

• 论 著 • DOI:10.3969/j.issn.1672-9455.2026.10.008

# 基于血清 HBP、HE4 构建的 XGBoost 模型对脓毒症患者发生急性肾损伤的预测价值\*

付婷婷, 张晓东, 姚琳琳

山西省太原市中心医院检验科, 山西太原 030009

**摘要:**目的 探讨基于血清肝素结合蛋白(HBP)、人附睾分泌蛋白 4(HE4)构建的极端梯度提升(XGBoost)模型对脓毒症患者发生急性肾损伤(AKI)的预测价值。方法 选取 2023 年 9 月至 2025 年 3 月太原市中心医院收治的 120 例脓毒症患者作为研究对象。根据患者入院后 7 d 内是否发生 AKI 分为 AKI 组、非 AKI 组。收集患者资料,检测并比较 2 组入院时血清 HBP、HE4 水平;采用 Lasso 回归及多因素 Logistic 回归分析脓毒症患者发生 AKI 的影响因素;应用 XGBoost 算法对脓毒症患者发生 AKI 的相关因素进行重要性排序,根据筛选出的重要特征子集构建 XGBoost 模型;绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型预测脓毒症患者发生 AKI 的效能。结果 AKI 组 46 例,非 AKI 组 74 例。AKI 组入院时合并糖尿病比例、急性生理和慢性健康状况 II (APACHE II)评分、序贯器官衰竭评估(SOFA)评分、发生脓毒症休克比例及血清 C 反应蛋白(CRP)、白细胞介素-6(IL-6)、降钙素原(PCT)、HBP、HE4 水平均高于非 AKI 组( $P < 0.05$ )。Lasso 回归分析筛选出 6 个影响因素:合并糖尿病、脓毒症休克、CRP、IL-6、HBP、HE4。多因素 Logistic 回归分析结果显示,合并糖尿病、发生脓毒症休克及血清 CRP、IL-6、HBP、HE4 水平升高均是脓毒症患者发生 AKI 的危险因素( $P < 0.05$ )。限制性立方样条(RCS)分析显示,血清 HBP、HE4 与脓毒症患者 AKI 发生风险呈正向的非线性关系( $P < 0.05$ )。XGBoost 算法显示,将脓毒症休克、合并糖尿病、HBP、IL-6、HE4、CRP 作为预测指标构建 XGBoost 模型可使模型的预测效能最大。ROC 曲线分析结果显示,血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型预测脓毒症患者发生 AKI 的曲线下面积(AUC)分别为 0.782、0.789、0.943, XGBoost 模型预测的 AUC 明显大于 HBP( $Z = 3.470, P = 0.001$ )、HE4( $Z = 3.295, P = 0.003$ )单独预测。结论 脓毒症发生 AKI 患者血清 HBP、HE4 水平明显升高,同时与 AKI 发生风险呈正向的非线性关系,以脓毒症休克、合并糖尿病、HBP、IL-6、HE4、CRP 作为预测指标构建的 XGBoost 模型对脓毒症并发 AKI 有较高的预测效能。

**关键词:**脓毒症; 肝素结合蛋白; 人附睾分泌蛋白 4; 急性肾损伤; 预测

中图法分类号:R631;R446.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9455(2026)10-1351-07

## Predictive value of XGBoost model based on serum HBP and HE4 for acute kidney injury occurrence in patients with sepsis\*

FU Tingting, ZHANG Xiaodong, YAO Linlin

Department of Clinical Laboratory, Taiyuan Municipal Central Hospital, Taiyuan, Shanxi 030009, China

**Abstract: Objective** To investigate the predictive value of an extreme gradient boosting (XGBoost) model based on serum heparin-binding protein (HBP) and human epididymis protein 4 (HE4) for the acute kidney injury (AKI) occurrence in the patients with sepsis. **Methods** A total of 120 sepsis patients treated in Taiyuan Municipal Central Hospital from September 2023 to March 2025 were enrolled as the study subjects. The patients were divided into the AKI group and non-AKI group according to whether AKI occurred within 7 d after admission. The data of the patients were collected, and serum HBP and HE4 levels at admission were measured and compared between the two groups. The Lasso regression and multivariate Logistic regression were used to analyze the risk factors for the AKI occurrence in sepsis patients. The XGBoost algorithm was applied to rank the importance of the factors related to AKI, and the XGBoost model was constructed based on the selected important feature subset. The receiver operating characteristic (ROC) curve was drawn to analyze the efficiency of serum HBP, HE4 and the XGBoost model for predicting the AKI occurrence in sepsis patients. **Results** There were 46 cases in the AKI group and 74 cases in the non-AKI group. The proportion of the patients complicating diabetes at admission, Acute Physiology and Chronic Health Evaluation II (APACHE II)

\* 基金项目:山西省科学技术研究与开发项目(202307D723052)。

作者简介:付婷婷,女,副主任技师,主要从事临床生物化学检验技术方向的研究。

引用格式:付婷婷,张晓东,姚琳琳.基于血清 HBP、HE4 构建的 XGBoost 模型对脓毒症患者发生急性肾损伤的预测价值[J].检验医学与临床,2026,23(10):1351-1357.

score, Sequential Organ Failure Assessment (SOFA) score, proportion of septic shock occurrence, and serum C-reactive protein (CRP), interleukin-6 (IL-6), procalcitonin (PCT), HBP and HE4 levels in the AKI group were all higher than those in the non-AKI group ( $P < 0.05$ ). The Lasso regression analysis screened the six influencing factors: complicating diabetes, septic shock, CRP, IL-6, HBP and HE4. The multivariate Logistic regression analysis results showed that complicating diabetes, septic shock occurrence and increased serum CRP, IL-6, HBP and HE4 levels were the independent risk factors for the AKI occurrence in sepsis patients ( $P < 0.05$ ). The restricted cubic spline (RCS) analysis revealed a positive nonlinear relationship between serum HBP, HE4 and the risk of AKI occurrence in sepsis patients ( $P < 0.05$ ). The XGBoost algorithm indicated that septic shock, complicating diabetes, HBP, IL-6, HE4 and CRP as the predictive indicators could maximize the model's predictive efficiency. The ROC curve analysis results demonstrated that the areas under the curves (AUCs) of serum HBP, HE4 and XGBoost model for predicting the AKI occurrence in sepsis patients were 0.782, 0.789 and 0.943, respectively. The AUC of the XGBoost model was significantly higher than that of HBP ( $Z = 3.470, P = 0.001$ ) or HE4 ( $Z = 3.295, P = 0.003$ ) alone. **Conclusion** Serum HBP and HE4 levels are significantly elevated in sepsis patients with AKI occurrence, meanwhile which shows a positive nonlinear relationship with the AKI occurrence. The XGBoost model constructed by septic shock, complicating diabetes, HBP, IL-6, HE4 and CRP as predictive indicators demonstrates the high predictive efficiency for the AKI occurrence in sepsis.

**Key words:** sepsis; heparin-binding protein; human epididymal secretory protein 4; acute kidney injury; prediction

脓毒症是全球常见疾病,据统计,全球每年脓毒症发病率为(276~678)/10万人,病死率为22.5%~26.7%,严重威胁人类生命健康<sup>[1]</sup>。急性肾损伤(AKI)是脓毒症的严重并发症,可使脓毒症病情加重,增加病死率<sup>[2-3]</sup>。临床有研究分析了脓症患者发生AKI的影响因素,对临床防治AKI有一定的指导价值<sup>[4-5]</sup>。但目前尚无预测脓症患者发生AKI的便捷可靠方法,因此,需要不断优化AKI预测指标以加强脓毒症患者的风险分层管理。生物学指标具有检测便捷、疾病相关性强等优势,在脓毒症相关AKI的预防和治疗中发挥重要作用<sup>[6]</sup>。肝素结合蛋白(HBP)是一种炎症介质,在脓毒症中通过调节血管内皮通透性、加剧炎症反应,其血清水平在感染后1h内即可升高,能有效反映脓毒症严重程度。研究表明,HBP通过增加血管内皮通透性、激活单核巨噬细胞,直接加剧肾脏微循环障碍,与脓毒症和AKI的发生有关,其水平升高能通过加重肾小管上皮细胞炎症促进AKI发生<sup>[7]</sup>。人附睾分泌蛋白4(HE4)也是一种肿瘤标志物,已被广泛用于上皮性卵巢癌的临床研究中,但其在脓毒症炎症微环境中的潜在作用尚未明确。现有研究显示,HE4在脓症患者血清中的水平明显升高,且是脓症患者死亡的独立预测因子<sup>[8]</sup>。此外,极端梯度提升(XGBoost)作为梯度提升算法的代表,通过集成学习策略减少过度拟合,提高模型泛化能力,尤其在处理时序数据时表现突出。因此,本研究探讨基于血清HBP、HE4构建的XGBoost模型对脓症患者发生AKI的预测价值,旨在为脓毒症并发AKI的精准防治提供新方法。现报道如下。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 选取2023年9月至2025年3月本

院收治的120例脓症患者作为研究对象。纳入标准:(1)符合脓毒症诊断标准<sup>[9]</sup>;(2)首次患脓毒症;(3)年龄18~79岁;(4)临床资料完整。排除标准:(1)患血液系统疾病;(2)患慢性肾脏病;(3)有肾脏手术史或创伤史;(4)合并恶性肿瘤;(5)入院时已发生AKI;(6)近期(3周内)有肾毒性药物接触史;(7)入院24h内死亡;(8)存在其他器官功能严重障碍。本研究通过本院医学伦理委员会审核批准(20230773)。所有患者或其家属均已签署知情同意书。

## 1.2 方法

**1.2.1 基线资料收集** 收集患者性别、年龄、体质量指数(BMI)、合并症、脓毒症病因,以及入院时急性生理和慢性健康状况II(APACHE II)评分<sup>[11]</sup>、序贯器官衰竭评估(SOFA)评分<sup>[12]</sup>、是否发生脓毒症休克<sup>[9]</sup>、白细胞计数、血小板计数和血肌酐、尿素氮、清蛋白、C反应蛋白(CRP)、白细胞介素-6(IL-6)、降钙素原(PCT)水平等资料。

**1.2.2 血清HBP、HE4检测** 所有患者入院时采集肘静脉血3mL,3500r/min(离心半径8cm)离心5min,分离血清。采用胶乳增强免疫比浊法检测血清HBP水平(试剂盒购自安徽伊普诺康生物技术股份有限公司),应用化学发光法测定血清HE4水平(试剂盒购自深圳市新产业生物医学工程股份有限公司)。以上指标均由同一专业检验人员在同一实验室条件下严格按照说明书完成。

**1.2.3 分组** 根据患者入院后7d内是否发生AKI分为AKI组、非AKI组,AKI的诊断参照《中国急性肾损伤临床实践指南》<sup>[10]</sup>中的相关标准。

**1.3 统计学处理** 采用SPSS27.0软件分析数据。计数资料以例数、百分率表示,组间比较采用 $\chi^2$ 检

验;符合正态分布的计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,2 组间比较采用独立样本  $t$  检验;采用 Lasso 回归及多因素 Logistic 回归分析脓毒症患者发生 AKI 的影响因素;通过限制性立方样条(RCS)模型分析血清 HBP、HE4 与脓毒症患者发生 AKI 的剂量-反应关系;应用 XG-Boost 算法对脓毒症患者发生 AKI 的相关因素进行重要性排序,根据筛选出的重要特征子集构建 XG-Boost 模型;绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型预测脓毒症患者发生 AKI 的效能,曲线下面积(AUC)的比较采用 DeLong 检验,AUC>0.7 表示有一定的预测效能,AUC>0.9

表示预测效能较高。检验水准  $\alpha=0.05$ ,以  $P<0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

**2.1** 2 组基线资料及入院时血清 HBP、HE4 水平比较 入院后 7 d 内,120 例脓毒症患者中 46 例发生 AKI(AKI 组),74 例未发生 AKI(非 AKI 组),AKI 发生率为 38.33%。AKI 组入院时合并糖尿病比例、APACHE II 评分、SOFA 评分、发生脓毒症休克比例及血清 CRP、IL-6、PCT、HBP、HE4 水平均高于非 AKI 组( $P<0.05$ )。见表 1。

表 1 2 组基线资料及入院时血清 HBP、HE4 水平比较[n(%)或  $\bar{x} \pm s$ ]

组别	n	性别		年龄(岁)	BMI(kg/m <sup>2</sup> )	合并高血压	合并糖尿病	合并高脂血症
		男	女					
AKI 组	46	31(67.39)	15(32.61)	60.24±7.39	23.84±1.87	15(32.61)	22(47.83)	12(26.09)
非 AKI 组	74	45(60.81)	29(39.19)	58.96±7.01	23.21±1.72	19(25.68)	15(20.27)	16(21.62)
$\chi^2/t$		0.529		0.953	1.886	0.671	10.100	0.316
P		0.467		0.343	0.062	0.413	0.001	0.574

组别	n	有吸烟史	有饮酒史	脓毒症病因				APACHE II 评分(分)
				呼吸道感染	腹腔感染	泌尿系统感染	其他部位感染	
AKI 组	46	19(41.30)	11(23.91)	19(41.30)	13(28.26)	11(23.91)	3(6.53)	21.56±5.08
非 AKI 组	74	26(35.14)	14(18.92)	33(44.59)	20(27.03)	17(22.97)	4(5.41)	19.37±4.15
$\chi^2/t$		0.461	0.429		0.158			2.576
P		0.497	0.512		0.984			0.011

组别	n	SOFA 评分(分)	发生脓毒症休克	白细胞计数( $\times 10^9/L$ )	血小板计数( $\times 10^9/L$ )	血肌酐( $\mu\text{mol/L}$ )	尿素氮(mmol/L)
非 AKI 组	74	7.85±2.21	12(16.22)	13.95±3.29	111.35±12.17	159.42±51.68	13.92±3.76
$\chi^2/t$		3.179	12.328	1.173	-1.379	1.169	1.659
P		0.002	<0.001	0.243	0.170	0.245	0.100

组别	n	清蛋白(g/L)	CRP(mg/L)	IL-6(pg/mL)	PCT(ng/mL)	HBP( $\mu\text{g/L}$ )	HE4(pmol/L)
非 AKI 组	74	27.15±7.22	49.74±15.30	83.46±18.79	41.32±8.27	40.89±12.74	521.67±108.21
$\chi^2/t$		-1.440	6.513	7.836	3.207	8.790	7.274
P		0.153	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001

**2.2** 脓毒症患者发生 AKI 的 Lasso 回归分析 以脓毒症患者是否发生 AKI(否=0,是=1)为因变量,表 1 中  $P<0.05$  的指标(合并糖尿病、APACHE II 评分、SOFA 评分、脓毒症休克及血清 CRP、IL-6、PCT、HBP、HE4,共 9 个)作为自变量,进行 Lasso 回归分析。结果显示,当惩罚系数  $\lambda$  取 0.052 时可使模型性能最优。依据此  $\lambda$  值筛选出 6 个影响因素:合并糖尿病、脓毒症休克、CRP、IL-6、HBP、HE4。见图 1。

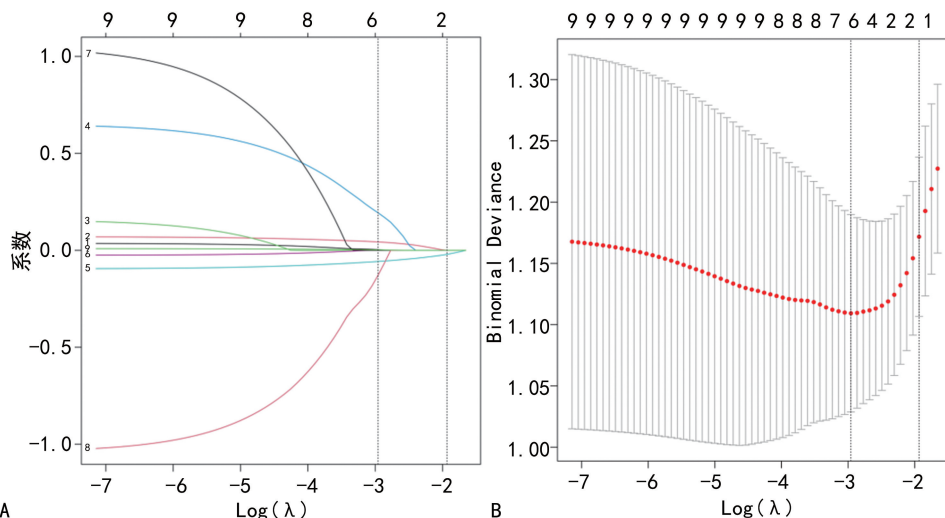
**2.3** 脓毒症患者发生 AKI 的多因素 Logistic 回归分

析 以脓毒症患者是否发生 AKI(否=0,是=1)为因变量,将 Lasso 回归筛选出的 6 个变量(合并糖尿病、脓毒症休克、CRP、IL-6、HBP、HE4)作为自变量,进行多因素 Logistic 回归分析。结果显示,合并糖尿病、发生脓毒症休克及血清 CRP、IL-6、HBP、HE4 水平升高均是脓毒症患者发生 AKI 的危险因素( $P<0.05$ )。见表 2。

**2.4** 血清 HBP、HE4 与脓毒症患者发生 AKI 的剂量-反应关系 RCS 分析取 3 个节点数,血清 HBP、

HE4 与脓毒症患者 AKI 发生风险呈正向的非线性关系 ( $P < 0.05$ ), 特别是当  $HBP \geq 63.0 \mu\text{g/L}$ 、 $HE4 \geq$

$591.0 \text{ pmol/L}$  时, 脓毒症患者发生 AKI 的风险随 HBP、HE4 水平升高而明显升高。见表 3 和图 2。



注: A 为 Lasso 回归筛选变量动态过程图; B 为交叉验证最佳参数  $\lambda$  的选择过程图。

图 1 脓毒症患者发生 AKI 的 Lasso 回归分析

表 2 脓毒症患者发生 AKI 的多因素 Logistic 回归分析

因素	赋值	$\beta$	SE	Wald $\chi^2$	OR	95%CI		P
						下限	上限	
脓毒症休克	无=0, 有=1	1.261	0.341	13.666	3.528	1.808	6.882	<0.001
合并糖尿病	否=0, 是=1	1.045	0.310	11.369	2.844	1.549	5.222	0.001
HBP	实测值	0.171	0.054	10.008	1.186	1.067	1.319	0.001
IL-6	实测值	0.142	0.047	9.170	1.153	1.051	1.264	0.003
HE4	实测值	0.121	0.041	8.714	1.129	1.042	1.223	0.003
CRP	实测值	0.094	0.033	8.093	1.098	1.030	1.172	0.004
常数项	—	-12.379	11.045	10.128	—	—	—	0.001

注: — 表示无数据。

表 3 RCS 分析

指标	OR	OR 的 95%CI	P
$HBP < 63.0 \mu\text{g/L}$	1.03	0.99~1.07	>0.05
$HBP \geq 63.0 \mu\text{g/L}$	1.34	1.01~1.79	<0.05
$HE4 \geq 591.0 \text{ pmol/L}$	1.18	1.01~1.56	<0.05
$HE4 < 591.0 \text{ pmol/L}$	1.00	0.99~1.01	>0.05

**2.5 XGBoost 算法对相关因素的筛选及模型构建**  
 基于 XGBoost 算法, 采用 SHAP 包获取表 1 中  $P < 0.05$  指标: 合并糖尿病、APACHE II 评分、SOFA 评分、脓毒症休克及血清 CRP、IL-6、PCT、HBP、HE4 的 SHAP 值, SHAP 越大提示脓毒症患者发生 AKI 的风险越高, 见图 3A; 进一步采用 R 软件的 grid

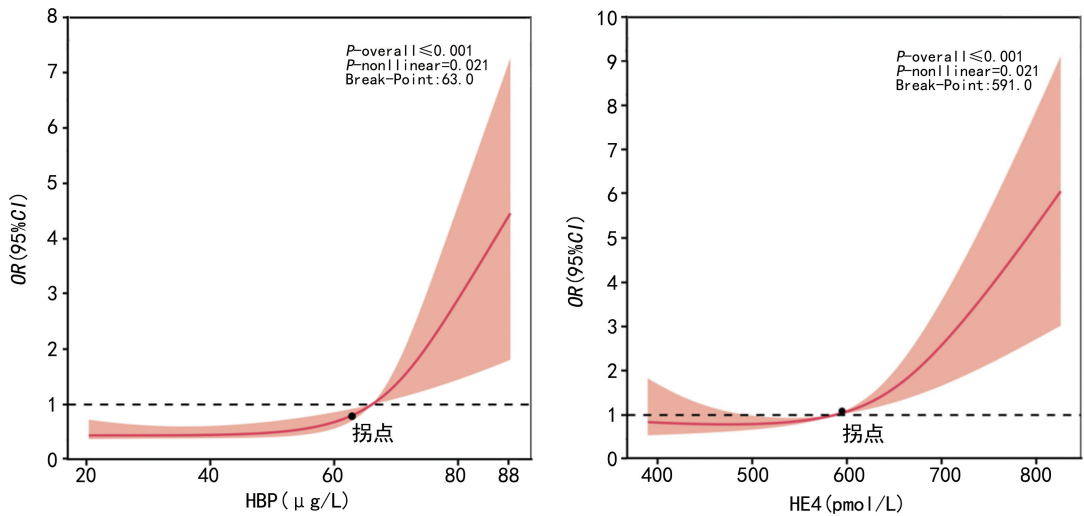
search 包对特征重要性排序, 通过调试模型发现, 当纳入图 3B 中前 6 个临床特征时可使模型的预测效能最大, 前 6 个临床特征按照重要性排序依次为脓毒症休克、合并糖尿病、HBP、IL-6、HE4、CRP, 因此将上述 6 个临床特征作为预测指标构建 XGBoost 模型。

**2.6 血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型预测 AKI 的价值**  
 以脓毒症患者是否发生 AKI (否=0, 是=1) 为状态变量, 血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型作为检验变量, 绘制 ROC 曲线。结果显示, 血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型预测脓毒症患者发生 AKI 的 AUC 分别为 0.782、0.789、0.943, XGBoost 模型预测的 AUC 明显大于 HBP ( $Z = 3.470, P = 0.001$ )、HE4 ( $Z = 3.295, P = 0.003$ ) 单独预测。见表 4 和图 4。

表 4 血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型预测脓毒症患者发生 AKI 的效能

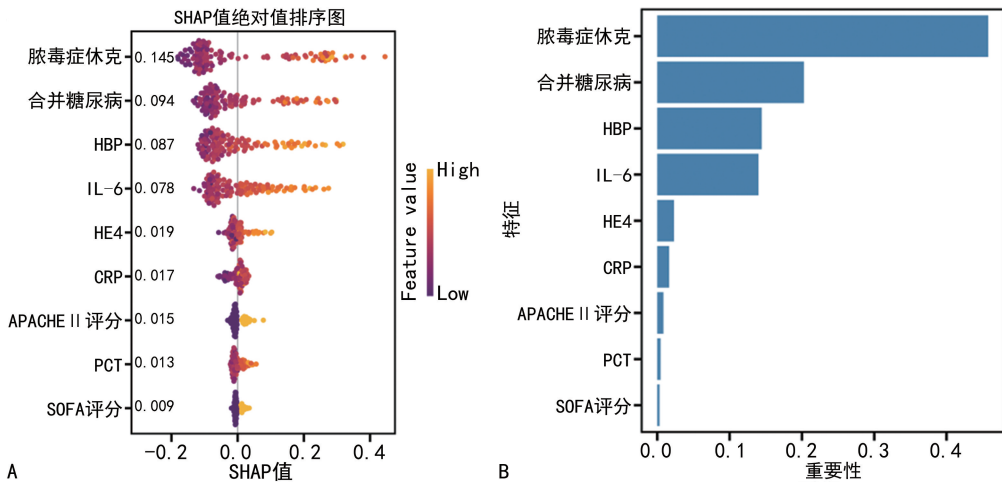
指标	AUC	AUC 的 95%CI	最佳截断值	约登指数	灵敏度 (%)	特异度 (%)	P
HBP	0.782	0.698~0.852	64.02 $\mu\text{g/L}$	0.453	69.57	75.68	<0.001
HE4	0.789	0.705~0.858	631.79 pmol/L	0.436	65.22	78.38	<0.001
XGBoost 模型	0.943	0.885~0.977	—	0.716	89.13	82.43	<0.001

注: — 表示无数据。



注:纵轴为 OR 值,参考线 OR=1。

图 2 血清 HBP、HE4 与脓毒症患者发生 AKI 的 RCS 模型



注:A 为相关因素的 SHAP 值分布图;B 为相关因素的重要性排序图。

图 3 脓毒症患者发生 AKI 相关因素的 XGBoost 筛选

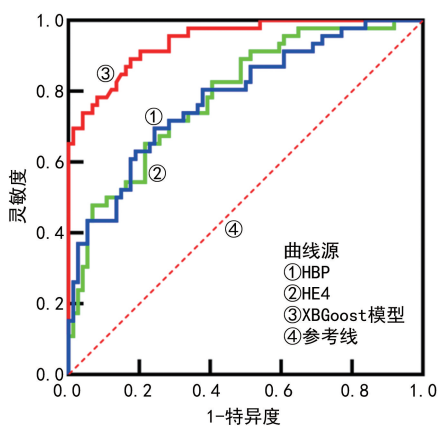


图 4 血清 HBP、HE4 及 XGBoost 模型预测脓毒症患者发生 AKI 的 ROC 曲线

### 3 讨论

AKI 是导致脓毒症患者预后变差的主要原因之一,加强 AKI 的预防和治疗对改善患者预后具有重要意义<sup>[13-14]</sup>。既往研究显示,脓毒症患者的 AKI 发生率为 19.05%~39.53%<sup>[15]</sup>。本研究结果显示,38.33% 的脓毒症患者发生 AKI,与王炎等<sup>[16]</sup>报道的 38.75%

相近。因此,及时明确脓毒症患者的 AKI 发生风险尤为关键。

本研究结果显示,发生 AKI 的脓毒症患者入院时血清 HBP、HE4 水平明显高于未发生 AKI 患者,且 HBP、HE4 水平升高均会明显增加 AKI 发生风险。这说明血清 HBP、HE4 水平升高与脓毒症患者发生 AKI 有关。分析其原因在于,HBP 是与脓毒症发生、发展密切相关的急性时相蛋白,在脓毒症诊断中较其他细胞因子更准确,其能发挥炎症介质和血管渗透剂的作用,能诱导 AKI 发生<sup>[17]</sup>。HBP 能与 Toll 样受体 2(TLR2)、Toll 样受体 4(TLR4)等结合,诱导机体免疫反应和炎症反应,刺激机体大量释放炎症因子,同时能增加血管通透性,引起肾小管上皮细胞损伤,最终诱发 AKI<sup>[18]</sup>。研究显示,血清 HBP 水平升高能加重肺炎患者肾损伤,从而促进 AKI 发生<sup>[19]</sup>。HE4 是一种 Wey 酸性蛋白家族分泌蛋白,目前广泛应用于卵巢癌等恶性肿瘤的临床诊断中<sup>[20]</sup>。近年研究发现 HE4 表达异常与肾脏损伤有关。动物学研究显示,HE4 表达增加能通过加重大鼠肾小管上皮细胞损伤诱导 AKI,而抑制 HE4 表达有助于降低 AKI 发

生风险<sup>[21]</sup>。在脓毒症患者体内,血清 HE4 水平升高能通过激活 Toll 样受体(TLR)、核苷酸结合寡聚化结构域样受体蛋白 3(NLRP3)炎症小体等途径诱导机体免疫,导致机体大量释放细胞因子,引起并加重全身炎症反应<sup>[22]</sup>。SONG 等<sup>[23]</sup>研究显示,血清 HE4 是评估肾损伤的新生物标志物,血清 HE4 水平与慢性肾脏病病情程度呈正相关,其水平升高能通过加重肾脏炎症损伤增加 AKI 发生风险。因此,血清 HBP、HE4 水平升高能通过加重肾脏炎症损伤促进 AKI 发生。

此外,IL-6、CRP 等生物学指标水平在脓毒症发生、发展过程中显著升高,有助于疾病诊断、并发症评估及预后预测<sup>[24]</sup>。本研究结果显示,与未发生 AKI 患者比较,发生 AKI 脓毒症患者的入院时合并糖尿病比例、APACHE II 评分、SOFA 评分、发生脓毒症休克比例及血清 CRP、IL-6、PCT 水平均明显升高,其中发生脓毒症休克、合并糖尿病、IL-6 水平升高、CRP 水平升高均为脓症患者发生 AKI 的独立危险因素,与既往研究<sup>[25-26]</sup>结果一致。说明脓毒症患者的 AKI 发生风险受多种因素影响。本研究将合并糖尿病、SOFA 评分等校正后分析发现,血清 HBP、HE4 水平升高与脓症患者 AKI 发生风险呈正向的非线性关系。说明在排除其他因素干扰后,血清 HBP、HE4 水平升高仍能明显增加脓症患者 AKI 发生风险,进一步说明二者具有预测脓毒症发生 AKI 的潜在价值。其机制可能在于:HBP 作为炎症介质,其水平升高可刺激机体大量释放炎症因子<sup>[27-28]</sup>,高水平的 HE4 则能诱导机体大量释放细胞因子<sup>[29-30]</sup>,二者能共同加重全身炎症反应,加重肾小管上皮细胞炎症损伤,形成协同作用,共同促进 AKI 的发生。本研究 ROC 曲线分析结果显示,血清 HBP、HE4 单独预测脓症患者发生 AKI 的 AUC 均在 0.7 以上,具有一定预测效能,可作为预测 AKI 的生物学指标。但二者单独应用的预测价值有限,这可能与 AKI 的发生受多种因素影响有关,单独应用一项指标难以全面反映 AKI 发生的相关信息。本研究通过 XGBoost 算法对相关因素之间复杂的非线性关系进行准确分析,并将最重要的关键特征提取出来,结果发现将脓毒症休克、合并糖尿病、HBP、IL-6、HE4、CRP 作为预测指标构建的 XGBoost 模型可使模型的预测效能最大,据此构建的模型更加稳健、可靠。本研究 XGBoost 模型预测脓症患者发生 AKI 的 AUC 提高至 0.943,预测效能较高。XGBoost 在处理非线性数据、提高泛化能力、进行特征重要性分析等方面仍具有显著优势,使其在复杂的医疗预测任务中备受青睐,可为临床识别 AKI 高危患者提供可靠的临床依据。

综上所述,脓毒症发生 AKI 患者血清 HBP、HE4 水平明显升高,同时与 AKI 发生风险呈正向的非线性关系,血清 HBP、HE4 在预测 AKI 发生风险方面具有一定价值,基于血清 HBP、HE4 构建的 XGBoost

模型可为临床预测脓毒症并发 AKI 提供可靠的临床依据。但本研究属于单中心研究,样本量较小,相关因素选取不够全面,可能影响结果准确性,且未动态监测血清 HBP、HE4 水平变化,其最佳检测时间点尚未明确,后续需通过多中心的大样本研究进一步完善和深入探讨。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突。

**作者贡献** 付婷婷:实验实施、论文撰写与修改、统计学分析;张晓东:研究的设计实施与质控、论文审核与监管;姚琳琳:负责实验数据收集分析。

## 参考文献

- [1] FLEISCHMANN-STRUZEK C, RUDD K. Challenges of assessing the burden of sepsis[J]. *Med Klin Intensivmed Notfmed*, 2023, 118(2): 68-74.
- [2] LEGRAND M, BAGSHAW S M, BHATRAJU P K, et al. Sepsis-associated acute kidney injury: recent advances in enrichment strategies, sub-phenotyping and clinical trials[J]. *Crit Care (Fullerton)*, 2024, 28(1): 92.
- [3] PRIVRATSKY J R, IDE S, CHEN Y T, et al. A macrophage-endothelial immunoregulatory axis ameliorates septic acute kidney injury[J]. *Kidney Int*, 2023, 103(3): 514-528.
- [4] NINMER E K, CHARLTON J R, SPAEDER M C. Risk factors for Sepsis-Associated acute kidney injury in the PICU: a retrospective cohort study[J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2022, 23(7): e366-e370.
- [5] MWEENE M D, RICHARDS G A, PAGETG, et al. Risk factors and outcomes of sepsis-associated acute kidney injury in intensive care units in Johannesburg, South Africa[J]. *S Afr Med J*, 2022, 112(12): 919-923.
- [6] BALKRISHNA A, SINHA S, KUMAR A, et al. Sepsis-mediated renal dysfunction: pathophysiology, biomarkers and role of phytoconstituents in its management[J]. *Biomed Pharmacother*, 2023, 165: 115183.
- [7] OLINDER J, STJERNQVIST M J, LINDÉN A, et al. Heparin, in contrast to heparin binding protein, does not portend acute kidney injury in patients with community acquired septic shock[J]. *PLoS One*, 2024, 19(5): e0299257.
- [8] LAI X F, KANG M, CHEN Y Q, et al. Elevated serum level of human epididymal protein 4 (HE4) predicts poor prognosis in the critically ill with sepsis: a prospective observational cohort study[J]. *Clin Biochem*, 2022, 109/110: 79-85.

- [9] 中国医师协会急诊医师分会,中国研究型医院学会休克与脓毒症专业委员会. 中国脓毒症/脓毒性休克急诊治疗指南(2018)[J]. 中国急救医学, 2018,38(9):741-756.
- [10] 国家慢性肾病临床医学研究中心,中国医师协会肾脏内科医师分会,中国急性肾损伤临床实践指南专家组. 中国急性肾损伤临床实践指南[J]. 中华医学杂志, 2023,103(42):3332-3366.
- [11] 崔超,李劭凝,马建华.  $\mu$ NGAL、Ccr、降钙素原联合 APACHE II 评分对脓毒症相关急性肾损伤预后的预测价值[J]. 临床误诊误治, 2025,38(3):73-77.
- [12] WANG L, MA X D, ZHOU G H, et al. SOFA in sepsis: with or without GCS[J]. Eur J Med Res, 2024,29(1):296.
- [13] DENG J H, LI L N, FENG Y J, et al. Comprehensive management of blood pressure in patients with septic AKI[J]. J Clin Med, 2023,12(3):1018.
- [14] LI J M, WANG L Y, WANG B, et al. NOX4 is a potential therapeutic target in septic acute kidney injury by inhibiting mitochondrial dysfunction and inflammation [J]. Theranostics, 2023,13(9):2863-2878.
- [15] 王雅婧,刘倩,闫文文,等. 血清增殖诱导配体水平与脓毒症急性肾损伤的关系[J]. 中国血液净化, 2023,22(1):32-35.
- [16] 王炎,李志云,贾铁兵,等. DKK3 在脓毒症相关急性肾损伤早期诊断的意义[J]. 河北医科大学学报, 2023,44(11):1295-1300.
- [17] 朱洪伍,梁继芳,武卫东,等. 肝素结合蛋白对脓症患者急性肾损伤的预测价值[J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2022,21(4):266-270.
- [18] 刘倩,王肖肖,闫文文,等. 重症脓症患者血清 HBP 和 Presepsin 水平对其急性肾损伤的预测[J]. 标记免疫分析与临床, 2024,31(7):1298-1302.
- [19] CONTRERAS-VILLAMIZAR K, BARBOSA O, MUÑOZ A C, et al. Risk factors associated with acute kidney injury in a cohort of hospitalized patients with COVID-19 [J]. BMC Nephrol, 2023,24(1):140.
- [20] 张春蕾,陈艳梅,赵洪焕,等. CA724、HE4 检测对妊娠合并卵巢癌病人诊断价值及其与超声造影参数相关性[J]. 蚌埠医学院学报, 2022,47(3):368-372.
- [21] HUANG X, GUO X X, YAN G L, et al. Dapagliflozin attenuates contrast-induced acute kidney injury by regulating the HIF-1 $\alpha$ /HE4/NF- $\kappa$ B pathway[J]. J Cardiovasc Pharmacol, 2022,79(6):904-913.
- [22] 许青青,林瑶瑶,刘海林,等. 血清人附睾分泌蛋白 4、应激诱导蛋白 2 水平与脓毒症相关 ARDS 患者病情严重程度、预后的关系研究[J]. 实用心脑血管病杂志, 2024,32(8):53-57.
- [23] SONG J Y, CHEN L, YUAN Z P, et al. Elevation of serum human epididymis protein 4 (HE4) and N-terminal pro-B-type natriuretic peptide (NT-proBNP) as predicting factors for the occurrence of acute kidney injury on chronic kidney disease: a single-center retrospective self-control study[J]. Front Pharmacol, 2023,14:1269311.
- [24] BITEKER F S, ÇAYLAK S D, SÖZEN H. Biomarkers in sepsis[J]. Am J Emerg Med, 2016,34(5):924-925.
- [25] 李雅琳,李东风,孙振康,等. 基于脓毒症急性肾损伤多因素的预测模型构建及验证[J]. 临床内科杂志, 2023,40(11):754-757.
- [26] 李泽标,李秋呈,邢柏. 基于预后营养指数对脓症患者并发急性肾损伤预测模型的建立与评价[J]. 安徽医学, 2024,45(7):868-873.
- [27] 刘威,孙小者,苏龙. 肝素结合蛋白在血液灌流(HA380)联合连续性静脉-静脉血液滤过治疗脓毒症中变化及意义[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2024,38(10):973-979.
- [28] 杨韬滔,肖兵,唐方朋. HBP、陷窝蛋白-1 及 PCT 在鉴别诊断脑膜炎患儿疾病类型及预后中的价值[J]. 临床和实验医学杂志, 2023,22(18):1987-1991.
- [29] 蒋磊,方兴刚,兰培敏,等. 类风湿关节炎病人血清 HE4、PS-PLA1 表达与疾病活动度、疾病转归的相关性分析[J]. 蚌埠医学院学报, 2024,49(11):1463-1466.
- [30] 刘成琴,严伟,朱红梅. 血清 HE4、IFN- $\alpha$ 、CCL19、OAS1 与系统性红斑狼疮患者疾病活动度的相关性分析[J]. 检验医学与临床, 2024,21(17):2553-2556.

(收稿日期:2025-08-14 修回日期:2026-04-15)  
(编辑:陈秋莲 廖薇薇)