

• 临床研究 Clinical research •

基于机器学习构建锁骨下动脉支架植入术后再狭窄的风险预测模型

李 鹏, 王亚杰, 范昆鹏

【摘要】 目的 基于锁骨下动脉支架(subclavian artery stenting, SAS)植入患者的临床资料建立机器学习模型,用于预测支架内再狭窄(in-stent restenosis, ISR)的风险。**方法** 回顾性分析 2018 年 1 月至 2023 年 3 月在河南科技大学第一附属医院住院的 SAS 植入患者 212 例。根据术后 1 年内患者是否发生 ISR 分为 ISR 组和非 ISR 组。将数据集按照 7:3 随机分为训练集(148 例,建模)和测试集(64 例,验证)。对训练集中变量进行单因素、多因素 logistic 回归分析,筛选出 SAS 植入患者 ISR 的独立预测因素,并建立逻辑回归、K-最近邻、支持向量机、随机森林、决策树、反向传播神经网络和梯度提升机共 7 个机器学习模型。模型性能评估采用受试者工作特征曲线下面积(AUC)、敏感度、特异度、准确度、Brier 分数和校准图。**结果** 纳入的 212 例 SAS 植入患者中术后 1 年内发生 ISR 者 22 例(10.37%),训练集中多因素 logistic 回归分析显示慢性阻塞性肺疾病($OR = 6.43, 95\%CI: 1.60 \sim 25.82, P = 0.009$)、术前狭窄长度($OR = 4.04, 95\%CI: 1.18 \sim 13.90, P = 0.027$)、术前钙化斑块($OR = 3.79, 95\%CI: 1.01 \sim 14.23, P = 0.049$)和残余狭窄($OR = 28.67, 95\%CI: 2.02 \sim 406.61, P = 0.013$)是 ISR 的独立影响因素。在测试集中,逻辑回归、K-最近邻、支持向量机、随机森林、决策树、反向传播神经网络和梯度提升机模型的 AUC 均较高,分别为 0.929($95\%CI: 0.837 \sim 0.992$)、0.850($95\%CI: 0.484 \sim 1.000$)、0.962($95\%CI: 0.879 \sim 1.000$)、0.954($95\%CI: 0.889 \sim 1.000$)、0.925($95\%CI: 0.837 \sim 0.988$)、0.929($95\%CI: 0.837 \sim 0.992$)和 0.912($95\%CI: 0.816 \sim 0.988$);DeLong 检验显示各个模型之间预测效能差异无统计学意义(均 $P > 0.05$)。**结论** 机器学习模型预测 SAS 植入患者术后 ISR 效能较高,有助于临床医生识别高危 ISR 患者并及时做出临床决策。

【关键词】 机器学习;锁骨下动脉;支架内再狭窄;预测模型

中图分类号:R543.5 文献标志码:B 文章编号:1008-794X(2026)-009-1054-09

The establishment of a risk prediction model for in-stent restenosis after subclavian artery stenting based on machine learning LI Peng, WANG Yajie, FAN Kunpeng. Department of Medical Imaging, First Affiliated Hospital of Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan Province 471000, China

Corresponding author: FAN Kunpeng, E-mail: 316307068@qq.com

【Abstract】 Objective Based on the clinical data of patients receiving subclavian artery stenting (SAS) to establish a machine learning model used for predicting the risk of in-stent restenosis (ISR). **Methods** The clinical data of 212 patients, who received SAS at the First Affiliated Hospital of Henan University of Science and Technology of China from January 2018 to March 2023, were retrospectively analyzed. According to whether ISR occurred within one year after SAS, the patients were divided into ISR group and non-ISR group. The dataset was randomly divided into a training set ($n = 148$, used for modeling) and a testing set ($n = 64$, used for validation) at a ratio of 7:3. Univariate analysis and multivariate logistic regression analysis were performed on the training set to screen out the independent predictors of ISR in SAS patients, based on which the following seven machine learning models were established: logistic regression (LR), K-nearest neighbors (KNN), support vector machine (SVM),

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2026.09.015

作者单位: 471000 河南洛阳 河南科技大学第一附属医院影像科(李 鹏),神经内科(王亚杰、范昆鹏)

通信作者: 范昆鹏 E-mail: 316307068@qq.com

random forest (RF), decision tree (DT), backpropagation (BP) neural network, and gradient boosting machine (GBM). The area under the receiver operating characteristic curve (AUC), sensitivity, specificity, accuracy, Brier score, and calibration plots were used to evaluate the model performance.

Results Of the 212 patients receiving SAS, 22 (10.37%) developed ISR within one year after treatment. Multivariate logistic regression analysis revealed that in the training set the chronic obstructive pulmonary disease ($OR = 6.43$, 95% $CI: 1.60-25.82$, $P = 0.009$), preoperative stenosis length ($OR = 4.04$, 95% $CI: 1.18-13.90$, $P = 0.027$), preoperative calcified plaque ($OR = 3.79$, 95% $CI: 1.01-14.23$, $P = 0.049$), and residual stenosis ($OR = 28.67$, 95% $CI: 2.02-406.61$, $P = 0.013$) were the independent risk factors for ISR. In the testing set, the AUCs of LR, KNN, SVM, RF, DT, BP neural network, and GBM were 0.929 (95% $CI: 0.837-0.992$), 0.850 (95% $CI: 0.484-1.000$), 0.962 (95% $CI: 0.879-1.000$), 0.954 (95% $CI: 0.889-1.000$), 0.925 (95% $CI: 0.837-0.988$), 0.929 (95% $CI: 0.837-0.992$), and 0.912 (95% $CI: 0.816-0.988$), respectively, with a satisfactory predictive performance. DeLong's test showed that no significant differences in predictive efficacy existed between each other among the seven models (all $P > 0.05$). **Conclusion** Machine learning models exhibit high accuracy in predicting ISR risk in patients after receiving SAS. It is very useful for clinicians in identifying high-risk ISR patients and making timely clinical decisions.

【Key words】 machine learning; subclavian artery; in-stent restenosis; prediction model

支架植入术是临床治疗锁骨下动脉重度狭窄或闭塞的主要方法之一^[1]。然而,术后支架内再狭窄(in-stent restenosis, ISR)严重影响锁骨下动脉支架(subclavian artery stent, SAS)治疗的远期疗效^[2-3]。因此,探索并有效规避再狭窄危险因素是预防 ISR 的关键,对于改善预后具有重要意义。已有部分研究^[2,4-5]采用多因素 logistic 回归筛选出 SAS 植入患者 ISR 的危险因素,但评估 ISR 的风险预测模型鲜有报道,且国内外关于机器学习算法在 SAS 植入患者 ISR 风险预测中的优势仍缺乏证据。因此,本研究拟回顾性分析河南科技大学第一附属医院(下称“我院”)SAS 植入患者的临床资料,探讨术后 1 年内发生 ISR 的独立因素并建立机器学习预测模型,旨在为临床高风险 ISR 患者的早期干预和个性化治疗策略制订提供支持。

1 资料与方法

1.1 研究对象

选择 2018 年 1 月至 2023 年 3 月于入住我院行 SAS 植入的患者作为研究对象,最终纳入患者 212 例,其中男性 143 例、女性 69 例,年龄 48~90 岁,平均年龄(66.5 ± 12.7)岁。纳入标准:①年龄 18~90 岁;②经数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)证实为锁骨下动脉狭窄 $\geq 70\%$ 或闭塞的患者,且行 SAS 介入治疗;③SAS 术前、术后 1 年计算机断层扫描血管造影(computed tomography angiography, CTA)及临床资料完整。

排除标准:①患者合并主动脉夹层、放射性动脉炎、大动脉炎;②联合外科斑块切除、药物涂层球囊扩张等;③凝血功能异常,无法抗凝治疗;④严重肝、肾或心功能不全(NYHA III 或 IV 级)。本研究获我院医学伦理委员会批准(2025-03-B0106),患者免除知情同意。

1.2 DSA 及 SAS 植入方法

SAS 植入术由我院神经内科、血管外科和介入科医师完成。DSA 检测使用荷兰飞利浦公司的 Allura Xper FD20 或德国西门子公司 Artis zee floor 血管造影机执行。术中通过 Seldinger 技术穿刺股动脉,使 Advantx 用 5 F 猪尾导管顺行造影并植入支架,术后即刻 DSA 示支架内残余狭窄率 $\geq 30\%$ 为 SAS 残余狭窄^[6-7], $<30\%$ 为支架成功植入。

1.3 资料收集

通过分析国内外相关文献^[8-10]和咨询本研究小组,拟定 SAS 植入患者 ISR 风险预测模型的候选变量共 14 个。包括①一般情况:性别、年龄;②基础疾病相关情况:吸烟史、卒中史、合并糖尿病、合并高血压、合并冠心病、高脂血症、慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD);③影像学检查:术前狭窄侧别、术前狭窄长度($<2\text{ cm}$, $\geq 2\text{ cm}$)、术前钙化斑块、支架类型(覆膜支架、裸金属支架、球囊扩张式支架和自膨式支架)、残余狭窄。其中术前狭窄长度、术前钙化斑块(图 1)由 1 名经验丰富的影像学医师在 CTA 图像上评估和测量所得,CTA 使用的放射诊断仪器包括西门子

SOMATOM Definition Flash 128 层螺旋 CT、GE Revolution 256 排 CT, 扫描电压 100~120 kV, 管电流 250 mA。数据由 1 名经过培训的住院医师录入, 录入后随机抽取 10% 患者核对, 确保数据无误。

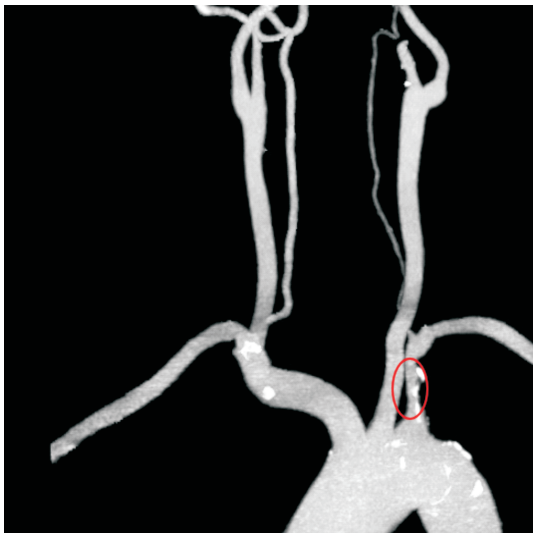


图 1 术前左侧锁骨下动脉狭窄伴钙化斑块

Figure 1 Preoperative left subclavian artery stenosis with calcified plaque

1.4 结局事件定义及分组

结局事件(ISR)定义为 SAS 植入术后 1 年内发生支架内径狭窄率 $\geq 50\%$ ^[2](经术后 DSA 或 CTA 诊断), 并根据术后 1 年内是否发生 ISR $\geq 50\%$ 分为 ISR 组和非 ISR 组。

1.5 自变量筛选及机器学习模型的建立

将研究对象以 7:3 比例随机分为训练集(148 例用于模型建立)和测试集(64 例用于模型验证), 在训练集中使用单因素、多因素 logistic 回归分析纳入指标, 确定 SAS 植入患者术后 1 年内发生 ISR 的独立预测因素并作为自变量纳入预测模型, 分别建立基于逻辑回归(logistic regression, LR)、K-最近邻(K-nearest neighbor, KNN)、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林(random forest, RF)、决策树(decision Tree, DT)、反向传播(back propagation, BP)神经网络和梯度提升机(gradient boosting machine, GBM)共 7 种机器学习算法的 ISR 预测模型。

1.6 阈值选择策略及预测时点

因数据自适应阈值需大量标注样本, 而本研究样本量有限, 故优先考虑通用阈值(0.5)。本研究所构模型的预测时点为 SAS 植入术后 24 h 内。

1.7 统计学方法

数据统计和分析采用 SPSS 26.0 版。正态分布

的计量资料表示为 $\bar{x} \pm s$, 组间比较采用独立样本 t 检验; 偏态分布的计量资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示, 组间比较采用非参数检验。计数资料以频数(n)或百分比(%)表示, 组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验。对指标进行单因素和多因素 logistic 回归分析以识别独立影响因素。应用基于 Python 3.9 的标准库模块(numpy、pandas、sklearn、matplotlib)进行数据处理、机器学习模型建立及结果可视化输出, 绘制受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic curve, ROC), 并计算曲线下面积(area under the curve, AUC)、敏感度、特异度、准确度和 Brier 分数来比较各模型的预测效能, 校准曲线评估各模型的校准度。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 训练集 SAS 植入患者术后 1 年内 ISR 发生的单因素分析

212 患者术后 1 年内发生 ISR 者 22 例(10.37%), 训练集 148 例患者中 ISR 组 13 例, 非 ISR 组 135 例, 单因素 logistic 回归分析显示年龄 ≥ 75 岁、合并糖尿病、COPD、术前狭窄长度 ≥ 2 cm、术前钙化斑块和残余狭窄是 ISR 的影响因素($P < 0.05$), 而性别、卒中史、合并高血压、吸烟史、高脂血症、合并冠心病、术前狭窄侧别和支架类型不影响 ISR 发生($P > 0.05$), 见表 1。

2.2 训练集 SAS 植入患者术后 1 年内并发 ISR 的多因素 logistic 回归分析

以单因素分析中有统计学意义的 6 个指标作为自变量, 以是否发生 ISR 为因变量, 结果显示 COPD(无 = 0, 有 = 1)、术前狭窄长度(< 2 cm = 0, ≥ 2 cm = 1)、术前钙化斑块(无 = 0, 有 = 1)、残余狭窄(无 = 0, 有 = 1)是 ISR 发生的独立影响因素, 见表 2。

2.3 机器学习预测模型性能比较

将基于多因素 logistic 回归分析筛选出的独立预测因素作为自变量纳入机器学习模型, 分别建立 LR、KNN、SVM、RF、DT、BP 神经网络模型和 GBM 机器学习模型, ROC 曲线结果见图 2; 图 3 为精确率-召回率曲线, 图 4 为测试集中 7 个模型的混淆矩阵热力图, 7 种模型在训练集和测试集的灵敏度、特异度、准确度、精确率、F1 评分、阳性预测率、Kappa 值和 AUC(95%CI)见表 3, 7 种机器学习模型训练集和测试集的 AUC 值均 > 0.65 , 其中 SVM 模型在测试集中具有最高的 AUC[0.962(0.879~

表 1 训练集中 ISR 发生的单因素 logistic 回归分析

Table 1 Univariate logistic regression analysis of ISR occurrence in the training set

变量	单因素				
	β 值	SE 值	Z 值	P 值	OR(95%CI)
年龄(≥ 75 岁)					
否					1.00(reference)
是	2.03	0.62	3.28	0.001	7.63(2.27~25.65)
性别					
女					1.00(reference)
男	0.8	0.66	1.21	0.227	2.22(0.61~8.11)
吸烟史					
无					1.00(reference)
有	0.75	0.6	1.26	0.208	2.12(0.66~6.80)
卒中史					
无					1.00(reference)
有	0.52	0.83	0.63	0.53	1.68(0.33~8.48)
合并高血压					
无					1.00(reference)
有	0.22	0.5	0.43	0.668	1.24(0.46~3.33)
合并糖尿病					
无					1.00(reference)
有	1.11	0.51	2.16	0.031	3.03(1.11~8.26)
高脂血症					
无					1.00(reference)
有	0.74	0.51	1.46	0.145	2.10(0.78~5.66)
合并冠心病					
无					1.00(reference)
有	0.21	0.81	0.26	0.799	1.23(0.25~6.00)
COPD					
无					1.00(reference)
有	2.06	0.56	3.66	<0.001	7.87(2.61~23.71)
术前狭窄侧别(左侧)					
右侧					1.00(reference)
左侧	-0.15	0.54	-0.29	0.773	0.86(0.30~2.45)
术前狭窄长度					
<2 cm					1.00(reference)
≥ 2 cm	1.94	0.54	3.58	<0.001	6.97(2.41~20.17)
术前钙化斑块					
无					1.00(reference)
有	1.16	0.53	2.19	0.029	3.20(1.13~9.07)
支架类型					
球囊扩张式支架					1.00(reference)
覆膜支架	0.18	0.61	0.29	0.772	1.20(0.36~3.99)
自膨式支架	0.02	0.75	0.03	0.978	1.02(0.23~4.44)
裸金属支架	0.43	0.76	0.56	0.577	1.53(0.34~6.84)
残余狭窄					
无					1.00(reference)
有	2.55	0.95	2.68	0.007	12.80(1.98~82.84)

1.000)], DeLong 检验显示各个模型之间预测效能差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。图 5 是测试集中基于 SVM 模型的特征重要性分析,其中术前狭窄长度对模型判断 ISR 具有最高的贡献。

3 讨论

ISR 是影响 SAS 植入患者预后的重要原因之

一。本研究中 SAS 植入患者术后 1 年内 ISR 的发生率为 10.37%(22/212),较以往报道^[2,11]比例降低,可能与近年来医生介入手术水平和 ISR 重视程度提高有关。目前 ISR 的病因及发病机制尚不清楚,但普遍认为是多因素综合作用的结果^[12-13]。本研究单因素及多因素 logistic 回归分析显示, COPD、术前狭窄长度、术前钙化斑块和残余狭窄是患者 ISR 的独立影响因素。

COPD 患者常伴有慢性炎症反应和氧化应激,这不仅损害血管内皮细胞,还促进动脉粥样硬化进展;此外, COPD 患者的呼吸功能受限,可能导致术后运动量减少和血液循环不畅,进一步增加血管重塑和再狭窄的风险^[14]。王煜杰等^[5]的研究结果显示 COPD 是 SAS 植入患者术后 ISR 的独立危险因素,本研究结果与之相似。因此,建议 COPD 患者术前行全面的肺功能评估,术后加强呼吸康复训练和抗炎治疗,以减轻炎症反应,保护血管内皮功能,从而降低 ISR 发生率。

本研究结果显示训练集中术前狭窄长度 ≥ 2 cm 与 ISR 发生明显相关,原因可能是:较大动脉狭窄范围增加了手术难度,可能加剧支架植入后的血流动力学变化,同时较长狭窄区域常伴随更复杂的管壁结构走形和更显著的钙化斑块,这些因素共同作用,增加了支架内血栓形成和 ISR 的可能性^[15]。因此,对于术前狭窄长度较长的患者,临床应考虑采用更为先进和适应性强的支架材料,并优化植入技术,如使用药物涂层支架,以增强血管内壁的稳定性,减少再狭窄的风险。

术前钙化斑块增加 ISR 风险主要归因于钙化斑块对支架植入过程的复杂影响。钙化斑块区域动脉壁较为僵硬和脆弱,支架植入过程中难以完全贴合血管壁,这可能造成支架扩张不良、支架错位或支架断裂,降低支架功能,同时导致支架内血流紊乱,增加血栓形成风险^[16]。且钙化斑块还可能引起支架内应力集中,促进血管平滑肌细胞增殖和迁移,导致 ISR^[17],这提示在术前筛查钙化斑块可能有助于患者选择个性化治疗方案,并在术后加强抗血小板治疗和定期随访,以提高长期疗效。

王力力等^[2]和 Schillinger 等^[18]研究结果显示残余狭窄是 SAS 植入后 ISR 的独立危险因素,本研究结果也证实这一点。残余狭窄局部存在血流紊乱和高血流剪切应力,且支架对血管壁的刺激或加速血管平滑肌细胞增殖,从而促进 ISR 发生^[19]。此外,残余狭窄局部更易生成血栓,进一步加剧血管狭

表 2 训练集中 ISR 的多因素 logistic 回归分析

Table 2 Multivariate logistic regression analysis of ISR in the training set

变量	β 值	SE 值	Z 值	P 值	OR(95%CI)
常量	-4.44	0.76	-5.81	<0.001	0.01(0.00~0.05)
年龄(≥ 75 岁)	1.17	0.85	1.38	0.167	3.22(0.61~16.93)
合并糖尿病(是)	0.83	0.68	1.22	0.221	2.29(0.61~8.61)
COPD(有)	1.86	0.71	2.62	0.009	6.43(1.60~25.82)
术前狭窄长度(≥ 2 cm)	1.40	0.63	2.22	0.027	4.04(1.18~13.90)
术前钙化斑块(有)	1.33	0.68	1.97	0.049	3.79(1.01~14.23)
残余狭窄	3.36	1.35	2.48	0.013	28.67(2.02~406.61)

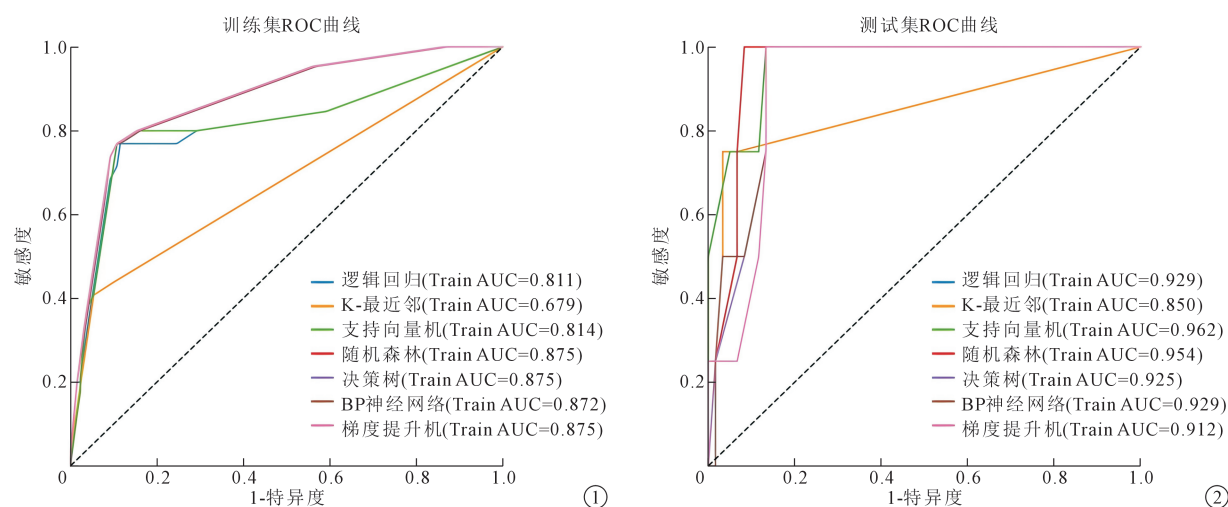
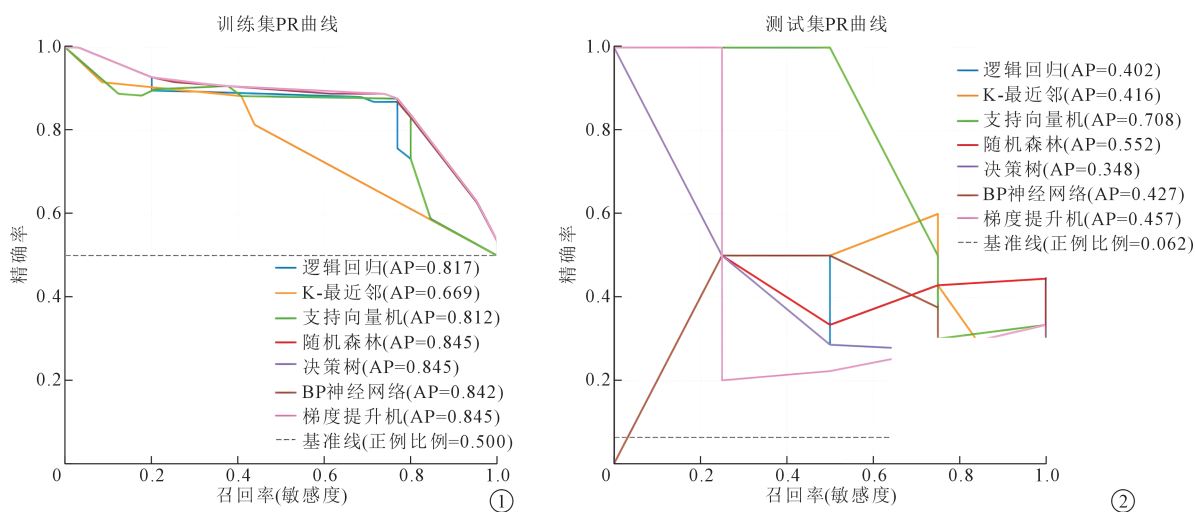


图 2 训练集(①)与测试集(②)中 7 种机器学习模型对 SAS 植入患者术后 1 年内并发 ISR 预测的 ROC 曲线

Figure 2 ROC curves for predicting ISR within one year after SAS implantation using seven machine learning models in the training set (①) and the test set (②)



图中 AP 为平均精确率, 值越大代表模型的精确率和召回率综合性能越好

In the figure, AP stands for Average Precision. A higher AP value indicates better overall performance of the model in terms of both precision and recall

图 3 7 种机器学习模型在训练集(①)和测试集(②)中的精确率-召回率曲线

Figure 3 Precision-Recall curves for seven machine learning models in the training set (①) and the test set (②)

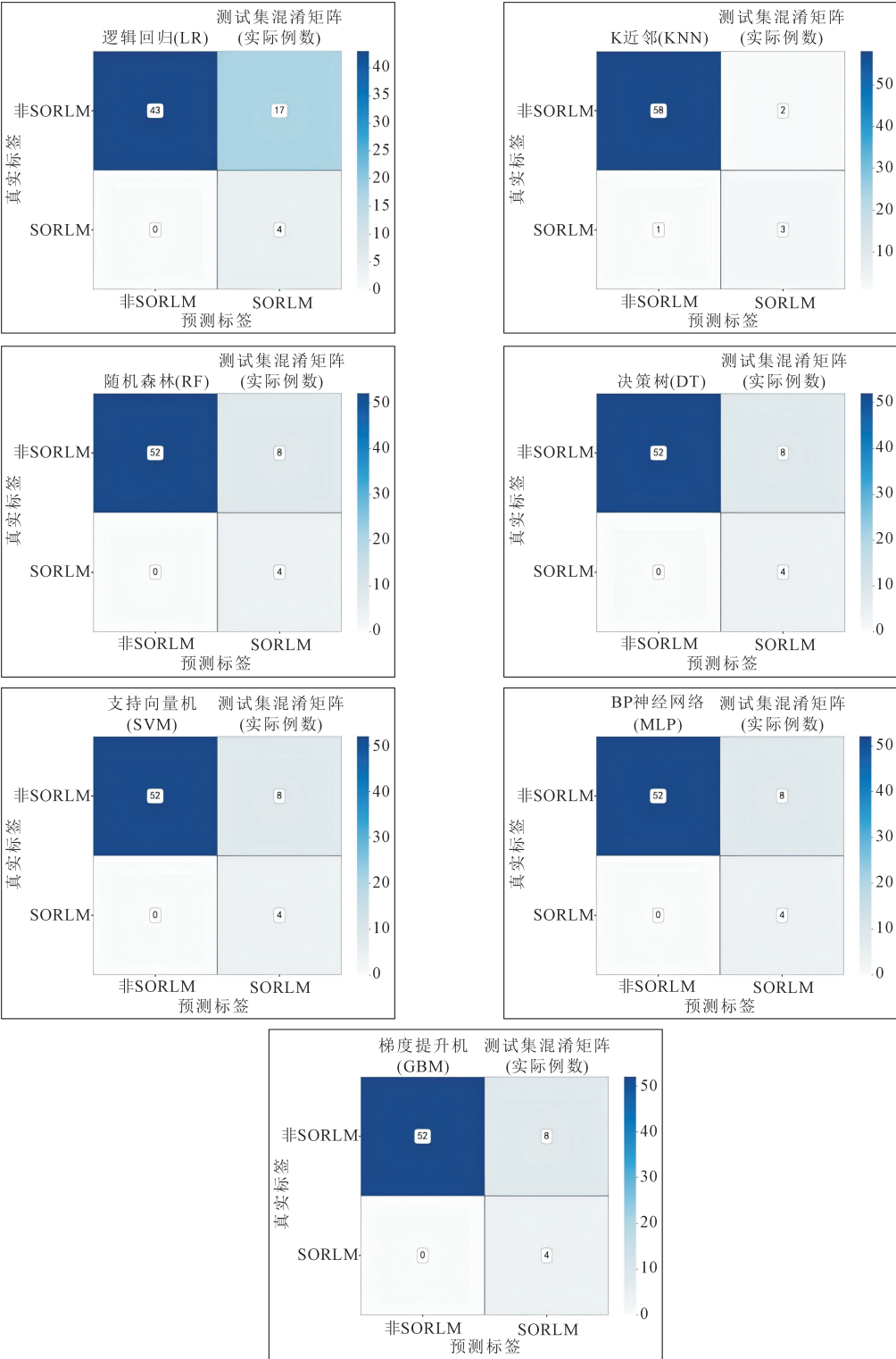


图 4 测试集中 7 个模型的混淆矩阵热力图

Figure 4 Confusion matrix heatmaps for the seven models in the test set

表 3 7 种机器学习模型在不同数据集中对 SAS 植入患者术后 1 年内并发 ISR 的预测效能

Table 3 Predictive performance of seven machine learning models for postoperative ISR within one year in sas implantation patients across different datasets

模型	数据集	敏感度	特异度	准确度	AUC	95%CI
LR	训练集	0.769	0.754	0.762	0.811	0.753~0.863
LR	测试集	1.000	0.717	0.734	0.929	0.837~0.992
KNN	训练集	0.408	0.946	0.677	0.679	0.625~0.729
KNN	测试集	0.750	0.967	0.953	0.850	0.484~1.000
SVM	训练集	0.769	0.892	0.831	0.814	0.751~0.864
SVM	测试集	1.000	0.867	0.875	0.962	0.879~1.000
RF	训练集	0.769	0.892	0.831	0.875	0.830~0.913
RF	测试集	1.000	0.917	0.922	0.954	0.889~1.000
DT	训练集	0.769	0.892	0.831	0.875	0.830~0.914
DT	测试集	1.000	0.867	0.875	0.925	0.837~0.988
BP 神经网络	训练集	0.769	0.892	0.831	0.872	0.828~0.911
BP 神经网络	测试集	1.000	0.867	0.875	0.929	0.837~0.992
GBM	训练集	0.769	0.892	0.831	0.875	0.830~0.914
GBM	测试集	1.000	0.867	0.875	0.912	0.816~0.988
模型	数据集	精确率	F1 评分	阳性预测率	Kappa 值	Brier 分数
LR	训练集	0.758	0.763	0.758	0.523	0.170
LR	测试集	0.190	0.320	0.190	0.240	0.171
KNN	训练集	0.883	0.558	0.883	0.354	0.330
KNN	测试集	0.600	0.667	0.600	0.642	0.046
SVM	训练集	0.877	0.820	0.877	0.662	0.140
SVM	测试集	0.333	0.500	0.333	0.448	0.109
RF	训练集	0.877	0.820	0.877	0.662	0.131
RF	测试集	0.444	0.615	0.444	0.579	0.105
DT	训练集	0.877	0.820	0.877	0.662	0.131
DT	测试集	0.333	0.500	0.333	0.448	0.137
BP 神经网络	训练集	0.877	0.820	0.877	0.662	0.133
BP 神经网络	测试集	0.333	0.500	0.333	0.448	0.133
GBM	训练集	0.877	0.820	0.877	0.662	0.131
GBM	测试集	0.333	0.500	0.333	0.448	0.192

表 4 7 个模型两两比较的 Delong 检验结果

Table 4 Pairwise delong test results comparing the seven models

模型 1	模型 2	Z 统计值	P 值	模型 1	模型 2	Z 统计值	P 值
逻辑回归	K-最近邻	0.084	0.933	支持向量机	随机森林	0.008	0.994
逻辑回归	支持向量机	0.035	0.972	支持向量机	决策树	0.034	0.973
逻辑回归	随机森林	0.023	0.982	支持向量机	BP 神经网络	0.030	0.976
逻辑回归	决策树	0.004	0.997	支持向量机	梯度提升机	0.046	0.964
逻辑回归	BP 神经网络	0.000	1.000	随机森林	决策树	0.024	0.981
逻辑回归	梯度提升机	0.015	0.988	随机森林	BP 神经网络	0.021	0.984
K-最近邻	支持向量机	0.120	0.905	随机森林	梯度提升机	0.035	0.973
K-最近邻	随机森林	0.097	0.923	决策树	BP 神经网络	0.003	0.997
K-最近邻	决策树	0.070	0.944	决策树	梯度提升机	0.010	0.992
K-最近邻	BP 神经网络	0.074	0.941	BP 神经网络	梯度提升机	0.014	0.989
K-最近邻	梯度提升机	0.058	0.954				

窄。因此,临床在支架植入术中应尽量减少残余狭窄的发生,通过优化支架选择和植入技术,如采用精准的血管成形术和充分扩张支架,确保术后血流恢复良好,降低 ISR 的风险。

此外,本研究应用多种机器学习算法成功构建

了 SAS 植入术后 ISR 的风险预测模型(LR、KNN、SVM、RF、DT、BP 神经网络和 GBM),所有模型 AUC>0.65,验证了基于机器学习算法构建预测模型的可行性。其中 SVM 模型在测试集中具有最高的 AUC,对 ISR 高风险患者识别能力突出。但

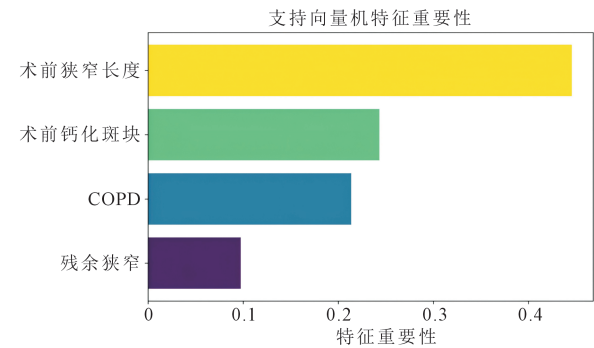


图 5 SAS 患者植入患者术后 1 年内发生 ISR 的独立预测因素在机器学习 SVM 模型预测中的特征重要性
Figure 5 Feature importance of independent predictors for ISR within one year after SAS implantation as identified by the machine learning SVM model

Delong 检验显示, SVM 与其余各个模型差异无统计学意义, 提示特征筛选的重要性可能高于算法选择。

上述构建的模型可能具有一些临床转化价值, 并可用以下场景: ①精准风险分层, 本研究构建的模型能够量化个体的 ISR 风险, 为治疗决策提供科学依据, 如针对 SAS 植入术后 24 h 内经术后即刻 DSA 确认支架位置正常的患者, 医生可通过电子病历系统提取上述指标并输入模型, 快速获取患者 ISR 风险概率; 医生通过电子病历系统提取术前狭窄长度、术前钙化斑块、COPD 病史, 结合术后即刻 DSA 评估的残余狭窄, 输入模型后获取患者术后 1 年 ISR 风险概率, 临床可针对风险概率差异采取不同的随访或干预方案; ②推动个体化医疗, 将影像特征量化, 为临床提供客观数据支撑, 引导治疗由“经验导向”向“数据驱动”的个性化模式转变。

本研究比较了多种机器学习模型在预测锁骨下动脉支架植入术后 ISR 风险中的表现, 并通过训练集建模、测试集验证, 结合 AUC、敏感度、特异度、Brier 分数及 Delong 检验等多维度指标, 为不同算法的预测效能提供了客观依据。然而, 研究也存在一定的局限性: 首先, 本研究为单中心回顾性研究, 样本量较为有限, 未来需在多中心、大样本的前瞻性研究中验证模型的有效性和稳定性; 其次, 仅纳入了部分临床和影像学指标, 可能遗漏其他潜在的影响因素, 如患者的生活方式、药物使用情况以及生化指标等。

综上所述, 基于机器学习算法在预测锁骨下动脉支架植入术后 ISR 风险方面展现出较大的潜力, 可能为临床提供有价值的决策支持。识别 COPD、

术前狭窄长度、术前钙化斑块和残余狭窄等独立影响因素, 可能有助于临床医生在术前评估和术后管理中采取针对性的干预措施, 从而降低 ISR 的发生率, 改善患者预后。

[参考文献]

[1] Zhao TY, Xu GQ, Xue JY, et al. Effects of percutaneous endovascular angioplasty for severe stenosis or occlusion of subclavian artery[J]. Sci Rep, 2024, 14: 14290.

[2] 王力力, 华 扬, 贾凌云, 等. 锁骨下动脉支架置入术后再狭窄的发生率及其影响因素分析[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2019, 16: 762-767.

Wang LL, Hua Y, Jia LY, et al. Incidence and influencing factors of restenosis after subclavian artery stent implantation [J]. Chin J Med Ultrasound Electron Ed, 2019, 16: 762-767.

[3] 徐佳波, 孙 捷, 郎德海. 腔内介入治疗在锁骨下动脉窃血综合征中的应用及预后分析[J]. 现代实用医学, 2024, 36: 630-632.

Xu JB, Sun J, Lang DH. Application and prognosis analysis of endovascular interventional therapy in subclavian steal syndrome[J]. Mod Pract Med, 2024, 36: 630-632.

[4] 杨 培, 陈 忠, 姜 军, 等. 影响锁骨下动脉支架远期通畅性的危险因素分析[J]. 中华医学杂志, 2010, 90: 1739-1742.

Yang P, Chen Z, Jiang J, et al. The analysis to risk factors of affecting the long-term patency ratio of stent planted in arteriosclerosis subclavian artery[J]. Natl Med J China, 2010, 90: 1739-1742.

[5] 王煜杰, 李 震, 李明省, 等. 左锁骨下动脉支架置入术后再狭窄因素分析[J]. 中国实用医刊, 2018, 45: 1-3.

Wang YJ, Li Z, Li MS, et al. Relative factors of restenosis after left subclavian artery stenting[J]. Chin J Pract Med, 2018, 45: 1-3.

[6] 武辉林, 李 坤, 翟水亭, 等. 锁骨下动脉狭窄和闭塞病变腔内治疗的临床效果[J]. 河南医学研究, 2022, 31: 2305-2309.

Wu HL, Li K, Zhai ST, et al. Clinical effect of intracavitary therapy for subclavian artery stenosis and occlusion[J]. Henan Med Res, 2022, 31: 2305-2309.

[7] 孙 勇, 杨 波, 康开江, 等. 锁骨下动脉闭塞血管内再通治疗的可行性分析[J]. 中国卒中杂志, 2021, 16: 940-945.

Sun Y, Yang B, Kang KJ, et al. Feasibility analysis of endovascular recanalization for subclavian artery occlusion[J]. Chin J Stroke, 2021, 16: 940-945.

[8] Van Nut L, Vinh PX, Vuong NL. Endovascular treatment for subclavian artery stenosis and occlusion: a single-center retrospective study[J]. Cureus, 2023, 15: e44699.

[9] Wei LB, Gao XX, Tong Z, et al. Outcomes of covered stents versus bare-metal stents for subclavian artery occlusive disease [J]. Front Cardiovasc Med, 2023, 10: 1194043.

[10] 李秋萍, 华 扬, 王力力, 等. 超声评估锁骨下动脉支架植入术后残余狭窄的影响因素[J]. 中华医学超声杂志(电子版),

- 2018,15:673-678.
- Li QP, Hua Y, Wang LL, et al. Evaluation of the influencing factors of residual stenosis after subclavian artery stent placement by ultrasonography [J]. Chin J Med Ultrasound Electron Ed, 2018, 15: 673-678.
- [11] 郭海峰, 李 韶, 李晓凤, 等. 锁骨下动脉支架植入术后支架内再狭窄的相关因素分析[J]. 中风与神经疾病杂志, 2017, 34: 711-713.
- Guo HF, Li S, Li XF, et al. The analysis of correlative factors of in-stent restenosis after subclavian artery stent implantation [J]. J Apoplexy Nerv Dis, 2017, 34: 711-713.
- [12] 龚 宇, 于 森, 田 甜, 等. 高分辨率磁共振血管壁成像评估大脑中动脉狭窄斑块特征与支架内再狭窄的相关性[J]. 介入放射学杂志, 2024, 33: 1282-1287.
- Gong Y, Yu M, Tian T, et al. High-resolution magnetic resonance angiography for assessing the correlation between plaque characteristics of middle cerebral artery stenosis and in-stent restenosis [J]. J Interv Radiol, 2024, 33: 1282-1287.
- [13] 杨心志, 牛国晨, 李鹏宇, 等. 锁骨下动脉完全闭塞的腔内治疗: 单中心回顾性研究 [J]. 中国血管外科杂志 (电子版), 2024, 16: 64-67.
- Yang XZ, Niu GC, Li PY, et al. Endovascular treatment of total subclavian artery occlusion: a single-center retrospective study [J]. Chin J Vasc Surg Electron Version, 2024, 16: 64-67.
- [14] 陈海杰, 徐少华, 张 静. 基于倾向性得分匹配的吸烟与不吸烟合并心血管疾病的慢阻肺患者的临床特征分析[J]. 中华健康管理学杂志, 2024, 18: 333-338.
- Chen HJ, Xu SH, Zhang J. Clinical characterization of smoking and nonsmoking patients with chronic obstructive pulmonary disease combined with cardiovascular disease based on propensity score matching [J]. Chin J Health Manag, 2024, 18: 333-338.
- [15] 丁乾昊, 贺迎坤, 赵婧革, 等. 颅内动脉粥样硬化性狭窄球囊成形术后血管腔扩张性重构的相关因素分析[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58: 850-858.
- Ding QH, He YK, Zhao JG, et al. Analysis of related factors for vascular luminal dilatational remodeling after balloon angioplasty for intracranial atherosclerotic stenosis [J]. Chin J Radiol, 2024, 58: 850-858.
- [16] 梁会珠, 马玉良, 李 琪, 等. 冠状动脉斑块旋磨术治疗冠状动脉弥漫钙化病变的长期安全性及有效性[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2022, 30: 814-818.
- Liang HZ, Ma YL, Li Q, et al. Long-time outcomes of rotational atherectomy of diffuse calcified coronary artery lesions [J]. Chin J Interv Cardiol, 2022, 30: 814-818.
- [17] 陈 明, 王 晶, 谭 强. 血管内超声评估冠心病合并非酒精性脂肪肝患者支架内再狭窄风险[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2023, 37: 771-775.
- Chen M, Wang J, Tan Q. Intravascular ultrasonography in in-stent restenosis risk assessment in coronary heart disease patients with non-alcoholic fatty liver disease [J]. J Chin Pract Diagn Ther, 2023, 37: 771-775.
- [18] Schillinger M, Haumer M, Schillinger S, et al. Risk stratification for subclavian artery angioplasty: is there an increased rate of restenosis after stent implantation? [J]. J Endovasc Ther, 2001, 8: 550-557.
- [19] 陆 赞, 翁嘉懿, 徐 亮, 等. 残余胆固醇与低密度脂蛋白胆固醇达标的冠心病患者经皮冠状动脉介入治疗术后支架内再狭窄的相关性[J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2024, 23: 18-22.
- Lu B, Weng JY, Xu L, et al. Correlation between remnant cholesterol and in-stent restenosis in coronary heart disease patients with low-density lipoprotein cholesterol compliance after percutaneous coronary intervention [J]. Chin J Mult Organ Dis Elder, 2024, 23: 18-22.

(收稿日期: 2025-07-25)

(本文编辑: 元 禾)