

## MRI 单次激发 FSE 序列评价胎儿脑沟发育的可行性

夏薇, 周婧, 郭豫, 邵剑波

**【摘要】 目的:**探讨 MRI 单次激发 FSE 序列评价宫内胎儿脑沟发育的可行性。**方法:**分析 203 例 22~38 孕周健康胎儿的脑部 MRI 图像,根据孕周分为 17 组,每一孕周为一组,评价胎儿半球间裂、外侧裂、顶枕沟、海马裂、胼胝体沟、距状裂、扣带沟、边缘沟、侧副沟、中央沟、额上沟、中央前沟、中央后沟、顶内沟、颞上沟、额下沟、颞下沟、枕颞沟、次级扣带沟、次级枕沟及岛沟是否可显示,并计算各孕周组中各个脑沟的可见率。**结果:**建立了 22~38 孕周胎儿大脑所有初级脑沟和部分次级脑沟的可见百分率的时间表。超过 75% 的胎儿在 22 孕周时可见半球间裂、外侧裂、顶枕沟、海马裂、胼胝体沟和距状裂;在 24 孕周可见扣带沟;在 25 孕周可见边缘沟、侧副沟、中央沟和额上沟;在 26 孕周可见中央前沟、中央后沟和顶内沟;在 27 孕周可见颞上沟和额下沟;在 31 孕周可见颞下沟、枕颞沟和次级扣带沟;在 32 孕周可见次级枕沟;在 34 孕周可见岛沟。**结论:**MRI 单次激发 FSE 序列可用于评估胎儿脑沟的发育情况,可为评价胎儿脑部发育提供一定的参考标准,从而可辅助诊断脑发育滞后。

**【关键词】** 胎儿; 脑沟; 脑组织发育; 磁共振成像

**【中图分类号】** R445.2; R715.5 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)12-1605-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.12.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Feasibility study on evaluation of fetal sulcus development by MRI with single shot fast spin echo sequence**

XIA Wei, ZHOU Jing, GUO Yu, et al. Department of Imaging Center, Wuhan Children's Hospital (Wuhan Maternal and Child Healthcare Hospital), Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430015, China

**【Abstract】 Objective:** To evaluate the development of fetal sulcus in uterus by MRI with single shot fast spin echo sequence. **Methods:** The MRI images of the brain of 203 normal fetuses at 22~38 weeks of gestation (17 groups in total) were retrospectively analyzed to evaluate the percentage of each fetal sulcus visibility according to gestational age by weeks, including interhemispheric fissure, lateral sulcus, parieto-occipital fissure, hippocampal fissure, callosal sulcus, calcarine fissure, cingular sulcus, marginal sulcus, collateral sulcus, central sulcus, superior frontal sulcus, precentral sulcus, postcentral sulcus, intraparietal sulcus, superior temporal sulcus, inferior frontal sulcus, inferior temporal sulcus, occipitotemporal sulcus, secondary cingular sulci, secondary occipital sulci and insular sulci.

**Results:** A timeline was established for the percentage of all fetal cerebral primary sulcus and some secondary sulcus visibility at 22~38 weeks of gestation. In over 75% of fetuses, interhemispheric fissure, lateral sulcus, parieto-occipital fissure, hippocampal fissure, callosal sulcus and calcarine fissure could be seen at 22 gestational weeks, cingular sulcus could be seen at 24 weeks, marginal sulcus, collateral sulcus, central sulcus and superior frontal sulcus could be seen at 25 weeks, precentral sulcus, postcentral sulcus and intraparietal sulcus could be seen at 26 weeks, superior temporal sulcus and inferior frontal sulcus could be seen at 27 weeks, inferior temporal sulcus, occipitotemporal sulcus and secondary cingular sulci could be seen at 31 weeks, secondary occipital sulci could be seen at 32 weeks, insular sulci could be seen at 34 weeks. **Conclusion:** The development of fetal sulcus could be evaluated by FSE sequence MRI, a reference standard for the fetal brain development has been suggested, which

作者单位:430015 湖北武汉,华中科技大学同济医学院附属武汉儿童医院(武汉市妇幼保健院)影像中心

作者简介:夏薇(1983-),女,湖北武汉人,博士研究生,主任医师,主要从事妇儿影像学研究工作。

通讯作者:邵剑波, E-mail: shaojb2002@sina.com

基金项目:湖北省自然科学基金(2020CFB710);湖北省卫生计生科研基金(WJ2018H0160);武汉儿童医院科研基金(2020FE002);武汉儿童医院儿童影像医学研究室建设项目(2022FEYJS002);武汉市儿童影像医学临床医学研究中心建设项目(WSTB2022-38)

can be used to assist the diagnosis of brain development retardation.

**【Key words】** Fetus; Sulcus; Brain development; Magnetic resonance imaging

胎儿脑部的发育过程遵循由简单到复杂的模式,胎儿脑沟的发育也是如此。脑沟的形成自胎儿在宫内的第 2 个月起开始,一直持续到分娩甚至出生后。初级脑沟首先出现,由表浅的凹陷逐渐加深,之后变得曲折并衍生出侧枝,即次级脑沟。次级脑沟继续发展侧枝,形成三级脑沟<sup>[1]</sup>。脑沟的发育极其复杂,而脑沟的显示是其中一个重要的参考指标。脑沟出现的时间是评价胎龄的可靠指标,是胎儿脑发育水平的重要指标,具有里程碑式的意义。评价脑沟发育的金标准是神经解剖学检查,但是在实际工作中很难实现<sup>[2]</sup>。在产前精确评价脑沟的发育水平,不仅有助于判断胎儿的胎龄,同时有助于早期发现胎儿神经元移行异常疾病。有研究中利用超声评价胎儿的脑沟发育,但是超声所获得的切面与操作手法有关,不同医师间的一致性较差<sup>[3]</sup>。随着高场强 MRI 在胎儿中的应用逐渐广泛,更高的信噪比和分辨率使胎儿脑沟得以更好地被观察到。MRI 在胎儿脑部显示方面的优势已得到了广泛的认可,已有研究者借助人工智能技术来识别胎儿的脑沟回从而辅助判断胎儿孕周,但由于胎儿 MRI 数据量有限,其结果的鲁棒性差、泛化能力弱,尚无法应用于临床<sup>[4]</sup>。同时由于基于人工智能技术所获得的结果缺乏可解释性,难以应用于临床场景<sup>[5]</sup>。我们研究的目的是利用单次激发快速自旋回波序列 MRI 细致评价不同孕周胎儿脑沟的发育,为准确评估胎儿脑沟发育提供参考数据,也为产前咨询提供依据。

## 材料与方法

### 1. 病例选择

回顾性选取 2018 年 3 月—2021 年 5 月在本院行 MRI 检查的 203 例胎龄 22~38 周的单胎妊娠胎儿作为研究对象。所有孕妇检查前签署了知情同意书,研究方案得到了武汉儿童医院伦理委员会的批准(2021R088-E01)。所有胎儿的临床孕周根据孕妇末次月经时间计算,并与早孕期超声根据顶臀长计算所得超声孕周一致。胎儿 MRI 检查由妇产科医师根据不同原因提出申请,如胎儿体位不佳、羊水异常、胎盘位置异常和透明隔显示不清等。所有胎儿的颅脑 MRI 检查结果正常。新生儿在分娩时、出生后 1、3 和/或 6 个月时的生长发育常规体检中未发现明显异常。

### 2. MRI 检查方法

使用 GE Discovery MR750 或 Philips Ingenia CX 3.0T 磁共振仪和体部相控阵线圈。对脑沟的评价均

在单次激发 FSE 序列 T<sub>2</sub>WI 图像上进行;使用 GE 磁共振仪扫描时采用的是半傅立叶采集单次激发短时自旋回波(half-fourier-acquired single-shot turbo spin echo, HASTE)序列,扫描参数:TE 100 ms, TR 3000 ms,激励次数 1,层厚 4 mm,视野 480 mm×480 mm,矩阵 384×288;Philips 磁共振仪上采用的是单次激发短时自旋回波(single-shot turbo spin echo, SSh-TSE)序列,扫描参数:TE 90 ms, TR 800 ms,激励次数 1,层厚 4 mm,视野 300 mm×300 mm,矩阵 260×222。

胎儿的常规检查序列还包括颅脑横轴面 T<sub>1</sub>WI 和 DWI。GE 设备的 T<sub>1</sub>WI 扫描参数:TE 3.4 ms, TR 130 ms,激励次数 1,层厚 4 mm,视野 480 mm×480 mm,矩阵 160×288;GE 设备 DWI 扫描参数:TE 70 ms, TR 3000 ms,层厚 4 mm,视野 360 mm×360 mm,矩阵 128×130, b 值为 50 和 800 s/mm<sup>2</sup>;Philips 设备 T<sub>1</sub>WI 扫描参数:TE 2.3 ms, TR 290 s,激励次数 1,层厚 4 mm,视野 250 mm×250 mm,矩阵 168×156;Philips 设备 DWI 扫描参数:TE 56 ms, TR 1132 ms,层厚 4 mm,视野 300 mm×395 mm,矩阵 100×129, b 值为 50 和 800 s/mm<sup>2</sup>。总扫描检查时间不超过 30 min,不使用镇静药物。

### 3. 图像分析

由经验丰富的 1 位高年资主治医师及 1 位主任医师在 FSE 序列 T<sub>2</sub>WI 图像上对胎儿脑沟进行评价,两者达成一致意见后给出结论。对胎儿脑沟的评价在胎儿脑部的 3 个正交切面上进行,定位方法:矢状面的定位线平行于脑干,其中正中矢状位可以显示胼胝体、中脑导水管及垂体;冠状面平行于脑干,两侧可对称显示内耳结构;横轴面则垂直于脑干,平行于胼胝体体部,两侧对称<sup>[6]</sup>。评价脑沟的影像层面如图 1~16 所示,包括半球间裂、外侧裂、顶枕沟、海马裂、胼胝体沟、距状裂、扣带沟、边缘沟、中央沟、中央前沟、中央后沟、顶内沟、侧副沟、颞上沟、颞下沟、枕颞沟、额上沟、额下沟、次级扣带沟、岛沟和次级枕沟。脑表面任一侧或双侧出现可以识别的凹陷即认为脑沟可见<sup>[7]</sup>。记录在不同孕周时各沟回出现者的例数和占比。在每个孕周统计各个脑沟回的可见率,分为 25%~75%可见、>75%可见和 100%可见。

## 结 果

所有胎儿进行 MRI 检查时的胎龄分布如图 17 所示,并根据胎龄进行分组。

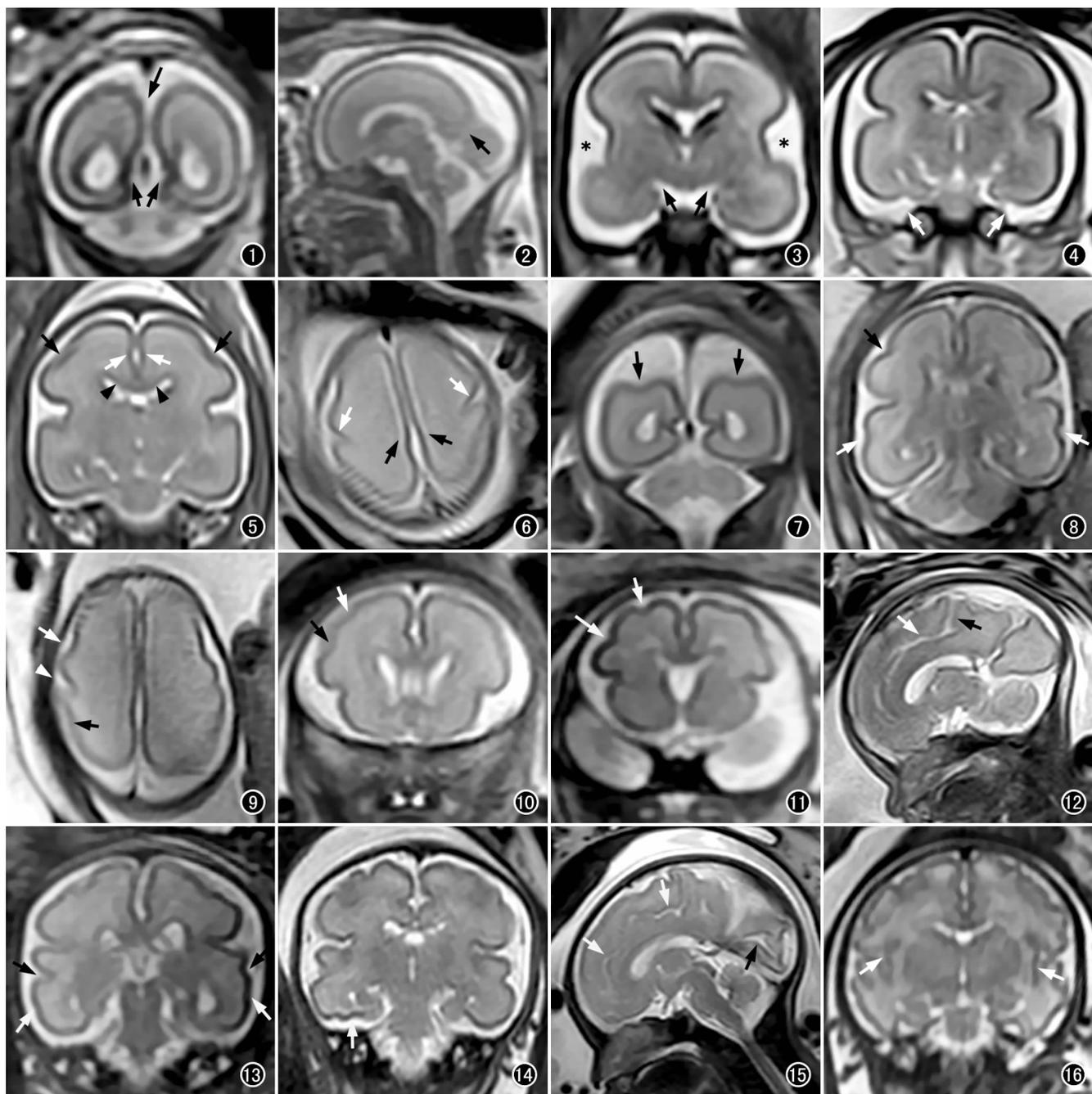


图 1 孕 22 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI, 可见半球间裂(长箭)和距状裂(短箭)。图 2 孕 22 周胎儿脑部矢状面  $T_2$ WI, 可见顶枕沟(箭)。图 3 孕 23 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI, 可见双侧外侧裂(\*)和海马裂(黑箭)。图 4 孕 24 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI, 可见双侧侧副沟(白箭)。图 5 孕 25 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI, 可见胼胝体沟(黑箭头)、扣带沟(白箭)和额上沟(黑箭)。图 6 孕 25 周胎儿脑部横轴面  $T_2$ WI, 可见双侧中央沟(白箭)和边缘沟(黑箭)。图 7 孕 25 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI, 可见双侧顶内沟(黑箭)。图 8 孕 25 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI, 可见额上沟(白箭)和额上沟(黑箭)进一步加深。图 9 孕 25 周胎儿脑部横轴面  $T_2$ WI, 可见中央沟(白箭头)、中央前沟(白箭)、中央后沟(黑箭)。图 10 孕 26 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI 可见额上沟(白箭)和额下沟(黑箭)。图 11 孕 27 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI 可见额上沟(短箭)和额下沟(长箭)进一步加深。图 12 孕 27 周胎儿脑部矢状面  $T_2$ WI 可见边缘沟(黑箭)加深, 延伸至扣带沟(白箭)平面。图 13 孕 29 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI 可见双侧额上沟(黑箭)和额下沟(白箭)。图 14 孕 29 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI 可见枕额沟(白箭)。图 15 孕 31 周胎儿脑部矢状面  $T_2$ WI 可见曲折的次级扣带沟(白箭)和次级枕沟(黑箭), 对比图 4、6、9 和 15, 可更清楚的发现随着孕周的增加外侧裂逐渐加深和变窄。图 16 孕 33 周胎儿脑部冠状面  $T_2$ WI, 可见双侧岛沟(白箭)。

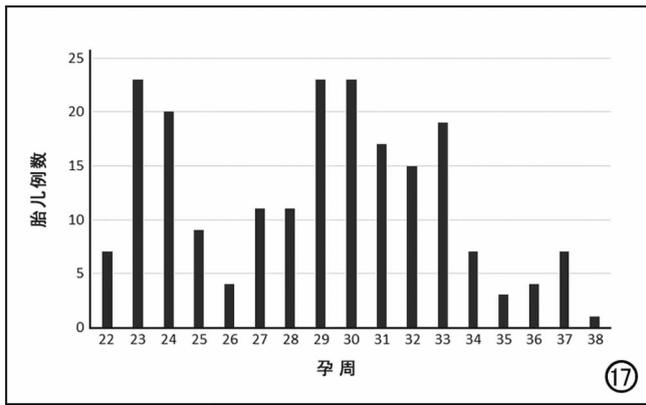


图 17 203 例胎儿的孕周分布。

各脑沟在不同孕周时可见的百分比详见表 1。

表 1 高场 MRI 脑沟发育时间表 /孕周

| 脑沟                 | 25%~75%<br>病例可见 | >75%<br>病例可见 |
|--------------------|-----------------|--------------|
| 半球间裂 <sup>a</sup>  | —               | 22           |
| 外侧裂 <sup>a</sup>   | —               | 22           |
| 顶枕沟 <sup>a</sup>   | —               | 22           |
| 海马裂 <sup>a</sup>   | —               | 22           |
| 胼胝体沟 <sup>a</sup>  | —               | 22           |
| 距状裂 <sup>a</sup>   | —               | 22           |
| 扣带沟                | 23              | 24           |
| 边缘沟                | 23              | 25           |
| 侧副沟                | 23              | 25           |
| 中央沟                | 24              | 25           |
| 额上沟                | 24              | 25           |
| 中央前沟               | 25              | 26           |
| 中央后沟               | 25              | 26           |
| 顶内沟                | 25              | 26           |
| 颞上沟                | 25              | 27           |
| 额下沟                | 26              | 27           |
| 颞下沟                | 29              | 31           |
| 枕颞沟                | 29              | 31           |
| 次级扣带沟 <sup>b</sup> | —               | 31           |
| 次级枕沟               | 31              | 32           |
| 岛沟                 | 33              | 34           |

注：<sup>a</sup>在 22 孕周时已 100% 可见，因此在“25%~75% 病例可见”处数据空缺。<sup>b</sup>在 30 孕周及以前可见率小于 25%，因此其在“25%~75% 病例可见”处数据空缺。

22 孕周时，半球间裂、外侧裂、顶枕沟、海马裂、胼胝体沟及距状裂均为 100% 可见。在 23 周时，57% 的扣带沟、35% 的边缘沟及 26% 的侧副沟可被识别；其中，扣带沟在 24 周时 100% 可见，边缘沟在 25 周时 89% 可见，侧副沟在 25 周时 78% 可见，后两者在 26 周时 100% 可见。75% 的中央沟和 30% 的额上沟在 24 周时可见，在 25 周时可见百分比分别增高至 89% 和 78%，在 26 周时均 100% 可见。中央前沟(56%)、中央后沟(44%)、顶内沟(56%)和颞上沟(44%)均在 25 周时可见；至 26 周时，中央前沟和顶内沟 100% 可见，中央后沟及颞上沟 75% 可见；颞上沟在 27 周时 100% 可见，中央后沟在 28 周时 100% 可见。额下沟在 26 周时 25% 可见，27 周时 90% 可见，在 29 周时

100% 可见。29 周时 35% 的颞下沟和 39% 的枕颞沟可见；在 31 周时两者的可见百分比分别升高至 94% 和 82%；在 33 周时两者均 100% 可见。在 31 周时，次级扣带沟 88% 可见，次级枕沟 47% 可见；32 周时，两者的可见百分比分别升高至 93% 和 87%；33 周时，两者均 100% 可见。岛沟出现最晚，33 周时 68% 可见，34 周时 100% 可见。

## 讨论

超声是评价胎儿宫内发育情况的一线检查方法，在早孕期可以通过测量胎儿的顶臀长来估算相应的超声孕周，并可与临床孕周进行对比，其在早孕期确定孕周具有很高的可信度<sup>[8]</sup>。在中晚孕期，超声测量的双顶径、头围等指标可以反映胎儿颅脑的宫内发育水平，但是随着孕周的进展，其稳定性较差<sup>[9-10]</sup>。为此，有必要寻找一种可靠的反映宫内胎儿颅脑发育情况的标志物，以更准确地判断胎儿颅脑的发育水平。既往神经解剖学研究发现，胎儿脑沟回的出现时间比较稳定，可以作为判断胎儿颅脑发育水平的标志物<sup>[11]</sup>。此外，脑沟的发育与许多疾病状态有关联，如神经元移行异常相关疾病等，因此准确判断胎儿脑沟发育情况是辅助疾病诊断及预后的重要参考信息<sup>[12-17]</sup>。超声作为一线产前影像检查手段，在尝试评价胎儿脑沟回方面做出了很多尝试<sup>[18-21]</sup>。尽管目前超声的图像质量已明显改善，但是其应用仍具有局限性：其对胎儿脑沟的显示在很大程度上基于超声医师的测量手法，其扇形束的切面对胎儿脑沟的显示难以与解剖结果相对照；同时由于颅骨声影的影响和扫描切面的受限，超声对脑沟的显示不全面、不系统；在胎头入盆、羊水过少及母体肥胖等情况下，超声难以满意地显示胎儿颅脑的结构，更无法评价脑沟。上述原因使得超声在产前评价胎儿脑沟发育方面的应用受到限制<sup>[22-25]</sup>。

MRI 在胎儿颅脑显示和评价方面的优势已得到了很多研究的证实<sup>[26-28]</sup>。MRI 可以实现标准正交切面的多平面成像，使其可以与神经解剖的结果互为验证。同时 MRI 不受胎儿头部位置、羊水量及母体体型的影响，在脑脊液的衬托下可以很好地显示胎儿脑表面的结构。有研究基于胎儿尸体 MRI 检查来评价脑沟回的发育情况<sup>[29]</sup>，还有研究者是基于早产儿颅脑 MRI<sup>[30]</sup>，但是现有研究认为健康胎儿和早产儿的脑沟回发育轨迹并不一致<sup>[31]</sup>。还有的研究仅对某一脑沟进行研究，未能系统评价胎儿脑沟的发育情况<sup>[32]</sup>。现有的利用人工智能辅助评价胎儿脑沟发育的研究中，由于各个孕周的胎儿 MRI 数据量十分有限，因此其结果的鲁棒性差、泛化能力弱，无法应用于临床。同时由于基于人工智能技术所获得的结果缺乏可解释性，如

无法说明其模型得出的结论是基于胎儿脑沟的发育,致其难以应用于临床场景<sup>[4-5]</sup>。本研究中总结了胎儿脑沟出现的孕周,可以为今后人工智能的特征标注提供参考,提高其结果的可信度及可解释性。

本研究基于胎儿脑部 3 个正交切面,如本文中图 1~16 所示,不同平面对不同脑沟的显示各有优劣,综合分析 3 个正交平面的图像,可以更全面、准确地评价各个脑沟的发育情况,减少分析结果的偏倚。冠状面图像可以较好地显示半球间裂、外侧裂、海马裂、胼胝体沟、距状裂、扣带沟、顶内沟、侧副沟、颞上沟、颞下沟、枕颞沟、额上沟、额下沟和岛沟,矢状面图像对顶枕沟、中央沟、中央前沟、中央后沟、次级扣带沟和次级枕沟的显示较好,而横轴面图像则可以用来观察半球间裂、外侧裂、边缘沟、中央沟、中央前沟、中央后沟、岛沟和次级枕沟。三个平面都有其不可替代的作用,同时可以互为补充、相互验证。同时,胎儿 MRI 可以无创性地在体观察胎儿脑部的真实形态,相较需要对脑组织进行制片等处理流程的神经解剖学检查而言,能更真实地反映胎儿脑沟的发育情况。这是因为神经解剖学制备标本的过程需要进行脱水、固定和切片等,脑组织在这个过程中会发生萎缩和变形,因此这种方法并不能真实反映活体脑沟的状态。既往有研究者利用 0.5 T MR 脑部图像(层厚 5 mm)评价胎儿的脑沟发育,发现 MRI 上显示额上沟、额下沟、枕颞沟、次级扣带沟、次级枕沟和岛沟的时间就早于神经解剖学检查<sup>[33]</sup>,说明 MRI 相较传统的神经解剖方法能更真实地反映脑沟的发育。我们的研究结果也显示,产前 MRI 可以更早地显示额上沟、顶内沟、额下沟、颞下沟、枕颞沟、次级扣带沟、次级枕沟和岛沟。同时,本研究中很多脑沟的可见时间较之前的研究中观察到的时间提前了 1~2 周,这可能是由于高场强 MRI 在保证高信噪比的前提下采集速度更快,使得在进行胎儿脑部成像时可以选用更薄的层厚<sup>[7]</sup>。

本研究存在一定的局限性:首先,在评价时未考虑脑沟发育的偏侧性优势,而脑沟的发育双侧并不一致<sup>[34]</sup>,脑沟发育的偏侧优势及意义尚需更大样本量的研究进行验证;第二,本研究中也未考虑胎儿的性别因素,但是既往有研究证实不同性别间脑沟的发育无明显差异<sup>[35]</sup>;第三,神经元移行异常会影响对胎儿脑沟显示的判断,因此我们选择由具有多年胎儿 MRI 诊断经验的高年资影像专家对图像进行判读,同时回顾胎儿出生后的常规体检资料,仅纳入体检结果正常的胎儿,以尽可能地排除神经元移行异常的可能;第四,本研究结果未能获得解剖学的验证,但是既往研究表明, MRI 可以实现解剖级别的成像,并且不受标本处理的影响,能更真实地反映活体状态<sup>[36]</sup>;最后,本研究中样

本量尚有限,且胎儿 MRI 多是在超声筛查后为进一步明确诊断而进行的<sup>[37]</sup>,因此纳入研究的胎儿的孕龄主要集中于 23~24 孕周(超声大排畸)和 29~30 孕周(超声小排畸),各孕周患儿的数量差异比较大,可能存在样本选择偏倚,而且为了尽力保证纳入的对象是健康胎儿,排除了产前检查发现异常或出生后体检不正常的胎儿,总之我们将在今后的工作中进一步扩充样本量进行更深入地研究。

本研究描述了自 22 周起至 38 周孕期每周脑沟的发育,为利用 MRI 评价脑沟发育提供了基础数据。在孕 34 周时,所有初级脑沟及部分次级脑沟均可以显示,因此,我们建议可以利用 MRI 单次激发 FSE 序列在 22~34 孕周进行 MRI 扫描来评价胎儿脑沟的发育情况。鉴于个体发育的差异性,我们提供了脑沟在不同孕周可见的百分数,并大致分为 3 个类别,包括 25%~75%,大于 75%且<100%和 100%。在临床应用时,我们建议以 100%可见孕周作为发育延迟的标准,75%可见孕周作为随访的标准,而 25%~75%可见孕周反映了个体发育的差异性。

总之,我们的研究提供了基于高场强 MRI 的 22~38 孕周胎儿每周胎儿脑沟发育的数据,证实了胎儿脑沟发育遵循一定的时间顺序,并且是可以评价和预测的。MRI 单次激发快速自旋回波序列能够提供清晰的对比度,可以在产前无创性显示宫内胎儿脑沟的发育情况,是评价胎儿脑发育的一种有价值的方法。

#### 参考文献:

- [1] Dorovini-Zis K, Dolman CL. Gestational development of brain[J]. Arch Pathol Lab Med, 1977, 101(4):192-195.
- [2] Nishikuni K, Ribas GC. Study of fetal and postnatal morphological development of the brain sulci[J]. J Neurosurg Pediatr, 2013, 11(1):1-11.
- [3] Chen X, Li SL, Luo GY, et al. Ultrasonographic characteristics of cortical sulcus development in the human fetus between 18 and 41 weeks of gestation[J]. Chin Med J, 2017, 130(8):920-928.
- [4] Shi W, Yan G, Li Y, et al. Fetal brain age estimation and anomaly detection using attention-based deep ensembles with uncertainty [J/OL]. Neuroimage, 2020, 223: e117316 [2020 Sep 2]. DOI:10.1016/j.neuroimage.2020.117316.
- [5] Wu J, Sun T, Yu B, et al. Age-specific structural fetal brain atlases construction and cortical development quantification for Chinese population[J/OL]. Neuroimage, 2021, 241: e118412 [2021 Jul 20]. DOI:10.1016/j.neuroimage.2021.118412.
- [6] 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.
- [7] Garel C, Chantrel E, Elmaleh M, et al. Fetal MRI: normal gestational landmarks for cerebral biometry, gyration and myelination [J]. Childs Nerv Syst, 2003, 19(7-8):422-425.
- [8] Daya S. Accuracy of gestational age estimation by means of fetal

- crown-rump length measurement[J]. *Am J Obstet Gynecol*, 1993, 168(3 Pt 1):903-908.
- [9] Persson PH, Weldner BM. Reliability of ultrasound fetometry in estimating gestational age in the second trimester[J]. *Acta Obstet Gynecol Scand*, 1986, 65(5):481-483.
- [10] Hadlock FP, Harrist RB, Martinez-Poyer J. How accurate is second trimester fetal dating[J]. *J Ultrasound Med*, 1991, 10(10):557-561.
- [11] Nishikuni K, Ribas GC. Study of fetal and postnatal morphological development of the brain sulci laboratory investigation[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2013, 11(1):1-11.
- [12] Ortinau CM, Rollins CK, Gholipour A, et al. Early-emerging sulcal patterns are atypical in fetuses with congenital heart disease[J]. *Cereb Cortex*, 2019, 29(8):3605-3616.
- [13] Pooh RK, Machida M, Nakamura T, et al. Increased Sylvian fissure angle as early sonographic sign of malformation of cortical development[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2019, 54(2):199-206.
- [14] Jaimes C, Rofeberg V, Stopp C, et al. Association of isolated congenital heart disease with fetal brain maturation[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2020, 41(8):1525-1531.
- [15] Zhao SX, Ma HL, Lv FR, et al. Lateral ventricular volume and calcarine sulcus depth: a fetal MRI analysis of mild ventriculomegaly; a strobe compliant article[J/OL]. *Medicine (Baltimore)*, 2020, 99(25):e20679 [2020 Jun 19]. DOI: 10.1097/MD.00000000000020679.
- [16] Yun HJ, Perez JDR, Sosa P, et al. Regional alterations in cortical sulcal depth in living fetuses with Down syndrome[J]. *Cereb Cortex*, 2021, 31(2):757-767.
- [17] Zhu R, Chen JY, Hou XL, et al. Asymmetric cortical development and prognosis in fetuses with isolated mild fetal ventriculomegaly; an observational prospective study[J]. *BMC Pregnancy Child Birth*, 2021, 21(1):199 [2021 Mar 10]. DOI: 10.1186/s12884-021-03692-x.
- [18] Toi A, Lister WS, Fong KW. How early are fetal cerebral sulci visible at prenatal ultrasound and what is the normal pattern of early fetal sulcal development[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2004, 24(7):706-715.
- [19] Cohen-Sacher B, Lerman-Sagie T, Lev D, et al. Sonographic developmental milestones of the fetal cerebral cortex; a longitudinal study[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2006, 27(5):494-502.
- [20] Correa FF, Lara C, Bellver J, et al. Examination of the fetal brain by transabdominal three-dimensional ultrasound; potential for routine neurosonographic studies[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2006, 27(5):503-508.
- [21] Ruiz A, Sembely-Taveau C, Paillet C, et al. Sonographic cerebral sulcal pattern in normal fetuses[J]. *J Radiol*, 2006, 87(1):49-55.
- [22] Li Y, Estroff JA, Mehta TS, et al. Ultrasound and MRI of fetuses with ventriculomegaly; can cortical development be used to predict postnatal outcome[J]. *AJR*, 2011, 196(6):1457-1467.
- [23] Rolo LC, Araujo E, Nardoza LMM, et al. Development of fetal brain sulci and gyri: assessment through two and three-dimensional ultrasound and magnetic resonance imaging[J]. *Arch Gynecol Obstet*, 2011, 283(2):149-158.
- [24] Quemener J, Bigot J, Joriot S, et al. Prenatal analysis of primary sulci by ultrasonography and MRI[J]. *Gynecol Obstet Fertil*, 2012, 40(11):701-710.
- [25] Contro E, Salsi G, Montaguti E, et al. Sequential analysis of the normal fetal fissures with three-dimensional ultrasound; a longitudinal study[J]. *Prenat Diagn*, 2015, 35(5):493-499.
- [26] Prayer D, Malinger G, Brugger PC, et al. Isuog practice guidelines; performance of fetal magnetic resonance imaging[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2017, 49(5):671-680.
- [27] 叶芷君, 宁刚, 李学胜. 胎儿胼胝体发育不全的 MRI 诊断[J]. *放射学实践*, 2018, 33(6):617-621.
- [28] 庄严, 王添平, 常卓琳, 等. MRI 对胎儿结节性硬化症的诊断价值[J]. *放射学实践*, 2018, 33(10):1068-1072.
- [29] Zhang ZH, Liu SW, Lin XT, et al. Development of fetal brain of 20 weeks gestational age; assessment with post-mortem magnetic Resonance imaging[J]. *Eur J Radiol*, 2011, 80(3):432-439.
- [30] Ruoss K, Lovblad K, Schroth G, et al. Brain development (Sulci and Gyri) as assessed by early postnatal MR imaging in preterm and term newborn infants[J]. *Neuropediatrics*, 2001, 32(2):69-74.
- [31] Lefevre J, Germanaud D, Dubois J, et al. Are developmental trajectories of cortical folding comparable between cross-sectional datasets of fetuses and preterm newborns[J]. *Cereb Cortex*, 2016, 26(7):3023-3035.
- [32] Quarello E, Stirnemann J, Ville Y, et al. Assessment of fetal Sylvian fissure operculization between 22 and 32 weeks; a subjective approach[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2008, 32(1):44-49.
- [33] Garel C, Chantrel E, Brisse H, et al. Fetal cerebral cortex; normal gestational landmarks identified using prenatal MR imaging[J]. *AJNR*, 2001, 22(1):184-189.
- [34] Habas PA, Scott JA, Roosta A, et al. Early folding patterns and asymmetries of the normal human brain detected from in utero MRI[J]. *Cereb Cortex*, 2012, 22(1):13-25.
- [35] Chi JG, Dooling EC, Gilles FH. Gyral development of the human brain[J]. *Ann Neurol*, 1977, 1(1):86-93.
- [36] Lerch JP, van Der Kouwe AJ, Raznahan A, et al. Studying neuroanatomy using MRI[J]. *Nat Neurosci*, 2017, 20(3):314-326.
- [37] Prayer D, Malinger G, Brugger PC, et al. Isuog practice guidelines; performance of fetal magnetic resonance imaging[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2017, 49(5):671-680.

(收稿日期:2023-02-06 修回日期:2023-06-11)