.24462.
- [23] Lei YQ. MR introvoxel incoherent motion diffusion weighted imaging in peripheral lung cancer[J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2015, 31(1): 57-61.
- [24] 陈媛媛, 朱绍成, 韩倩, 等. 磁共振体素内不相干运动扩散加权成像在肺癌所致肺不张影像诊断中的初步应用[J]. *现代生物医学进展*, 2016, 16(4): 734-737. DOI: 10.13241/j.cnki.pmb.2016.04.032.
- Chen YY, Zhu SC, Han Q, et al. The preliminary application of intravoxel incoherent motion in the diagnosis of lung atelectasis caused by lung cancer[J]. *Modern Biomed in Prog*, 2016, 16(4): 734-737.
- [25] Hatakenaka M, Soeda H, Yabuuchi H, et al. Apparent diffusion coefficients of breast tumors: clinical application[J]. *Magn Reson Med Sci*, 2008, 7(1): 23-29.
- [26] Kim EJ, Kim SH, Park GE, et al. Histogram analysis of apparent diffusion coefficient at 3.0T: correlation with prognostic factors and subtypes of invasive ductal carcinoma[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 42(6): 1666-1678. DOI: 10.1002/jmri.24934.
- [27] Koh DM, Collins DJ, Orton MR. Intravoxel incoherent motion in body diffusion-weighted MRI: reality and challenges[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2011, 196(6): 1351-1361. DOI: 10.2214/AJR.10.5515.
- [28] Cohen AD, Schieke MC, Hohenwarter MD, et al. The effect of low b-values on the intravoxel incoherent motion derived pseudodiffusion parameter in liver[J]. *Magn Reson Med*, 2015, 73(1): 306-311. DOI: 10.1002/mrm.25109.
- [29] Cui Y, Dyvorne H, Besa C, et al. IVIM diffusion-weighted imaging of the liver at 3.0T: comparison with 1.5T[J]. *Eur J Radiol Open*, 2015, 2: 123-128. DOI: 10.1016/j.ejro.2015.08.001.
- [30] Bisdas S, Klose U. IVIM analysis of brain tumors: an investigation of the relaxation effects of CSF, blood, and tumor tissue on the estimated perfusion fraction[J]. *MAGMA*, 2015, 28(4): 377-383. DOI: 10.1007/s10334-014-0474-z.

(收稿日期: 2016-06-28)