·诊治分析·

基于脑血氧饱和度监测的胎儿窘迫预测模型构建

叶瑞勉，宣荣荣，丁慧青

【摘要】目的　构建基于脑血氧饱和度监测的胎儿窘迫（FD）预测模型。**方法**　本研究为前瞻性随机对照研究。选择 2022 年 12 月至 2023 年 12 月在宁波大学附属第一医院住院分娩孕妇 206 例，按照 8∶2 的比例随机分为训练组（n=164）和验证组（n=42）。采用单因素分析、LASSO 回归分析筛选特征变量，进一步运用多因素 Logistic 回归分析建模并绘制列线图。采用 Bootstrap 内部验证模型的校准度，并在验证组中进行外部验证。**结果**　单因素分析结果显示孕次、产次、是否经产妇、妊娠周数、血胆汁酸水平、D-二聚体、脐动脉 S/D 值及胎儿脑血氧饱和度与 FD 相关（均 P ＜ 0.05）。多因素 Logistic 回归显示，孕周与胎儿脑血氧饱和度为 FD 的影响因素（均 P ＜ 0.05）。LASSO 回归变量筛选后保留 9 个特征变量，包括孕期体质量增加、孕周、白细胞计数、门冬氨酸氨基转移酶、尿酸、D-二聚体、脑血氧饱和度、脐动脉 S/D 值及脐带绕颈。基于上述变量，分别构建两个预测模型：模型 1 纳入 LASSO 筛选的 9 项指标，模型 2 仅纳入孕周与脑血氧饱和度，绘制相应的列线图。受试者工作特征（ROC）曲线分析显示，两模型的判别效能相近，且在外部验证集中曲线下面积（AUC）差异无统计学意义（P ＞ 0.05）。**结论**　脑血氧饱和度是 FD 的重要预测因素，纳入脑血氧饱和度的 FD 模型具有良好的预测能力。

【关键词】　胎儿窘迫；脑血氧饱和度；临床预测模型
DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.06.013
【中图分类号】　R722.12　**【文献标志码】**　A　**【文章编号】**　1671-0800(2026)06-0639-05

胎儿窘迫（fetal distress，FD）是指胎儿在宫腔内因急性或慢性缺氧而导致的一系列危及其健康和生命的综合症状[1]。近年来，随着生育政策调整，高龄孕产妇比例上升，妊娠合并症及产前诊断率增加，胎儿窘迫的检出率也呈增长趋势。目前全球报道的FD发生率为 2.7%～ 38.5%[2-3]。FD 不仅可能对胎儿的生长发育造成影响，还会给家庭带来经济负担和精神压力，甚至对社会产生一定的负面影响。因此，如何在早期准确识别并妥善处理FD，同时避免过度诊断，是我们当前亟需解决的重要问题。

近红外光谱测定技术（near infrared spectroscopy，NIRS）是一种基于光的无创、实时、连续的光学检测技术，可用于监测组织的氧合状态，并且计算出胎儿的脑血氧饱和度。早在 2000 年，Jacques 等[4]便建立了基于光子传输模型的胎儿血氧测量方法，为及时诊断 FD 及指导剖宫产决策提供了重要依据。NIRS能够有效评估胎儿脑氧合状态，对于识别潜在脑缺氧具有重要价值，尤其适用于高危妊娠、产程监护及新生儿科等领域。目前尚缺乏针对胎儿脑血氧饱和度在预测 FD 方面的系统研究。鉴于此，本研究选取 2022 年 12 月至 2023 年 12 月于宁波大学附属第一医院住院分娩的 206 例孕妇，以临床资料为基础，采用单因素分析、LASSO 回归分析筛选胎儿窘迫的危险因素，构建基于脑血氧饱和度监测的FD预测模型，现报道如下。

1　资料与方法

1.1　一般资料　本研究为前瞻性随机对照研究。选取 2022 年 12 月至 2023 年 12 月宁波大学附属第一医院住院分娩 206 例孕妇的临床资料，按照 8∶2 的比例随机分为训练组（n=164）和验证组（n=42）。纳入标准：（1）自觉胎动正常；（2）36 周≤孕周≤41 周；（3）单胎；（4）临床资料完整。排除标准：（1）未行规范产检；（2）合并严重全身疾病，如严重凝血功能障碍、严重心血管疾病、严重肝脏疾病、血液系统疾病、严重外科疾病等；（3）双胎或多胎妊娠。本研究获得宁波大学医学院附属医院医学伦理委员会批准（XJS20210311），所有受试者均签署书面知情同意书。

1.2　方法　收集纳入孕妇的临床资料。采用脑部与

作者单位：　315010 宁波，宁波大学附属第一医院
通信作者：　丁慧青，Email：fyydinghuiqing@nbu.edu.cn

区域组织氧饱和度检测仪，在孕妇做胎心监护的同时，将脑氧饱和度监测探头涂上导电凝胶并放置在胎头处，监测胎儿脑血氧饱和度，持续监护 10 min。

1.3　相关定义及诊断标准　参照第九版妇产科学[5]达到以下诊断标准中的任意一项可诊断为 FD：（1）胎心异常，胎心＞ 160 次/min 或＜ 110 次/min；（2）胎心监护异常，应激试验无反应，胎心率基线代偿性加快或胎心率＜ 110 次/min，每分钟基线变异少于 5 次或伴重度变异减速、频繁晚期减速和正弦模式；（3）胎动异常，胎动频繁或减弱，胎动次数减少 50%以上甚至消失；（4）羊水异常，羊水 II°以上粪染伴胎心监护异常；（5）胎儿生物物理评分≤4 分。所有胎心监护均由 2 位以上高级职称产科医师同时判断，若结果存在矛盾由第三名医师进行结果判读。

1.4　统计方法　采用 SPSS 25.0、MedCalc 19.0.7、R 3.6.1 软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料以均数±标准差表示表示，组间比较采用独立样本 t 检验；非正态分布的计量资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示，组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料采用 χ^2 检验。通过单因素分析和 LASSO 回归筛选特征变量，并采用多因素 Logistic 回归建立预测模型，进一步使用限制性立方样条进行模型优化，最终绘制列线图实现可视化。采用 Bootstrap 法进行内部验证，评估模型的校准度；通过受试者工作特征（ROC）曲线及曲线下面积（*AUC*）值评价模型的区分能力。最后在验证集中对模型进行外部验证，以全面评估其预测效能。$P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2　结果

2.1　FD 的发生情况及单因素分析　训练组 164 例中发生 FD67 例（窘迫组），97 例未发生窘迫的纳入对照组。单因素分析结果显示：孕次、产次、是否经产妇、妊娠周数、血胆汁酸水平、D-二聚体、脐动脉 S/D 值及胎儿脑血氧饱和度与 FD 相关（均 $P < 0.05$），见表 1。

2.2　LASSO 回归分析　共筛选出 9 个预测变量，包括孕期增加体质量、孕周、白细胞、门冬氨酸氨基转移酶、尿酸、D-二聚体、脑血氧饱和度、脐动脉 S/D 值及是否脐带绕颈，其回归系数分别为：0.002 142 8、0.034 41、0.000 76、0.002 003 9、0.000 103 6、−0.000 013 9、−0.827 212 1、0.021 431 5、−0.034 796 1，见封三图 2 ～ 3。

2.3　多因素 Logistic 回归分析及模型构建　将 LASSO 回归筛选出的变量进一步纳入多因素 Logistic 回归分析，结果显示，孕周及胎儿脑血氧饱和度是 FD 的影响因素（均 $P < 0.05$），见表 2。为全面评估预测效能，本研究分别构建了包含全部 LASSO 筛选因素（模型 1）和上述二因素（模型 2）的预测模型，并分别绘制成列线图，见封三图 4 ～ 5。采用 Bootstrap 法（重复抽样 1000 次）对建模队列进行内部验证。校准曲线显示，模型 2 的校准性能优于模型 1，其表观校准曲线与理想线的偏离程度更小，提示模型 2 输出的预测概率与实测概率一致性更佳，具有更高的临床可解释性（图 1）。ROC 曲线分析结果显示，两个模型均具有极佳的判别效能，其中模型 1 的 *AUC* 为 0.998，略高于模型 2 的 0.991（图 2）。

2.4　列线图的外部验证　验证组 42 例患者中，发生 FD 19 例。两组患者脑血氧饱和度、受教育年限差异均有统计学意义（均 $P < 0.05$），见表 3。在验证集中，模型 1 与模型 2 对 FD 的预测效能均处于较高水平，*AUC* 分别为 0.973 和 0.975，见图 3。校准曲线分析提示，两模型的预测概率均低于实际观测概率，表现为系统性低估，但整体校准表现仍可接受，且模型 2 的校准一致性略优于模型 1，见图 4。

3　讨论

目前 FD 的诊断还没有所谓的“金标准”。在围产期连续监测胎儿及新生儿脑组织氧饱和度，能够客观反映宫内窘迫状态下的脑氧合水平，为缺氧缺血性脑病的风险评估提供量化指标[6]。本研究通过多因素 Logistic 回归分析结果显示，脑血氧饱和度是 FD 的重要影响因素（$P < 0.05$）。脑组织氧饱和度可在一定程度上反映胎儿脑灌注与氧合状态，与 FD 具有显著相关性。提示基于 NIRS 技术测得的脑血氧饱和度，可作为评估胎儿健康状况的客观指标。尤其在连续监测模式下，脑血氧饱和度的动态变化趋势较单一时点测量更能稳定地反映胎儿氧合波动，具有更高的临床参考价值。

同时，本研究系统分析孕妇产前常规实验室指标，并结合既往研究结果[7-8]，确认脐带绕颈、脐动脉 S/D 比值升高等为 FD 的高危因素。在此基础上，经

表 1　训练组胎儿窘迫的单因素分析

指标	窘迫组（n=67）	对照组（n=97）	t（χ^2）[Z]值	P 值
年龄（岁）	28.7±3.2	28.7±4.2	0.01	＞0.05
身高（cm）	161.9±5.86	160.9±5.19	1.10	＞0.05
体质量（kg）	69.10±9.52	68.84±9.54	0.17	＞0.05
孕期增加体质量（kg）	13.34±4.04	12.73±3.73	0.98	＞0.05
受教育年限[例（%）]			（3.11）	＞0.05
本科以下	30（44.8）	57（58.8）		
本科及以上	37（55.2）	40（41.2）		
孕次（次）	1（1，2）	2（1，2）	[2.27]	＜0.05
产次（次）	1（1，1）	1（1，2）	[2.89]	＜0.05
是否经产妇[例（%）]			（8.88）	＜0.05
是	5（7.5）	25（25.8）		
否	62（92.5）	72（74.2）		
孕周（周）	39.0（39.0，40.0）	38.0（38.0，39.0）	[4.12]	＜0.05
宫高（cm）	34（32，35）	34（33，35）	[0.77]	＞0.05
腹围（cm）	99.06±6.42	99.94±6.79	0.83	＞0.05
血常规				
白细胞（10^9/L）	8.85（7.23，10.50）	8.4（6.75，10.20）	[0.71]	＞0.05
血红蛋白（g/L）	124.03±9.95	124.47±11.71	0.24	＞0.05
血小板（10^9/L）	201.19±56.19	212.10±55.24	1.21	＞0.05
肝肾功能				
丙氨酸氨基转移酶（U/L）	11（9，13）	10（7.5，13）	[1.82]	＞0.05
门冬氨酸氨基转移酶（U/L）	17（15，21）	17（15，19）	[1.25]	＞0.05
总胆汁酸（μmol/L）	2.7（1.7，4.3）	2.3（1.5，3.1）	[2.17]	＜0.05
尿酸（mmol/L）	327（288，364）	317.5（268.8，361.4）	[1.09]	＞0.05
凝血功能				
纤维蛋白原（μg/mL）	4.85±1.15	4.72±0.86	0.80	＞0.05
D-二聚体（ng/mL）	548.10±249.28	724.11±521.18	2.86	＜0.05
超声				
双顶径（mm）	93.82±3.46	92.97±3.37	1.57	＞0.05
头围（mm）	333.87±10.50	331.92±10.04	1.19	＞0.05
胎儿腹围（mm）	335.67±15.38	338.35±16.11	1.06	＞0.05
股骨长（mm）	71.39±2.63	71.11±3.03	0.61	＞0.05
羊水指数（mm）	119.94±32.72	122.40±31.93	0.47	＞0.05
脐动脉 S/D	2.31±0.28	2.21±0.30	2.08	＜0.05
脐带绕颈[例（%）]	33（49.3）	35（36.1）	（2.83）	＞0.05
脑血氧饱和度（%）	76.49±2.24	81.88±1.64	17.80	＜0.05

表 2　多因素 Logistic 回归分析

因素	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值
孕期增加体质量	0.204	0.124	1.65	＞0.05
孕周	1.115	0.388	2.88	＜0.05
白细胞	0.147	0.192	0.77	＞0.05
门冬氨酸氨基转移酶	0.057	0.048	1.19	＞0.05
尿酸	0.010	0.008	1.31	＞0.05
D-二聚体	−0.003	0.002	−1.53	＞0.05
脑血氧饱和度	−8.543	1.737	−4.92	＜0.05
脐动脉 S/D 值	3.232	1.719	1.88	＞0.05
脐带绕颈	−2.089	1.129	−1.85	＞0.05

LASSO 回归筛选，最终纳入 9 项预测变量，包括孕期体质量增加、孕周、胎儿脑血氧饱和度、白细胞计数、门冬氨酸氨基转移酶、尿酸、D-二聚体、脐动脉 S/D 比值及脐带绕颈，并以此构建全变量预测模型（模

表 3　验证组胎儿窘迫的单因素分析

指标	窘迫组（n=19）	对照组（n=23）	$t(\chi^2)[U]$值	P 值
年龄（岁）	28.0（27.0，31.0）	27.0（26.0，29.0）	（0.499）	＞ 0.05
身高（cm）	162.0（159.0，166.0）	159.0（156.0，163.0）	（1.565）	＞ 0.05
体质量（kg）	71.30±9.27	68.60±7.37	1.051	＞ 0.05
孕期增加质量（kg）	14.0（11.0，17.0）	13.0（11.0，16.0）	（0.482）	＞ 0.05
受教育年限[例（%）]			[6.007]	＜ 0.05
本科以下	9（47.4）	3（13.0）		
本科及以上	10（52.6）	20（87.0）		
孕次（次）	1.0（1.0，2.0）	1.0（1.0，2.0）	[0.958]	＞ 0.05
是否经产妇[例（%）]			（2.307）	＞ 0.05
是	1（5.3）	5（21.7）		
否	18（94.7）	18（78.3）		
孕周（周）	39.0（38.0，39.0）	39.0（38.0，39.0）	[1.795]	＞ 0.05
宫高（cm）	33.0（32.0，35.0）	34.0（33.0，36.0）	[1.423]	＞ 0.05
腹围（cm）	101.26±6.26	101.70±5.09	0.247	＞ 0.05
血常规				
白细胞（10^9/L）	8.82±1.61	8.47±2.08	0.596	＞ 0.05
血红蛋白（g/L）	123.32±9.28	122.00±8.29	0.485	＞ 0.05
血小板（10^9/L）	203.11±50.52	226.22±61.29	1.315	＞ 0.05
肝肾功能				
丙氨酸氨基转移酶（U/L）	10.0（9.0，13.0）	10.0（8.0，13.0）	[0.358]	＞ 0.05
门冬氨酸氨基转移酶（U/L）	17.0（15.0，20.0）	17.0（15.0，19.0）	[0.508]	＞ 0.05
总胆汁酸（μmol/L）	3.0（1.8，4.3）	2.5（1.8，3.9）	[0.025]	＞ 0.05
尿酸（mmol/L）	309.95±104.33	299.96±57.10	0.394	＞ 0.05
凝血功能				
纤维蛋白原（μg/mL）	4.74±0.64	5.16±0.83	1.821	＞ 0.05
D-二聚体（ng/mL）	754.0（489.0，1086.0）	643.0（456.0，921.0）	[1.188]	＞ 0.05
超声				
双顶径（mm）	95.16±3.02	94.26±3.18	0.930	＞ 0.05
头围（mm）	339.0（334.0，342.0）	338.0（332.0，342.0）	[0.342]	＞ 0.05
胎儿腹围（mm）	349.63±12.60	343.04±15.01	1.520	＞ 0.05
股骨长（mm）	72.63±2.31	71.70±2.01	1.403	＞ 0.05
羊水指数（mm）	113.68±26.36	130.83±32.74	1.841	＞ 0.05
脐动脉 S/D	2.18±0.32	2.32±0.30	1.373	＞ 0.05
脐带绕颈[例（%）]	10（52.6）	7（30.4）	（2.128）	＞ 0.05
脑血氧饱和度（%）	77.00±2.03	81.83±0.98	10.085	＜ 0.05

型 1）。为进一步评估核心变量的预测价值，本研究同时构建了仅包含孕周与脑血氧饱和度的简化模型（模型 2）。ROC 曲线分析显示，两模型的判别效能相近，且在外部验证集中 *AUC* 值差异微小，提示脑血氧饱和度作为反映胎儿脑氧合状态的直接指标，在 FD 预测中具有较高权重。上述结果初步证实，基于脑氧饱和度的预测模型具备良好的识别能力。

与现有 FD 预测模型相比[9-13]，本研究在建模过程中引入了 NIRS 测得的脑血氧饱和度指标，拓展了传统模型的变量维度，从而提高了对胎儿宫内窘迫的识别效能。然而，本研究仍存在一定的局限性：（1）样本量相对有限，且来源于单一医疗中心，可能限制模型的外推性与代表性；（2）尽管 NIRS 具有无创、实时监测的优势，其测量值易受胎儿体位、母体腹壁脂肪厚度、羊水量及胎盘-胎儿血流动力学等因素干扰，进而引入测量偏倚。上述问题有待在多中心、大样本研究中进一步优化控制，并通过校正因子或分层分析提高测量精度与模型准确性。

综上所述，本研究证实脑血氧饱和度是 FD 的重要影响因素，基于脑血氧饱和度构建的临床预测模型可有效识别胎儿缺氧风险，为早期预警及个体化临床决策提供了客观依据。未来仍需开展外部验

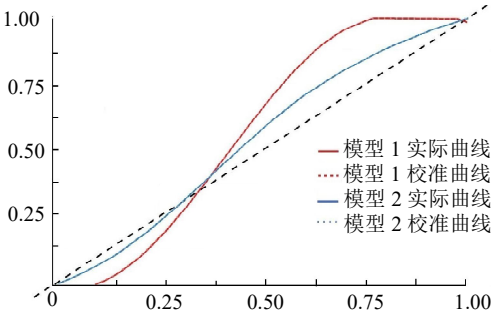


图 1　训练组模型 1 和模型 2 的校准曲线

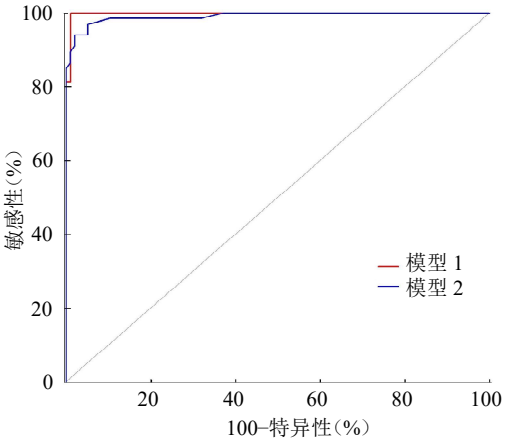


图 2　训练组模型 1、模型 2 列线图的 ROC 曲线

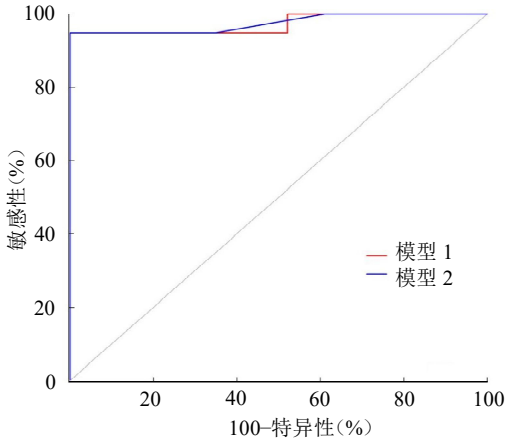


图 3　验证组模型 1、模型 2 列线图的 ROC 曲线

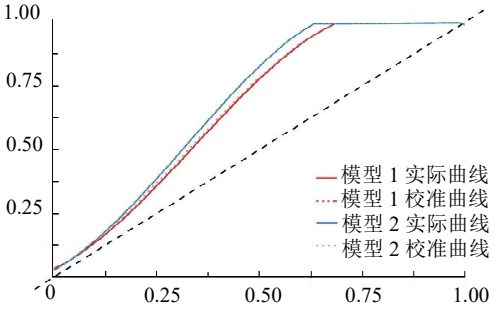


图 4　验证组模型 1 和模型 2 的校准曲线

证与前瞻性队列研究，以进一步确立该模型在围产期管理中的应用价值。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明　叶瑞勉：论文撰写，数据整理；宣荣荣，丁慧青：研究指导，论文修改

参　考　文　献

[1] Liu X, Zheng F Y, Zeng W T, et al. A cross-sectional study on knowledge, attitudes, and practices regarding fetal distress among pregnant women[J]. Clin Exp Obstet Gynecol, 2025, 52(4): 31368.

[2] 丁晓静,张玉秀,王孝君,等.围生期高危因素对胎儿窘迫、新生儿窒息的影响[J].中国妇幼保健,2017,32,(21):5397-5400.

[3] Zhu M N, Liu L P. Fetal heart rate extraction based on wavelet transform to prevent fetal distress in utero[J]. J Healthc Eng, 2021, 2021: 7608785.

[4] Jacques S L, Ramanujam N, Vishnoi G, et al. Modeling photon transport in transabdominal fetal oximetry[J]. J Biomed Opt, 2000, 5(3): 277-282.

[5] 谢幸,孔北华,段涛.妇产科学[M].9 版.北京:人民卫生出版社,2018:168-176.

[6] 叶贞志,谢小强,韩玉昆,等.近红外光谱技术产时监测宫内缺氧性脑损伤的价值[J].中华围产医学杂志,2010(4):314-317.

[7] Richardson M A, Grant-Knight W, Beeghly M, et al. Psychological distress among school-aged children with and without intrauterine cocaine exposure: Perinatal versus contextual effects[J]. J Abnorm Child Psychol, 2016, 44(3): 547-560.

[8] 李颖清. 胎心监护联合脐动脉血流在围产期新生儿窘迫中的预测价值[J].疾病监测与控制,2016,10(12):1016-1017.

[9] 张惠芳,罗欢,霍咪,等.超声检测脐动脉、大脑中动脉血流参数与Tei指数对胎儿宫内窘迫的诊断价值分析[J].现代医用影像学,2025,34,(4):707-711.

[10] 石英娜,江浩,魏米琳.超声检测脐动脉参数与宫内窘迫胎儿缺氧严重程度的关系探讨[J].中国计划生育学杂志,2025,33,(8):1832-1835.

[11] 陈炜,王俊彦,程辉,等.经颅超声评估大脑中动脉 S/D、RI 对孕晚期胎儿宫内窘迫诊断价值[J].转化医学杂志,2025,14,(10):106-110.

[12] 田敏,周杰.胎盘血管超声参数对胎儿宫内窘迫的预测效能[J].华夏医学,2025,38,(5):132-137.

[13] 罗艳宁,潘文雯,滕娟.孕妇子宫动脉血流参数联合胎心监护预测胎儿宫内窘迫的价值分析[J].现代医用影像学,2025,34,(7):1356-1360.

收稿日期：2026-02-03

（本文编辑：吴迪汉）