

3. 0T 3D fast imaging employing steady state acquisition with small flip angle for detecting fetal spinal dysplasia

CAO Qian, YIN Hongyu, CHEN Xia, ZHANG Kun, WANG Shiqi, KANG Min*
(Department of Radiology, Sichuan Provincial Maternal and Child Health Care Hospital,
Chengdu 646000, China)

[Abstract] **Objective** To observe the value of 3.0T 3D fast imaging employing steady state acquisition (FIESTA) with small flip angle (FA) for detecting fetal spinal dysplasia. **Methods** Forty-three singletons who underwent spinal MR examination, including 2D single shot fast spin echo (2D SSFSE), 2D FIESTA, 2D susceptibility weighted imaging (SWI) and 3D FIESTA sequences due to suspected spinal dysplasia by prenatal ultrasound were retrospectively enrolled. Likert scale was performed to evaluate imaging quality of fetal cervical, thoracic and lumbosacral vertebrae, then signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) were calculated. The subjective scores and objective evaluations of imaging quality were compared among different sequences. **Results** Significant differences of subjective scores, SNR and CNR of fetal cervical, thoracic and lumbosacral vertebrae were found among different sequences (all $P < 0.001$). Subjective scores of fetal lumbosacral vertebrae were not significantly different between 2D SSFSE and 2D FIESTA nor 2D SWI and 3D FIESTA (both $P > 0.05$), while significant differences of subjective scores of fetal cervical, thoracic and lumbosacral vertebrae were found between each 2 other sequences (all $P < 0.05$). For 3D FIESTA, SNR of fetal cervical and thoracic vertebrae, as well as CNR of thoracic vertebrae were all higher than those of 2D SSFSE, 2D FIESTA and 2D SWI (all $P < 0.05$), while CNR of cervical vertebrae was higher than that of 2D SSFSE and 2D FIESTA (both $P < 0.05$), SNR of lumbosacral vertebrae was higher than that of 2D SWI ($P < 0.05$), and CNR of lumbosacral vertebrae was higher than that of 2D SSFSE and 2D SWI (both $P < 0.05$). **Conclusion** 3.0T FIESTA with small FA was helpful for detecting fetal spinal dysplasia.

[Keywords] spine; congenital abnormalities; fetus; magnetic resonance imaging; flip angle

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.12.026

3.0T 小翻转角 3D 快速稳态进动成像显示 胎儿脊柱发育畸形

曹倩, 尹宏宇, 陈霞, 张坤, 王世琦, 康敏*
(四川省妇幼保健院放射科, 四川 成都 646000)

[摘要] **目的** 观察 3.0T 小翻转角(FA)3D 快速稳态进动成像(FIESTA)显示胎儿脊柱发育畸形的价值。**方法** 回顾性分析 43 胎因产前超声提示脊柱异常而接受脊柱 MR 检查, 包括 2D 单次激发快速自旋回波(2D SSFSE)、2D FIESTA、2D 磁敏感加权成像(SWI)及 3D FIESTA 的单胎胎儿, 以 Likert 量表对图像显示胎儿颈、胸、腰骶椎质量进行主观评分, 计算图像信噪比(SNR)及对比度噪声比(CNR), 并对各序列进行比较。**结果** 各序列图像显示胎儿颈、胸及腰骶椎质量主观评分、SNR 及 CNR 差异均有统计学意义(P 均 < 0.001)。2D SSFSE 与 2D FIESTA、2D SWI 与 3D FIESTA 显示胎儿腰骶椎质量主观评分差异无统计学意义(P 均 > 0.05), 而其余序列显示胎儿颈、胸及腰骶椎质量主观评分结果

[第一作者] 曹倩(1989—), 女, 四川南充人, 本科, 主管技师。研究方向: 胎儿磁共振技术。E-mail: 245107331@qq.com

[通信作者] 康敏, 四川省妇幼保健院放射科, 646000。E-mail: 1073297610@qq.com

[收稿日期] 2024-05-10 [修回日期] 2024-07-09

两两比较差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。3D FIESTA 所示胎儿颈椎 SNR、胸椎 SNR 及 CNR 均高于 2D SSFSE、2D FIESTA 及 2D SWI(P 均 <0.05),所示颈椎 CNR 高于 2D SSFSE 及 2D FIESTA(P 均 <0.05)、腰骶椎 SNR 高于 2D SWI($P<0.05$)而腰骶椎 CNR 高于 2D SSFSE 及 2D SWI(P 均 <0.05)。结论 3.0T 小 FA FIESTA 有助于检出胎儿脊柱发育畸形。

[关键词] 脊柱; 先天性畸形; 胎儿; 磁共振成像; 翻转角

[中图分类号] R714.53; R445.2 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2024)12-1931-05

胎儿及儿童先天性脊柱畸形发病率较高,准确诊断对于选择合理干预方式十分重要^[1]。超声为筛查胎儿先天性脊柱异常的首选影像学方法^[2],但易受孕妇体型、羊水量、前置胎盘、脊柱后位及复杂畸形等因素影响^[3-4]。MR 3D 扫描可采集各向同性数据、重建任意方位图像、清晰显示脊柱细节并作为超声的重要补充^[1,5-6],但对运动较为敏感,需受试者屏气配合,而孕妇屏气效果常不理想;新近共识^[7]亦指出,胎儿 MR 检查一般不采用屏气扫描,故有必要缩短 3D 序列成像时间。本研究观察 3.0T 小翻转角(flip angle, FA) 3D 快速稳态进动成像(fast imaging employing steady state acquisition, FIESTA)显示胎儿脊柱发育畸形的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性分析 2023 年 1 月—2024 年 1 月四川省妇幼保健院因产前超声提示胎儿脊柱异常而接受 MR 检查的 43 胎单胎妊娠孕妇,年龄 18~36 岁、平均(29.2±4.2)岁,孕周 22~34 周、平均(26.3±3.6)周;排除存在 MR 检查禁忌证或图像质量不佳者。本研究经院伦理委员会批准(20240425-095),检查前孕妇及家属均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用 GE 3.0T Premier MR 仪、30 通道魔毯 AIR 线圈。嘱孕妇仰卧,足先进,以 normal 模式扫描胎儿^[8],严格控制特定吸收率(specific absorption rate, SAR)值 <2 W/kg、单次检查时间 <20 min;扫描序列及参数见表 1。将 3D FIESTA 图像传至后处理工作站,采用曲面重建技术重建胎儿脊柱标准冠状位及正中矢状位图像。

1.3 评价图像质量 由 2 名具有 5 年以上胎儿 MRI 诊断经验的放射科医师(医师 1、2)采用 Likert 量表^[6]分别对 2D SSFSE、2D FIESTA、2D SWI 及 3D FIESTA 序列图像显示胎儿颈、胸、腰骶椎质量进行主观评分:0 分,无法分辨骨骼与周围组织,运动伪影严重;1 分,难以分辨骨骼与周围组织,运动伪影较重;2 分,可区分骨骼与周围组织,运动伪影中等;3 分,较易区分骨骼与周围组织,运动伪影较轻;4 分,极易区分

骨骼与周围组织,无运动伪影。意见不一致时,由另 1 名具有 10 年以上胎儿 MRI 诊断经验的主任医师进行判断。

选择质量好且运动伪影较少的正中矢状位图像,分别于颈、胸、腰骶椎及其邻近椎间盘处放置面积 1 mm^2 的相同大小 ROI,测量椎体及椎间盘信号强度(signal intensity, SI);于图像右侧背景区放置 1 个长轴垂直于相位编码方向、面积 $>100\text{ mm}^2$ 的矩形 ROI,测量背景噪声(SD 值);计算图像信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)及对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)^[8]: $SNR = SI_{\text{椎体}}/SD$, $CNR = (SI_{\text{椎间盘}} - SI_{\text{椎体}})/SD$ 。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 23.0 统计分析软件。以 $\bar{x} \pm s$ 表示正态分布计量资料,行单因素方差分析;以中位数(上下四分位数)表示偏态分布计量资料,行 Kruskal-Wallis H 检验及 Mann-Whitney U 检验。以 Fisher 精确概率法比较计数资料。以 Kappa 检验评估观察者间主观评分的一致性:0.80 $<$ Kappa \leq 1 为一致性好,0.60 $<$ Kappa \leq 0.80 为一致性较好,0.40 $<$ Kappa \leq 0.60 为一致性中等,0.20 $<$ Kappa \leq 0.40 为一致性一般,Kappa \leq 0.20 为一致性较差。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一致性分析 2 名医师评估 3D FIESTA 序列图像显示胎儿胸椎,2D FIESTA、2D SWI 及 3D FIESTA 序列图像显示胎儿腰骶椎质量的主观评分的一致性较好(Kappa 0.830~0.937),评估其余图像显示胎儿脊椎质量的主观评分一致性较好(Kappa 0.696~0.794)。

2.2 主观评分 2D SSFSE、2D FIESTA、2D SWI 及 3D FIESTA 显示胎儿颈、胸、腰骶椎质量主观评分差异均有统计学意义(P 均 <0.001);2D SSFSE 与 2D FIESTA 及 2D SWI 与 3D FIESTA 显示胎儿腰骶椎质量主观评分差异无统计学意义($P=0.057, 0.080$)外,其余各序列图像间两两比较结果差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。见表 2 及图 1、2。

表 1 胎儿 MR 扫描序列及参数

序列	方位	FOV(cm)	矩阵	TR(ms)	TE(ms)	层厚(mm)	FA(°)	扫描时间(s)	扫描层数
2D SSFSE	轴位/冠状位/矢状位	36×36	320×288	1 655	80	3	90	17	9
2D FIESTA	轴位/冠状位/矢状位	36×36	256×320	4.4	2	3	65	8	9
2D SWI	冠状位/矢状位	36×36	256×192	115	8	3	20	10	8
3D FIESTA	矢状位	36×28.8	288×320	3.4	1.3	1.4	35	9	26

注:SSFSE:单次激发快速自旋回波(single shot fast spin echo);SWI:磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging)

表 2 各序列 MRI 显示胎儿脊椎质量主观评分结果(n=43,胎)

序列	颈椎					胸椎					腰骶椎				
	0分	1分	2分	3分	4分	0分	1分	2分	3分	4分	0分	1分	2分	3分	4分
2D SSFSE	8	28	6	1	0	0	3	25	14	1	0	0	2	17	24
2D FIESTA	0	12	16	15	0	0	0	6	24	13	0	0	0	11	32
2D SWI	0	1	6	27	9	0	0	3	5	35	0	1	0	2	40
3D FIESTA	0	0	1	23	19	0	0	0	0	43	0	0	0	0	43
P 值	<0.001					<0.001					<0.001				

2.3 客观评价 2D SSFSE、2D FIESTA、2D SWI 及 3D FIESTA 显示胎儿颈、胸及腰骶椎的 SNR 及 CNR 差异均有统计学意义(P 均<0.001);两两比较,3D FIESTA 所示胎儿颈椎 SNR、胸椎 SNR 及 CNR 均高于 2D SSFSE、2D FIESTA 及 2D SWI(P 均<0.05),颈椎 CNR 高于 2D SSFSE 及 2D FIESTA(P 均<0.05),腰骶椎 SNR 高于 2D SWI(P<0.05),腰骶椎 CNR 高于 2D SSFSE 及 2D SWI(P 均<0.05)。见表 3。

3 讨论

胎儿脊柱 MRI 多采用以 SSFSE 及 FIESTA 等快速序列为主的 2D 扫描。近年部分学者^[9-11]以 3D SWI、3D T2W 快速梯度回波及 3D 多回波恢复梯度回波序列行胎儿脊柱成像,可将扫描时间控制在 12~18 s,但由于胎儿运动随机、孕妇屏气耐受程度相对差,MRI 采集成功率较低,且易受运动伪影干扰而影响判读。

本研究尝试通过减小 FA 和降低层间分辨率两种方式缩短 3D FIESTA 序列采集时间。针对缩短 MRI

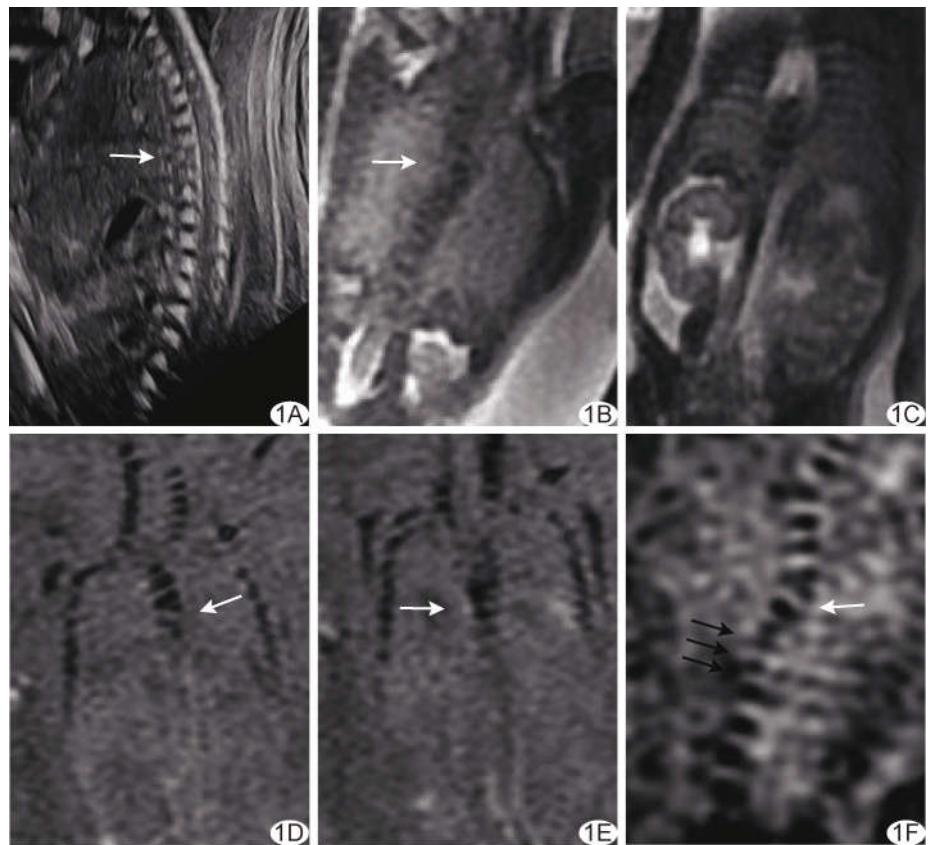


图 1 孕 22⁺5 周胎儿,上胸段半椎体,中胸椎多椎体发育畸形 A. 二维声像图显示胎儿局部椎体排列紊乱(箭),细节显示不清; B. 冠状位 MR 2D SSFSE 图隐约可见上胸段椎体紊乱(箭); C. 冠状位 2D FIESTA 图示颈、胸段椎体欠清; D、E. 冠状位 2D SWI 图示胸段脊柱右侧弯,并见三角形椎体信号(D,箭)与上方椎体局部融合,隐约见中胸段畸形椎体(E,箭); F. 冠状位 3D FIESTA 图清晰显示上(白箭)、中胸段(黑箭)畸形椎体

采集时间带来的 SNR 及软组织对比度等问题^[12],通过以下设置予以补偿:①35° FA 可缩短射频脉冲持续

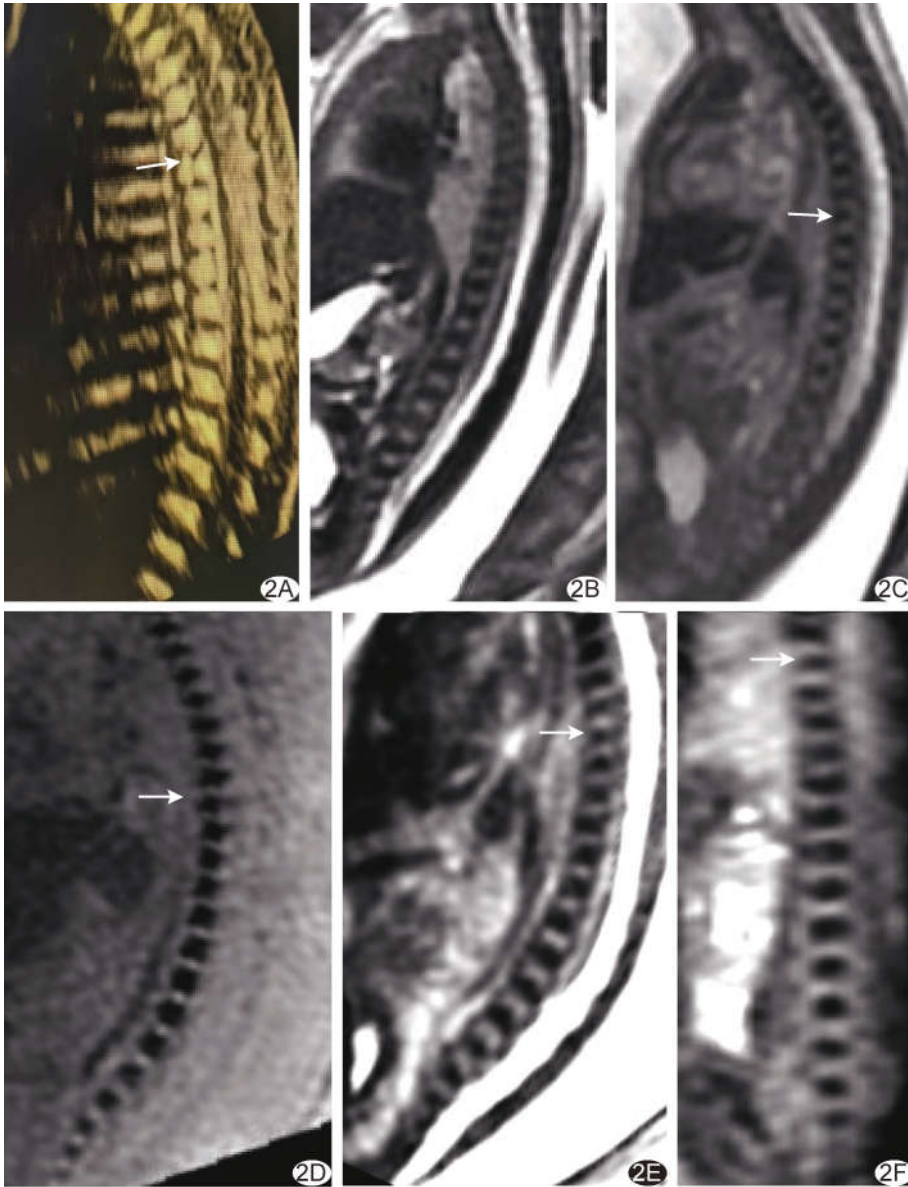


图 2 孕 22⁺6 周胎儿, T7 椎体发育不良 A. 三维声像图示 T7 椎体异常并见纵裂(箭); B. 矢状位 2D SSFSE 图中未见明显异常椎体; C. 矢状位 2D FIESTA 图示中胸段 T7 椎体小于邻近椎体(箭); D. 矢状位 2D SWI 图示中胸段 T7 椎体形态欠规则(箭); E、F. 矢状位(E)及冠状位(F)3D FIESTA 图示 T7 椎体小于邻近椎体(箭),且上方椎间盘影大

时间,使 TR 降至 3.4 ms;②小 FA 有助于降低 SAR 值^[13];③FIESTA 序列 FA<50°时软组织对比度相对差,但本研究重点针对胎儿脊柱成像,在高信号脑脊液对比下可清晰显示脊髓,椎体缺乏氢质子且骨质具有抗磁性而呈低信号,将 TE 设为反向位即可清晰显示;④搭配 30 通道魔毯 AIR 线圈可在一定程度上提高图像 SNR^[12];⑤相比其他序列,FIESTA 序列单位时间内 SNR 最高^[13],即便因参数设置而使 SNR 有所降低,其图像质量仍可满足阅片要求。将层间分辨率降至 60%可减少 3D 采集的层间编码数量、缩短采集时

间,但将致图像层间分辨率减低;本研究通过增加层面内分辨率使之平衡,即采用 288×320 矩阵实现层面内 1.25 mm×0.9 mm 分辨率,有助于提高小胎龄胎儿疾病检出率。短 TR 可使 FIESTA 对磁场不均匀性相对不敏感^[13],结合略大于扫描范围的矩形匀场块能使扫描范围磁场尽可能均匀,以减少伪影。本研究设带宽为 83 kHz,因最短 TR、TE 随带宽增加而呈先低后高趋势,获得足够短的 TR 不仅能减少扫描时间,更可减少 FIESTA 常见的条带伪影^[13]。

本研究 2D SSFSE 与 2D FIESTA 及 2D SWI 与 3D FIESTA 显示胎儿腰骶椎质量主观评分无明显差异,考虑与胎儿腰骶椎体积相对大、在各序列显示均较好有关;而对于显示胎儿颈、胸椎,3D FIESTA 图像主观评分最高,其下依次为 2D SWI、2D FIESTA 及 2D SSFSE。

对比各序列显示胎儿椎客观评价结果,3D FIESTA 中,胎儿颈、胸椎 SNR 均高于 2D SSFSE、2D FIESTA 及 2D SWI,与主观评分结果大致相符,表明该序列显示胎儿颈、胸椎更具优势;其中,腰骶椎 SNR 及 CNR 均明显高于 2D SWI,而与 2D SSFSE 及 2D FIESTA 无明显差

异或差异较小,主要原因在于腰骶椎骨化较好,在 3D FIESTA、2D SSFSE 及 2D FIESTA 序列与邻近椎间盘高信号的对比更为明显,而椎体在 2D SWI 序列中呈低信号且图像整体信号偏低,导致 SNR 及 CNR 均不高,但这并不意味着 2D SWI 序列图像显示椎体不佳。值得注意的是,本研究 2D SWI 序列图像质量有别于既往文献^[14]报道,尤其在胎龄较小且合并脊柱扭曲胎儿,图像显示椎体变性明显、与邻近椎体难以区分;分析原因:①SWI 序列需屏气扫描,而本研究采用较小分辨率控制扫描时间;②相比 1.5T 设备,3.0T 主

表 3 各序列 MRI 显示胎儿脊椎客观评价结果 (n=43)

序列	颈椎		胸椎		腰骶椎	
	SNR	CNR	SNR	CNR	SNR	CNR
2D SSFSE	42.19±3.45*	7.21±3.53*	54.00±15.94*	20.91±8.30*	62.67±16.60	45.00(36.00,55.00)*
2D FIESTA	42.33±13.20*	14.42±6.44*	45.60±14.55*	30.74±10.37*	51.58±16.61	50.14±15.81
2D SWI	13.00 (11.00,17.00)*	24.56±5.98	14.53±5.28*	29.00 (23.25,35.00)*	12.00 (11.00,23.50)*	27.51±6.22*
3D FIESTA	54.00±15.94	25.49±6.92	62.67±16.61	41.00 (35.00,45.00)	73.00 (61.00,82.75)	55.00 (48.00,68.00)
F 值	75.411	95.172	98.083	31.141	103.459	32.847
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: * :与 3D FIESTA 比较 P<0.05

磁场强度及频率编码方向体素较大,胎儿脊柱扭曲时,磁化率效应增强可致图像显示结构扭曲^[15];③本研究 SWI 序列仅扫描 2 个方位,可能导致显示病变不全。

综上,3.0T 小 FA FIESTA 可缩短扫描时间、较好地显示胎儿脊柱整体形态,有助于检出胎儿脊柱发育畸形。但本研究样本量较小,仅利用单一设备采集 MRI,未涉及其他设备及场强,有待后续进一步完善。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:曹倩查阅文献、研究设计和实施、撰写和修改文章;尹宏宇图像、数据和统计分析;陈霞、张坤和王世琦研究实施;康敏指导、修改和审阅文章。

[参考文献]

[1] ABOUGHALIA H, NODA S, CHAPMAN T, et al. Multimodality imaging evaluation of fetal spine anomalies with postnatal correlation[J]. Radiographics, 2021,41(7):2176-2192.

[2] 甄敬华,周伟娜,刘益宁,等.产前超声及 MRI 在胎儿闭合性脊柱裂诊断中的应用价值[J].临床超声医学杂志,2023,25(6):451-455.

[3] COBLENTZ A C, TEIXEIRA S R, MIRSKY D M, et al. How to read a fetal magnetic resonance image 101[J]. Pediatr Radiol, 2020,50(13):1810-1829.

[4] GLENN O A, BARKOVICH J. Magnetic resonance imaging of the fetal brain and spine: An increasingly important tool in prenatal diagnosis: Part 2[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2006,27(9):1807-1814.

[5] MATSUBARA Y, HIGAKI T, TANI C, et al. Demonstration of human fetal bone morphology with MR imaging: A preliminary study[J]. Magn Reson Med Sci, 2020,19(4):310-317.

[6] GOODALL A F, BARRETT A, WHITBY E, et al. T2*-weighted MRI produces viable fetal "Black-Bone" contrast with significant benefits when compared to current sequences[J]. Br J Radiol, 2021,94(1123):20200940.

[7] 中华医学会放射学分会儿科学组,中华医学会儿科学分会放射学组.胎儿 MRI 中国专家共识[J].中华放射学杂志,2020,54(12):1153-1161.

[8] SU C Y, WONG A M, CHANG C C, et al. Quantitative analysis for the delineation of the subthalamic nuclei on three-dimensional stereotactic MRI before deep brain stimulation surgery for medication-refractory Parkinson's disease [J]. Front Hum Neurosci, 2022,16:829198.

[9] LIU Q, LI Q, PANG Y, et al. Accelerated three-dimensional susceptibility weighted imaging of the whole spine of fetus at 3T[J]. Eur J Radiol, 2023,158:110622.

[10] 何双,雷强,王芳,等.3 T MRI 三维 T2 加权快速梯度回波序列显示胎儿脊柱解剖及椎体畸形的评价[J].磁共振成像,2023,14(3):111-116.

[11] 李权,邵剑波,彭雪华,等.三维多回波恢复梯度回波序列用于胎儿脊柱成像[J].中国医学影像技术,2023,39(4):582-586.

[12] SCHEFFLER K, LEHNHARDT S. Principles and applications of balanced SSFP techniques[J]. Eur Radiol, 2003,13(11):2409-2418.

[13] KRISHNAMURTHY U, NEELAVALLI J, MODY S, et al. MR imaging of the fetal brain at 1.5T and 3.0T field strengths: Comparing specific absorption rate (SAR) and image quality[J]. J Perinat Med, 2015,43(2):209-220.

[14] CAI X, CHEN X, WANG J, et al. Susceptibility-weighted imaging to evaluate normal and abnormal vertebrae in fetuses: A preliminary study[J]. Prenat Diagn, 2022,42(11):1398-1408.

[15] PORT J D, POMPER M G. Quantification and minimization of magnetic susceptibility artifacts on GRE images[J]. J Comput Assist Tomogr, 2000,24(6):958-964.