

• 临床研究 •

儿童创伤后癫痫风险预测模型构建与验证: 基于队列研究的Meta分析

张慧文, 祁红玉, 张 华, 张利娟, 王 婧, 陆巍峰*

南京医科大学附属儿童医院外科重症监护病房, 江苏 南京 210008

[摘要] 目的: 创伤后癫痫(post-traumatic epilepsy, PTE)是创伤性脑损伤(traumatic brain injury, TBI)的常见并发症, 严重影响患者预后, 早期预测 PTE 风险对临床管理至关重要, 相比成人, 儿童 PTE 相关研究较少, 且缺乏临床公认的高预测效能模型。本研究旨在构建并验证适用于儿童 TBI 患者的 PTE 风险预测列线图模型。方法: 系统检索中国知网、万方、中国生物医学文献数据库、维普、Pubmed、Embase 和 Web of Science 数据库中关于儿童 PTE 危险因素的研究, 检索时限为建库至 2024 年 10 月。采用 Stata 15.0 软件进行 Meta 分析, 根据 Meta 分析结果提取合并效应量具有显著性的风险因素。回顾性收集 2019 年 1 月—2023 年 12 月南京医科大学附属儿童医院外科重症监护病房(surgical intensive care unit, SICU)收治的 262 例 TBI 患儿, 按 7:3 比例随机划分为训练队列和内部验证队列, 基于 Meta 分析筛选的危险因素, 利用 R 软件构建多因素 Logistic 回归模型并绘制列线图。采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)评价模型区分度, Hosmer-Lemeshow 检验评估校准度, 运用决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评估临床实用性。结果: 共纳入 13 项研究, 涉及 1 371 819 例 TBI 患儿。Meta 分析显示, 中国 TBI 儿童中 PTE 的发病率为 19%(95%CI: 17%~20%)。结合 Meta 分析筛选结果和临床经验, 最终纳入 8 个危险因素构建模型: 格拉斯哥昏迷量表(Glasgow coma scale, GCS)评分、开放性脑损伤、早期痫性发作、意识丧失以及异常颅脑影像学表现(颅内血肿、脑挫伤、硬膜下出血、蛛网膜下腔出血), 预测模型在训练队列和内部验证队列的 AUC 分别为 0.801(95%CI: 0.735~0.867, $P < 0.05$)和 0.831(95%CI: 0.728~0.934, $P < 0.05$)。Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验示模型拟合良好(训练队列: $P=0.079$; 验证队列: $P=0.082$)。DCA 显示该模型具有较高临床净获益。结论: 本研究基于 Meta 分析构建的儿童 PTE 风险预测模型具有良好的区分度、校准度和临床实用性, 可作为 TBI 儿童发生 PTE 风险评估的有效工具。

[关键词] 创伤后癫痫; 创伤性脑损伤; 危险因素; 风险预测模型; 荟萃分析**[中图分类号]** R742.1**[文献标志码]** A**[文章编号]** 1007-4368(2026)01-82-12**doi:** 10.7655/NYDXBNSN250393

Development and validation of a risk prediction model for post-traumatic epilepsy in pediatric traumatic brain injury based on meta-analysis of cohort studies

ZHANG Huiwen, QI Hongyu, ZHANG Hua, ZHANG Lijuan, WANG Jing, LU Weifeng*

Surgical Intensive Care Unit(SICU), Children's Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210008, China

[Abstract] **Objective:** Post-traumatic epilepsy (PTE) is a common complication of traumatic brain injury (TBI) that significantly impacts the prognosis. Early prediction of PTE risk is crucial for clinical management. Compared to adults, research on pediatric PTE remains limited, and there is currently no widely accepted high-performance predictive model for children with TBI. This study aimed to develop and validate a nomogram prediction model for PTE risk in pediatric TBI patients. **Methods:** We systematically searched the China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Wanfang, Chinese Biomedical Literature Database (CBM), VIP, PubMed, Embase, and Web of Science for studies on risk factors of pediatric PTE, with a search timeframe from database inception to October 2024. Meta-analysis was performed using Stata 15.0 software to identify risk factors with statistically significant pooled effect sizes. A retrospective cohort of 262 children with TBI admitted to the surgical intensive care unit (SICU) of Nanjing Medical University Affiliated Children's

[基金项目] 江苏省卫健委医学科研项目(H2023116)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: LuweifengNCH@126.com(ORCID: 0000-0002-8510-4348)

Hospital from January 2019 to December 2023 was included. The children was randomly split into a training cohort (70%) and an internal validation cohort (30%). Based on the risk factors identified in the meta-analysis, a multivariate logistic regression model was constructed using R software, and a nomogram was developed. The model's discriminative ability was evaluated using the area under the receiver operating characteristic (AUC) curve, calibration was assessed *via* the Hosmer-Lemeshow test, and clinical utility was examined using decision curve analysis (DCA). **Results:** A total of 13 observational studies involving 1 371 819 TBI children were included. Meta-analysis revealed that the incidence of PTE in Chinese children with TBI was 0.190 (95% CI: 0.170-0.200). Based on the meta-analysis findings and clinical expertise, the final prediction model incorporated eight key risk factors: Glasgow Coma Scale (GCS) score, open head injury, early seizure activity, loss of consciousness, and abnormal neuroimaging findings including intracranial hematoma, cerebral contusion, subdural hemorrhage, and subarachnoid hemorrhage. The model demonstrated strong discriminative ability, with AUC of 0.801 (95% CI: 0.735-0.867, $P < 0.05$) in the training cohort and 0.831 (95% CI: 0.728-0.934, $P < 0.05$) in the validation cohort. The Hosmer-Lemeshow goodness-of-fit test indicated good calibration (training cohort: $P=0.079$; validation cohort: $P=0.082$). DCA confirmed substantial clinical net benefit. **Conclusion:** The PTE risk prediction model developed in this study, based on meta-analysis-derived risk factors, exhibits excellent discrimination, calibration, and clinical utility, serving as an effective tool for PTE risk assessment in children with TBI.

[Key words] post-traumatic epilepsy; traumatic brain injury; risk factors; risk prediction model; meta-analysis

[J Nanjing Med Univ, 2026, 46(01): 82-93]

创伤后癫痫(post-traumatic epilepsy, PTE)作为创伤性脑损伤(trumatic brain injury, TBI)的严重并发症,其临床重要性日益受到关注。研究表明,PTE不仅加重继发性脑损伤,还严重降低患者生存质量甚至增加死亡风险^[1]。根据PTE发作的时间点分为即刻癫痫样发作(伤后24 h内)、早期创伤后癫痫(early post-traumatic seizures, EPTS)(伤后1~7 d)和晚期创伤后癫痫(late post-traumatic seizures, LPTS)(伤后7 d以后),PTE通常指反复无诱因的LPTS^[2]。

流行病学研究显示,成人PTE发病率存在地域差异,2016年一篇系统综述报道成人PTE发病率为15%^[3]。2021年瑞典全国登记数据显示成人PTE发病率为6.2%^[4]。我国的研究显示3年PTE累计发病率为5.0%~9.8%^[5-6]。值得注意的是,儿童群体的流行病学研究相对匮乏,现有报道显示发生率为1.9%~32.0%^[7]。

PTE的发生与TBI严重程度密切相关^[8],这一结论得到后续多项研究证实^[9-11]。此外,研究还发现其他一些风险因素,包括:致伤机制、脑损伤部位、是否伴有局限性神经功能缺失等。Xu等^[3]对1961—2015年20篇研究进行Meta分析显示:酒精滥用史、创伤后遗忘、中线移位是PTE强危险因素,性别、神经体征、意识丧失、颅骨骨折、硬膜下出血、颅内出血、重型TBI、急性创伤后癫痫(acute post-traumatic seizures, APTS)也与PTE风险增加显著相关。

风险预测模型在临床实践中可帮助临床工作

者早期评估PTE发生风险,采取针对性预防或干预措施。预防性使用抗癫痫药物被证实能有效降低TBI患者发生PTE的风险^[12-13]。尽管目前已建立多个PTE风险预测模型^[13-16],但是这些模型普遍存在以下问题:样本来源异质性大、样本量不足、纳入变量不统一、缺乏外部验证、方法学质量参差等问题,这些缺陷严重制约了现有模型在临床实践中的应用价值。

不仅如此,PTE研究主要集中于成人个体,针对儿童群体的研究报道十分有限。鉴于儿童TBI的特殊性,建立快速、准确筛选儿童PTE高危人群筛查体系,实施有效预防和精准管理,对改善患儿预后、减轻家庭及社会负担具有重大意义。因此,开展儿童PTE专项研究迫在眉睫。针对上述问题,本研究通过Meta分析筛选危险因素,构建并验证儿童PTE风险预测模型,研究结果将为临床实践提供循证决策依据。

1 资料和方法

1.1 资料

Meta分析文献纳入标准:①已发表的中、英文文献,可检索全文;②研究类型为队列研究、横断面研究;③研究对象年龄<18岁,样本量 ≥ 50 例,且符合TBI诊断标准,美国疾病控制与预防中心将TBI定义为由头部撞击、打击或穿透性头部损伤引起的正常脑功能的中断;④影响因素定义明确(采用通用定义),经多因素Logistic回归,至少有1个影响因

素并能提供效应值[比值比(odds ratio, OR)及其95%置信区间(confidence interval, CI)],可与其他文献数据直接合并或经转换后合并;⑤结局指标,符合2014年国际抗癫痫联盟^[17](International League Against Epilepsy, ILAE)定义,TBI后至少7 d发生的反复无诱因的癫痫发作。排除标准:①重复发表的文献;②未通过质量评价的文献;③未能提供完整数据,与第一作者或通信作者联系后仍无法获取完整数据的文献,或原始数据无法转换;④综述、病例报告、学位论文、会议摘要,仅有摘要或者无法获得全文的文献。

研究对象选取2019年1月—2023年12月南京医科大学附属儿童医院外科重症监护病房(surgical intensive care unit, SICU)收治的262例TBI儿童进行回顾性研究。纳入标准:①首次发病,有明确外伤史,符合TBI的诊断标准,在脑外伤后24 h内入院,均经过CT或MRI检查;②年龄 ≤ 18 岁;③符合PTE诊断标准,TBI发生7 d后存在临床或者电生理2次或以上癫痫发作。排除标准:①住院时间 < 48 h;②合并其他原因导致入院后48 h内死亡者;③临床资料不完整;④存在导致癫痫的合并症如脑发育不良、脑血管畸形、颅内占位性病变等。

通过查阅相关文献,制定临床调查病例报告表,登记研究对象数据资料。①一般资料:性别、年龄等;②临床资料:外伤原因、入院GCS评分、住院时长、ICU住院时长、有无癫痫病史、有无即刻痫性发作、治疗方式等;③影像学指标:包括马歇尔评分、有无颅骨骨折、鞍上池受压、脑挫伤、有无脑出血、出血部位等。录入上述资料时采用双人平行录入、核对,保证数据准确性、完整性。本研究已通过南京医科大学附属儿童医院医学伦理委员会审查批准(伦理号:202412020-1),符合《赫尔辛基宣言》伦理准则并豁免患者知情同意。

1.2 方法

1.2.1 文献检索策略

计算机检索中国知网、万方数据知识服务平台、中国生物医学文献数据库、维普数据库、PubMed、Embase和Web of Science等中英文数据库公开发表的有关儿童PTE危险因素的研究,检索时限为自建库至2024年10月,并手动检索相应参考文献。采用主题词和自由词结合的形式进行检索,中文检索词包括:“儿童”“脑损伤/脑外伤/创伤性脑损伤”“癫痫/创伤后癫痫/外伤性癫痫”“危险因素/预测因素/影响因素”等,英文检索词包括:“Brain Inju-

ries, Traumatic” OR “Traumatic Brain Injuries” OR “Brain Trauma” OR “Traumatic Encephalopathies”) AND (“Post-Traumatic Epilepsy” OR “Post-Traumatic Seizure” OR “Late Post-Traumatic Seizures” OR “Early Post Traumatic Seizure”) AND (“Infant” OR “Newborn” OR “Neonate” OR “Child” OR “Children” OR “Preschool”) AND (“Related Variable” OR “Prognostic Factor” OR “Epidemiologic Factor”。

1.2.2 文献筛选、资料提取与文献质量评价

由2名经过系统培训的研究者手工去重、独立浏览、筛选文献、提取资料、交叉核对。1名研究者根据制定的数据提取表进行资料提取,包括第一作者、发表年份、地区、研究类型、样本量、性别、年龄、随访时间、诊断标准、经多因素校正的影响因素及效应量。另1名研究者核对。采用Cochrane协作网推荐的纽卡斯尔—渥太华量表(Newcastle-Ottawa scale score, NOS)进行评价,包括研究对象的选择、组间可比性以及结果测量3个维度、8个条目,共计9分, ≥ 7 分为高质量,5~6分为中等质量, ≤ 4 分为低质量。本研究选取NOS评分 > 5 分的文献。如果在筛选文献和资料提取过程中遇到分歧,经过协商讨论或者咨询第3名研究者后最终决策。

1.2.3 风险预测模型构建与验证

基于Meta分析筛选结果和临床经验选择,纳入危险因素进行多变量Logistic回归,构建TBI儿童PTE患病风险预测模型。随机划分队列为训练队列和内部验证队列,基于训练队列构建列线图预测模型,预测PTE发生风险,并在内部验证队列中检验模型的效能。

1.3 统计学方法

1.3.1 Meta分析

采用Stata 26.0软件进行Meta分析。为保证结果的稳定性,仅保留纳入研究数量 ≥ 3 篇的影响因素。效应量采用OR值和95%CI。异质性检验采用 I^2 统计量:若 $I^2 \leq 50\%$ 且 $P \geq 0.1$,采用固定效应模型;若 $I^2 > 50\%$, $P < 0.1$,采用随机效应模型。采用固定效应模型和随机效应模型转换进行敏感性分析,评估Meta分析结果的稳定性。对于纳入研究数量 ≥ 10 篇,则采用Egger's回归分析法评价发表偏倚(检验水准 $\alpha = 0.05$),否则不进行发表偏倚分析。

1.3.2 模型构建及验证

利用R 4.3.2软件进行数据分析,符合正态分布的计量资料以均值 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)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中

位数(四分位数) $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示, 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验; 计数资料以频数(百分比)形式表示, 组间比较采用 χ^2 检验。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。利用 R 4.3.2 软件进行共线性诊断, 若方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF) ≥ 10 或若容忍度 < 0.1 , 提示存在共线性。按 7:3 比例随机分配研究对象至建模队列和内部验证队列。基于以下标准筛选风险因素: Meta 分析合并结果中具有统计学意义($P < 0.05$)的影响因素、文献回顾证据支持的因素、专家咨询以及既往 PTE 预测模型构建经验, 建立预测模型并绘制列线图。采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,

ROC)计算曲线下面积(area under the curve, AUC)检验该模型的预测能力以及区分度, 通过决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评价模型临床实用性。采用 Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验评价模型的准确度。

2 结果

2.1 文献检索及筛选

数据库初检共获得文献 5 192 篇, 其中中文文献 868 篇, 英文文献 4 324 篇, 根据纳入和排除标准^[18-30]筛查后, 最终纳入 13 篇, 文献筛选流程见图 1。

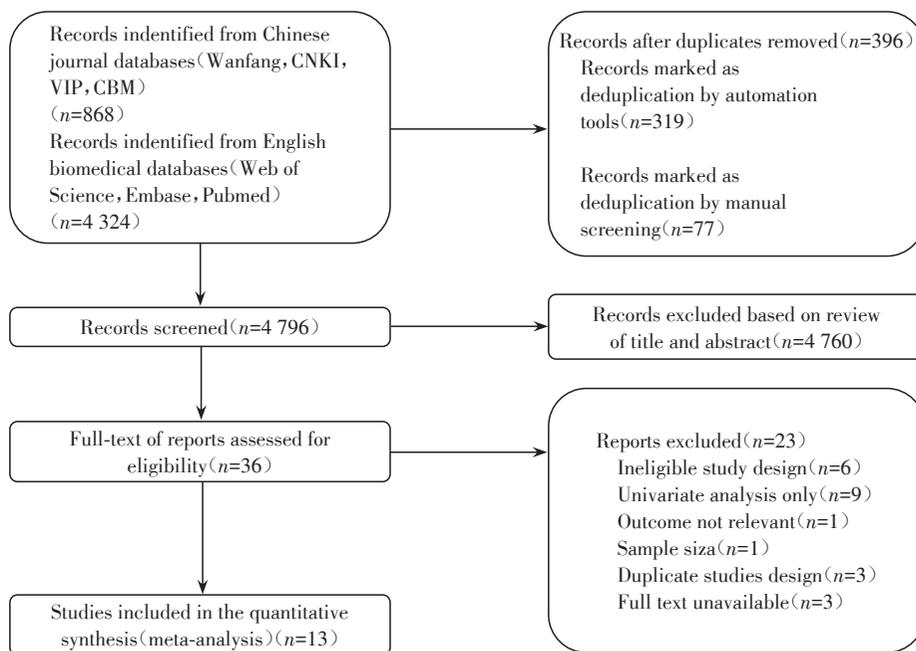


图1 文献筛选流程

Figure 1 Flow chart of study selection

2.2 纳入文献特征和质量评价

研究类型包括队列研究、病例对照研究和横断面研究, 其中 12 篇为回顾性研究, 1 篇为前瞻性研究。研究中 8 项来自中国, 2 项来自美国。共涉及 18 个影响因素。中国地区总样本量为 1 918 例, 其中病例组 395 例, 对照组 1 523 例, TBI 儿童 PTE 的发生率为 0.8%~48.5%, 中国儿童 PTE 发生率为 12.2%~48.5%。各研究 NOS 评分均 ≥ 5 分。纳入文献基本特征和质量评价结果见表 1。

2.3 Meta 分析结果

文献报告次数 ≥ 3 次的危险因素有 10 个: 年龄、格拉斯哥昏迷量表(Glasgow coma scale, GCS)、开放性脑损伤、早期痫性发作、意识丧失、外科手术治

疗、颅内出血、脑挫伤、硬膜下出血(subdural hemorrhage, SDH)、蛛网膜下腔出血(subarachnoid hemorrhage, SAH), Meta 分析结果显示年龄[OR=1.059, 95%CI (0.904~1.240), $P=0.476$]、GCS [OR=1.466, 95%CI (0.977~2.199), $P=0.065$]、外科手术[OR=1.256, 95%CI (0.643~4.790), $P=0.504$]无显著性, 其余 7 项均有显著性。颅内血肿、SAH 在研究间异质性可忽略, 采用固定效应模型进行 Meta 分析, 其他 6 项采用随机效应模型(表 2)。敏感性分析结果显示 GCS、颅内血肿、SAH 结果稳健, 其余危险因素结果稳定性可能受研究间异质性影响(表 3)。同时, Meta 分析合并效应量显示, 儿童 TBI 群体中 PTE 发生风险为 0.190 (95%CI: 0.170~0.200)。

表1 纳入文献的基本特征及文献质量评价结果

Table 1 Characteristics and quality appraisal results of included studies

First author	Publication year	Research year	Follow-up duration(years)	Country/Region	Study design
Yang ^[18]	2021	2015.1–2018.12	2.0	Xuzhou, China	Retrospective study
Li ^[19]	2022	2005.1–2015.1	3.4(1.2, 6.3)	Wenzhou, China	Retrospective cohort study
Zhang ^[20]	2024	2016.6–2022.6	–	Jiangxi, China	Retrospective study
Zhu ^[21]	2018	2013.1–2018.1	–	Nanchang, China	Retrospective cohort study
Zhang ^[22]	2022	2015.12–2020.10	0.5	Nanjing, China	Retrospective cohort study
Liu ^[23]	2024	2015.1.1–2023.1.1	–	Chengdu, China	Retrospective cohort study
Li et al ^[24]	2024	2011.1–2021.12	–	Chongqing, China	Retrospective case-control study
Ulgen et al ^[25]	2023	2014–2021	0.5	Antalya, Turkey	Retrospective cohort study
Ji et al ^[26]	2022	2016.1–2020.12	–	Beijing, China	Retrospective study
Elsamadicy et al ^[27]	2021	2010–2014	–	USA	Retrospective cohort study
Rumalla et al ^[28]	2018	2003–2012	–	USA	Retrospective cohort study
Ong et al ^[29]	1996	1993.11–1994.12	–	Malaysia	Prospective observational study
Mikkonen et al ^[30]	2020	2003–2013	–	Finland	Retrospective cohort study

First author	Sex (Male/Female)	Age(years)	Case group(n)	Control group(n)	Total sample size(n)	Positive rate(%)	Risk factors	NOS score
Yang ^[18]	166/147	(8.87±4.69)(PTE); (9.74±4.87)(non-PTE)	74	239	313	23.6	c, e, i, j, o	7
Li ^[19]	203/84	6.8(1, 14)	59	231	290	20.3	acfhijklmp	7
Zhang ^[20]	96/76	6.8(1, 14)	21	151	172	12.2	cdiqr	7
Zhu ^[21]	152/104	0.17–14.00	38	218	256	14.8	acdqij	6
Zhang ^[22]	207/181	8.22±3.16	52	336	388	13.4	ijo	7
Liu ^[23]	159/100	6.69(1, 12)	52	207	259	20.1	l	7
Li et al ^[24]	86/66	3.32(1.88, 5.98)	64	68	132	48.5	cej	7
Ulgen et al ^[25]	298/179	5.5(2.25, 0.17)	58	409	477	12.2	ei	6
Ji et al ^[26]	68/40	4.92±3.92	35	73	108	32.4	dh	8
Elsamadicy et al ^[27]	790 163/453 708	<18	10 340	1 233 747	1 244 087	0.8	acdqjlmn	7
Rumalla et al ^[28]	85 748/38 696	<18	8 597	115 847	124 444	6.9	acdqhmn	7
Ong et al ^[29]	147/88	<15	53	182	235	22.5	abqm	6
Mikkonen et al ^[30]	–	15(13, 17)	59	231	290	20.3	achk	8

Note: a=age, b=sex, c=Glasgow coma scale (GCS), d=open head injury, e=early seizure activity, f=abnormal pupillary light reflex, g=loss of consciousness, h=surgical intervention, i=intracranial hemorrhage, j=cerebral contusion, k=suprasellar cistern compression, l=subarachnoid hemorrhage, m=subdural hemorrhage, n=epidural hemorrhage, o=lobar injury, p=brain herniation, q=cerebral infarction, r=hydrocephalus. NOS: Newcastle-Ottawa Scale; “–”: data not reported in the study.

2.4 患者基线特征

共纳入 262 例 TBI 患儿，年龄为 1 个月~15 岁 10 个月，5.42(3.00, 9.23)岁。男 175 例(66.8%)，女 87 例(33.2%)。发生 PTE 者 65 例，发病率为 24.8% (表 4)。

2.5 预测模型的构建

262 例患儿按 7:3 被随机分组，183 例(70%)进入 ykxa 队列，79 例(30%)进入内部验证队列。两组 PTE 发生率为 24.0%(44/183)和 26.6%(21/79)，Meta 分析筛选的 7 个危险因素以及 GCS 评分在两组间的

比较差异均具有统计学意义(P均> 0.05)，两组基线资料见表 5。8 个变量容忍度均>0.1 且 VIF<10，不存在共线性。以 PTE 为因变量(赋值: PTE=1, Non-PTE=0)，在训练队列中构建 Logistic 回归预测模型，并绘制列线图(图 2)。通过列线图对每个变量相应数值进行评分，所有变量的分数之和即为变量总评分，根据总分绘制垂直线可估算 TBI 儿童发生 PTE 的概率。

2.6 预测模型的检验和评价

预测模型预测 TBI 患儿发生 PTE 的 ROC 曲线评

表2 儿童PTE风险因素的Meta分析结果

Table 2 Meta-analysis results of risk factors for pediatric PTE in children

Risk factor	Number of studies	References	Sample size(n)	Heterogeneity analysis	
				I ² (%)	P
Age	3	[19, 21, 30]	836	75.8	0.006
GCS score	8	[18, 19, 20, 21, 24, 27, 28, 30]	126 274	92.6	0.065
Open head injury	5	[20, 21, 26, 27, 28]	1 244 623	47.8	0.287
Immediate seizure	3	[18, 24, 25]	922	93.7	<0.01
Loss of consciousness	4	[21, 27, 28, 29]	1 369 022	98.8	<0.001
Neurosurgical treatment	4	[19, 26, 28, 30]	125 132	78.5	0.003
Intracranial hematoma	4	[19, 20, 21, 22]	1 100	40.7	0.167
Cerebral contusion	6	[19, 21, 22, 24, 27, 30]	1 245 443	82.0	<0.01
Subdural hemorrhage	4	[19, 27, 28, 29]	1 369 056	95.5	<0.01
Subarachnoid hemorrhage	3	[19, 23, 27]	1 244 636	0	0.999

Risk factor	Effect model	Pooled result			
		OR	95%CI	Z score	P
Age	Random	1.059	0.904-1.240	0.71	0.476
GCS score	Random	1.466	0.977-2.199	1.85	0.065
Open head injury	Fixed	1.750	1.310-2.340	3.78	<0.01
Immediate seizure	Random	3.043	1.933-4.790	4.81	<0.01
Loss of consciousness	Random	3.023	1.299-7.037	2.57	0.010
Neurosurgical treatment	Random	1.256	0.643-2.453	0.67	0.504
Intracranial hematoma	Fixed	3.796	2.700-4.892	6.79	<0.01
Cerebral contusion	Random	2.708	1.379-5.321	2.89	<0.01
Subdural hemorrhage	Random	1.302	1.165-1.438	18.66	<0.01
Subarachnoid hemorrhage	Fixed	4.143	3.150-5.135	11.90	<0.01

Gcs: Glasgow coma scale.

表3 风险因素的敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of risk factors

Risk factor	Fixed-effects model		Random-effects model	
	OR	95% CI	OR	95% CI
Age	1.077	1.022-1.135	1.044	0.600-1.817
GCS score	0.970	0.892-1.056	1.486	0.836-2.633
Open head injury	1.750	1.310-2.340	1.554	0.536-5.523
Immediate seizure	3.043	1.933-4.790	4.540	0.622-33.119
Loss of consciousness	1.856	1.744-1.975	2.950	1.566-5.555
Neurosurgical treatment	1.493	1.312-1.670	1.173	0.439-3.138
Intracranial hematoma	4.216	3.200-5.555	3.723	2.459-5.639
Cerebral contusion	4.320	3.566-5.231	2.648	1.173-5.981
Subdural hemorrhage	3.676	3.206-4.214	2.587	1.089-6.148
Subarachnoid hemorrhage	4.183	3.305-5.294	4.183	3.305-5.294

估模型区分度, 训练队列 AUC 为 0.80(95%CI: 0.74~0.87, $P < 0.05$, 图 3A), 内部验证队列 AUC 为 0.83(95%CI: 0.73~0.93, $P < 0.05$)(图 3B), 结果表明预测模型具有良好区分能力。DCA 评估模型的临床有效性。如果医生和患者的阈值率 >20%, 则在当前研

究中使用该列线图预测 PTE 的发生风险会比对所有患者实施干预方案更有效, 在这个范围内, 预测模型的净收益显著高于两个极端情况, 即所有患者都被给予临床干预, 结果见图 4。Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验评价模型校准度, 检验结果显示在建

表4 TBI患儿的基线资料比较
Table 4 General information of children with TBI

Variable	Total(n=262)	PTE group(n=65)	Non-PTE group(n=194)	P
Male[n(%)]	175(66.8)	129(65.5)	6(70.8)	0.527
Age[years, M(P ₂₅ , P ₇₅)]	5.42(3.00, 9.23)	5.92(3.58, 10.08)	3.92(0.75, 6.58)	<0.001
Age categories[years, n(%)]				0.011
0-5	123(46.9)	83(42.1)	40(61.5)	
5-12	82(31.3)	64(32.5)	18(27.7)	
12-18	57(21.8)	50(25.4)	7(10.8)	
GCS score[M(P ₂₅ , P ₇₅)]	10.00(6.00, 15.00)	12.00(7.00, 15.00)	6.00(5.00, 8.00)	<0.001
Parameters	101(38.5)	92(46.7)	9(13.8)	
GCS score[M(P ₂₅ , P ₇₅)]	41(15.6)	36(18.3)	5(7.7)	
GCS categories[n(%)]	120(45.8)	69(35.0)	51(78.5)	<0.001
Hospital stay[days, M(P ₂₅ , P ₇₅)]	15.00(10.00, 24.00)	13.00(10.00, 20.25)	24.00(14.00, 29.00)	<0.001
ICU stay[days, M(P ₂₅ , P ₇₅)]	13.00(8.00, 22.00)	11.00(7.00, 16.00)	23.00(13.00, 28.00)	<0.001
Loss of consciousness[n(%)]	162(61.8)	109(55.3)	53(81.5)	<0.001
Immediate seizures[n(%)]	49(18.7)	25(12.7)	24(36.9)	
Injury mechanisms[n(%)]				<0.001
Traffic accident	157(59.9)	124(62.9)	33(50.8)	
Fall(≤1 m)	21(8.0)	7(3.6)	14(21.5)	
Fall(>1 m)	66(25.2)	55(27.9)	11(16.9)	
Violent injury	13(5.0)	9(4.6)	4(6.2)	
Unkown	5(1.9)	2(1.0)	3(4.6)	
Conservative management[n(%)]	199(76)	163(82.2)	36(55.4)	<0.001
Neurosurgical operation[n(%)]	45(17.2)	24(12.2)	21(32.3)	<0.001
Decompressive craniectomy[n(%)]	24(9.2)	7(3.6)	17(26.2)	<0.001
Open head injury[n(%)]	57(21.8)	49(24.9)	8(12.3)	0.05
Subdural hemorrhage[n(%)]	86(32.8)	56(28.4)	30(46.2)	0.013
Epidural hemorrhage[n(%)]	43(16.4)	36(18.3)	7(10.8)	0.221
Intracranial hematoma[n(%)]	49(18.7)	26(13.2)	23(35.4)	<0.001
Intraventricular hemorrhage[n(%)]	28(10.7)	12(6.1)	16(24.6)	<0.001
Subarachnoid hemorrhage[n(%)]	147(56.1)	97(49.2)	50(76.9)	<0.001
Diffuse axonal injury[n(%)]	75(28.6)	50(25.4)	25(38.5)	0.062
Cerebral contusion[n(%)]	152(58.0)	98(49.7)	54(83.1)	<0.001
Skull fracture[n(%)]	158(60.3)	117(59.4)	41(63.1)	0.704
Suprasellar cistern compression[n(%)]	203(77.5)	167(84.8)	36(55.4)	<0.001
Marshall CT classification[M(P ₂₅ , P ₇₅)]	2.00(2.00, 6.00)	2.00(1.00, 2.00)	6.00(2.00, 6.00)	<0.001

模队列和验证队列中模型预测值与实际观测值之间的差异没有统计学意义(建模队列: $P=0.079$; 验证队列: $P=0.082$), 模型拟合良好(图5)。

3 讨论

本研究通过对13项TBI儿童PTE危险因素研究进行了Meta分析, 基于Meta分析筛选结果构建风险预测模型并绘制列线图, 该模型在内部验证队列中表现出较好的区分能力及校准度, 本研究显示该模型具有较好的临床价值。

2022年一篇针对儿童PTE的Meta分析研究^[31]显示儿童PTE的发病率为10% (95% CI: 5.9%~15.0%), 而本回顾性队列中TBI患儿的PTE发病率为24.8%, 其中中国地区发病率为19.0%。值得注意的是本研究最终纳入的文献中有3项是ICU队列, 其中来自北京和重庆报道的发病率分别为32.4%^[24]和48.5%^[26], 这可能与其纳入研究对象分别为中重度TBI和重度TBI患儿相关。PTE发病率的差异与研究样本特征密切相关, 地区、遗传因素、外伤机制、医疗水平等都可能影响结果。因此儿童TBI后

表5 训练队列与验证队列的基线资料比较

Table 5 Comparison of general characteristics between training cohort and validation cohort

Variable	Total(n=262)	Traning cohort(n=183)	Validation cohort(n=79)	P
PTE[n(%)]	65(24.8)	44(24.0)	21(26.6)	0.779
Male[n(%)]	175(66.8)	128(69.9)	47(59.5)	0.132
Age[years, M(P ₂₅ , P ₇₅)]	5.42(3.00, 9.23)	5.08(2.96, 8.50)	6.00(3.16, 10.25)	0.112
Age categories[years, n(%)]				0.221
0-5	123(46.9)	91(49.7)	32(40.5)	
5-12	82(31.3)	57(31.1)	25(31.6)	
12-18	57(21.8)	35(18.2)	22(27.8)	
GCS score[M(P ₂₅ , P ₇₅)]	10.0(6.0, 15.0)	9.0(6.0, 14.0)	12.00(6.00, 15.00)	0.153
GCS categories[n(%)]				0.283
13-15	101(38.5)	65(35.5)	36(45.6)	
9-12	41(15.6)	29(15.8)	12(15.2)	
3-8	120(45.8)	89(48.6)	31(39.2)	
Loss of consciousness[n(%)]	162(61.8)	116(63.4)	46(58.2)	0.515
Immediate seizures[n(%)]	49(18.7)	40(21.9)	9(11.4)	0.069
Open head injury[n(%)]	57(21.8)	38(20.8)	19(24.1)	0.668
Subdural hemorrhage[n(%)]	86(32.8)	59(32.2)	27(34.2)	0.870
Intracranial hematoma[n(%)]	49(18.7)	35(19.1)	14(17.7)	0.924
Subarachnoid hemorrhage[n(%)]	147(56.1)	106(57.9)	41(51.9)	0.444
Cerebral contusion[n(%)]	152(58.0)	114(62.3)	38(48.1)	0.046

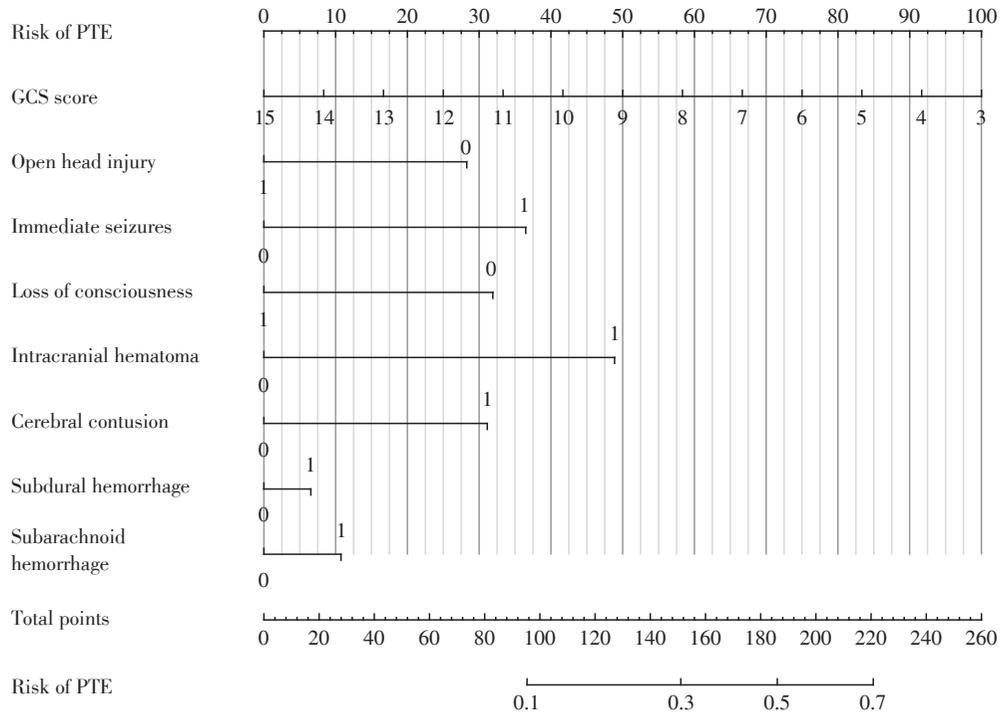


图2 TBI儿童发生PTE的预测模型列线图

Figure 2 Nomogram prediction model for PTE in children with TBI

PTE发病率仍需更大样本、高质量的流行病学研究进一步证实。

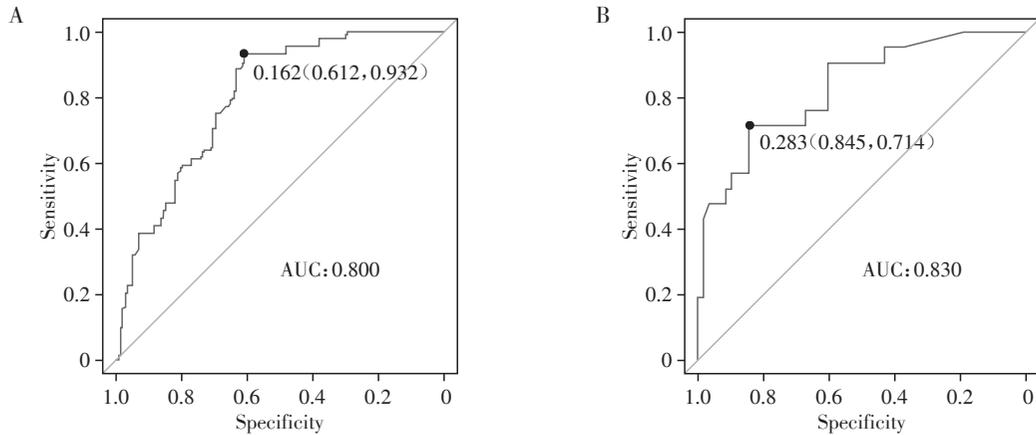
本研究风险预测模型最终纳入8个危险因素:

临床特征(GCS评分、开放性脑损伤、早期癫痫样发作、意识丧失)以及异常颅脑影像学表现(颅内血肿、脑挫伤、SDH、SAH),除GCS评分外,其余7项来

自Meta分析筛选结果。在模型构建变量筛选方法上,本研究创新性地采用Meta分析结合临床因素的筛选标准,来确定纳入Logistic回归模型的变量,而非传统的逐步回归、LASSO、弹性网络等经典方法。

PTE发生风险与损伤严重程度密切相关,前述Meta分析证实,儿童严重TBI显著增加PTE风险(OR=1.81, 95% CI =1.23~2.67, $P < 0.001$)^[31],另有研

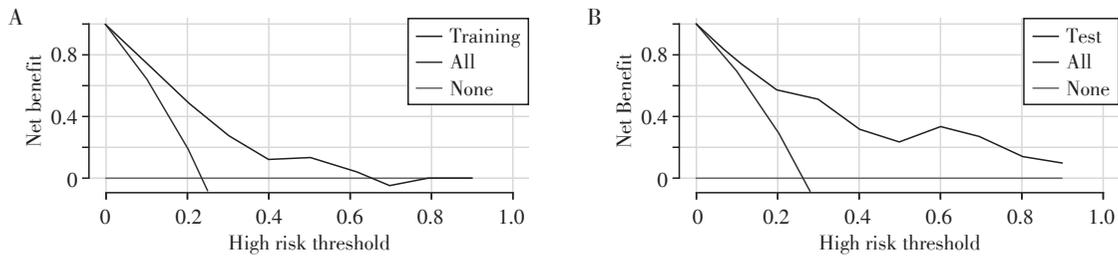
究显示轻型TBI的癫痫发生率是普通人群的2倍,而重型TBI则高达7倍^[32]。TBI的严重程度可通过GCS来衡量。国内学者通过回顾性分析发现GCS评分(OR=29.081, 95% CI: 3.125~270.614, $P=0.003$)和血清乳酸是儿童重型颅脑损伤预后的独立危险因素^[33]。虽然在本研究GCS评分的合并效应量没有统计学意义(OR=1.466, 95% CI: 0.977~2.199, $P=0.065$),



A: ROC curve of the prediction model in the training cohort. B: ROC curve of the prediction model in the internal validation cohort.

图3 风险预测模型预测TBI儿童发生PTE的ROC曲线

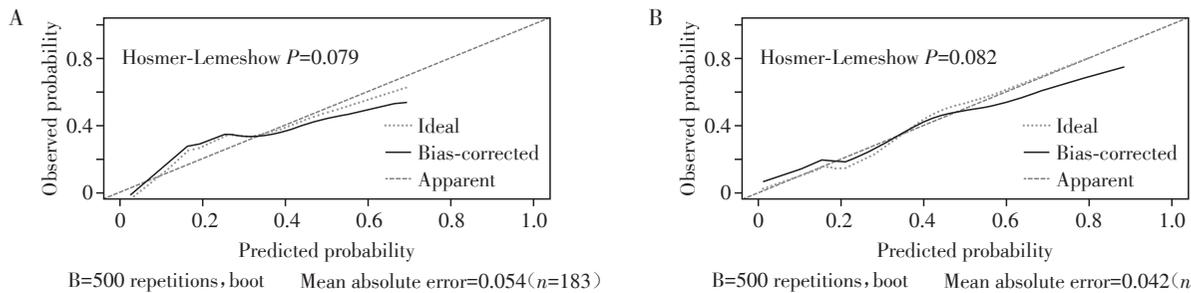
Figure 3 ROC curve of the prognostic model for PTE in children with TBI



A: DCA of the prediction model in the training cohort. B: DCA of the prediction model in the validation cohort. All: scenario where all samples are considered positive (intervention for all), with net benefit represented by a negative-slope line; None: scenario where no samples were intervened (intervention for none), yielding a net benefit of 0.

图4 风险预测模型预测TBI儿童发生PTE的DCA曲线

Figure 4 DCA curves of the prognostic model for forecasting PTE in children with TBI



A: Calibration curve of the prediction model in the training cohort. B: Calibration curve of the prediction model in the internal validation cohort. Apparent: apparent calibration (unadjusted); Bias-corrected: bias-corrected calibration after adjustment; Ideal: reference line of perfect calibration.

图5 风险预测模型预测TBI儿童发生PTE的校准曲线

Figure 5 Calibration curve analysis of the prognostic model for forecasting PTE probability in TBI children

但结合其临床意义, 仍将其纳入预后模型。即刻癫痫样发作作为风险因素与既往研究一致^[18,24-25,34-35], 被作为具有显著相关的变量纳入模型。但其与PTE在病理生理机制上的关系仍需要深入探讨。需要注意的是现有临床研究还存在没有严格细分早期癫痫样发作、早期PTS或者晚期PTS的问题, 甚至在数据分析时也会混淆概念。影像学方面: 颅内血肿、脑挫伤、SDH、SAH是有统计学意义的危险因素。成人TBI研究中^[13-14,36]硬膜下血肿被作为独立危险因素纳入模型构建。在文献筛选和资料录入过程中, 发现只有2项研究提出损伤部位是PTE的独立危险因素^[18,22], 因此没有对该因素进行Meta分析, 但从功能解剖学上而言, 颅脑任何部位的皮质外伤都可能引起PTE, 其中57%表现为颞区癫痫, 35%为额区癫痫, 顶枕区癫痫各约占3%。因此还需要更多的损伤机制基础研究支持。

目前已有多个PTE风险预测模型的研究发表^[14-16,35], 包括: 基于美国的TBI模型系统国家数据库(TBIMS)通过Lasso回归选择变量生成4个预测模型量化中重度TBI后PTE发病风险^[16], 以及基于多变量Cox比例风险模型(采用逐步向前法)在大样本队列中生成的列线图模型等^[14]。这些模型的区分及校准能力良好, 但是均针对成人, 无法直接适用于儿童。儿童领域的研究明显滞后。目前仅有一项工作尝试多因素Logistic回归方法筛选变量后构建预测模型, 该模型预测价值尚可(AUC \geq 0.7), 但未对变量选择方法、缺失数据处理方法进行说明, 且缺乏验证, 无法评估该模型的普遍适用性^[22]。

相比既往工作, 本研究有以下优势。第一, 虽然许多PTE的风险因素已被发现, 但这些研究存在研究设计欠规范、研究对象纳入标准不一、样本量不足等问题, 本研究采用高质量的Meta(循证医学最高证据等级)整合了5个国家13项研究数据, 严格执行纳入标准, 确保研究同质性, 特别限定儿科患者, 排除年龄不明确的队列。同时纳入中英文文献提高代表性, 避免数据缺失偏倚。既扩大样本量, 也弥补了回归模型的不稳定性, 提高了统计效能, 使筛选结果更加具有说服力。第二, 既往研究多采用病例对照研究或者队列研究设计, 因其样本量少、研究区域单一, 临床指导价值有限。本研究建模队列来自国内三级创伤中心ICU, 且列线图风险模型在内部验证队列中表现良好。本模型中纳入的变量在国内不同医疗水平的医院均容易获得, 因此认为可以适用于不同医疗水平的医疗单位。

本研究也存在一定局限性。第一, 因纳入研究设计和研究人群差异, 文献之间的异质性不能避免, 但受原始资料难以获得以及纳入研究数量的限制, 未进行亚组分型来减少异质性。第二, 涉及某些影响因素的研究数如果少于3篇则未纳入Meta分析及模型构建, 可能遗漏部分PTE危险因素。第三, 作为回顾性分析, 纳入Meta分析的临床研究均未报道潜在混杂因素及其调整情况, 可能引入偏倚。第四, 本研究采用的是单中心样本, 仅在内部进行验证, 未来需要通过多中心研究或者医学数据库挖掘等方法获得大样本外部验证提高模型的稳定性。

综上所述, 本研究通过Meta分析筛选出风险变量, 构建了一个简单且可靠的儿童PTE风险预测模型, 该模型的建立有望成为临床识别TBI儿童PTE高危对象的有效工具, 为健康教育及临床干预策略的制定提供依据, 以减轻家庭及社会的经济负担, 并有望降低儿童PTE发生率, 未来该模型仍需要进一步验证及优化。

利益冲突声明:

全体作者均声明无利益冲突。

Conflict of Interests:

All authors declare no conflict of interests.

作者贡献声明:

陆巍峰、张慧文负责研究方案设计; 张慧文、张利娟负责统计学方法设计; 张慧文、祁红玉、张华负责获取、收集、解释研究数据; 王婧、陆巍峰负责文章审阅, 修改稿件内容。

Author's Contributions:

LU Weifeng and ZHANG Huiwen designed the research. ZHANG Huiwen and ZHANG Lijuan designed the statistical methods. ZHANG Huiwen, QI Hongyu, and ZHANG Hua acquired, collected, and interpreted the data. WANG Jing and LU Weifeng reviewed and revised the manuscript.

[参考文献]

- [1] PEASE M, GUPTA K, MOSHÉ S L, et al. Insights into epileptogenesis from post-traumatic epilepsy[J]. *Nat Rev Neurol*, 2024, 20(5): 298-312
- [2] FORDINGTON S, MANFORD M. A review of seizures and epilepsy following traumatic brain injury[J]. *J Neurol*, 2020, 267(10): 3105-3111
- [3] XU T, YU X, OU S, et al. Risk factors for posttraumatic epilepsy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Epilepsy Behav*, 2017, 67: 1-6
- [4] KARLANDER M, LJUNGQVIST J, ZELANO J. Post-traumatic epilepsy in adults: a nationwide register-based study[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2021, 92(6):

- 617-621
- [5] CHRISTENSEN J. The epidemiology of posttraumatic epilepsy[J]. *Semin Neurol*, 2015, 35(3): 218-222
- [6] ORLAND M L, DALZIEL S R, PHILLIPS N, et al. Incidence of traumatic brain injuries in head-injured children with seizures [J]. *Emerg Med Australas*, 2023, 35(2): 289-296
- [7] KAZIS D, CHATZIKONSTANTINOUS S, CIOBICA A, et al. Epidemiology, risk Factors, and biomarkers of post-traumatic epilepsy: a comprehensive overview [J]. *Bio-medicines*, 2024, 12(2): 410
- [8] SUI S, SUN J, CHEN X, et al. Risk of epilepsy following traumatic brain injury: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Head Trauma Rehabil*, 2023, 38(4): E289-E298
- [9] YU T, LIU X, SUN L, et al. Clinical characteristics of post-traumatic epilepsy and the factors affecting the latency of PTE[J]. *BMC Neurol*, 2021, 21(1): 301
- [10] SØDAL H F, STORVIG G, TVERDAL C, et al. Early post-traumatic seizures in hospitalized patients with traumatic brain injury [J]. *Acta Neurol Scand*, 2022, 146(5): 485-491
- [11] GOPALAN H, P K, S A, et al. Use of Anti-epileptic drugs for post traumatic seizure: a global survey [J]. *Ann Neurosci*, 2023, 30(1): 26-32
- [12] SAMARA Q A, IFRAITEKH A S, AL JAYYOUSI O, et al. Use of antiepileptic drugs as prophylaxis against posttraumatic seizures in the pediatric population: a systematic review and meta-analysis [J]. *Neurosurg Rev*, 2023, 46(1): 49
- [13] LOCSKAI L F, ALYENBAAWI H, ALLISON W T. Anti-epileptic drugs as potential dementia prophylactics following traumatic brain injury [J]. *Annu Rev Pharmacol Toxicol*, 2024, 64: 577-598
- [14] WANG X P, ZHONG J, LEI T, et al. Development and external validation of a predictive nomogram model of posttraumatic epilepsy: a retrospective analysis [J]. *Seizure*, 2021, 88: 36-44
- [15] OU S J, SUN L F, LU Y L, et al. Development and validation of a prognostic model to predict late seizures after traumatic brain injury: a retrospective analysis [J]. *J Craniofac Surg*, 2024, 36(5): 1827-1834
- [16] AWAN N, KUMAR R G, JUENGST S B, et al. Development of individualized risk assessment models for predicting post-traumatic epilepsy 1 and 2 years after moderate-to-severe traumatic brain injury: a traumatic brain injury model system study [J]. *Epilepsia*, 2025, 66(2): 482-498
- [17] SPECCHIO N, WIRRELL E C, SCHEFFER I E, et al. International league against epilepsy classification and definition of epilepsy syndromes with onset in childhood: position paper by the ILAE task force on nosology and definitions [J]. *Epilepsia*, 2022, 63(6): 1398-1442
- [18] 杨 晗, 陈雨清, 于如同. 儿童脑外伤后癫痫的发病危险因素及预后影响因素 [J]. *山东医药*, 2021, 61(30): 53-56
- YANG H, CHEN Y Q, YU R T. Risk factors and prognostic factors of epilepsy after traumatic brain injury in children [J]. *Shandong Medical Journal*, 2021, 61(30): 53-56
- [19] 李 乐, 陈双节, 胡碎钗, 等. 重症监护病房儿童外伤性脑损伤后癫痫的危险因素分析 [J]. *中国妇幼保健*, 2022, 37(10): 1871-1874
- LI L, CHEN S J, HU S C, et al. Risk factors of epilepsy after traumatic brain injury in children in intensive care unit [J]. *Maternal and Child Health Care of China*, 2022, 37(10): 1871-1874
- [20] 张贤华, 杨 明, 邱文琪, 等. 儿童创伤性蛛网膜下腔出血继发癫痫发作的相关危险因素分析 [J]. *江西医药*, 2024, 59(3): 254-256
- ZHANG X H, YANG M, QIU W Q, et al. Analysis of risk factors for secondary epilepsy after traumatic subarachnoid hemorrhage in children [J]. *Jiangxi Medical Journal*, 2024, 59(3): 254-256
- [21] 朱岳峰. 儿童颅脑外伤后早期癫痫发作的危险因素分析 [C]. 中华医学会神经外科学分会第17次学术会议论文集. 陕西: 2018: 238
- ZHU Y F. Risk factors analysis of early seizure after traumatic brain injury in children [C]. *Proceedings of the 17th Academic Conference of Chinese Society of Neurosurgery*. Shan'xi: 2018: 238
- [22] 张 玉, 李 娜, 刘一鸣. 颅脑损伤患儿继发性癫痫危险因素分析及列线图预测模型的构建 [J]. *立体定向和功能性神经外科杂志*, 2022, 35(2): 95-99
- ZHANG Y, LI N, LIU Y M. Analysis of risk factors for secondary epilepsy in children with craniocerebral injury and construction of nomogram prediction model [J]. *Chinese Journal of Stereotactic and Functional Neurosurgery*, 2022, 35(2): 95-99
- [23] 刘 梅, 高安亮, 陈 靓, 等. 轻、中型颅脑损伤儿童并发外伤性癫痫的危险因素分析 [J]. *临床神经外科杂志*, 2024, 21(3): 257-261, 266
- LIU M, GAO A L, CHEN L, et al. Risk factors analysis of post-traumatic epilepsy in children with mild and medium traumatic brain injury [J]. *Journal of Clinical Neurosurgery*, 2024, 21(3): 257-261, 266
- [24] LI Y, WANG D, ZHOU X Z, et al. Clinical characteristics and associated factors of posttraumatic epilepsy after traumatic brain injury in children: a retrospective case-control study [J]. *Seizure*, 2024, 115: 87-93

- [25] ULGEN TEKEREK N, DURSUN O, ASILIOGLU YENER N, et al. Posttraumatic epilepsy in critically ill children with traumatic brain injury[J]. Childs Nerv Syst, 2023, 39(11): 3207-3214
- [26] JI J, QIAN S Y, LIU J, et al. Occurrence of early epilepsy in children with traumatic brain injury: a retrospective study[J]. World J Pediatr, 2022, 18(3): 214-221
- [27] ELSAMADICY A A, KOO A B, DAVID W B, et al. Post-traumatic seizures following pediatric traumatic brain injury[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2021, 203: 106556
- [28] RUMALLA K, SMITH K A, LETCHUMAN V, et al. Nationwide incidence and risk factors for posttraumatic seizures in children with traumatic brain injury[J]. J Neurosurg Pediatr, 2018, 22(6): 684-693
- [29] ONG L C, DHILLON M K, SELLADURAI B M, et al. Early post-traumatic seizures in children: clinical and radiological aspects of injury[J]. J Paediatr Child Health, 1996, 32(2): 173-176
- [30] MIKKONEN E D, SKRIFVARS M B, REINIKAINEN M, et al. Posttraumatic epilepsy in intensive care unit-treated pediatric traumatic brain injury patients [J]. Epilepsia, 2020, 61(4): 693-701
- [31] MARIAJOSEPH F P, CHEN Z B, SEKHAR P, et al. Incidence and risk factors of posttraumatic epilepsy following pediatric traumatic brain injury: a systematic review and meta-analysis[J]. Epilepsia, 2022, 63(11): 2802-2812
- [32] CHONG S L, QIAN S, YAO S H W, et al. Early posttraumatic seizures in pediatric traumatic brain injury: a multi-center analysis [J]. J Neurosurg Pediatr, 2021, 29(2): 225-231
- [33] 周利兵, 李 莺. 儿童重型颅脑损伤患者预后危险因素分析[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2014, 34(1): 56-60
- ZHOU L B, LI Y. Analysis of prognostic risk factors in children with severe traumatic brain injury [J]. Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences), 2014, 34(1): 56-60
- [34] YU T T, LIU X, SUN L, et al. Risk factors for Drug-resistant epilepsy (DRE) and a nomogram model to predict DRE development in post-traumatic epilepsy patients [J]. CNS Neurosci Ther, 2022, 28(10): 1557-1567
- [35] LAING J, GABBE B, CHEN Z, et al. Risk factors and prognosis of early posttraumatic seizures in moderate to severe traumatic brain injury [J]. JAMA Neurol, 2022, 79(4): 334-341
- [36] LIN S W, WANG Q Q, ZHU Y F, et al. Establishment and validation of PTE prediction model in patients with cerebral contusion [J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 20574
- (收稿: 2025-04-01; 修回: 2025-07-17; 录用: 2025-08-08)
(本文编辑: 戴玉娟)

(上接第81页)

- 眶T2加权成像中的图像质量对比研究[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2022, 42(12): 1741-1744
- LIU W Y, CHEN L, HU H, et al. Comparison of image quality between dixon and fat-sat techniques in orbital T2-weighted imaging [J]. Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences), 2022, 42(12): 1741-1744
- [20] MARSHALL E L, GINAT D T, SAMMET S. Computed tomography imaging artifacts in the head and neck region: pitfalls and solutions [J]. Neuroimaging Clin N Am, 2022, 32(2): 271-277
- [21] ALZAIN A F, ELHUSSEIN N, FADULELMULLA I A, et al. Common computed tomography artifact: source and avoidance [J]. Egypt J Radiol Nucl Med, 2021, 52(1): 151
- [22] NEHRA A K, RAJENDRAN K, BAFFOUR F I, et al. Seeing more with less: clinical benefits of photon-counting detector CT [J]. Radiographics, 2023, 43(5): e220158
- [23] HUFLAGE H, KUNZ A S, PATZER T S, et al. Submillisievert abdominal photon-counting CT versus energy-integrating detector CT for urinary calculi detection: impact on diagnostic confidence [J]. Radiology, 2024, 312(1): e232453
- [24] SU T, SUN X, YANG J, et al. DIRECT-Net: a unified mutual-domain material decomposition network for quantitative dual-energy CT imaging [J]. Med Phys, 2022, 49(2): 917-934
- [25] GHANI M U, KARL W C. Fast enhanced CT metal artifact reduction using data domain deep learning [J]. IEEE Trans Comput Imaging, 2019, 6: 181-193
- (收稿: 2025-07-27; 修回: 2025-09-08; 录用: 2025-09-08)
(本文编辑: 唐 震)