

## · 儿科磁共振成像专题 ·

## 双时相 3D SSFP 成像技术在先天性心脏病诊断中的应用初探

孙爱敏, 钟玉敏, 王谦, 王静蕾, 朱铭, 邵虹

**【摘要】** 目的:探讨双时相三维稳态进动快速成像序列(3D SSFP)对先天性心脏病的诊断价值。方法:60例平均心率108次/分的先天性心脏病患儿行收缩末期和舒张中晚期的双时相3D SSFP成像,对图像质量及对比噪声比进行分析比较。结果:心电触发收缩期延迟时间为180~300 ms,平均(235.41±35.59) ms;舒张期延迟时间为384~550 ms,平均(443.77±50.81) ms。3D SSFP收缩期图像上显示心内结构及肺静脉、上下腔静脉的清晰度优于舒张期,两者间图像质量的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。舒张期图像上对无狭窄主动脉及肺动脉的显示清晰度高于收缩期,但两者间差异无统计学意义( $P>0.05$ )。收缩期图像上心内结构的对比噪声比(CNR)均高于舒张期,且两者比较差异有统计学意义( $P<0.05$ )。上腔静脉及下腔静脉在收缩期图像上的CNR均高于舒张期,但仅下腔静脉CNR的差异有统计学意义( $P<0.05$ );主动脉和肺总动脉则在舒张期图像上的CNR高于收缩期,但两者比较差异无统计学意义( $P>0.05$ )。伴有肺动脉瓣及瓣下狭窄的肺动脉分支在收缩期的显示率(39.1%)明显低于舒张期(73.9%)。结论:双时相3D SSFP综合利用收缩期和舒张期不同时相的成像优势,能更准确地诊断先天性心脏病患儿的心内及心外大血管结构的畸形。

**【关键词】** 磁共振血管成像;先天性心脏病;血管畸形;图像质量;诊断

**【中图分类号】** R445.2; R541.1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2014)08-0860-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2014.08.003

**Preliminary study of three dimensional dual-phase steady state free precession imaging technique in the diagnosis of congenital heart diseases** SUN Ai-min, ZHONG Yu-min, WANG Qian, et al. Department of Radiology, Shanghai Children's Medical Center, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200127, P. R. China

**【Abstract】 Objective:** To evaluate the value of MRI dual phase three dimensional steady state free precession (dual-phase 3D SSFP) sequence in the diagnosis of congenital heart disease (CHD). **Methods:** 60 pediatric patients of CHD with the average heart rate as 108 beats/min underwent MRI dual-phase 3D SSFP sequence, the acquired images were at the end systolic phase and mid-late diastolic phase. The image quality and contrast-to-noise ratio (CNR) were analyzed and compared. **Results:** The ECG trigger delay time was 180~300ms [mean = (235.41±35.59)ms] in systole and 384~550ms [m = (443.77±50.81)ms] in diastole. The image qualities of intra-cardiac structures, pulmonary veins, superior and inferior vena cava in 3D SSFP systole were significantly better than that in diastole, with statistical difference ( $P<0.05$ ). However, the distinctness of aorta with no stenosis and main pulmonary artery was better in diastole compared with that of systole, yet with no statistical difference ( $P>0.05$ ). The CNR of intra-cardiac structures was significantly higher in 3D SSFP systole than in diastole, with statistic difference ( $P<0.05$ ). The CNR of SVC and IVC was higher in systole, but only the CNR of IVC showed statistical difference ( $P<0.05$ ). The CNR of aorta and main pulmonary artery was lower in systole than in diastole, but there was no statistical difference ( $P>0.05$ ). In patients with pulmonary stenosis and subvalvular pulmonary stenosis, the percentage of visibility of pulmonary artery branches in systole was only 39.1%, but was higher in diastole (73.9%). **Conclusion:** Dual-phase 3D SSFP sequence had the advantages of showing images in systole and diastole and ultimately can provide more accurate diagnosis of intra-/ extra-cardiac great vessel abnormalities in pediatric patients with CHD.

**【Key words】** Magnetic resonance angiography; Congenital heart diseases; Vessel malformation; Image quality

近十多年来,无需对比剂的单时相舒张期三维稳态自由进动(three dimensional steady state free precession, 3D SSFP)序列已广泛应用于成人冠状动脉成像中,在先天性心脏病(congenital heart disease, CHD)检查中也逐步得到应用<sup>[1,2]</sup>。由于先天性心脏病的特殊性,心内及心外大血管结构可发生各种改变,包括心内分流、大血管狭窄等,从而影响血流的方向、

流速等血流动力学的改变,同时CHD患者往往心率较快,单一时相的3D SSFP图像质量往往不能满足诊断要求。本文探讨不增加扫描时间的双时相3D SSFP在CHD心内及心外解剖结构成像中的特点。

## 材料与方法

### 1. 一般资料

2014年3月—2014年5月在本院行3D双时相SSFP成像的先天性心脏病患者60例,其中男38例,女22例,年龄2个月~13岁,平均(3.63±4.39)岁。患者心率81~128次/分,平均108次/分。术前患者

作者单位:200127 上海,上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心放射科

作者简介:孙爱敏(1969-),女,上海人,副主任医师,硕士,主要从事小儿先天性心脏病影像学诊断工作。

通讯作者:邵虹, E-mail: aiminsun217@yahoo. com

39 例,病种分布情况见表 1;术后患者 21 例,手术方法分类见表 2。

表 1 术前患者 CHD 病种分布情况

先天性心脏病种类	例数
室间隔缺损	10
主动脉缩窄	2
法乐氏三联征	12
肺动脉瓣闭锁伴室间隔缺损	5
右室双出口	4
完全性大动脉错位	2
完全性肺静脉异位引流	1
主动脉瓣上狭窄	2
冠状动脉起源异常	1

表 2 CHD 手术方法分类情况

手术方法分类	例数
室间隔或动脉导管术后	3
中央分流术后	1
Banding 术后	1
Glenn 术后	6
Fontan 术后	2
法乐氏三联征根治术后	5
肺动脉闭锁根治术后	2
大动脉转位术后	1

## 2. MRI 检查

采用 Philips Achieva 1.5T 磁共振扫描仪,5 通道儿童体部线圈和 16 通道体部相控阵线圈。5 岁以下或不能配合患儿给予 10% 水合氯醛(0.4 mL/kg)口服或苯巴比妥 5 mg/kg 肌注镇静。

在 3D SSFP 成像前,先进行常规序列扫描。2D 电影 SSFP(B-TFE)序列:横轴面或矢状面、冠状面扫描,选择性左心室及右心室流出道等部位成像,根据具体疾病种类决定。扫描参数:TR<4 ms,TE<2 ms,翻转角 60°,层厚 5~8 mm,层间隔 0 mm,视野(25~32) cm×(15~24) cm,体素(1.2~1.4) mm×(1.4~1.6) mm,每层 20~25 帧图像,3~4 次激励,回顾性心电门控,自由呼吸,图像采集时间 2 min 30 s~3 min 35 s。对比剂增强血管成像(contrast enhanced MRA, CE-MRA)采用三维快速扰相梯度回波或 4D 锁钷技术高分辨率血管成像序列。CE-MRA 扫描参数:视野(28~33) cm×(16~24) cm,体素(1.2~1.4)×(1.3~1.5)×(0.75~0.90) mm<sup>3</sup>,冠状面或矢状面,3 次动态扫描。4D 锁钷技术高时间分辨血管成像设置锁钷为 40%,8 次动态扫描。对比剂采用马根维显或欧乃影,剂量 0.1~0.2 mmol/kg。

3D 双时相 SSFP 序列:采集框为冠状面,覆盖心脏及周围大血管,自由呼吸,运用前瞻性心电门控和膈肌导航技术,在呼吸末采用同一序列同时采集心脏收缩末期和舒张中晚期图像。扫描参数:TR 4.6 ms,TE 2.3 ms,翻转角 90°,视野(25~32) cm×(14.5~25.0) cm,体素(1.2~1.5) mm×(1.2~1.5) mm×

(0.60~0.75) mm。Sense 因子 2, T<sub>2</sub> 预脉冲 35 ms,采集窗宽 45~85 ms,1 次激励,图像采集时间 150~230 s,膈肌导航窗宽为 3~6 mm,导航效率 35%~65%。在呼吸末同时采集心脏收缩末期和舒张中晚期图像。心电图触发延迟时间和图像采集窗宽因人而异,具体通过高时间分辨力(60~80 帧/心动周期)、2D SSFP(B-TFE)电影序列的四腔心获得。心电图触发延迟时间为心电图 R 波至右房室沟右冠状动脉停止运动的时间;收缩期采集窗宽为右房室沟右冠状动脉停止运动至三尖瓣开始开放间期,舒张期采集窗宽为右冠状动脉停止运动至心房开始收缩的间期。

图像处理:采用最大密度投影技术等在工作站对 CE-MRA、3D SSFP 收缩期和舒张期图像分别进行图像重建。

图像评价分析:对 3D SSFP 收缩期和舒张期的内心结构及主动脉、肺动脉、肺静脉、上下腔静脉分别进行图像质量评分和对比噪声比评估。图像质量按 5 分评分原则:图像质量差,无法进行诊断为 1 分;图像边缘明显模糊,诊断不确定为 2 分;图像边缘中度模糊,但不影响诊断为 3 分;图像边缘轻度模糊,明确诊断为 4 分;图像边界清晰,为 5 分。对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR)则根据公式(1)计算<sup>[8]</sup>:

$$CNR = \frac{2(S_{\text{血液}} - S_{\text{心肌}})}{N_{\text{血液}} + N_{\text{心肌}}} \quad (1)$$

变量均为平均值, S=平均信号强度, N=标准差。测量收缩期和舒张期左右心房及心室内血液,升主动脉、肺总动脉、上下腔静脉内血液的平均信号强度及标准差,同时测量室间隔的平均信号强度及标准差作为对比,然后对收缩期和舒张期 CNR 数值进行比较。

## 3. 统计学处理

采用 SPSS 11.0 软件进行统计学分析。采用 Wilcoxon 秩和检验比较收缩期和舒张期的图像质量,配对 t 检验比较心内及心外大血管收缩期及舒张期的对比噪声比。P<0.05 为差异有统计学意义。

## 结 果

心电触发收缩期延迟时间为 180~300 ms,均值为(235.41±35.59) ms;舒张期为 384~550 ms,均值为(443.77±50.81) ms。

3D SSFP 收缩期图像心房(4.23±0.46)、心室(4.73±0.45)、腔静脉(4.20±0.56)及肺静脉(3.8±0.56)的图像质量评分均高于舒张期[心房(2.87±0.64)、心室(3.33±0.62)、腔静脉(3.00±0.65)及肺静脉(2.53±0.52)],且两组间差异有统计学意义(P<0.05),即在显示心房、心室、腔静脉和肺静脉时以收缩期图像更佳(图 1、2)。在无大血管狭窄的患者

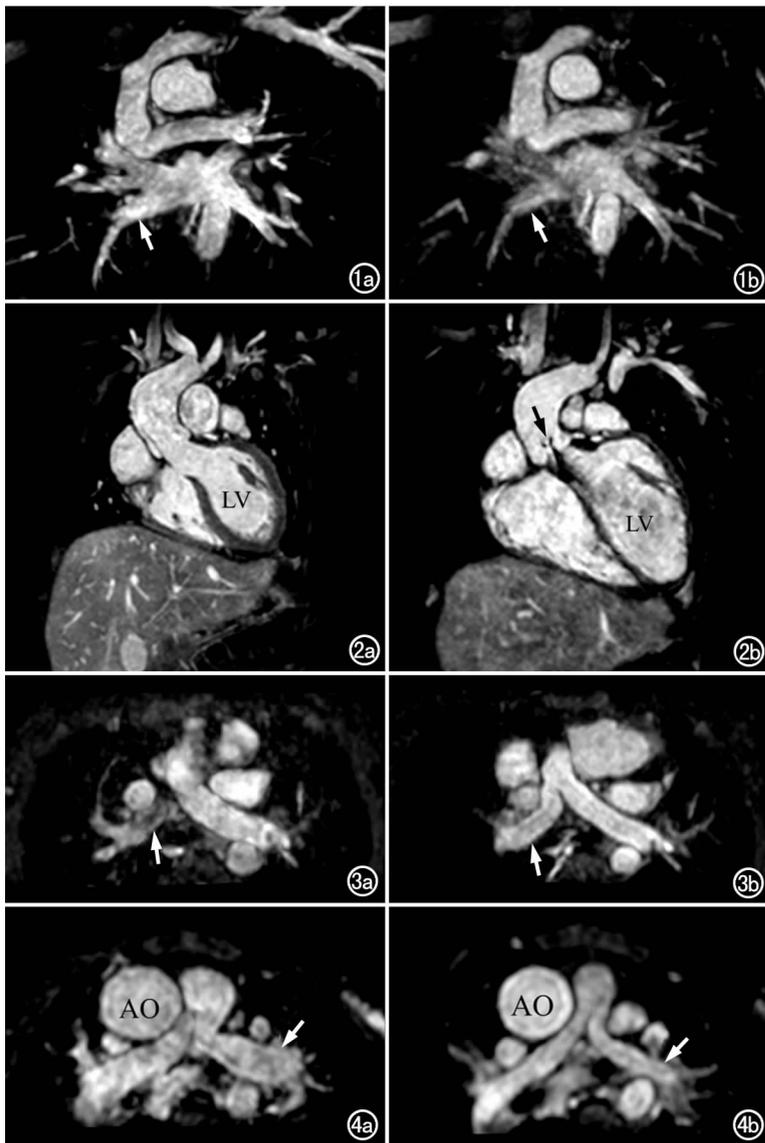


图 1 肺静脉双时相 3D SSFP MIP 图,收缩期肺静脉(箭)图像质量及对比噪声比均高于舒张期。a) 收缩期; b) 舒张期。图 2 左心室(LV)双时相 3D SSFP MIP 图。a) 左心室收缩期图像质量高于舒张期; b) 舒张期同时见主动脉瓣反流(箭)。图 3 完全性大动脉转位术后患者肺动脉分支双时相 3D SSFP MIP 图。a) 右肺动脉(白箭)收缩期图像,示右肺动脉内血流受湍流影响而无法清晰显示; b) 舒张期图像,清晰显示右肺动脉解剖结构(箭)。图 4 升主动脉短轴(AO)及肺动脉分支(箭)双时相 3D SSFP MIP 图,舒张期主动脉对比噪声比及左右肺动脉分支的图像质量均高于收缩期。a) 收缩期; b) 舒张期。

中,主动脉( $4.8 \pm 0.42$ )及肺动脉( $4.53 \pm 0.52$ )舒张期图像质量(图 3)高于收缩期[分别为( $4.47 \pm 0.52$ )和( $4.07 \pm 0.59$ )],前者在两组间差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),后者差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。在 23 例伴有肺动脉瓣及瓣下狭窄者中,14 例(60.9%)在 3D SSFP 收缩期图像上肺动脉分支信号丢失(图 3),肺动脉分支显示清晰者仅占 39.1%,而舒张期肺动脉分支显示率达 73.9%(17/23)。

收缩期和舒张期图像上心内及心外血管的 CNR

测量结果见表 3。

表 3 心内及心外血管对比噪声比(CNR)

部位	对比噪声比		P 值
	收缩期	舒张期	
左心房	$8.67 \pm 2.27$	$6.03 \pm 2.57$	0.010
右心房	$9.31 \pm 2.19$	$7.33 \pm 3.26$	0.020
左心室	$10.44 \pm 2.16$	$7.03 \pm 1.89$	0.000
右心室	$9.96 \pm 2.47$	$6.94 \pm 2.08$	0.002
升主动脉	$7.78 \pm 2.71$	$8.57 \pm 2.90$	0.308
肺总动脉	$8.38 \pm 3.37$	$9.45 \pm 3.33$	0.467
上腔静脉	$6.68 \pm 1.97$	$6.16 \pm 2.18$	0.261
下腔静脉	$7.95 \pm 2.37$	$6.00 \pm 2.26$	0.003

心内结构如左心房、左心室、右心房、右心室在收缩期的 CNR,均高于舒张期,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。上腔静脉及下腔静脉收缩期 CNR 均高于舒张期,但仅后者在两组间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。主动脉和肺总动脉则在舒张期的 CNR 高于收缩期(图 4),但两组间差异无统计学意义( $P = 0.26$ )。

3D SSFP 收缩期及舒张期成像在先天性心脏病心脏三节段分析中,对内脏心房定位、室间隔缺损位置、房室连接方式及心室和大动脉连接方式的诊断敏感度均为 100%,特异度 100%。

## 讨论

3D SSFP 序列由于膈肌导航和心电触发技术的应用,去除了运动(包括心脏搏动和呼吸运动)的影响,使心肌和血管壁成像更清晰,尤其适于无法控制呼吸的先心病患者。目前无论是成人的 3D SSFP 冠状动脉成像,还是小儿先心病的诊断,基本以单一时相成像为主。成人冠脉成像心电触发延迟时间多选择舒张中晚期,采集窗宽可达 200 ms 以上,因成人心率基本低于 80 次,舒张期有较长的心脏相对静止期。而儿童尤其伴有先心病患者,往往心率较快,可达 120 次/分以上。由于心率快慢的变化,更多影响的是舒张期的长短,对收缩期影响较少,所以快心率患者收缩期心脏运动相对静止期往往长于舒张期,因此快心率儿童的 3D SSFP 序列往往选择收缩期成像<sup>[4]</sup>。但先天性心脏病患儿不仅心率快,往往伴有复杂的心内及心外大血管结构畸形,包括心内及大动脉水平的分流、瓣膜的反流、左右心室流出道的梗阻、大血管的狭窄等,从而导致血流方向、流速等血流动力学的复杂改变,继而对不同时相的 3D SSFP 图像产生不同影响。如本组中收缩期时心内结构(包括心房及心室)、心外大静脉(包括肺静脉及上下腔静脉)的显示均较舒张期更好,而主动

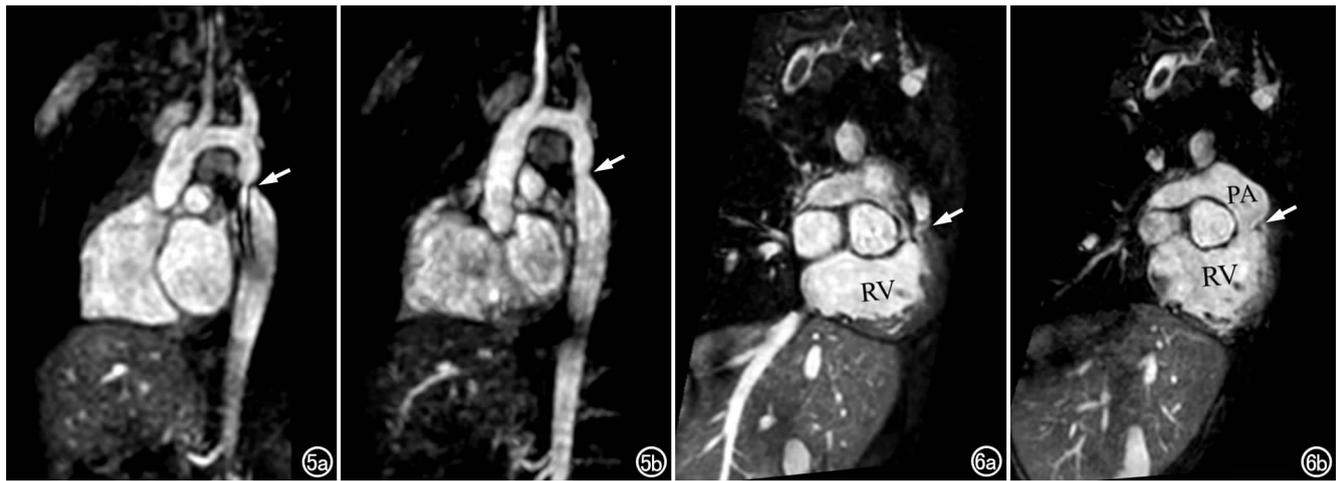


图5 主动脉缩窄患者双时相3D SSFP MIP图。a) 收缩期可见血流过狭窄部位(箭)的射流征象; b) 舒张期较收缩期能更好显示主动脉缩窄部位(箭)。图6 右室流出道狭窄(白箭)右前斜位双时相3D SSFP MIP图。a) 收缩期图像示过狭窄处的快速血流信号丢失,影响狭窄部位的显示(箭); b) 舒张期图像不受狭窄处血流的影响,能清晰显示狭窄部位(箭)。

脉及肺动脉则在舒张期好于收缩期,因为心电触发是选择心脏相对运动静止期而非动脉运动静止期,大动脉在心脏收缩相对静止期仍可保持持续运动,而在舒张期则与心脏运动基本保持一致。如血管有狭窄,以舒张期成像优势更明显,因血流经过狭窄区时在SSFP序列上易造成信号丢失,影响狭窄部位的显示,所以为了减少湍流等对图像的影响,应选择舒张期成像(图5、6)<sup>[5]</sup>。

综上所述,显示心内结构一般宜选择收缩期成像,主动脉及肺动脉及其分支、或狭窄部位的显示一般应选择舒张期成像。但如用传统的方法分别采集收缩期及舒张期3D SSFP图像,就需增加图像采集时间,基本上为单一时相成像时间的两倍。而随着技术的发展,双时相3D SSP已被应用于心室容量及心功能的评估中<sup>[6]</sup>。即一个3D SSFP序列同时获得收缩期和舒张期的图像,不增加扫描时间。双时相3D SSFP在图像后处理时可提供更多的选择,可优先选择更好时相的图像,或者相对更高质量的图像进行重建,有利于对心脏及血管异常结构的显示,提高诊断准确性。

儿童先心病患者往往伴随较快心率,本组中平均108次/分。所以准确的心电触发延迟时间及合理采集窗宽的选择是同时获得收缩期及舒张期高质量3D SSFP图像的关键。由于不同的心率时收缩期内心脏相对静止期与舒张中晚期往往不一致。所以为获得高质量的图像,可以在适度增加图像采集时间的前提下,尽可能选择相对短的采集窗宽<sup>[7]</sup>。本组中最短的采集窗宽为45 s,图像采集时间为3 min,导航效率约50%。心电触发延迟时间及采集窗宽可以从高时间分辨率的2D四腔心电影SSFP序列中获得,每个心动周期60~80帧图像,根据房室沟内运动幅度较大的右冠状动脉的运动情况来判断心脏收缩期及舒张期的相对静止

期。但患者如心率过快, $>130$ 次/分,由于过短的RR间期,无法进行双时相3D SSFP成像,即使可进行成像,舒张期图像质量往往较差,无诊断价值。

在儿童快心率先心病诊断中,双时相3D SSFP克服了单一时相的局限性,能更充分地综合利用收缩期和舒张期不同时相的成像优势,更清晰显示先天性心脏病心内及心外大血管结构畸形,提高诊断准确性。

#### 参考文献:

- [1] Sørensen TS, Körperich H, Greil GF, et al. Operator-independent isotropic three-dimensional magnetic resonance imaging for morphology in congenital heart disease: a validation study[J]. *Circulation*, 2004, 110(2): 163-169.
- [2] Beerbaum P, Sarikouch S, Laser KT, et al. Coronary anomalies assessed by whole-heart isotropic 3D magnetic resonance imaging for cardiac morphology in congenital heart disease[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2009, 29(2): 320-327.
- [3] Arai AE, Epstein FH, Bove KE, et al. Visualization of aortic valve leaflets using black blood MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 1999, 10(5): 771-777.
- [4] Tangcharoen T, Bell A, Hegde S, et al. Detection of coronary artery anomalies in infants and young children with congenital heart disease by using MR imaging[J]. *Radiology*, 2011, 259(1): 240-247.
- [5] Hussain T, Lossnitzer D, Uribe S, et al. Three dimensional dual-phase whole-heart MR imaging: clinical implications for congenital heart disease[J]. *Radiology*, 2012, 263(2): 547-554.
- [6] Delgado JA, Abad P, Rascovsky S, et al. Assessment of cardiac volumes using an isotropic whole-heart dual cardiac phase sequence in pediatric patients[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2014, 39(3): 708-716.
- [7] Gweon HM, Kim SJ, Lee SM, et al. 3D Whole-Heart coronary MR angiography at 1.5T in healthy volunteers: comparison between unenhanced SSFP and Gd-enhanced FLASH sequences[J]. *Korean J Radiol*, 2011, 12(6): 679-685.

(收稿日期:2014-06-02 修回日期:2014-07-10)