

1.5T 和 3.0T 上腹部扩散加权成像三种呼吸采集方式的比较

史卓, 赵心明, 宋俊峰, 马霄虹, 叶枫

【摘要】 目的:比较 1.5T 和 3.0T 上腹部磁共振扩散加权成像在屏气、呼吸触发、自由呼吸 3 种采集技术下得到的图像质量。**方法:**21 名志愿者分别在 GE Signa HDx 1.5T 和 3.0T 磁共振机上进行常规 MR 和包括屏气、呼吸触发、自由呼吸 3 种采集方式在内的 DWI 检查, b 值均为 100 和 800。2 名医师分别盲法记录、评价主观图像质量分数, 图像伪影、信噪比以及表观扩散系数(ADC)值。**结果:**呼吸触发 DWI 3.0T 的图像质量优于 1.5T ($P < 0.05$), 而自由呼吸 DWI 1.5T 的伪影评分和图像质量均优于 3.0T ($P < 0.05$); 3 种采集技术中自由呼吸 DWI 的信噪比最高, 3.0T DWI 中肝脏的 SNR 低于 1.5T ($P < 0.05$); 1.5T 和 3.0T 之间正常肝脏、胆囊、肾脏和胰腺的 ADC 值均无统计学差异 ($P > 0.05$)。**结论:**3.0T 呼吸触发采集技术可以获得较好的 DWI 影像; 而自由呼吸 DWI 的信噪比最高; 上腹部正常脏器的 ADC 值在 1.5 和 3.0T 之间无差异。

【关键词】 腹部; 图像处理, 计算机辅助; 磁共振成像

【中图分类号】 R323.3; R445.2; R814.3 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2015)06-0686-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2015.06.020

Comparison of breath-hold, respiratory-triggered and free-breathing techniques for diffusion-weighted imaging acquisitions of the upper abdomen at 1.5T and 3.0T SHI Zhuo, ZHAO Xin-ming, SONG Jun-feng, et al. Department of Imaging Diagnosis, Cancer Hospital Chinese Academy of Medical Sciences, Peking Union Medical College, Beijing 100021, P. R. China

【Abstract】 Objective: To compare the three different acquisition techniques for diffusion-weighted imaging (DWI) of the upper abdomen at 1.5T or 3.0T. **Methods:** 21 volunteers underwent routine MRI examination at 1.5T and 3.0T scanner (GE Signa HDx). Three DWI examinations were then performed with breath-hold, respiratory-triggered and free-breathing techniques respectively ($b\text{-value} = 100$ and 800s/mm^2). The DWI images were independently evaluated by two radiologists regarding image quality, image artifacts, signal-to-noise ratio (SNR) and apparent diffusion coefficient (ADC) value. **Results:** The image quality of respiratory-triggered DWI was better at 3.0T than 1.5T ($P < 0.05$). The artifact score and image quality of free-breathing DWI were better at 1.5T than 3.0T ($P < 0.05$). Free-breathing DWI had the highest SNR among the three techniques. SNR of the liver was lower at 3.0T than 1.5T ($P < 0.05$). The ADC values of liver, gallbladder, kidney and pancreas showed no statistical differences between 1.5T and 3.0T ($P > 0.05$). **Conclusions:** DWI with respiratory-triggered technique can achieve better imaging quality at 3T, and DWI with free-breathing has the highest SNR. The ADC values of upper abdomen organs show no significantly differences between 1.5 and 3.0T.

【Key words】 Abdomen; Image processing, computer-assisted; Magnetic resonance imaging

磁共振扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)已广泛应用于腹部脏器疾病的评估, 提供了有用的定量和定性信息^[1-4]。目前, 很多上腹部的 MRI 检查在 3.0T 核磁共振机上进行, 但也有相当多的医院使用 1.5T 仪器扫描。本研究的目的就是对 1.5T 和 3.0T 常用的屏气、呼吸触发、自由呼吸 3 种技术采集到的 DWI 图像进行定量、定性分析, 以判断上腹部 DWI 的最佳扫描方案, 希望为今后的临床工作提供一个参考性意见。

材料与方法

1. 志愿者

作者单位:100021 北京, 北京协和医学院/中国医学科学院肿瘤医院影像诊断科

作者简介:史卓(1982-), 男, 陕西蒲城人, 硕士, 主管技师, 主要从事上腹部 MR 扫描序列的参数优化工作。

通讯作者:赵心明, E-mail: xinmingzh@sina.com

2013 年 9—12 月共有 21 位志愿者(其中男 13 例, 女 8 例, 平均年龄 47 ± 13 岁)参与了本次研究。所有志愿者均无上腹部主要脏器的疾病史。

2. MR 扫描方案

每位志愿者都经过 GE 的 1.5T 和 3.0T 扫描仪(Signa HDxt, GE Healthcare, USA)及体部相控阵线圈进行检查, 两套磁共振检查在同一天完成。其中, DWI 方案是在单次激发自旋回波平面成像(single-shot spin-echo echo-planar imaging, SE-EPI)序列的基础上分别进行屏气、呼吸触发和自由呼吸 3 种方式的扫描, b 值都是 100 和 800, 扫描层数为 24, 激励次数屏气为 1, 呼吸触发为 2, 自由呼吸为 4^[5]; 扫描范围包全上腹部(表 1)。

3. 图像分析

影像科 2 名高年资主治医师分别盲法记录、测量

表 1 3 种 DWI 在 1.5T 和 3T 中的成像技术和参数

参数	屏气 DWI (b100—b800)		呼吸触发 DWI (b100—b800)		自由呼吸 DWI (b100—b800)	
	1.5T	3.0T	1.5T	3.0T	1.5T	3.0T
TR(ms)	4500	4950	6700	7500	4500	4950
TE(ms)	65	65	75	65	75	65
扫描时间(s)	23	25	120	122	70	72
激励次数	1	1	2	2	4	4
带宽(kHz)	250	250	250	250	250	250
层厚(mm)	5	5	5	5	1	1
间距(mm)	1	1	1	1	1	1
层数	24	24	24	24	24	24
矩阵大小	128×128	128×128	128×128	128×128	128×128	128×128
脂肪抑制	SPIR	SPIR	SPIR	SPIR	SPIR	SPIR
加速因子	2	2	2	2	2	2
扩散梯度方向	ALL	ALL	ALL	ALL	ALL	ALL
FOV(mm)	360×360	360×360	360×360	360×360	360×360	360×360
呼吸门控	无	无	有	有	无	无

注：SPIR(spectral presaturation with inversion recovery, 反转恢复频率选择预饱和)

数据,他们通过 GE AW442 Workstation 进行定量和定性分析。

定量分析:对于每个器官的信噪比(signal to noise ratio,SNR)和表观扩散系数(apparent diffusion coefficient,ADC),观测者反复测量 3 次求其平均值,每次测量的位置需保持一致。圆形感兴趣区(region of interests,ROI)分别被放置于右肾皮质;肝脏的右后叶(门静脉主干及其右分支层面);脾脏的中部;以及胰尾部的 DWI 和 ADC 图上。相关组织 DWI 图像的

信噪比由下式计算^[6]:

$$SNR=\frac{SI}{SD}$$

SD 为背景噪声的标准差,其测量方法为放置一 1cm² 左右的 ROI 于腹壁外,由工作站自动得出其数值。

定性分析:DWI 图像伪影被归类成 3 组。①运动伪影包括呼吸、心跳、胃肠蠕动等周期性运动造成的伪影;②磁敏感伪影包含胃等含有气体的空腔,由涡电流效应引起的组织结构扭曲以及信号的丢失;③射频脉

表 2 1.5 和 3.0T 3 种 DWI 采集方式下各种伪影以及图像质量评分

参数	呼吸触发 DWI		屏气 DWI		自由呼吸 DWI	
	b100	b800	b100	b800	b100	b800
运动伪影						
1.5T	1.3±0.7	1.5±0.5	1.6±0.8	1.6±0.8	1.7±0.5	1.7±0.7
3.0T	1±0	1.1±0.3	1.9±0.5	1.8±0.6	3.1±0.7	3.2±0.6
t 值	2.520	2.312	-1.607	-0.675	-21.974	-26.371
P 值	0.02	0.04	0.16	0.50	<0.0001	<0.0001
磁敏感伪影						
1.5T	1.4±0.5	1.9±0.5	2.2±0.7	2.3±0.5	1.8±0.7	2±0.7
3.0T	1.7±0.6	2.1±0.9	2.7±0.6	2.5±0.5	2.6±0.7	2.4±0.7
t 值	-1.719	-0.691	-3.146	-1.913	-8.669	-2.373
P 值	0.1	0.5	0.006	0.08	<0.0001	0.03
射频脉冲伪影						
1.5T	1±0	1.7±0.3	1±0.3	2.4±0.4	1.2±0.4	1.9±0.4
3.0T	1.6±0.8	1.6±0.5	1.8±0.8	2.6±0.5	2.4±0.7	2.8±0.3
t 值	-2.535	0.692	-2.836	-1.324	-13.861	-11.379
P 值	0.02	0.50	0.01	0.20	<0.0001	<0.0001
平均伪影						
1.5T	1.2±0.3	1.7±0.4	1.9±0.4	2.5±0.5	1.6±0.3	1.9±0.5
3.0T	1.5±0.5	1.6±0.5	2.5±0.4	2.7±0.5	2.7±0.4	2.9±0.5
t 值	-1.883	0.857	-11.887	-1.727	-18.887	-9.977
P 值	0.07	0.40	<0.0001	0.10	<0.0001	0.0002
图像质量						
1.5T	3.5±0.5	2.5±0.5	2.7±0.6	2.4±0.7	3.6±0.5	2.7±0.4
3.0T	3.9±0.3	3.1±0.3	2.5±0.7	2.4±0.5	2.3±0.7	2±0.7
t 值	-2.206	-2.527	0.859	0.008	11.373	2.528
P 值	0.04	0.02	0.40	1	0.0003	0.02

冲不均一伪影(介电效应或涡电流造成),由叠加在图像上的暗区大小来评估。观测者用 4 分法对每组图像的伪影进行分级^[7,8]:1 分,无伪影;2 分,较少伪影;3 分,较多伪影;4 分,严重伪影;同时,两位医师还对所有 DWI 图像所描述的解剖细节进行评分:1 分,图像质量差;2 分,质量一般;3 分,质量较好;4 分,图像质量好。

4. 统计学分析

本研究均采用 SPSS 17.0 统计学软件(LEAD Technologies, New York, NY)对上述数据进行统计学分析。若各计量资料均符合正态分布,采用配对 *t* 检验或完全随机设计资料的方差分析进行比较;若各组变量不全符合正态分布,则采用配对设计符号秩检验或者完全随机设计多个样本比较的秩和检验进行分析。若检验水准为 0.05,依据 Bonferroni 校正 $P<0.05/3=0.0167$ 认为有统计学差异。

结 果

表 2 比较了 1.5 和 3.0T 3 种 DWI 序列的伪影和图像质量评分,从表格测得的各组数据中我们可以看出高 *b* 值较低 *b* 值伪影多,3.0T 较 1.5T 对伪影更敏感;其中,呼吸触发 DWI 3.0T 的图像质量优于 1.5T ($P<0.05$),而自由呼吸技术无论在 *b*100 和 *b*800 何种情况下,1.5T 的伪影评分以及图像质量均优于 3.0T。

表 3 显示了两种场强下屏气、呼吸触发和自由呼吸技术之间的伪影和图像质量评分比较的结果。从表中可以看出,3.0T 时呼吸触发 DWI 图像质量最好、伪影最少,而屏气 DWI 技术在 1.5T *b*=100 时的图像质量相对较差,*b*=800 时伪影相对较多($P<0.01$)。

表 4 总结了信噪比(signal to noise ratio,SNR)的比较结果:从采集方式来看自由呼吸 DWI 的信噪比高于呼吸触发、屏气技术;而两种场强下,无论是 *b*100 或

表 3 两种场强下三种 DWI 方案之间两两比较图像质量和伪影

参数	图像质量评分				平均伪影评分			
	1.5T		3.0T		1.5T		3.0T	
	b100	b800	b100	b800	b100	b800	b100	b800
呼吸触发	3.5±0.5	2.5±0.5	3.9±0.3	3.1±0.3	1.2±0.3	1.7±0.4	1.5±0.5	1.6±0.5
屏气	2.7±0.6	2.4±0.7	2.5±0.7	2.4±0.5	1.9±0.4	2.5±0.5	2.5±0.4	2.7±0.5
<i>t</i> 值	3.381	0.107	15.961	3.150	-13.381	-17.818	-21.232	-27.661
<i>P</i> 值	0.003	0.9	<0.0001	0.006	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
呼吸触发	3.5±0.5	2.5±0.5	3.9±0.3	3.1±0.3	1.2±0.3	1.7±0.4	1.5±0.5	1.6±0.5
自由呼吸	3.6±0.5	2.7±0.4	2.3±0.7	2±0.7	1.6±0.3	1.9±0.5	2.7±0.4	2.9±0.5
<i>t</i> 值	-0.398	-0.856	17.757	14.885	-2.374	-0.857	-30.323	-35.667
<i>P</i> 值	0.7	0.4	<0.0001	<0.0001	0.03	0.4	<0.0001	<0.0001
屏气	2.7±0.6	2.4±0.7	2.5±0.7	2.4±0.5	1.9±0.4	2.5±0.5	2.5±0.4	2.7±0.5
自由呼吸	3.6±0.5	2.7±0.4	2.3±0.7	2±0.7	1.6±0.3	1.9±0.5	2.7±0.4	2.9±0.5
<i>t</i> 值	-13.850	-1.719	1.101	2.006	1.731	2.848	-0.853	-0.687
<i>P</i> 值	<0.0001	0.1	0.3	0.06	0.09	0.01	0.4	0.5

表 4 两种场强的三种 DWI 方案下不同腹部器官测得的 SNR

参数	b100 信噪比(SNR)					b800 信噪比(SNR)				
	1.5T	3.0T	差异分数	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	1.5T	3.0T	差异分数	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
呼吸触发										
肝脏	5±1.8	3.6±1.5	1.3±0.2	21.385	<0.0001	1.9±0.6	1.7±0.7	0.2±0.1	1.719	0.1
胆囊	43±22	59±20	-15.8±10	-36.661	<0.0001	4.9±2.2	6.8±3.1	-1.8±1.3	-9.674	<0.0001
肾脏	23±2.8	27±7.6	-3.7±4	-3.819	0.001	4.4±0.9	5.6±1.5	-1.3±0.3	-3.153	0.005
脾	17±8	18±12	-1.8±1.7	-2.389	0.3	8.5±4.4	10.5±6.9	-1.9±1	-3.666	0.002
胰腺	8.4±3.3	10±2.6	-1.6±0.7	-10.474	<0.0001	2.8±0.7	4±1.6	-1.2±0.4	-2.841	0.01
屏气										
肝脏	3.6±1.3	1.9±0.5	1.6±0.4	3.297	0.004	2.7±0.8	1.6±0.3	1.1±0.5	10.082	<0.0001
胆囊	35±9	40±20	-5±11	-2.083	0.05	3±0.5	4±1.6	-1±1.1	-4.166	0.0005
肾脏	17±6.3	20±5	-3±1.3	-10.575	<0.0001	3.6±0.8	4±0.4	-0.4±0.4	-4.583	0.0002
脾	10±7	15±11	-5±4	-5.728	<0.0001	6.3±4.5	7.8±4.2	-1.5±0.3	-22.913	<0.0001
胰腺	5.7±1.2	6.2±2	-0.5±0.8	-2.864	0.01	2.7±0.5	2.7±0.9	0±0.4	0.000	1.0
自由呼吸										
肝脏	7.3±2.9	5.7±2.3	1.6±0.6	12.220	<0.0001	3.3±0.9	2.3±0.9	0.9±0.2	3.401	0.003
胆囊	57±12	63±15	-6±3	-9.165	<0.0001	8.6±3.4	10±7	-1.4±3.6	-1.782	0.09
肾脏	31±5.5	37±9	-6±3.5	-7.856	<0.0001	6.4±1.6	7±3.4	-0.6±1.8	-1.528	0.142
脾	25±15	27±20	-2±5	-1.833	0.082	11±5.3	12.5±9.5	-1.5±4.2	-1.637	0.117
胰腺	13±6	16±5	-3±1	-13.748	<0.0001	5±2	6±3	-1±1	-4.583	0.0002

b800,胆囊、肾、脾和胰腺在 3.0T 中的 SNR 均高于 1.5T,而肝脏大部分情况却低于 1.5T。

表 5、6 显示了两场强下 b 值为 800、100 时,正常器官 ADC 值比较的结果,其中,1.5 和 3.0T 之间所测正常肝脏、胆囊、肾脏、脾和胰腺的 ADC 值均无统计学差异($P>0.05$)。整体说来脾脏的 ADC 值是这几个器官中最低的。

表 5 两种场强下正常器官 b=800 时的 ADC 值

器官	1.5T	3.0T	差异分数	t 值	P 值
肝脏	1.16±0.2	1.13±0.2	0.03±0.024	1.081	0.3
胆囊	2.6±0.4	2.6±0.3	0.001±0.082	0.107	0.9
肾脏	1.8±0.1	1.8±0.1	0.013±0.021	0.398	0.7
脾	0.7±0.05	0.68±0.08	0.017±0.014	1.329	0.2
胰腺	1.07±0.1	1.08±0.1	-0.011±0.021	-0.687	0.5

表 6 两种场强下正常器官 b=100 时的 ADC 值

器官	1.5T	3.0T	差异分数	t 值	P 值
肝脏	2.79±0.5	2.76±0.3	0.03±0.027	1.319	0.2
胆囊	3.6±0.7	3.59±0.7	0.011±0.061	0.680	0.5
肾脏	3.38±0.7	3.39±0.6	-0.01±0.029	-0.687	0.5
脾	1.17±0.2	1.15±0.2	0.037±0.014	1.318	0.2
胰腺	3.16±0.7	3.17±0.6	-0.013±0.03	-0.686	0.5

讨 论

1. 1.5T 与 3.0T

3.0T 磁共振扫描仪已经广泛应用于临床,DWI 的研究热点也早已从单指数模型转向双指数、拉伸指数等模型的研究^[9]。但目前上腹部 DWI 序列应如何运用的报道并不统一^[5,10,11]。理论上,3.0T 磁共振扫描仪是最理想的 DWI 成像系统,可以提供两倍于 1.5T 的固有信噪比。但是,高场强下的腹部 DWI 成像也面临着磁化率不同引起的几何畸变,高度的磁场敏感性引起的信号丢失,严重的运动伪影,以及由于脂肪组织配准不良引起的化学位移伪影等挑战。我们的研究结果也证明了这几点:表 2 中 3.0T 呼吸触发 DWI 的图像质量虽然优于 1.5T($P<0.05$),但 b=100 时,3.0T 屏气技术采集到的伪影却较 1.5T 多($P<0.0001$),且 1.5T 自由呼吸 DWI 的图像质量及

伪影评分都优于 3.0T;整体说来高 b 值较低 b 值的伪影多,3.0T 较 1.5T 对伪影更敏感。

3.0T 另一项需要关注的方面是驻波(立波)和介电效应,它们的物理行为(无论是相长干涉或相消干涉)会削减射频脉冲的均一性。当静磁场强度增加时,这种效应会更明显,3.0T 较 1.5T 会更多的受到射频脉冲不均一伪影的影响。在我们的研究当中,b100 的组织信号强度较 b800 高,可以很好的观察到这一现象:随着场强的增加,尤其在这种自旋回波序列(SE-EPI)中,为了满足上腹部的轴向扫描参数,射频脉冲的带宽必须增加、波长必须减少,图像信号(尤其是上腹部中心)就会不均一或者丢失,这也是肝左叶或胰腺经常不清楚的原因。高场强下这种伪影的严重程度取决于多种因素,包括被检查物的几何结构和电性质,射频线圈的设计,以及激励电源、射频线圈和被检物之间的相互作用。目前,已有改良设计的线圈使射频场更加均匀。

理论上,ADC 值与磁场强度无关,我们的研究结果也证明了这一点。虽然脾脏的值最低,但本研究与 Matsuoka^[12]和 Notohamiprodjo^[13]的报道相近,重点脏器在 1.5T 和 3.0T 中的 ADC 值均无差异;尽管 Lavdas 等^[14]发现 Siemens Avanto 1.5T 所测 ADC 值高于 Verio 3.0T,但他们同时也注意到 Philips Achieva 1.5T 测得的 ADC 值却低于 Achieva 3.0T,所以这种偏差很可能与扫描机型有关,相关的结论仍有待今后进一步补充和完善。

另一方面,两种场强下信噪比(SNR)却呈现出另一番比较结果:肝脏在 3.0T 中的 SNR 明显低于 1.5T,而胆囊、右肾、脾和胰腺均高于 1.5T(表 4)。从采集方式来看,自由呼吸 DWI 的 SNR 整体上高于呼吸触发和屏气技术。这些结果提示我们今后针对不同检查的对象,应采取相应的扫描策略。

2. 屏气、呼吸触发与自由呼吸

上腹部 DWI 呼吸运动伪影的消除方法已有多种,

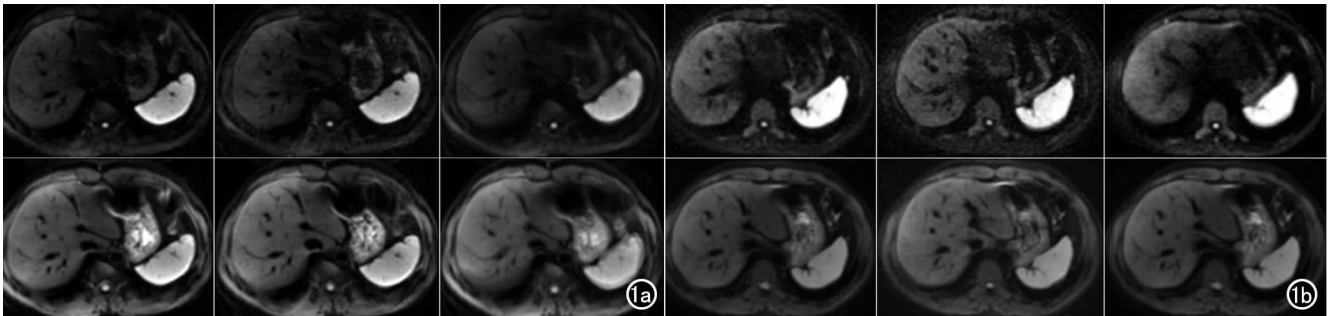


图 1 志愿者的同一层面在 3.0T 和 1.5T 上进行 3 种采集方式的扫描结果。其中,3.0T 呼吸触发 DWI 的图像质量优于 1.5T,而 1.5T 自由呼吸 DWI 图像均优于 3.0T;自由呼吸 DWI 的信噪比高于呼吸触发,屏气技术。a) 3.0T; b) 1.5T,上排 b=800,下排 b=100。RT:Respiratory Triggered DWI,呼吸触发 DWI;BH:Breath-hold DWI,屏气 DWI;FB:Free-Breathing DWI,自由呼吸 DWI。

但诸如心脏搏动、胃肠蠕动的伪影仍不可避免,仍会降低图像质量。单次激励的 SE-EPI 序列的 K 空间填充时间虽然很快,但由于读出间隔的限制,一次采集完上腹部 DWI 图像的时间最快也得 20s 左右,因此自由呼吸扩散加权成像必然会受到呼吸运动的影响。屏气方案是唯一可以减少上腹部呼吸运动的 DWI 采集技术,但它又受到采集时间的制约,所以其激励次数较低($NEX=1$),SNR 和空间分辨率都会受到影响;为了补偿图像由于呼吸运动造成的病变显示不清,我们与 Choi 等^[5,15-17]的方案设计类似,自由呼吸 DWI 的激励次数最高($NEX=4$),呼吸触发 DWI 居中($NEX=2$),所以 3 种方式之间的参数不可能完全一致。

本研究的结果显示当场强为 3.0T 时,呼吸触发 DWI 相对于另外两种技术的图像质量好、伪影少,其评分也较 1.5T 好,且两种场强下的扫描时间基本一致;而屏气 DWI 在 1.5T 低 b 时的图像质量相对较差,高 b 时,伪影又相对较多;另一方面,3.0T 自由呼吸技术因为没有进行呼吸补偿,图像更多受到运动伪影的影响,与 1.5T 相比图像质量差,需要用门控技术进行采集纠正(表 3)。因此在高场强下(3.0T),尤其是不能平静呼吸的患者,自由呼吸方案在增加了激励次数后,有可能导致像素配准错误,图像质量会被降低,这种效应在微小病变的检测中非常明显,所以屏气技术减少呼吸伪影的作用仍需做进一步的研究。但因大部分患者最多能坚持 20s 左右的屏气时间,就目前的情况而言,3.0T 呼吸触发技术仍属于获取最佳 DWI 图像质量的采集方案。

3. 本研究的局限性

本研究也存在一些局限:①队列的规模较小,入组的都是正常、健康、合作较好的志愿者,与典型的有上腹部脏器疾病的患者情况不同,DWI 的图像伪影和质量会不一样;②没有比较和评估呼气末血液的系统性高流速、伪各向异性效应对 ADC 值影响的大小^[10,18];③不同厂家的型号和参数可能会不同,这里得出的结论是否可以推广应用,仍有待今后进一步补充和验证。

参考文献:

[1] Doshi AM, Campbell N, Hajdu CH, et al. Differentiation of malignant omental caking from benign omental thickening using MRI[J]. Abdom Imaging, 2014, 14.

[2] 胡瑶,胡道予,王秋霞,等. 多 b 值 DWI 指数模型对胰腺肿瘤鉴别诊断价值初探[J]. 放射学实践, 2014, 29(3): 305-309.

[3] 姚秀忠,许红莲,顾君英,等. 正常胰腺在 3.0T MR 不同 DWI 序列上的 ADC 值评价[J]. 放射学实践, 2013, 28(2): 173-176.

[4] Sandrasegaran K. Functional MR imaging of the abdomen[J]. Radiol Clin North Am, 2014, 52(4): 883-903.

[5] Choi JS, Kim MJ, Chung YE, et al. Comparison of breathhold, navigator-triggered, and free-breathing diffusion-weighted MRI for focal hepatic lesions[J]. J Magn Reson Imaging, 2013, 38(1): 109-118.

[6] 杨正汗,冯逢,王霄英. 磁共振成像技术指南(第二版)[M]. 人民军医出版社, 2010: 424-426.

[7] Bernstein MA, Huston J, Ward HA. Imaging artifacts at 3.0T[J]. J Magn Reson Imaging, 2006, 24(4): 735-746.

[8] Le Bihan D, Poupon C, Amadon A, et al. Artifacts and pitfalls in diffusion MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2006, 24(3): 478-488.

[9] 车树楠. 磁共振扩散加权成像不同模型对于肝脏恶性肿瘤性病变定量诊断价值的研究[D]. 北京大学医学部, 2013: 12-18.

[10] Kwee TC, Takahara T, Koh DM, et al. Comparison and reproducibility of ADC measurements in breathhold, respiratory triggered, and free-breathing diffusion-weighted MR imaging of the liver[J]. J Magn Reson Med, 2008, 28(5): 1141-1148.

[11] Nasu K, Kuroki Y, Sekiguchi R, et al. The effect of simultaneous use of respiratory triggering in diffusion-weighted imaging of the liver[J]. Magn Reson Med Sci, 2006, 5(3): 129-136.

[12] Matsuoka A, Minato M, Harada M, et al. Comparison of 3.0 and 1.5 Tesla diffusion-weighted imaging in the visibility of breast cancer[J]. Radiat Med, 2008, 26(1): 15-20.

[13] Notohamiprodjo M, Dietrich O, Horger W, et al. Diffusion tensor imaging (DTI) of the kidney at 3 tesla-feasibility, protocol evaluation and comparison to 1.5 Tesla[J]. Invest Radiol, 2010, 45(5): 245-254.

[14] Lavdas I, Miquel ME, McRobbie DW, et al. Comparison between diffusion-weighted MRI (DW-MRI) at 1.5 and 3 tesla: a phantom study[J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 40(3): 682-690.

[15] Taouli B, Sandberg A, Stemmer A, et al. Diffusion-weighted imaging of the liver: comparison of navigator triggered and breathhold acquisitions[J]. J Magn Reson Imaging, 2009, 30(3): 561-568.

[16] Baltzer PA, Schelhorn J, Benndorf M, et al. Diagnosis of focal liver lesions suspected of metastases by diffusion-weighted imaging (DWI): systematic comparison favors free-breathing technique[J]. Clin Imaging, 2013, 37(1): 97-103.

[17] 王海屹,王佳,叶慧义,等. 自由呼吸扩散加权成像与屏气扩散加权成像在肾脏病变方面的对比研究[J]. 中国医学影像学杂志, 2011, 19(6): 436-441.

[18] Nasu K, Kuroki Y, Fujii H, et al. Hepatic pseudo-anisotropy: a specific artifact in hepatic diffusion-weighted images obtained with respiratory triggering[J]. MAGMA, 2007, 20(4): 205-211.

(收稿日期: 2014-11-03 修回日期: 2015-03-10)