

[专题研究]

围生期脑损伤高危新生儿神经行为异常 早期预测模型构建及验证

陈华蓉¹, 王 燕², 胡佳馨²

(自贡市妇幼保健院 1. 儿科; 2. 新生儿科, 四川 自贡 643000)

[摘要] **目的** 基于新生儿振幅整合脑电图(aEEG)和围生期资料构建脑损伤高危新生儿神经行为异常的早期预测模型, 并进行模型验证。 **方法** 回顾性分析 2021 年 9 月至 2023 年 6 月自贡市妇幼保健院收治的 246 例脑损伤高危新生儿生后 72 h 内 aEEG 和围生期资料, 根据 12 月龄时神经行为筛查是否正常分为无异常组($n=186$)、异常组($n=60$), 比较两组围生期资料及 aEEG 结果, 多因素 Logistic 回归模型分析脑损伤高危新生儿神经行为异常的相关影响因素, 绘制受试者工作特征(ROC)曲线并计算曲线下面积(AUC)验证模型, 绘制临床决策曲线(DCA)分析临床有效性。 **结果** 异常组极低出生体重、产钳助产、新生儿 20 项行为神经测定(NBNA)评分 ≤ 35 分及 aEEG 背景活动无连续性、无周期性、惊厥波患儿占比高于无异常组, 1 min Apgar 评分、aEEG 宽带电压下界、窄带电压上界、窄带电压下界及总分低于无异常组, 差异有统计学意义(t/χ^2 值介于 2.874~57.970 之间, $P<0.05$); 多因素 Logistic 回归结果显示早产、极低出生体重、产钳助产、NBNA 评分 ≤ 35 分是脑损伤高危新生儿神经行为异常的独立危险因素(OR 值介于 2.832~4.821 之间, $P<0.05$), 1 min Apgar 评分、aEEG 总分是脑损伤高危新生儿神经行为异常的独立保护因素(OR 值分别为 0.446、0.722, $P<0.05$); 基于上述回归模型绘制脑损伤高危新生儿神经行为异常的列线图预测模型, 其 C-index 为 0.928, AUC 为 0.928, 列线图校准度为 0.876; DCA 曲线显示, 采用该列线图预测脑损伤高危新生儿神经行为异常能取得临床正向的净获益。 **结论** 新生儿振幅整合脑电图结合早产、极低体重、产助产、NBNA 评分、1 min Apgar 评分可用于脑损伤高危新生儿神经行为异常早期预测评估中, 为临床针对性制定干预方案提供参考。

[关键词] 新生儿; 脑损伤; 神经行为异常; 振幅整合脑电图; 预测模型

Doi:10.3969/j.issn.1673-5293.2026.03.001

[中图分类号] R174.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1673-5293(2026)03-0001-07

Construction and validation of an early prediction model for neurobehavioral abnormalities in high-risk neonates with perinatal brain injury

CHEN Huarong¹, WANG Yan², HU Jiaxin²

(1. Department of Pediatrics, Zigong Hospital of Woman and Child Health Care, Sichuan Zigong 643000, China;

2. Department of Neonatology, Zigong Hospital of Woman and Child Health Care, Sichuan Zigong 643000, China)

[Abstract] **Objective** To establish an early prediction model of neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury based on amplitude integrated electroencephalogram (aEEG) and perinatal data. **Methods** The aEEG and perinatal data of 246 high-risk neonates with brain injury admitted to Zigong Hospital of Woman and Child Health Care from September 2021 to June 2023 were retrospectively analyzed within 72 h after birth, and were divided into normal group ($n=186$) and abnormal group ($n=60$) according to the neurobehavioral screening at 12 months of age. Perinatal characteristics and aEEG parameters were compared between the two groups. Multivariate logistic regression analysis was performed to identify independent influencing factors for neurobehavioral abnormalities. A nomogram prediction model was constructed based on the regression results and validated using receiver operating characteristic (ROC) curves and the area under the curve (AUC). Clinical utility was evaluated by decision curve analysis (DCA). **Results** The proportion of very low birth weight, forceps assisted delivery, NBNA score ≤ 35 , non-continuous, non-periodic aEEG background activity and seizure wave in abnormal group was higher than that in normal group, and the 1 min Apgar score, aEEG broadband voltage lower boundary, narrowband voltage upper boundary, narrowband voltage lower boundary and total score were lower than those in normal group (t/χ^2 values ranged from 2.874 to 57.970, $P<0.05$). Multivariate Logistic regression analysis showed that preterm birth, very low birth weight, forceps delivery and NBNA score ≤ 35 were independent risk factors for

[收稿日期] 2024-09-19

[基金项目] 2020 年四川省医学(青年创新)科研课题项目(S20174)

[作者简介] 陈华蓉(1983—), 女, 副主任医师, 主要从事新生儿和儿内科研究。

neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury(*OR* values ranged from 0.446 to 0.722, $P < 0.05$), and 1 min Apgar score and aEEG total score were independent protective factors for neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury (*OR* values ranged from 0.446 to 0.722, $P < 0.05$). Based on the above regression model, a nomogram prediction model for neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury was established. The model yielded a C-index of 0.928 and an AUC of 0.928, with a nomogram calibration degree of 0.876. Decision curve analysis showed that applying this nomogram to predict neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury could achieve a positive clinical net benefit. **Conclusion** Neonatal amplitude integrated EEG combined with preterm birth, very low birth weight, forceps assisted delivery, NBNA score, 1 min Apgar score can be used for early prediction and evaluation of neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury, and provide reference for early clinical prediction and formulation of corresponding intervention programs.

[Key words] newborn; brain injury; neurobehavioral abnormality; amplitude-integrated EEG; prediction model

围生期窒息、宫内感染等可导致新生儿脑损伤,而高危新生儿脑损伤可对患儿日后生活造成不同程度障碍,如脑瘫、智力低下、癫痫等,由于其发病机制较为复杂且早期缺乏典型体征、症状,如未得到及时有效干预可严重影响预后^[1-3]。因此,早期有效评估预测高危新生儿神经行为异常具有重大意义。磁共振(magnetic resonance imaging, MRI)为临床诊断新生儿脑损伤的常用方案,具有高分辨率、可精准定位、准确性高等优点,但 MRI 检查时新生儿需处于静态、安静环境,因此对于新生儿脑损伤评估诊断存在一定局限性^[4-5]。脑电图为目前临床早期监测新生儿脑功能的主要方案,其中振幅整合脑电图(amplitude-integrated electroencephalography, aEEG)通过记录脑电图仪可反映患者大脑背景活动水平,不仅可评估脑功能异常,还可根据 aEEG 背景活动特点评估神经学预后^[6-8]。但目前临床鲜有关于通过 aEEG 早期评估新生儿脑损伤的相关研究,因此,本研究基于新生儿 aEEG 和围生期资料构建脑损伤高危新生儿神经行为异常的早期预测模型并对其进行验证。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性选取 2021 年 9 月至 2023 年 6 月自贡市妇幼保健院收治的 246 例脑损伤高危新生儿作为研究对象,其中男 122 例、女 124 例,出生体重正常 232 例、低出生体重 8 例、极低体重 6 例,早产 20 例、非早产 226 例,顺产 142 例、产钳助产 35 例、剖宫产 69 例,初产妇 168 例、经产妇 78 例,高龄产妇 105 例,妊娠期糖尿病 73 例,妊娠期高血压 40 例,羊水异常 35

例,脐带异常 26 例,胎盘异常 44 例,胎膜早破 33 例。纳入标准:①均为单胎妊娠;②均伴有脑损伤新生儿高危因素,如早产、极低体重儿、围生期窒息等;③入院日龄 < 28 d;④患儿均接受 aEEG 检查;⑤围生期资料完整。排除标准:①合并遗传代谢性疾病新生儿因病情危重需立即进行手术者;②入院 24 h 内病死或中途转院者。本研究通过单位伦理审查,同时所有研究对象的监护人均知情同意自愿参与研究。

1.2 研究方法

新生儿神经行为异常评估:均采用新生儿 20 项行为神经测定(neonatal behavioral neurological assessment, NBNA)评分进行神经行为筛查,其中早产儿于胎龄满 40 周后进行筛查, NBNA 评分共分为 5 部分,包括行为能力 4 项、被动肌张力 4 项、主动肌张力 4 项、原始反射 4 项及一般估价 4 项,每项评分分为 0 分、1 分、2 分,总分 40 分,评分 < 35 分评估为异常。

aEEG 检查:均采用 NicoletOnne 脑电测量系统进行检测,于患儿中央(C3-C4)、双侧额叶(Fp1-Fp2)、颞叶(T3-T4)放置电极,在置入部分常规消毒处理后去脂,电极内注入导电膏,灵敏度为 70 $\mu\text{V}/\text{cm}$,滤波频率为 0.5~35 Hz,收集脑电信号后记录保存,显示为振幅形式的波普带,速度为 6 cm/h ,同时记录常规 EEG,每次持续时间在 3 h 以上。采用盲法进行判读,采用半对数公式对检测结果进行电压测量,从 aEEG 图形的周期性、连续性、下边界值、电压连续性等进行评估,并计算 aEEG 综合评分。

围生期资料收集:均采用医院自制调查问卷收集所有患儿围生期资料,包括母亲年龄、母亲分娩史(初产妇、经产妇)、是否为高龄产妇、分娩方式(顺产、产钳助产、剖宫产)、合并妊娠期糖尿病、高血压

疾病、脐带异常、羊水异常、胎膜早破、胎盘异常、胎儿是否早产、出生体重、1 min Apgar 评分、新生儿性别、NBNA 评分。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 28.0 软件处理分析基础数据。符合正态分布的计量资料用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,两组间比较采用 t 检验,非正态分布数据经自然对数转换成正态分布后进行分析;计数资料用例数(n)和百分比(%)表示,两组间比较行 χ^2 检验;采用 Logistic 回归方程分析相关影响因素。采用 R 4.0.3 软件构建列线图风险预测模型,绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic,ROC)曲线并计算曲线下面积(area under the curve,AUC),不同预测方案间比较采用 Z 检验;采用 Bootstrap 法进行 1 000 次内部抽样验证列线图模型一致性,以减少过度拟合偏差;临床有效性验证通过决策曲线分析

(decision curve analysis,DCA),量化列线图模型在不同阈值概率下的净收益;模型的普适性分析通过绘制外部测试集的校准曲线进行验证。双侧检验, $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 脑损伤高危新生儿神经行为异常情况

246 例脑损伤高危新生儿,12 月龄时神经行为筛查异常 60 例(24.39%),无异常 186 例(75.61%)。

2.2 两组 aEEG 和围生期资料比较

异常组极低出生体重、产钳助产、NBNA 评分 ≤ 35 分及 aEEG 背景活动无连续性、无周期性、惊厥波患儿占比高于无异常组,1 min Apgar 评分、aEEG 宽带电压下界、窄带电压上界、窄带电压下界及总分低于无异常组,差异有统计学意义(t/χ^2 值介于 2.874~57.970 之间, $P<0.05$),见表 1。

表 1 两组 aEEG 和围生期资料比较[$\bar{x} \pm s, n(\%)$]
Table 1 Comparison of aEEG and perinatal characteristics between the two groups [$\bar{x} \pm s, n(\%)$]

资料	异常组(n=60)	无异常组(n=186)	t/χ^2	P
母亲年龄(岁)	33.68±3.00	32.90±3.54	1.522	0.129
母亲分娩史			0.107	0.744
初产妇	42(70.00)	126(67.74)		
经产妇	18(30.00)	60(32.26)		
高龄产妇	27(45.00)	78(41.94)	0.174	0.676
妊娠期糖尿病	19(31.67)	54(29.03)	0.151	0.698
妊娠期高血压疾病	11(18.33)	29(15.59)	0.250	0.617
羊水异常	10(16.67)	25(13.44)	0.387	0.534
脐带异常	8(13.33)	18(9.68)	0.641	0.423
胎盘异常	12(20.00)	32(17.20)	0.241	0.623
胎膜早破	9(15.00)	24(12.90)	0.172	0.679
宫内感染	2(3.33)	2(1.08)	1.446	0.229
早产			2.876	0.090
否	52(86.67)	174(93.55)		
是	8(13.33)	12(6.45)		
出生体重			23.759	<0.001
正常	49(81.67)	183(98.39)		
低出生体重	6(10.00)	2(1.08)		
极低体重	5(8.33)	1(0.54)		
1 min Apgar 评分(分)	7.82±0.64	8.59±0.87	6.322	<0.001

(转下表)

(续上表)

资料	异常组(n=60)	无异常组(n=186)	t/χ^2	P
分娩方式			13.739	0.001
顺产	24(40.00)	118(63.44)		
产钳助产	16(26.67)	19(10.22)		
剖宫产	20(33.33)	49(26.34)		
新生儿性别			0.136	0.712
男	31(51.67)	91(48.92)		
女	29(48.33)	95(51.08)		
NBNA 评分			5.456	0.020
≤ 35 分	58(96.67)	159(85.48)		
> 35 分	2(3.33)	27(14.52)		
aEEG				
背景活动无连续性	17(28.33)	1(0.54)	51.683	<0.001
无周期性	18(30.00)	1(0.54)	55.253	<0.001
惊厥波	20(33.33)	2(1.08)	57.970	<0.001
宽带电压上界(μV)	17.90 $\pm$ 4.18	18.44 $\pm$ 2.35	1.254	0.211
宽带电压下界(μV)	5.00 $\pm$ 0.64	5.59 $\pm$ 0.57	6.762	<0.001
窄带电压上界(μV)	10.18 $\pm$ 2.25	10.79 $\pm$ 1.04	2.874	0.004
窄带电压下界(μV)	5.47 $\pm$ 0.59	6.05 $\pm$ 0.39	8.746	<0.001
总分(分)	8.90 $\pm$ 1.35	11.89 $\pm$ 0.36	27.432	<0.001

2.3 脑损伤高危新生儿神经行为异常的多因素分析

以脑损伤高危新生儿神经行为是否异常为因变量(无异常=0,异常=1),以早产(否=0,是=1)、出生体重(正常=1,低体重=2,极低体重=3)、1 min Apgar 评分(按实际值赋值)、分娩方式(顺产=1,剖宫产=2,产钳助产=3)、NBNA 评分(>35 分=1,

≤ 35 分=2)、aEEG 总分(按实际值赋值)为自变量进行分析,结果显示早产、极低出生体重、产钳助产、NBNA 评分 ≤ 35 分是脑损伤高危新生儿神经行为异常的独立危险因素(OR 值介于 2.832~4.821 之间, $P<0.05$),1 min Apgar 评分、aEEG 总分是脑损伤高危新生儿神经行为异常的独立保护因素(OR 值分别为 0.446、0.722, $P<0.05$),见表 2。

表 2 脑损伤高危新生儿神经行为异常的多因素 Logistic 回归分析

Table 2 Multivariate logistic regression analysis of factors associated with neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury

影响因素	β	$S.E.$	Wald χ^2	OR	95%CI		P
					下限	上限	
早产	1.257	0.405	9.637	3.516	1.685	7.336	<0.001
出生体重(正常=1)							
低体重	-0.231	0.188	1.503	0.794	0.549	1.148	0.220
极低体重	1.041	0.322	10.453	2.832	1.299	6.175	<0.001
1 min Apgar 评分	-0.807	0.266	9.207	0.446	0.278	0.716	<0.001
分娩方式(顺产=1)							
剖宫产	-0.404	0.295	1.875	0.668	0.375	1.190	0.171
产钳助产	1.240	0.314	15.594	3.455	2.064	5.785	<0.001
NBNA 评分 ≤ 35 分	1.573	0.383	16.865	4.821	2.846	8.165	<0.001
aEEG 总分	-0.326	0.097	11.293	0.722	0.577	0.903	<0.001

2.4 脑损伤高危新生儿神经行为异常的列线图及验证

基于上述回归模型绘制脑损伤高危新生儿神经行为异常的列线图预测模型,其 C-index 为 0.928,见图 1。进一步绘制 ROC 曲线,结果显示该列线图的 AUC 为 0.928,具有良好的区分度;校准曲线分

析显示,列线图的校准度为 0.876,预测脑损伤高危新生儿神经行为异常发生率与实际发生率基本一致;临床决策分析曲线显示,采用列线图预测脑损伤高危新生儿神经行为异常能取得临床正向的净获益,见图 2 至图 4。

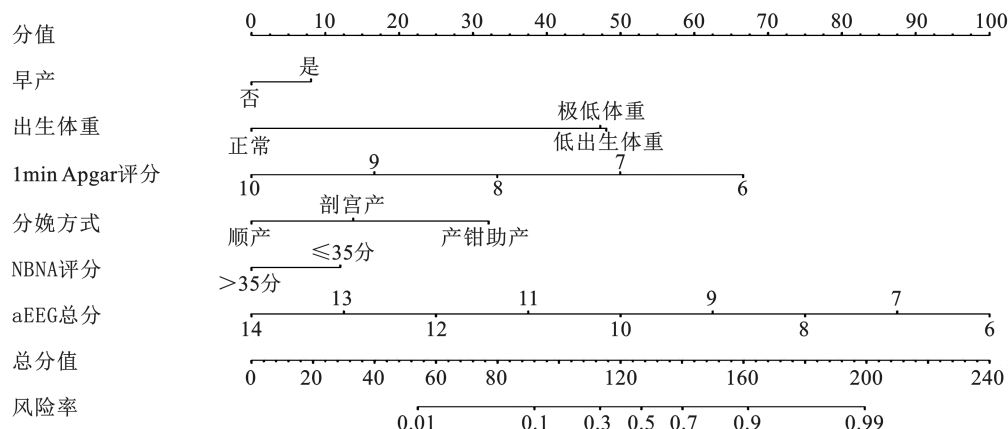


图 1 脑损伤高危新生儿神经行为异常的列线图预测模型

Fig. 1 Nomogram for predicting neurobehavioral abnormalities in neonates at high risk of brain injury

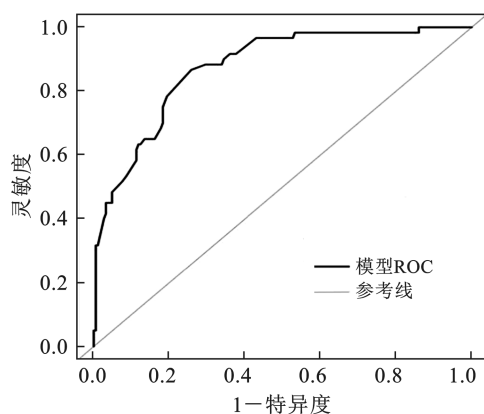


图 2 ROC 曲线评价列线图的区分度

Fig. 2 ROC curve for evaluating the discrimination of the nomogram

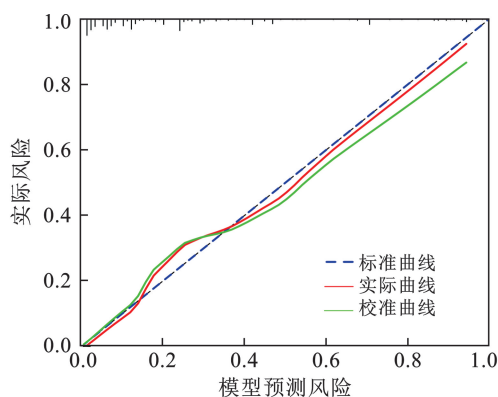


图 3 校准曲线评价列线图的校准度

Fig. 3 Calibration curve evaluate the calibration performance of the nomogram

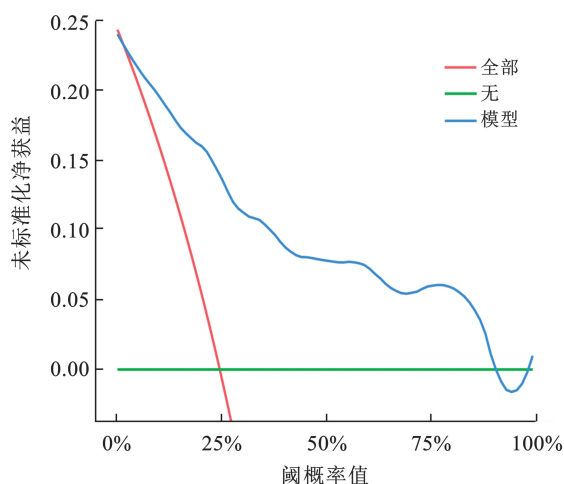


图 4 临床决策分析曲线评价列线图的临床效用

Fig. 4 Decision curve analysis to evaluate the clinical utility of the nomogram

2.5 模型的普适性分析

另纳入本中心不同时期满足纳入排除标准的 80 例新生儿作为外部测试集,经临床随访发现,神经行为筛查异常 19 例,无异常 61 例;采用所建立模型预测发现,异常 18 例,无异常 62 例。绘制外部测试集的校准曲线显示,在外部测试人群中,模型预测结果与实际结果仍贴合度良好,见图 5。

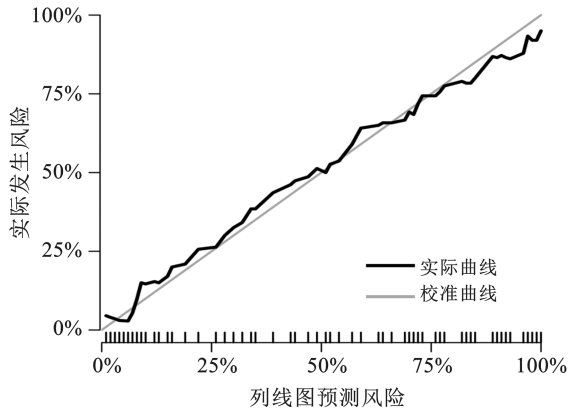


图5 外部测试集的校准曲线

Fig. 5 Calibration curve for the external test set

3 讨论

3.1 aEEG 评估围生期高危新生儿脑损伤的应用优势

高危新生儿近年来存活率显著升高,但由于患儿具有缺氧高危因素,可能导致神经系统发育受损,且其早期无明显临床症状,易被忽视,随患儿生长发育可引起脑瘫、癫痫、智力低下等脑损伤症状,对患儿及家庭、社会均造成严重影响^[9-11]。临床对于新生儿脑损伤评估主要根据神经系统临床表现及影像学检查,但均落后于脑损伤病理改变时间,无法实现早期干预,影响患儿预后。因此,早期预测评估脑损伤高危新生儿神经异常行为,积极采取干预措施,可改善高危新生儿神经预后。

aEEG 具有实时判读、连续监测等优点,与传统评估方案比较,在评估诊断时间点方面具有一定优势^[12-13]。本研究经 aEEG 检查结果显示,异常组 aEEG 宽带电压下界、窄带电压上界、窄带电压下界及总分低于无异常组,提示临床可通过早期 aEEG 检查结果评估脑损伤高危新生儿神经行为异常。aEEG 可将脑电图信号放大、滤波、压缩等后评估神经功能,所受信号干扰较少,且可根据 aEEG 评分直观分析,以减少人为因素影响^[14-15]。报道显示, aEEG 将脑部微弱电信号给予放大并可视化呈现,可用于新生儿脑功能评估中,且通过 aEEG 对正常新生儿观察发现,随胎龄增加新生儿逐渐出现睡眠周期,波形连续、稳定,进一步说明 aEEG 对新生儿脑功能的评估价值^[16-17]。有学者研究表明,脑功能异常新生儿更易发生 aEEG 变化,对早产儿监测发现,小于胎龄儿的 aEEG 评分低于适龄胎龄儿,表现为图形下边界、连续性、宽带、睡眠周期及总分较低,

因此 aEEG 可作为评估新生儿脑成熟度、脑功能的监测方案^[18-19]。

3.2 围生期高危新生儿脑损伤的早期预测模型构建及验证

相关研究表明, aEEG 虽可用于新生儿脑损伤评估中,但对高危新生儿单独通过 aEEG 难以早期判断,其受信号干扰虽已大幅下降,但高危新生儿可能使用呼吸机等辅助治疗设备,从而干扰脑电波,导致对脑电图异常的误判^[20-21]。因此,本研究在 aEEG 基础上分析高危新生儿围生期资料发现,两组早产、极低体重、产钳助产、NBNA 评分 ≤ 35 分、1 min Apgar 评分患儿占比存在显著差异,进一步经多因素分析显示,早产、极低体重、产钳助产、NBNA 评分 ≤ 35 分、1 min Apgar 评分、aEEG 总分均为脑损伤高危新生儿神经行为异常的相关影响因素。报道显示,早产儿在宫内可出现缺氧性脑损伤,极低体重儿存在宫内营养不良症状,导致大脑发育不成熟,而阴道分娩产程不顺利时,产道挤压易引起新生儿头皮血肿,干扰脑电信号,也可导致胎儿急性缺氧,影响脑电变化^[22-23]。另有研究表明, Apgar 评分可用于评估新生儿窒息,以指导临床评估新生儿状况,而 NBNA 可用于预测高危新生儿神经发育情况,反映脑发育状况及发展趋势^[24]。因此,早产、极低体重、产钳助产、NBNA 评分 ≤ 35 分、1 min Apgar 评分均与脑损伤高危新生儿神经行为异常密切相关。此外,本研究基于上述 Logistic 回归分析绘制脑损伤高危新生儿神经行为异常的列线图预测模型,其 C-index 为 0.928;经 ROC 曲线显示,该列线图的 AUC 为 0.928,具有良好的区分度;校准曲线分析显示,列线图的校准度为 0.876;临床决策分析曲线显示,采用列线图预测脑损伤高危新生儿神经行为异常能取得临床正向的净获益。此外,本研究另纳入本中心不同时期满足纳入排除标准的 80 例新生儿作为外部测试集,绘制外部测试集的校准曲线,结果提示在外部测试人群中,模型预测结果与实际结果仍贴合度良好,说明该预测模型具有良好的外部有效性,且在实际临床场景中对同类新生儿人群的预测结果可靠,具有临床普适性。

综上所述,早产、极低体重、产钳助产、NBNA 评分 ≤ 35 分、1 min Apgar 评分、aEEG 总分均与脑损伤高危新生儿神经行为异常密切相关,临床可通过其早期预测脑损伤高危新生儿神经行为异常,以制

定相应干预方案。但本研究仍存在一定局限性,如本研究为单中心样本研究,总样本量仍较少,未来还需进一步扩大样本量以提高统计可信度。

[参考文献]

- [1] Shao R, Sun D, Hu Y, et al. White matter injury in the neonatal hypoxic-ischemic brain and potential therapies targeting microglia[J]. *J Neurosci Res*, 2021, 99(4): 991-1008.
- [2] Peeples E S. MicroRNA therapeutic targets in neonatal hypoxic-ischemic brain injury: a narrative review[J]. *Pediatr Res*, 2023, 93(4): 780-788.
- [3] Aalten M, Tataranno M L, Dudink J, et al. Brain injury and long-term outcome after neonatal surgery for non-cardiac congenital anomalies[J]. *Pediatr Res*, 2023, 94(4): 1265-1272.
- [4] 王栋, 李盛杰, 张宁, 等. 初探 MRI 联合血清 NSE 水平评估新生儿高胆红素血症脑损伤的临床价值[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2021, 19(5): 134-136.
- [5] 沈瑶, 赵国祥, 金万庆. 头颅 MRI、CT 和 B 超诊断新生儿颅脑损伤的价值观察[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2021, 19(11): 14-16.
- [6] MacDonald J M, Abend N S, Topjian A A. Amplitude-integrated electroencephalography: it's not just for babies[J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2020, 21(3): 292-293.
- [7] Durrani N U R, Dinan M H. Amplitude-integrated electroencephalography: a primer for neonatologists and practitioners in the NICU[J]. *Neoreviews*, 2022, 23(2): 96-107.
- [8] Wang X, Trabatti C, Weeke L, et al. Early qualitative and quantitative amplitude-integrated electroencephalogram and raw electroencephalogram for predicting long-term neurodevelopmental outcomes in extremely preterm infants in the Netherlands: a 10-year cohort study[J]. *Lancet Digit Health*, 2023, 5(12): e895-e904.
- [9] Yates N, Gunn A J, Bennet L, et al. Preventing brain injury in the preterm infant-current controversies and potential therapies[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(4): 1671.
- [10] Peyvandi S, Xu D, Barkovich A J, et al. Declining incidence of postoperative neonatal brain injury in congenital heart disease[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2023, 81(3): 253-266.
- [11] Morton S, Kua J, Mullington C J. Epidural analgesia, intrapartum hyperthermia, and neonatal brain injury: a systematic review and meta-analysis[J]. *Br J Anaesth*, 2021, 126(2): 500-515.
- [12] Shen L, Tao M Y, Shi Y X, et al. Value of amplitude-integrated electroencephalogram combined with quantitative indices of cranial magnetic resonance imaging in predicting short-term neurodevelopment in moderately and late preterm infants: a prospective study[J]. *Chinese Journal of Contemporary Pediatrics*, 2021, 23(10): 987-993.
- [13] Singh A, Saluja S, Kler N, et al. Amplitude integrated EEG: how much it helps in prognostication in neonatal encephalopathy[J]. *J Matern Fetal Neonatal Med*, 2022, 35(25): 7748-7755.
- [14] Park K H, Kim Y M, Lee Y J, et al. Predictive value of an early amplitude-integrated electroencephalogram for short-term neurologic outcomes in preterm infants[J]. *Turk J Pediatr*, 2020, 62(3): 367-378.
- [15] Tian Q, Pan Y, Zhang Z, et al. Predictive value of early amplitude integrated electroencephalogram (aEEG) in sleep related problems in children with perinatal hypoxic-ischemia(HIE)[J]. *BMC Pediatr*, 2021, 21(1): 410.
- [16] 王书磊, 张阳阳. 血清 NSE 及 aEEG 动态变化早期预测窒息新生儿脑损伤的意义[J]. *广州医药*, 2023, 54(11): 100-104.
- [17] 陈健萍, 谭葵欢, 袁海超, 等. aEEG、脐血 pH 及新生儿 Apgar 评分对新生儿窒息结局的预测价值[J]. *海南医学*, 2022, 33(3): 342-344.
- [18] 李兆杭, 梁玉美, 孟子达, 等. 改良 aEEG 评分联合血清 NSE 对新生儿缺氧缺血性脑病早期诊断价值的研究[J]. *右江民族医学院学报*, 2022, 44(5): 713-718.
- [19] 阳华妹, 邓毅, 王丽, 等. NSE 联合 aEEG 在新生儿胆红素脑病急性期诊断和预后评估中的应用分析[J]. *吉林医学*, 2020, 41(3): 572-574.
- [20] 姜红华, 程可然, 王月媛, 等. 血清 UCH-L1、HO-1 联合 aEEG 在早产儿脑损伤早期诊断及预后评估中的价值[J]. *徐州医科大学学报*, 2023, 43(7): 517-522.
- [21] 闫丽娟, 张晓丽, 翟丽娜, 等. MRI FLAIR 序列联合 aEEG 在危重早产儿脑损伤中的早期诊断价值探究[J]. *影像科学与光化学*, 2021, 39(6): 818-822.
- [22] Variane G F T, Rodrigues D P, Pietrobon R F R, et al. Newborns at high risk for brain injury: the role of the amplitude-integrated electroencephalography[J]. *J Pediatr*, 2022, 98(6): 565-571.
- [23] Tandircioglu U A, Guzoglu N, Gucuyener K, et al. Influence of intensive care unit enlightenment on premature infants on functional brain maturation assessed by amplitude-integrated electroencephalograph[J]. *Am J Perinatol*, 2021, 38(4): 357-362.
- [24] 赵凯红, 王彤, 田渤, 等. 脐动脉血气指标联合 Apgar 评分评估新生儿窒息的应用价值[J]. *中国妇幼健康研究*, 2024, 35(1): 51-57.

[专业责任编辑:李占魁]

[中文编辑:郭乐倩;英文编辑:孙梦菲]