

# 基于XGBoost-SHAP方法的急性主动脉夹层患者术后死亡风险模型的构建

张新<sup>1</sup>, 方敏<sup>1</sup>, 曹轶<sup>1</sup>, 李婷婷<sup>1</sup>, 刘献孔<sup>2</sup>, 党嘉毅<sup>2</sup>, 赵雪森<sup>2</sup>, 任洪钦<sup>2</sup>, 耿佳泽<sup>2</sup>, 王楷文<sup>2</sup>, 韩铁生<sup>1</sup>, 赵永波<sup>3\*</sup>, 马冬<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>华北理工大学公共卫生学院, 河北唐山 063000; <sup>2</sup>神经与血管教育部重点实验室/河北省心血管稳态与衰老重点实验室/河北医科大学生物化学与分子生物学研究室/河北医科大学基础医学院, 河北石家庄 050017; <sup>3</sup>河北医科大学第四医院心外科, 河北石家庄 050011

[中图分类号] R543.1 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.2025.0805  
[声明] 本文所有作者声明无利益冲突  
[引用本文] 张新, 方敏, 曹轶, 等. 基于XGBoost-SHAP方法的急性主动脉夹层患者术后死亡风险模型的构建[J]. 解放军医学杂志, 2025, 50(10): 1226-1234.  
[收稿日期] 2024-10-31 [录用日期] 2025-04-29 [上线日期] 2025-08-05

**[摘要]** **目的** 基于临床一般变量, 应用极端梯度提升模型(XGBoost)-沙普利加和解释(SHAP)方法建立模型, 预测急性主动脉夹层(AAD)患者术后的死亡风险, 搭建预测网站为临床医师和患者提供诊疗服务平台。**方法** 采用回顾性队列研究设计。收集2013年1月—2023年12月于河北医科大学第四医院行手术治疗的782例AAD患者的基本资料和首次入院血清标志物检测结果等进行分析。将患者按照随机抽样的方法以7:3的比例分为训练集和测试集。同时收集2020年1月—2023年12月河北医科大学第二医院收治的313例AAD患者组成外部验证集, 用于模型的进一步验证。采用LASSO回归筛选变量后构建XGBoost机器学习模型并进行SHAP, 采用受试者操作特征(ROC)曲线等方法对模型的预测性能进行评估。调用Shiny包将XGBoost模型部署到shinyapps.io, 构建AAD患者术后死亡风险的预测网站, 并在测试集和外部验证集分别采用简单随机抽样选取1例患者用于Shiny网页预测示例。**结果** XGBoost模型预测AAD患者术后死亡的ROC曲线下面积(AUC)值较高[训练集: AUC=0.928(95%CI 0.901~0.956); 测试集: AUC=0.919(95%CI 0.891~0.949); 外部验证集: AUC=0.941(95%CI 0.915~0.967)]。SHAP值解释变量在模型中的重要性排序由高到低依次为“乳酸脱氢酶”“血氯”“多脏器损伤”“二氧化碳结合力”“凝血酶原时间”“ $\alpha$ -羟丁酸”“肌酸激酶同工酶”“Stanford分型”“合并使用床旁血液净化”“性别”“急性肾损伤”“消化道出血”“脑损伤”和“休克”。采用XGBoost-SHAP方法构建了AAD患者术后不良结局风险预测网站(<https://dun-dunxiaolu.shinyapps.io/document/>)并进行实例验证, 在测试集和外部验证集分别随机选取1例患者进行应用, 结果显示, 术后发生死亡的患者1模型预测值为0.9539, 术后未发生死亡的患者2预测值为0.0206。**结论** 采用XGBoost算法构建了AAD患者术后院内死亡风险的预测模型, 该模型具有较高的预测性能; 利用该预测模型建立的在线预测工具有助于提高术后死亡高危患者的识别效率。

**[关键词]** 机器学习; 预测模型; 急性主动脉夹层; 术后死亡

## Construction of a postoperative mortality risk model for patients with acute aortic dissection based on XGBoost-SHAP method

Zhang Xin<sup>1</sup>, Fang Min<sup>1</sup>, Cao Yi<sup>1</sup>, Li Ting-Ting<sup>1</sup>, Liu Xian-Kong<sup>2</sup>, Dang Jia-Yi<sup>2</sup>, Zhao Xue-Sen<sup>2</sup>, Ren Hong-Qin<sup>2</sup>, Geng Jia-Ze<sup>2</sup>, Wang Kai-Wen<sup>2</sup>, Han Tie-Sheng<sup>1</sup>, Zhao Yong-Bo<sup>3\*</sup>, Ma Dong<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Public Health, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063000, China

**[基金项目]** 国家自然科学基金(82270508); 河北省自然科学基金面上项目(H2022206279); 神经与血管生物学教育部重点实验室主任基金青年基金项目(NV20210006); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2022164); 河北省医学科学研究重点项目(20221293); 河北省卫生健康委政府资助临床医学优秀人才培养项目(ZF2025226)。

**[作者简介]** 张新, 硕士研究生, 主要从事心血管流行病学及预测模型构建方面的研究

**[通信作者]** 赵永波, E-mail: zhaoyongboyue@163.com; 马冬, E-mail: madong119@hebmu.edu.cn

<sup>2</sup>Key Laboratory of Nerves and Blood Vessels of the Ministry of Education/Key Laboratory of Cardiovascular Homeostasis and Aging of Hebei Province/Institute of Basic Biochemistry, Hebei Medical University/School of Basic Medicine, Hebei Medical University, Shijiazhuang, Hebei 050017, China

<sup>3</sup>Department of Cardiac Surgery, the Fourth Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang, Hebei 050011, China

\*Corresponding author. Zhao Yong-Bo, E-mail: zhaoyongboyueyue@163.com; Ma Dong, E-mail: madong119@hebm.edu.cn

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (82270508), the Hebei Provincial Natural Science Foundation General Project (H2022206279), the Youth Fund Project of the Director's Fund of the Key Laboratory of Neurobiology and Vascular Biology of the Ministry of Education (NV20210006), the Science and Technology Research Project of Higher Education Institutions in Hebei Province (QN2022164), the Key Project of Medical Science Research of Hebei Province (20221293), and the Hebei Provincial Health Commission Government-Funded Project for Cultivating Outstanding Talents in Clinical Medicine (ZF2025226)

**[Abstract] Objective** To develop a predictive model for postoperative mortality risk in patients with acute aortic dissection (AAD) using the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm combined with Shapley Additive Explanation (SHAP), and to establish a prediction website to serve as a diagnostic and therapeutic support platform for clinicians and patients. **Methods** A retrospective cohort study design was adopted. Data from 782 AAD patients who underwent surgical treatment at the Fourth Hospital of Hebei Medical University from January 2013 to December 2023 were collected, including basic information and initial serum biomarker test results. Patients were randomly divided into training and test sets at a 7:3 ratio. An external validation set consisting of 313 AAD patients admitted to the Second Hospital of Hebei Medical University from January 2020 to December 2023 was also established for further model validation. Variables were screened using LASSO regression, and an XGBoost machine learning model was constructed and interpreted using SHAP. The predictive performance of the model was evaluated using receiver operating characteristic (ROC) curve analysis. Using the Shiny package, the XGBoost model was deployed to shinyapps.io to create a prediction website for postoperative mortality risk in AAD patients. One patient was selected by simple random sampling from the test set and the external validation set respectively for the prediction example on the Shiny webpage. **Results** The XGBoost model demonstrated high predictive performance for postoperative mortality in AAD patients, with area under the ROC curve (AUC) values of 0.928 (95%CI 0.901-0.956) in the training set, 0.919 (95%CI 0.891-0.949) in the test set, and 0.941 (95%CI 0.915-0.967) in the external validation set. SHAP values indicated the following order of variable importance in the model (from highest to lowest): "lactate dehydrogenase" "blood chlorine" "multiple organ injury" "carbon dioxide combining power" "prothrombin time" "α-hydroxybutyric acid" "creatinine kinase isoenzyme" "Stanford classification" "combined use of bedside blood purification" "gender" "acute kidney injury" "gastrointestinal bleeding" "brain injury" and "shock". A risk prediction website for adverse postoperative outcomes in AAD patients was developed using XGBoost-SHAP method (<https://dun-dunxiaolu.shinyapps.io/document/>) and validated with examples. One randomly selected patient from each of the test and external validation sets was applied: the predicted mortality risk value for patient 1 (who died postoperatively) was 0.9539, and that for patient 2 (who survived postoperatively) was 0.0206. **Conclusions** The XGBoost-SHAP model demonstrates high accuracy in predicting postoperative mortality risk for AAD patients. The online prediction tool established based on this model enhances the identification efficiency of high-risk postoperative mortality patients.

**[Key words]** machine learning; prediction model; acute aortic dissection; postoperative mortality

急性主动脉夹层(acute aortic dissection, AAD)是指主动脉内膜发生病变引起血管内膜与中膜撕裂,从而形成的假腔,其发病急、病情凶险<sup>[1]</sup>,常见的并发症有心包填塞、心包积液、胸腔积液、肾功能不全<sup>[2]</sup>,严重时可致主动脉破裂和死亡<sup>[3]</sup>。目前,AAD的发病率为(2.1~16.3)/10万<sup>[4]</sup>,患者在未经治疗的情况下24 h内病死率为33%,48 h内为75%,确诊后在住院期间进行紧急手术治疗(手术置换或修复主动脉根部、升主动脉及主动脉弓)后病死率仍高达32%<sup>[5]</sup>。虽然目前已知年龄、低血压、肾衰竭等因素与AAD的不良结局有关<sup>[6-7]</sup>,但其进展机制尚未完全清楚。因此,分析AAD预后的相关影响因素,对于预测其发展、改善危险分层管理具有重要的临床意

义。机器学习是人工智能的重要组成部分,相较传统算法具有非线性、复杂相互作用、可纳入更多影响结局的变量等优点,在提高疾病和预后预测准确性等方面的应用前景广阔<sup>[8]</sup>,在处理临床研究数据尤其是考虑多个相互依赖的因素时具有明显的优势<sup>[9-10]</sup>。目前已有研究使用LASSO回归及5种模型比较并预测AAD患者术前死亡的影响因素<sup>[11]</sup>,但尚未见采用机器学习模型预测术后死亡报道。鉴于此,本研究通过LASSO回归筛选变量,建立AAD术后死亡风险的重要特征变量极端梯度提升算法(XGBoost)预测模型并进行沙普利加和解释(Shapley Additive exPlanations, SHAP),旨在建立可靠的AAD患者术后死亡风险预测网站,以服务临床医师和患者。

## 1 资料与方法

**1.1 研究对象** 本研究为回顾性队列研究。收集2013年1月—2023年12月于河北医科大学第四医院心外科就诊的782例AAD患者及2020年1月—2023年12月于河北医科大学第二医院收治的313例AAD患者。纳入标准：(1)确诊为AAD，诊断标准符合《主动脉夹层诊断与治疗规范中国专家共识》<sup>[12]</sup>；(2)年龄 $\geq 18$ 岁。排除标准：(1)院内术前死亡；(2)未进行手术；(3)外伤、车祸等原因所致ADD；(4)妊娠期；(5)人口学资料和相关实验室检测指标不全。本研究获河北医科大学第四医院伦理委员会审批(2023KS095)，以及河北医科大学第二医院伦理委员会审批(2022-R815)。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 分组方法** 将河北医科大学第四医院收治的782例AAD患者根据术后是否存活分为存活组( $n=637$ )与死亡组( $n=145$ )进行分析同时采用R4.3.2软件进行简单随机抽样，按照7:3的比例分为训练集( $n=548$ )与测试集( $n=234$ )，并将河北医科大学第二医院收治的313例患者作为外部验证集( $n=313$ )。在测试集和外部验证集中采用简单随机抽样法各选取1例患者用于在线预测示例。

**1.2.2 临床资料收集** 为确保数据的准确性和完整性，采用双人双轨录入的方式，应用Excel软件进行数据集收集，随后进行交叉核对，以确保数据录入的准确性和一致性。收集的资料包括以下几项。(1)一般资料：性别、年龄、收缩压、舒张压、发病季节。(2)既往史：吸烟史、饮酒史、糖尿病史、高血压史、冠心病史、高血压分级、是否口服降压药。(3)实验室检查指标(在患者入院时立即进行采集，以保证获取最准确的初始状态数据，避免因时间延迟导致的指标变化对研究结果产生干扰)：钠、钾、氯、二氧化碳结合力( $\text{CO}_2\text{CP}$ )、钙、阴离子间隙、磷、镁、谷草转氨酶(AST)、肌酐、尿素、葡萄糖、尿酸、肌酸激酶、肌酸激酶同工酶(CK-MB)、乳酸脱氢酶(LDH)、 $\alpha$ -羟丁酸( $\alpha$ -HB)、白细胞计数、白细胞百分比、中性粒细胞百分比、淋巴细胞百分比、单核细胞百分比、嗜酸性粒细胞百分比、嗜碱性粒细胞百分比、中性粒细胞计数、淋巴细胞计数、单核细胞计数、嗜酸性粒细胞计数、嗜碱性粒细胞计数、红细胞计数、血红蛋白、血细胞比容、血小板计数、凝血酶原时间(PT)、纤维蛋白原。(4)并发症情况：急性肝损伤(ALI)、多器官损伤、急性肾损伤(AKI)、呼吸衰竭、脑梗死、急性心肌梗死、心力衰竭、消化道出血、休克、谵妄。(5)合并使用情况(即术前或术后早期使用呼吸机辅助呼吸和床旁血液

净化的情况)：合并呼吸机辅助呼吸是指患者在术前或术后早期接受呼吸机治疗 $\geq 96$  h，合并床旁血液净化则是指患者在住院期间因病情需要接受床旁血液净化即连续肾脏替代治疗(continuous renal replacement therapy, CRRT)治疗，这些合并使用情况的记录均基于患者的病历资料，由专业的医疗团队根据患者的病情进行判断和记录，以确保数据的真实性和准确性。

**1.2.3 AAD并发症的诊断标准** (1)ALI的诊断标准参照《成人急性肝损伤诊疗急诊专家共识》<sup>[13]</sup>：①轻度ALI通常定义为正常值上限(ULN)的2倍 $\leq$ 谷丙转氨酶(ALT) $<$ ULN的5倍；②中度ALI通常定义为ULN的5倍 $\leq$ ALT $<$ ULN的15倍；③重度ALI需符合国际标准化比值(international normalized ratio, INR) $\geq 2.0$ ，ALT $\geq$ ULN的10倍且总胆红素(TBil) $\geq 3.0$  mg/dl且无肝性脑病。(2)多器官损伤根据中华医学会多器官功能障碍综合征(MODS)诊断标准进行判定<sup>[14]</sup>。(3)AKI标准为：①48 h内血清肌酐升高 $>26.5$   $\mu\text{mol/L}$ 或7 d内血清肌酐升高至正常值上限的1.5倍；②持续6 h尿量 $<0.5$  m/(kg·h)。符合上述任意一项即可诊断<sup>[15]</sup>。(4)呼吸衰竭是指由于肺通气或换气功能障碍造成不能进行有效的气体交换，从而引起生理功能及代谢紊乱的临床综合征。排除异常情况，在静息状态下呼吸室内空气时动脉血氧分压 $<60$  mmHg，或伴有二氧化碳分压 $>50$  mmHg，即可确定为呼吸衰竭。(5)脑梗死的诊断符合《中西医结合脑卒中循证实践指南(2019)》的标准<sup>[16]</sup>。(6)急性心肌梗死均经临床检查且符合诊断标准：①有胸前区持续的压榨性疼痛；②心电图检查示相邻2个以上胸前导联ST段抬高 $>2$  mm，或者2个以上的相邻肢体ST段抬高 $>1$  mm；心肌酶谱等提示血清肌酸激酶(CPK)超过正常值上限的2倍或磷酸激酶同工酶(CK-MB)高于正常值，肌钙蛋白T(TnT)为阳性。(7)心力衰竭的诊断符合《中国心力衰竭诊断和治疗指南2018》的标准<sup>[17]</sup>。(8)心功能参照纽约心脏病协会(NYHA)心功能分级进行分级。(9)消化道出血的诊断需满足以下标准<sup>[18]</sup>：①粪便潜血试验阳性；②伴有出血的临床表现(头晕、心慌、乏力、口干等症状，严重者出现晕厥、四肢冰凉、烦躁不安等症状)；③不明原因的血红蛋白进行性下降。(10)休克是指有效循环血量减少、组织灌注不足导致细胞缺氧和功能受损的临床综合征，符合下列6项中的2项以上即可诊断：①收缩压 $<100$  mmHg(或较基础血压下降 $>40$  mmHg)；②脉压 $<4.0$  kPa(30 mmHg)；③出现冷汗、皮肤苍白等休克症状；④尿量 $<25$  ml/h；⑤血乳酸 $>2$  mmol/L；⑥心脏指数 $<2.2$  L/(min·m<sup>2</sup>)。(11)谵妄的诊断通常以美国精神病学会DSM-5或《疾病和有关健康问题的国际统计分类》第10次修订本(international statistical

classification of diseases and related health problems-10, ICD-10)中的标准作为金标准<sup>[19]</sup>。

**1.2.4 结局指标及随访方法** 以术后30 d内发生的全因死亡为研究结局,其中术后全因死亡风险的预测综合考虑院内死亡和出院后死亡的情况。术后30 d死亡包括患者在医院内因手术相关并发症或其他原因导致的死亡,以及患者出院后因手术相关后遗症或其他相关因素导致的死亡。通过查阅病历记录、医疗数据库、电话沟通等方式收集参与者在随访过程中的信息,以确保研究的完整性和准确性。

**1.3 XGBoost模型构建和LASSO回归方法** 该模型使用“XGBoost”包构建,利用train函数从插入符号包中优化参数,并输出最佳参数配置。XGBoost模型是通过将学习率eta设置为0.1,最大深度(max\_depth)设置为2,采用交叉验证(10折)的方法,减少过拟合的风险,将迭代轮的次数(即提升轮数)设置为100来建立的。采用受试者操作特征(ROC)曲线、校准曲线和决策曲线分析(DCA)评价模型的性能。预测的结果概率用0.5的阈值转换为二元结果。计算并输出训练集和测试集的准确度、敏感度、特异度和其他指标。

为了避免共线性问题对模型的影响,在优化机器学习模型的过程中采用LASSO回归进行特征选择。通过选择一个 $\lambda$ 值,该值等于最小 $\lambda$ 加上一个标准差,且对应的误差在最小 $\lambda$ 的误差基础上不超过一个标准误差。

**1.4 SHAP值解释XGBoost模型** “Shapviz”是用于解释机器学习模型预测的R包,提供了基于SHAP值的视觉解释,并解释了每个特征(积极或消极)对模型预测的贡献程度。利用特征重要性图显示对模型预测影响最显著的特征,并根据SHAP值的平均绝对

对值对特征重要性进行排序。

**1.5 统计学处理** 采用R4.3.2和Python 3.6软件进行统计分析。对于缺失值比例 $\leq 25\%$ 的变量,采用多重插补法填充缺失数据。对于缺失值比例 $> 25\%$ 的变量,在分析中予以剔除,以避免因数据缺失过多而导致的偏差。计量资料符合正态分布者以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用独立样本 $t$ 检验,非正态分布者以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,组间比较采用Mann-Whitney  $U$ 检验;计数资料以例(%)表示,组间比较采用 $\chi^2$ 检验。以术后死亡作为结局变量,通过LASSO回归筛选重要特征变量,并采用XGBoost构建预测模型,采用ROC曲线下面积(AUC)、准确度、F1评分比较不同模型的预测性能,采用DCA法评估模型的临床有效性,并使用RStudio中的xgb.plot.importance函数展示变量重要性排序,以进一步利用SHAP值解释XGBoost模型。使用“tidyverse”“pROC”“CBCgrps”“rms”“rmda”包进行数据整理和可视化。调用“Shiny”包将XGBoost模型部署到shinyapps.io,开发AAD术后死亡发生风险在线预测计算器。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 基线特征** 782例AAD患者中术后存活637例,占81.5%,死亡145例,占18.5%。在总研究人群中,男性占比为75.5%;年龄为52(45, 61)岁;Stanford A型(73.5%)居多。存活组的舒张压、 $CO_2CP$ 、血红蛋白和纤维蛋白原水平均高于术后死亡组( $P < 0.05$ ),而血钠、血氯、阴离子间隙、磷、AST、肌酐、肌酸激酶、CK-MB、LDH和 $\alpha$ -HB水平均低于死亡组,PT短于死亡组( $P < 0.05$ ,表1)。

表1 AAD患者的基线资料

Tab.1 Basic information of patients with acute aortic dissection

指标	合计(n=782)	存活组(n=637)	死亡组(n=145)	$\chi^2/Z/t$	P
人口统计学指标					
男性[例(%)]	591(75.5)	495(77.7)	96(66.2)	7.852	0.005
年龄[岁, $M(Q_1, Q_3)$ ]	52(45, 61)	52(43, 61)	54(47, 61)	4212.0	0.098
疾病分型及并发症[例(%)]					
Stanford A型	575(73.5)	442(69.4)	133(91.7)	29.140	<0.001
糖尿病	20(2.6)	15(2.4)	5(3.4)	0.681	0.395
冠心病	33(4.2)	28(4.4)	5(3.4)	0.080	0.777
吸烟史	379(48.5)	319(50.1)	60(41.4)	3.239	0.072
饮酒史	410(52.4)	341(53.5)	69(47.6)	1.444	0.229
高血压史	558(71.4)	451(70.8)	107(73.8)	0.381	0.537
并发症[例(%)]					
肝损伤	21(2.7)	14(2.2)	7(4.8)	2.533	0.088
多脏器损伤	65(8.3)	20(3.2)	45(31.0)	116.962	<0.001

(续表)

指标	合计(n=782)	存活组(n=637)	死亡组(n=145)	$\chi^2/Z/t$	P
AKI	109(13.9)	58(9.1)	51(35.2)	64.750	<0.001
呼吸衰竭	44(5.4)	30(4.7)	14(9.7)	4.549	0.033
脑梗死	38(4.9)	26(4.1)	12(8.3)	3.633	0.057
脑损伤	52(6.6)	32(5.0)	20(13.8)	13.255	<0.001
急性心肌梗死	5(1.0)	1(0.2)	4(2.6)	3.763	0.005
心力衰竭	19(2.4)	9(1.4)	10(6.9)	15.546	<0.001
消化道出血	33(4.2)	14(2.2)	19(13.1)	32.110	<0.001
谵妄	19(2.4)	10(1.6)	9(6.2)	5.345	0.003
休克	31(4.0)	15(2.4)	16(11.0)	21.149	<0.001
治疗 and 用药指标[例(%)]					
口服降压药	305(39.0)	237(37.2)	68(46.9)	4.264	0.039
合并使用情况[例(%)]					
床旁血液净化	83(10.6)	37(5.8)	46(31.7)	80.906	<0.001
呼吸机辅助呼吸	180(23.0)	138(21.6)	42(29.0)	3.153	0.076
入院检查指标[M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]					
SBP(mmHg)	140(123, 160)	141(124, 162)	136(121, 153)	50 923.5	0.053
DBP(mmHg)	80(69, 93)	80(69, 94)	75(65, 87)	52 898.5	0.006
Na(mmol/L)	138(136, 140)	138(136, 140)	139(137, 141)	40 177.5	0.014
K(mmol/L)	3.8(3.5, 4.1)	3.8(3.5, 4.0)	3.9(3.5, 4.1)	43 702.0	0.311
Cl(mmol/L)	105.0(102.0, 107.0)	104.0(102.0, 107.0)	105.7(103.0, 108.0)	38 297.0	0.001
CO <sub>2</sub> CP(mmol/L)	23.4(21.1, 25.1)	23.8(22.0, 25.3)	22.0(20.0, 24.4)	57 656.0	<0.001
Ca(mmol/L)	2.2(2.1, 2.3)	2.2(2.1, 2.3)	2.2(2.1, 2.3)	51 973.0	0.018
AG(mmol/L)	13.9(12.2, 16.1)	13.8(12.2, 15.7)	14.4(12.1, 17.8)	40 352.5	0.018
P(mmol/L)	1.14(0.96, 1.31)	1.13(0.95, 1.3)	1.15(1.02, 1.39)	41 126.5	0.039
Mg(mmol/L)	0.86(0.78, 0.91)	0.86(0.78, 0.91)	0.87(0.78, 0.92)	44 960.0	0.618
AST(U/L)	26.1(19.4, 45.0)	25.1(19.0, 42.3)	30.6(21.5, 64)	36 500.0	<0.001
Cr( $\mu$ mol/L)	76(60, 99)	75(60, 96)	82(60, 120)	40 270.5	0.016
Urea(mmol/L)	6.2(4.9, 7.8)	6.1(4.9, 7.7)	6.5(5, 8.4)	42 880.0	0.179
Glu(mmol/L)	7.1(6.1, 8.4)	7.1(6.1, 8.3)	7.2(6.3, 8.9)	42 329.5	0.117
UA( $\mu$ mol/L)	347.7(272.8, 431.7)	346.0(271.9, 426.8)	359.0(283.8, 453.0)	43 404.0	0.258
CK(U/L)	136.6(76.0, 293.3)	130.5(74.7, 280.7)	170.3(83.8, 374.5)	39 620.5	0.008
CK-MB(U/L)	15.6(10.8, 26.2)	15.0(10.5, 23.3)	19.6(13.0, 32.7)	36 116.5	<0.001
LDH(U/L)	228(188, 315)	221(182, 297)	264(217, 386)	34 233.0	<0.001
$\alpha$ -HB(U/L)	187(157, 255)	180(153, 247)	215(174, 303)	34 650.0	<0.001
WBC( $\times 10^9/L$ )	11.8(9.4, 14.6)	11.8(9.3, 14.5)	12.1(9.4, 15.3)	42 531.5	0.137
Eos( $\times 10^9/L$ )	0.01(0, 0.03)	0.01(0, 0.03)	0(0, 0.01)	51 072.5	0.035
Baso( $\times 10^9/L$ )	0.01(0, 0.02)	0.01(0.01, 0.02)	0.01(0, 0.02)	48 333.5	0.367
RBC( $\times 10^{12}/L$ )	4.17(4.02, 4.71)	4.19(3.89, 4.80)	4.09(3.58, 4.78)	1 779	0.077
Hb(g/L)	130(116, 141)	131(117, 142)	128(114, 139)	51 137.0	0.044
Hct(%)	0.39(0.34, 0.42)	0.39(0.35, 0.42)	0.38(0.34, 0.41)	51 024.0	0.049
PLT( $\times 10^9/L$ )	171(133, 210)	172(134, 212)	165(131, 199)	50 470.0	0.081
PT(s)	12.3(11.6, 13.2)	12.2(11.5, 13.2)	12.5(11.8, 13.5)	38 881.0	0.003
Fib(g/L)	2.6(2.0, 3.5)	2.6(2.1, 3.6)	2.5(1.8, 3.2)	51 341.5	0.036

AAD. 急性主动脉夹层; AKI. 急性肾损伤; SBP. 收缩压; DBP. 舒张压; Na. 钠; K. 钾; Cl. 氯; CO<sub>2</sub>CP. 二氧化碳结合力; Ca. 钙; AG. 阴离子间隙; P. 磷; Mg. 镁; AST. 谷草转氨酶; Cr. 肌酐; Urea. 尿素; Glu. 葡萄糖; UA. 尿酸; CK. 肌酸激酶; CK-MB. 肌酸激酶同工酶; LDH. 乳酸脱氢酶;  $\alpha$ -HB.  $\alpha$ -羟丁酸; WBC. 白细胞计数; Eos. 嗜酸性粒细胞计数; Baso. 嗜碱性粒细胞计数; RBC. 红细胞计数; Hb. 血红蛋白; Hct. 血细胞比容; PLT. 血小板计数; PT. 凝血酶原时间; Fib. 纤维蛋白原

**2.2 训练集、测试集及外部验证集患者的基线临床特征比较** 对训练集、测试集及外部验证集3个队列的人口学资料和临床特征进行比较,结果显示3组间差异无统计学意义,分布一致( $P>0.05$ ,附表, <https://dx.doi.org/10.11855/j.issn.0577-7402.1728.2025.0805FJ>)。

**2.3 LASSO回归筛选的重要特征变量** 采用LASSO回归分析上述变量,共筛选出14个非零系数的特征变量,其中,MODS、CL、CRRT、AKI、脑损伤和休克与术后死亡结局呈正相关,CO<sub>2</sub>CP、Stanford分型、CK-MB、PT、α-HB、LDH和性别与术后死亡结局呈负相关(表2)。

**表2** LASSO回归变量筛选的相关系数

**Tab.2** Screening coefficients for LASSO regression variables

变量	相关系数
MODS	0.687
AKI	0.338
CRRT	0.493
脑损伤	0.099
消化道出血	0.439
休克	0.295
Stanford分型	0.194
性别	-0.023
血氯	0.328
CO <sub>2</sub> CP	-0.262
CK-MB	0.072
LDH	0.085
α-HB	0.378
PT	0.081

MODS.多器官功能障碍综合征;AKI.急性肾损伤;CRRT.连续肾脏替代治疗;CO<sub>2</sub>CP.二氧化碳结合力;CK-MB.肌酸激酶同工酶;LDH.乳酸脱氢酶;α-HB.α-羟丁酸;PT.凝血酶原时间

**2.4 XGBoost机器学习模型性能的评估** 根据上述变量构建XGBoost模型,在训练集和测试集中该模型均具有较高的预测能力(训练集:AUC=0.928,95%CI 0.901~0.956;测试集:AUC=0.919,95%CI 0.891~0.949)。训练集的准确率为89.6%,测试集的准确率为89.9%;F1得分结果显示,训练集为93.8%,测试集为70.4%。模型的准确率、敏感度及特异度等指标在训练集与测试集中均表现良好,提示模型具有较好的泛化能力和临床应用价值。在外部验证集中,模型性能表现也较优,进一步凸显了该模型在不同评价维度上的有效性(表3)。

**2.5 XGBoost机器学习模型的SHAP值解释** 采用SHAP值解释XGBoost模型相关特征变量对AAD患者术后死亡预测的影响,结果按SHAP值平均绝对值从高到低排序依次为LDH、血氯、MODS、CO<sub>2</sub>CP、

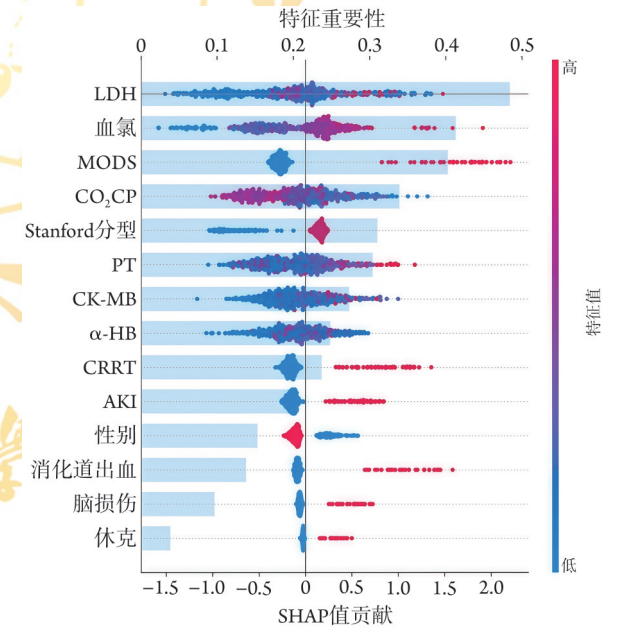
**表3** XGBoost模型在训练集、测试集和外部验证集中的性能评估

**Tab.3** Evaluation for performance of XGBoost model in training, testing set, and external validation sets

效能评价	训练集	测试集	外部验证集
AUC(95%CI)	0.928(0.901~0.956)	0.919(0.891~0.949)	0.941(0.915~0.967)
准确率(%)	89.6	89.9	90.1
敏感度(%)	96.9	96.7	81.4
特异度(%)	73.5	60.8	92.1
精确率(%)	90.9	80.5	70.6
阳性预测值(%)	91.0	91.5	70.6
阴性预测值(%)	80.8	80.5	95.5
F1评分(%)	93.8	70.4	75.6

AUC.曲线下面积;95%CI.95%置信区间;准确率.模型正确预测的比例,反映了模型的整体准确程度;敏感度(又称召回率).模型正确预测阳性结果的能力;特异度.模型正确预测阴性结果的能力;F1评分.精确率和敏感度的调和平均值,用于综合评估模型的性能

PT、α-HB、CK-MB、Stanford分型、CRRT、性别、AKI、消化道出血、脑损伤和休克(图1)。



MODS.多器官功能障碍综合征;AKI.急性肾损伤;CRRT.连续肾脏替代治疗;CO<sub>2</sub>CP.二氧化碳结合力;CK-MB.肌酸激酶同工酶;LDH.乳酸脱氢酶;α-HB.α-羟丁酸;PT.凝血酶原时间

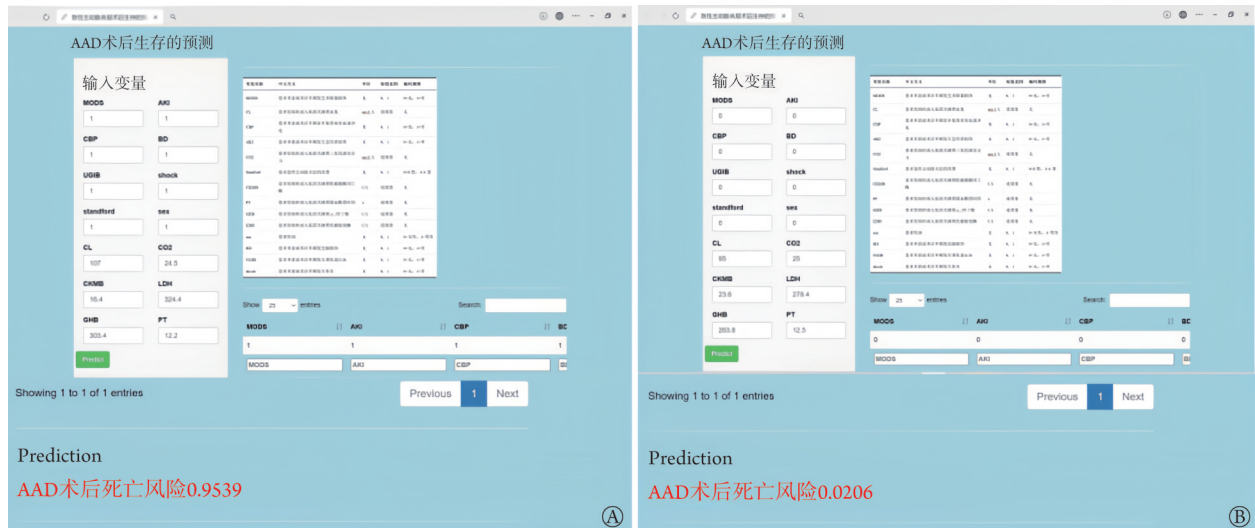
**图1** SHAP值蜂群图解释XGBoost模型的特征贡献

**Fig.1** SHAP value bee colony graph explains the feature contribution of the XGBoost model

**2.6 预测网站搭建** 依据上述XGBoost模型构建AAD患者术后死亡风险预测网站(<https://dun-dunxiaolu.shinyapps.io/document/>),XGBoost模型预测最佳截断值为0.2067,在测试集和外部验证集中采用简单随机抽样的方法分别选取1例入院AAD患者,

将患者入院时的特征变量输入到基于XGBoost方法构建的术后死亡风险在线预测模型(图2)中,计算结果显示,患者1(特征变量:合并发生多脏器损伤、AKI、脑损伤、消化道出血、休克、合并使用床旁血液净化、Stanford A型、血氯为107 mmol、CK-MB为16.4 U/L、PT为324.4 s、 $\alpha$ -HB为303.4 mmol/L、LDH为12.2 U/L和男性)的术后死亡风险为0.9539

(>0.2067),患者2(特征变量:未发生多脏器损伤、未发生AKI、未发生脑损伤、未发生消化道出血、未发生休克、未使用床旁血液净化、Stanford A型、血氯为96 mmol、CK-MB为23.6 U/L、PT为278.4 s、 $\alpha$ -HB为263.8 mmol/L、LDH为12.5 U/L和女性)术后死亡风险为0.0206(<0.2067)。随访结局证实患者1术后30 d内死亡,患者2术后30 d内存活。



AAD.急性主动脉夹层; A.患者1预测结果; B.患者2预测结果

图2 AAD术后生存预测网站试运行结果

Fig.2 Computational results of online website for postoperative survival of AAD

### 3 讨论

AAD是一种致死率极高的心血管急症,其治疗策略和预后评估高度依赖于Stanford分型,其中A型夹层因涉及升主动脉,病情更为凶险,未经治疗的A型患者在住院前24 h内每小时都存在死亡风险,近50%的患者在1周内死亡<sup>[20]</sup>。因此,准确预测AAD患者的术后死亡风险对于优化治疗方案、降低病死率至关重要。本研究构建XGBoost机器学习模型,基于患者的基本信息,入院生理、生化指标和术后并发症特征,对AAD患者术后死亡风险进行预测,旨在为临床提供一个高效、准确的评估工具。本研究构建的XGBoost模型在训练集、测试集和外部验证集上均表现出较高的预测性能(AUC分别为0.928、0.919和0.941, F1评分分别为93.8%、70.4%和75.6%),提示模型能够有效识别术后死亡风险的关键因素,并准确预测术后死亡风险,其结果优于既往研究中常见的预测模型<sup>[11]</sup>,进一步证实了机器学习在复杂疾病预后评估中的优势。此外,本研究通过SHAP值分析明确了各特征变量的重要性及其对预测结果的贡献,揭示了多脏器损伤、AKI、合并使用床旁血液净化、脑损伤、消化道出血、休克、

Stanford分型、性别、血氯、CO<sub>2</sub>CP、CK-MB、LDH、 $\alpha$ -HB和PT等为预测AAD术后死亡的关键影响因素。这些特征变量大多为临床常规检测指标,数据获取方便,易于在临床实践中应用,为临床诊断和治疗提供了新的依据。该在线预测系统为临床医师提供了一种高效工具,可快速评估术后死亡风险,辅助识别高危病例,并指导精准干预,进而减少术后不良结局的发生。

Stanford分型是AAD预后的重要评估指标,A型患者病情更严重,术后死亡风险较高。Xu等<sup>[21]</sup>发现,A型和B型AAD患者30 d全因病死率分别为31.9%和9.7%,就诊1年后分别增高至35.4%和16.8%。本研究结果进一步证实A型患者术后死亡风险高于B型患者,这可能与A型夹层受累范围更广泛及病理改变更复杂有关<sup>[20,22]</sup>。有研究报道,AAD的Stanford分型是患者预后的主要预测指标<sup>[23]</sup>。此外,急性主动脉壁夹层国际注册(International Registry of Acute Aortic Dissection, IRAD)研究显示,Stanford A型患者的总住院病死率为22%,而Stanford B型患者为12%~14%<sup>[20]</sup>,提示临床医师应更加重视A型患者的病情严重程度及潜在风险。

本研究发现,存活组的舒张压明显高于死亡组

[80(69, 94) mmHg vs. 75(65, 87) mmHg,  $P < 0.05$ ], 与 Bossone 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。其中, 舒张压  $< 60$  mmHg 是短期内心肌损伤等心血管事件和病死率的预测因子<sup>[25]</sup>; 此外, 研究还表明, 收缩压  $\leq 80$  mmHg 是 AAD 院内死亡的独立危险因素, 且与住院病死率呈明显的 J 型曲线关系<sup>[24]</sup>。这种相关性可能与血压过度降低损害心肌灌注有关。因此, 在临床治疗中应避免过度降压, 尤其是在术前和术后初期, 并密切监测血压水平, 以确保心肌灌注充足。

本课题组前期研究发现,  $\text{CO}_2\text{CP}$  降低是 AAD 患者术后短期死亡的独立危险因素<sup>[26]</sup>, 而本研究死亡组入院时的  $\text{CO}_2\text{CP}$  明显低于存活组 ( $P < 0.001$ ), 进一步支持了前期研究结果。此外, 入院时高血氯也是患者术后 30 d 内全因死亡的独立危险因素<sup>[27]</sup>, 本研究死亡组的血氯 ( $P < 0.001$ ) 及血钠 ( $P < 0.014$ ) 也高于存活组。上述结果提示, 血氯升高和  $\text{CO}_2\text{CP}$  降低可能影响电解质平衡及酸碱平衡, 进而破坏心肌细胞的兴奋性、传导性和酸碱平衡, 最终影响心脏功能<sup>[28]</sup>。高血氯还可能与炎症因子[如白细胞介素-6(IL-6)、IL-10 和肿瘤坏死因子(TNF)]的释放有关, 这些炎症因子可能对心脏产生负面影响, 如促进心肌细胞的凋亡和纤维化<sup>[29]</sup>, 而主动脉夹层的发生、发展均受炎症反应的影响。炎症反应可造成血管平滑肌细胞凋亡、坏死, 以及胶原蛋白沉积、断裂, 从而招募炎症细胞并激活胞内信号转导途径, 并促进炎症因子的表达, 加重血管损伤, 最终导致主动脉破裂, 危及患者生命<sup>[30]</sup>。本课题组前期研究还发现,  $\text{CO}_2\text{CP}$  联合血钠预测患者 30 d 病死率和院内不良结局的价值优于单一的血钠升高和  $\text{CO}_2\text{CP}$  降低<sup>[31]</sup>。最后, 高氯血症可能影响患者的神经激素系统, 如肾素-血管紧张素-醛固酮系统(RAAS), 进而影响其心脏功能和血压调节<sup>[32]</sup>。因此, 在临床实践中, 应重视入院时的电解质和酸碱平衡状态, 及时纠正异常情况, 以降低术后死亡风险。本课题组前期研究发现, 用于诊断心肌梗死的  $\alpha\text{-HB}$  是 AAD 患者院内死亡的影响因素<sup>[33]</sup>。Yu 等<sup>[34]</sup>发现,  $\alpha\text{-HB}$  与腹股沟动脉粥样硬化的发生有关, 而 Lee 等<sup>[35]</sup>发现, 动脉粥样硬化与 AAD 的发生、发展有关, 与本研究的结论[即存活组的  $\alpha\text{-HB}$ 、CK-MB 和 LDH 水平均明显低于死亡组 ( $P < 0.001$ )]一致。这些指标均与心肌损伤和坏死密切相关, 高水平的  $\alpha\text{-HB}$  和 CK-MB 提示心肌损伤程度更严重, 而 LDH 水平升高则可能与组织缺血、坏死有关<sup>[33,36]</sup>。以上结果进一步证实了心肌损伤标志物在 AAD 患者术后死亡风险评估中的重要性。在临床实践中, 应密切监测这些指标的变化, 及时发现心肌损伤并采取相应的治疗措施。

综上所述, 本研究基于 XGBoost-SHAP 方法成功

构建了用于预测 AAD 患者术后死亡风险的机器学习模型, 并开发了相应的在线预测工具。本研究通过对 AAD 患者的临床数据进行分析, 结合 LASSO 回归筛选出关键的特征变量, 并构建了 XGBoost 模型, 该模型在训练集、测试集和外部验证集上均表现出较高的预测性能(AUC 分别为 0.928、0.919 和 0.941)。此外, 本研究通过 SHAP 值分析明确了各特征变量对模型预测的贡献, 进一步增强了模型的可解释性。最终, 基于 XGBoost-SHAP 搭建的预测网站为临床医师提供了一个便捷的术后死亡风险评估工具, 有助于提高高危患者的识别效率, 为临床决策提供支持。尽管本研究取得了一定的成果, 但仍存在一些局限性: (1) 前瞻性验证不足。本研究未设置前瞻性测试集, 模型的预测性能尚未经过前瞻性验证。故在未来计划开展前瞻性研究, 对模型进行实时验证和评估, 这将有助于更准确地评估模型在实际临床应用中的表现, 及时发现并解决模型在实际使用过程中可能出现的问题, 进一步优化模型性能。(2) 样本量有限。目前模型的数据主要来源于两家医院, 这可能限制了模型的泛化能力, 影响该模型在不同地区和人群中的适用性, 未来可扩大样本量并与更多临床中心合作, 收集更大规模的样本数据, 以进一步验证模型的性能, 减少样本量不足和选择偏倚造成的影响, 使其能够更好地适应不同地区和人群的临床需求。(3) 合并症分析不完善。本研究的合并症未按照严重程度进行分级分析, 可能导致模型对某些患者的风险评估不够精准。未来的研究可对合并症的严重程度进行详细分级和分析, 并将合并症的具体数值纳入模型构建中, 这将有助于更精准地评估患者的术后死亡风险, 提高模型的预测精度和临床应用价值。(4) 模型复杂性与过拟合风险。尽管 XGBoost 模型在处理复杂数据和非线性关系方面具有优势, 但仍需进一步优化模型参数, 以确保模型在不同数据集上的稳定性和泛化能力。未来的研究可对模型和工具进行进一步的改进和完善, 使其更贴合临床实际需求, 以更好地用于临床决策支持。

#### 【参考文献】

- [1] 隋洪刚, 王效增. 急性主动脉夹层合并急性 ST 段抬高型心肌梗死诊疗进展[J]. 临床军医杂志, 2023, 51(4): 434-437, 440.
- [2] Gawinecka J, Schönraht F, von Eckardstein A. Acute aortic dissection: pathogenesis, risk factors and diagnosis[J]. Swiss Med Wkly, 2017, 147: w14489.
- [3] Papagiannis J. Sudden death due to aortic pathology[J]. Cardiol Young, 2017, 27(S1): S36-S42.
- [4] Wundram M, Falk V, Eulert-Grehn JJ, et al. Incidence of acute type A aortic dissection in emergency departments[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 7434.

- [5] Singh A, Khaja A, Alpert MA. Cocaine and aortic dissection[J]. *Vasc Med*, 2010, 15(2): 127-133.
- [6] Zhu X, Wang J, Chong H, *et al.* Analysis of risk factors for postoperative mortality in acute type A aortic dissection patients under different critical levels[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 8107.
- [7] Tolenaar JL, Froehlich W, Jonker FHW, *et al.* Predicting in-hospital mortality in acute type B aortic dissection: evidence from International Registry of Acute Aortic Dissection[J]. *Circulation*, 2014, 130(11 Suppl 1): S45-S50.
- [8] 郭桦, 丁俊瑜, 刘长鑫, 等. 机器学习在新型冠状病毒感染诊疗中的应用研究进展[J]. *解放军医学杂志*, 2023, 48(7): 863-870.
- [9] Huang Y, Li J, Li M, *et al.* Application of machine learning in predicting survival outcomes involving real-world data: a scoping review[J]. *BMC Med Res Methodol*, 2023, 23(1): 268.
- [10] 陈潮金, 饶静怡, 叶欣妍, 等. 基于可解释机器学习构建老年患者术后急性肾损伤风险预测模型[J]. *临床军医杂志*, 2023, 51(7): 688-693.
- [11] Wu Z, Li Y, Xu Z, *et al.* Prediction of preoperative in-hospital mortality rate in patients with acute aortic dissection by machine learning: a two-centre, retrospective cohort study[J]. *BMJ Open*, 2023, 13(4): e066782.
- [12] 中国医师协会心血管外科分会大血管外科专业委员会. 主动脉夹层诊断与治疗规范中国专家共识[J]. *中华胸心血管外科杂志*, 2017, 33(11): 641-654.
- [13] 刘双庆, 杨建中, 杨婷, 等. 成人急性肝损伤诊疗急诊专家共识[J]. *中国急救医学*, 2024, 44(1): 5-12.
- [14] 蒋建新, 顾玮, 张连阳, 等. 创伤后并发症的定义与诊断专家共识[J]. *中华创伤杂志*, 2013, 29(6): 481-484.
- [15] 王岩, 张锂泰, 何龙, 等. 急性肾损伤的定义诊断与变迁[J]. *中国实用内科杂志*, 2023, 43(12): 969-971, 985.
- [16] 倪小佳, 陈耀龙, 蔡业峰. 中西医结合脑卒中循证实践指南(2019)[J]. *中国循证医学杂志*, 2020, 20(8): 901-912.
- [17] 王华, 梁延春. 中国心力衰竭诊断和治疗指南2018[J]. *中华心血管病杂志*, 2018, 46(10): 760-789.
- [18] 栗林, 王雪静, 武文贤, 等. 体外循环心脏手术后消化道出血风险预测模型构建及验证[J]. *中国循环杂志*, 2024, 39(8): 800-805.
- [19] 袁桃, 岳建明, 周荣华. 心脏手术后谵妄的危险因素及预防[J]. *中国体外循环杂志*, 2024, 22(1): 60-64.
- [20] Pape LA, Awais M, Woznicki EM, *et al.* Presentation, diagnosis, and outcomes of acute aortic dissection: 17-year trends from the International Registry of Acute Aortic Dissection[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2015, 66(4): 350-358.
- [21] Xu W, Haran C, Dean A, *et al.* Acute aortic syndrome: nationwide study of epidemiology, management, and outcomes[J]. *Br J Surg*, 2023, 110(9): 1197-1205.
- [22] Erbel R, Aboyans V, Boileau C, *et al.* 2014 ESC guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases[J]. *Kardiol Pol*, 2014, 72(12): 1169-1252.
- [23] Trimarchi S, de Beaufort HWL, Tolenaar JL, *et al.* Acute aortic dissections with entry tear in the arch: a report from the International Registry of Acute Aortic Dissection[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2019, 157(1): 66-73.
- [24] Bossone E, Gorla R, LaBounty TM, *et al.* Presenting systolic blood pressure and outcomes in patients with acute aortic dissection[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 71(13): 1432-1440.
- [25] McEvoy JW, Chen Y, Rawlings A, *et al.* Diastolic blood pressure, subclinical myocardial damage, and cardiac events: implications for blood pressure control[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 68(16): 1713-1722.
- [26] Huang PF, Liu YK, Zhao YB, *et al.* Carbon-dioxide-combining-power and postoperative short-term mortality in patients with Stanford type A acute aortic dissection[J]. *Asian J Surg*, 2022, 45(12): 2925-2927.
- [27] 黄鹏飞, 张云静, 马冬, 等. 血氯离子水平与急性A型主动脉夹层患者术后30 d内预后的相关性研究[J]. *中国全科医学*, 2023, 26(11): 1330-1339.
- [28] Berend K, van Hulsteijn LH, Gans ROB. Chloride: the queen of electrolytes?[J]. *Eur J Intern Med*, 2012, 23(3): 203-211.
- [29] Filis C, Vasileiadis I, Koutsoukou A. Hyperchloraemia in sepsis[J]. *Ann Intensive Care*, 2018, 8(1): 43.
- [30] 湛镇伊, 杨建安, 刘银河. 微小RNA在主动脉夹层中差异性表达与发病机制的研究进展[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2019, 27(10): 910-914.
- [31] Huang PF, Zhang YJ, Lou XZ, *et al.* Predictive value of admission CO<sub>2</sub> combining power combined with serum sodium for the prognosis in acute Stanford type A aortic dissection patients[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 1048.
- [32] Takahashi H, Yoshika M, Komiyama Y, *et al.* The central mechanism underlying hypertension: a review of the roles of sodium ions, epithelial sodium channels, the renin-angiotensin-aldosterone system, oxidative stress and endogenous digitalis in the brain[J]. *Hypertens Res*, 2011, 34(11): 1147-1160.
- [33] 赵俊喙, 王洪岩, 赵永波, 等. 急性主动脉夹层患者入院时血糖水平与其院内死亡的相关性研究[J]. *中国全科医学*, 2022, 25(2): 166-170.
- [34] Yu H, Han H, Li J, *et al.* Alpha-hydroxybutyrate dehydrogenase as a biomarker for predicting systemic lupus erythematosus with liver injury[J]. *Int Immunopharmacol*, 2019, 77: 105922.
- [35] Lee S, Koppensteiner R, Kopp CW, *et al.*  $\alpha$ -Hydroxybutyrate dehydrogenase is associated with atherothrombotic events following infrainguinal angioplasty and stenting[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 18200.
- [36] Zhang YJ, Sun Y, Zhao YB, *et al.*  $\alpha$ -HBDH is a superior to LDH in predicting major adverse cardiovascular events in patients with acute aortic dissection[J]. *Heliyon*, 2024, 10(8): e29155.

(责任编辑: 张小利)