DOI:10.12138/j.issn.1671－9638.20264287

·论著·

ICU 患者耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌感染风险预测模型的构建与验证

先疆燕,李 多,邬勋莲,甘昌玉
(西南医科大学附属医院医院感染管理部,四川 泸州 646000)

[摘 要] **目的** 探讨重症监护病房(ICU)患者耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌(CRAB)感染的危险因素,构建并验证风险列线图(nomogram)预测模型。**方法** 回顾性收集 2022 年 6 月 1 日—2025 年 5 月 31 日某三级甲等医院 ICU 住院患者的临床资料,按 7∶3 比例随机分为建模组和验证组。基于建模组数据,采用单因素分析和 Lasso 回归筛选特征变量,再纳入多因素 logistic 回归分析确定 ICU 患者 CRAB 感染的独立危险因素,并建立 nomogram 预测模型。运用验证组数据对模型进行内部验证,采用受试者工作特征(ROC)曲线、校准曲线、决策曲线评估模型效能。**结果** 2 256 例 ICU 患者中,194 例发生 CRAB 感染,感染发病率为 8.60%。多因素 logistic 回归分析结果显示,使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂(*OR* = 3.21,95%*CI*:1.55～6.65)、低蛋白血症(*OR* = 10.20,95%*CI*:5.12～20.34)、CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联(*OR* = 2.55,95%*CI*:0.99～6.51)、呼吸机使用日数≥7 d(*OR* = 4.09,95%*CI*:2.56～6.53)、CRAB 感染前存在既往感染(*OR* = 6.31,95%*CI*:3.80～10.49)、CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素(*OR* = 9.93,95%*CI*:3.61～27.31)是 ICU 患者 CRAB 感染的独立危险因素。基于上述 6 项独立危险因素,建立预测 ICU 患者 CRAB 感染的 nomogram 模型。内部验证结果显示,建模组与验证组的 ROC 曲线下面积(AUC)值分别为 0.909(95%*CI*:0.883～0.936)、0.901(95%*CI*:0.862～0.939),表明模型具有较高的预测准确性;Hosmer-Lemeshow 检验 *P* 值分别为 0.991、0.521,显示模型拟合良好。**结论** 该研究构建的 ICU 患者 CRAB 感染风险预测模型具有良好的区分度和校准度,能够辅助识别 CRAB 感染高风险患者,为早期精准防控提供预警参考。

[关 键 词] 重症监护病房;耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌;Lasso 回归分析;风险列线图;预测模型
[中图分类号] R181.3+2

Construction and validation of risk predicting model for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infection in ICU patients

XIAN Jiangyan, LI Duo, WU Xunlian, GAN Changyu (Department of Healthcare-associated Infection Management, The Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou 646000, China)

[**Abstract**] **Objective** To explore the risk factors for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* (CRAB) infection in patients in intensive care unit (ICU), and to construct and validate a nomogram risk prediction model. **Methods** Clinical data of ICU patients in a tertiary first-class hospital from June 1, 2022 to May 31, 2025 were collected retrospectively, and randomly divided into a modeling group and a validation group at a 7∶3 ratio. Based on data from the modeling group, univariate analysis and Lasso regression were used to screen characteristic variables, multivariate logistic regression analysis was adopted to determine independent risk factors for CRAB infection in ICU patients, and a nomogram prediction model was established. Internal validation of the model was conducted

[收稿日期] 2026－02－25
[作者简介] 先疆燕(1990 －),女(汉族),四川省泸州市人,主管技师(卫生管理),主要从事医院感染预防与控制研究。
[通信作者] 甘昌玉 E-mail:814767400@qq.com

with data from validation group, and model performance was evaluated by receiver operating characteristic (ROC) curve, calibration curve, and decision curve. **Results** Among the 2 256 ICU patients, 194 developed CRAB infection, with an infection rate of 8.60%. Multivariate logistic regression analysis showed that the use of glucocorticoids or immunosuppressants (*OR* = 3.21, 95%*CI*: 1.55 - 6.65), hypoalbuminemia (*OR* = 10.20, 95%*CI*: 5.12 - 20.34), combination therapy with antimicrobial agents≥2 types before CRAB infection (*OR* = 2.55, 95%*CI*: 0.99 - 6.51), duration of ventilator use≥7 days (*OR* = 4.09, 95%*CI*: 2.56 - 6.53), previous infection before CRAB infection (*OR* = 6.31, 95%*CI*: 3.80 - 10.49), and use of carbapenem antibiotics before CRAB infection (*OR* = 9.93, 95%*CI*: 3.61 - 27.31) were independent risk factors for CRAB infection in ICU patients. Based on the above 6 independent risk factors, a nomogram model for predicting CRAB infection in ICU patients was established. The internal validation results showed that the area under ROC curve (AUC) values of the modeling group and the validation group were 0.909 (95%*CI*: 0.883 - 0.936) and 0.901 (95%*CI*: 0.862 - 0.939), respectively, indicating that the model had high predictive accuracy. The Hosmer-Lemeshow test had P-values of 0.991 and 0.521, respectively, indicating a good fit of the model. **Conclusion** The risk prediction model for CRAB infection in ICU patients constructed in this study has good discrimination and calibration, which can assist in identifying high-risk patients with CRAB infection and provide early warning references for accurate prevention and control.

[**Key words**] intensive care unit; carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*; Lasso regression analysis; risk nomogram; prediction model

鲍曼不动杆菌是引起医院感染常见的条件致病菌[1-3],尤其在重症监护病房(intensive care unit, ICU)的免疫功能低下患者和老年患者中较为常见[4]。该菌可导致呼吸道感染、血流感染,还可引发伤口感染和脑膜炎,同时也能在肠道、呼吸道黏膜及皮肤表面无症状定植[5]。近年来,广谱抗菌药物的滥用导致病原菌的耐药性逐渐升高,而碳青霉烯类药物是临床广泛应用的抗菌药物,随着该类药物的使用时间延长,耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌(carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*, CRAB)日益增多[6],并在全球范围内流行[7]。由于 CRAB 对多种抗菌药物呈现高度耐药性,治疗选择受限,因此世界卫生组织(WHO)宣布将其归为 1 类(危急)优先病原体[8]。据 2025 年上半年中国细菌耐药监测网[9]数据显示,鲍曼不动杆菌对亚胺培南和美罗培南的耐药率分别从 2005 年的 31%和 39%上升至 2025 年上半年的 76.5%和 76.4%。ICU 中 CRAB 的检出率为 78.2%[10]。CRAB 感染的全球暴发增加了患者病死率,延长了住院时间,提高了 ICU 资源占用率及再住院率,加重了疾病负担[11-12]。因此,建立 ICU 患者 CRAB 感染的风险预测模型,并据此制定精准防控策略,对临床开展个体化治疗与预防提供决策支持。

与传统的变量选择方法相比,Lasso 回归克服了传统方法在变量选择方面的缺点,具有预测能力强、筛选变量严谨、拟合能力好等优点[13]。Nomogram 预测模型将生物学与临床整合模型结合,用平行线段将 logistic 回归的结果在平面直角坐标系中直观地展现出来[14]。基于此,本研究采用回顾性队列研究的方法,通过多阶段变量筛选 ICU 患者 CRAB 感染的相关预测因素,并构建风险预测模型,旨在为临床工作者提供快速的量化评估工具,以早期识别 CRAB 感染高风险人群,从而提升 CRAB 感染防控的精准化和前移化水平,为改善重症患者结局提供新的循证依据。

1 对象与方法

1.1 研究对象 选取西南医科大学附属医院 ICU 2022 年 6 月 1 日—2025 年 5 月 31 日收治的患者为研究对象。

1.2 细菌的鉴定和药敏试验 菌株鉴定及药敏试验采用法国生物梅里埃公司 VITEK 2 全自动微生物鉴定及药敏分析系统及其配套药敏卡进行。药敏结果的判断参照美国临床实验室标准化协会(CLSI)M100 抗微生物药物敏感性试验执行标准,将亚胺培南或美罗培南的最低抑菌浓度(MIC)≥8 μg/mL 定义为耐药,即判定为 CRAB。质控菌株为大肠埃希菌 ATCC 25922。

1.3 纳入与排除标准

1.3.1 纳入标准 (1)在 ICU 的住院时间≥48 h。(2)患者年龄>18 岁。(3)入 ICU 48 h 以后发生的 CRAB 感染,且符合 CRAB 感染的诊断标准[15]。CRAB 感染的诊断需同时满足以下条件:①临床表现,存在与感染相符的临床症状,如发热(体温≥38.0℃)、低体温(<36.0℃)、寒战、低血压、局部红肿、脓性分泌物等;②影像学改变(如肺炎患者),胸部影像学显示新发或进展性浸润影、实变或胸腔积液;③实验室指标异常,外周血白细胞计数升高(>10.0×10^9/L)或降低(<4.0×10^9/L)、中性粒细胞比率升高(>75%)、C 反应蛋白(CRP>50 mg/L)、降钙素原(PCT>0.5 μg/L)等炎症标志物异常升高;④病原菌依据,从确诊感染部位采集的合格标本(如血、支气管肺泡灌洗液、无菌体液、深部组织等)中分离出 CRAB。(4)若同一患者在研究期间多次在 ICU 发生 CRAB 感染,仅纳入首次感染。

1.3.2 排除标准 (1)入 ICU 前已确诊 CRAB 感染;(2)入 ICU 后 48 h 内发生 CRAB 感染;(3)患者临床资料缺失;(4)入 ICU 后 48 h 内死亡或者放弃治疗的患者;(5)排除定植。定植的判定标准:从非无菌部位(如痰、咽拭子、皮肤表面、环境标本等)采集的标本中分离出 CRAB,但不伴有上述临床表现、炎症指标或影像学证据支持。由两名具有 3 年以上临床经验的医生根据诊断标准进行独立判断,若出现判断不一致的情况则协商解决。

1.4 研究方法

通过查阅国内外相关文献资料,并咨询医院感染管理及临床专家,制定本研究的调查表。采用回顾性调查方法,通过医院的病历信息系统和重症监护系统收集所有 ICU 患者的临床资料。主要内容包括:(1)患者基本信息,性别、年龄、身高、体重、入院时间、出院时间、入 ICU 时间、出 ICU 时间;(2)入 ICU 时基础疾病情况,发热、高血压、糖尿病、低蛋白血症(血清清蛋白<30 g/L)、入 ICU 时急性生理学与慢性健康状况评价系统Ⅱ(APACHE Ⅱ)评分、心脏病、恶性肿瘤、颅脑损伤、贫血、血液或腹膜透析;(3)CRAB 感染前药物使用情况,使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂、使用蛋白类药物(具体指人血白蛋白、免疫球蛋白类及其他血浆蛋白制品)、抗菌药物使用时间、抗菌药物联合用药种类数、碳青霉烯类抗生素使用情况;(4)CRAB 感染前手术和侵入性操作情况,手术次数、留置鼻胃管、留置导尿管日数、呼吸机使用日数、中心静脉置管日数;(5)CRAB 感染前感染情况,是否存在既往感染、是否存在其他多重耐药菌感染。本研究经西南医科大学附属医院伦理委员会审批通过(批准编号:KY2026084)。

1.5 统计分析

应用 R 软件(4.4.2)进行统计分析,将入组患者按照 7∶3 比例随机分为建模组和验证组,两组基线资料比较采用 χ^2 检验。采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法进行单因素分析,并将分析中有统计学意义的变量进一步纳入 Lasso 回归分析,筛选出特征性变量。将特征变量进行多因素 logistic 回归分析(采用向后逐步回归法),最终确定模型拟合精度最佳的变量组合,并构建预测模型,根据预测模型公式输出 nomogram 可视化图形。采用 Hosmer-Lemeshow 方法对预测模型进行拟合优度检验,通过受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)、灵敏度、特异度、校准曲线评价 ICU 患者发生 CRAB 感染的预测效能。采用决策曲线分析(DCA)评估模型的预测效率和临床实用价值。AUC 越接近于 1,说明诊断效果越好,>0.9 为准确性较高,0.7~0.9 为有一定准确性,0.5~0.7 为准确性较低。$P\leqslant0.05$ 表示差异有统计学意义。多因素 logistic 回归分析(向后逐步回归法)筛选最终建模变量时,以赤池信息准则(AIC)最小化为变量剔除依据。即临床预测模型中为准确预测,变量是否具有统计学意义已不再重要,重点评价的是 AIC 和 BIC[16],AIC 值越小,模型相对越优。

2 结果

2.1 CRAB 感染情况及基线数据比较 研究共纳入 2 256 例 ICU 住院患者,其中发生 CRAB 感染 194 例,感染发病率 8.60%。建模组 1 600 例,验证组 656 例,感染发病率分别为 9.06%(145 例)和 7.47%(49 例)。建模组与验证组 27 个临床变量情况比较,除使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂、CRAB 感染前有既往感染外,其他变量差异均无统计学意义(均 $P>0.05$),见表 1。

表 1　建模组与验证组患者临床资料比较[例(%)]

Table 1　Comparison of clinical data between patients in modeling group and validation group (No. of cases [%])

变量	建模组(n = 1 600)	验证组(n = 656)	χ^2	P
男性	992(62.00)	419(63.87)	0.70	0.404
年龄≥60 岁	951(59.44)	377(57.47)	0.74	0.388
ICU 住院时间≥7 d	663(41.44)	287(43.75)	1.02	0.312
入 ICU 前住院时间≥7 d	316(19.75)	107(16.31)	3.61	0.057
总住院时间≥10 d	1 371(85.69)	566(86.28)	0.14	0.714
BMI≥24 kg/m^2	378(23.63)	144(21.95)	0.73	0.392
入 ICU 时 APACHE Ⅱ 评分≥20 分	1 201(75.06)	491(74.85)	0.01	0.915
高血压	375(23.44)	170(25.91)	1.56	0.212
糖尿病	140(8.75)	66(10.06)	0.96	0.326
使用蛋白或蛋白类药物	286(17.88)	102(15.55)	1.77	0.184
心脏病	155(9.69)	63(9.60)	0.01	0.951
存在恶性肿瘤	87(5.44)	36(5.49)	0.01	0.962
颅脑损伤	191(11.94)	85(12.96)	0.45	0.502
贫血	170(10.63)	65(9.91)	0.26	0.613
血液或腹膜透析	36(2.25)	17(2.59)	0.24	0.627
发热	516(32.25)	197(30.03)	1.06	0.303
使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂	85(5.31)	21(3.20)	4.63	0.031
低蛋白血症	84(5.25)	25(3.81)	2.10	0.148
CRAB 感染前抗菌药物使用时间≥7 d	819(51.19)	349(53.20)	0.76	0.385
CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联	43(2.69)	15(2.29)	0.30	0.585
手术次数≥2 次	24(1.50)	9(1.37)	0.05	0.818
留置鼻胃管	57(3.56)	21(3.20)	0.18	0.670
留置导尿管日数≥7 d	758(47.38)	317(48.32)	0.17	0.682
呼吸机使用日数≥7 d	484(30.25)	209(31.86)	0.57	0.452
静脉置管日数≥7 d	120(7.50)	52(7.93)	0.12	0.729
CRAB 感染前有既往感染	510(31.88)	240(36.59)	4.65	0.031
CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素	32(2.00)	7(1.07)	2.38	0.123

注：BMI 为身体质量指数。

2.2　CRAB 感染单因素分析　对建模组患者进行单因素分析，结果显示，感染组患者 ICU 住院时间(≥7 d)、总住院时间(≥10 d)、糖尿病、使用蛋白或蛋白类药物、颅脑损伤、贫血、血液或腹膜透析、发热、使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂、低蛋白血症、CRAB 感染前抗菌药物使用时间(≥7 d)、CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联、手术次数、留置鼻胃管、留置导尿管日数(≥7 d)、呼吸机使用日数(≥7 d)、静脉置管日数(≥7 d)、CRAB 感染前有既往感染、CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素的比率均高于非感染组，差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)，见表 2。

表 2 ICU 患者 CRAB 感染的单因素分析[例(%)]

Table 2 Univariate analysis of CRAB infection in ICU patients (No. of cases [%])

变量	全部(n = 1 600)	感染组(n = 145)	非感染组(n = 1 455)	χ^2	P
性别				0.27	0.603
男	992(62.00)	87(60.00)	905(62.20)		
女	608(38.00)	58(40.00)	550(37.80)		
年龄(岁)				0.04	0.834
≥60	951(59.44)	85(58.62)	866(59.52)		
<60	649(40.56)	60(41.38)	589(40.48)		
ICU 住院时间(d)				84.23	<0.001
≥7	663(41.44)	112(77.24)	551(37.87)		
<7	937(58.56)	33(22.76)	904(62.13)		
入 ICU 前住院时间(d)				1.38	0.241
≥7	316(19.75)	34(23.45)	282(19.38)		
<7	1 284(80.25)	111(76.55)	1 173(80.62)		
总住院时间(d)				5.88	0.015
≥10	1 371(85.69)	134(92.41)	1 237(85.02)		
<10	229(14.31)	11(7.59)	218(14.98)		
BMI(kg/m^2)				2.25	0.112
≥24	378(23.63)	42(28.97)	336(23.09)		
<24	1 222(76.37)	103(71.03)	1 119(76.91)		
入 ICU 时 APACHE Ⅱ评分(分)				2.70	0.101
≥20	1 201(75.06)	117(80.69)	1 084(74.50)		
<20	399(24.94)	28(19.31)	371(25.50)		
高血压				2.08	0.149
有	375(23.44)	41(28.28)	334(22.96)		
无	1 225(76.56)	104(71.72)	1 121(77.04)		
糖尿病				12.16	0.001
有	140(8.75)	24(16.55)	116(7.97)		
无	1 460(91.25)	121(83.45)	1 339(92.03)		
使用蛋白或蛋白类药物				74.92	<0.001
有	286(17.88)	64(44.14)	222(15.26)		
无	1 314(82.12)	81(55.86)	1 233(84.74)		
心脏病				2.13	0.145
有	155(9.69)	19(13.10)	136(9.35)		
无	1 445(90.31)	126(86.90)	1 319(90.65)		
存在恶性肿瘤				1.23	0.268
有	87(5.44)	5(3.45)	82(5.64)		
无	1 513(94.56)	140(96.55)	1 373(94.36)		
颅脑损伤				20.10	<0.001
有	191(11.94)	34(23.45)	157(10.79)		
无	1 409(88.06)	111(76.55)	1 298(89.21)		
贫血				79.72	<0.001
是	170(10.63)	47(32.41)	123(8.45)		
否	1 430(89.37)	98(67.59)	1 332(91.55)		

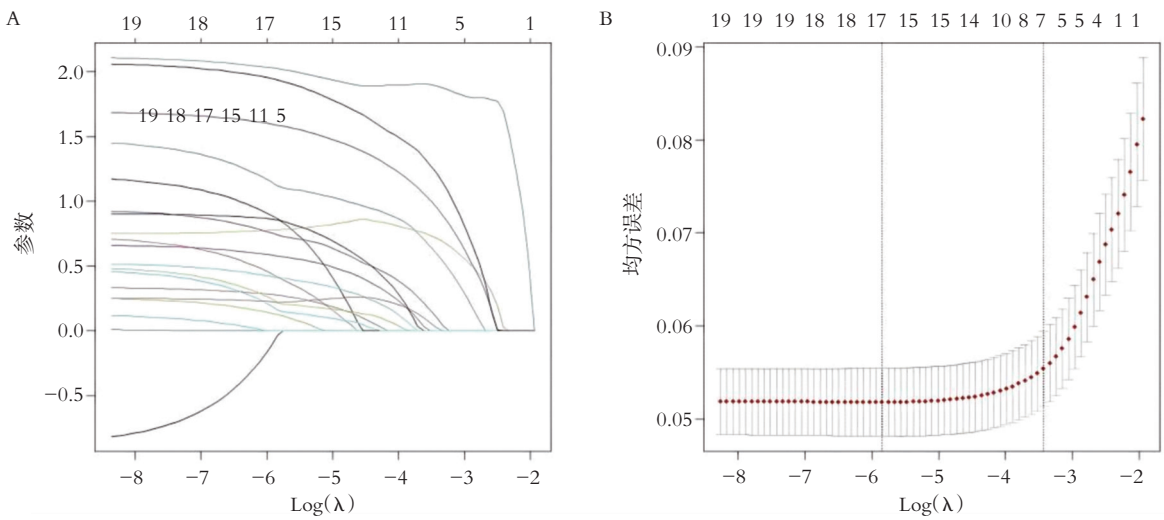
续表 2　（Table 2，Continued）

变量	全部（n = 1 600）	感染组（n = 145）	非感染组（n = 1 455）	χ^2	P
血液或腹膜透析				-	0.013*
是	36(2.25)	8(5.52)	28(1.92)		
否	1 564(97.75)	137(94.48)	1 427(98.08)		
发热				48.13	<0.001
是	516(32.25)	84(57.93)	432(29.69)		
否	1 084(67.75)	61(42.07)	1 023(70.31)		
使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂				282.63	<0.001
是	85(5.31)	51(35.17)	34(2.34)		
否	1 515(94.69)	94(64.83)	1 421(97.66)		
低蛋白血症				402.59	<0.001
是	84(5.25)	59(40.69)	25(1.72)		
否	1 516(94.75)	86(59.31)	1 430(98.28)		
CRAB 感染前抗菌药物使用时间(d)				84.58	<0.001
≥7	819(51.19)	127(87.59)	692(47.56)		
<7	781(48.81)	18(12.41)	763(52.44)		
CRAB 感染前抗菌药物联合用药(联)				-	<0.001*
≥2	43(2.69)	24(16.55)	19(1.31)		
<2	1 557(97.31)	121(83.45)	1 436(98.69)		
手术次数(次)				-	<0.001*
≥2	24(1.50)	11(7.59)	13(0.90)		
<2	1 576(98.50)	134(92.41)	1 442(99.10)		
留置鼻胃管				136.14	<0.001
是	57(3.56)	30(20.69)	27(1.86)		
否	1 543(96.44)	115(79.31)	1 428(98.14)		
留置导尿管日数(d)				96.44	<0.001
≥7	758(47.38)	125(86.21)	633(43.51)		
<7	842(52.62)	20(13.79)	822(56.49)		
呼吸机使用日数(d)				147.86	<0.001
≥7	484(30.25)	108(74.48)	376(25.84)		
<7	1 116(69.75)	37(25.52)	1 079(74.16)		
静脉置管日数(d)				63.62	<0.001
≥7	120(7.50)	35(24.14)	85(5.84)		
<7	1 480(92.50)	110(75.86)	1 370(94.16)		
CRAB 感染前既往感染				179.95	<0.001
无	1 090(68.12)	27(18.62)	1 063(73.06)		
有	510(31.88)	118(81.38)	392(26.94)		
CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素				-	<0.001*
是	32(2.00)	24(16.55)	8(0.55)		
否	1 568(98.00)	121(83.45)	1 447(99.45)		

注：- 表示无数值，* 表示采用 Fisher 确切概率法，BMI 为身体质量指数。

2.3　CRAB 感染 Lasso 回归和多因素 logistic 回归分析　将单因素分析中有统计学意义的因素作为自变量，ICU 患者是否发生 CRAB 感染作为因变量，进行 Lasso 回归分析筛选变量。随着惩罚系数 λ 越来越大，筛选变量的惩罚力度也越大，进入模型的自变量减少，模型选择主变量的能力会增强，见图 1A。通过 K 折交叉验证，选择最佳 λ 值，本研究折叠次数 K 等于 10，见图 1B。图 1B 中两条虚线代表两个特殊 λ 值，左侧 lambda.min，代表在该 λ 取值下，模型拟合效果最好；右侧 lambda.1se，代表在该 λ 取值下，模型拟合效果良好，同时纳入的变量最少，模型更简单。本研究选择 lambda.1se（λ = 0.032）为模型最优，既保证了模型的拟合度，又得到最精简的变量，见图 1B。本研究选择 λ = 0.032 时为最优模型，此时 Lasso 回归模型纳入的自变量为使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂、低蛋白血症、留置鼻胃管、CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联、呼吸机使用日数≥7 d、CRAB 感染前有既往感染、CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素。

进一步将 Lasso 回归筛选出的 7 个变量纳入多因素 logistic 分析（向后逐步回归分析），结果显示当 AIC 值最小为 579.32 时，预测模型的拟合度和预测效果最好，此时纳入的变量组合是：使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂、低蛋白血症、CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联、呼吸机使用日数≥7 d、CRAB 感染前有既往感染、CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素，同时排除了“留置鼻胃管”变量。见表 3。



注：A 为变量筛选路径图，B 为交叉验证曲线。

图 1　ICU 患者 CRAB 感染 Lasso 回归变量筛选

Figure 1　Variable selection by lasso regression for CRAB infection in ICU patients

表 3　ICU 患者 CRAB 感染的 Lasso 筛选后的多因素 logistic 回归分析

Table 3　Multivariate logistic regression analysis of Lasso-selected variables of CRAB infection in ICU patients

变量	β	S_b	Z	P	OR	95%CI
使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂	1.167	0.371	3.149	0.002	3.21	1.55～6.65
低蛋白血症	2.322	0.352	6.605	<0.001	10.20	5.12～20.34
CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联	0.937	0.478	1.961	0.049	2.55	0.99～6.51
呼吸机使用日数≥7 d	1.407	0.239	5.897	<0.001	4.09	2.56～6.53
CRAB 感染前有既往感染	1.843	0.259	7.116	<0.001	6.31	3.80～10.49
CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素	2.296	0.516	4.449	<0.001	9.93	3.61～27.31
常数项	−4.636	0.261	−17.782	<0.001	0.01	0.01～0.02

2.4　CRAB 感染的 nomogram 风险模型构建　根据多因素 logistic 回归分析结果，建立风险预测模型 ICU 患者 CRAB 感染的预测模型：Logit（CRAB 感染概率）= −4.636 + 1.167 × 使用糖皮质激素类

药物或免疫抑制剂 + 2.322×低蛋白血症 + 0.937×CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联 + 1.407×呼吸机使用日数≥7 d + 1.843×CRAB 感染前有既往感染 + 2.296×CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素。基于上述回归方程绘制列线图以直观展示 nomogram 模型结果，定量预测 ICU 患者发生 CRAB 感染的风险，见图 2。每个独立危险因素对应一个特定的评分，然后将各独立危险因素的单项得分相加获得相应总分，总分对应预测 ICU 患者 CRAB 感染发生的概率。

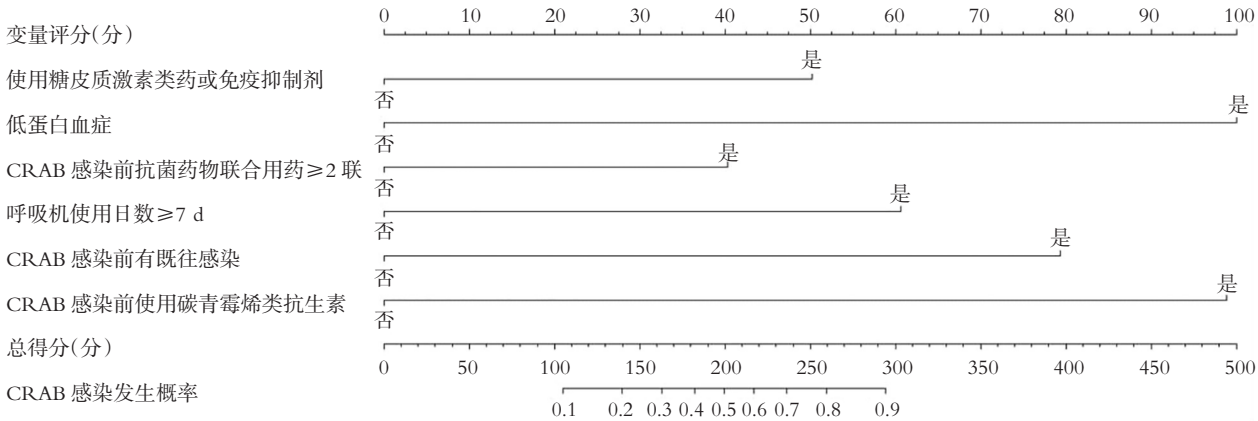
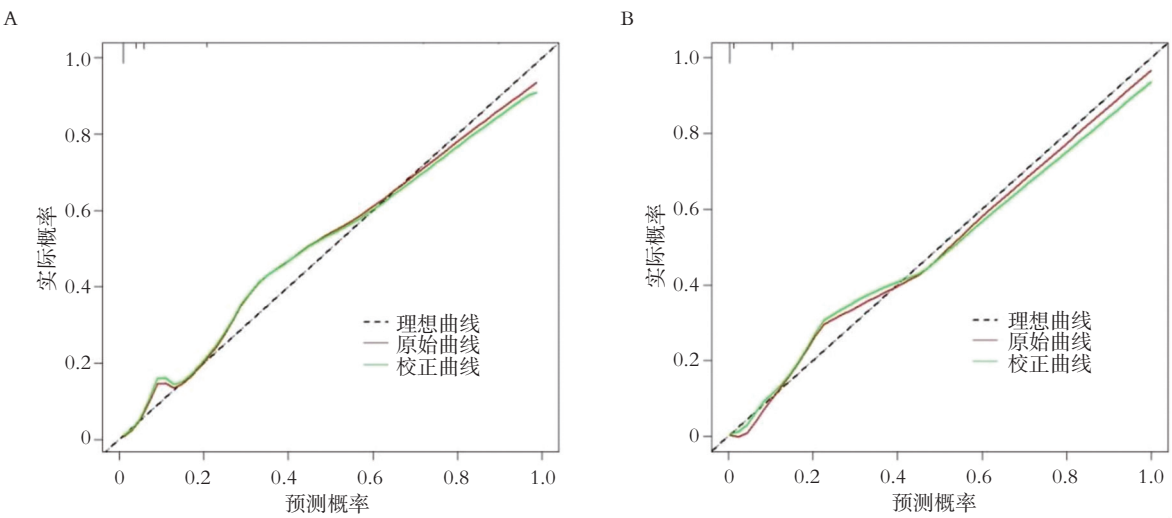


图 2　ICU 患者 CRAB 感染的 nomogram 风险模型构建

Figure 2　Construction of nomogram risk model for CRAB infection in ICU patients

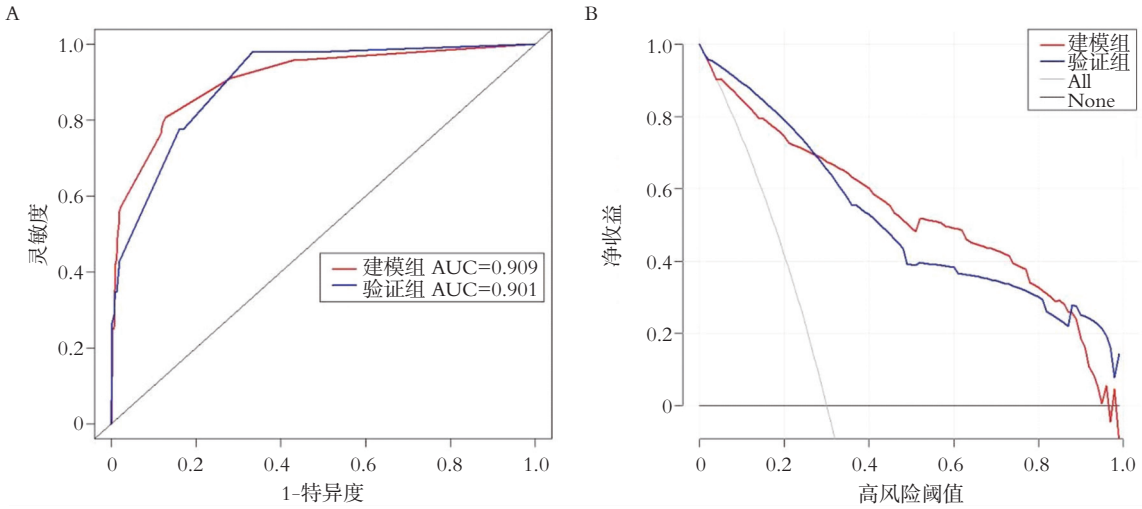
2.5　CRAB 感染 nomogram 风险模型的验证　使用 Hosmer-Lemeshow 方法对预测模型进行拟合优度检验，结果显示建模组（$\chi^2 = 1.968$，$P = 0.991$）、验证组（$\chi^2 = 8.127$，$P = 0.521$）两组均 $P > 0.05$，提示该 nomogram 预测模型具有较高的校准度。用 Bootstrap 重复抽样法对建模组和验证组进行内部验证，两组的校准曲线均趋近于理想曲线，见图 3，显示本模型的一致性尚可。同时，根据预测模型预测概率绘制 ROC 曲线，计算出建模组和验证组的 AUC 值分别为 0.909（95%*CI*：0.883～0.936）与 0.901（95%*CI*：0.862～0.939），最大约登指数分别为 0.678、0.647，灵敏度分别为 0.871、0.667，特异度分别为 0.807、0.980，提示模型具有良好的精准度和区分度，预测能力较强。DCA 显示使用该预测模型筛查能使患者在临床中获益。见图 4。



注：A 为建模组校准曲线，B 为验证组校准曲线。

图 3　Nomogram 模型预测 ICU 患者 CRAB 感染风险的校准曲线

Figure 3　Calibration curve of nomogram model for predicting the risk of CRAB infection in ICU patients



注：A 为 ROC 曲线，B 为 DCA 曲线。

图 4　Nomogram 模型预测 ICU 患者 CRAB 感染的 ROC 曲线和 DCA 曲线

Figure 4　ROC curve and DCA curve of nomogram model for predicting the risk of CRAB infection in ICU patients

3　讨论

CRAB 是重要的医院获得性病原菌，广泛存在于医院环境中，可在免疫力低下或重症患者中定植，引发肺炎、血流感染等严重感染，成为 ICU 内医院感染的主要威胁[17-19]。本研究 ICU 患者 CRAB 的感染发病率为 8.60%，与国内相关研究[20]结果一致。CRAB 引起的呼吸机相关肺炎（VAP）发生率呈逐年升高趋势[21]，鲍曼不动杆菌相关 VAP 的病死率可达 45%～70%[22]。与碳青霉烯类敏感鲍曼不动杆菌相比，CRAB 感染患者的疾病负担显著升高，治疗失败率和死亡风险较高[23]。因此，研究 ICU 患者 CRAB 感染的危险因素，建立直观有效的感染预测模型，是预防 CRAB 感染和暴发的重要手段。

本研究通过单因素分析和 Lasso 回归筛选变量、再经多因素回归建模，最终构建包含 6 个独立危险因素的 ICU 患者 CRAB 感染预测模型。糖皮质激素类药物或免疫抑制剂的使用会增加 ICU 患者 CRAB 感染发病率，其机制在于糖皮质激素类药物或免疫抑制剂可全面抑制中性粒细胞、巨噬细胞及淋巴细胞介导的免疫防御功能，降低患者免疫力，且往往掩盖感染迹象，从而为 CRAB 感染构造了完整的免疫病理基础。此外，免疫抑制剂与糖皮质激素类药物的使用是鲍曼不动杆菌感染产生耐药性的独立危险因素[24]。国内相关 Meta 分析研究显示，使用糖皮质激素和免疫抑制剂可增加 CRAB 患者的死亡风险[25]。低蛋白血症患者免疫功能受损，病原清除能力下降；同时，低蛋白血症所致的组织水肿与微循环障碍为 CRAB 提供了有利的定植微环境，本研究中，低蛋白血症患者感染 CRAB 的发生率是非低蛋白血症患者的 10.20 倍，与既往研究[26-27]结果一致。抗菌药物联合用药（≥2 联）增加了 CRAB 感染的风险，其机制在于抗菌药物在杀灭病原菌的同时，不可避免地破坏宿主正常的微生物群落，从而清除生态屏障，为 CRAB 的附着与增殖提供有利的定植空间。本研究发现，CRAB 感染前抗菌药物联合用药（≥2 联）的 ICU 患者 CRAB 感染发病率是未联合用药者的 2.55 倍（P = 0.049，OR = 2.55，95%CI：0.99～6.51）。采用 AIC 准则，纳入该变量时模型的临床预测性最佳。长时间多种抗菌药物联用、使用广谱抗菌药物与鲍曼不动杆菌产生耐药明显相关[28]。一方面，CRAB 易在呼吸机管路、湿化装置等设备表面定植并形成生物膜，为其入侵机体并繁殖致病创造了条件。另一方面，气管切开作为有创机械通气的必要操作，使患者呼吸道在一段时间内暴露于空气，增加了 CRAB 感染的风险[29]。CRAB 还容易在呼吸机管路、湿化装置等设备表面定植，为其入侵机体并繁殖致病创造了有利条件。本研究显示，呼吸机使用日数≥7 d 是 ICU 患者 CRAB 的危险因素，与国内相关 Meta 分析[30]结果保持一致。本研究中，CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素的 ICU 患者更易发生 CRAB 感染，与既往

研究[31]结果一致。鲍曼不动杆菌对碳青霉烯类抗生素耐药的机制包括产碳青霉烯酶、外膜蛋白表达改变、青霉素结合蛋白改变[32]。长期使用碳青霉烯类抗生素可抑制敏感菌株，导致原本敏感的鲍曼不动杆菌转为耐药。患者存在其他部位的感染（如肺部、泌尿系统、皮肤软组织感染等）时，继发 CRAB 感染的风险显著增高。此类患者普遍免疫功能低下，且常伴局部或全身性炎症反应，为 CRAB 的黏附、定植与侵袭创造了条件；同时，针对原发感染常采取碳青霉烯类、头孢菌素类等广谱抗菌药物进行经验性治疗，此类用药方案易诱导耐药菌株产生，进一步提升 CRAB 感染的可能性。

基于上述 6 项独立危险因素，本研究构建了 nomogram 模型，将多因素预测模型转换为可视化图形，通过累加各变量得分并计算总分，实现 ICU 患者 CRAB 感染风险的快速评估。拟合优度检验显示，建模组和验证组均 $P>0.05$，校准曲线与标准曲线接近，提示该模型预测概率与实际概率一致，拟合度较好；两组 AUC 值均＞0.9，灵敏度和特异度高，表明该模型在建模组和验证组中均具有较好的预测效能，适用于 ICU 患者 CRAB 感染的风险识别，有助于及时发现高危群体并优先采取预防措施，提升临床管理的时效性与精准性。建模组及验证组的 DCA 曲线表明该模型具有较高的临床获益性，可用于筛选高危患者并指导预防干预。

综上所述，本研究基于 Lasso 回归构建了 ICU 患者 CRAB 感染的风险预测模型，确定了使用糖皮质激素类药物或免疫抑制剂、低蛋白血症、CRAB 感染前抗菌药物联合用药≥2 联、呼吸机使用日数≥7 d、CRAB 感染前存在既往感染、CRAB 感染前使用碳青霉烯类抗生素为其独立危险因素。经内部验证，该模型具有较好的一致性及预测效能，可用于指导临床个体化风险评估。但本研究对象为单中心、回顾性病历资料分析，缺乏外部验证，外推性受限。

作者贡献声明：先疆燕确定研究主题，设计研究方案，收集病例数据，进行数据整理和统计分析，撰写论文；李多参与课题研讨，对研究结果、文章讨论部分提出建设性修改意见；邬勋莲参与课题研讨，绘制表格，修正文章语句与格式；甘昌玉确定研究方案，收集病例数据，文稿审阅与修改。

利益冲突：所有作者均声明不存在利益冲突。

[参 考 文 献]

[1] 周华，周建英，俞云松. 中国鲍曼不动杆菌感染诊治与防控专家共识解读[J]. 中国循证医学杂志，2016，16(1)：26－29.
Zhou H，Zhou JY，Yu YS. The interpretation of Chinese expert consensus for the diagnosis，treatment，prevention and control of *Acinetobacter baumannii* infection[J]. Chinese Journal of Evidence-Based Medicine，2016，16(1)：26－29.

[2] Ayobami O，Willrich N，Harder T，et al. The incidence and prevalence of hospital-acquired (carbapenem-resistant) *Acinetobacter baumannii* in Europe，Eastern Mediterranean and Africa：a systematic review and meta-analysis[J]. Emerg Microbes Infect，2019，8(1)：1747－1759.

[3] 郭燕，胡付品，朱德妹，等. 2022 年 CHINET 三级医院细菌耐药监测[J]. 中国感染与化疗杂志，2024，24(3)：277－286.
Guo Y，Hu FP，Zhu DM，et al. Surveillance of bacterial resistance in tertiary hospitals across China：results of CHINET Antimicrobial Resistance Surveillance Program in 2022[J]. Chinese Journal of Infection and Chemotherapy，2024，24(3)：277－286.

[4] Sarshar M，Behzadi P，Scribano D，et al. *Acinetobacter baumannii*：an ancient commensal with weapons of a pathogen[J]. Pathogens，2021，10(4)：387.

[5] Whiteway C，Breine A，Philippe C，et al. *Acinetobacter baumannii*[J]. Trends Microbiol，2022，30(2)：199－200.

[6] Tamma PD，Aitken SL，Bonomo RA，et al. Infectious Diseases Society of America guidance on the treatment of AmpC β-lactamase-producing *Enterobacterales*，carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*，and *Stenotrophomonas maltophilia* infections[J]. Clin Infect Dis，2022，74(12)：2089－2114.

[7] Liu CC，Chen KC，Wu YC，et al. Epidemiological and genetic characteristics of clinical carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* strains collected countrywide from hospital intensive care units (ICUs) in China[J]. Emerg Microbes Infect，2022，11(1)：1730－1741.

[8] Tacconelli E，Carrara E，Savoldi A，et al. Discovery，research，and development of new antibiotics：the WHO priority list of antibiotic-resistant bacteria and tuberculosis[J]. Lancet Infect Dis，2018，18(3)：318－327.

[9] CHINETS. 鲍曼不动杆菌对亚胺培南和美罗培南的耐药变迁[EB/OL]. [2026－04－30]. https://www.chinets.com/Data/GermYear.
CHINETS. Changes in drug resistance of *Acinetobacter baumannii* to imipenem and meropenem[EB/OL]. [2026－04－30]. https://www.chinets.com/Data/GermYear.

[10] 全国细菌耐药监测网. 2021 年全国细菌耐药监测网重症监护病房临床分离细菌耐药监测报告[J]. 中华医院感染学杂志，2023，33(22)：3370－3379.
China Antimicrobial Resistance Surveillance System. Antimicrobial resistance surveillance reports from intensive care units from China Antimicrobial Resistance Surveillance System in

2021[J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2023, 33(22): 3370－3379.

[11] Fitzpatrick MA, Suda KJ, Poggensee L, et al. Epidemiology and clinical outcomes associated with extensively drug-resistant (XDR) *Acinetobacter* in US Veterans' Affairs (VA) medical centers[J]. Infect Control Hosp Epidemiol, 2021, 42(3): 305－310.

[12] Pogue JM, Zhou Y, Kanakamedala H, et al. Burden of illness in carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infections in US hospitals between 2014 and 2019[J]. BMC Infect Dis, 2022, 22(1): 36.

[13] 郭磊磊，秦红英，张尚书，等. 骨科创伤患者术后多重耐药菌感染风险 Nomogram 模型构建与验证[J]. 中国感染控制杂志，2022，21(6)：584－591.
Guo LL, Qin HY, Zhang SS, et al. Establishment and validation of nomogram model for the risk of multidrug-resistant organism infection in patients after orthopedic trauma surgery [J]. Chinese Journal of Infection Control, 2022, 21(6): 584－591.

[14] 邓茵茵，陈冰冰，洪雅芳，等. 神经外科颅脑术后 SSI 危险因素及 Nomogram 预测模型的建立与验证[J]. 中华医院感染学杂志，2025，35(17)：2630－2635.
Deng YY, Chen BB, Hong YF, et al. Risk factors for postoperative SSI in neurosurgery department patients undergoing craniocerebral surgeries, establishment of nomogram prediction model and its verification[J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2025, 35(17): 2630－2635.

[15] 黄勋，邓子德，倪语星，等. 多重耐药菌医院感染预防与控制中国专家共识[J]. 中国感染控制杂志，2015，14(1)：1－9.
Huang X, Deng ZD, Ni YX, et al. Chinese experts' consensus on prevention and control of multidrug resistance organism healthcare-associated infection[J]. Chinese Journal of Infection Control, 2015, 14(1): 1－9.

[16] 武松. 预测模型实战：基于 R、SPSS 和 Stata[M]. 北京：清华大学出版社，2023.
Wu S. Predictive model practice with R, SPSS and Stata[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2023.

[17] Wong D, Nielsen TB, Bonomo RA, et al. Clinical and pathophysiological overview of *Acinetobacter* infections: a century of challenges[J]. Clin Microbiol Rev, 2017, 30(1): 409－447.

[18] 朱宇，汪洋，郝敏侠，等. 某医院 ICU 病房内耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌感染/定植患者环境污染调查[J]. 交通医学，2025，39(1)：97－100，103.
Zhu Y, Wang Y, Hao MX, et al. Investigation of environmental contamination in patients with carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infection/colonization in the ICU of a hospital[J]. Medical Journal of Communications, 2025, 39(1): 97－100, 103.

[19] 黄钰亮，田靓，马晓芸，等. 重症监护病房鲍曼不动杆菌感染患者周边环境污染情况调查[J]. 中国消毒学杂志，2020，37(8)：601－603，607.
Huang YL, Tian L, Ma XY, et al. Investigation on pollution of surrounding environment of patients with *Acinetobacter baumannii* infection in intensive care unit[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2020, 37(8): 601－603, 607.

[20] 梁继仁，杨惠英，刘银梅，等. 重症监护病房耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌感染危险因素分析[J]. 中国消毒学杂志，2019，36(9)：668－670.
Liang JR, Yang HY, Liu YM, et al. Analysis of risk factors for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infection in intensive care unit[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2019, 36(9): 668－670.

[21] 冯清，贺培凤. 基于随机森林模型的耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌性呼吸机相关性肺炎风险预测模型的构建[J]. 护理研究，2024，38(19)：3410－3416.
Feng Q, He PF. Construction of a risk prediction model for ventilator-associated pneumonia caused by carbapenem resistant *Acinetobacter baumannii* based on random forest model [J]. Chinese Nursing Research, 2024, 38(19): 3410－3416.

[22] Najafabadi MK, Soltani R. Carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* and ventilator-associated pneumonia: epidemiology, risk factors, and current therapeutic approaches[J]. J Res Pharm Pract, 2024, 13(2): 33－40.

[23] 林佩贤，李伟佳，许斐斐，等. 基于 Prophet 等时间序列模型的耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌检出预测及评价[J]. 中华医院感染学杂志，2025，35(24)：3779－3784.
Lin PX, Li WJ, Xu FF, et al. Prediction and evaluation of carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* detection based on Prophet and other time series models[J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2025, 35(24): 3779－3784.

[24] 栾晶晶，方辉，孙旭芳. 鲍曼不动杆菌耐药性监测及其影响因素[J]. 中国药物应用与监测，2025，22(4)：728－732.
Luan JJ, Fang H, Sun XF. Drug resistance monitoring of *Acinetobacter baumannii* and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Drug Application and Monitoring, 2025, 22(4): 728－732.

[25] 李娜，唐志红，田永明. 耐碳青霉烯鲍曼不动杆菌医院感染预后相关危险因素的 Meta 分析[J]. 安徽医药，2020，24(10)：1920－1926.
Li N, Tang ZH, Tian YM. Meta-analysis of the prognosis risk factors for nosocomial infection in carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*[J]. Anhui Medical and Pharmaceutical Journal, 2020, 24(10): 1920－1926.

[26] 姜凤丽，董亚琳，刘冬，等. ICU 耐碳青霉烯类抗菌药物鲍曼不动杆菌肺部感染危险因素分析[J]. 中国药房，2015，26(29)：4077－4079.
Jiang FL, Dong YL, Liu D, et al. Analysis of risk factors for lung infection of CRAB in ICU[J]. China Pharmacy, 2015, 26(29): 4077－4079.

[27] 崔欣雨，田芳英，王鸿伟，等. 耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌血流感染危险因素的 Meta 分析[J]. 中华医院感染学杂志，2025，35(8)：1193－1199.
Cui XY, Tian FY, Wang HW, et al. Meta-analysis of risk factors for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*

bloodstream infections[J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2025, 35(8): 1193 - 1199.

[28] 李娜，唐志红，田永明. 2010—2018 年某医院重症监护病房老年病人耐碳青霉烯鲍曼不动杆菌血流感染危险因素及预后分析[J]. 安徽医药，2020，24(5)：903 - 907.
Li N, Tang ZH, Tian YM. Risk factors and prognosis of ICU elderly patients with carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* bloodstream infection in a hospital from 2010 to 2018[J]. Anhui Medical and Pharmaceutical Journal, 2020, 24(5): 903 - 907.

[29] 吴迪，魏铭，曾韡，等. ICU 呼吸机相关性肺炎患者耐碳青霉烯鲍氏不动杆菌感染的危险因素及其耐药基因[J]. 中华医院感染学杂志，2024，34(1)：23 - 27.
Wu D, Wei M, Zeng W, et al. Risk factors for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infection in ICU patients with ventilator-associated pneumonia and drug resistance genes [J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2024, 34(1): 23 - 27.

[30] 左蝶，赵佳，李萍. ICU 患者耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌感染危险因素的 Meta 分析[J]. 海南医学，2024，35(10)：1471 - 1482.
Zuo D, Zhao J, Li P. Risk factors for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infection in ICU patients: a meta-analysis[J]. Hainan Medical Journal, 2024, 35(10): 1471 - 1482.

[31] 贾辰，高岩，解夕黎，等. 基于 5 种机器学习算法构建 ICU 患者耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌感染风险预测模型[J]. 中华医院感染学杂志，2025，35(17)：2586 - 2591.
Jia C, Gao Y, Xie XL, et al. Risk prediction models for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infection in ICU patients established based on 5 types of machine learning algorithms[J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2025, 35(17): 2586 - 2591.

[32] 王珏鑫，余广超，温旺荣. 鲍曼不动杆菌对碳青霉烯类抗菌药物耐药机制研究进展[J]. 中国抗生素杂志，2016，41(11)：824 - 828.
Wang JX, Yu GC, Wen WR. Research progress of resistance mechanisms to carbapenem in *Acinetobacter baumannii* [J]. Chinese Journal of Antibiotics, 2016, 41(11): 824 - 828.

（本文编辑：左双燕）

本文引用格式：先疆燕，李多，邬勋莲，等. ICU 患者耐碳青霉烯类鲍曼不动杆菌感染风险预测模型的构建与验证[J]. 中国感染控制杂志，2026，25(7)：1030 - 1041. DOI：10.12138/j.issn.1671 - 9638.20264287.

Cite this article as: XIAN Jiangyan, LI Duo, WU Xunlian, et al. Construction and validation of risk predicting model for carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* infection in ICU patients[J]. Chin J Infect Control, 2026, 25(7): 1030 - 1041. DOI: 10.12138/j.issn.1671 - 9638.20264287.