

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2026.05.007

基于婴幼儿有意义听觉整合量表建立并验证婴幼儿听损程度预测模型

Development and Validation of a Prediction Model for the Severity of Hearing Loss in Infant and Toddler Based on IT-MAIS

尹慧琳 顾海玲 李刚 孟照莉

YIN Hui-lin, GU Hai-ling, LI Gang, MENG Zhao-li

【摘要】目的 基于婴幼儿有意义听觉整合量表(infant-toddler meaningful auditory integration scale, IT-MAIS)联合客观听力学指标及围产期危险因素,建立并验证婴幼儿听力损失程度的多模态预测模型。**方法** 根据筛选标准纳入553例0~6月龄完成听力学诊断测试及IT-MAIS的婴幼儿。根据短纯音听性脑干反应(ABR)结果,根据听力损失程度划分为正常-轻度、中度和重度三组。分析影响听力损失不同程度的危险因素,采用单因素加多因素logistic回归筛选自变量组建预测模型并绘制列线图。采用受试者工作特征曲线评估模型的区分度;校准图验证模型校准度;决策曲线分析法探讨模型的临床效能。**结果** 筛选出7个预测因子构建模型形成列线图,包括高龄产妇($P=0.004$)、儿童永久性听力障碍家族史($P=0.001$)、存在或怀疑有与听力损失有关的综合征或遗传病($P<0.001$)、畸变产物耳声发射($P<0.001$)和IT-MAIS总分($P<0.001$)。经验证,模型区分中度及以上和重度-极重度听力损失的曲线下面积分别为0.904(95%CI:0.876~0.932)和0.954(95%CI:0.930~0.978);预测概率和实际概率之间存在较好的一致性,平均绝对值误差分别为0.014和0.011;该模型在一定范围内对于识别不同程度听力损失风险人群具有应用价值。**结论** 本研究建立的婴幼儿听力损失程度预测模型具有良好的区分度、预测能力和临床适用性,为早期识别听力损失患儿,促进早发现早干预提供了科学依据。

【关键词】 婴幼儿有意义听觉整合量表;听力损失;婴幼儿;预测模型

【中图分类号】 R764.43

【文献标识码】 A

【文章编号】 1672-4933(2026)05-0484-08

【Abstract】 Objective To establish and validate a multimodal prediction model for the degree of hearing loss in infants and young children based on the Infant-Toddler Meaningful Auditory Integration Scale (IT-MAIS) in combination with objective audiological indicators and perinatal risk factors. **Methods** According to the screening criteria, 553 infants aged 0-6 months who had completed audiological diagnostic tests and the IT-MAIS were enrolled. Based on the results of tone-burst auditory brainstem response (ABR), the subjects were divided into three groups according to the degree of hearing loss as the outcome variable: normal-mild, moderate, and severe. Risk factors affecting the degree of hearing loss were analyzed. Univariate and multivariate logistic regression were used to screen independent variables, establish the prediction model, and construct a nomogram. The discrimination of the model was assessed using the receiver operating characteristic (ROC) curve; calibration was verified by calibration plots; and clinical utility was explored by decision curve analysis (DCA). **Results** Seven predictive factors were screened to construct the model and form a nomogram, including advanced maternal age ($P=0.004$), family history of permanent childhood hearing loss ($P=0.001$), presence or suspicion of a syndrome or genetic disorder associated with hearing loss ($P<0.001$), distortion product otoacoustic emissions ($P<0.001$), and total IT-MAIS score ($P<0.001$). After validation, the area under the curve for distinguishing moderate and above hearing loss and severe-profound hearing loss was 0.904 (95%CI: 0.876-0.932) and 0.954 (95%CI: 0.930-0.978), respectively. Notable consistency was observed between the predicted probabilities and the actual probabilities, with mean absolute errors of 0.014 and 0.011. Within a certain range, the model had practical value in identifying populations at risk for different degrees of hearing loss. **Conclusion** The prediction model for the degree of hearing loss in infants and young children established in this study demonstrates acceptable discrimination, predictive ability, and clinical applicability, providing a scientific basis for the early identification of children with hearing loss and for promoting early detection and early intervention.

【Key words】 Infant-toddler meaningful auditory integration scale; Hearing loss; Infant and toddler; Prediction model

听力损失是新生儿常见缺陷之一,发病率为1%~3%^[1],位居五大致残原因之首。2015年全球疾病负担研

究(global burden of disease, GBD)结果表明^[2],听力损失的负担越来越大,已成为全球健康的主要关注点^[3],而听力

基金项目:四川省科学技术厅项目“2~6月龄中耳功能正常婴儿的宽频声导抗值特征初探”(2021YFS0220)

作者单位:四川大学华西医院耳鼻喉头颈外科 成都 610041

作者简介:尹慧琳 本科 技师;研究方向:听力学

通讯作者:孟照莉, E-mail: lucy-mengzhaoli@163.com

损失的影响远不止单一的感官障碍。由于3岁前大脑听觉输入的缺失或实质性衰减会改变大脑的连接和处理^[4],因此,婴幼儿听力损失若未被及时发现干预,将会影响后期言语语言习得^[5]、社交能力^[6]、认知能力和学习能力^[7],进一步给个人、家庭和社会带来负担。

1 目的

为进一步减轻听力损失带来的负担,早期识别存在听力损失高风险的患儿显得尤为重要。既往研究的侧重点大都是对婴幼儿听力损失的预测因素进行筛选^[8-10],发现了较多独立的危险因素,如性别、儿童永久性听力障碍(permanent childhood hearing loss, PCHL)家族史、与PCHL相关的颅面异常或综合征和双耳筛查结果^[11];阴道分娩^[12];孕期产妇感染和父母近亲结婚^[13]等。有研究仅考虑单个量表^[14]对听力损失的预测作用,听觉量表LitlEARS可用作德国新生儿听力筛查后的替代筛查工具^[15]。婴幼儿有意义听觉整合量表(infant-toddler meaningful auditory integration scale, IT-MAIS)联合评估年龄的logistic模型对于极重度听力损失患儿的诊断效能最优,敏感度为89.6%,特异度为88.4%,且听力损失程度越重,IT-MAIS的区分准确性越高,诊断效能越佳^[16]。

IT-MAIS是一种基于家长口述的评估婴幼儿日常听觉能力的结构化问卷,属于功能性听觉行为的主观评价工具,其得分不能直接等同于客观听阈。将其用于构建预测模型,并非作为听力损失程度的客观诊断标准,而是利用其反映出的日常听觉能力信息,作为多模态评估体系的组成部分之一。因此,本研究旨在联合IT-MAIS、客观听力学测试及围产期危险因素,探索建立多模态的婴幼儿听力损失程度预测模型,使其在行为测听或电生理测试无法完成、难以诊断听力损失时,作为初步预测听力损失程度的备选工具,辅助医务人员和家长明确解读和了解诊断结果,唤起家长对婴幼儿听力损失的重视,促进早发现、早干预,使患儿尽早获得实用听力,回归正常生活,为早期识别听力损失患儿及防治提供科学依据。

2 方法

2.1 研究对象

本研究回顾性收集2017年5月~2024年6月于四川省新生儿听力障碍诊治中心进行听力学诊断的婴幼儿相关临床资料。纳入标准:生理年龄0~6月龄;完成相关听力学客观测试,能明确听力损失程度和性质。排除标准:在听觉干预后完成的IT-MAIS评估;听力诊断测试或IT-MAIS评估资料不完整(存在2个及以上条目无法计分);家长存在严重精神疾病或认知缺陷,无法获得完整的病

史资料。为减少婴幼儿自身发育水平对IT-MAIS评估结果的干扰,在数据筛选阶段,通过病史资料回顾,排除既往已明确诊断患有全面发育迟缓、脑性瘫痪或其他严重影响行为反应的中枢神经系统疾病患儿。对于病历中虽有生长发育是否达标记录,但未明确诊断者,则将该变量作为混杂因素纳入后续分析。本研究获得四川大学华西医院医学伦理委员会审批(2022-145),所有参与者均对研究知情同意且签署知情同意书。

2.2 研究方法

病史采集内容包括:姓名、性别、民族、出生日期、受孕方式、父母生育年龄、孕次胎次、胎龄、出生体重、分娩方式、孕期病史、新生儿病房史、既往听力筛查结果、生长发育是否达标、对声音是否有稳定反应、家族史、过敏史、手术史、感染史、特殊药物史和耳镜查体结果。重点询问有无新生儿听力损失高危因素^[17]和常见危险因素:新生儿重症监护室(neonatal intensive care unit, NICU)住院超过5天;PCHL家族史;巨细胞病毒、风疹病毒、疱疹病毒、梅毒或毒浆体原虫;颅面形态畸形(cranio-facial abnormality, CFA),包括耳廓和耳道畸形;出生体重低于1500 g(very low birth weight, VLBW);高胆红素血症达到换血要求;病毒性或细菌性脑膜炎;新生儿窒息;早产儿呼吸窘迫综合征;体外膜氧;机械通气超过48小时;母亲孕期曾使用过耳毒性药物或袪利尿剂、或滥用药物和酒精;临床上存在或怀疑有与听力障碍有关的综合征或遗传病;妊娠期高血压;妊娠期糖尿病;孕期贫血;先兆流产;产前出血;缺氧缺血性脑病等。

听力学客观测试在患儿保持睡眠状态时完成,包括畸变产物耳声发射(DPOAE)和短纯音听性脑干反应(tb-ABR)。听力损失的性质和程度根据tb-ABR结果判断,诊断标准参考2018年《婴幼儿听力损失诊断与干预指南》^[18]。

应用汉化后的中文版IT-MAIS量表对研究对象进行听功能评估。通过访谈熟悉婴幼儿情况的家长或看护人,判断婴幼儿的能力。量表共包括10个条目,每个条目满分4分,其中第1、2条目用于婴幼儿自主发声能力评估,第3~6条目用于对婴幼儿声音察觉能力评估,第7~10条目用于对婴幼儿声音辨别能力评估。当发生家长或看护人无法回答的条目超过2项时,则判定测试无效。IT-MAIS评估均由经过统一培训且临床经验丰富的听力学家在未知听力学诊断结果的情况下独立完成。

为控制混杂,本研究在方法学上做如下考量:①将生长发育是否达标和对声音是否有稳定反应等反映婴幼儿基础功能状态的指标作为预测变量纳入分析,以部分剥离发育和认知因素对IT-MAIS得分的干扰;②所有IT-MAIS评估均遵循统一操作手册,由不知晓听力学诊断结

果的评估者完成,以减少信息偏倚;③最终的预测模型包含 IT-MAIS 主观评分、DPOAE 等客观检查及围产期危险因素,形成多模态预测框架,使听力损失程度推断不完全依赖于主观量表结果。

2.3 统计学方法

根据听力损失程度划分为正常-轻度听力损失、中度听力损失和重度-极重度听力损失 3 组作为结局变量。所有研究对象按 7:3 的比例随机拆分为训练集和验证集。训练集样本用于模型建立,验证集样本用于评估验证模型的预测效果。首先,对各变量进行单因素分析,找出有统计学差异的危险因素后,运用逐步回归法筛选自变量组建预测模型,并绘制模型的列线图。列线图完成后,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 curve, AUC),评估模型的区分度。采用 Bootstrap 法重复抽样 1000 次对预测模型进行内部验证,采用线性校准图直观表现模型校准度。运用决策分析法(decision curve analysis, DCA)探讨模型的临床效能。

所有统计学分析由 R 4.0.0、IBM SPSS Statistics 25 和 GraphPad Prism 8.3.0 软件完成。双侧检验 $P < 0.05$ 认为有统计学意义。

3 结果

3.1 不同程度听力损失的相关危险因素分析

本研究共纳入 553 例研究对象,其中训练样本 388 例,验证样本 165 例,两组各指标均无显著差异($P > 0.05$),见表 1。

将训练样本进行单因素分析发现,高龄产妇($P = 0.004$)、PCHL 家族史($P = 0.001$)、新生儿呼吸窘迫综合征($P = 0.025$)、存在或怀疑有与听损有关综合征或遗传病($P < 0.001$)、较好耳的 DPOAE($P < 0.001$)和 IT-MAIS 总分($P < 0.001$)在不同程度听力损失组间均有显著差异。其他各指标在 3 组间无显著差异($P > 0.05$),见表 2。

3.2 模型建立

经过单因素分析找到有意义的危险因素后,通过多因素 logistic 回归分析筛选独立预测因子,建立多模态模型并计算各变量的比值比(odds ratio, OR),构建列线图见表 3、图 1。其中,与婴幼儿发生不同程度听力损失关系最密切的是 DPOAE 结果($OR = 114.59$)和对声音是否有稳定反应($OR = 35.46$)。表示与 DPOAE 通过相比,未通过时发生更严重听力损失的风险增加了 114.59 倍;家长反应孩子对声音无稳定反应的婴幼儿比有稳定反应的婴幼儿发生更严重听力损失的风险增加了 35.46 倍。有 PCHL 家族史的婴幼儿或母亲是高龄产妇的婴幼儿发生更严重听力损失的风险

是没有家族史、母亲不是高龄产妇婴幼儿的 3.32 倍和 2.73 倍。进一步分析发现,存在或怀疑有与听力损失有关综合征或遗传病的婴幼儿发生更严重听力损失的风险是没有综合征或遗传病婴幼儿的 4.15 倍;当 IT-MAIS 总分每增加 1 分,婴幼儿发生更严重听力损失的风险降低了 9%。

3.3 模型评价

本研究模型的区分度采用 ROC 曲线进行评价,见图 2。模型在 6 月龄及以下婴幼儿中区分不同程度听力损失的预测能力优秀。无论在训练集还是验证集样本中,在区分重度-极重度听损时,诊断效能更佳。区分中度及以上听力损失的训练集 AUC 为 0.904(95%CI: 0.876~0.932),验证集为 0.866(95%CI: 0.812~0.920);而区分重度-极重度听力损失的训练集 AUC 为 0.954(95%CI: 0.930~0.978),验证集为 0.881(95%CI: 0.799~0.962)。

本研究模型的校准度采用校准曲线进行评价,见图 3。绘制模型分别在训练集和验证集中预测中度及以上听力损失和重度-极重度听力损失的校准曲线图,可见模型校准曲线和理想曲线贴近,即预测发生不同程度听力损失的概率和实际概率之间存在较好的一致性,计算对应平均绝对值误差(mean absolute error, MAE)分别为 0.014 和 0.011。MAE 越小,说明模型预测能力越好。

本研究模型的临床适用性采用决策分析法进行评价,见图 4。图中灰色曲线代表所有婴幼儿均发生听力损失并接受干预;黑色直线表示所有婴幼儿均未发生听力损失并没有接受干预;蓝色和橙色曲线分别代表该模型对于中度及以上和重度-极重度在不同阈值概率下利减弊后的净获益率。决策曲线分析显示,对于中度及以上听力损失患儿,使用该模型在任何风险概率下均较不使用该模型的临床获益大;而对于重度-极重度患儿来说,在 94%~96% 阈值概率区间外时,使用该模型对于识别重度-极重度听力损失风险人群具有应用价值。

4 讨论

4.1 模型结论分析

每 1000 名新生儿中,存在永久性双侧重度至极重度听力损失的患儿约有 1.1 例^[19],双侧轻度至中度听力损失或任何程度单侧听力损失的患儿有 1~2 例^[20]。如果听力损失没有得到及时干预,将会对婴幼儿的言语、语言、学习和认知能力发育产生负面影响。早期识别听力损失风险、判断听力损失程度并了解其病因,将有助于家长咨询和后续干预康复方案的制订,帮助听障儿童更早地获得实用听力,融入主流学校教育,回归正常生活。目前,0~6 个月婴幼儿听力诊断已有短纯音听性脑干反应(tb-ABR)确定听力损失程度,需要测试 3~4 个频率,较费时,

表1 训练集和验证集的基线比较

项目		总样本 n=557	训练集 n=392	验证集 n=165	P
月龄(mean(SD))		3.78(1.56)	3.76(1.52)	3.83(1.66)	0.630
性别(%)	男	323(58.0)	227(57.9)	96(58.2)	1.000
	女	234(42.0)	165(42.1)	69(41.8)	
民族(%)	汉族	541(97.1)	380(96.9)	161(97.6)	0.894
	少数民族	16(2.9)	12(3.1)	4(2.4)	
受孕情况(%)	自然	549(98.6)	389(99.2)	160(97.0)	0.097
	试管	8(1.4)	3(0.8)	5(3.0)	
胎龄(%)	28-36+周	58(10.4)	37(9.4)	21(12.7)	0.375
	37-41+周	488(87.6)	346(88.3)	142(86.1)	
	≥42周	11(2.0)	9(2.3)	2(1.2)	
出生体重(%)	<2500 g	52(9.3)	38(9.7)	14(8.5)	0.075
	2500 g~4000 g	476(85.5)	339(86.5)	137(83.0)	
	≥4000 g	29(5.2)	15(3.8)	14(8.5)	
高龄产妇(%)	否	520(93.4)	361(92.1)	159(96.4)	0.096
	是	37(6.6)	31(7.9)	6(3.6)	
生产次数(%)	初产妇	292(52.4)	208(53.1)	84(50.9)	0.710
	经产妇	265(47.6)	184(46.9)	81(49.1)	
生产方式(%)	顺产	254(45.6)	173(44.1)	81(49.1)	0.327
	剖腹	303(54.4)	219(55.9)	84(50.9)	
PCHL 家族史(%)	无	527(94.6)	370(94.4)	157(95.2)	0.874
	有	30(5.4)	22(5.6)	8(4.8)	
NICU 住院超过5天(%)	否	430(77.2)	299(76.3)	131(79.4)	0.490
	是	127(22.8)	93(23.7)	34(20.6)	
TORCH 感染(%)	无	549(98.6)	385(98.2)	164(99.4)	0.497
	有	8(1.4)	7(1.8)	1(0.6)	
CFA_包括耳廓和耳道畸形(%)	无	505(90.7)	354(90.3)	151(91.5)	0.773
	有	52(9.3)	38(9.7)	14(8.5)	
VLBW(%)	否	551(98.9)	388(99.0)	163(98.8)	1.000
	是	6(1.1)	4(1.0)	2(1.2)	
新生儿高胆红素血症(%)	无	446(80.1)	316(80.6)	130(78.8)	0.707
	有	111(19.9)	76(19.4)	35(21.2)	
病毒性或细菌性脑膜炎(%)	无	556(99.8)	391(99.7)	165(100.0)	1.000
	有	1(0.2)	1(0.3)	0(0.0)	
新生儿窒息(%)	无	532(95.5)	374(95.4)	158(95.8)	1.000
	有	25(4.5)	18(4.6)	7(4.2)	
新生儿肺炎(%)	无	472(84.7)	329(83.9)	143(86.7)	0.489
	有	85(15.3)	63(16.1)	22(13.3)	
早产儿呼吸窘迫综合征(%)	无	549(98.6)	385(98.2)	164(99.4)	0.497
	有	8(1.4)	7(1.8)	1(0.6)	
母亲孕期曾使用耳毒性药物或滥用酒精(%)	无	555(99.6)	392(100.0)	163(98.8)	0.159
	有	2(0.4)	0(0.0)	2(1.2)	
存在或怀疑有与听损有关综合征或遗传病(%)	无	536(96.2)	376(95.9)	160(97.0)	0.725
	有	21(3.8)	16(4.1)	5(3.0)	
DPOAE(%)	通过	182(32.7)	124(31.6)	58(35.2)	0.327
	未通过	371(66.6)	264(67.3)	107(64.8)	
	闭锁	4(0.7)	4(1.0)	0(0.0)	
对声音是否有稳定反应(%)	有	507(91.0)	358(91.3)	149(90.3)	0.823
	无	50(9.0)	34(8.7)	16(9.7)	
PTA_较好耳(mean(SD))		40.14(25.00)	40.08(24.81)	40.27(25.52)	0.935
IT-MAIS 总分(mean(SD))		20.30(14.70)	20.17(14.50)	20.60(15.19)	0.752

注: TORCH, 宫内感染(包括巨细胞病毒、风疹病毒、疱疹病毒、梅毒或毒浆体原虫); VLBW, 极低出生体重

IT-MAIS 量表具有耗时短、成本低等优点, 但 IT-MAIS 得分反映的是家长感知到的听觉行为, 本质上属于主观报告, 难免受婴幼儿认知、发育水平及家庭环境等因素影响, 因此在临床上不能单独作为听力损失程度的替代诊断, 而应作为客观检查的有益补充^[21]。本研究建立并验

证了一种融合 IT-MAIS 主观报告、客观听力学检查和围产期危险因素的多模态听力损失程度预测模型, 可快速评估患儿发生不同程度听力损失的风险, 帮助临床工作者早期识别听力损失高风险人群, 更好地实现精准医疗。

本研究发现, 婴幼儿发生听力损失的独立危险因素包

表2 训练集样本不同程度听力损失的单因素分析

项目		正常-轻度 n=209	中度 n=106	重度-极重度 n=77	P
月龄(mean (SD))		3.61(1.47)	3.88(1.65)	3.98(1.47)	0.122
性别(%)	男	126(60.3)	58(54.7)	43(55.8)	0.588
	女	83(39.7)	48(45.3)	34(44.2)	
民族(%)	汉族	202(96.7)	102(96.2)	76(98.7)	0.593
	少数民族	7(3.3)	4(3.8)	1(1.3)	
受孕情况(%)	自然	207(99.0)	105(99.1)	77(100.0)	0.691
	试管	2(1.0)	1(0.9)	0(0.0)	
胎龄(%)	28~36+周	21(10.0)	10(9.4)	6(7.8)	0.499
	37~41+周	181(86.6)	94(88.7)	71(92.2)	
	≥42周	7(3.3)	2(1.9)	0(0.0)	
出生体重(%)	<2500 g	23(11.0)	9(8.5)	6(7.8)	0.877
	2500 g~4000 g	179(85.6)	92(86.8)	68(88.3)	
	≥4000 g	7(3.3)	5(4.7)	3(3.9)	
高龄产妇(%)	否	196(93.8)	101(95.3)	64(83.1)	0.004
	是	13(6.2)	5(4.7)	13(16.9)	
生产次数(%)	初产妇	122(58.4)	48(45.3)	38(49.4)	0.068
	经产妇	87(41.6)	58(54.7)	39(50.6)	
生产方式(%)	顺产	98(46.9)	41(38.7)	34(44.2)	0.382
	剖腹	111(53.1)	65(61.3)	43(55.8)	
PCHL家族史(%)	无	204(97.6)	100(94.3)	66(85.7)	0.001
	有	5(2.4)	6(5.7)	11(14.3)	
NICU住院超过5天(%)	否	162(77.5)	74(69.8)	63(81.8)	0.14
	是	47(22.5)	32(30.2)	14(18.2)	
TORCH感染(%)	无	204(97.6)	106(100.0)	75(97.4)	0.265
	有	5(2.4)	0(0.0)	2(2.6)	
CFA_包括耳廓和耳道畸形(%)	无	182(87.1)	99(93.4)	73(94.8)	0.067
	有	27(12.9)	7(6.6)	4(5.2)	
VLBW(%)	否	207(99.0)	105(99.1)	76(98.7)	0.964
	是	2(1.0)	1(0.9)	1(1.3)	
新生儿高胆红素血症(%)	无	168(80.4)	84(79.2)	64(83.1)	0.801
	有	41(19.6)	22(20.8)	13(16.9)	
病毒性或细菌性脑膜炎(%)	无	208(99.5)	106(100.0)	77(100.0)	0.645
	有	1(0.5)	0(0.0)	0(0.0)	
新生儿窒息(%)	无	199(95.2)	99(93.4)	76(98.7)	0.234
	有	10(4.8)	7(6.6)	1(1.3)	
新生儿肺炎(%)	无	177(84.7)	86(81.1)	66(85.7)	0.642
	有	32(15.3)	20(18.9)	11(14.3)	
早产儿呼吸窘迫综合征(%)	无	207(99.0)	101(95.3)	77(100.0)	0.025
	有	2(1.0)	5(4.7)	0(0.0)	
母亲孕期曾使用耳毒性药物或滥用酒精(%)	无	209(100.0)	106(100.0)	77(100.0)	-
存在或怀疑有与听损有关综合征或遗传病(%)	无	206(98.6)	105(99.1)	65(84.4)	<0.001
	有	3(1.4)	1(0.9)	12(15.6)	
	通过	122(58.4)	2(1.9)	0(0.0)	
DPOAE(%)	未通过	87(41.6)	102(96.2)	75(97.4)	<0.001
	闭锁	0(0.0)	2(1.9)	2(2.6)	
对声音是否有稳定反应(%)	有	207(99.0)	104(98.1)	47(61.0)	<0.001
	无	2(1.0)	2(1.9)	30(39.0)	
IT-MAIS总分[mean (SD)]		24.47(14.25)	20.74(13.12)	7.71(8.94)	<0.001

括母亲高龄产妇、PCHL家族史和存在或怀疑有与听损有关的综合征或遗传病。高龄产妇发生妊娠合并症和遗传病的风险明显增加,导致出现新生儿发育异常等,使新生儿发生听力损失的可能性增加,与季立等^[22]研究结论相似。婴幼儿感音神经性听力损失约65%可归因于遗传因素,大多数遗传性耳聋均为单基因隐性遗传^[23],遗传性听力损失的

绝对患病率约4.2%^[24]。有家族史的婴幼儿中患重度或极重度听力损失比例较高^[25]。其中,亲属关系的重要角色不言而喻,亲属关系越密切,后代血缘关系相距越近,遗传风险越大,反之亦然。李倩^[26]在普遍新生儿中进行回归分析发现,临床上存在或怀疑有与听损相关综合征或遗传病是明确危险因素之一,其风险增加倍数为2.978倍。

表3 训练集样本不同程度听力损失的多因素 logistic 回归分析

预测因素	β	SE	OR	95%CI	P
高龄产妇	1.01	0.48	2.73	1.08~7.10	0.034*
有 PCHL 家族史	1.20	0.55	3.32	1.15~10.00	0.026*
存在或怀疑有与听损有关综合征或遗传病	1.42	0.71	4.15	1.11~18.93	0.033*
对声音无稳定反应	2.66	0.65	14.36	4.46~60.32	<0.001*
IT-MAIS 测试年龄	0.67	0.11	1.96	1.60~2.45	<0.001*
IT-MAIS	-0.09	0.01	0.91	0.89~0.94	<0.001*
DPOAE 未通过	4.74	0.75	114.59	33.30~725.81	<0.001*

注:95%CI,95%置信区间,*表示 $P<0.05$

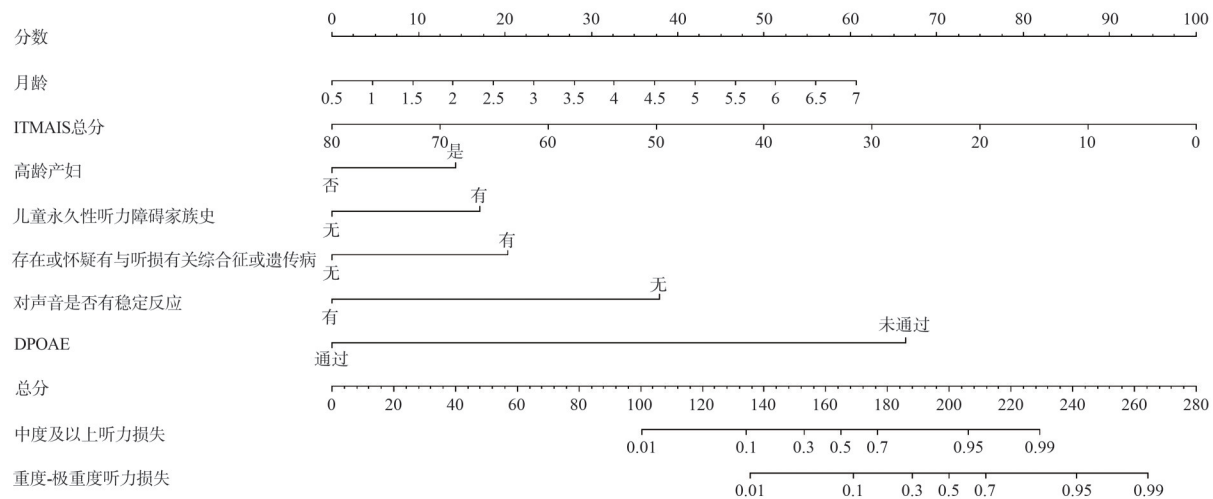


图1 预测模型可视化列线图

在建立预测模型的指标选择上,本研究除纳入既往研究被证明和听力损失程度相关的围产期危险因素,以及听力学客观测量外,还纳入了主观问诊及 IT-MAIS 得分等变量。IT-MAIS 得分除了随听力损失程度加重而降低外,不同测试年龄也会影响最终得分^[27]。父母是对孩子听力情况最敏感的,其次是言语治疗师,最不敏感的是学校老师^[28]。通过询问家长孩子对声音是否有稳定反应预测听力损失,虽然其可能低估孩子的听力问题,但如果听力损失涉及言语相关频率,中度听力损失或双侧听损时,父母能准确检测出听力损失^[14]。

本次建立的预测模型为多模态模型,IT-MAIS 仅作为其中的一个组件,其贡献在统计上受其他客观变量制约,从而提高了整体预测的客观性与稳定性。绘制列线图将预测模型可视化,量化后的指标将辅助临床医生诊断,以直观展示模型中不同变量的取值,预测不同程度听力损失的概率。在列线图的顶端的得分表示各预测变量的评分参考标准,取各项评分的总和对应下方的最终评分,再垂直比对方中度及以上听力损失和重度-极重度听力损失刻度,得出婴幼儿发生对应不同程度听力损失的风险预测值。由于不同变量的不同评分结果影响最终评分,因此得到发生中度及以上听力损失和重度-极重度听

力损失的概率也随之不同。假设 1 个 3.6 月大的婴幼儿,母亲生育年龄 39 岁,有 PCHL 家族史,家长反应孩子对声音无稳定反应,基因检测结果显示 *SLC26A4 2168 A>G* 杂合突变型,听力测试 DPOAE 未通过,IT-MAIS 得分 9.4 分,根据图 1 所示,3.6 月龄对应约 20 分,IT-MAIS 结果对应约 87 分,PCHL 家族史对应约 17 分,存在与听力损失有关的遗传病对应约 20 分,对声音无稳定反应对应约 50 分,DPOAE 未通过对应约 65 分,最终评分为 259 分,对应发生中度及以上听力损失的概率超过 99%,发生重度-极重度听力损失的概率约 98%。因此,可以预测该婴幼儿基本可以确定患有中度及以上听力损失,患重度-极重度听力损失的概率极高,建议及时进行听力学诊断及后续干预。

将本研究建立的预测模型进行验证,分别评价模型的区分度、校准度和临床效能。结果显示该预测模型区分中度及以上听力损失和重度-极重度听力损失的 AUC 分别高达 0.904 和 0.954,MAE 分别为 0.014 和 0.011,表明该模型对于不同程度听力损失的判别能力较强,且具有良好的预测能力。只关注准确性是不全面的,还需要了解预测模型能否对临床实践有帮助。因此,采用决策分析曲线方法表明,该预测模型可在一定阈值概率区间提高决策的科学性。对于听力学设备有限的医疗机构在进

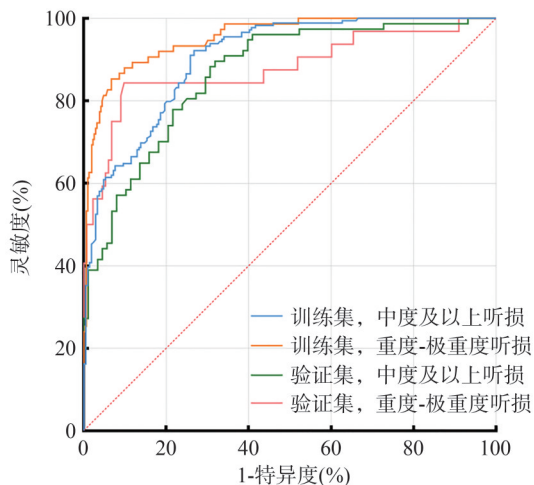


图2 模型区分不同程度听力损失的ROC曲线

行6月龄及以下婴幼儿听力筛查时,整合主观评估与客观检查的多模态模型不失为辅助判断婴幼儿听力损失严重程度方便、快捷的预测工具。

4.2 研究的局限性

本研究尚存在不足之处。首先,IT-MAIS评估属于主观报告,其得分的准确性不可避免地受婴幼儿认知、发育水平、家庭养育环境、测试者的培训经历等非听觉因素影响^[29],尽管本研究已将生长发育是否达标等作为协变量加以控制,但仍无法完全剥离混杂,可能对模型的精准度产生干扰。未来宜引入标准化发育评估量表,进一步优化校正混杂。其次,本研究模型的结局只关注较好耳听力损失程度,单侧听力损失对言语理解、声源定位和认知发育存在一定影响^[30],IT-MAIS仅能反应患儿日常生活

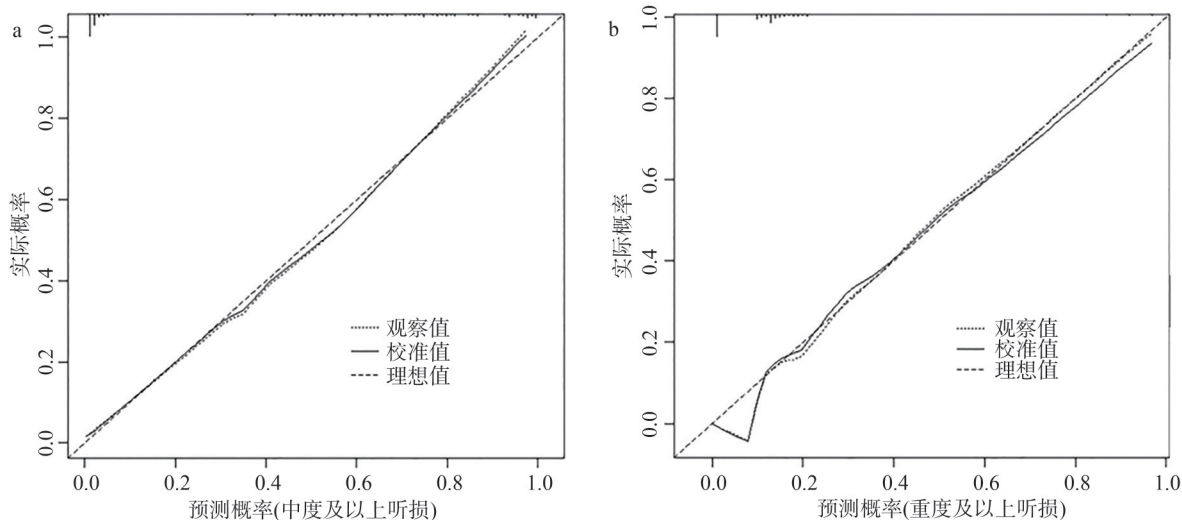


图3 模型的校准曲线图

注:校准曲线基于Bootstrap自举法重复抽样1000次进行偏差校正,平均绝对误差为0.014,样本量 $n=388$ 。a:模型预测中度及以上听损的校准曲线;b:模型预测重度-极重度听损的校准曲线

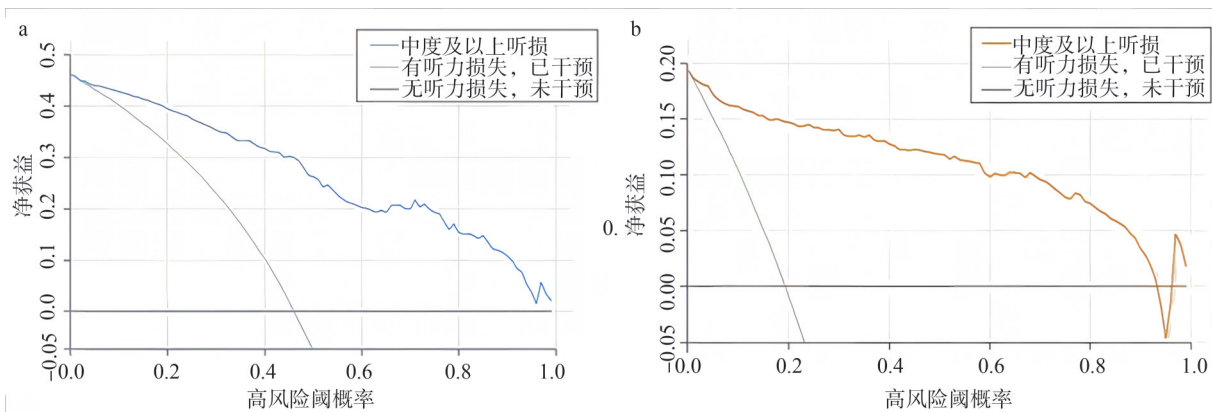


图4 模型区分不同程度听力损失的临床决策曲线

注:a:模型预测中度及以上听损的临床决策曲线;b:模型预测重度-极重度听损的临床决策曲线

的听觉能力,但单侧聋患儿也需要及时发现、干预。除此之外,本研究为单中心研究,仅采用内部验证,且预测听力损失时由于样本量的限制没有根据听力损失性质和侧别进行分组讨论,故需进一步扩大样本量并多中心合作进行外部验证,不断提升预测模型的性能,以期对难以获得准确听阈的婴幼儿听力损失程度的诊断提供科学依据。

本研究联合了围产期危险因素、听力学客观测试及IT-MAIS量表,构建并验证了多模态临床预测模型,并绘制列线图将结果可视化。该婴幼儿听力损失程度预测模型不仅有利于早期识别亟需听力评估和干预的孩子,还可以引起家长对孩子听力问题的重视,有助于医患沟通和个性化康复方案的制订。

参考文献

- [1] 聂文英,吴汉荣,戚以胜. 新生儿及婴幼儿听力损失[J]. 中国妇幼保健, 2004, 19(22): 122-124.
- [2] GBD 2015 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 310 diseases and injuries, 1990-2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015[J]. Lancet (London, England), 2016, 388(10053): 1545-1602.
- [3] 曾镇翌,张燕梅,尚美霞,等. 新生儿听力筛查与诊断质控量表的信度和效度分析[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2021, 29(2): 158-161.
- [4] Kral A, O'Donoghue GM. Profound deafness in childhood[J]. The New England Journal of Medicine, 2010, 363(15): 1438-1450.
- [5] Tomblin JB, Harrison M, Ambrose SE, et al. Language Outcomes in Young Children with Mild to Severe Hearing Loss[J]. Ear and Hearing, 2015, 36 (Suppl 1): 76S-91S.
- [6] Kral A, Kronenberger WG, Pisoni DB, et al. Neurocognitive factors in sensory restoration of early deafness: a connectome model[J]. The Lancet. Neurology, 2016, 15(6): 610-621.
- [7] Marschark M, Shaver DM, Nagle KM, et al. Predicting the Academic Achievement of Deaf and Hard-of-Hearing Students From Individual, Household, Communication, and Educational Factors[J]. Exceptional Children, 2015, 81(3): 350-369.
- [8] Khairy MA, Abuelhamed WA, Ahmed RS, et al. Hearing loss among high-risk newborns admitted to a tertiary Neonatal Intensive Care Unit[J]. The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine, 2018, 31(13): 1756-1761.
- [9] Lieu JEC, Ratnaraj F, Ead B. Evaluating a prediction model for infant hearing loss[J]. The Laryngoscope, 2013, 123(11): 2873-2879.
- [10] Beswick R, Driscoll C, Kei J, et al. Which risk factors predict postnatal hearing loss in children? [J]. Journal of the American Academy of Audiology, 2013, 24(3): 205-213.
- [11] Fitzgibbons EJ, Driscoll C, Myers J, et al. Predicting hearing loss from 10 years of universal newborn hearing screening results and risk factors [J]. International Journal of Audiology, 2021, 60(12): 1-9.
- [12] Al-Balas HI, Nuseir A, Zaitoun M, et al. The effects of mode of delivery, maternal age, birth weight, gender and family history on screening hearing results: A cross sectional study[J]. Annals of Medicine and Surgery (2012), 2021, 64: 102236.
- [13] Karaca CT, Oysu C, Toros SZ, et al. Is hearing loss in infants associated with risk factors? Evaluation of the frequency of risk factors[J]. Clinical and Experimental Otorhinolaryngology, 2014, 7(4): 260-263.
- [14] Swierniak W, Gos E, Skarzynski PH, et al. The accuracy of parental suspicion of hearing loss in children[J]. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 2021, 141: 110552.
- [15] Schaefer K, Coninx F, Fischbach T. LittleEARS auditory questionnaire as an infant hearing screening in Germany after the newborn hearing screening[J]. International Journal of Audiology, 2019, 58(8): 468-475.
- [16] 顾海玲,孔维丽,尹晓玲,等. Logistic回归联合ROC曲线评价IT-MAIS得分在预测0~36月龄婴幼儿听力损失程度中的诊断价值[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2022, 36(2): 109-114.
- [17] 中华人民共和国卫生部. 新生儿听力筛查技术规范[卫妇社发[2010] 96号][J]. 中国儿童保健杂志, 2011, 19(6): 574-575.
- [18] 陈建勇. 婴幼儿听力损失评估国际共识[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2018, 32(12): 886-890.
- [19] Butcher E, Dezateux C, Cortina-Borja M, et al. Prevalence of permanent childhood hearing loss detected at the universal newborn hearing screen: Systematic review and meta-analysis[J]. PloS One, 2019, 14(7): e0219600.
- [20] Lieu JEC, Kenna M, Anne S, et al. Hearing Loss in Children: A Review [J]. JAMA, 2020, 324(21): 2195-2205.
- [21] 李刚,郑芸,张园. 探讨IT-MAIS在儿童听力评估中的临床价值[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2016, 14(4): 275-277.
- [22] 季立,方明,陆文敏,等. 9443例新生儿听力筛查结果分析[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2018, 26(6): 661-663.
- [23] Al-Gazali LI. A genetic aetiological survey of severe childhood deafness in the United Arab Emirates[J]. Journal of Tropical Pediatrics, 1998, 44(3): 157-160.
- [24] Bener A, Eihakeem AAM, Abdulhadi K. Is there any association between consanguinity and hearing loss[J]. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 2005, 69(3): 327-333.
- [25] Fortnum DH, Davis A. Epidemiology of Permanent Childhood Hearing Impairment in Trent Region, 1985—1993[J]. British Journal of Audiology, Taylor & Francis, 1997, 31(6): 409-446.
- [26] 李倩. 聋病遗传与环境相关高危因素的流行病学研究[D]. 中国人民解放军医学院, 2014: 58-66.
- [27] Liang S, Soli SD, Zheng Y, et al. Initial classification of pediatric hearing impairment using behavioral measures of early prelingual auditory development[J]. International Journal of Audiology, 2016, 55 (4): 224-231.
- [28] Slovik Y, Goral R, Dizitzer Y, et al. Predicting hearing loss in children according to the referrer and referral cause[J]. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 2020, 128: 109685.
- [29] 李刚,郑芸,孟照莉,等. 婴幼儿有意义听觉整合量表评估极重度聋幼儿助听后早期语前听能发育的价值[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2017, 25(5): 517-520.
- [30] 陈临睿,邱鉴辉,张欠欠,等. 儿童单侧聋的临床表现与诊疗策略[J]. 临床儿科杂志, 2025, 43(12): 971-978.

收稿日期 2026-06-08
修回日期 2026-08-12
录用日期 2026-08-15
责任编辑 蒋 春