

全身磁共振扩散加权成像在肿瘤中的应用

龚红霞 综述 许建荣 审校

【中图分类号】R445.2 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2009)03-0341-04

磁共振成像具有良好的组织对比和空间分辨力,可以显示形态学的各种细微改变,因此其在肿瘤成像上有着很好的应用前景。以前 MRI 主要局限于某一器官或组织,随着快速成像序列的发展,如回波平面成像和并行采集技术的使用,磁共振扫描的应用范围越来越广泛。

最初的扫描经验显示全身(whole body, WB) MRI 使用标准的 T_1 WI、 T_2 WI 和短 T_1 翻转恢复序列(short T_1 inversion recovery, STIR)^[1-3]。很多研究^[4-6]显示磁共振成像在发现实质和骨髓病变的优越性。冠状面 T_1 WI、 T_2 WI 和 STIR 序列有很高的空间分辨力,但是图像中包含了太多的信息量,放射科医师很难做到浏览这么多图像而不遗漏一个微小病变。磁共振扩散加权成像原理基于水分子的自由运动,大多数肿瘤伴有结构异常和水扩散率的改变,重度扩散和翻转恢复方法可以抑制大多数自由水和脂肪组成的正常组织的信号^[7]。背景抑制磁共振扩散加权成像(diffusion weighted imaging with background body signal suppression, DWIBS)可以显示良好的病变对比,有利于发现病变和疗效的监测。

背景抑制磁共振扩散加权成像原理

磁共振扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)是在常规扫描序列中加入对称的扩散敏感梯度脉冲,使得在施加梯度场方向上的水分子的相位离散加剧,信号降低,目前 DWI 常采用平面回波成像序列进行采集。扩散梯度由梯度脉冲的强度和持续时间即所谓的梯度因子决定,用 b 值表示。由于 DWI 受到微循环及体内生理运动的影响,常采用表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)来代替实际扩散系数(D 值)。DWI 是目前唯一能观察活体水分子微观运动的成像方法,它从分子水平反映了人体各组织水分子的功能变化,可以检测出与组织含水量改变有关的形态学和生理学的早期改变。扩散加权成像很多年前就应用于颅外脏器^[8],但受到图像质量以及 ADC 值测量准确性的限制。随着 MRI 技术的改进,如高梯度技术的应用,平行成像技术及相控阵线圈的应用,大大提高了图像质量^[9]。越来越多的研究开始关注颅外脏器的扩散加权成像,尤其是在肿瘤中的应用^[10-15]。文献^[16-18]报道显示,恶性肿瘤由于细胞直径大、密度高,其 ADC 值较正常组织降低。ADC 值与肿瘤的细胞分布密度和组织结构有关^[19-21]。背景信号抑制扩散加权成像序列是在传统扩散加权成像基础上衍生

出来的一种新的成像技术。这一技术首先是由 Takahara^[7] 在 1.5T 磁共振上提出来的。

该序列将扩散加权成像与脂肪抑制和快速成像技术结合,克服了传统体部扩散成像必须在屏气条件下进行,扫描范围有限、图像信噪比和分辨力较低的局限,可以在自由呼吸状态下完成体部大范围(包括头颈、胸部、腹部及盆腔)、薄层、无间断扫描,并得到高信噪比、高分辨力和高对比度的图像,可直观、立体地显示病变部位、形态、大小及范围,并可行 ADC 值和体积的定量测量^[7]。DWIBS 的核心技术包括:单次激发平面回波成像技术(single-shot echo planar imaging, SSEPI)、短 T_1 反转恢复序列和敏感编码技术(sensitivity encoding, SENSE)。DWI 所得图像采用最大强度投影(maximum intensity projection, MIP)进行图像重组,得到良好的背景抑制效果,病变清晰显示;利用黑白反转技术,使病变的显示达到同 PET 相媲美的效果,故又称为“类 PET”。

这一技术对发现肿瘤的敏感度和特异度仍然在研究中。Mürtz 等^[22]在 3T 磁共振上行 DWIBS 研究发现, DWIBS 图像对比度较 1.5T MRI 增加了 14%,其图像质量可以充分用于诊断。但相对于 1.5T 磁共振而言,3.0T MRI 也有不利之处,如较长的采集时间(比吸收率限制)、图像变形、信号缺失和移动伪影的增加等。通过提高 SENSE 因子(>2)可以改善 DWIBS 图像质量,但是它在减少伪影的同时也降低了信噪比。3.0T 磁共振的 DWIBS 技术尚需进一步研究。

背景抑制磁共振扩散加权成像技术

DWI 扫描技术包括常规的自旋回波、激励回波、快速自旋回波、梯度回波、回波平面成像和线性扫描扩散成像,每一种扫描技术都有其优点及局限性^[23]。

DWI 的扫描可分为屏气扫描和自由呼吸扫描。屏气扫描允许扫描范围较局限,如肝脏、肾脏或腹腔的其他部位,扫描快速。图像保持了良好的解剖细节,通常无呼吸伪影导致图像质量的下降,小病灶的发现及 ADC 的测量在理论上较自由呼吸为好^[24]。图像的获得在屏气 20~30 s 内,通常几次屏气即可完成图像的采集。但是屏气扫描的缺点是扫描层数受到限制,图像信噪比较多次采集平均为差,对搏动伪影敏感。自由呼吸自旋回波 EPI 结合脂肪抑制可以获得体部甚至全身 DWI 图像。较长时间内多层面激励和信号平均,保证了图像信噪比和对比噪声比^[7]。薄层扫描提高了空间分辨力,保证了多平面重组的图像质量。而且自由呼吸较长采集时间可以进行多 b 值(>5)或者高 b 值扫描。采用这种扫描方法时图像采集时间长,通常需要 3~6 min,具体取决于扫描的范围及 b 值的数目。肿瘤异质性的评价可能受到移动和容积平均的影响^[24]。

作者单位:200127 上海,上海交通大学医学院附属仁济医院放射科

作者简介:龚红霞(1975-),女,上海人,博士研究生,主治医师,主要从事淋巴瘤 MRI 成像研究工作。

基金项目:上海交通大学医学院重点学科项目资助;上海市重点学科建设项目(S30203)

DWIBS在体部应用时,为了达到较高的分辨力,常常需要较长的回波链而容易导致图像畸变和EPI特征性伪影^[25]。SENSE技术的灵活应用可以明显降低回波链长度,消除或降低图像畸变和EPI特征性伪影。多通道线圈与SENSE技术的有机结合能加快扫描速度,有效降低单激发EPI所需要的回波链长度,降低伪影,减少图像扭曲,保证扩散加权成像的质量和ADC值的准确测量。

STIR和预饱和翻转恢复(频率选择抑制翻转恢复)脂肪抑制技术的灵活应用,可以达到良好的背景抑制效果,STIR技术背景抑制效果好、稳定、可靠、对射频场和主磁场不均匀性不敏感,但信噪比低,扫描时间相对较长,SPIR技术背景抑制效果稍差,对射频场及主磁场不均匀性敏感,可能会有背景抑制不完全的现象存在,但是信噪比较高,扫描时间相对较短^[26]。

后处理及图像分析

DWI扫描图像要到工作站进行后处理。DWIBS 3D图像由横轴面图像经过MIP重组和黑白反转技术获得。这种图像临床医师比较熟悉,与PET图像相似。正常组织的信号如血管、脂肪、肌肉、肠道均被抑制,另外一些正常结构如脾脏、前列腺、睾丸、卵巢、子宫内膜和脊髓仍然可见^[27],病变区域如肿瘤显示为灰黑区域(DWI图像上显示为高信号)^[22]。对病变区的定量分析仍需要在ADC图像上放置兴趣测量获得。除了从DWIBS图像获得信息,结合常规T₁WI、STIR或其他序列的图像地非常重要,结合常规图像可以更加准确的判断病变,除外DWI图像上的伪影。

背景抑制磁共振扩散加权在肿瘤中的应用

1. 发现肿瘤

采用DWIBS序列得到的全身图像,去除了运动伪影和复杂背景信号的影响,使病变与周围组织的对比噪声比提高,肿瘤显示为高信号。Bohlscheid等^[28]研究结果显示64例肿瘤患者中有58处恶性肿瘤区域显示为高信号,有6例显示为中等信号或病灶显示欠清晰。其中有些病例随访中显示部分病灶在治疗后信号降低,而部分病灶因复发而信号增高。为了进一步确定DWIBS在肿瘤中的价值,Komori等^[29]把DWIBS与PET-CT进行了对照分析,16例肿瘤患者(共27个病灶)在同一天进行DWIBS及PEC-CT检查,结果显示,在27个病灶中DWIBS显示了25个病灶(92.6%),¹⁸F-FDG PET-CT显示了22个病灶(81.5%),对于发现肿瘤DWIBS有很高的敏感性。

在淋巴瘤的诊断中,DWIBS具有非常高的价值。Takahara等^[7]使用DWIBS技术对5例淋巴瘤以及其它6例恶性肿瘤进行了检查,所有原发病灶及肿大淋巴结均清晰显示,在1例接受化疗的淋巴瘤患者中,其化疗前后的MIP图像对比鲜明;其中3例患者同时行DWIBS和PET检查,结果表明DWI图像上病变的清晰度甚至超过PET。由于它具有和PET相似的效果,但又不需像PET检查一样接受电离辐射,因此可作为一种无创的功能成像新方法。但DWIBS显示组织是基于细胞构成的变化而非恶性程度,因此对于良恶性淋巴结的鉴别还存在不

确定性^[30]。

DWI不仅能很好的显示原发性肿瘤病变,对转移性病变的显示效果也非常好。YANG等^[31]对56位原发性肿瘤患者的转移灶进行了研究,根据转移灶的大小将患者分为4组:小于1.0 cm、1.0~1.9 cm、2.0~2.9 cm和大于3.0 cm,对DWI发现病灶的敏感性和特异性进行分析,DWI发现转移灶的敏感度分别为38%、75%、97%和100%。

DWI对发现骨骼系统的转移敏感性和特异性最高。对于小于1.0 cm的病灶检出敏感性较差。但是DWI对于转移性病灶的诊断是一个非常有前景的诊断方法,随着扫描参数的进一步优化,DWI将会成为一种有效的全身成像的肿瘤诊断技术。

2. 肿瘤分期

DWIBS在发现原发和转移性病变有着非常重要的临床价值,同时也是发现骨髓受累的有效方法。在全身DWI发现骨髓病变和骨髓穿刺活检之间两者一致性非常高^[31]。DWIBS可以全面直观的显示全身淋巴结的分布情况,为临床肿瘤分期提供了很好的参考依据。Stecco等^[32]用盲法对29例患者(肿瘤15例,淋巴瘤14例)进行了DWIBS及PEC-CT检查,通过与PET-CT比较来确定DWIBS对肿瘤分期的价值,图像由两位放射科医师及一位核医学科医师分别阅片。结果显示阅片医师之间的一致性非常好(达到0.93)。第一位阅片者敏感度89.07%,特异度98.5%,符合率97.65%,阳性预测值85.48%,阴性预测值98.91%;第二位阅片者敏感度87.39%,特异度98.39%,诊断符合率97.8%,阳性预测值88.13%,阴性预测值98.75%。不难看出,DWIBS提供了快速有效的全身检查方法来用于肿瘤的分期,同时它具有非常好的特异性和阴性预测值,在肿瘤分期中有很好的应用价值。

3. 监测和预测治疗效果

DWI用于观察肿瘤治疗的反应已越来越引起关注^[24]。有效的抗肿瘤治疗会导致肿瘤细胞的溶解,细胞膜完整性的缺失,细胞外间隙的增加,这些都会导致水分子的扩散增加^[33,34]。动物实验研究^[35]证实在最初的放疗化疗后,病变的ADC值会增加。由于细胞的水肿,在最初治疗的24 h后就可以观察到治疗的影响,而这表现为ADC值的短暂降低。ADC值的测量对肿瘤放疗化疗效果的预测是一个非常有趣的发现^[24]。很多研究^[36-38]显示,肿瘤治疗前ADC值较低,其对放疗化疗的效果比治疗前ADC值高的肿瘤效果好。原因可能是ADC值高的肿瘤坏死较明显。肿瘤坏死通常提示肿瘤含氧量低的、酸中毒、灌注不良,这些导致肿瘤对放疗化疗的敏感性降低。还有研究^[39,40]显示开始治疗后,早期ADC值的增加常预示好的治疗效果。ADC值的变化先于肿瘤大小的变化。

DWI在评价肿瘤疗效中的价值不仅在动物实验中得到了证实,在最近的活体研究中也得到进一步验证。Koh等^[41]对20例结直肠癌肝转移患者采用标准的化疗方案化疗3个月,并分别在化疗前1周和化疗后3周内行常规MRI及DWI检查(b值为0、150和500 s/mm²)。以转移灶化疗前后在MRI上最大径的变化作为评价肿瘤治疗效果的标准,即最大径减少 $\geq 30\%$ 被认为有效,而最大径增加或减少 $< 30\%$ 为无效,据此将肝转

移灶分成有效组和无效组。分析两组病灶的 DWI 资料发现,化疗前有效组平均 ADC 值为 $(1.15 \pm 0.28) \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$,明显低于无效组的 $(1.93 \pm 0.58) \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$,如以 $1.69 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ 作为预测转移瘤化疗后可能无效的阈值,敏感度为 60%,特异度达 100%。因此,化疗前肿瘤的 ADC 值较高提示化疗效果可能不理想。然而当肿瘤组织坏死为凝固性坏死时,由于不会发生细胞溶解和液化,ADC 值会比较低,这就能解释部分肿瘤虽然有较低的 ADC 值,但化疗后效果并不理想,可能与肿瘤组织发生的凝固性坏死有关。此项研究还发现,肿瘤化疗后有效组平均 ADC 值较化疗前显著增高,表明肿瘤化疗后细胞密度的减低或坏死;与之相反,无效组肿瘤和正常肝实质平均 ADC 值无明显变化。该研究结果表明,DWI 将会在未来预测和评价肿瘤疗效方面起重要作用。Kamel 等^[42]报道了一组原发性肝癌经⁹⁰钷玻璃微球(放射性核素)介入治疗的病例,发现治疗 1 个月后,肿瘤体积较治疗前无明显变化,测得试验组肿瘤平均 ADC 值明显增高,而对照组肿瘤平均 ADC 值无明显变化。该研究结果表明,DWI 能用于评价肿瘤疗效,而且还有助于制定和调整治疗方案,尤其在临床医师判定患者是否需要进行下一个疗程的治疗以提高生存率方面具有积极的作用。总之,ADC 值的测量是一个非常有效地工具,它提供了无可匹敌的信息,在将来的临床研究中,我们应该广泛的应用这一有效的工具^[24]。

目前的挑战及将来的发展

背景抑制磁共振扩散加权在淋巴瘤及其他肿瘤的全身检查中具有广阔前景,但是也有其局限性:①STIR 在进行脂肪抑制的同时,也会降低图像的对比度,有可能遗漏病变;②小的病变有可能因为自由呼吸而遗漏;③DWIBS 的敏感性较高,但特异性较差。

背景抑制磁共振扩散加权在技术还存在一些限制:DWIBS 对移动影响敏感,这可能导致 DWIBS 图像出现伪影,进而影响 ADC 值测量的准确性;自由呼吸信号平均可能导致像素记录失真,而这会导致空间分辨力的下降;由于可能存在的 T_1 和/或 T_2 穿透效应,DWIBS 发现肿瘤的特异性会受限;DWIBS 不能提供病变准确的解剖位置^[22]。对临床应用来说,图像融合是非常有必要时。如 DWIBS 与 T_2 WI 的融合。

总之,DWIBS 是一种很有发展前景的技术,它可以广泛用于发现肿瘤、肿瘤分期、区分良恶性病变、估计疗效等,但是需要进一步评价其价值。

参考文献:

[1] Schmidt GP, Schmid R, Hahn K, et al. Whole-body MRI and PET/CT in Tumordiagnosis[J]. Radiology, 2004, 44(11): 1079-1087.
 [2] Herborn CU, Unkel C, Vogt FM, et al. Whole-body MRI for Staging Patients with Head and Neck Squamous Cell Carcinoma[J]. Acta Otolaryngol, 2005, 125(11): 1224-1229.
 [3] Thomas L, Richard S. Emerging Techniques: Whole-body Screening and Staging with MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2006, 24(3): 489-498.
 [4] Chan Y, Chan K, Lam W, et al. Comparison of Whole Body MRI

and Radioisotope Bone Scintigram for Skeletal Metastases Detection[J]. Chin Med J, 1997, 110(6): 485-489.

[5] Mentzel HJ, Kentouche K, Sauner D, et al. Comparison of Whole-body STIR-MRI and ^{99m}Tc-methylene-diphosphonate Scintigraphy in Children with Suspected Multifocal Bone Lesions [J]. Eur Radiol, 2004, 14(12): 2297-2302.
 [6] Nakanishi K, Kobayashi M, Takahashi S, et al. Whole body MRI for Detecting Metastatic Bone Tumor: Comparison with Bone Scintigrams[J]. Magn Reson Med Sci, 2005, 4(1): 11-17.
 [7] Takahara T, Imai Y, Yamashita T, et al. Diffusion Weighted Whole Body Imaging with Background Body Signal Suppression (DWIBS): Technical Improvement Using Free Breathing, STIR and High Resolution 3D Display [J]. Radiat Med, 2004, 22(4): 275-282.
 [8] Müller MF, Prasad P, Siewert B, et al. Abdominal Diffusion Mapping with Use of a Hole-body Echo-planar System[J]. Radiology, 1994, 190(2): 475-478.
 [9] Chow LC, Bammer R, Moseley ME, et al. Single Breath-hold Diffusion-weighted Imaging of the Abdomen [J]. J Magn Reson Imaging, 2003, 18(3): 377-382.
 [10] Thoeny HC, De KF. Extracranial Applications of Diffusion-weighted Magnetic Resonance Imaging [J]. Eur Radiol, 2007, 17(6): 1385-1393.
 [11] Abdel Razek A, Soliman NY, Elkhamary S, et al. A Role of Diffusion-weighted MR Imaging in Cervical Lymphadenopathy [J]. Eur Radiol, 2006, 16(7): 1468-1477.
 [12] Koh DM, Scurr E, Collins DJ, et al. Colorectal Hepatic Metastases: Quantitative Measurements Using Single-shot Echoplanar Diffusion-weighted MR Imaging [J]. Eur Radiol, 2006, 16(9): 1898-1905.
 [13] Hayashida Y, Yakushiji T, Awai K, et al. Monitoring Therapeutic Responses of Primary Bone Tumors by Diffusion-weighted Image: Initial Results [J]. Eur Radiol, 2006, 16(12): 2637-2643.
 [14] Kozłowski P, Chang SD, Jones EC, et al. Combined Diffusion-weighted and Dynamic Contrast-enhanced MRI for Prostate Cancer Diagnosis-correlation with Biopsy and Histopathology [J]. J Magn Reson Imaging, 2006, 24(1): 108-113.
 [15] Rubesova E, Grell AS, De MV, et al. Quantitative Diffusion Imaging in Breast Cancer: a Clinical Prospective Study [J]. J Magn Reson Imaging, 2006, 24(2): 319-324.
 [16] Squillaci E, Manenti G, Cova M, et al. Correlation of Diffusion Weighted MR Imaging with Cellularity of Renal Tumours [J]. Anticancer Res, 2004, 24(6): 4175-4179.
 [17] Kim T, Murakami T, Takahashi S, et al. Diffusion-weighted Single-shot Echoplanar MR Imaging for Liver Disease [J]. AJR, 1999, 173(2): 393-398.
 [18] Issa B. In Vivo Measurement of the Apparent Diffusion Coefficient in Normal and Malignant Prostatic Tissues Using Echoplanar Imaging [J]. J Magn Reson Imaging, 2002, 16(2): 196-200.
 [19] Guo Y, Cai YQ, Cai ZL, et al. Differentiation of Clinically Benign and Malignant Breast Lesions Using Diffusion-weighted Im-

- ging[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2002, 16(2):172-178.
- [20] Guo AC, Cummings TJ, Dash RC, et al. Lymphomas and High-grade Astrocytomas; Comparison of Water Diffusibility and Histologic Characteristics[J]. *Radiology*, 2002, 224(1):177-183.
- [21] Gauvain KM, McKinstry RC, Mukherjee P, et al. Evaluating Pediatric Brain Tumor Cellularity with Diffusion-tensor Imaging [J]. *AJR*, 2001, 177(2):449-454.
- [22] Mürtz P, Krautmacher C, Träber F, et al. Diffusion-weighted Whole-body MR Imaging with Background Body Signal Suppression; a Feasibility Study at 3.0T [J]. *Eur Radiol*, 2007, 17(12):3031-3037.
- [23] Bammer R. Basic Principles of Diffusion-weighted Imaging [J]. *Eur J Radiol*, 2003, 45(3):169-184.
- [24] Koh DM, Collins DJ. Diffusion-weighted MRI in the Body: Applications and Challenges in Oncology [J]. *AJR*, 2007, 188(6):1622-1635.
- [25] Kim T, Murakami T, Takahashi S, et al. Diffusion Weighted Echo Planar MR Imaging for Liver Disease [J]. *AJR*, 1999, 173(2):393-398.
- [26] 杜昱平, 张永顺, 崔进国, 等. 高场强 MRI 脂肪抑制技术的原理及应用体会 [J]. *白求恩军医学院学报*, 2003, 9(4):214-215.
- [27] Vilanova JC, Barceló J. Diffusion-weighted Whole-body MR Screening [J]. *Eur J Radiol*, 2008, 67(3):440-447.
- [28] Bohlscheid A, Nuss D, Lieser S, et al. Tumor Search with Diffusion-weighted Imaging—first Experience [J]. *Fortschr Röntgenstr*, 2008, 180(4):302-309.
- [29] Komori T, Narabayashi I, Matsumura K, et al. 2-[Fluorine-18]-fluoro-2-D-glucose Positron Emission Tomography/Computed Tomography Versus Whole-body Diffusion-weighted MRI for Detection of Malignant Lesions: Initial Experience [J]. *Ann Nucl Med*, 2007, 21(4):209-215.
- [30] Koh DM, Takahara T, Imai Y, et al. Practical Aspect of Assessing Tumors Using Clinical Diffusion-weighted Imaging in the Body [J]. *Magn Reson Med Sci*, 2007, 6(4):211-224.
- [31] Li S, Sun F, Jin ZY, et al. Whole-body Diffusion-weighted Imaging: Technical Improvement and Preliminary Results [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2007, 26(4):1139-1144.
- [32] Stecco A, Romano G, Negru M, et al. Whole-body Diffusion-weighted Magnetic Resonance Imaging in the Staging of Oncological Patients; Comparison with Positron Emission Tomography Computed Tomography (PET-CT) in a Pilot Study [J]. *Radiol Med*, 2008. Epub ahead of print.
- [33] Moffat BA, Chenevert TL, Lawrence TS, et al. Functional Diffusion Map; a Noninvasive MRI Biomarker for Early Stratification of Clinical Brain Tumor Response [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102(15):5524-5529.
- [34] Moffat BA, Hall DE, Stojanovska J, et al. Diffusion Imaging for Evaluation of Tumor Therapies in Preclinical Animal Models [J]. *MAGMA*, 2004, 17(3):249-259.
- [35] Thoeny HC, De Keyzer F, Chen F, et al. Diffusion-weighted MR Imaging in Monitoring the Effect of a Vascular Targeting Agent on Rhabdomyosarcoma in Rats [J]. *Radiology*, 2005, 234(3):756-764.
- [36] DeVries AF, Kremser C, Hein PA, et al. Tumor Microcirculation and Diffusion Predict therapy Outcome for Primary Rectal Carcinoma [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2003, 56(10):958-965.
- [37] Dzik-Jurasz A, Domenig C, George M, et al. Diffusion MRI for Prediction of Response of Rectal Cancer to Chemoradiation [J]. *Lancet*, 2002, 360(2):307-308.
- [38] Oh J, Henry RG, Pirzkall A, et al. Survival Analysis in Patients with Glioblastoma Multiforme; Predictive Value of Choline-to-N-acetylaspartate Index, Apparent Diffusion Coefficient, and Relative Cerebral Blood Volume [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2004, 19(2):546-554.
- [39] Mardor Y, Pfeffer R, Spiegelmann R, et al. Early Detection of Response to Radiation Therapy in Patients with Brain Malignancies Using Conventional and High b-value Diffusion-weighted Magnetic Resonance Imaging [J]. *J Clin Oncol*, 2003, 21(9):1094-1100.
- [40] Theilmann RJ, Borders R, Trouard TP, et al. Changes in Water Mobility Measured by Diffusion MRI Predict Response of Metastatic Breast Cancer to Chemotherapy [J]. *Neoplasia*, 2004, 6(9):831-837.
- [41] Koh DM, Scurr E, Collins D, et al. Predicting Response of Colorectal Hepatic Metastasis; Value of Retreatment Apparent Diffusion Coefficients [J]. *AJR*, 2007, 188(4):1001-1008.
- [42] Kamel IR, Reyes DK, Liapi E, et al. Functional MR Imaging Assessment of Tumor Response after 90Y Microsphere Treatment in Patients with Unresectable Hepatocellular Carcinoma [J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2007, 18(1):49-56.

(收稿日期:2008-12-09)