DOI:10.16016/j.2097-0927.202503010

术后入ICU肥胖患者AKI风险及其进展为死亡预测研究

李 强[1,2],母 国[1,2],王文章[1,2],印 婕[1,2],余 璇[1,2],卢 彬[2],李 茜[3],周 军[1] [1]西南医科大学附属医院麻醉科 四川 泸州;[2]自贡市第四人民医院麻醉科 四川 自贡;[3]四川大学华西医院麻醉科 四川 成都

[摘要] **目的** 本研究旨在通过机器学习算法构建肥胖患者术后急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)风险预测模型及死亡风险预测模型,以提高对肥胖患者术后AKI的预警能力和预后评估水平,为临床医疗提供支持。**方法** 研究从MIMIC-IV和eICU数据库中收集术后入ICU的肥胖患者相关数据进行统计分析,最终纳入2520例肥胖术后入ICU患者(MIMIC-IV 670例,eICU 1 850例)进行模型构建,包括一般资料、生命体征、实验室检查结果、手术类型、合并症及用药情况等。通过数据清洗和预处理,使用Boruta进行特征筛选,并采用GBM、GLM、KNN、NB、NNET、SVM和XGBoost等7种机器学习算法构建预测模型,通过交叉验证和外部验证评估模型性能。**结果** 肥胖患者术后AKI风险预测模型中,SVM模型在测试集的AUC值达到0.80,外部验证AUC为0.71;死亡风险预测模型中,GBM模型表现最佳,测试集AUC值达到0.91。**结论** 本研究成功构建了肥胖患者术后AKI风险及死亡风险预测模型,为临床医生提供了有力的辅助工具,有助于改善患者临床结局。

[关键词] 肥胖患者;急性肾损伤;机器学习;风险预测;死亡预测

[中图法分类号] R459.7;R692;R195.1 [文献标志码] A

Prediction of risk for acute kidney injury and its progression to mortality in obese patients admitted to ICU postoperatively

LI Qiang[1,2], MU Guo[1,2], WANG Wenzhang[1,2], YIN Jie[1,2], YU Xuan[1,2], LU Bin[2], LI Qian[3], ZHOU Jun[1] [1]Department of Anesthesiology, Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou, Sichuan; [2]Department of Anesthesiology, Zigong Fourth People's Hospital, Zigong, Sichuan; [3]Department of Anesthesiology, West China Hospital of Sichuan University, Chengdu, Sichuan, China

[**Abstract**] **Objective** To develop a machine learning-based risk prediction model for postoperative acute kidney injury (AKI) and a model for mortality in obese patients admitted to intensive care unit (ICU) in order to improve early warning and prognostic evaluation to support clinical decision-making. **Methods** Data of obese postoperative ICU patients were retrospectively retrieved from the MIMIC-IV and eICU databases for statistical analysis. Ultimately, 2 520 patients (670 from MIMIC-IV and 1 850 from eICU databases) were included to build the risk prediction models for AKI and mortality. The data included demographic information, vital signs, laboratory findings, surgical types, comorbidities, and medication use. After data cleaning and preprocessing, Boruta feature selection was applied, followed by the construction of

[基金项目] 四川省科技计划项目(2022YFS0615),自贡市科技计划项目(2023-YGY-2-02)

[通信作者] 周 军, E-mail: junzhou@swmu.edu.cn

2097-0927/Copyright © 2025, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循CC BY许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

引用格式:李强,母国,王文章,等. 术后入ICU肥胖患者AKI风险及其进展为死亡预测研究[J]. 陆军军医大学学报,2025,47(10):1110-1125. DOI:10.16016/j.2097-0927.202503010.

Citation: LI Q, MU G, WANG W Z, *et al*. Prediction of risk for acute kidney injury and its progression to mortality in obese patients admitted to ICU postoperatively[J]. J Army Med Univ, 2025, 47(10): 1110-1125. DOI: 10.16016/j.2097-0927.202503010.

prediction models using 7 machine learning algorithms, that is, Gradient Boosting Machine (GBM), Generalized Linear Model (GLM), k-Nearest Neighbors (KNN), Naïve Bayes (NB), Neural Network (NNET), Support Vector Machine (SVM), and XGBoost. Model performance was evaluated through cross-validation and external validation. **Results** In the risk prediction models of AKI, the SVM model achieved the highest AUC value of 0.80 in the testing set and 0.71 in the external validation test. For the risk prediction models of mortality, the GBM model outperformed others in the prediction, attaining an AUC value of 0.91 in the testing set. **Conclusion** Risk predictive models for postoperative AKI and mortality in obese ICU patients are successfully constructed, and are valuable tools for clinicians to optimize early intervention and improve clinical outcomes for the patients.

[**Key words**] obese patients; acute kidney injury; machine learning; risk prediction; mortality prediction

Supported by the Project of Science and Technology Plan of Sichuan Province (2022YFS0615) and the Project of Science and Technology Plan of Zigong City (2023-YGY-2-02). Corresponding author: ZHOU Jun, E-mail: junzhou@swmu.edu.cn

急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)是一种由多种病因引起的肾功能急剧下降的临床综合征,表现为血清肌酐水平升高和尿量减少,常伴随水电解质紊乱和酸碱失衡,严重时可导致多器官功能障碍甚至死亡[1]。术后急性肾损伤是手术患者常见的并发症之一,尤其在肥胖手术患者中,由于其特殊的生理和代谢状态,术后AKI的发生率明显高于普通手术患者[2],且与患者的中长期预后密切相关,如慢性肾脏病(chronic kidney disease,CKD)的发生率增加、长期透析需求及死亡风险上升等[3]。我国肥胖患者手术量逐年增加,肥胖患病率的增加会导致与肥胖相关的外科并发症增加[4-7],给围手术期的管理带来挑战。

随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的快速发展,机器学习(machine learning, ML)作为AI的核心技术之一,通过挖掘、处理和分析大量医疗数据,已在医疗领域取得了显著成果[8-12]。近年来,有许多研究团队尝试利用ML技术构建AKI的早期预警模型,如AKI-Pro评分预测心脏手术后早期AKI患者进展为严重AKI或死亡[13],以及对住院患者进行AKI实时预测的模型[14]等。但目前的个体化预警模型研究多针对普通患者,针对肥胖手术术后AKI的早期预警研究仍然较少,由于肥胖患者的生物代谢等不同,模型用于该类患者会导致敏感性和特异性不足,且对于危重肥胖患者的关注尚欠缺。因此,亟需对肥胖手术患者进行个体化预警及预后预测研究,对术后AKI进行准确、快速识别;并对出现了AKI的患者及时预测患者的死亡风险,给予及时、有效的管理,可以显著改善患者结局。

1 资料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于MIMIC数据库(medical information mart for intensive care IV, MIMIC-IV v2.0)[15]和eICU数据库(eICU Collaborative Research Database)[16]。MIMIC-IV-2.2是一个可免费访问的数据库,收录了2008年至2019年马萨诸塞州波士顿贝斯以色列女执事医疗中心的50,000多例ICU入院病例。MIMIC-IV数据库包含大量信息,包括人口统计学、生命体征、测试结果和诊断,使用国际疾病分类第九版(ICD-9)和第十版(ICD-10)中的代码进行分类。eICU数据库是由飞利浦医疗保健开发的多中心ICU数据库,包括2014年至2015年间来自美国208个不同ICU的200,859例ICU入院病例,MIMIC-IV的来源医院没有参加eICU计划。eICU数据库包括患者在ICU住院期间的生命体征、护理记录、疾病严重程度测量、诊断、治疗和实验室结果等数据。本研已获得数据访问权限和使用许可(认证号:46086293)。由于MIMIC和eICU数据库都是公开可用的匿名数据库,因此无需获得伦理委员会的批准。

纳入标准包括:(1)年龄大于18岁;(2)美国麻醉医师协会(american society of anesthesiologists, ASA)分级Ⅱ~Ⅳ;(3)术后24小时进入ICU;(4)术前无AKI或其他严重并发症;(5)麻醉方式为全麻。排除标准包括:(1)同一手术操作重复记录或手术记录相关数据不完整;(2)手术类型不属于胸腹部手术、心脏手术、头颅手术和脊柱手术、四肢手术;(3)缺失数据>

30%;(4)年龄大于90岁。纳入排除流程图见图1。

结局指标为AKI(KDIGO标准)和死亡(院内全因死亡)。KDIGO定义的AKI需满足以下任意一条(48 h内):血肌酐升高≥0.3 mg/dL(26.5 μmol/L),血肌酐较基线升高≥50%,尿量减少(<0.5 mL/kg/h,持续6 h以上)[17]。并将急性肾损伤患者作为阳性病例,按统计学研究要求的1∶3比例,根据阳性病例的手术类型和年龄,对于MIMIC-IV数据库随机匹配同时间段内术后未发生AKI的患者作为阴性对照病例,由于eICU在AKI预测模型中用于外部验证,未进行匹配,肥胖患者定义为BMI(body mess index)≥30 kg/m^2[18]。

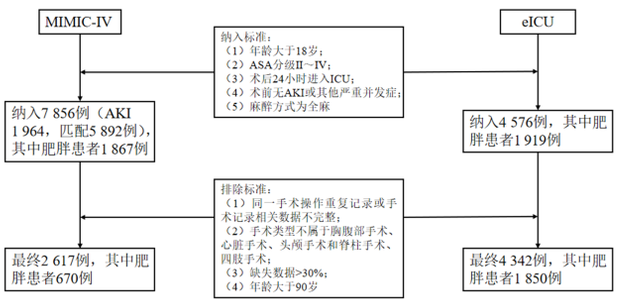


图1 纳入排除流程

1.2 建模指标选取

根据既往研究和临床经验,选取与AKI相关的变量作为模型构建的指标,共收集了51个指标,包括一般资料、手术类型、术后入ICU监测检验指标和决策相关指标,纳入指标的测量时间点为术后24 h内,见表1。

表1 纳入指标及赋值情况

指标名称	指标含义	数据类型	赋值
age	年龄	连续型变量	具体数值
gender	性别	离散型变量	0:女;1:男
bmi	身体质量指数	连续型变量	具体数值
charlson_score	charlson评分	连续型变量	具体数值
surgery_type	手术类型	离散型变量	1:胸腹部手术;2:心脏手术;3:头颅手术和脊柱手术;4:四肢手术
first_hr	首次心率(HR)	连续型变量	具体数值
first_rr	首次呼吸(RR)	连续型变量	具体数值
first_nbps	首次无创收缩压(NBPS)	连续型变量	具体数值
first_nbpd	首次无创舒张压(NBPD)	连续型变量	具体数值
first_nbpm	首次无创平均血压(NBPM)	连续型变量	具体数值
first_spo2	首次外周血氧饱和度(SpO_2)	连续型变量	具体数值
first_temperature	首次体温(T)	连续型变量	具体数值
urine_amount1	尿量总和(UA)	连续型变量	具体数值
day1_per_urine	每小时.每公斤体重尿量	连续型变量	具体数值
1day_hemoglobin	血红蛋白(Hb)	连续型变量	具体数值
1day_wbc	白细胞(WBC)	连续型变量	具体数值
1day_plateletcount	血小板计数(PLT)	连续型变量	具体数值
1day_hematocrit	血细胞比容(HCT)	连续型变量	具体数值
1day_albumin	白蛋白	连续型变量	具体数值
1day_sodium	血钠浓度	连续型变量	具体数值
1day_potassium	血钾浓度	连续型变量	具体数值
1day_chloride	血氯浓度	连续型变量	具体数值
1day_glucose	血葡萄糖浓度	连续型变量	具体数值
1day_aniongap	阴离子间隙(AG)	连续型变量	具体数值
1day_ph	酸碱度(PH)	连续型变量	具体数值
1day_pco2	血二氧化碳分压($PaCO_2$)	连续型变量	具体数值
1day_po2	血氧分压(PaO_2)	连续型变量	具体数值
1day_lactate	乳酸(LAC)	连续型变量	具体数值
1day_pt	凝血酶原时间(PT)	连续型变量	具体数值

续表1 纳入指标及赋值情况

指标名称	指标含义	数据类型	赋值
1day_ptt	部分活化凝血活酶时间(APTT)	连续型变量	具体数值
1day_inr	国际标准化比值(INR)	连续型变量	具体数值
1day_bilirubintotal	总胆红素(TBIL)	连续型变量	具体数值
1day_ureanitrogen	血尿素氮(BUN)	连续型变量	具体数值
1day_creatinine	血肌酐	连续型变量	具体数值
dopamine_total_1day	多巴胺(DA)	离散型变量	0:未使用;1:使用
norepinephrine_total_1day	去甲肾上腺素(NE)	离散型变量	0:未使用;1:使用
phenylephrine_total_1day	苯肾上腺素(PE)	离散型变量	0:未使用;1:使用
epinephrine_total_1day	肾上腺素(EPI)	离散型变量	0:未使用;1:使用
vasopressin_1Day	血管加压素(AVP)	离散型变量	0:未使用;1:使用
dexmedetomidine_1Day	盐酸右美托咪定(Dex)	离散型变量	0:未使用;1:使用
hydrocortisone_1Day	氢化可的松(HC)	离散型变量	0:未使用;1:使用
prednisone_1Day	泼尼松(P)	离散型变量	0:未使用;1:使用
dexamethasone_1Day	地塞米松(DEX)	离散型变量	0:未使用;1:使用
prednisolone_1Day	泼尼松龙(PRED)	离散型变量	0:未使用;1:使用
atorvastatin_1Day	阿托伐他汀(ATOR)	离散型变量	0:未使用;1:使用
pravastatin_1Day	普伐他汀(PRA)	离散型变量	0:未使用;1:使用
losartan_1Day	氯沙坦(LK)	离散型变量	0:未使用;1:使用
azithromycin_1Day	阿奇霉素(AZM)	离散型变量	0:未使用;1:使用
furosemide_1Day	呋塞米(FSD)	离散型变量	0:未使用;1:使用
vitamin_c_1Day	维生素C(VC)	离散型变量	0:未使用;1:使用
aspirin_1Day	阿司匹林	离散型变量	0:未使用;1:使用

1.3 机器学习模型构建

1.3.1 数据预处理 为使数据符合机器学习运行要求,对纳入指标进行预处理。连续型变量采用Z-score归一化处理。此外,数据过多缺失会直接影响预测模型分类效果,本研究进行纳入排除患者时剔除了纳入指标(一般资料和术后入ICU监测、检验指标)缺失超过30%的患者,另外在进行数据清洗时,针对单一指标缺失超过30%的指标同样进行剔除,其余缺失数据采用多重插补方法(multiple imputation)来处理数据缺失问题,具体通过R语言中的MICE包实现。

数据处理后,对于AKI预测使用MIMIC-IV数据集的肥胖术后患者作为训练集和测试集,eICU数据集的肥胖术后患者作为验证集;对于死亡风险预测,为保证数据量,使用MIMIC-IV和eICU的肥胖术后发生AKI患者共同作为训练集和测试集。训练数据集和测试数据集按8:2的比例随机拆分得到。

1.3.2 特征选择 本研究采用Boruta算法进行特征选择,被算法识别为重要的特征纳入模型的构建,以减少模型过拟合。对于不同的结局预测(AKI发生以及AKI后死亡预测),Boruta分别进行分析筛选。

1.3.3 模型构建 本研究采用梯度提升机(gradient boosting machine, GBM)、广义线性模型(generalized linear model, GLM)、K近邻算法(k-nearest neighbors, KNN)、朴素贝叶斯(naive bayes, NB)、神经网络(neural network, NNET)、支持向量机(support vector machine, SVM)以及极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)共7种算法构建预测模型,机器学习过程基于R语言(version 4.4.1, R core development team, vienna, austria)进行分析。通过对比上述算法的性能,筛选出最适合研究数据的预测模型。

1.4 模型性能评估

本研究采用多种指标综合评估模型的预测效能,包括AUC(area under the receiver operating characteristic curve)、敏感性、特异性、PPV(positive predictive value)、NPV(negative predictive value)、平衡准确率、F1分数、bbrier以及校准曲线和DCA(decision curve analysis)曲线。

1.5 统计学分析

采用R软件进行数据分析。正态分布的计量资料用$\bar{x}\pm s$表示,组间比较采用t检验;偏态分布的计量资料用中位数(四分位数间距)[M(P25;P75)]表示,组

间比较采用Mann-Whitney U检验。计数资料采用频数和百分比表示,组间比较采用χ^2检验或Fisher确切概率法。所有统计检验均为双侧,P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基线信息

本研究MIMIC-IV和eICU数据库分别纳入7 856和4 576例患者,经数据清洗后用于统计分析的总数为6 959例,其中用于模型构建的为2 520例肥胖手术患者(MIMIC-IV 670例,eICU 1 850例)。

两个数据集的肥胖手术患者中有1 423例在ICU期间出现AKI,非肥胖患者发生AKI患者为1 950例,存在统计学差异(P<0.05)。同时肥胖和非肥胖患者相比,ICU住院时长也存在统计学差异(3.75[2.12, 6.71] *vs* 2.96[1.49, 5.23]天,P<0.05)。对于肥胖患者,肥胖等级越高,AKI的发生率越高(BMI 30-34.9:50.64% *vs* BMI 35-39.9:59.21% *vs* BMI≥40:73.82%,P<0.05)。

两个数据集中肥胖患者AKI组与非AKI组的一般信息、检验以及用药决策的比较见表2,可以发现,发生AKI后患者死亡风险更大,且大部分纳入指标存在差异,同时AKI的发生与不同类型手术存在关联,P<0.05。同时,对于AKI预测,对两个数据集的基线资料进行了对比,MIMIC-IV和eICU数据集在指标分布上存在统计学差异,P<0.05。

针对出现AKI的肥胖术后患者,其中有138例患者出现院内死亡,死亡率为9.7%。死亡组与存活组的一般资料比较显示,两组患者的大部分指标存在统计学差异,见表3,P<0.05。

表2 MIMIC和eICU数据集肥胖手术患者基线资料

指标	MIMIC-IV数据集				eICU数据集				
	Total(n=670)	未发生AKI(n=517)	发生AKI(n=153)	P1	Total(n=1850)	未发生AKI(n=580)	发生AKI(n=1 270)	P2	P3
年龄/岁	64.00[56.00;72.00]	64.00[56.00;72.00]	64.00[55.00;71.00]	0.954	66.00[55.25;73.00]	65.00[55.00;72.00]	66.00[56.00;73.00]	0.086	0.192
性别				0.387				0.701	<0.001
女	198(29.55%)	148(28.63%)	50(32.68%)		744(40.22%)	351(60.52%)	755(59.45%)		
男	472(70.45%)	369(71.37%)	103(67.32%)		1 106(59.78%)	229(39.48%)	515(40.55%)		
体重指数	32.61[31.18;34.93]	32.53[31.18;34.69]	32.88[31.11;35.69]	0.395	34.73[31.79;38.58]	33.85[31.54;37.44]	34.92[32.02;39.44]	<0.001	<0.001
查尔森合并症指数	3.00[2.00;5.00]	3.00[2.00;5.00]	4.00[3.00;6.00]	0.001	3.00[2.00;5.00]	3.00[2.00;5.00]	4.00[2.00;5.00]	<0.001	0.79
首次心率/(次/分)	80.00[76.00;87.00]	80.00[75.00;86.00]	84.00[80.00;94.00]	<0.001	87.58[77.71;98.07]	83.33[73.12;91.48]	89.36[80.00;101.24]	<0.001	<0.001
首次呼吸/(次/分)	15.00[12.00;17.00]	14.00[12.00;17.00]	16.00[13.00;18.00]	0.003	19.34[17.29;21.50]	18.36[16.58;20.51]	19.75[17.70;21.91]	<0.001	<0.001
首次无创收缩压/mmhg	113.00[102.00;123.00]	113.00[103.00;123.00]	113.00[101.00;124.00]	0.971	119.87[111.37;129.52]	120.35[111.43;130.26]	119.52[111.33;129.18]	0.343	<0.001
首次无创舒张压/mmhg	62.00[55.00;69.00]	62.00[55.00;68.00]	63.00[54.00;71.00]	0.443	63.73[58.52;69.57]	64.57[58.92;70.69]	63.50[58.52;68.83]	<0.001	<0.001
首次无创平均血压/mmhg	75.00[68.00;82.00]	74.00[68.00;82.00]	76.00[64.00;85.00]	0.68	79.48[72.98;87.05]	81.53[73.59;88.98]	78.95[72.94;85.95]	0.001	<0.001
首次外周血氧饱和度/%	100.00[99.00;100.00]	100.00[99.00;100.00]	100.00[97.00;100.00]	0.001	96.62[95.57;97.62]	96.50[95.49;97.42]	96.71[95.62;97.69]	0.03	<0.001
首次体温/℃	36.72[36.44;37.00]	36.67[36.44;36.99]	36.78[36.56;37.06]	0.005	36.94[36.75;37.18]	36.91[36.73;37.14]	36.95[36.76;37.20]	0.003	<0.001
尿量总和/ml	2 465.00[1981.25;3003.75]	2 465.00[2020.00;3000.00]	2 450.00[1855.00;3025.00]	0.534	2 631.50[892.00;4323.75]	3 425.00[1794.00;5088.75]	2 295.00[385.00;3999.00]	<0.001	0.594
每公斤体重.每小时尿量/ml	1.09[0.85;1.35]	1.10[0.86;1.36]	1.06[0.82;1.31]	0.168	1.07[0.34;1.77]	1.43[0.73;2.01]	0.89[0.16;1.54]	<0.001	0.05
血红蛋白/(g/dL)	11.70[9.90;13.50]	11.80[9.90;13.70]	11.50[9.80;13.00]	0.112	9.70[8.30;11.40]	10.10[8.80;11.70]	9.40[8.00;11.20]	<0.001	<0.001
白细胞/(10^9/L)	9.80[7.38;13.40]	9.80[7.40;13.20]	10.30[7.30;14.60]	0.284	9.70[7.00;12.90]	9.20[7.10;11.50]	9.90[6.90;13.70]	0.001	0.084
血小板计数/(10^9/L)	191.00[145.00;238.25]	190.00[143.00;235.00]	194.00[155.00;246.00]	0.276	153.00[110.00;213.00]	158.00[116.00;216.00]	151.00[105.00;209.00]	0.014	<0.001
血细胞比容/%	35.40[29.58;40.30]	35.50[29.30;40.60]	35.20[30.60;39.00]	0.513	28.35[23.67;33.73]	29.70[25.30;35.00]	27.70[23.00;33.10]	<0.001	<0.001

续表2 MIMIC和eICU数据集肥胖手术患者基线资料

指标	MIMIC-IV数据集				eICU数据集				
	Total(*n*=670)	未发生AKI(*n*=517)	发生AKI(*n*=153)	P1	Total(*n*=1850)	未发生AKI(*n*=580)	发生AKI(*n*=1 270)	P2	P3
白蛋白/(g/L)	4.10[3.80;4.30]	4.10[3.85;4.30]	4.00[3.68;4.30]	0.107	3.10[2.40;3.60]	3.40[2.90;3.80]	2.90[2.30;3.40]	<0.001	<0.001
血钠浓度/(mmol/L)	139.00[137.00;141.00]	139.00[138.00;141.00]	139.00[137.00;141.00]	0.061	137.00[134.00;139.00]	137.00[134.00;139.00]	137.00[134.00;140.00]	0.221	<0.001
血钾浓度/(mmol/L)	4.20[3.90;4.50]	4.20[3.90;4.50]	4.30[4.00;4.60]	0.047	3.80[3.50;4.10]	3.80[3.50;4.10]	3.80[3.40;4.10]	0.326	<0.001
血氯浓度/(mmol/L)	105.00[102.00;109.00]	105.00[102.00;109.25]	105.00[101.00;109.00]	0.062	103.00[99.00;107.00]	104.00[100.00;107.00]	103.00[99.00;107.00]	0.009	<0.001
血葡萄糖/(mmol/L)	121.00[103.00;147.00]	120.00[103.00;145.25]	122.00[105.00;150.00]	0.486	111.00[94.00;132.75]	109.00[96.00;129.00]	112.00[93.00;135.00]	0.357	<0.001
阴离子间隙/(mmol/L)	12.00[10.00;14.00]	12.00[10.00;14.00]	13.00[11.00;15.00]	0.023	8.00[5.00;11.00]	7.00[5.00;11.00]	8.00[6.00;11.00]	0.007	<0.001
酸碱度	7.38[7.35;7.42]	7.39[7.36;7.42]	7.37[7.34;7.40]	<0.001	7.35[7.31;7.39]	7.35[7.32;7.39]	7.35[7.30;7.39]	0.001	<0.001
二氧化碳分压/mmHg	42.00[39.00;46.00]	42.00[39.00;46.00]	43.00[40.00;47.00]	0.028	40.25[36.18;45.20]	40.50[37.33;44.25]	40.22[36.00;45.50]	0.509	<0.001
血氧分压/mmHg	341.00[253.25;404.00]	356.00[275.00;414.00]	283.00[150.00;362.00]	<0.001	105.58[81.47;148.33]	116.87[86.83;160.51]	102.08[80.46;144.60]	0.004	<0.001
乳酸/(mmol/L)	1.50[1.10;1.90]	1.50[1.10;1.90]	1.50[1.10;2.10]	0.118	1.60[1.00;2.80]	1.10[0.70;1.90]	1.70[1.10;2.90]	<0.001	0.002
凝血酶原时间/s	13.20[12.00;14.90]	13.20[12.00;14.90]	13.10[12.05;14.80]	0.988	13.10[11.20;14.90]	12.70[11.05;14.30]	13.30[11.40;15.00]	<0.001	0.001
部分活化凝血活酶时间/s	30.60[27.60;34.80]	30.80[27.70;35.10]	29.60[27.05;34.30]	0.092	28.85[25.60;33.40]	28.00[26.00;32.00]	29.00[25.60;34.00]	0.061	<0.001
国际标准化比值	1.20[1.10;1.35]	1.20[1.10;1.40]	1.20[1.10;1.30]	0.915	1.10[1.00;1.30]	1.10[1.00;1.20]	1.11[1.00;1.30]	<0.001	<0.001
总胆红素/(μmol/L)	0.50[0.30;0.70]	0.50[0.30;0.70]	0.50[0.30;0.62]	0.677	0.60[0.40;0.90]	0.50[0.40;0.80]	0.60[0.40;0.90]	0.001	<0.001
血尿素氮/(mmol/L)	16.00[13.00;20.00]	15.00[12.00;19.00]	18.00[14.00;24.00]	<0.001	16.00[12.00;24.00]	13.00[10.00;17.00]	18.00[13.00;27.00]	<0.001	0.12
血肌酐/(μmol/L)	0.90[0.80;1.10]	0.90[0.70;1.00]	1.00[0.80;1.30]	<0.001	0.93[0.73;1.27]	0.80[0.68;0.95]	1.03[0.80;1.50]	<0.001	<0.001
手术类型				<0.001				<0.001	<0.001
胸腹部手术	55(8.21%)	27(5.22%)	28(18.30%)		564(30.49%)	98(16.90%)	466(36.69%)		
心脏手术	575(85.82%)	470(90.91%)	105(68.63%)		1 025(55.41%)	347(59.83%)	678(53.39%)		
头颅手术和脊柱手术	26(3.88%)	12(2.32%)	14(9.15%)		250(13.51%)	134(23.10%)	116(9.13%)		
四肢手术	14(2.09%)	8(1.55%)	6(3.92%)		11(0.59%)	1(0.17%)	10(0.79%)		
多巴胺				0.228				0.459	0.029
未使用	669(99.85%)	517(100.00%)	152(99.35%)		1 828(98.81%)	571(98.45%)	1 257(98.98%)		
使用	1(0.15%)	0(0.00%)	1(0.65%)		22(1.19%)	9(1.55%)	13(1.02%)		
去甲肾上腺素				0.001				<0.001	<0.001
未使用	622(92.84%)	490(94.78%)	132(86.27%)		1 456(78.70%)	486(83.79%)	970(76.38%)		
使用	48(7.16%)	27(5.22%)	21(13.73%)		394(21.30%)	94(16.21%)	300(23.62%)		
苯肾上腺素				0.001				0.309	<0.001
未使用	327(48.81%)	233(45.07%)	94(61.44%)		1 782(96.32%)	563(97.07%)	1 219(95.98%)		
使用	343(51.19%)	284(54.93%)	59(38.56%)		68(3.68%)	17(2.93%)	51(4.02%)		
肾上腺素				0.001				0.67	<0.001
未使用	606(90.45%)	479(92.65%)	127(83.01%)		1 796(97.08%)	565(97.41%)	1 231(96.93%)		
使用	64(9.55%)	38(7.35%)	26(16.99%)		54(2.92%)	15(2.59%)	39(3.07%)		
血管加压素				0.186				<0.001	<0.001
未使用	657(98.06%)	509(98.45%)	148(96.73%)		1 744(94.27%)	575(99.14%)	1 169(92.05%)		
使用	13(1.94%)	8(1.55%)	5(3.27%)		106(5.73%)	5(0.86%)	101(7.95%)		
盐酸右美托咪定				0.25				0.21	0.935

续表2 MIMIC和eICU数据集肥胖手术患者基线资料

指标	MIMIC-IV数据集				eICU数据集				
	Total(*n*=670)	未发生AKI(*n*=517)	发生AKI(*n*=153)	P1	Total(*n*=1850)	未发生AKI(*n*=580)	发生AKI(*n*=1 270)	P2	P3
未使用	499(74.48%)	391(75.63%)	108(70.59%)		1 373(74.22%)	419(72.24%)	954(75.12%)		
使用	171(25.52%)	126(24.37%)	45(29.41%)		477(25.78%)	161(27.76%)	316(24.88%)		
氢化可的松				0.033				<0.001	<0.001
未使用	661(98.66%)	513(99.23%)	148(96.73%)		1 732(93.62%)	561(96.72%)	1 171(92.20%)		
使用	9(1.34%)	4(0.77%)	5(3.27%)		118(6.38%)	19(3.28%)	99(7.80%)		
泼尼松				0.073				0.254	<0.001
未使用	648(96.72%)	504(97.49%)	144(94.12%)		1 833(99.08%)	572(98.62%)	1 261(99.29%)		
使用	22(3.28%)	13(2.51%)	9(5.88%)		17(0.92%)	8(1.38%)	9(0.71%)		
地塞米松				<0.001				<0.001	0.253
未使用	652(97.31%)	511(98.84%)	141(92.16%)		1 781(96.27%)	541(93.28%)	1 240(97.64%)		
使用	18(2.69%)	6(1.16%)	12(7.84%)		69(3.73%)	39(6.72%)	30(2.36%)		
泼尼松龙				1				0.8	0.001
未使用	669(99.85%)	516(99.81%)	153(100.00%)		1 811(97.89%)	569(98.10%)	1 242(97.80%)		
使用	1(0.15%)	1(0.19%)	0(0.00%)		39(2.11%)	11(1.90%)	28(2.20%)		
阿托伐他汀				0.111				<0.001	<0.001
未使用	319(47.61%)	237(45.84%)	82(53.59%)		1 608(86.92%)	475(81.90%)	1 133(89.21%)		
使用	351(52.39%)	280(54.16%)	71(46.41%)		242(13.08%)	105(18.10%)	137(10.79%)		
普伐他汀				0.267				0.826	<0.001
未使用	634(94.63%)	486(94.00%)	148(96.73%)		1 809(97.78%)	566(97.59%)	1 243(97.87%)		
使用	36(5.37%)	31(6.00%)	5(3.27%)		41(2.22%)	14(2.41%)	27(2.13%)		
氯沙坦				0.702				0.664	<0.001
未使用	633(94.48%)	487(94.20%)	146(95.42%)		1 820(98.38%)	569(98.10%)	1 251(98.50%)		
使用	37(5.52%)	30(5.80%)	7(4.58%)		30(1.62%)	11(1.90%)	19(1.50%)		
阿奇霉素				0.662				0.259	<0.001
未使用	663(98.96%)	512(99.03%)	151(98.69%)		1 777(96.05%)	562(96.90%)	1 215(95.67%)		
使用	7(1.04%)	5(0.97%)	2(1.31%)		73(3.95%)	18(3.10%)	55(4.33%)		
呋塞米				0.036				<0.001	<0.001
未使用	72(10.75%)	48(9.28%)	24(15.69%)		1 225(66.22%)	441(76.03%)	784(61.73%)		
使用	598(89.25%)	469(90.72%)	129(84.31%)		625(33.78%)	139(23.97%)	486(38.27%)		
维生素C				0.741				0.124	<0.001
未使用	658(98.21%)	508(98.26%)	150(98.04%)		1 676(90.59%)	516(88.97%)	1 160(91.34%)		
使用	12(1.79%)	9(1.74%)	3(1.96%)		174(9.41%)	64(11.03%)	110(8.66%)		
阿司匹林				<0.001				0.007	<0.001
未使用	74(11.04%)	39(7.54%)	35(22.88%)		1 588(85.84%)	517(89.14%)	1 071(84.33%)		
使用	596(88.96%)	478(92.46%)	118(77.12%)		262(14.16%)	63(10.86%)	199(15.67%)		
ICU住院时长(天)	1.31 [1.16;2.14]	1.26 [1.14;1.46]	3.02 [1.60;4.30]	<0.001	4.79 [3.00;8.12]	3.25 [2.46;4.27]	6.04 [3.79;10.78]	<0.001	<0.001
是否发生住院死亡				0.012				<0.001	<0.001
未发生	667(99.55%)	517(100.00%)	150(98.04%)		1 706(92.22%)	571(98.45%)	1 135(89.37%)		
发生	3(0.45%)	0(0.00%)	3(1.96%)		144(7.78%)	9(1.55%)	135(10.63%)		

P1,MIMIC-IV数据集中发生AKI和未发生AKI组进行比较;P2,eCIU数据集中发生AKI和未发生AKI组进行比较;P3,MIMIC-IV数据集和eICU数据集进行比较

表3 肥胖术后发生AKI患者基线资料(MIMIC-IV+eICU)

指标	存活(n=1 285)	死亡(n=138)	P
年龄	65.00[56.00;73.00]	70.00[55.25;78.00]	0.01
性别			0.02
女	497(38.68%)	68(49.28%)	
男	788(61.32%)	70(50.72%)	
体重指数	34.71[31.87;38.79]	35.63[32.41;41.50]	0.023
查尔森合并症指数	3.00[2.00;5.00]	4.00[3.00;6.00]	<0.001
首次心率/(次/分)	87.86[79.76;99.21]	99.76[85.59;113.79]	<0.001
首次呼吸/(次/分)	19.39[16.97;21.55]	20.48[18.13;23.78]	<0.001
首次无创收缩压/mmhg	119.74[111.31;129.41]	111.86[105.20;121.56]	<0.001
首次无创舒张压/mmhg	63.89[58.52;69.33]	58.72[54.71;64.14]	<0.001
首次无创平均血压/mmhg	79.16[72.98;86.25]	73.31[69.33;80.55]	<0.001
首次外周血氧饱和度/%	96.81[95.64;97.86]	96.81[95.71;98.18]	0.438
首次体温/℃	36.94[36.73;37.18]	36.94[36.72;37.28]	0.618
尿量总和/ml	2 435.00[950.00;3999.00]	912.00[0.00;2425.00]	<0.001
每公斤体重.每小时尿量/ml	0.99[0.36;1.55]	0.40[0.00;0.94]	<0.001
血红蛋白/(g/dL)	9.70[8.30;11.50]	9.25[7.80;11.00]	0.008
白细胞/(10^9/L)	9.90[6.90;13.60]	11.30[7.90;14.47]	0.021
血小板计数/(10^9/L)	155.00[110.00;218.00]	135.50[106.00;183.00]	0.001
血细胞比容/%	28.60[23.50;34.20]	27.80[22.12;33.55]	0.057
白蛋白/(g/L)	3.10[2.40;3.60]	2.30[1.70;2.80]	<0.001
血钠浓度/(mmol/L)	137.00[134.00;140.00]	138.00[136.00;141.75]	<0.001
血钾浓度/(mmol/L)	3.80[3.50;4.20]	3.70[3.30;4.20]	0.027
血氯浓度/(mmol/L)	103.00[99.00;107.00]	105.00[100.00;108.00]	0.173
血葡萄糖/(mmol/L)	112.00[94.00;135.00]	117.00[99.00;147.00]	0.026
阴离子间隙/(mmol/L)	9.00[6.00;12.00]	11.00[7.00;14.00]	0.001
酸碱度	7.35[7.31;7.39]	7.35[7.27;7.40]	0.261
二氧化碳分压/mmHg	41.00[36.50;45.57]	37.00[33.00;44.50]	<0.001
血氧分压/mmHg	110.00[82.92;181.04]	107.00[85.50;140.00]	0.08
乳酸/(mmol/L)	1.50[1.10;2.30]	2.70[1.50;4.50]	<0.001
凝血酶原时间/s	13.10[11.40;14.80]	15.00[12.80;17.10]	<0.001
部分活化凝血活酶时间/s	29.00[25.60;33.60]	34.00[28.80;39.60]	<0.001
国际标准化比值	1.10[1.00;1.30]	1.33[1.10;1.50]	<0.001
总胆红素/(μmol/L)	0.60[0.40;0.90]	0.70[0.50;1.40]	<0.001
血尿素氮/(mmol/L)	18.00[13.00;26.00]	22.50[15.77;39.25]	<0.001
血肌酐/(μmol/L)	1.01[0.80;1.43]	1.23[0.81;2.20]	<0.001
手术类型			<0.001
胸腹部手术	404(31.44%)	90(65.22%)	
心脏手术	751(58.44%)	32(23.19%)	
头颅手术和脊柱手术	114(8.87%)	16(11.59%)	
四肢手术	16(1.25%)	0(0.00%)	
多巴胺			0.385
未使用	1 271(98.91%)	138(100.00%)	
使用	14(1.09%)	0(0.00%)	
去甲肾上腺素			0.611
未使用	998(77.67%)	104(75.36%)	
使用	287(22.33%)	34(24.64%)	

续表3 肥胖术后发生AKI患者基线资料（MIMIC-IV+eICU）

指标	存活（n=1 285）	死亡（n=138）	P
苯肾上腺素			0.467
未使用	1 183（92.06%）	130（94.20%）	
使用	102（7.94%）	8（5.80%）	
肾上腺素			0.73
未使用	1 225（95.33%）	133（96.38%）	
使用	60（4.67%）	5（3.62%）	
血管加压素			0.014
未使用	1 197（93.15%）	120（86.96%）	
使用	88（6.85%）	18（13.04%）	
盐酸右美托咪定			0.005
未使用	945（73.54%）	117（84.78%）	
使用	340（26.46%）	21（15.22%）	
氢化可的松			<0.001
未使用	1 210（94.16%）	109（78.99%）	
使用	75（5.84%）	29（21.01%）	
泼尼松			0.691
未使用	1 269（98.75%）	136（98.55%）	
使用	16（1.25%）	2（1.45%）	
地塞米松			0.029
未使用	1 243（96.73%）	138（100.00%）	
使用	42（3.27%）	0（0.00%）	
泼尼松龙			0.748
未使用	1 260（98.05%）	135（97.83%）	
使用	25（1.95%）	3（2.17%）	
阿托伐他汀			0.014
未使用	1 087（84.59%）	128（92.75%）	
使用	198（15.41%）	10（7.25%）	
普伐他汀			0.358
未使用	1 254（97.59%）	137（99.28%）	
使用	31（2.41%）	1（0.72%）	
氯沙坦			0.168
未使用	1 259（97.98%）	138（100.00%）	
使用	26（2.02%）	0（0.00%）	
阿奇霉素			0.167
未使用	1 230（95.72%）	136（98.55%）	
使用	55（4.28%）	2（1.45%）	
呋塞米			0.836
未使用	728（56.65%）	80（57.97%）	
使用	557（43.35%）	58（42.03%）	
维生素C			<0.001
未使用	1 194（92.92%）	116（84.06%）	
使用	91（7.08%）	22（15.94%）	
阿司匹林			0.059
未使用	1 008（78.44%）	98（71.01%）	
使用	277（21.56%）	40（28.99%）	
ICU住院时长/d	5.25［3.21;9.33］	8.54［5.04;15.17］	<0.001

2.2 缺失值填补

对于单独的MIMIC-IV数据集的肥胖术后患者用作开发模型时,纳入指标中共有20个存在缺失值,其中2个指标缺失超过30%(白蛋白,总胆红素),予以剔除。对于MIMIC-IV和eICU数据集的肥胖AKI患者共用作开发模型时,纳入指标中共有21个存在缺失值,其中6个指标缺失超过30%(白蛋白,酸碱度,血二氧化碳分压,血氧分压,乳酸,总胆红素),予以剔除。

其余数据采用MICE包进行多重插补。各变量的填补数据与原始数据的分布一致,无统计学差异,如表4和表5所示。

2.3 特征选择结果

如图2所示,对于AKI发生预测,血肌酐、尿素氮、首次心率、首次无创舒张压、首次体温、首次无创收缩压、血钾浓度、年龄、血钠浓度、尿量总和、地塞米松、首次呼吸、首次无创平均血压、首次外周血氧饱和度、

表4 MIMIC-IV数据集原始数据与插补数据对比

指标	插补数据(n=670)	原始数据(n=670)	P
血红蛋白/(g/dL)	11.70[9.90;13.50]	11.70[9.90;13.50]	0.992
白细胞/(10^9/L)	9.80[7.40;13.40]	9.80[7.38;13.40]	0.985
血小板计数/(10^9/L)	190.50[145.25;237.75]	191.00[145.00;238.25]	0.986
血细胞比容/%	35.40[29.63;40.27]	35.40[29.58;40.30]	0.985
血钠浓度/(mmol/L)	139.00[137.00;141.00]	139.00[137.00;141.00]	0.979
血钾浓度/(mmol/L)	4.20[3.90;4.50]	4.20[3.90;4.50]	0.965
血氯浓度/(mmol/L)	105.00[102.00;109.00]	105.00[102.00;109.00]	0.993
血葡萄糖浓度/(mmol/L)	121.00[104.00;147.00]	121.00[103.00;147.00]	0.965
阴离子间隙/(mmol/L)	12.00[10.00;14.00]	12.00[10.00;14.00]	0.978
酸碱度	7.38[7.35;7.42]	7.38[7.35;7.42]	0.964
血二氧化碳分压/mmHg	42.00[39.00;46.00]	42.00[39.00;46.00]	0.843
血氧分压/mmHg	339.50[249.00;402.75]	341.00[253.25;404.00]	0.552
乳酸/(mmol/L)	1.50[1.10;1.90]	1.50[1.10;1.90]	0.823
凝血酶原时间/s	13.15[12.00;14.90]	13.20[12.00;14.90]	0.95
部分活化凝血活酶时间/s	30.60[27.60;34.80]	30.60[27.60;34.80]	0.975
国际标准化比值	1.20[1.10;1.30]	1.20[1.10;1.35]	0.91
血尿素氮	16.00[13.00;20.00]	16.00[13.00;20.00]	0.967
血肌酐	0.90[0.80;1.10]	0.90[0.80;1.10]	0.976

表5 MIMIC-IV和eICU数据集原始数据与插补后数据对比

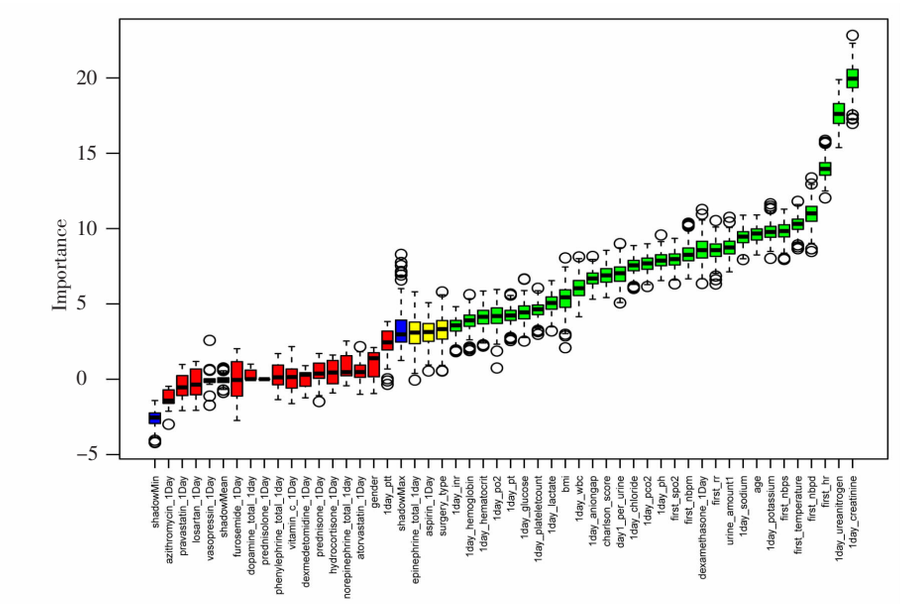
指标	插补数据(n=1 423)	原始数据(n=1 423)	P
首次心率/(次/分)	88.63[80.00;100.49]	88.65[80.00;100.50]	0.992
首次呼吸/(次/分)	19.50[17.12;21.70]	19.50[17.11;21.70]	0.924
首次无创收缩压/mmhg	118.46[110.46;128.87]	118.41[110.46;128.87]	0.993
首次无创舒张压/mmhg	63.42[58.00;69.00]	63.42[58.00;69.05]	0.945
首次无创平均血压/mmhg	78.83[72.46;85.95]	78.83[72.47;85.95]	0.978
首次外周血氧饱和度/%	96.81[95.63;97.87]	96.81[95.64;97.88]	0.901
血红蛋白/(g/dL)	9.60[8.20;11.50]	9.60[8.20;11.50]	0.912
白细胞/(10^9/L)	9.90[7.04;13.81]	9.90[7.00;13.80]	0.957
血小板计数/(10^9/L)	154.00[109.00;214.00]	154.00[109.00;215.00]	0.961
血细胞比容/%	28.50[23.30;34.10]	28.50[23.20;34.10]	0.974
血葡萄糖浓度/(mmol/L)	113.00[94.00;136.50]	113.00[94.00;137.00]	0.98
阴离子间隙/(mmol/L)	9.00[6.00;12.00]	9.00[6.00;12.00]	0.539
凝血酶原时间/s	13.40[11.50;15.20]	13.20[11.50;15.00]	0.289
部分活化凝血活酶时间/s	29.30[26.00;34.25]	29.05[25.70;34.00]	0.418
国际标准化比值	1.20[1.03;1.30]	1.15[1.00;1.30]	0.414

酸碱度、血二氧化碳分压、血氯浓度、每公斤体重. 每小时尿量、查尔森合并症指数、阴离子间隙、白细胞、体重指数、乳酸 、血小板计数、血葡萄糖浓度、凝血酶原时间、血氧分压、血细胞比容、血红蛋白、国际标准化比值被Boruta识别为重要变量。

如图3所示,AKI发生后死亡风险预测,重要变量如下:首次呼吸、首次体温、首次心率、年龄、首次外周血氧饱和度、国际标准化比值、血氯浓度、查尔森合并症指数、阴离子间隙、凝血酶原时间、血葡萄糖浓度、血细胞比容、血钠浓度、首次无创收缩压、血尿素氮、尿量总和、体重指数、血钾浓度、白细胞、氢化可的松、每公斤体重. 每小时尿量、首次无创舒张压、手术类型、血红蛋白、血小板计数、部分活化凝血活酶时间、血肌酐、首次无创平均血压、阿司匹林。

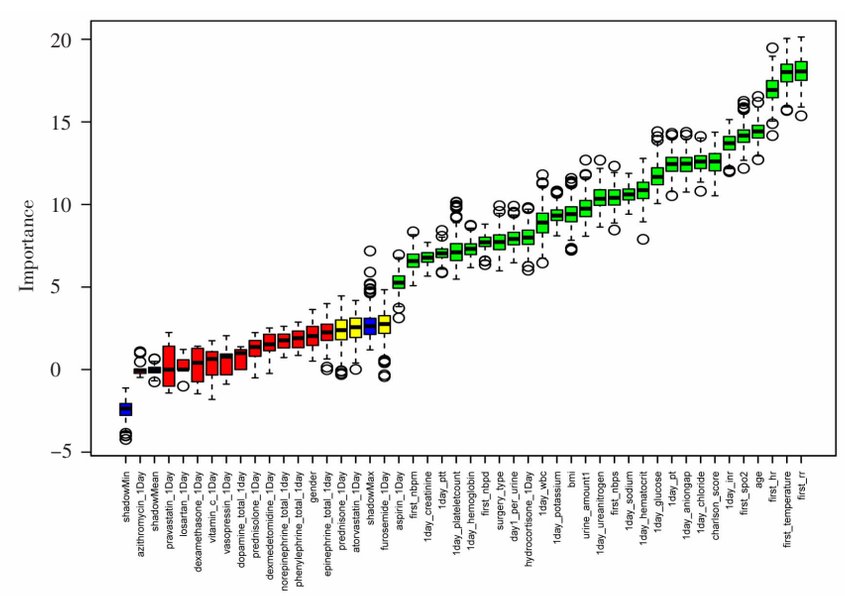
2.4 模型性能评估

对于AKI预测,如表6和图4所示,7种ML模型在



绿色为重要变量,黄色为暂时重要,蓝色为未判断,红色为不重要,仅保留重要变量;各指标名称含义见表1。

图2 Boruta重要特征筛选



绿色为重要变量,黄色为暂时重要,蓝色为未判断,红色为不重要,仅保留重要变量;各指标名称含义见表1

图3 Boruta重要特征筛选

模型拟合测试集数据集上都取得了较好的预测性能,其中SVM模型在测试数据集上的AUC为0.80,这与GLM和NNET模型的AUC相近,即这两者的区分度相近且高于其他模型。在灵敏度、特异性、阳性预测值、阴性预测值、F1分数、Kappa、bbrier的数值上,三个模型接近。对于验证集,如表6图4所示,SVM的AUC仍然可以达到0.71,表明其具有较好的分类能力,相较其他6个模型表现更好。SVM在验证集的特异性达到了0.97,阳性预测值也较高(0.84),这意味着SVM在识别负类样本方面非常准确,且当模型预测为正类时,有很高的概率是真正的正类样本。结合多个指标,以及校准曲线和DCA曲线,SVM表现最好,能更准确地发现急性肾损伤风险高的患者。

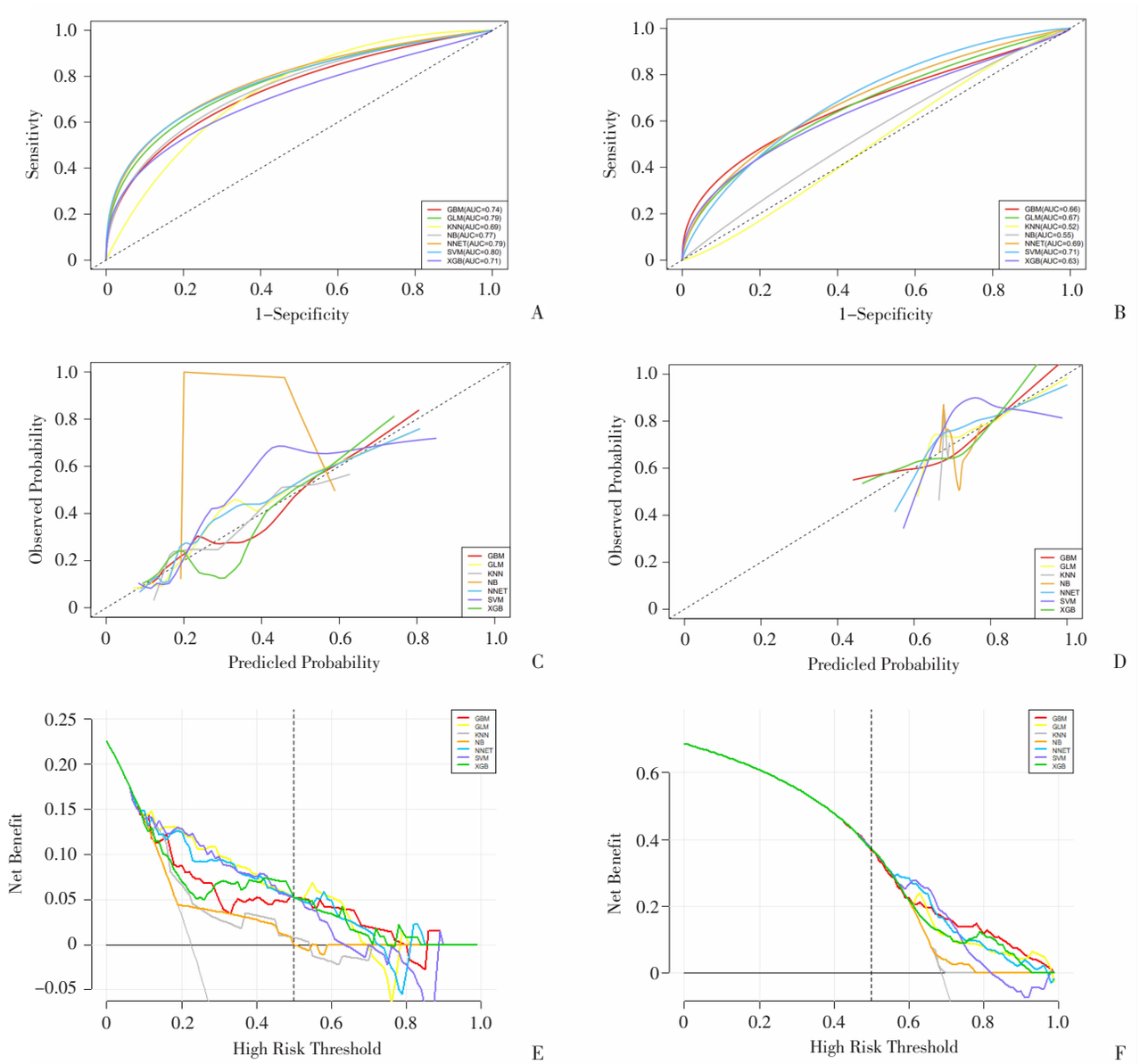
对于AKI后死亡风险预测,在测试数据集验证并评估7种算法对肥胖手术入ICU后急性肾损伤患者院内死亡的预测能力。如表7和图5所示,GBM、GLM、KNN、NB、NNET、SVM、XGboost模型的AUC依次为0.91、0.83、0.83、0.79、0.86、0.82、0.88,其中,GBM的AUC最高,明显高于其他模型,表明其在区分正负样本方面表现最好。且GBM的平衡准确率、灵敏度、阳性预测值、阴性预测值、F1分数均排在第一,且bbrier最低。从校准曲线图来看(图6),GBM的曲线相对较为接近对角线,表现较好。在DCA曲线中(图7),GBM在大多数高风险阈值范围内表现最好,其净收益(Net Benefit)相对较高,尤其是在高风险阈值较低时,GBM的净收益明显高于其他模型。综合所有指标,GBM具有强大的区分能力,平衡准确率高,且Brier分数较低,表明其预测结果较为准确,误差较小。因此,在预测AKI的任务中,GBM模型是更为理想的选择。

3 讨论

急性肾损伤是肥胖患者术后常见的严重并发症之一,与患者的高死亡率密切相关,尤其危重的肥胖患者。准确预测肥胖患者术后发生AKI的风险以及发生AKI后的死亡风险,对于早期干预和改善预后具有重要意义。本研究基于MIMIC-IV和eICU数据库,采用机器学习算法构建了肥胖手术患者入ICU后发生急性肾损伤的风险预测以及院内死亡风险预测模型,并比较了不同模型的预测效能,旨在提高对这一高危人群的临床管理水平。结果显示,SVM模型对于AKI的预测性能最佳,GBM模型对于AKI后死亡的预测

表6 AKI预测模型表现

模型	GBM	GLM	KNN	NB	NNET	SVM	Xgboost
测试集:MIMIC-IV							
AUC(95% *CI*)	0.74 (0.63-0.85)	0.79 (0.68-0.90)	0.69 (0.58-0.78)	0.77 (0.66-0.88)	0.79 (0.69-0.90)	0.80 (0.69-0.90)	0.71 (0.59-0.82)
Balanced ACC	0.62	0.70	0.60	0.60	0.69	0.66	0.69
灵敏度	0.27	0.47	0.23	0.23	0.43	0.37	0.40
特异性	0.98	0.93	0.96	0.95	0.94	0.96	0.97
阳性预测值	0.80	0.67	0.67	0.58	0.68	0.73	0.80
阴性预测值	0.82	0.86	0.81	0.81	0.85	0.84	0.85
F1	0.40	0.55	0.34	0.33	0.53	0.49	0.53
Kappa	0.32	0.45	0.25	0.23	0.43	0.40	0.45
bbrier	0.14	0.12	0.16	0.21	0.13	0.13	0.14
验证集-eICU							
AUC(95% *CI*)	0.66 (0.64-0.69)	0.66 (0.64-0.69)	0.52 (0.49-0.55)	0.55 (0.52-0.58)	0.69 (0.66-0.71)	0.71 (0.68-0.73)	0.63 (0.61-0.66)
Balanced ACC	0.56	0.51	0.48	0.53	0.53	0.52	0.60
灵敏度	0.09	0.02	0.04	0.20	0.07	0.07	0.36
特异性	1.00	1.00	0.93	0.86	0.99	0.97	0.85
阳性预测值	0.99	1.00	0.54	0.76	0.97	0.84	0.84
阴性预测值	0.34	0.32	0.31	0.33	0.33	0.32	0.38
F1	0.17	0.03	0.07	0.32	0.12	0.13	0.50
Kappa	0.06	0.01	-0.02	0.05	0.04	0.03	0.15
bbrier	0.36	0.62	0.49	0.58	0.51	0.50	0.29



A:测试集ROC曲线;B:验证集ROC曲线;C:测试集校准曲线;D:验证集校准曲线;E:测试集DCA曲线;F:验证集DCA曲线

图4 AKI预测模型的测试集及验证集模型表现

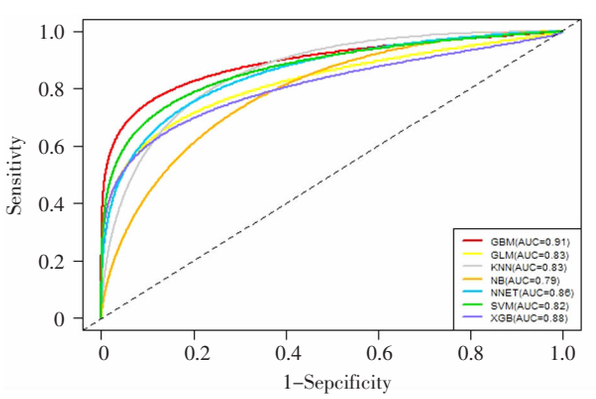


图5 死亡预测模型测试集ROC曲线

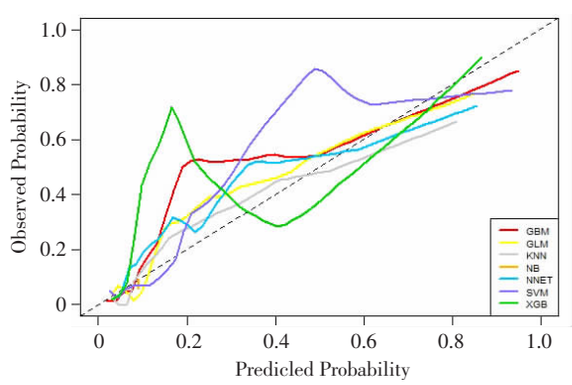


图6 死亡预测模型测试集校准曲线

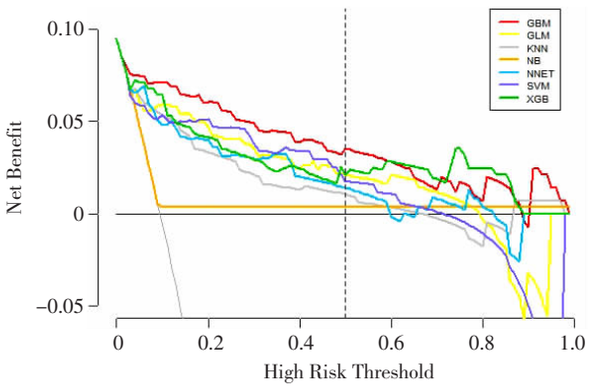


图7 死亡预测模型测试集DCA曲线

AUC达到0.91,显著优于其他模型。

本研究通过Boruta算法筛选出多个与肥胖患者术后AKI以及其死亡风险相关的特征,包括首次呼吸、首次体温、首次心率、年龄、首次无创收缩压、血钾浓度、血钠浓度、尿量总和、首次无创舒张压、血氯浓度、查尔森合并症指数、阴离子间隙、白细胞、体重指数、血细胞比容、血红蛋白、国际标准化比值、凝血酶原时间、血葡萄糖浓度、血小板计数以及血肌酐。这些特征涵盖了患者的基本生理状态、实验室检验指标,反映了肥胖患者术后AKI的复杂病理生理过程。ICU中首次记录的呼吸和心率异常可能提示患者存在严重的全身炎症反应或循环功能障碍,这些因素均可能增加术后AKI的发生风险和死亡率[19-20]。首先,肥胖患者由于胸壁和腹部脂肪堆积,导致呼吸肌运动受限,肺顺应性降低,呼吸肌疲劳。这种呼吸功能障碍在术后可能进一步加重,导致低氧血症和高碳酸血症,进而引发全身炎症反应[21-23]。研究表明,肥胖患者的肺和胸廓顺应性与BMI呈指数变化,肺顺应性比预计值降低35%,用力肺活量(FVC)和功能残气量(FRC)减少,肺内分流明显增加[24-25]。这些因素均可能导致术后低氧血症和全身炎症反应,进而增加AKI的风险。其次,心率异常与全身炎症反应综合征(SIRS)密切相关,提示患者可能存在严重的感染或循环功能障碍[26-28]。循环功能障碍后肾内血流发生重新分配,血流从髓质流向皮质,导致髓质缺氧,这种微循环障碍可导致肾小管损伤[29]。同时循环功能障碍可导致血管内皮细胞损伤,白细胞与内皮细胞相互作用,释放炎症介质,导致局部微循环血流改变和持续性缺血。循环功能障碍引起的肾小管上皮细胞损伤和功能障碍是AKI的关键病理生理机制之一[30-33]。体温异常(高热或低体温)可通过多种机制影响肾脏功能,与AKI的发生、发展及预后密切相关。高热导致不显性失水增加,若未及时补液,可能引发血容量不足和肾灌注下降,易诱发AKI。有研究报道,严重发热伴血小板减少综合征(SFTS)是AKI的危险因素和临床结局[34]。血压与急性肾损伤(AKI)的发生和发展存在密切的关系,研究报道支持"无低血压"与死亡率和急性肾损伤(AKI)结局的关联,并且在大多数研究中,这种关联的强度与低血压的严重程度有关[35]。肌酐是肌肉代谢的产物,主要通过肾脏排泄,所以它的水平也可以反映肾小球滤过率(GFR)[36]。但血肌酐的变化可能滞后于实际的肾功能损伤,尤其是在AKI早期,这时候可能还没有明显的升高。对于识别出来的重要指标,可以在高危人群中进行针对性的干预,调整治疗方案,可以改善患者预后。

在实际应用场景中,本研究构建的模型可在术后对肥胖患者诊治流程进行优化,对于重症肥胖患者,可实时监测患者的生理指标,并利用模型评估患者的AKI风险,以便及时发现并处理潜在的AKI事件。对于已经发生AKI的患者,死亡风险预测模型可以帮助医生评估患者的预后,指导制定更加个性化的治疗方案,如调整液体管理策略、使用肾脏替代治疗等。对于AKI预测模型的泛化性,使用了eICU数据库进行外

表7 死亡预测模型的测试集表现

模型	GBM	GLM	KNN	NB	NNET	SVM	XGboost
AUC(95% *CI*)	0.91 (0.83~0.98)	0.83 (0.73~0.94)	0.83 (0.74~0.92)	0.79 (0.70~0.87)	0.86 (0.78~0.95)	0.82 (0.71~0.93)	0.88 (0.79~0.96)
Balanced ACC	0.75	0.70	0.57	0.50	0.71	0.59	0.72
灵敏度	0.52	0.41	0.15	0.00	0.44	0.19	0.48
特异性	0.98	0.98	0.99	1.00	0.98	0.99	0.95
阳性预测值	0.78	0.73	0.67	–	0.71	0.71	0.52
阴性预测值	0.95	0.94	0.92	1.00	0.94	0.92	0.95
F1	0.62	0.52	0.24	–	0.55	0.29	0.50
Kappa	0.59	0.49	0.22	0.00	0.51	0.27	0.45
bbrier	0.05	0.06	0.07	0.10	0.06	0.06	0.06

部验证,且两个数据库的数据来源于不同医院,进行验证能够展示模型真实情况下应用的表现。SVM模型在外部验证集中AUC为0.71,达到了统计学意义上的显著性,较测试集有下降,由于外部验证集与训练集之间存在数据来源不同,存在数据分布差异,AKI发生率差异明显,都会影响模型的泛化能力。但模型性能在外部验证集的表现处于合理范围,能够有效区分结局,具有参考价值,未来可进一步收集多中心多模态数据,扩大样本量以及指标维度,并可通过迁移学习或领域自适应技术优化模型跨数据集表现。

本研究有一些局限性,首先,虽然我们已在公共数据库收集了所有肥胖手术术后急性肾损伤患者,研究了重症肥胖患者术后的AKI风险及死亡风险,在外部验证也表现了稳定的性能,未来研究可进一步结合本地数据进行校准和优化,并进一步纳入多中心、多地区数据。其次,作为回顾性研究,只能建立各因素之间的关联,而不是因果关系。在将来,需要纳入更多维度的指标升级模型,并开展前瞻性的多中心研究来验证我们的模型。

本研究通过机器学习算法成功构建了入ICU肥胖患者术后AKI风险预测模型和死亡风险预测模型。构建的预测模型可应用于临床,重症肥胖患者的术后诊治流程,通过提前识别高AKI以及AKI后死亡风险的患者,临床医生可以更早地采取针对性的干预措施,如优化液体管理、调整药物剂量、加强监测等措施,从而降低死亡率并改善患者的预后。此外,该模型还可以为医疗资源的合理分配提供依据,帮助医院优化外科重症监护病房(SICU)的资源配置,提高医疗效率。

利益冲突 本文所有作者声明不存在利益冲突

参考文献:

[1] GOREN O, MATOT I. Perioperative acute kidney injury[J]. Br J Anaesth, 2015, 115: ii3-ii14. DOI:10.1093/bja/aev380.

[2] GUMBERT S D, KORK F, JACKSON M L, *et al*. Perioperative acute kidney injury[J]. Anesthesiology, 2020, 132(1): 180-204. DOI:10.1097/ALN.0000000000002968.

[3] MACLAUGHLIN H L, BLACKLOCK R M, WRIGHT K, *et al*. Obesity and recovery from acute kidney injury (Ob AKI): a prospective cohort feasibility study[J]. BMJ Open, 2019, 9(3): e024033. DOI:10.1136/bmjopen-2018-024033.

[4] HAWN M T, BIAN J, LEETH R R, *et al*. Impact of obesity on resource utilization for general surgical procedures[J]. Ann Surg, 2005, 241(5): 821-826; discussion 826-828. DOI:10.1097/01.sla.0000161044.20857.24.

[5] MULLEN J T, DAVENPORT D L, HUTTER M M, *et al*. Impact of body mass index on perioperative outcomes in patients undergoing major intra-abdominal cancer surgery[J]. Ann Surg Oncol, 2008, 15(8): 2164-2172. DOI: 10.1245/s10434-008-9990-2.

[6] NTINOPOULOU P, NTINOPOULOU E, PAPATHANASIOU I V, *et al*. Obesity as a risk factor for venous thromboembolism recurrence: a systematic review[J]. Medicina, 2022, 58(9): 1290. DOI:10.3390/medicina58091290.

[7] JÄMSEN E, NEVALAINEN P, ESKELINEN A, *et al*. Obesity, diabetes, and preoperative hyperglycemia as predictors of periprosthetic joint infection: a single-center analysis of 7181 primary hip and knee replacements for osteoarthritis[J]. J Bone Joint Surg Am, 2012, 94(14): e101. DOI:10.2106/JBJS.J.01935.

[8] WANG W, FENG S, YE Z, *et al*. Prediction of lipid nanoparticles for mRNA vaccines by the machine learning algorithm[J]. Acta Pharm Sin B, 2022, 12(6): 2950-2962. DOI:10.1016/j.apsb.2021.11.021.

[9] 林泰安, 罗亚梅, 黄志伟, 等. 基于支持向量机的肝外胆管癌术前淋巴结状态预测模型构建[J]. 西南医科大学学报, 2023, 46(4): 303-307. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3351.2023.04.006.
LIN T A, LUO Y M, HUANG Z W, *et al*. The prediction model based on support vector machine for preoperative lymph nodes status in extrahepatic cholangiocarcinoma[J]. J Southwest Med Univ, 2023, 46(4): 303-307. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3351.2023.04.006.

[10] CAO L, HE R M, ZHANG A, *et al*. Development of a deep learning system for predicting biochemical recurrence in prostate cancer[J]. BMC Cancer, 2025, 25(1): 232. DOI: 10.1186/s12885-025-13628-9.

[11] 孟祥勇, 秦嘉怡, 陈文生. 基于机器学习的早期胃癌淋巴结转移预测模型构建与验证[J]. 陆军军医大学学报, 2024, 46(21): 2432-2442. DOI: 10.16016/j.2097-0927.202403126.
MENG X Y, QIN J Y, CHEN W S. Construction and validation of a prediction model for lymph node metastasis in early gastric cancer based on machine learning[J]. J Army Med Univ, 2024, 46(21): 2432-2442. DOI: 10.16016/j.2097-0927.202403126.

[12] 舒欣, 李昊洋, 李雨捷, 等. 基于机器学习建立腹部手术术后脓毒症患者死亡风险预测模型[J]. 陆军军医大学学报, 2023, 45(8): 732-738. DOI: 10.16016/j.2097-0927.202212045.
SHU X, LI H Y, LI Y J, *et al*. Prediction of postoperative sepsis mortality risk based on machine learning in patients undergoing abdominal surgery[J]. J Army Med Univ, 2023, 45(8): 732-738. DOI: 10.16016/j.2097-0927.202212045.

[13] SU Y, WANG P, HU Y, *et al*. AKI-Pro score for predicting progression to severe acute kidney injury or death in patients

with early acute kidney injury after cardiac surgery[J]. J Transl Med, 2024, 22(1): 571. DOI:10.1186/s12967-024-05279-4.

[14] ZHANG Y H, XU D M, GAO J W, *et al*. Development and validation of a real-time prediction model for acute kidney injury in hospitalized patients[J]. Nat Commun, 2025, 16(1): 68. DOI:10.1038/s41467-024-55629-5.

[15] JOHNSON A E W, BULGARELLI L, SHEN L, *et al*. MIMIC-IV, a freely accessible electronic health record dataset[J]. Sci Data, 2023, 10(1): 1. DOI: 10.1038/s41597-022-01899-x.

[16] POLLARD T J, JOHNSON A E W, RAFFA J D, *et al*. The eICU Collaborative Research Database, a freely available multi-center database for critical care research[J]. Sci Data, 2018, 5: 180178. DOI:10.1038/sdata.2018.178.

[17] WELSH A, HAMMAD M, PIÑA I L, *et al*. Obesity and cardiovascular health[J]. Eur J Prev Cardiol, 2024, 31(8): 1026-1035. DOI:10.1093/eurjpc/zwae025.

[18] YOON S Y, KIM J S, JEONG K H, *et al*. Acute kidney injury: biomarker-guided diagnosis and management[J]. Medicina, 2022, 58(3): 340. DOI: 10.3390/medicina58030340.

[19] LIEBERMAN O J, LAHUE S C. Extracorporeal blood purification and acute kidney injury in cardiac surgery[J]. JAMA, 2025, 333(8): 722-723. DOI: 10.1001/jama.2024.26219.

[20] TOYONAGA Y, ASAYAMA K, MAEHARA Y. Impact of systemic inflammatory response syndrome and surgical Apgar score on post-operative acute kidney injury[J]. Acta Anaesthesiol Scand, 2017, 61(10): 1253-1261. DOI: 10.1111/aas.12965.

[21] BALONOV K. Intraoperative protective lung ventilation strategies in patients with morbid obesity[J]. Saudi J Anaesth, 2022, 16(3): 327-331. DOI: 10.4103/sja.sja_386_22.

[22] KAW R, WONG J, MOKHLESI B. Obesity and obesity hypoventilation, sleep hypoventilation, and postoperative respiratory failure[J]. Anesth Analg, 2021, 132(5): 1265-1273. DOI:10.1213/ANE.0000000000005352.

[23] MARK A L, SOMERS V K. Obesity, hypoxemia, and hypertension: mechanistic insights and therapeutic implications[J]. Hypertension, 2016, 68(1): 24-26. DOI: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.116.07338.

[24] HODGSON L E, MURPHY P B, HART N. Respiratory management of the obese patient undergoing surgery[J]. J Thorac Dis, 2015, 7(5): 943-952. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2015.03.08.

[25] MAFORT T T, RUFINO R, COSTA C H, *et al*. Obesity: systemic and pulmonary complications, biochemical abnormalities, and impairment of lung function[J]. Multidiscip Respir Med, 2016, 11: 28. DOI: 10.1186/s40248-016-0066-z.

[26] DE CASTILHO F M, RIBEIRO A L P, NOBRE V, *et al*. Heart rate variability as predictor of mortality in sepsis: a systematic review[J]. PLoS One, 2018, 13(9): e0203487. DOI:10.1371/journal.pone.0203487.

[27] LIAU M Y Q, LIAU J Y J, SELVAKUMAR S V, *et al*. Heart rate variability in acute pancreatitis: a narrative review[J]. Transl Gastroenterol Hepatol, 2024, 9: 68. DOI:10.21037/tgh-24-22.

[28] MARGRAF A, LUDWIG N, ZARBOCK A, *et al*. Systemic inflammatory response syndrome after surgery: mechanisms and protection[J]. Anesth Analg, 2020, 131(6): 1693-1707. DOI:10.1213/ANE.0000000000005175.

[29] YU S M, BONVENTRE J V. Acute kidney injury and maladaptive tubular repair leading to renal fibrosis[J]. Curr Opin Nephrol Hypertens, 2020, 29(3): 310-318. DOI: 10.1097/MNH.0000000000000605.

[30] 陈晓媚, 马圆媛, 聂静, 等. 急性肾损伤向慢性肾脏病转化中肾小管上皮细胞损伤修复机制的研究进展[J]. 首都医科大学学报, 2022, 43(5): 720-727.
CHEN X M, MA Y Y, NIE J, *et al*. Progress on the injury and repair mechanism of renal tubular epithelial cells in the transition of acute kidney injury to chronic kidney disease[J]. J Cap Med Univ, 2022, 43(5): 720-727.

[31] BONVENTRE J V, YANG L. Cellular pathophysiology of ischemic acute kidney injury[J]. J Clin Invest, 2011, 121(11): 4210-4221. DOI:10.1172/JCI45161.

[32] PAIS T, JORGE S, LOPES J A. Acute kidney injury in sepsis[J]. Int J Mol Sci, 2024, 25(11): 5924. DOI: 10.3390/ijms25115924.

[33] HOSTE E A J, BAGSHAW S M, BELLOMO R, *et al*. Epidemiology of acute kidney injury in critically ill patients: the multinational AKI-EPI study[J]. Intensive Care Med, 2015, 41(8): 1411-1423. DOI:10.1007/s00134-015-3934-7.

[34] LEE J M, KIM H L, LIM M N, *et al*. Acute kidney injury as a prognostic marker in severe fever with thrombocytopenia syndrome[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 20651. DOI:10.1038/s41598-024-71438-8.

[35] SCHUURMANS J, VAN ROSSEM B T B, RELLUM S R, *et al*. Hypotension during intensive care stay and mortality and morbidity: a systematic review and meta-analysis[J]. Intensive Care Med, 2024, 50(4): 516-525. DOI:10.1007/s00134-023-07304-4.

[36] INKER L A, ENEANYA N D, CORESH J, *et al*. New creatinine- and cystatin C-based equations to estimate GFR without race[J]. N Engl J Med, 2021, 385(19): 1737-1749. DOI:10.1056/NEJMoa2102953.

(收稿:2025-03-04;修回:2025-04-01)
(编辑 邓强庭)