

· 临床研究 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.17.015

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240708.1802.012\(2024-07-11\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240708.1802.012(2024-07-11))

胎儿窘迫预测指标的价值评估及预测模型的建立与验证*

马妍¹, 杨凯², 徐鹏³, 王珊珊¹, 马一虎¹, 赵小雪⁴, 张俊茹¹, 李军³, 马向东^{1△}

(1. 空军军医大学第一附属医院妇产科, 西安 710032; 2. 空军军医大学第一附属医院肝胆外科, 西安 710032;

3. 空军军医大学第一附属医院超声科/陕西省胎儿先天性心脏病超声诊断中心, 西安 710032;

4. 延安市人民医院临床药学科, 陕西延安 716000)

[摘要] **目的** 使用彩色多普勒超声测量血流动力学指标并建立炎症胎儿窘迫的诊断预测模型。**方法** 收集 213 例空军军医大学第一附属医院产科收治的孕妇作为研究对象, 按照是否发生胎儿窘迫分为对照组和病例组, 其中对照组 93 例, 病例组 120 例。分析大脑中动脉、脐动脉及子宫动脉的搏动指数(PI)、血流阻力指数(RI)、动脉收缩末期峰值/舒张末期峰值(S/D)对胎儿窘迫的预测价值, 通过 logistic 回归分析构建诊断模型, 采用受试者工作特征曲线、校准曲线及临床决策曲线分析评估模型对不良围生结局的诊断效能及患者的临床获益。**结果** 单因素分析结果显示, 病例组 MCA-PI、MCA-Ri、MCA-S/D 及脑胎盘率(CPR)均低于对照组, 而 UA-Ri、UA-S/D、UtA-Ri 高于对照组。多因素回归分析表明, MCA-PI、MCA-Ri 及 CPR 是预测胎儿窘迫的独立保护因素, 而 UA-Ri 和 UA-S/D 作为独立危险因素影响胎儿结局。基于 5 个独立影响因素构建风险预测模型, 受试者工作特征曲线下面积为 0.880(95%CI: 0.834~0.925), 模型的灵敏度为 0.93, 特异度为 0.70, 准确度为 0.83, 拟合度较好。**结论** 彩色多普勒超声测量血流动力学指标对诊断胎儿窘迫有较好的预测价值, 联合指标所建立的风险预测模型对发生胎儿窘迫孕妇提前干预有一定的参考价值。

[关键词] 胎儿窘迫; 超声检查, 多普勒, 彩色; 大脑中动脉; 脐动脉; 风险预测模型

[中图分类号] R714.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)17-2637-06

Value evaluation of fetal distress prediction indexes and establishment and verification of prediction model*

MA Yan¹, YANG Kai², XU Peng³, WANG Shanshan¹, MA Yihu¹,
ZHAO Xiaoxue⁴, ZHANG Junru¹, LI Jun³, MA Xiangdong^{1△}

(1. Department of Obstetrics and Gynecology, First Affiliated Hospital of Air Force Military Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032, China; 2. Department of Hepatobiliary Surgery, First

Affiliated Hospital of Air Force Military Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032, China;

3. Department of Ultrasound, First Affiliated Hospital of Air Force Military Medical University/
Shaanxi Province Centre for the Ultrasound Diagnosis of Fetal Congenital Heart Diseases,

Xi'an, Shaanxi 710032, China; 4. Department of Clinical Pharmacy, Yan'an Municipal
People's Hospital, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

[Abstract] **Objective** To use color Doppler ultrasound to measure the hemodynamic indexes, and to establish the diagnostic prediction model of inflammatory fetal distress. **Methods** A total of 213 pregnant women admitted to the obstetrics department of the First Affiliated Hospital of Air Force Military Medical University were collected as the research subjects and divided into the control group and case group according to whether or not fetal distress occurred, including 93 cases in the control group and 120 cases in the case group. The predictive value of PI, RI, S/D values of middle cerebral artery, umbilical artery and uterine artery for predicting fetal distress was analyzed. The diagnostic model was constructed by logistic regression analysis. The receiver operating characteristic (ROC) curve, calibration curve and clinical decision curve were adopted to analyze and evaluate the diagnostic efficiency of the model for adverse perinatal outcome and the clinical benefit of the patients. **Results** The univariate analysis results showed that MCA-PI, MCA-Ri, MCA, S/D and CPR in the case group were lower than those in the control group, while UA-Ri, UA, S/D and UtA-Ri were higher than those in the control group. The multivariate regression analysis further showed that MCA-PI, MCA-Ri

and CPR were the independent protective factors for predicting fetal distress, while UA-RI and UA-S/D served as the independent risk factors affecting the fetal outcome. Based on five independent influencing factors, the risk prediction model was constructed, and the area under the receiver operating characteristic curve was 0.880 (95% CI: 0.834–0.925). The sensitivity, specificity and accuracy were 0.93, 0.70 and 0.83 respectively, and the goodness of fit was good. **Conclusion** The hemodynamic indexes measured by color Doppler ultrasound have good predictive value for the diagnosis of fetal distress. The risk prediction model established by the combined indexes has a certain reference value for the intervention in advance of pregnant women with fetal distress occurrence.

[Key words] fetal distress; ultrasonography, doppler, color; middle cerebral artery; umbilical arteries; risk prediction model

胎儿窘迫是指由于各种因素引起的胎儿宫内急性或慢性缺氧,是造成不良妊娠结局的重要原因^[1-2],20%的新生儿死亡与胎儿窘迫相关^[3]。如何早期对宫内环境进行判断,及时发现胎儿窘迫并加以干预成为产科医生不断探索的难题。彩色多普勒超声作为一种无创手段,在产科领域的应用逐渐精准。应用彩色多普勒超声对孕子宫动脉(uterine artery, UtA)、胎儿大脑中动脉(middle cerebral artery, MCA)及脐动脉(umbilical artery, UA)进行无创监测,可对胎儿窘迫做到早筛查、早诊断,改善不良妊娠结局。本研究选取空军军医大学第一附属医院产科收治的 213 例孕妇作为研究对象,采用彩色多普勒超声评估血流动力学指标对胎儿窘迫的诊断价值,建立风险预测模型,并加以验证分析。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集 213 例空军军医大学第一附属医院妇产科收治的孕妇作为研究对象,年龄 24~35 岁,孕周 28⁺~41⁺ 周,均为宫内孕单胎。本研究为病例对照研究,研究对象按照是否发生胎儿窘迫分为病例组和对照组。胎儿窘迫诊断标准参考《妇产科学》^[4]。胎动减少或消失:胎动计数<10 次/2 h 或减少 50%;产前电子胎心监护异常:胎心率基线无变异且存在复发性晚期减速或复发性变异减速、胎心率基线<110 次/min;胎儿生物物理评分低:≤4 分提示胎儿缺氧,5~6 分为可疑缺氧;羊水胎粪污染:I 度羊水呈浅绿色,II 度羊水为绿色且浑浊,III 度羊水为稠厚、棕黄色。对照组纳入标准:妊娠时间为 28⁺~41⁺ 周;单胎妊娠;无慢性病史;胎儿大小符合孕周;既往体健;未发生胎儿窘迫。病例组纳入标准:妊娠时间为 28⁺~41⁺ 周;单胎妊娠;符合胎儿窘迫诊断标准。排除标准:多胎妊娠者;胎儿畸形者;具有遗传性疾病的孕妇,彩色多普勒超声检查图像显示不佳的孕妇,入组流程见图 1。

1.2 方法

1.2.1 彩色多普勒超声检查

采用 GE Voluson E10 型彩色多普勒超声诊断系统,探头频率为 3.5~5.0 MHz。测量资深医师执行,

在孕妇及胎儿状态良好的情况下,选择同一标准平面进行测量^[5]。MCA:孕妇取平卧位,采用超声探头定位,选定标准双顶径平面,使之充分暴露,获取胎儿横切面清晰画面,沿蝶骨小翼探查颅底,后沿颅底向下至前、中颅窝之间直至蝶骨大翼,则可观察到作为颈内动脉直接延续的 MCA。研究表明于 MCA 水平段(M1)节段近中 1/3 处血流信号良好区域测量频谱更为可靠^[6],取样线与血管的夹角<30°,应尽量接近 0°,取连续 5 个以上清晰且完整的频谱作为参考数据。UA:孕妇取平卧位,根据超声图像定位胎盘和脐带,于脐带距离胎盘 2 cm 处血流信号良好区域测量频谱,若有脐绕颈,则选择绕颈部位作为采样部位,获取连续 5 条以上清晰完整的频谱作为参考依据。UtA:孕妇取平卧位,于髂内动脉远端定位双侧 UtA 主干,在血流信号良好区域进行采样,获取清晰完整的频谱。

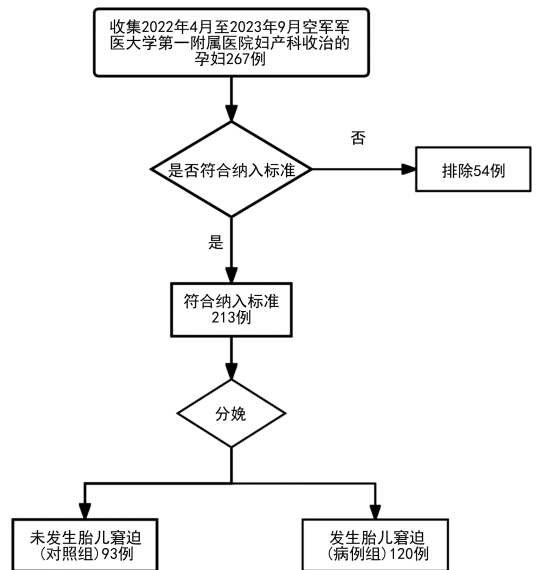


图 1 患者入组流程

1.2.2 胎儿生物学信息采集

包括双顶径、头围、腹围、股骨长度,胎儿生物学测量指标均在标准切面上测量至少 2 次,取平均值进行统计学分析。

1.2.3 测量指标

测量 MCA、UA 及 UtA 的血流阻力指数(blood flow resistance index, RI)、搏动指数(pulsatility in-

dex,PI)以及动脉收缩末期峰值/舒张末期峰值(systoiiemaximum veiocity/ diastoiicminimum veiocity, S/D)。

1.2.4 样本量估算及结果

根据以下公式估算样本量：

$$n = \pi_0(1 - \pi_0) \left(\frac{\mu_\alpha + \mu_\beta}{\delta} \right)^2 \quad \text{①}$$

传统胎心监测预测胎儿窘迫的有效率为 0.78^[7]，现采用彩色多普勒超声检测血流动力学指标联合评估以预测胎儿窘迫，估计有效率为 0.88，选定 $\alpha = 0.05, \beta = 0.1, \delta = \pi_1 - \pi_0 = 0.1$ ，代入公式得到 $n = 0.78 \times (1 - 0.78) \left(\frac{1.96 + 1.282}{0.1} \right)^2 = 180$ ，即应该至少观察 180 例，本研究共收集 213 例，符合最低样本量要求。

1.3 统计学处理

各数据经 R4.2.1 软件进行清洗处理，正态分布计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 描述，组间差异比较采用两独立样本 t 检验；非正态分布计量资料采用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示，组间差异比较采用 Mann-Whitney U 检验；计数资料以例数或百分比表示，组间差异比较采用 χ^2 检验。校准度评价使用方法是 Hosmer-Lemeshow Goodness of Fit 拟合优度检验。采用多因素 logistic 回归分析影响围生结局的血流指标，建立预测模型。采用受试者工作特性曲线、校准曲线及临床决策曲线分析脐动脉、大脑中动脉、脐动脉及 CPR 对不良围生结局的预测价值。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组一般资料比较

对照组 ($n = 93$) 与病例组 ($n = 120$) 的年龄、检测孕周、双顶径(BPD)、腹围(AC)、股骨长(FL)及胎儿出生体重差异无统计学意义 ($P > 0.05$)，见表 1。

表 1 两组一般资料比较 ($\bar{x} \pm s$)

项目	对照组($n=93$)	病例组($n=120$)	t	P
年龄(岁)	28.484±2.348	29.092±2.359	-1.869	0.063
孕周(周)	27.886±5.802	28.691±5.067	-1.061	0.290
BPD(cm)	6.707±1.412	6.624±1.229	0.458	0.647
AC(cm)	22.184±6.021	21.830±4.613	0.475	0.636
FL(cm)	4.996±1.234	4.829±1.066	1.038	0.301
出生体重(g)	3 303.9±388.9	3 208.2±470.4	1.586	0.114

2.2 两组血流动力学指标比较

由于数据不满足正态分布，因此采用 Mann-Whitney U 检验。对照组 MCA 各指标均高于病例组，UA-RI、UA-S/D 低于病例组，差异均具有统计学意义 ($P < 0.05$)；对照组 UtA-RI 水平高于病例组，CPR 水平高于病例组，差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。其余指标差异无统计学意义 ($P > 0.05$)，见

表 2。

2.3 建立血流动力学指标对胎儿窘迫的风险预测模型

将单因素分析中 $P < 0.05$ 的因素纳入多因素回归分析，结果显示 MCA-PI、MCA-RI 及 CPR 是预测胎儿窘迫的独立保护因素，而 UA-RI 和 UA-S/D 则为独立危险因素，见表 3。

表 2 两组患者血流动力学指标比较 [$M(Q_1, Q_3)$]

项目	对照组($n=93$)	病例组($n=120$)	P
MCA-PI	1.72(1.48,1.88)	1.36(1.10,1.55)	<0.001
MCA-RI	0.75(0.66,0.82)	0.63(0.53,0.67)	<0.001
MCA-S/D	4.82(3.60,5.70)	3.44(2.90,4.13)	<0.001
UA-PI	1.18(0.99,1.46)	1.34(1.06,1.63)	0.063
UA-RI	0.72(0.61,0.79)	0.78(0.71,0.82)	<0.001
UA-S/D	3.00(2.57,4.42)	4.50(3.39,5.80)	<0.001
UtA-PI	0.80(0.61,1.39)	0.92(0.70,1.68)	0.068
UtA-RI	0.51(0.43,0.68)	0.55(0.47,0.74)	0.045
UtA-S/D	2.00(1.76,3.15)	2.24(1.88,3.54)	0.060
CPR	1.43(1.07,1.95)	0.97(0.80,1.11)	<0.001

表 3 血流动力学指标异常预测胎儿窘迫的多因素 logistic 回归分析

变量	n	β	OR	95%CI	P
MCA-PI	213	-3.942 9	0.419	0.303~0.614	<0.001
MCA-RI	213	-7.940 8	0.200	0.010~0.314	<0.001
MCA-S/D	213	-0.400 7	0.670	0.440~1.019	0.061
UA-RI	213	4.202 3	3.354	1.012~4.176	0.049
UA-S/D	213	1.037 2	2.551	1.597~4.075	<0.001
UtA-RI	213	0.838 5	2.313	0.212~5.284	0.492
CPR	213	-7.748 3	0.791	0.300~1.686	0.002

2.4 预测模型的验证

2.4.1 预测模型的评价

在对本预测模型的似然比检验中， $P < 0.001$ ，表示本模型整体具有意义；模型的区分度能力采用 C 指数来评价，本模型 C 指数 0.93 (> 0.9)，因此可认为本模型具有高度准确性；使用 Hosmer-Lemeshow Goodness of Fit 拟合优度检验校准度， $P > 0.05$ ，表明预测值与观测值没有显著差异，本模型拟合度较好，见表 4。

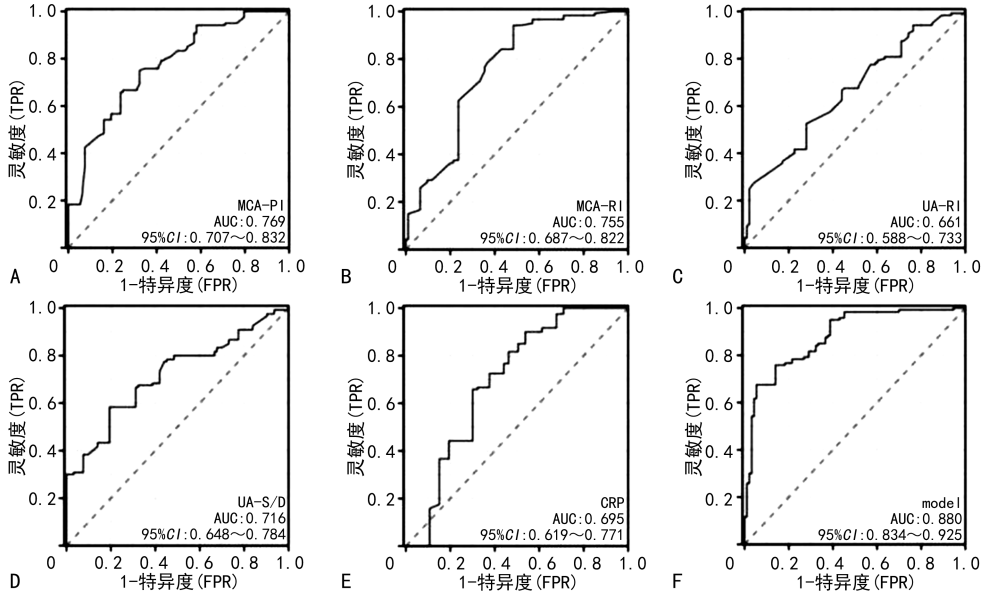
表 4 预测模型评价

评价方向	评价方法	统计量	P
模型检验	似然比检验	149.91	<0.001
区分度评价	C 指数	0.93	<0.001
校准度评价	拟合优度检验	11.18	0.192

2.4.2 预测模型的诊断效能

使用 ROC 曲线测试本风险预测模型的诊断效能,以胎儿窘迫为结局指标, MCA-PI、MCA-RI、UA-RI、UA-S/D 及 CPR 为变量,得到本预测模型的曲线下面积为 0.880(0.834~0.925),见图 2。对于独立

因素而言, MCA-RI 诊断灵敏度最高, UA-S/D 诊断特异度最高,相比于单个指标,联合指标的预测效能显著提高,且联合指标灵敏度为 0.93,特异度为 0.70,准确度为 0.83,高于各单独指标,见表 5。



A: MCA-PI; B: MCA-RI; C: UA-RI; D: UA-S/D; E: CPR; F: model。

图 2 单个指标及联合指标预测模型的诊断效能

表 5 各指标及预测模型的诊断评价

变量	灵敏度	特异度	准确度
MCA-PI	0.75	0.68	0.72
MCA-RI	0.94	0.52	0.76
UA-RI	0.53	0.72	0.61
UA-S/D	0.58	0.81	0.68
CPR	0.90	0.46	0.71
预测模型	0.93	0.70	0.83

2.4.3 诊断 Calibration 校准曲线验证

使用 Calibration 校准曲线验证本预测模型,发现预测曲线与校准曲线相近,且接近于理想曲线,说明本模型的拟合效果较好,见图 3。

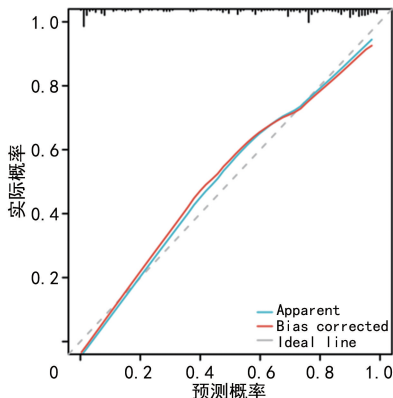


图 3 诊断 Calibration 校准曲线

2.4.4 临床决策曲线分析

决策曲线(decision curve analysis, DCA)是指描述随着风险概率阈值变化,按照模型预测值进行干预的情况下净收益率值的变化情况。对于本模型而言,即意味着预测模型对患者受益率最大,其预测价值优于独立因素,见图 4。

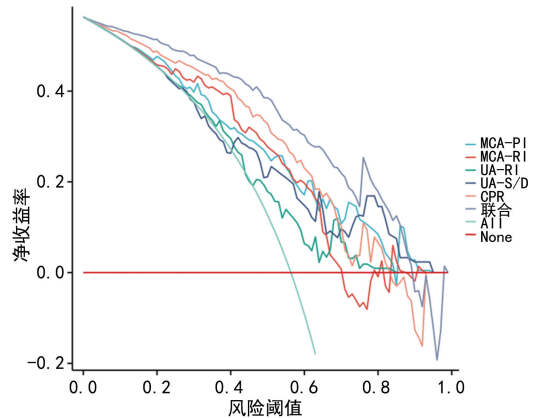


图 4 临床决策曲线分析

3 讨论

本研究建立了胎儿窘迫的风险预测模型,在单因素分析中,病例组的 MCA-PI、MCA-RI 及 MCA-S/D 均低于对照组,而 UA-RI、UA-S/D 高于对照组,且差异具有统计学意义,与之前的研究一致^[8-10]。同时,本研究提示 MCA-RI 诊断灵敏度最高,与赵永峰等^[11]的研究结果一致。大脑中动脉作为颈内动脉的分支,满足胎儿脑部氧需求量的 80%^[12]。研究表明,当出现胎儿宫内窘迫征象时,胎儿脑部血流首先受到保

护,即“脑保护效应”。大脑中动脉管径代偿性增粗,血管阻力降低,血流量增加,以满足脑部供氧^[13]。同时,外周血管(如脐动脉、肾动脉、子宫动脉等)收缩,阻力增加,即发生“血管再分配现象”,受脑部化学感受器和压力感受器自主调节介导^[14]。上述研究表明,在发生胎儿窘迫时,机体将迅速启动代偿模式,大脑前动脉、大脑中动脉及大脑后动脉均作出反应,之所以选择大脑中动脉,是由于其血流量大且较易获得良好的血流频谱。然而,仅仅利用大脑中动脉频谱判断胎儿宫内窘迫从而选择干预手段是不严谨的,因为重度缺氧会引起颅内压升高及脑水肿,持续存在的脑水肿将导致大脑皮质缺血,自主调节功能丧失,大脑中动脉阻力在下降至最低点后反升,不断升高,最终导致舒张末期血流消失,血流频谱的持续逆转往往预示着胎儿的不良结局^[15]。此外,由于大脑中动脉本身的敏感性,超声医生在检查过程中,手动施加的压力也会增加大脑中动脉的血管阻力^[16],因此,单独依靠大脑中动脉血流动力学监测是不理想的。脐动脉是目前临床应用中最为测量的超声指标。由于脐动脉是联系母胎的关键枢纽,是控制胎儿营养与氧气的命脉,因此脐动脉的血流动力学改变往往能反映胎盘血供及胎儿生理变化^[17]。妊娠早期脐动脉并不会出现舒张期血流,随着妊娠的进展,为了满足胎儿发育需要,胎盘血管逐渐扩张,血流阻力不断降低,脐动脉血流量增加。研究表明,当一半以上的胎盘血管树发生损害时,脐动脉血流阻力指数开始升高,血流量降低^[18]。本研究探讨了两组孕妇的 UA 血流动力学改变,结果显示,病例组的 UA,其 PI、RI 及 S/D 均高于对照组。当脐带功能出现异常或胎盘循环障碍时,S/D 数值随之增高,提示胎盘有效血液灌注不足,胎儿面临缺氧危机,因此,UA-S/D 值的异常可较好反映胎儿在宫内的循环状态。需要提出的是,当宫内缺氧环境一直无法得到纠正时,胎儿循环状况会进一步恶化,以致出现 UA 舒张末期血流消失或反向(absent or reversed end-diastolic flow, AREDF)^[19]。UA-AREDF 与不良围生结局的发生及胎儿宫内死亡风险增加有关^[20],其中血流频谱消失时间越长,意味着胎盘循环越差,提示不良围产结局的风险越高^[21]。

在正常妊娠周期中,较高的子宫动脉血流量可保护胎儿生长,生理状态下,妊娠子宫的血液供应主要来自卵巢、子宫固有韧带的子宫动、静脉。在妊娠早期,胎儿滋养层细胞侵入子宫内层三分之一,随即发生蜕膜改变,这将导致细胞外基质破坏及血管内皮转变为纤维组织,加速了高排低阻血管床的形成^[22-23]。当发生胎儿窘迫时,降低的子宫动脉血流量可触发“脑保护效应”^[18]。在本研究中,病例组子宫动脉血流量低于对照组,表现为 UtA-RI 高于对照组,与以往研究结果一致^[22-24]。

目前越来越多的研究认为,脑胎盘率对于评估胎

儿宫内窘迫及不良妊娠结局的评估更为有力。本研究表明,病例组的 CPR 平均为 0.97,而对照组则为 1.43,与张海燕等^[25]的研究相符,其研究指出,CPR 正常值通常大于 1,当 CPR<1 时,表明宫内环境发生变化,是胎儿面对不良宫内环境及亚临床胎盘功能不良的一种适应性变化,需要尽早剖宫产终止妊娠,以便胎儿脱离不良环境。因此,CPR 在一定程度上可以作为不良妊娠结局的预测指标。

在多因素 logistic 回归分析中,纳入 MCA-PI、MCA-RI、MCA-S/D、UA-RI、UA-S/D、UtA-RI 及 CPR,最终得出 MCA-PI、MCA-RI 及 CPR 是预测胎儿窘迫的独立保护因素,而 UA-RI 和 UA-S/D 为独立危险因素。采用受试者工作特征曲线评价此预测模型的诊断效能,其曲线下面积为 0.880(0.834~0.925),显著高于各独立因素,且模型的灵敏度为 0.93,特异度为 0.70,准确度为 0.83,拟合优度较好。通过 Calibration 校准曲线验证,本模型预测曲线与校准曲线相近,且均靠近理想曲线,表明预测概率与实际概率差异较小,具有良好的拟合情况。同时,诊断 DCA 曲线也说明了该模型有更好的临床获益。

需要指出的是,本研究仍然存在不足。首先母体因素、胎儿状况均会影响 MCA、UA 及 UtA 的测量,尽管每个指标会进行多次测量,仍无法避免误差存在;其次本研究为单中心研究,缺乏外部验证,需扩大样本进行下一步研究;此外,本课题组将在未来的模型中进一步纳入胎心监护结果,并对新生儿进行随访,以便优化模型。

综上所述,MCA-PI、MCA-RI 及 CPR 是预测胎儿窘迫的独立保护因素,而 UA-RI 和 UA-S/D 为独立危险因素。基于此所建立的预测模型,其曲线下面积显著高于各独立因素,拟合优度较好,说明其对胎儿窘迫的预测与实际偏差较小,患者临床获益较大,具有较好的指导临床价值。

参考文献

- [1] 马妍,乔谷媛,王珊珊,等. 大脑中动脉、脐动脉、子宫动脉及脑胎盘率在胎儿宫内窘迫风险评估中的应用进展[J]. 空军军医大学学报,2023,44(3):275-279.
- [2] 潘怡霞,王健,王保旭,等. 胎儿窘迫不同分娩方式围生期相关影响因素及结局的研究[J]. 重庆医学,2022,51(10):1714-1718.
- [3] DALL'ASTA A,KUMAR S. Prelabor and intrapartum Doppler ultrasound to predict fetal compromise[J]. Am J Obstet Gynecol MFM, 2021,3(Suppl. 6):100479.
- [4] 谢幸,孔北华,林仲秋,等. 妇产科学[M]. 9 版. 北京:人民卫生出版社,2018:487.

- [5] 余转,王菁哲,魏静,等. 彩色多普勒超声检测妊娠中期胎儿大脑中动脉 M1 段不同节段血流动力学指标的临床分析[J]. 中国全科医学, 2015, 18(33):4144-4147.
- [6] 刘爽. 彩色多普勒超声检测妊娠中期胎儿大脑中动脉 M1 段不同节段血流动力学指标的临床研究[J]. 影像研究与医学应用, 2018, 2(12):42-43.
- [7] 黄嘉敏,张琼丽,梁佩坤. 胎心监测联合脐动脉血流 S/D 值诊断胎儿窘迫的价值[J]. 临床医学, 2020, 40(12):41-42.
- [8] 顾向梅,张悦,丁豆豆. 超声检测胎儿脐动脉、肾动脉、大脑中动脉血流参数对宫内窘迫的诊断价值[J]. 临床医学研究与实践, 2023, 8(08):78-81.
- [9] LIU Q, LI B. The diagnostic value of ultrasound detection of the fetal middle cerebral artery, umbilical artery blood flow and fetal movement reduction in fetal distress[J]. *Am J Transl Res*, 2021, 13(4):3529-3535.
- [10] 陈晓萍,丁兰,谢丹丽,等. 超声检测 UA、MCA、UtA 联合评估在诊断胎儿宫内窘迫中的价值[J]. 医学影像学杂志, 2023, 33(8):1518-1521.
- [11] 赵永峰,甘国财,王雪,等. 高原地区高危产妇胎儿宫内窘迫超声诊断的价值分析[J]. 天津医药, 2023, 51(12):1374-1378.
- [12] CIOBANU A, WRIGHT A, SYNGELAKI A, et al. Fetal medicine foundation reference ranges for umbilical artery and middle cerebral artery pulsatility index and cerebroplacental ratio [J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2019, 53(4):465-472.
- [13] KUTUK M S, DOLANBAY M, GOKMEN K A, et al. Relationship between fetal peak systolic velocity in middle cerebral artery and umbilical blood gas values and hemoglobin levels in diabetic pregnant women[J]. *J Clin Ultrasound*, 2018, 46(6):391-396.
- [14] MASINI G, TAY J, MCNIERY C M, et al. Maternal cardiovascular dysfunction is associated with hypoxic cerebral and umbilical doppler changes[J]. *J Clin Med*, 2020, 9(9):2891.
- [15] HIRSHBERG A, LEVINE L D, SCHWARTZ N, et al. Reversed end-diastolic flow in the middle cerebral artery preceding death in a normally grown fetus[J]. *Obstet Gynecol*, 2013, 122(2 Pt 2):507-509.
- [16] MĂLUTAN A M, CLINCIU D, MIRESCU S C, et al. Ultrasound probe pressure on the maternal abdominal wall and the effect on fetal middle cerebral artery doppler indices[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2019, 55(8):410.
- [17] YIN Q, ZHANG Y, MA Q, et al. The clinical value of blood flow parameters of the umbilical artery and middle cerebral artery for assessing fetal distress[J]. *Am J Transl Res*, 2021, 13(5):5280-5286.
- [18] ALFIREVIC Z, STAMPALIJA T, DOWSWELL T. Fetal and umbilical Doppler ultrasound in high-risk pregnancies [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 6(6):D7529.
- [19] 郭文静,李天刚,王颜墨,等. 胎儿脐动脉异常频谱定量分析对非足月胎儿围生期死亡的预测价值[J]. 实用妇产科杂志, 2023, 39(9):714-717.
- [20] MONTENEGRO N, SANTOS F, TAVARES E, et al. Outcome of 88 pregnancies with absent or reversed end-diastolic blood flow (ARED flow) in the umbilical arteries[J]. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*, 1998, 79(1):43-46.
- [21] KINOSHITA M, THURING A, MORSING E, et al. Extent of absent end-diastolic flow in umbilical artery and outcome of pregnancy[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2021, 58(3):369-376.
- [22] 曾丽萍,谭琴,何苑苑. 子宫动脉多普勒超声血流参数评估孕晚期子痫前期产妇病情严重程度的价值[J]. 中国妇幼保健, 2018, 33(11):2587-2590.
- [23] BROWNE V A, JULIAN C G, TOLEDO-JALDIN L, et al. Uterine artery blood flow, fetal hypoxia and fetal growth[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2015, 370(1663):20140068.
- [24] 张佐炳,张晓东,林锦蓉. 彩色多普勒超声检测子宫动脉及脐动脉在预测晚发型胎儿宫内生长受限中的价值[J]. 临床超声医学杂志, 2018, 20(8):554-557.
- [25] 张海燕,俞兆儿,王一泉,等. 胎儿脐动脉舒张末期血流缺失及脑-胎盘率降低与妊娠结局及存活儿早期预后[J/CD]. 中华妇幼临床医学杂志(电子版), 2020, 16(6):665-671.