

B-FFE、DWI 及 SWI 序列在胎儿磁共振成像股骨长度测量中的对比研究

李鸿恩, 李翠柳, 刘春花, 曾益辉, 江魁明, 张嫣

【摘要】 目的:研究平衡式快速场回波(B-FFE)、磁共振扩散加权成像(DWI)及磁敏感加权成像(SWI)序列在胎儿磁共振成像股骨长度测量方面的诊断价值,为临床提供准确股骨长度测量值。**方法:**随机选取本院磁共振胎儿股骨检查的43例孕妇,扫描序列包括B-FFE、DWI及SWI序列,分析各序列股骨解剖结构及影像表现,对三组序列图像质量评分、图像信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)、特异吸收率(SAR)值及采集时间比较分析,对显示股骨解剖结构、形态及测量进行统计学分析。**结果:**43例孕妇中,图像质量评分方面:B-FFE、DWI、SWI序列评分分别为 1.767 ± 0.571 、 1.395 ± 0.791 、 1.279 ± 0.826 。三组序列 Wilcoxon 符号秩检验,B-FFE序列与DWI序列, $P=0.002$,两者存在差异,B-FFE序列与SWI序列, $P<0.001$,两者存在显著差异,DWI序列与SWI序列, $P=0.461$,两者无显著差异。SNR、CNR方面:B-FFE序列组股骨干SNR明显高于及DWI、SWI序列组($F=52.240、104.458$, P 均 <0.001),差异具有统计学意义,SWI序列组股骨上端骨骺端SNR高于DWI序列组($F=7.948$, $P<0.05$),差异具有统计学意义,SWI序列组股骨上端骨骺端SNR与B-FFE序列组($F=0.299$, $P>0.05$),差异无统计学意义;SWI序列组CNR高于B-FFE及DWI序列组($F=7.526、12.759$, $P<0.05$),差异具有统计学意义。SAR值方面:B-FFE、DWI、SWI分别为 2.0 ± 0.08 W/kg、 1.2 ± 0.05 W/kg、 0.1 ± 0.05 W/kg。单次采集时间:SWI采集时间最短,B-FFE、DWI序列次之。**结论:**B-FFE、DWI、SWI序列在显示胎儿股骨解剖结构及影像表现方面各有优缺点,B-FFE序列能简单、快捷获取股骨图像、不易受呼吸运动及胎动伪影影响,容易完成检查,主观评分最高;DWI序列显示骨骺特征性高信号,方便测量股骨长度,但扫描时间长,容易受胎动伪影影响;SWI序列能清晰显示骨干影像表现,扫描时间短,需要多次屏气,容易受运动伪影影响。因此需根据现场胎儿胎动及孕妇及胎儿配合情况选择相应序列进行胎儿股骨扫描,本院常采用扫描B-FFE序列为主,DWI及SWI序列为辅进行胎儿股骨扫描。

【关键词】 磁共振成像; 胎儿股骨; 平衡式快速场回波; 扩散加权成像; 磁敏感加权成像

【中图分类号】 R445.2; R714.5 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2021)11-1430-06

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.11.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparative study of B-FFE, DWI and SWI sequences in the measurement of femoral length in fetal magnetic resonance imaging LI Hong-en, LI Cui-liu, LIU Chun-hua, et al. Guangdong Maternal and Child Health Hospital, Guangdong 511400, China

【Abstract】 Objective: To study the diagnostic value of balanced fast field echo (B-FFE), MRI diffusion weighted imaging (DWI) and susceptibility weighted imaging (SWI) sequences in the measurement of fetal femur length on MRI, and to provide the accurate femoral length measurement for the clinic value. **Methods:** 43 pregnant women were randomly selected from our hospital for fetal femoral magnetic resonance examination. The scanning sequences were B-FFE, DWI and SWI. The femoral anatomical structure and image of each sequence were analyzed. The image quality and signal-to-noise ratio (SNR) of the three sets of sequences were scored. Comparative noise ratio (CNR), specific absorption rate (SAR) value and acquisition time were comparatively analyzed. The anatomical structure, morphology and measurement of the femur were statistically analyzed. **Results:** Among the 43 pregnant women, the image quality scores of B-FFE, DWI, and SWI sequence were 1.767 ± 0.571 , $1.395 \pm$

作者单位: 511400 广州, 广东省妇幼保健院

作者简介: 李鸿恩(1988-), 男, 湖南娄底人, 主管技师, 主要从事磁共振扫描技术及诊断工作。

通讯作者: 张嫣, E-mail: doctorzhangyan@vip.163.com

基金项目: 广州市科技计划项目基金(202002030217)

0.791, 1.279 ± 0.826 , respectively. The results of the Wilcoxon signed rank test of three sets of sequences were: significant differences ($P=0.002$) and between B-FFE and DWI sequence ($P<0.001$); but not between DWI and SWI sequence ($P=0.461$). As for SNR and CNR; the SNR of the femoral shaft in the B-FFE group was higher than that in the DWI and SWI groups ($F=52.240, 104.458, P<0.001$). The SNR of the upper femoral epiphysis of the SWI group was significantly higher than that of the DWI group ($F=7.948, P<0.05$). The SNR of the upper femoral epiphysis of the SWI group was not statistically significant different compared with the B-FFE group ($F=0.299, P>0.05$). The CNR of the SWI group was statistically higher than that of the B-FFE and DWI groups ($F=7.526, 12.759, P<0.05$). The SAR value of B-FFE, DWI, and SWI were (2.0 ± 0.08) W/kg, (1.2 ± 0.05) W/kg, (0.1 ± 0.05) W/kg, respectively. The acquisition time of SWI was the shortest, followed by B-FFE and DWI sequences. **Conclusion:** B-FFE, DWI and SWI sequences have their own advantages and disadvantages in displaying fetal femoral anatomical structure. B-FFE sequence can easily and quickly obtain femur images, is not susceptible to respiratory motion and fetal motion artifacts, and is easy to complete the scan, with the highest subjective score. The DWI sequence shows the characteristic high signal of the epiphysis, which is convenient for measuring the length of the femur, but the scanning time is long and is easily affected by fetal movement artifacts. The SWI sequence can clearly display the femoral diaphysis, the scanning time is short, it requires multiple breath holdings, and is easily affected by movement artifacts. Therefore, it is necessary to select the corresponding sequence for fetal femoral scan according to the on-site fetal movement and the cooperation of pregnant women and fetuses. The B-FFE sequence is often used as the main scan sequence in our hospital, and the DWI and SWI as the supplementary sequences for fetal femur scan.

【Key words】 Magnetic resonance imaging; Fetal femur; Balanced fast field echo; Diffusion weighted imaging; Susceptibility weighted imaging

在胎儿生长发育过程中, 胎儿股骨长度测量是很重要的指标^[1]。超声在检测胎儿股骨发育情况及测量方面已有大量研究^[2-3], 但超声检查穿透力有限、成像视野小、空间分辨力及软组织分辨力低、容易受羊水过少、胎儿位置不佳等因素影响^[4], 胎儿股骨不能很好的直观显示。而磁共振检查具有大视野、多平面多参数成像、高空间及软组织分辨率、图像直观等优势, 不受母体肥胖、羊水及胎位因素影响, 越来越多地应用在胎儿复杂疾病产前诊断中^[5-6]。本文通过采用平衡式快速场回波(balanced fast field echo, B-FFE)、磁共振扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)及磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)序列应用在磁共振胎儿股骨扫描中的对比研究, 旨在探讨磁共振检查序列在胎儿股骨测量方面的临床应用价值, 为临床测得胎儿股骨长度提供新的影像学检查技术。

材料与方法

1. 一般资料

2019 年 1 月—2020 年 7 月在本院行磁共振胎儿股骨检查的 43 例孕妇, 年龄 24~45 岁, 平均年龄 (29.43 ± 5.36) 岁, 孕周 21~37 周, 平均孕周 27.6 ± 4.6

周, 都是单胎妊娠, 检查前告知孕妇注意事项及签署知情同意书, 本研究已通过医院伦理委员会审批并通过。

2. 检查方法、机器及参数

采用荷兰 Philips Ingenia 3.0T 超导磁共振成像扫描仪, 梯度场 45 mT/m, 切换率 160 T/(m·s), 16 通道体部相控阵线圈。孕妇仰卧位或侧卧位, 足先进, 双手放于胸前, 不交叉, 交代扫描注意事项, 耳部戴好隔音耳罩。胎儿股骨扫描定位及参数: 扫描以股骨冠状面及矢状面为主, 采用大范围扫描, 方便扫描时区分左右侧。扫描序列 B-FFE, DWI, SWI, 扫描参数见表 1。

表 1 B-FFE, DWI, SWI 序列参数

参数	B-FFE	DWI	SWI
TR(ms)	Shorest	Shorest	85
TE(ms)	Shorest	Shorest	13
采集次数(次)	1	1	1
层厚(mm)	3	3	3
间隔(mm)	0	0	0
翻转角(°)	60	/	20
带宽(Hz/pixel)	1295.5	38.4	613.3
矩阵	268×195	132×109	316×251
视野(cm)	40×35	40×34	38×38
扫描层数(层)	24	24	6
采集时间(s)	42	82	13

3. 图像分析

主观评价: 由 2 名磁共振主任医师分析三组序列

对胎儿股骨图像解剖结构及影像表现,在股骨长轴面测量股骨两端之间的垂直距离,主观评价主要对图像进行评分,采用 Yamashita 等^[7]标准将图像分为三个等级:甲等片记 2 分(胎儿股骨解剖结构显示清晰,扫描成功率高,能很好下诊断),乙等片记 1 分(胎儿股骨解剖结构显示稍模糊,扫描成功率尚可,尚能下诊断),丙等片记 0 分(胎儿股骨解剖结构显示不清,扫描成功率低,不能下诊断)。

客观评价:计算图像信噪比(signal to noise ratio, SNR)、对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR),测量胎儿股骨干、股骨上端骨骺端信号强度(SI),及相位编码方向上组织旁空气标准差(SD),勾画相同兴趣区面积为 0.20 cm^2 ,计算出三组序列图像的 SNR 及 CNR, $\text{SNR} = \text{SI}/\text{SD}_{\text{空气}}$; $\text{CNR} = (\text{SNR}_{\text{股骨干}} - \text{SNR}_{\text{股骨上端骨骺端}})/\text{SD}_{\text{空气}}$,其中 SI 为股骨干、股骨上端骨骺端的平均信号强度值,SD_{空气}为组织旁边气体标准差。

记录三组序列特异吸收率(specific absorption rate, SAR)值及采集时间。

4. 统计学方法

采用 SPSS 23.0 软件进行数据分析,采用 Wilcoxon 符号秩检验比较三组序列图像间评分的差异,采用 χ^2 检验对三组序列 SNR、CNR、SAR 值、采集时间进行统计学分析。

结 果

1. 主观评价图像质量评分分析

43 例图像质量评分,其中 B-FFE、DWI、SWI 平均分分别为 1.767 ± 0.571 、 1.395 ± 0.791 、 1.279 ± 0.826 (表 2),B-FFE 序列平均分高主要是简便、检查成功率高,43 例检查仅 3 例因运动伪影而评 0 分,DWI 有 8 例因运动伪影而评 0 分,SWI 有 10 例因运动伪影而评 0 分。B-FFE 序列与 DWI 序列评分差异具有统计学意义($P=0.002$),B-FFE 序列与 SWI 序列评分差异具有统计学意义($P<0.001$),DWI 序列与 SWI 序列评分差异无统计学意义($P=0.461$)。

表 2 三组序列图像质量评分比较(n=43)

组别	图像质量评分(例)			平均分
	2 分	1 分	0 分	
B-FFE	36	4	3	1.767 ± 0.571
DWI	25	10	8	1.395 ± 0.791
SWI	22	11	10	1.279 ± 0.826

2. SNR、CNR 图像质量

B-FFE 序列组股骨干 SNR 明显高于及 DWI、SWI 序列组($F=52.240$ 、 104.458 , P 均 <0.001)差异具有统计学意义,SWI 序列组股骨上端骨骺端 SNR 高于 DWI 序列组($F=7.948$, $P<0.05$),差异具有统

计学意义,SWI 序列组股骨上端骨骺端 SNR 与 B-FFE 序列组($F=0.299$, $P>0.05$),差异无统计学意义;SWI 序列组 CNR 高于 B-FFE 及 DWI 序列组($F=7.526$ 、 12.759 , $P<0.05$),差异具有统计学意义,见表 3。

表 3 三组序列 SNR、CNR 对比(n=43)

序列组	SNR 股骨干	SNR 股骨上端骨骺端	CNR
B-FFE	44.719 ± 7.033	87.146 ± 12.846	5.302 ± 1.060
DWI	13.263 ± 2.891	88.140 ± 8.184	9.357 ± 0.936
SWI	9.863 ± 1.515	115.641 ± 13.768	13.301 ± 1.800

3. 三组序列 MR 信号分析

B-FFE 序列股骨骨干表现为低信号,股骨骨骺端表现为稍高信号,骨髓肌为等信号,DWI 序列在胎儿股骨骨干表现为低信号,股骨骨骺端表现为高信号,骨髓肌为等信号,采用脂肪抑制,母体腹壁组织信号被抑制,胎儿股骨对比度增加,与周边界限清晰,能很好测量股骨长度,SWI 序列股骨骨干表现为低信号,股骨骨骺端表现为高信号,骨髓肌为等信号(图 1)。SWI 对股骨轮廓显示最为清楚。而对于更多的解剖细节,B-FFE 优势更大,但 SWI 容易受胎动明显(图 2)。

4. 扫描时间与 SAR 值对比

单次采集时间方面,SWI 扫描时间最短,B-FFE 及 DWI 次之。43 例检查中 B-FFE、DWI、SWI 序列组 SAR 分别为 $2.0 \pm 0.08 \text{ W/kg}$ 、 $1.2 \pm 0.05 \text{ W/kg}$ 、 $0.1 \pm 0.05 \text{ W/kg}$,见表 4。

表 4 2 组 SAR 值及采集时间对比

序列名称	扫描时间	SAR 值(W/kg)
B-FFE	42s	2.0 ± 0.08
DWI	82s	1.2 ± 0.05
SWI	13s	0.1 ± 0.05

讨 论

要了解胎儿宫内生长发育情况,测量胎儿股骨长度有很重要意义。能根据胎儿股骨长度预测胎龄,还能预测胎儿体重提供重要依据^[8],在诊断胎儿非对称性肢体发育异常方面也有重要帮助。对于孕周明确孕妇,长骨长度测量值低于预测值 2 倍标准差以上或者低于第 5 百分位时考虑长骨缩短^[9],因此产前诊断胎儿股骨长度尤为重要。常规胎儿序列磁共振对股骨等钙质结构成像质量差,本文采用新技术磁共振扫描进行股骨长度测量,研究 B-FFE、DWI 及 SWI 序列在胎儿股骨磁共振检查中的应用,为磁共振胎儿股骨长度测量提供多序列扫描方案。

1. B-FFE、DWI 及 SWI 序列在测量股骨长度方面优势

B-FFE 序列是一种完全平衡的稳定相干成像脉冲技术,在很短的 TR 内产生高信噪比图像,成像速度

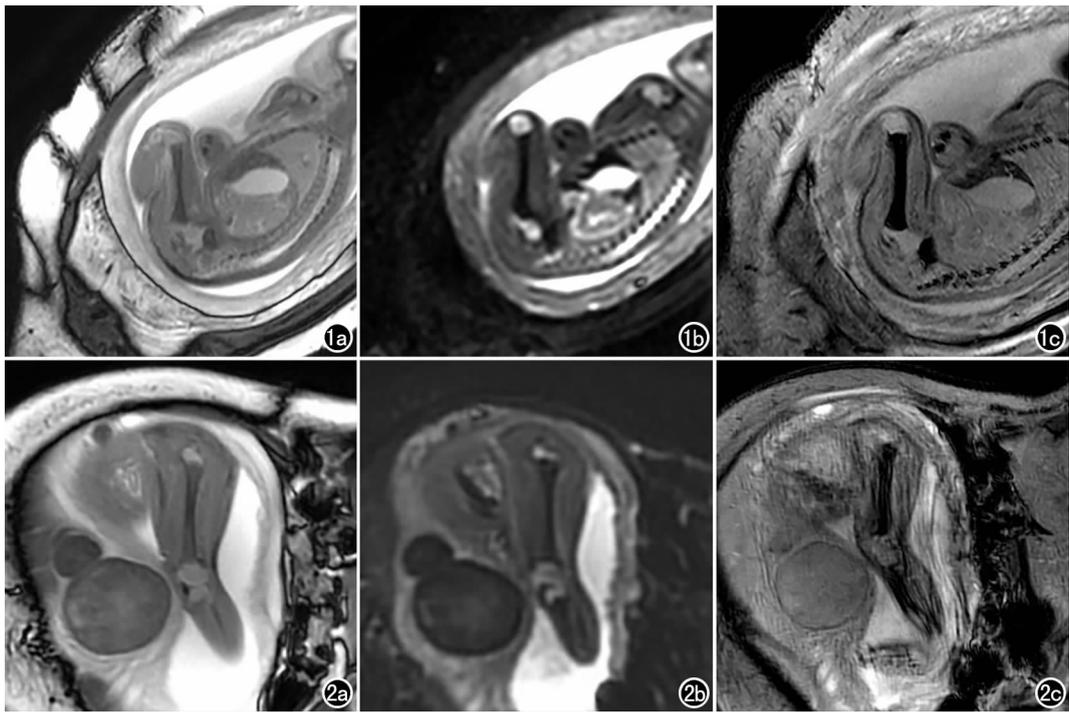


图1 孕26周胎儿股骨磁共振检查矢状面图。a)为B-FFE序列股骨图像,股骨干呈低信号,股骨骨骺端呈稍高信号;b)DWI序列股骨图像,胎儿股骨骨骺端呈明显高信号,与股骨干及皮肤软组织分界清晰,便于测量;c)SWI序列股骨图像,胎儿股骨干呈清晰低信号。图2 孕29周胎儿股骨磁共振检查矢状面图。a)B-FFE序列股骨图像,图像清晰;b)DWI序列股骨图像;c)SWI序列股骨图像,胎动伪影明显,不利于观察。

快,对胎动及呼吸运动伪影不敏感,图像信号强度由组织的T1及T2弛豫时间有关,具有时间分辨率高、少运动伪影、SNA高等优势^[10-11]。B-FFE序列上因胎儿股骨含水量少股骨骨干表现为低信号,股骨骨骺端表现为稍高信号,骨骼肌为等信号,图像质量平均分(1.767 ± 0.571)在三种序列对比中最高,主要因B-FFE序列扫描能1s内实时出图成像、时间分辨率高、能实时查看胎儿胎动情况,方便中断及重新定位检查,能大大提高检查成功率,但因胎儿股骨干、骨骺端与周围软组织T2/T1比值差异不大,导致B-FFE图像对比度差,在显示胎儿股骨上端骨骺端CNR方面稍逊于DWI及SWI组,另外SAR值方面,B-FFE是三组序列中最高的(2.0 ± 0.08 W/kg),具有平均、极差小的特点^[12]。

DWI序列是以编码梯度磁场中水分子自由扩散信号为基础成像的,表面扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)表示生物组织中水分子移动的自由度,本文采用单次激发平面回波扩散加权成像(SE-EPI DWI)技术^[13],该序列为 90° 脉冲激发后,在 180° 脉冲的前后各施加一个强度、持续时间和方向均相同的扩散敏感梯度场, 180° 复相脉冲将产生一个自旋回波信号,其他MR信号利用EPI技术进行采集。该序

列TR为无穷大,因此消除了T1弛豫对图像对比的干扰,TE一般为50~100ms,扫描速度很快,采用脂肪抑制,减少了脂肪与水之间化学位移伪影及图像变形伪影,更有利于图像查看。本文DWI序列在胎儿股骨骨干表现为低信号,股骨骨骺端表现为特征性高信号^[14],在三种序列中DWI显示股骨骨骺端信号最明显,与皮肤及周围软组织形成鲜明对比,骨骼肌为等信号,能够清晰显示股骨骨骺端与周边软组织界限,方便股骨长度测量,但DWI序列相比其他两组序列扫描时间长,容易受胎儿胎动伪影影响,相比其他两组序列检查成功率低,图像质量评分为 1.333 ± 0.739 ,适用于胎动不明显孕妇磁共振检查。

SWI技术是一种高分辨率血氧水平依赖技术(blood oxygenation level-dependent),主要是利用不同组织间的磁敏感性的差异成像,在显示颅脑变性、细小静脉、小出血、血管壁、铁沉积方面有明显优势^[15-17]。2012年Kaeley等^[18]提出SWI"黑骨序列"很好地显示人体骨质结构,本文结合股骨骨质结构(钙质)强抗磁敏感性成像,股骨骨质结构抗磁性造成局部磁场不均匀变化,造成体素内质子去相位,T2*值变短,股骨干信号减低,使股骨干与周边软组织间对比增强,更清晰显示股骨干形态。常规SWI序列采用三维梯度回波

序列(three-dimensional gradient echo, 3D-GRE), TE 长、分辨率高、采集时间长、容易受胎动及母体呼吸运动图像影响,使用在胎儿检查图像效果差。本文采用二维梯度回波 SWI 序列与并行采集联合技术,屏气扫描,有效减少呼吸运动伪影,层数 6 层,每次屏气时间为 13 s,大大缩短了扫描时间,并且结合文献^[19]采用 TE 为 13 ms,所采集 SWI 图像磁敏感伪影较少,股骨干及骨骺端解剖结构显示清晰,股骨轮廓显示清晰。在图像信噪比(signal to noise ratio, SNR)及对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR)方面,SWI 序列组股骨上端骨骺端 SNR 高于 DWI 序列组($F=7.948, P<0.05$),SWI 序列组 CNR 高于 B-FFE 及 DWI 序列组($F=7.526, 12.759, P<0.05$),差异均具有统计学意义,主要是因为 SWI 采用“黑骨”技术,在图像上周围其他胎儿、胎盘、羊水组织全部被抑制,股骨干呈清晰低信号,能很好显示股骨干情况,SWI 序列采集时间仅 13 s、SAR 值为 0.1 ± 0.05 W/kg,是三种序列中最小的。但 SWI 序列对运动很敏感,需要孕妇屏气配合,一次屏气(13 s)扫描范围小(6 层)。需要多次屏气扫描,增加了胎动伪影发生率,使检查成功率不高,图像质量平均分为 1.279 ± 0.826 ,低于 B-FFE 序列组评分。

2. 本研究不足之处

受限于样本量少,未讨论不同孕周 B-FFE、DWI 及 SWI 序列在显示胎儿股骨解剖结构方面的应用价值,未对股骨测量值与超声或其他检查进行分类统计分析。

3. 磁共振胎儿检查安全性

SAR 值是指单位质量的人体组织吸收的射频能量。美国食品和药品管理局(FDA)及国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)标准规定了在胎儿磁共振检查中 SAR 值在 3.0 W/kg 以下^[20]。本文 B-FFE、DWI 及 SWI 序列 SAR 值分别为 2.0 ± 0.08 W/kg、 1.2 ± 0.05 W/kg、 0.1 ± 0.05 W/kg,均在安全值范围内,临床婴儿出生后随访也未发现有关不良反应,因此磁共振检查是相对安全的。

综上所述,B-FFE、DWI 及 SWI 序列都能应用在胎儿股骨长度测量方面检查,能够为临床提供直观股骨长轴图像。DWI 在显示股骨骨骺端高信号,在测量股骨长度方面有独到优势,但扫描时间长、容易受运动伪影影响。SWI 信噪比及对比噪声比高,能够清晰显示股骨干情况,显示股骨干分辨率高,但需要多次孕妇屏气扫描,容易受运动伪影影响。B-FFE 序列能简单、快捷获取股骨图像、不易受运动伪影影响,扫描成功率高,图像质量平均分最高,但信噪比稍低。三种序列在磁共振胎儿股骨检查方面各有优势,在实际应用中可以根据现场孕妇情况进行序列选择扫描,本院常

以 B-FFE 序列为主,DWI 及 SWI 序列为辅进行胎儿股骨扫描,为产前胎儿精准影像学诊断提供有力保障,降低胎儿骨骼畸形及缺陷儿出生率。

参考文献:

- [1] 李丽雅,吕国荣,苏瑞娟. 超声测量胎儿四肢长骨及足长与孕龄的相关性研究[J]. 中国医学影像技术,2006,22(11):1739-1741.
- [2] 孙昭,吴秀芬,杨太珠. 超声检测胎儿四肢长骨及其与胎龄的相关分析[J]. 解剖学报,1996,2:206-208.
- [3] 田华,王琼,马玉香. 正常胎儿双顶径与股骨长度的超声测量及比较分析[J]. 中国医学影像技术,1998,14(4):298-299.
- [4] 王瑜,樊燕,熊秀琼,魏敏. 二维超声产前诊断胎儿畸形[J]. 中国医学影像技术,2003,19(6):785-786.
- [5] 严祥虎,包雨微,方纪成,等. 3.0T 磁共振 True FISP 及 HASTE 序列胎儿椎体成像对比[J]. 放射学实践,2020,35(6):768-772.
- [6] 周刚,范路萍,尹秋风,等. 胎儿肺囊性病变的磁共振表现[J]. 放射学实践,2019,34(6):668-674.
- [7] Yamashita Y, Namimoto T, Abe Y, et al. MR imaging of the fetus by a HASTE sequence[J]. AJR, 1997, 168(2):513-519.
- [8] 雷慧中,谭金秀. 胎儿长骨测量与 3 例骨骼畸形的 B 超诊断[J]. 医学临床研究,1991,8(3):184-185.
- [9] Merz E, Kim-Kern MS, Pehl S. Ultrasonic mensuration of fetal limb bones in the second and third trimesters[J]. J Clin Ultrasound, 1987, 15(3):175-183.
- [10] 罗海营,周成斌,钟小梅,等. 快速平衡稳态进动序列在胎羊心脏核磁共振成像中的应用价值[J]. 岭南心血管病杂志,2014,20(4):543-546.
- [11] 朱铭. 胎儿磁共振-磁共振检查的新领域[J]. 磁共振成像,2011,2(1):7-12.
- [12] 曹伊. 磁共振不同成像序列在产前胎儿诊断成像质量的比较研究[J]. 西南国防医药,2017,27(1):62-66.
- [13] Papadopoulou I, Langan D, Sebire NJ, et al. Arthurs. Diffusion-weighted post-mortem magnetic resonance imaging of the human fetal brain in situ[J]. Eur J Radiol, 2016, 85(6):1167-1173.
- [14] 李军锋,覃文华,程广. 磁共振技术在胎儿临床检查中的应用价值[J]. 实用医技杂志,2017,24(11):1198-1200.
- [15] Haacke EM, Xu Y, Cheng YCN, et al. Susceptibility weighted imaging (SWI)[J]. Magn Reson Med, 2004, 52(3):612-618.
- [16] An H, Liu Q, Chen Y, et al. Oxygen metabolism in ischemic stroke using magnetic resonance imaging[J]. Transl Stroke Res, 2011, 3(1):65-75.
- [17] Ge Y, Zohrabian VM, Osa EO, et al. Diminished visibility of cerebral venous vasculature in multiple sclerosis by susceptibility-weighted imaging at 3.0 Tesla[J]. J Magn Reson Imaging, 2009, 29(5):1190-1194.
- [18] Eley KA, McIntyre AG, Watt-Smith SR, et al. "Black bone" MRI: a partial flip angle technique for radiation reduction in craniofacial imaging[J]. Br J Radiol, 2012, 85(1011):272-278.
- [19] 蔡先云,陈欣,单瑞芹,等. 磁敏感加权成像显示胎儿脊柱解剖及发育畸形的价值[J]. 中华放射学杂志,2018,52(2):119-124.
- [20] Hand JW, Li Y, Thomas EL, et al. Prediction of specific absorption rate in mother and fetus associated with MRI examinations during pregnancy[J]. Magn Reson Med, 2006, 55(4):883-893.

(收稿日期:2021-02-25 修回日期:2021-06-22)