doi:10.11659/jjssx.07E025110

·心血管外科专栏·

小儿先天性心脏病术后心脏骤停预测模型的构建

王 霜[1],王筱君[1],刘爱红[2],沈正礼[1],郝雪梅[1] (1.中国人民解放军总医院第七医学中心麻醉科,北京 100700;2.中国人民解放军总医院第七医学中心儿童重症监护室,北京 100700)

[摘 要] **目的** 基于基线资料与超声组学分析小儿先心病术后心脏骤停的影响因素。**方法** 选取2020年2月至2025年2月我院收治的先心病患儿993例,根据术后30 d是否发生心脏骤停分为发生组、未发生组。采用*LASSO*回归模型初步筛选变量后,采用*Logistic*回归模型分析术后心脏骤停的影响因素;建立对应的预测模型,分别采用受试者工作特征(*ROC*)曲线、校准曲线验证模型效能。**结果** 术后30 d心脏骤停发生率为5.14%。*LASSO*回归模型筛选出5个核心变量,经*Logistic*回归模型分析显示,先心病手术风险分级第一版(RACHS-1)等级≥4级、心肺转流(CPB)时间较长、二尖瓣舒张早期血流速度/二尖瓣环舒张早期运动速度(E/e′)比值较大、三尖瓣反流峰值流速(TR Vmax)较大均是小儿先心病术后心脏骤停的危险因素($P<0.05$),而左室整体纵向应变(LVGLS)绝对值较大是保护因素($P<0.05$)。基于上述因素建立预测模型预测术后心脏骤停的风险;模型预测术后心脏骤停的曲线下面积(*AUC*)为0.928,敏感度为92.16%,特异度为84.39%;*Hosmer-Lemeshow*检验显示,该模型对小儿先心病术后心脏骤停的预测概率与实际概率比较,差异无统计学意义($\chi^2=0.415$,$P=0.296$)。**结论** RACHS-1等级≥4级、CPB时间较长、E/e′比值较大、TR Vmax较大是小儿先心病术后心脏骤停的危险因素,LVGLS绝对值较大是其保护因素,融合上述基线资料和超声组学指标构建的预测模型具有良好的效能。

[关键词] 儿童;心脏病;心脏骤停;超声检查;列线图
[中图分类号] R541.7+8 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-07-28

Prediction model for cardiac arrest after surgery in pediatric congenital heart disease

WANG Shuang[1], WANG Xiao-jun[1], LIU Ai-hong[2], SHEN Zheng-li[1], HAO Xue-mei[1] (1.Department of Anesthesiology, Seventh Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100700, China; 2.Pediatric Intensive Care Unit, Seventh Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100700, China)

Abstract: Objective To analyze the influencing factors for postoperative cardiac arrest in children with congenital heart disease based on the baseline clinical data and ultrasomics. **Methods** A total of 993 pediatric patients with congenital heart disease who were admitted to our hospital from February 2020 to February 2025 were enrolled. They were categorized into the event group and the non-event group according to the occurrence of cardiac arrest within 30 days after surgery. Variables were initially screened using *LASSO* regression model, and subsequently analyzed using multivariate *Logistic* regression to identify the independent risk factors. A corresponding risk prediction model was established, and the model performance was validated using the *receiver operating characteristic* (*ROC*) curve and calibration curve. **Results** The incidence of cardiac arrest within 30 days after surgery was 5.14%. Five core variables were screened out by the *LASSO* regression model. *Logistic* regression analysis identified that risk adjustment for congenital heart surgery 1st version (RACHS-1) category≥4, longer cardiopulmonary bypass (CPB) time, greater early diastolic mitral inflow velocity/early diastolic mitral annular velocity (E/e′), and higher tricuspid regurgitation peak velocity (TR Vmax) were the independent risk factors for postoperative cardiac arrest ($P<0.05$), while a greater absolute value of left ventricular global longitudinal strain (LVGLS) was identified as a protective factor ($P<0.05$). A corresponding risk prediction model was established. The *area under the curve* (*AUC*) of the model for predicting postoperative cardiac arrest was 0.928, with a sensitivity of 92.16% and a specificity of 84.39%. The *Hosmer-Lemeshow* test indicated no significant difference between the predicted probability and actual probability for cardiac arrest after pediatric congenital heart disease surgery ($\chi^2=0.415$, $P=0.296$). **Conclusion** RACHS-1 category≥4, longer CPB time, a greater E/e′ ratio, and a higher TR Vmax are the risk factors for cardiac arrest after pediatric congenital heart disease surgery, while a greater absolute value of LVGLS is a protective factor. The prediction model constructed by integrating the above baseline data and ultrasomics indicators demonstrates good performance.

Keywords: children; heart disease; cardiac arrest; echocardiography; nomogram

目前外科矫治手术已成为挽救先天性心脏病(先心病)患儿生命的核心手段。心脏骤停作为术后最凶险的并发症,始终是心脏重症监护面临的严峻挑战[1]。研究显示,尽管心脏骤停发生率仅占先心病手术患儿

[通信作者] 郝雪梅,E-mail:nxat1@163.com

的2%~5%,但其可导致超过60%的患儿术后早期死亡,且存活的患儿中近30%伴严重后遗症,显著增加致残与远期死亡风险[2]。传统风险评估多依赖患儿月龄、体质量及心功能等基线资料及手术复杂度评分[3-5],无法充分捕捉术后早期心脏功能、血流动力学状态以及心肌组织特性的细微动态变化,而这些变化通常是心脏失代偿至骤停的前兆。近年来,影像组学作为一种新兴技术,在医学领域展现出强大的疾病诊断和预后预测能力[6]。超声组学通过高通量提取超声图像中的海量定量特征,将传统的视觉解读转化为可深度挖掘的数字化信息,其在肿瘤诊断、预后预测等领域的成功应用已验证了其揭示病灶异质性及生物学行为的强大能力[7-8]。将影像组学技术应用于术后床旁超声心动图,有望从常规获取的图像中解码出更深层次、更敏感的心肌组织特性及功能状态改变信息。本研究将基线资料与超声组学特征进行融合,构建预测模型,以期为高危患儿的早期识别和个性化干预提供决策支持。

1 资料与方法

1.1 临床资料

选取2020年2月至2025年2月本院收治的先心病患儿993例。纳入标准:①年龄≤7周岁且首次行体外循环下先心病矫治手术;②术前诊断符合先心病的标准[9]。排除标准:①早产儿(胎龄<37周)或出生体质量<2.5 kg。该类患儿心肺发育不成熟、术后并发症风险显著高于足月儿,可能干扰模型对典型先心病术后心脏骤停的预测性能。②术前即依赖机械通气、体外膜肺氧合或心肺复苏支持维持循环。该类患儿术前已处于极危重状态,其心脏骤停风险极高且机制复杂,可能掩盖本研究关注的术后新发心脏骤停的预测因素。③合并已知染色体综合征。该类患儿因常伴多系统异常,影响心脏结构与功能,增加术后并发症异质性。④既往接受过心脏手术或介入治疗。排除手术史对心功能、解剖结构及术后恢复的潜在影响。⑤合并严重肝、肾功能障碍。肝、肾功能衰竭本身即为心脏骤停的强预测因素,可能混淆模型对心脏特异性因素的识别。⑥合并糖原累积病、线粒体病等先天性代谢疾病或免疫缺陷病。这些疾病本身可直接导致心肌病变、心电不稳定或难以控制的感染,其心脏骤停的根本原因更倾向于原发代谢/免疫缺陷,而非心脏手术。⑦合并脓毒症、重症肺炎或多器官功能障碍综合征等影响心功能的严重全身感染。该类感染会严重损害心功能并显著增加心律失常风险,其导致的心脏骤停病理生理机制与本研究聚焦的"手术相关心脏负荷及功能变化"存在差异。本研究已经过本院伦理委员会审批[批准号:(2020)伦审第(001)号],患儿法定监护人签署知情同意书,授权使用临床及影像数据。

1.2 方法

1.2.1 基线资料收集 人口统计学特征:性别、年龄、体质量;术前状态及疾病相关因素:术前乳酸、术前肌酐、术前B型钠尿肽(B-type natriuretic peptide,BNP)、术前肺动脉高压、术前感染史、青紫型先心病;手术相关因素:先心病手术风险分级第1版(risk adjustment for congenital heart surgery 1st version,RACHS-1)等级、急诊手术、心肺转流(cardiaopulmonary bypass,CPB)时间、主动脉阻断时间、延迟关胸、使用起搏器、术中出血量、术中乳酸峰值;术后早期指标:术后机械通气时间、术后24 h内心电图异常、术后24 h内电解质紊乱。

术前抽取患儿静脉血,离心后采用酶法检测乳酸、肌酐,免疫分析法检测BNP;根据文献[10]评估RACHS-1等级,等级越高手术越复杂;心电图异常是指存在具有临床意义的心律失常(如室性早搏、高度房室传导阻滞、ST段与T波改变等)或传导异常;电解质紊乱是指存在低钾血症(K^+<3.5 mmol/L)、低镁血症(Mg^{2+}<0.7 mmol/L)等任一关键电解质异常。

1.2.2 超声组学指标检测 所有患儿均于择期手术前24 h内,在稳定状态下完成床旁超声心动图检查。使用Vivid E95高频超声探头(美国GE公司)标准化采集心尖四腔心、左室长轴、短轴等切面,保存动态图像(DICOM格式)。经双盲质控后,通过高斯滤波降噪与心内膜勾画感兴趣区域。基于pyradiomics平台提取以下四类特征。①形态学特征:左室舒张末期内径(left ventricular end-diastolic dimension,LVEDd)、左室舒张末期容积指数(left ventricular end diastolic volume index,LVEDVi)、左房容积指数(left atrial volume index,LAVi)、右室舒张末期内径(right ventricular end-diastolic diameter,RVEDd)、主肺动脉内径;②功能学特征:左室射血分数(left ventricular ejection fraction,LVEF)、左室整体纵向应变(left ventricular global longitudinal strain,LVGLS)绝对值、三尖瓣环平面收缩期位移(tricuspid annular plane systolic excursion,TAPSE)、Tei指数、二尖瓣舒张早期血流速度、二尖瓣环舒张早期运动速度、二尖瓣舒张早期血流速度/二尖瓣环舒张早期运动速度(early

diastolic mitral inflow velocity/early diastolic mitral annular velocity,E/e′)比值;③血流动力学特征:三尖瓣反流峰值流速(tricuspid regurgitation peak velocity,TR Vmax)、右心室收缩压(right ventricular systolic pressure,RVSP)、主动脉瓣狭窄最大压差、左室流出道峰值流速(left ventricular outflow tract peak velocity,LVOT-Vmax);④纹理特征:GLCM熵、GLCM对比度、灰度直方图峰度。特征经数据清洗(缺失值KNN填补、Z-score归一化)后,通过方差过滤(剔除零方差特征)与相关性分析初筛。

1.2.3 心脏骤停情况统计 术后30 d观察心脏骤停发生情况。心脏骤停判定标准:患儿在非临终状态下突发循环衰竭,表现为可触及大动脉(如颈动脉、股动脉、肱动脉)搏动消失或动脉血压监测示有效血压丧失(收缩压不可测或波形呈直线/极低振幅平线),并伴意识丧失(若术前清醒)及自主呼吸停止或异常濒死样呼吸。

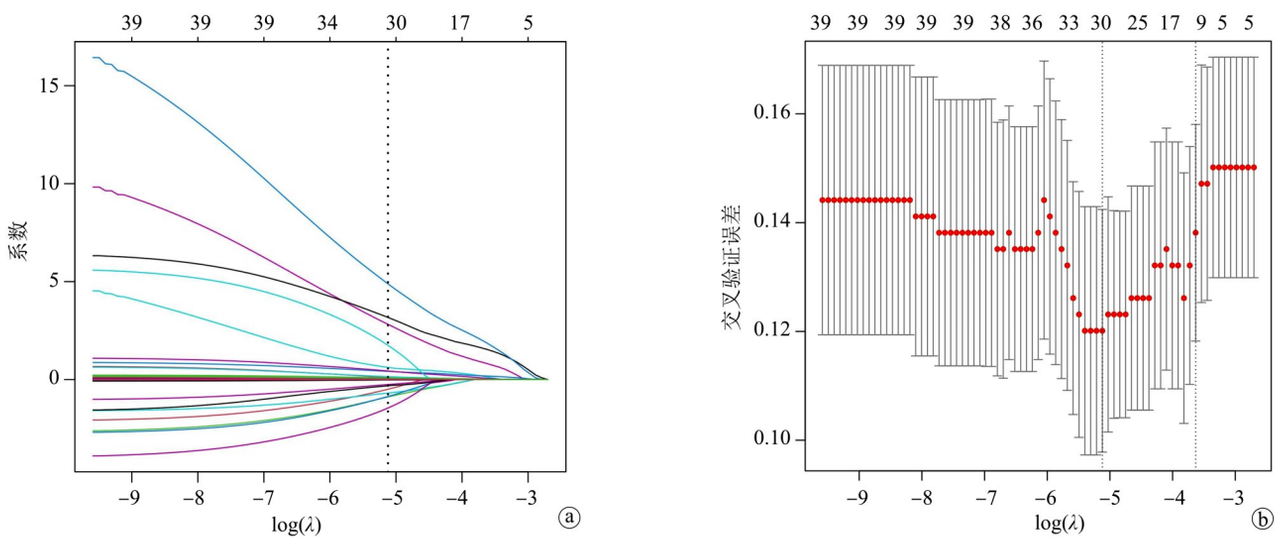
1.3 统计学方法

采用SPSS 23.0软件分析数据,计数资料以率(%)表示,采用χ^2检验。计量资料经*K-S*检验符合正态分布,以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,采用独立样本t检验;不符合正态分布的数据以中位数(四分位间距)[M(Q_1,Q_3)]表示,采用*Mann-Whitney U*检验。进行*LASSO*回归分析,经"glmnet"包筛选变量。经十折交叉验证获取*LASSO*回归模型最佳拟合效果;采用多因素*Logistic*回归模型分析术后心脏骤停的影响因素,采用R4.0.0软件的rms程序包建立对应的预测模型,采用受试者工作特征(*receiver operating characteristic*,*ROC*)曲线、校准曲线验证其效能。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 *LASSO*回归模型初步筛选小儿先心病术后心脏骤停的影响因素

术后30 d患儿心脏骤停发生率为5.14%(51/993)。对各自变量(19项基线资料和20项超声组学指标)进行赋值,纳入*LASSO*回归分析,结果显示:当正则化强度参数(logλ)为−8~−2时,模型保留的显著变量数量呈系统性下降趋势;当logλ=−3时,模型仅保留5个具有非零系数的关键变量(图1a)。十折交叉验证曲线进一步验证了变量筛选的合理性:当logλ为−5~−4时,模型分类错误率较低,为0.13~0.17(图1b),同时变量数量从多个精简至5个(logλ=−3)。综合十折交叉验证结果,最终确定最优logλ=−3时,模型在维持稳定分类性能(误差约0.16)的前提下,纳入5个核心变量,分别为RACHS-1等级≥4级、CPB时间、LVGLS、E/e′比值、TR Vmax。



a:*LASSO*回归筛选变量的动态过程图;b:十折交叉验证曲线

图1 小儿先心病术后心脏骤停的影响因素筛选

2.2 小儿先心病术后心脏骤停的影响因素分析

以*LASSO*回归模型筛选出的小儿先心病术后心脏骤停的影响因素为自变量,并进行赋值,RACHS-1等级(2/3级=0,≥4级=1),CPB时间、LVGLS、E/e′比值、TR Vmax均为实际值,并以是否发生心脏骤停(否=0,是=1)为因变量,纳入*Logistic*回归模型,结果显示,RACHS-1等级≥4级、CPB时间较长、E/e′比值较大、TR Vmax较大均是小儿先心病术后心脏骤停的危险因素(P<0.05),LVGLS绝对值较大是其保护因素(P<0.05),见表1。

2.3 小儿先心病术后心脏骤停的预测模型建立

根据*Logistic*回归模型筛选出的风险因素，建立方程：$Y=-14.549+0.497X_1+0.983X_2-0.584X_3+0.507X_4+1.058X_5$，$X_1$~$X_5$分别为RACHS-1等级、CPB时间、LVGLS绝对值、E/e′比值、TR Vmax。基于本研究的危险因素建立预测模型，将各因素对应的数值代入方程计算Y值，再通过逻辑函数$P=1/(1+e^{-Y})$转换为发生心脏骤停的概率，*P*值越高表示风险越大，见图2。

表1 小儿先心病术后心脏骤停的影响因素

自变量	*β*	*SE*	Wald χ^2	*P*	*OR*	95%*CI*
RACHS-1等级	0.497	0.229	4.716	0.030	1.643	1.050~2.572
CPB时间	0.983	0.409	5.771	0.016	2.671	1.198~5.955
LVGLS	−0.584	0.217	7.243	0.007	0.558	0.364~0.853
E/e′比值	0.507	0.225	5.078	0.024	1.660	1.068~2.581
TR Vmax	1.058	0.347	9.313	0.002	2.880	1.460~5.683
常数项	−14.549	3.406	18.250	<0.001	<0.001	

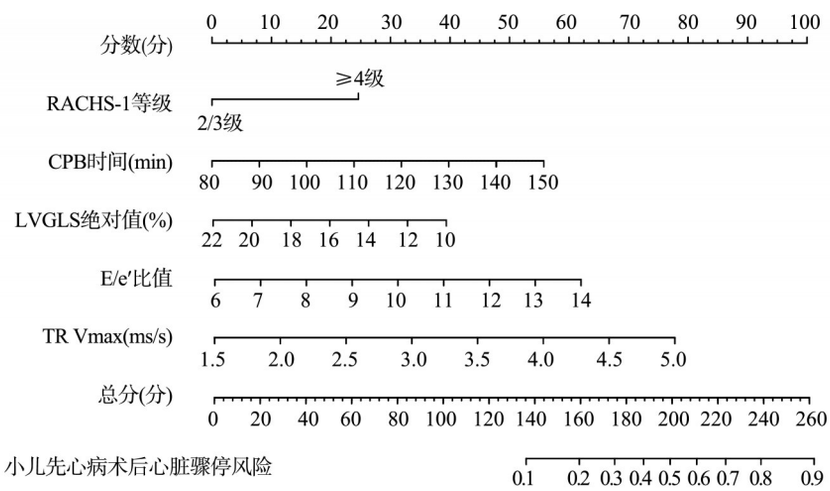


图2 小儿先心病术后心脏骤停的预测模型

2.4 预测模型的效能验证

构建的预测模型预测小儿先心病术后心脏骤停的曲线下面积（*area under the curve*，*AUC*）为0.928（95% *CI*：0.910~0.943，*Z*=21.223，*P*<0.001），敏感度为92.16%，特异度为84.39%，见图3；*Hosmer-Lemeshow*检验显示，该模型的预测概率与实际概率比较，差异无统计学意义（χ^2=0.415，*P*=0.296），见图4。

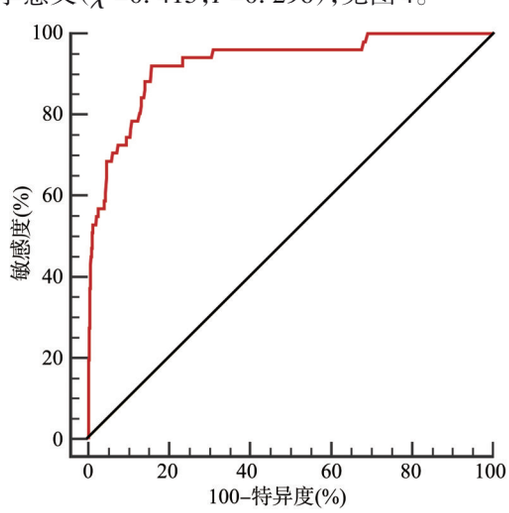


图3 模型预测小儿先心病术后心脏骤停的*ROC*曲线

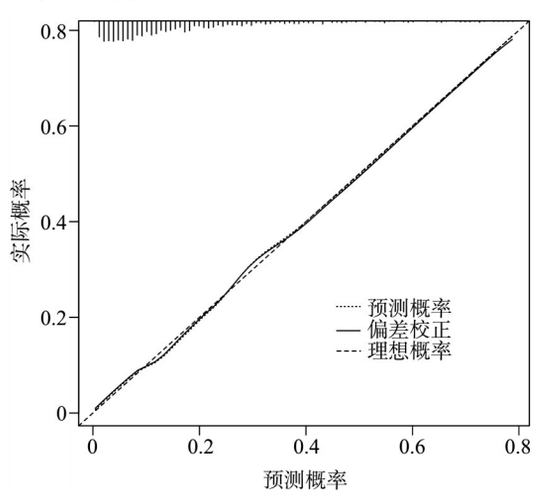


图4 模型预测小儿先心病术后心脏骤停的校准曲线

3 讨论

小儿先心病术后心脏骤停的核心病理基础为体外循环诱发的全身炎症风暴、缺血-再灌注损伤及外科操作对脆弱心肌的直接创伤，触发恶性心律失常及心脏停搏[11]。小儿心脏发育未成熟，其心肌储备有限，电生理特性更不稳定，对容量/压力负荷变化耐受性差，术后极易陷入恶性循环，轻微功能恶化即可迅速

演变为电机械分离甚至循环崩溃。因此,开发一种融合患儿固有风险背景与心肌状态评估的新型预测工具,对于术后心脏骤停的预防具有重要意义。

本研究显示,RACHS-1等级≥4级、CPB时间较长、E/e′比值较大、TR Vmax较大是小儿先心病术后心脏骤停的危险因素,LVGLS绝对值较大是保护因素。RACHS-1等级≥4级提示疾病复杂,患儿的基础解剖和生理状态恶劣,心肌功能差,存在严重心室肥厚、缺氧、负荷过重或发育不全等问题,手术耐受能力极差;且手术本身创伤大,操作复杂,吻合口多,手术时间长,从而易引发心脏骤停[12]。既往研究发现,RACHS-1等级高的先心病患儿术后30 d病死率显著升高[13]。CPB时间较长可导致严重的心肌缺血-再灌注损伤、直接机械性损伤和水肿,显著削弱心脏收缩与舒张功能,造成低心排状态,同时全身性炎症反应被广泛激活,导致器官灌注进一步恶化[14]。E/e′比值升高提示左心室舒张功能障碍和充盈压升高,心脏在术前已存在储备功能不足,术后难以通过Frank-Starling机制增加每搏输出量,易在应激状态下出现低心排血量综合征[15]。E/e′比值升高还可能提示潜在的心肌病变,如心肌肥厚、纤维化等,这提示患儿术前可能处于亚临床状态,在手术后容易诱发心衰或心律失常,最终导致心脏骤停。TR Vmax主要反映右心室收缩压增高,提示存在显著的肺动脉高压或右心室流出道梗阻,是围术期风险激增的关键病理生理基础[16]。术前既存的右心高压状态预示着右心室长期承受压力超负荷,导致心室肥厚、顺应性降低、储备功能下降。在经历手术创伤、体外循环打击及术后可能的低心排等应激后,此类耐受性下降的右心室极易发生急性功能衰竭。衰竭的右心室不仅无法克服术后可能持续存在或波动的肺动脉阻力,导致严重的低心排血量综合征,还因心肌电不稳定性增加,更易诱发致命的室性心律失常。LVGLS是心肌纤维在收缩期的纵向形变能力的量化指标,能在LVEF尚处于正常范围时即有效揭示左心室的亚临床功能障碍和显著受损的心肌储备,反映因复杂心脏畸形导致的长期压力/容量超负荷、潜在心肌纤维化、微循环障碍或能量代谢异常等累积性损伤[17]。术前LVGLS绝对值降低预示着左心室收缩潜能耗竭,导致心脏无法有效应对术后急性的前/后负荷增加,极易出现低心排血量综合征,是术后心脏骤停的关键病理生理基础。

本研究融合基线资料(RACHS-1等级≥4级、CPB时间)及超声组学指标(E/e′比值、TR Vmax、LVGLS绝对值)建立预测模型,其核心优势在于:结合宏观临床背景与微观影像表型,全面覆盖风险维度;提供定量风险评分,实现术后早期高危患儿识别;超越主观评估和常规评分,为精准监护及临床决策提供客观、动态的参考依据,推动智能重症管理发展。经验证该模型临床预测效能良好,具有重要预警价值,可为临床小儿先心病术后心脏骤停的预测提供参考。

综上所述,RACHS-1等级≥4级、CPB时间较长及E/e′比值较大、TR Vmax较大是小儿先心病术后心脏骤停的危险因素,LVGLS绝对值较大是其保护因素,基于上述因素构建的预测模型具有良好的临床预测效能。然而本研究未进行外部验证及临床转化验证不足,未来研究需通过大型多中心前瞻性队列、开发鲁棒可解释的动态融合模型,并严格验证其临床整合效能,以期为降低小儿先心病术后心脏骤停发生率提供更可靠的预测工具和决策依据。

[参考文献]

[1] Needleman JS, Whitehill RD, Claxton JS, et al. Risk of late sudden death after surgery for congenital heart disease[J]. Cardiol Young, 2025,35(4):805-811. doi: 10.1017/S1047951125000277.

[2] Zheng G, Wang J, Chen P, et al. Epidemiological characteristics and trends in postoperative death in children with congenital heart disease (CHD): a single-center retrospective study from 2005 to 2020[J]. J Cardiothorac Surg, 2023, 18(1): 165. doi: 10.1186/s13019-023-02224-2.

[3] Oztürk DY, Oztürk E, Ozcanoglu HD, et al. Factors predicting early major adverse events in the intensive care unit after successful cardiac surgery for congenital heart disease in full-term neonates[J]. Braz J Cardiovasc Surg, 2023, 38(5): e20220442. doi: 10.21470/1678-9741-2022-0442.

[4] Hook JE, Delany DR, Buckley JR, et al. Factors associated with mortality and adverse outcomes after truncus arteriosus repair[J]. Ann Thorac Surg, 2023, 116(2): 358-364. doi: 10.1016/j. athoracsur. 2022. 10. 020.

[5] Wu Y, Che S, Li Y. An unusual cause of cardiac arrest in a young infant[J]. BMC Cardiovasc Disord, 2024, 24(1): 370. doi: 10.1186/s12872-024-04028-1.

[6] Yang Y, Long H, Feng Y, et al. A multi-omics method for breast cancer diagnosis based on metabolites in exhaled breath, ultrasound imaging, and basic clinical information[J]. Heliyon, 2024, 10(11): e32115. doi: 10.1016/j. heliyon. 2024. e32115.

[7] Song X, Xu H, Wang X, et al. Use of ultrasound imaging Omics in predicting molecular typing and assessing the risk of postoperative recurrence in breast cancer[J]. BMC Womens Health, 2024, 24(1): 380. doi: 10.1186/s12905-024-03231-8.

[8] Li Z, Wang K, Qu J, et al. Identification of novel biomarkers for malignant thyroid nodules: a preliminary study based on ultrasound omics[J]. Ann Biomed Eng, 2025, 53(5): 1192-1198. doi: 10.1007/s10439-025-03698-y.

[9] 魏 翔,潘铁成. 心血管外科疾病诊疗指南[M]. 北京:科学出版社,2013:37-38.