

Doppler-ultrasound gating fetal cardiac MRI for prenatal assessment of cardiovascular anatomy and function

ZHENG Zhibo¹, OUYANG Rongzhen², PANG Luyun¹, LIANG Lena¹, XIN Delai¹,
WANG Huaijun¹, SUN Yicheng¹, XING Mengli¹, ZHONG Yumin^{1,2*}

(1. Department of Radiology, Hainan Branch, Shanghai Children's Medical Center, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Sanya Women and Children's Hospital Affiliated to Hainan Medical University, Sanya 572022, China; 2. Department of Radiology, Shanghai Children's Medical Center, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200127, China)

[Abstract] **Objective** To explore the value of Doppler-ultrasound (DUS) gating fetal cardiac MRI for prenatal assessment of cardiovascular anatomy and function. **Methods** Cardiac MRI data of 41 fetuses were retrospectively analyzed. The fetuses were divided into pregnant metaphase group ($n=16$) and late pregnancy group ($n=25$). Non electrocardiographic gating sequences (included balanced steady-state free precession [b-SSFP] and single-shot turbo spin-echo [SSTSE]) and DUS gating b-SSFP cine sequences scanning were performed. The subjective scores of image quality were compared between DUS gating and non electrocardiographic gating b-SSFP images. Based on DUS gating b-SSFP cine sequences, the diameters of major cardiac blood vessels, left ventricular (LV) volume and functional parameters were measured and compared, and their correlations with gestational age were analyzed. **Results** The scanning duration of DUS gating b-SSFP cine sequence was 23.0 (19.0, 28.0) min, with one-time scanning success rate of 75.61% (31/41). No significant difference of subjective score of DUS gating b-SSFP image quality was observed between groups ($P>0.05$), while the scores in both groups were significantly higher than those of electrocardiographic gating b-SSFP sequences (both $P<0.001$). Based on the DUS gating b-SSFP cine sequences, cardiovascular abnormalities were detected in 9 fetuses. For the other 32 fetuses, the diameters of ascending aorta, descending aorta and main pulmonary artery during systole and diastole, the diameter of ductus arteriosus during systole, as well as end-diastolic volume (EDV), end-systolic volume (ESV), stroke volume (SV), ejection fraction, cardiac output (CO) and diastolic myocardial mass in late pregnancy group ($n=25$) were all significantly higher than those in pregnant metaphase group ($n=7$) (all $P<0.05$). EDV, ESV, SV, CO and diastolic myocardial mass were all moderately positively correlated with gestational age ($r=0.539-0.660$, all $P<0.05$). **Conclusion** DUS gating fetal cardiac MRI could be used for prenatal evaluation on fetal cardiovascular anatomy and function.

[Keywords] fetus; heart; magnetic resonance imaging; Doppler ultrasound-gating

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.01.004

[基金项目] 三亚市科技创新专项项目(2022KJXC39)、三亚市高校及医疗机构专项科技计划(2021GXYL34)。

[第一作者] 郑志波(1974—),男,黑龙江齐齐哈尔人,本科,主任医师。研究方向:幼儿影像学。E-mail: zzbctx2006@163.com

[通信作者] 钟玉敏,上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心海南医院,海南医科大学附属三亚妇女儿童医院放射科,572022;上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心放射科,200127。E-mail: zyumin2002@163.com

[收稿日期] 2025-08-15 **[修回日期]** 2025-11-18

多普勒超声门控胎儿心脏 MRI 用于产前评估 心血管解剖和功能

郑志波¹, 欧阳荣珍², 庞露云¹, 梁乐娜¹, 辛德来¹, 王槐训¹, 孙诒成¹, 邢梦丽¹, 钟玉敏^{1,2*}

(1. 上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心海南医院, 海南医科大学附属三亚妇女儿童医院放射科, 海南 三亚 572022; 2. 上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心放射科, 上海 200127)

[摘要] **目的** 观察多普勒超声(DUS)门控胎儿心脏 MRI 用于产前评估心血管解剖和功能的价值。**方法** 回顾性分析 41 胎胎儿并将其分为孕中期组($n=16$)与孕晚期组($n=25$);采集非心电图门控序列[包括平衡稳态自由进动(b-SSFP)和单次激发快速自旋回波(SSTSE)]及 DUS 门控 b-SSFP 电影序列图像;比较 DUS 门控与非心电图门控 b-SSFP 序列图像质量主观评分;基于 DUS 门控 b-SSFP 电影序列测量胎儿心脏大血管径及左心室(LV)容积和功能参数并进行组间比较,分析其与孕周的相关性。**结果** DUS 门控 b-SSFP 电影序列图像采集时间 23.0(19.0, 28.0)min,一次扫描成功率为 75.61%(31/41)。组间 DUS 门控 b-SSFP 图像质量主观评分差异无统计学意义($P>0.05$)且均显著高于非心电图门控 b-SSFP(P 均 <0.001)。DUS 门控 b-SSFP 电影序列检出 9 胎心血管系统异常;其余 32 胎中,孕晚期组($n=25$)收缩期和舒张期升主动脉、降主动脉、主肺动脉,收缩期动脉导管直径,以及舒张末期容积(EDV)、收缩末期容积(ESV)、每搏输出量(SV)、射血分数、心输出量(CO)及舒张期心肌质量均显著高于孕中期组($n=7$)(P 均 <0.05),其中的 EDV、ESV、SV、CO 及舒张期心肌质量均与孕周呈中度正相关($r=0.539\sim 0.660$, P 均 <0.05)。**结论** DUS 门控胎儿心脏 MRI 可用于产前评估心血管解剖与功能。

[关键词] 胎儿; 心脏; 磁共振成像; 多普勒超声门控

[中图分类号] R714.51; R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)01-0017-06

先天性心脏病(congenital heart disease, CHD)是我国最常见的出生缺陷之一^[1-2]。胎儿心脏超声为产前评估 CHD 的首选^[3],但易受多种因素影响^[4]。胎儿 MRI 能基于大范围、多参数成像评估胎儿心脏结构、功能和代谢活动^[5-6],但胎儿心率快、胎动频繁可致采集图像困难,且因无法直接使用心电图门控采集图像,导致难以定量评估心脏功能及血流动力学。多普勒超声(Doppler ultrasound, DUS)门控技术可实时追踪胎儿心脏机械运动并将其转化为门控信号以实现采集与胎心运动同步化^[7],进而获取胎儿心脏 MR 电影图像。本研究观察 DUS 门控胎儿心脏 MRI 用于产前评估心血管解剖和功能的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性纳入 2023 年 12 月—2024 年 5 月上海儿童医学中心海南医院 41 胎于心脏超声筛查后 1 周内完善 MR、尤其 DUS 门控心脏 MR 检查的单羊膜囊单胎胎儿,胎龄 $18^{+2}\sim 38^{+4}$ 周、平均 30 周;排除图像质量不佳(主观评分 <3)、短轴切面错层明显者。根据检查时孕周将其分为孕中期组($n=16$)与孕晚期组($n=25$)。本研究经伦理委员会批准(SYFYIRB2022013),孕妇或家属均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用 Philips Ingenia 3.0T MR 仪、16 通道体部线圈及 MRI 兼容 DUS 传感器(smart-sync, Northh Medical),最大特异吸收率 ≤ 2.0 W/kg

体质量。分别以非心电图门控序列[包括平衡稳态自由进动(balanced steady-state free precession, b-SSFP)和单次激发快速自旋回波(single-shot turbo spin-echo, SSTSE)]及 DUS 门控 b-SSFP 电影序列采集心脏轴位、冠状位及矢状位图像;并以 DUS 门控 b-SSFP 电影序列加行左心室(left ventricle, LV)两腔心、四腔心、短轴及三腔心切面扫描。见图 1 及表 1。

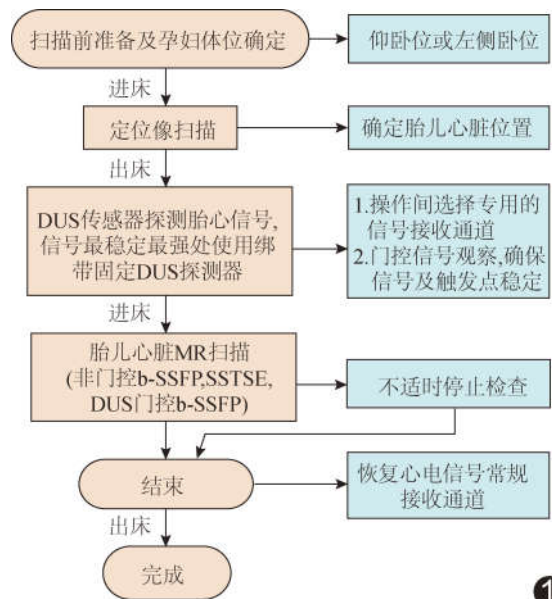


图 1 DUS 门控胎儿心脏 MR 扫描流程图

表 1 胎儿心脏 MR 扫描参数及相关数据

序列	TR(ms)	TE(ms)	FOV(mm)	FA(°)	采集体素 (mm)	重建体素 (mm)	层厚 (mm)
非心电图控 b-SSFP	3.3	1.65	280×260	100	1.4×1.4×4.0~2.0×2.0×4.0	1.20×1.20×4.00	4
非心电图控 SSTSE	2 000.0	32.00	300×160	65	2.0×2.5×4.0~2.0×2.5×6.0	1.04×1.04×4.00~ 1.04×1.04×6.00	4~6
DUS 门控 b-SSFP	3.2	1.60	280×280	60	1.2×1.2×4.0~2.0×2.0×4.0	0.97×0.97×4.00	4

序列	层间距 (mm)	激发频率	R-R 间期重建期相	是否需特殊重建	扫描成功率 (%)	容积及功能分析	大血管直径测量	血流动力学成像
非心电图控 b-SSFP	-2 或 -1 mm (横断面及短轴层面)	2~3	—	否	100	无	单期相	无
非心电图控 SSTSE	0	2~3	—	否	100	无	单期相, 有放大效应	无
DUS 门控 b-SSFP	-2 或 -1 mm (横断面及短轴层面)	2~3	20	否	75.6	有	心动周期内任何期相	有

1.3 评价图像质量 由 2 名具有 5 年以上心血管影像学诊断经验的医师评价非心电图控及 DUS 门控 b-SSFP 图像显示心脏及大血管边界锐利度及伪影程度:1 分,锐利度低或伪影严重;2 分,锐利度较低或伪影较严重;3 分,锐利度中等或中等量伪影;4 分,锐利度较高或少量伪影;5 分,锐利度高或无明显伪影。

1.4 测量胎儿心脏大血管直径 将图像传至 Philips 后处理工作站,于 DUS 门控 b-SSFP 电影序列冠状位测量收缩期和舒张期升主动脉 (ascending aorta, AAO) 及降主动脉 (descending aorta, DAO) 直径,于轴位图像测量收缩期和舒张期主肺动脉 (main pulmonary artery, MPA) 直径及收缩期动脉导管直径 (图 2)。

1.5 LV 容积及功能分析 利用后处理软件 CVI42 (Version 5.8, Circle Cardiac Imaging) 于 DUS 门控

b-SSFP 电影序列短轴平面图像中半自动勾画 LV 自心尖至心底部舒张末期内外膜及收缩末期内膜,获取舒张末期容积 (end-diastolic volume, EDV)、收缩末期容积 (end-systolic volume, ESV)、每搏输出量 (stroke volume, SV)、心输出量 (cardiac output, CO) 及舒张期心肌质量,计算射血分数 (ejection fraction, EF): $EF = (EDV - ESV) / EDV \times 100\%$ 。

1.6 统计学分析 采用 GraphPad Prism (Version 9.5.1) 统计分析软件。以 $\bar{x} \pm s$ 表示正态分布计量资料,行独立样本 *t* 检验;以中位数(上下四分位数)表示偏态分布计量资料,行 Mann-Whitney *U* 检验。以 χ^2 检验或 Fisher 精确概率法比较计数资料。以 Pearson 相关分析观察 LV 容积及心功能参数与孕周的相关性: $|r| \geq 0.8$ 为高度相关, $0.5 \leq |r| < 0.8$ 为中度相关, $0.3 \leq |r| < 0.5$ 为低度相关, $|r| < 0.3$ 为弱相

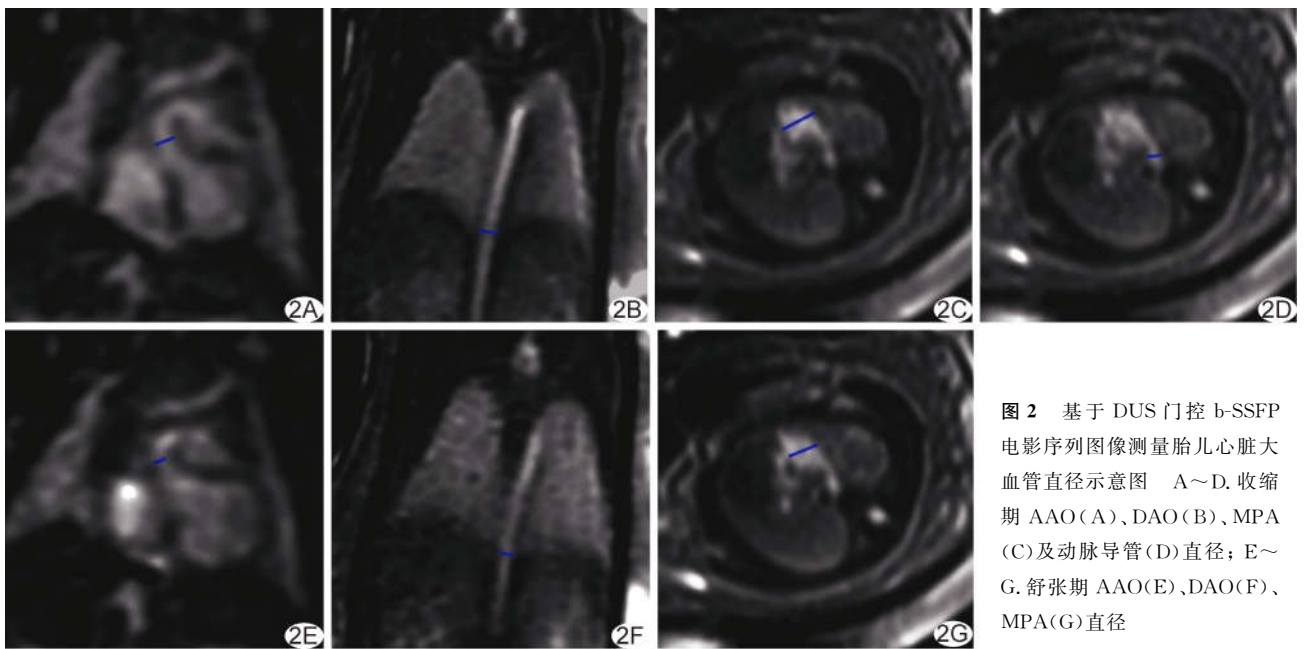


图 2 基于 DUS 门控 b-SSFP 电影序列图像测量胎儿心脏大血管直径示意图 A~D. 收缩期 AAO(A)、DAO(B)、MPA(C) 及动脉导管(D)直径; E~G. 舒张期 AAO(E)、DAO(F)、MPA(G)直径

关。分别以 Kappa 检验和组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC) 评估观察者间主观评分及测量参数结果的一致性, Kappa > 0.800 或 ICC > 0.75 为一致性好。P < 0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

对 41 胎均成功进行 DUS 门控电影序列扫描, 采集时间 23.0(19.0, 28.0)min, 一次扫描成功率为 75.61% (31/41)。孕晚期组 DUS 门控电影序列一次扫描成功率高于 [80.00% (20/25) vs. 68.75% (11/16), $\chi^2 = 3.682, P < 0.05$], 采集时间短于 [21.5(16.0, 27.2)s vs. 26.0(19.2, 32.0)s, Z = -1.484, P < 0.05] 孕中期组。

参照 van Praagh 节段分析法^[8], 9 胎存在心血管系统异常, 包括永存动脉干伴二尖瓣闭锁、三尖瓣闭锁伴室间隔缺损 (ventricular septal defect, VSD)、肺动脉瓣狭窄并右心室 (right ventricular, RV) 流出道心肌肥厚、左心发育不良 (二尖瓣闭锁) 并颈部淋巴管畸形可能、心脏扩大伴心包积液、左心及主动脉发育小、可疑 LV 横纹肌瘤、RV 内横纹肌瘤并双侧脑室旁结节性硬化、VSD 伴其他骨骼畸形。见图 3、4。其余 32 胎未见明显心血管系统异常, 观察者间主观评分结果的一致性 (Kappa = 0.919)。组间 DUS 门控 b-SSFP 图像质量主观评分差异无统计学意义 (3.8 ± 0.4 vs. 3.8 ± 0.4, P > 0.05) 且均显著高于非心电门控 b-SSFP [孕中、晚期组分别为 (2.3 ± 0.4) 及 (2.5 ± 0.5)

分, P 均 < 0.001], 见图 5、6。

观察者间基于 DUS 门控 b-SSFP 电影序列所测参数的一致性均良好 (ICC 为 0.85 ~ 0.99)。孕晚期组心血管系统发育正常胎儿收缩期和舒张期 AAO、DAO、MPA, 收缩期动脉导管直径, EDV、ESV、SV、EF、CO 及舒张期心肌质量均显著高于孕中期组 (P 均 < 0.05, 表 2); EDV、ESV、SV、CO 及舒张期心肌质量均与孕周呈中度正相关 (r = 0.539 ~ 0.660, P 均 < 0.05)。

3 讨论

产前精准评估 CHD 有助于制定临床决策、指导产后护理、降低新生儿死亡率, 具有重大临床意义^[9]。胎儿自身心电信号无法直接作为门控信号, 胎儿心率高、胎动频繁、胎心结构细小及孕妇呼吸均为 3.0T MR

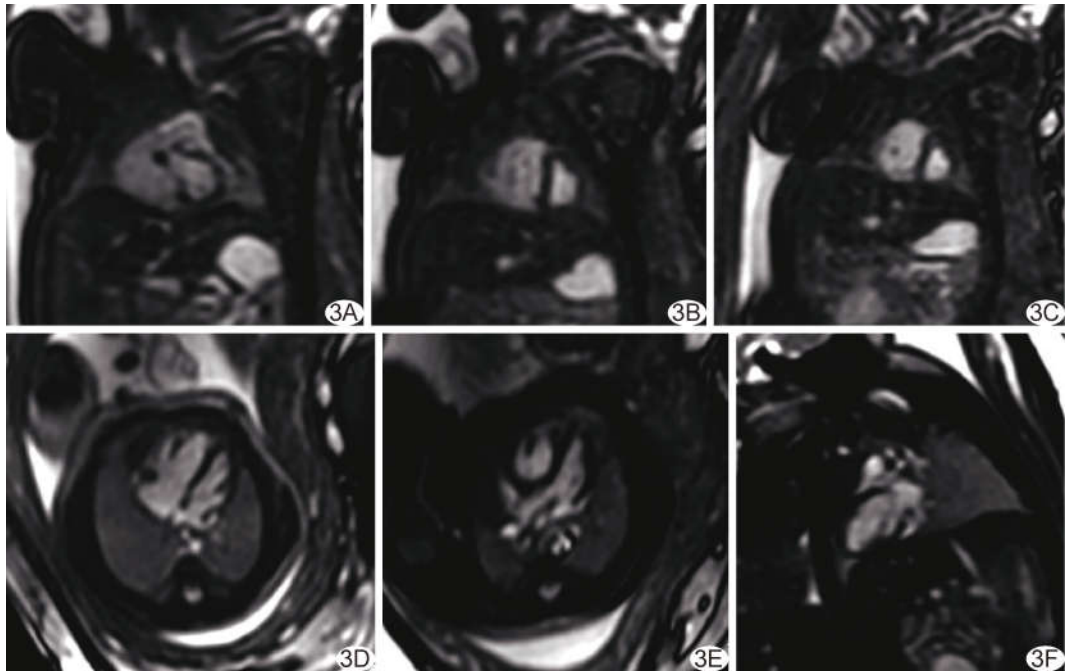


图 3 孕 36 周正常胎儿, DUS 门控胎儿心脏电影序列图像 A~E. 短轴(A~C)、四腔心(D)、三腔心(E)和 LV 两腔心(F)切面图中未见明显心血管异常

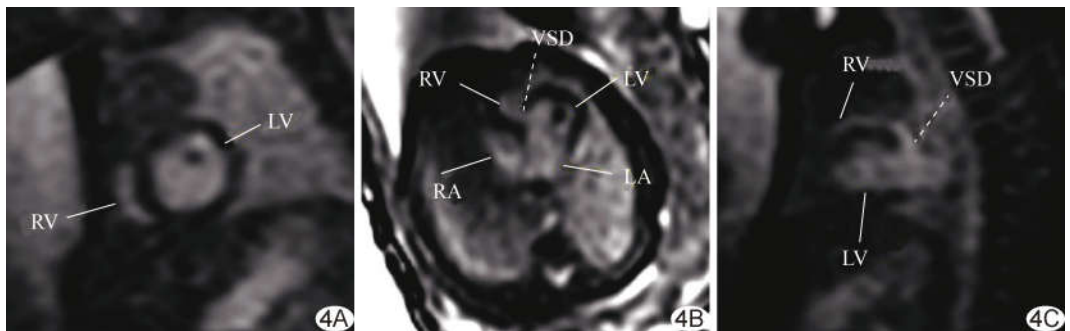


图 4 孕 24 周胎儿, 三尖瓣闭锁伴 VSD, DUS 门控胎儿心脏电影序列图 A~C. 短轴(A)、四腔心(B)、矢状面(C)图示 LV 较大, RV 极小, 三尖瓣闭锁伴 VSD (LA: 左心房; RA: 右心房)

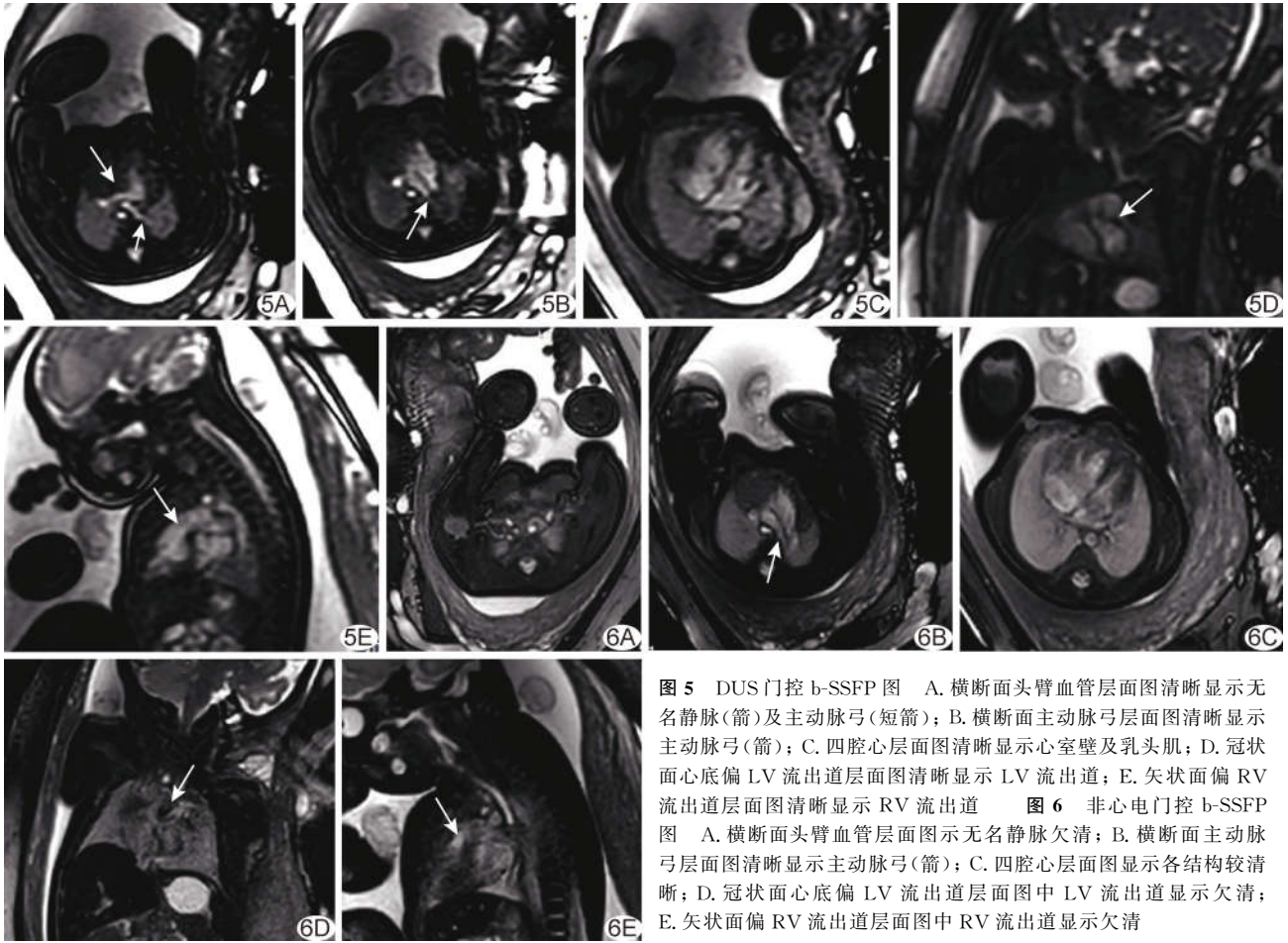


图 5 DUS 门控 b-SSFP 图 A. 横断面头臂血管层面图清晰显示无名静脉(箭)及主动脉弓(短箭); B. 横断面主动脉弓层面图清晰显示主动脉弓(箭); C. 四腔心层面图清晰显示心室壁及乳头肌; D. 冠状面心底偏 LV 流出道层面图清晰显示 LV 流出道; E. 矢状面偏 RV 流出道层面图清晰显示 RV 流出道 图 6 非心电门控 b-SSFP 图 A. 横断面头臂血管层面图显示无名静脉欠清; B. 横断面主动脉弓层面图清晰显示主动脉弓(箭); C. 四腔心层面图显示各结构较清晰; D. 冠状面心底偏 LV 流出道层面图中 LV 流出道显示欠清; E. 矢状面偏 RV 流出道层面图中 RV 流出道显示欠清

表 2 基于 DUS 门控 b-SSFP 电影序列所测 32 胎心血管发育正常胎儿心脏大血管直径、LV 容积及功能参数

组别	心率 (次/分)	舒张期 AAO (mm)	收缩期 AAO (mm)	舒张期 DAO (mm)	收缩期 DAO (mm)	舒张期 MPA (mm)	收缩期 MPA (mm)
孕中期组 (n=7)*	151 (146,153)	2.60 (2.50,2.80)	3.30 (3.12,3.60)	2.85 (2.80,3.10)	3.50 (3.40,3.59)	3.50 (3.20,4.00)	4.50 (4.10,5.40)
孕晚期组 (n=25)*	151 (148,154)	3.30 (2.97,3.55)	3.95 (3.52,4.80)	3.60 (3.35,3.99)	4.55 (3.86,4.78)	5.40 (4.50,6.50)	7.00 (6.40,8.80)
Z 值	-0.177	-2.668	-2.763	-2.811	-2.541	-2.895	-3.618
P 值	0.873	0.006	0.004	0.003	0.010	0.002	<0.001
组别	收缩期动脉导管 (mm)	EDV(ml)	ESV(ml)	SV(ml)	EF(%)	CO (L/min)	舒张期心肌质量 (g)
孕中期组 (n=7)*	2.70 (2.60,3.10)	2.28 (1.50,2.68)	0.81 (0.48,0.97)	1.45 (1.02,1.73)	66.01 (62.23,68.39)	0.22 (0.15,0.26)	1.85 (1.49,2.20)
孕晚期组 (n=25)*	3.30 (2.95,3.70)	3.81 (2.99,4.61)	1.68 (1.06,1.87)	2.28 (1.74,2.75)	60.71 (54.11,64.48)	0.31 (0.25,0.41)	3.36 (2.80,4.17)
Z 值	-2.273	-2.96	-3.105	-1.232	-3.107	0.002	0.001
P 值	0.02	0.002	0.003	<0.001	0.246	<0.001	<0.001

注: *: 除外心血管异常胎儿

胎儿心脏电影成像带来巨大挑战^[10-11]。部分间接门控技术(如度量优化门控等^[12-13])可用于胎儿心脏电影成像,但需采用特殊后处理软件,且操作耗时。DUS 门控技术用于胎儿心脏电影成像的价值已获得肯定^[10]。本研究利用 3.0T MR 设备将 DUS 门控技

术用于孕中、晚期胎儿心脏电影成像,发现 DUS 门控电影图像显示心血管边界锐利度高、运动伪影少且血管易跟踪,显著优于非门控序列。

胎儿超声受孕周及含气肠管、母体体壁厚度等多种因素影响^[14]。随孕周增大,胎儿骨质钙化明显、羊

水变少,可能限制声窗^[6,15]而影响结果。既往研究^[10,16]基于 DUS 门控技术电影序列诊断复杂 CHD 的敏感度为 91.8%、特异度高达 99.9%,认为其可作为产前超声的补充。本研究基于 DUS 门控电影序列图像于 41 胎中准确检出 9 胎心血管异常,且孕中、晚期图像质量无明显差异,即孕周对图像质量的影响有限,提示相比产前超声,孕晚期 DUS 门控心脏 MRI 诊断胎儿 CHD 可能更具优势。

本研究基于 DUS 门控电影序列所测孕中、晚期胎儿心动周期内大血管直径、LV 容积及定量功能参数值与 KORDING 等^[7]相似而小于 MINOCHA 等^[17]的结果,并发现 EDV、ESV、SV、CO 及舒张期心肌质量均与孕周呈中度正相关,提示 DUS 门控电影序列可用于评估孕中、晚期胎儿心腔大血管发育,为临床决策提供客观依据。在具体操作方面,孕妇临检前禁食 2~3 h 可使胎动频率相对较低;扫描过程中如遇胎心监测信号时常中断,建议重新探测胎心信号并定位,将胎心探测器置于胎背部较易获得稳定胎心信号。

综上,DUS 门控胎儿心脏 MRI 可用于产前评估胎儿心血管解剖和功能。但本研究仅为基于单中心、小样本量的初步观察,且心血管异常未获验证。未来将开展多中心、前瞻性、大样本研究并与产后结果进行比较,进一步验证 DUS 门控胎儿心脏 MRI 诊断 CHD 的准确性。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:郑志波研究设计和实施、撰写文章;欧阳荣珍研究实施、数据分析;庞露云、梁乐娜、辛德来、王槐训、孙治成和邢梦丽研究实施;钟玉敏研究设计、修改文章。

[参考文献]

- [1] ZHAO Q M, LIU F, WU L, et al. Prevalence of congenital heart disease at live birth in China[J]. *J Pediatr*, 2019, 204:53-58.
- [2] LIU Y, CHEN S, ZÜHLKE L, et al. Global birth prevalence of congenital heart defects 1970—2017: Updated systematic review and meta-analysis of 260 studies[J]. *Int J Epidemiol*, 2019, 48(2):455-463.
- [3] BEHERA S K, DING V Y, CHUNG S, et al. Impact of fetal echocardiography comprehensiveness on diagnostic accuracy[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2022, 35(7):752-761.
- [4] 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.
- [5] VOLLBRECHT T M, BISSELL M M, KORDING F, et al. Fetal cardiac MRI using doppler US gating: Emerging technology and clinical implications[J]. *Radiol Cardiothorac Imaging*, 2024, 6(2):e230182.
- [6] AGUET J, SEED M, MARINI D. Fetal cardiovascular magnetic resonance imaging[J]. *Pediatr Radiol*, 2020, 50(13):1881-1894.
- [7] KORDING F, YAMAMURA J, de SOUSA M T, et al. Dynamic fetal cardiovascular magnetic resonance imaging using Doppler ultrasound gating [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1):17.
- [8] SCHALLERT E K, DANTON G H, KARDON R, et al. Describing congenital heart disease by using three-part segmental notation[J]. *Radiographics*, 2013, 33(2):E33-E46.
- [9] BONNET D. Impacts of prenatal diagnosis of congenital heart diseases on outcomes [J]. *Transl Pediatr*, 2021, 10(8): 2241-2249.
- [10] VOLLBRECHT T M, HART C, ZHANG S, et al. Fetal cardiac cine MRI with Doppler US gating in complex congenital heart disease [J]. *Radiol Cardiothorac Imaging*, 2023, 5(1):e220129.
- [11] ROY C W, van AMEROM J F P, MARINI D, et al. Fetal cardiac MRI: A review of technical advancements[J]. *Top Magn Reson Imaging*, 2019, 28(5):235-244.
- [12] JANSZ M S, SEED M, van AMEROM J F, et al. Metric optimized gating for fetal cardiac MRI[J]. *Magn Reson Med*, 2010, 64(5):1304-1314.
- [13] YAMAMURA J, FRISCH M, ECKER H, et al. Self-gating MR imaging of the fetal heart: Comparison with real cardiac triggering[J]. *Eur Radiol*, 2011, 21(1):142-149.
- [14] DONOFRIO M T, MOON-GRADY A J, HORNBERGER L K, et al. Diagnosis and treatment of fetal cardiac disease: A scientific statement from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2014, 129(21):2183-2242.
- [15] WIELANDNER A, MLCZOCH E, PRAYER D, et al. Potential of magnetic resonance for imaging the fetal heart[J]. *Semin Fetal Neonatal Med*, 2013, 18(5):286-297.
- [16] TRENTO L U, PRUETZ J D, CHANG R K, et al. Prenatal diagnosis of congenital heart disease: Impact of mode of delivery on neonatal outcome [J]. *Prenat Diagn*, 2012, 32(13): 1250-1255.
- [17] MINOCHA P K, ENGLUND E K, FRIESEN R M, et al. Reference values for fetal cardiac dimensions, volumes, ventricular function and left ventricular longitudinal strain using Doppler ultrasound gated cardiac magnetic resonance imaging in healthy third trimester fetuses [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024, 60(1):365-374.