

# Diagnostic Value of Different Magnetic Resonance Sequences in Fetal Spinal Cord Malformation

论 著

CUI Shu-hong\*, YUE Xiang, REN Na, LU Lin, LV Qing-qing.

Department of Medical Imaging, the Third Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, Henan Province, China

## 磁共振不同序列对胎儿脊柱脊髓畸形诊断价值分析

崔书红\* 岳翔 任娜

陆林 吕青青

郑州大学第三附属医院医学影像科

(河南 郑州 450000)

**【摘要】目的** 探讨磁共振不同序列对胎儿脊柱脊髓畸形的诊断价值。**方法** 选取2023年6月至2024年6月期间,在本院产检且超声提示胎儿脊柱脊髓可能存在畸形的90例孕妇为研究对象。所有孕妇均接受磁共振检查,采用真实稳态进动快速成像序列(Trufi)、半傅里叶采集单次激发快速自旋回波序列(Haste)、磁敏感加权成像(SWI)等序列进行扫描。以产后随访结果或尸检结果作为金标准,对比不同序列对胎儿脊柱脊髓畸形的检出率、诊断效能以及图像质量评估。**结果** 90例胎儿中,确诊脊髓空洞20例、脊髓低位20例、脊髓纵裂13例、脊髓脊膜膨出18例、椎体畸形20例、脊柱裂21例。Haste序列对脊髓空洞、脊髓低位的检出率较高,分别为95.00%、90.00%;Trufi序列对脊髓纵裂、脊髓脊膜膨出的检出率较高,分别为92.31%、88.89%;SWI序列对椎体畸形、脊柱裂的检出率较高,分别为90.00%、85.71%。Haste、Trufi、SWI序列均具有较高的诊断准确率及敏感度,两两相比均无明显差异( $P>0.05$ )。在图像质量方面,各序列的图像质量表现与检出率呈现出一致性。**结论** 磁共振不同序列在胎儿脊柱脊髓畸形诊断中各有优势,临床实践中可根据胎儿具体情况,运用多种磁共振序列进行扫描,相互补充信息,以提高胎儿脊柱脊髓畸形的诊断准确性。

**【关键词】** 磁共振成像;

真实稳态进动快速成像序列;

半傅里叶采集单次激发快速自旋回波序列;

磁敏感加权成像;胎儿;

脊柱脊髓畸形;诊断价值

**【中图分类号】** R445.2; R681.5**【文献标识码】** A**DOI:**10.3969/j.issn.1672-5131.2026.02.043

### ABSTRACT

**Objective** To explore the diagnostic value of different magnetic resonance sequences in fetal spinal cord malformation. **Methods** A total of 90 pregnant women with suspicious fetal spinal cord malformation by ultrasound examination in the hospital were enrolled as the research objects between June 2023 and June 2024. All pregnant women underwent magnetic resonance imaging (MRI) and sequential scanning [true fast imaging with steady-state precession (Trufi), half-fourier acquisition single-shot turbo spin-echo (Haste), sensitivity weighted imaging (SWI)]. Taking the results of postpartum follow-up or autopsy as the golden standard, detection rates of fetal spinal cord malformation by different sequences, their diagnostic efficiency and evaluation of images quality were compared. **Results** Among the 90 fetuses, there were 20 cases with syringomyelia, 20 cases with low spinal cords, 13 cases with diastematomyelia, 18 cases with meningocele, 20 cases with vertebral malformation and 21 cases with bifid spine. The detection rates of syringomyelia and low spinal cord by Haste sequence were high (95.00%, 90.00%). The detection rates of diastematomyelia and meningocele by Trufi sequence were high (92.31%, 88.89%). The detection rates of vertebral malformation and bifid spine by SWI sequence were high (90.00%, 85.71%). The diagnostic accuracy and sensitivity of Haste, Trufi and SWI sequences all all high, but there was no significant difference between any two sequences ( $P>0.05$ ). In terms of images quality, consistency among different sequences in manifestations of images quality and detection rates was good. **Conclusion** Different magnetic resonance sequences have their own advantages in the diagnosis of fetal spinal cord malformation. In clinical practice, scanning with multiple magnetic resonance sequences can be taken according to specific conditions of fetuses and information should be complemented reciprocally to improve the diagnostic accuracy of fetal spinal cord malformations.

**Keywords:** Magnetic Resonance Imaging; True Fast Imaging with Steady-state Precession; Half-fourier Acquisition Single-shot Turbo Spin-echo; Sensitivity Weighted Imaging; Fetus; Spinal Cord Malformation; Diagnostic Value

胎儿脊柱脊髓畸形是一类严重的先天性疾病,包括脊柱裂、脊髓脊膜膨出、脊髓纵裂、脊髓低位等多种类型,不仅会影响胎儿的正常生长发育,还可能导致患儿出生后出现严重的神经功能障碍,如肢体瘫痪、大小便失禁等,给家庭和社会带来沉重的负担<sup>[1]</sup>。早期准确诊断对于评估胎儿预后、制定合理的临床决策以及开展产前咨询至关重要。超声检查是产前筛查胎儿脊柱脊髓畸形的常用方法,具有操作简便、无辐射等优点,但由于胎儿体位、羊水量、孕妇肥胖等因素的影响,其对某些复杂畸形或细微病变的诊断存在一定局限性<sup>[2-3]</sup>。磁共振成像具有软组织分辨率高、多方位成像、无辐射等优势,能够清晰显示胎儿脊柱脊髓的解剖结构和病变细节,近年来在胎儿脊柱脊髓畸形的诊断中得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。不同的磁共振序列具有不同的成像特点和优势,例如真实稳态进动快速成像序列(true fast imaging with steady-state precession, Trufi)对流动液体敏感,有利于显示脑脊液和脊髓的关系;半傅里叶采集单次激发快速自旋回波序列(half-fourier acquisition single-shot turbo spin-echo, Haste)成像速度快,对胎儿运动伪影不敏感,且能较好地显示脊髓形态;磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)对血液代谢产物和铁沉积敏感,在显示椎体畸形和椎管内血管畸形方面具有独特优势<sup>[5]</sup>。然而,目前对于不同磁共振序列在胎儿脊柱脊髓畸形诊断中的价值比较及最佳序列选择尚无统一结论。基于此,本研究旨在对比不同磁共振序列对胎儿脊柱脊髓畸形的诊断效果,探究其临床价值,为提升产前诊断水平提供依据。

### 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 选取2023年6月至2024年6月期间,在本院进行产前检查且超声提示胎儿脊柱脊髓可能存在畸形的90例孕妇作为研究对象。孕妇年龄22~35岁,平均(27.5±3.2)岁;孕周20~32周,平均(25.6±2.5)周。

纳入标准:超声检查提示胎儿可能存在脊柱脊髓形态或结构异常;孕妇签署知情同

【第一作者】崔书红,女,主管技师,主要研究方向:胎儿磁共振影像。E-mail: m13837174669@163.com

【通讯作者】崔书红

意见书, 自愿参与本研究, 并愿意配合后续的磁共振检查、产后随访或尸检。排除标准: 孕妇有磁共振检查禁忌证; 孕妇合并严重的心肺功能不全、肝肾功能障碍等疾病, 无法耐受磁共振检查; 胎儿存在其他严重的先天性畸形, 影响对脊柱脊髓畸形的判断。

**1.2 磁共振检查方法** 采用西门子3.0 T MAGNETOM Skyra磁共振成像仪, 配备8通道相控阵体线圈。孕妇取仰卧位, 平静呼吸, 尽量减少身体移动。首先进行常规的定位扫描, 确定胎儿脊柱脊髓的位置和范围。然后分别采用以下序列进行扫描: (1)Trufi序列: TR/TE(重复时间/回波时间)为3.2/1.6 ms, 翻转角60°, 层厚4 mm, 层间距0.4 mm, 采集矩阵256×256, 激励次数1次。(2)Haste序列: TR/TE为1000/80 ms, 回波链长度128, 层厚4 mm, 层间距0.4 mm, 采集矩阵256×192, 激励次数1次。(3)SWI序列: TR/TE为25/20ms, 翻转角15°, 层厚2 mm, 层间距0 mm, 采集矩阵320×320, 激励次数1次, 采用最小密度投影(minimum intensity projection, MIP)重建。

**1.3 图像分析** 由2名影像科医师观察并记录不同序列图像中胎儿脊柱脊髓的形态、结构、信号变化, 以及是否存在畸形及其类型、部位、范围等信息, 意见不一致时通过协商讨论达成一致。对不同序列显示胎儿脊柱脊髓畸形的图像质量进行评估, 评估标准为: +, 图像模糊, 无法清晰显示病变; ++, 图像基本清晰, 病变可辨认; +++, 图像清晰, 病变可显示清楚, 能达到最优诊断<sup>[6]</sup>。

**1.4 诊断标准** 以产后随访结果或尸检结果作为金标准。磁共振

诊断胎儿脊柱脊髓畸形的标准如下: (1)脊柱裂: 脊柱后方椎板连续性中断, 椎管内容物通过缺损处向外突出。(2)脊髓空洞: 脊髓内出现边界相对清晰的长T1、长T2信号影, 信号强度与脑脊液相近, 呈管状或囊状扩张。(3)脊髓脊膜膨出: 可见脊髓和脊膜通过椎板缺损处膨出, 表面有皮肤覆盖或无皮肤覆盖。(4)脊髓纵裂: 脊髓在矢状位或冠状位图像上显示为纵行分裂, 中间可见骨性、纤维性或软骨性分隔。(5)脊髓低位: 脊髓圆锥位置低于第2腰椎下缘水平。(6)椎体畸形: 包括半椎体、蝴蝶椎、椎体融合等, 表现为椎体形态异常、大小不等、椎间隙改变等。

**1.5 统计学处理** 借助软件SPSS 28.0对数据进行分析, 计算不同序列诊断胎儿脊柱脊髓畸形的敏感度、特异度、阳性预计值、阴性预计值、准确率。并采用Kappa一致性检验评价不同序列诊断结果与金标准的一致性。计量资料( $\bar{x} \pm s$ )行t检验; 计数资料n(%)行 $\chi^2$ 检验。以P<0.05为差异有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 胎儿脊柱脊髓畸形类型分布** 90例胎儿中, 经产后随访或尸检证实, 存在脊柱脊髓畸形的胎儿共68例, 畸形类型分布如下: 脊髓空洞20例、脊髓低位20例、脊髓纵裂13例、脊髓脊膜膨出18例、椎体畸形20例、脊柱裂21例。部分胎儿同时存在多种畸形, 如脊柱裂合并脊髓脊膜膨出、脊髓纵裂合并脊髓低位等。典型病例见图1~4。

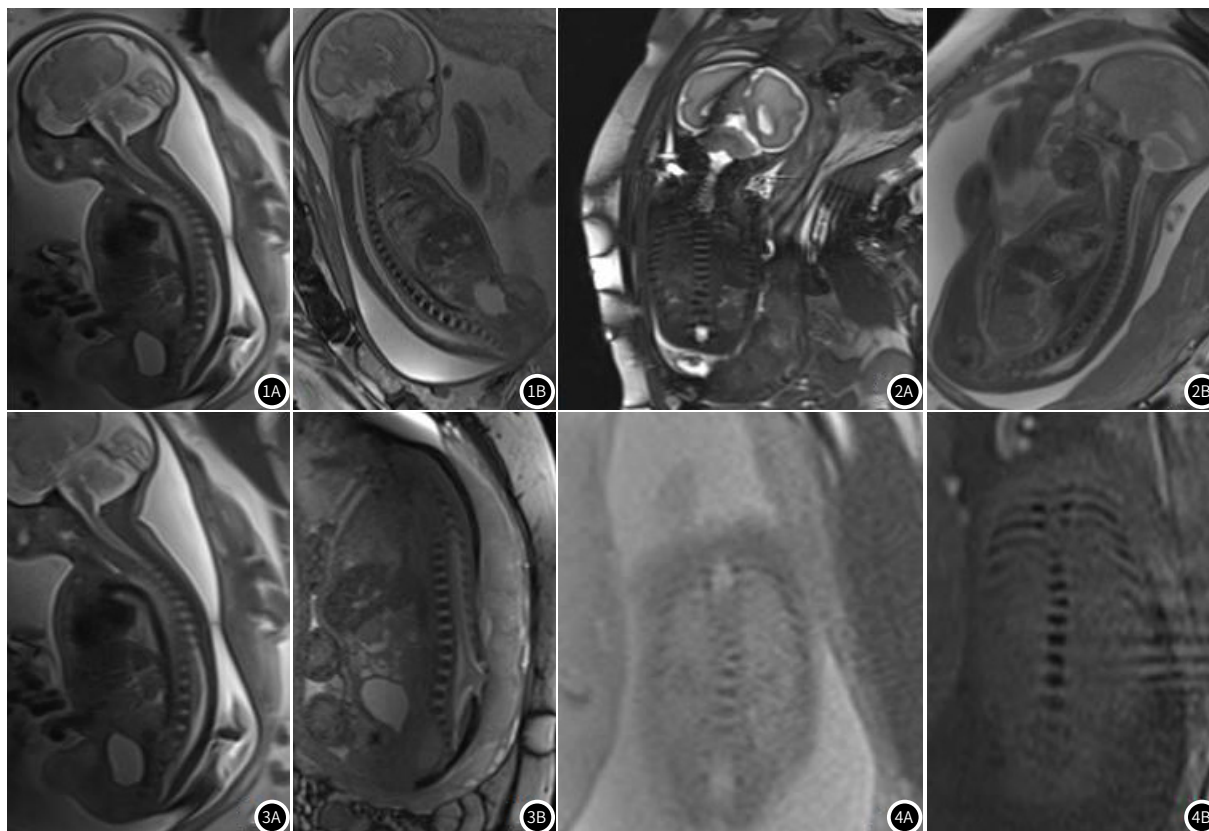


图1 孕妇31岁, 孕25周, 分别经Haste(图1A)和Trufi(图1B)序列扫描, 显示正常胎儿脊柱结构;  
图2 孕妇29岁, 孕26周, 分别经Haste(图2A)和Trufi(图2B)序列扫描, 显示胎儿多发胸腰椎畸形;  
图3 孕妇30岁, 孕25周, 分别经Haste(图3A)和Trufi(图3B)序列扫描, 显示胎儿腰骶椎脊髓脊膜膨出;  
图4 孕妇28岁, 孕24周, 经WI序列(图4A、图4B)扫描, 显示胎儿椎体畸形。

**2.2 磁共振不同序列对胎儿脊柱脊髓畸形的检出率** Haste序列对脊髓空洞、脊髓低位的检出率较高，分别为95.00%、90.00%；Trufi序列在脊髓纵裂、脊髓脊膜膨出的检出上表现出色，检出率分别为92.31%、88.89%；SWI序列对椎体畸形、脊柱裂的检出率较高，分别为90.00%、85.71%，见表1。

**2.3 磁共振不同序列的诊断效能** Haste序列、Trufi序列、SWI序列诊断与金标准的Kappa值依次为0.459、0.454、0.441，见表2。Haste序列、Trufi序列、SWI序列均具有较高的诊断准确率及敏感度，两两相比均无明显差异( $P>0.05$ )，见表3。

**表1 磁共振不同序列对胎儿脊柱脊髓畸形的检出率比较(例, %)**

畸形类型	例数	Haste序列	Trufi序列	SWI序列
脊髓空洞	20	19(95.00)	16(80.00)	16(80.00)
脊髓低位	20	18(90.00)	16(80.00)	15(75.00)
脊髓纵裂	13	10(76.92)	12(92.31)	9(69.23)
脊髓脊膜膨出	18	14(77.78)	16(88.89)	13(72.22)
椎体畸形	20	15(75.00)	14(70.00)	18(90.00)
脊柱裂	21	15(71.43)	14(66.67)	18(85.71)

**表2 磁共振不同序列诊断结果与金标准的一致性评估(例)**

序列	金标准		Kappa
	阳性(n=68)	阴性(n=22)	
Haste序列阳性	59	9	0.459
	阴性	13	
Trufi序列	57	8	0.454
	阴性	14	
SWI序列	60	10	0.441
	阴性	12	

**表3 磁共振不同序列诊断效能分析[% (例)]**

序列	敏感度	特异度	阳性预计值	阴性预计值	准确率
Haste序列	86.76(59/68)	59.09(13/22)	86.76(59/68)	59.09(13/22)	80.00(72/90)
Trufi序列	83.82(57/68)	63.64(14/22)	87.69(57/65)	56.00(14/25)	78.89(71/90)
SWI序列	88.24(60/68)	54.54(12/22)	85.71(60/70)	60.00(12/20)	80.00(72/90)
$\chi^2$	0.576	0.376	0.115	0.084	0.046
P	0.748	0.829	0.944	0.959	0.977

**2.4 磁共振不同序列图像质量评估** 在图像质量上，呈现脊髓空洞、脊髓低位，Haste序列最佳；呈现脊髓纵裂、脊髓脊膜膨

出，Trufi序列最佳；呈现椎体畸形、脊柱裂，SWI序列最佳，见表4。

**表4 磁共振不同序列图像质量评估**

序列	脊髓空洞	脊髓低位	脊髓纵裂	脊髓脊膜膨出	椎体畸形	脊柱裂
Haste序列	+++	+++	++	++	++	+
Trufi序列	++	++	+++	+++	++	++
SWI序列	+	+	+	+	+++	+++

### 3 讨论

胎儿脊柱脊髓畸形的发病原因较为复杂,涉及遗传因素,如基因突变等;同时,孕期母体的环境因素也至关重要,如孕期缺乏叶酸、接触有害物质、感染病毒等,都可能干扰胎儿脊柱脊髓的正常发育过程<sup>[7-8]</sup>。鉴于此类畸形对胎儿健康的严重威胁,早期精准诊断显得尤为关键。这不仅关系到胎儿出生后的生存质量与成长前景,还为临床医疗决策提供了不可或缺的依据。为进一步提升胎儿脊柱脊髓畸形的诊断水平,本研究选取了90例经超声初步筛查,提示胎儿脊柱脊髓可能存在畸形的孕妇作为研究对象,运用先进的磁共振成像技术,系统对比分析Trufi、Haste、SWI等不同序列在胎儿脊柱脊髓畸形诊断中的应用价值,旨在为临床提供更具针对性、更精准的诊断思路。

本研究中Haste序列对脊髓空洞和脊髓低位的检出率较高。这与Haste序列的成像特点密切相关。Haste序列成像速度快,对胎儿运动耐受性好,能够在短时间内获取清晰的图像,减少了因胎儿运动产生的伪影;同时,该序列对液体信号敏感,脊髓空洞内为液体成分,在Haste序列图像上表现为明显的高信号,易于识别<sup>[9]</sup>。对于脊髓低位, Haste序列能够清晰显示脊髓圆锥的位置,准确判断其是否低于正常水平。殷星等<sup>[10]</sup>人的研究也表明, Haste序列在显示脊髓形态和信号变化方面具有优势,与本研究结果一致。Trufi序列在脊髓纵裂和脊髓脊膜膨出的检出上表现出色。Trufi序列具有较高的软组织对比度,能够清晰显示脊髓和周围软组织的结构<sup>[11]</sup>。在脊髓纵裂的诊断中, Trufi序列可以清晰显示脊髓的分裂情况以及中间的分隔结构,无论是骨性、纤维性还是软骨性分隔都能较好地分辨<sup>[12]</sup>。对于脊髓脊膜膨出, Trufi序列能够清晰显示膨出物的内容物以及其与周围组织的关系,有助于准确诊断。SWI序列对椎体畸形和脊柱裂的检出率较高。SWI序列对磁场不均匀性敏感,能够清晰显示微小的出血、铁沉积以及骨质结构的变化<sup>[13]</sup>。在椎体畸形中,椎体的形态和骨质结构改变在SWI序列图像上能够清晰显示,有助于准确判断畸形类型<sup>[14]</sup>。对于脊柱裂, SWI序列可以显示椎板缺损处的细微结构以及可能存在的少量出血,提高了脊柱裂的检出率。相关研究表明, SWI序列在检测骨骼和软组织的细微病变方面具有显著优势,与本研究结果相符<sup>[15]</sup>。

Haste序列、Trufi序列、SWI序列均具有较高的诊断准确率及敏感度,两两相比均无明显差异( $P>0.05$ ),但三者与金标准的Kappa值依次为0.459、0.454、0.441,一致性为中等。这表明虽然三种序列在胎儿脊柱脊髓畸形诊断中都有一定价值,但单一序列诊断仍存在一定的误诊和漏诊情况。可能的原因包括胎儿个体差异、病变的复杂程度以及扫描参数的设置等。不同胎儿的脊柱脊髓解剖结构和病变表现存在差异,部分复杂畸形可能同时涉及多种病变,增加了诊断的难度<sup>[16]</sup>。此外,扫描参数的优化对于图像质量和诊断准确性也至关重要,不合适的参数设置可能导致病变显示不清,从而影响诊断结果<sup>[17]</sup>。在图像质量方面,各序列的图像质量表现与检出率呈现出一致性。进一步说明了不同序列在显示特定畸形方面具有优势,其图像质量与序列的成像原理和参数设置密切相关。例如, Haste序列对液体信号的敏感特性使其在显示脊髓空洞时图像清晰、对比度高; Trufi序列的高软组织对比度使其在显示脊髓纵裂和脊髓脊膜膨出时能够清晰呈现病变细节; SWI序列对磁场不均匀性的敏感使其在显示椎体畸形和脊柱裂的骨质结构变化时具有优势<sup>[18]</sup>。

综上所述,磁共振不同序列在胎儿脊柱脊髓畸形诊断中各有优势,但也存在一定的局限性。在临床实践中,应根据胎儿的具体情况,综合运用多种磁共振序列进行扫描,充分发挥各序列的优势,相互补充信息,以提高胎儿脊柱脊髓畸形的诊断准确性,为临床提供更可靠的诊断依据。同时,未来的研究可以进一步优化扫描参数,探索新的成像技术,以提高磁共振在胎儿脊柱脊髓畸形诊断中的应用价值。

### 参考文献

- [1] 孙梦纯, 尚爱加, 李超超, 等. 胎儿期脊髓神经管畸形产前超声与胎儿MRI影像的对比分析[J]. 中华神经外科杂志, 2024, 40(2): 148-153.
- [2] Tang X, Bai G, Wang H, et al. A comparison of the accuracy of fetal magnetic resonance imaging and ultrasonography for the diagnosis of fetal congenital malformations of the spine and spinal cord[J]. Prenat Diagn. 2022, 42(10): 1295-1302.
- [3] 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.
- [4] Branco LMT, Rezende TJR, Reis F, et al. Advanced structural magnetic resonance imaging of the spinal cord: technical aspects and clinical use[J]. Semin Ultrasound CT MR, 2023, 44(5): 464-468.
- [5] 马腾严, 严璐, 印洪刚, 等. 不同MR序列在胎儿脊柱成像中的对比研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2022, 28(4): 419-422.
- [6] 夏海泓, 初迎幸, 刘本波. MRI诊断胎儿脊柱脊髓畸形的价值和序列选择[J]. 中国实用医药, 2022, 17(24): 106-109.
- [7] 杨科, 张玉薇, 姜桂子, 等. 21例产前超声高度怀疑先天性骨骼系统畸形胎儿的遗传学分析[J]. 中华围产医学杂志, 2022, 25(1): 28-34.
- [8] 刘冰冰, 陈娟, 陈新, 等. 孕早期胎儿中枢神经系统结构畸形与染色体异常的相关性分析[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2022, 36(9): 955-958.
- [9] Ryan ME, Jaju A, Rychlik K, et al. Feasibility of rapid spine magnetic resonance evaluation for spinal cord syrinx in the pediatric population[J]. Neuroradiology, 2022, 64(9): 1879-1885.
- [10] 殷星, 李洁, 赵鑫, 等. 3.0 T MRI在胎儿脊柱及脊髓病变中的诊断探讨[J]. 临床放射学杂志, 2019, 38(4): 719-722.
- [11] Yin X, Zhao X, Lu L, et al. Fetal magnetic resonance imaging of lumbar spine development in vivo: a retrospective study[J]. Childs Nerv Syst, 2022, 38(11): 2113-2118.
- [12] Trueb P, Getzmann JM, Ried E, et al. Comparison of muscle fat fraction measurements in the lower spine musculature with non-contrast-enhanced CT and different MR imaging sequences[J]. Eur J Radiol, 2022; 150: 110260.
- [13] 侯西蔓, 蔡先云, 陈欣, 等. 胎儿冠状椎体裂的影像学表现及转归分析[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(5): 503-508.
- [14] 曹倩, 尹宏宇, 陈霞, 等. 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[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(12): 1931-1935.
- [15] 丁旭东, 杨金永, 丁萍, 等. SWI序列诊断胎儿脊柱发育畸形的应用价值[J]. 医学影像学杂志, 2021, 31(12): 2108-2110.
- [16] 石丽莉, 李素荣, 李光民, 等. MR在胎儿脊柱脊髓疾病诊断中的应用[J]. 实用放射学杂志, 2023, 39(1): 108-111.
- [17] 徐静, 马光辉, 刘彭华, 等. 基于磁共振多模态成像定量参数鉴别诊断乳腺良恶性病变及与临床病理特征的关系探究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22(3): 93-96.
- [18] 梁艳山, 张小安, 赵鑫, 等. MRI诊断胎儿脊柱脊髓畸形及序列选择[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(1): 111-115.

(收稿日期: 2025-04-23)

(校对编辑: 翁佳鸿)