

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2026.16.005

文章编号: 1005-8982 (2026) 16-0027-09

脑血管疾病专题·论著

基于LASSO-随机森林算法的急性脑梗死血管内介入治疗术后出血转化预测模型的构建*

杨桂平, 钟广宏, 杨少明, 刘微微

(河源市人民医院 神经内科, 广东 河源 517000)

摘要: **目的** 基于LASSO-随机森林算法构建急性脑梗死(ACI)患者血管内介入治疗术后出血转化的预测模型,并验证其性能。**方法** 选取2021年1月—2024年12月河源市人民医院收治的400例行血管内介入治疗的ACI患者作为研究对象,采用完全随机抽样,按7:3的比例将患者随机分为建模组(280例)和验证组(120例)。收集患者临床资料,采用LASSO回归分析从中筛选关键变量进行多因素一般Logistic回归分析,以筛选出独立危险因素,据此采用随机森林算法构建ACI血管内介入治疗术后出血转化预测模型,分别采用受试者工作特征曲线(ROC)和决策曲线分析(DCA)验证模型的预测性能和临床效用。**结果** 该研究纳入的ACI患者术后出血转化发生率为17.00%(68/400)。LASSO回归分析结果显示,基于 λ_{1se} ,该研究从32个变量中共计筛选出关键变量12个,据此进行多因素一般Logistic回归分析,结果显示:房颤 [$OR=4.308$ (95% CI: 1.688, 10.998)]、术前SBP水平升高 [$OR=1.036$ (95% CI: 1.012, 1.062)]、PLT水平降低 [$OR=0.979$ (95% CI: 0.968, 0.991)]、CRP水平升高 [$OR=1.140$ (95% CI: 1.034, 1.257)]、桥接治疗 [$OR=3.060$ (95% CI: 1.262, 7.423)]、PTR延长 [$OR=1.059$ (95% CI: 1.021, 1.098)]、取栓次数增多 [$OR=3.030$ (95% CI: 1.607, 5.711)]、使用2种抗栓药物 [$OR=3.985$ (95% CI: 1.551, 10.236)]、抗栓药物采用负荷剂量 [$OR=5.149$ (95% CI: 1.845, 14.375)]均为ACI血管内介入治疗术后出血转化的独立危险因素($P<0.05$)。ROC曲线分析结果显示,建模组和验证组曲线下面积分别为0.884 (95% CI: 0.832, 0.935)和0.876 (95% CI: 0.813, 0.938)。Hosmer-Lemeshow检验结果显示,两组的模型预测值与实际值比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。DCA曲线分析结果显示,在高风险阈值0.05~1.00内,采用随机森林模型对患者进行干预,可获得更高的标准化净收益。SHapley Additive exPlanations分析结果显示,抗栓药物剂量对模型预测的贡献最大,且低特征值会增加出血转化风险;个体预测路径显示,该患者基线风险为0.0496,经各因素累加后最终风险为0.0140。**结论** 该研究构建的预测模型能较准确地预测ACI患者血管内介入治疗术后出血转化的发生,可为患者术后治疗方案的制订提供参考依据。

关键词: 急性脑梗死; 血管内介入治疗; 出血转化; LASSO回归; 随机森林算法

中图分类号: R743.3

文献标识码: A

Development of a prediction model for hemorrhagic transformation after endovascular treatment of acute cerebral infarction based on LASSO and random forest algorithms*

Yang Gui-ping, Zhong Guang-hong, Yang Shao-ming, Liu Wei-wei

(Department of Neurology, Heyuan People's Hospital, Heyuan, Guangdong 517000, China)

Abstract: Objective To develop a prediction model for hemorrhagic transformation after endovascular treatment of acute cerebral infarction (ACI) based on LASSO and random forest algorithms, and to verify its

收稿日期: 2026-04-30

* 基金项目: 广东省医学科学技术研究基金项目(B2025210); 河源市科技计划项目(河科社发2025198)

[通信作者] 杨桂平, E-mail: aguiping1126@163.com

performance. **Methods** Patients with ACI who underwent endovascular treatment at Heyuan People's Hospital between January 2021 and December 2024 were enrolled. Using simple random sampling, the patients were randomly assigned in a 7:3 ratio to a training group ($n = 280$) and a validation group ($n = 120$). Clinical data of all patients were collected. LASSO regression was used to identify key variables, which were subsequently entered into multivariable logistic regression analysis to identify independent risk factors. A prediction model for postprocedural hemorrhagic transformation after endovascular treatment for ACI was then developed using a random forest algorithm. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis and decision curve analysis (DCA) were used to evaluate the predictive performance and clinical utility of the model, respectively. **Results** The incidence of postprocedural hemorrhagic transformation among the 400 patients with ACI was 17.00% (68/400). Based on the λ_{1se} criterion, LASSO regression selected 12 key variables from 32 candidate variables. Multivariable logistic regression analysis showed that atrial fibrillation [$\hat{OR} = 4.308$ (95% CI: 1.688, 10.998)], higher preoperative systolic blood pressure (SBP) [$\hat{OR} = 1.036$ (95% CI: 1.012, 1.062)], lower platelet (PLT) count [$\hat{OR} = 0.979$ (95% CI: 0.968, 0.991)], higher C-reactive protein (CRP) level [$\hat{OR} = 1.140$ (95% CI: 1.034, 1.257)], bridging therapy [$\hat{OR} = 3.060$ (95% CI: 1.262, 7.423)], prolonged puncture to recanalization (PTR) time [$\hat{OR} = 1.059$ (95% CI: 1.021, 1.098)], a greater number of thrombectomy device passes [$\hat{OR} = 3.030$ (95% CI: 1.607, 5.711)], the use of two antithrombotic agents [$\hat{OR} = 3.985$ (95% CI: 1.551, 10.236)], and the use of loading doses of antithrombotic agents [$\hat{OR} = 5.149$ (95% CI: 1.845, 14.375)] were independent risk factors for postprocedural hemorrhagic transformation after endovascular treatment for ACI (all $P < 0.05$). ROC curve analysis showed that the area under the curve (AUC) values were 0.884 (95% CI: 0.832, 0.935) and 0.876 (95% CI: 0.813, 0.938) in the training and validation groups, respectively. The Hosmer-Lemeshow test showed no significant differences between the predicted and observed outcomes in either group (both $P > 0.05$). DCA showed that the random forest model provided a higher standardized net benefit across threshold probabilities ranging from 0.05 to 1.00. SHapley Additive exPlanations (SHAP) analysis showed that the dose of antithrombotic medication contributed most to the model predictions, and lower feature values were associated with an increased risk of hemorrhagic transformation. Individual prediction analysis showed that the patient's baseline risk was 0.0496 and decreased to 0.0140 after the cumulative contribution of the individual predictors. **Conclusion** The prediction model developed in this study accurately predicts the occurrence of postprocedural hemorrhagic transformation after endovascular treatment in patients with ACI and may provide a reference for the formulation of postoperative treatment strategies.

Keywords: acute cerebral infarction; endovascular treatment; hemorrhagic transformation; LASSO regression; random forest algorithm

急性脑梗死 (acute cerebral infarction, ACI) 作为全球范围内死亡和长期残疾的主要病因之一, 其治疗策略的优化始终是神经病学领域的研究重点。近年来, 血管内介入治疗凭借其在恢复脑血流灌注方面的显著优势, 已成为大血管闭塞性急性缺血性卒中患者的标准治疗方案^[1]。然而, 术后出血转化作为血管内介入治疗的严重并发症, 其发生率可达 15.2% ~ 46.1%^[2], 不仅加重患者神经功能缺损程度, 而且显著增加死亡风险, 严重影响治疗获益。现有研究表明, 出血转化的发生涉及复杂的病理生理机制, 包括缺血再灌注损伤、血脑屏障破坏、炎症反应激活及凝血功能紊乱等多种因素^[3-4]。尽管国内外学者已识别出若干危险因素, 但针对血管内介入治疗术后出血转化的预测模型仍缺乏统一标准, 尤其在高维临床数据背景

下, 传统统计方法难以有效处理变量间的多重共线性与交互作用^[5]。因此, 本研究拟采用 least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) 回归结合随机森林算法, 构建并验证 ACI 患者血管内介入治疗术后出血转化的预测模型, 本模型全部预测指标为入院常规采集资料, 无须额外影像学后处理, 同时随机森林可挖掘变量非线性交互效应, 弥补传统单一 Logistic 模型局限, 旨在为临床早期识别高危人群、制订个体化防治策略提供循证依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究为回顾性队列研究, 采用 PASS 21.0 估算样本量, 基于非本研究对象的前期预实验中,

未接受桥接的患者术后出血转化的基线概率 $P = 0.069$, 接受桥接的患者术后出血转化的效应值 $\hat{OR} = 2.206$, 检验水准 $\alpha = 0.05$, 检验效能 $\beta = 0.10$, 计算得出建模组样本量 280 例, 再以 7:3 的比例纳入验证组样本, 最终纳入 400 例。选取 2021 年 1 月—2024 年 12 月河源市人民医院收治的 400 例 ACI 患者作为研究对象, 所有患者行血管内介入治疗, 采用完全随机抽样, 按 7:3 的比例将患者随机分为建模组 (280 例) 和验证组 (120 例)。本研究获得知情豁免及医学伦理委员会批准 (YXYJLL-YSKISF2025068), 符合《赫尔辛基宣言》^[7]。

1.2 纳入与排除标准

1.2.1 纳入标准 ①符合《中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2018》^[6]中 ACI 相关诊断标准; ②年龄 ≥ 18 周岁; ③符合血管内介入治疗指征, 接受机械取栓、动脉溶栓或血管成形术; ④术后 3 和 24 h 内行颅脑 CT 检查; ⑤临床资料完整。

1.2.2 排除标准 ①伴有恶性肿瘤; ②伴有严重血液系统疾病; ③伴有严重器官功能障碍; ④伴有精神分裂症、双相情感障碍等严重精神疾病史而影响治疗依从性或疗效评估。

1.3 资料收集方法

收集患者临床资料, 临床特征包括性别、年龄、基础病史 (高血压、糖尿病、房颤、脑梗死)、术前美国国立卫生研究院卒中量表 (national institutes of health stroke scale, NIHSS) 评分、术前血压 [收缩压 (systolic blood pressure, SBP)、舒张压 (diastolic blood pressure, DBP)] 及术前实验室指标 [血糖 (Glucose, GLU)、血小板计数 (Platelet, PLT)、血红蛋白 (Hemoglobin, HGB)、白细胞计数 (white blood cell, WBC)、C 反应蛋白 (C-reactive protein, CRP)、肌酸激酶 (creatinine kinase, CK)]; 手术参数包括是否桥接、术中是否使用替罗非班、发病至动脉穿刺时间 (onset to puncture time, OTP)、穿刺至再通时间 (puncture to recanalization time, PTR)、再灌注分级 (modified thrombolysis in cerebral infarction, mTICI)、取栓方式、取栓次数; 影像数据包括病变血管、弥散加权成像液体衰减反转恢复序列 (diffusion weighted imaging-fluid attenuated inversion recovery, DWI-FLAIR) 或 CT 灌注成像 (CT perfusion, CTP) 不匹配; 术后管理资料

包括术后 24 h SBP、抗栓药物 (阿司匹林、氯吡格雷、替罗非班、华法林) 的数量与剂量、术后 24 h NIHSS 评分。

1.4 术后出血转化的评定方法

参照《中国急性脑梗死后出血转化诊治共识 2019》^[8]中相关诊断标准, 发病后 2 周~1 个月内, MRI 或 CT 可见 ≥ 1 个高密度影, 即可诊断为术后出血转化。

1.5 统计学方法

数据处理采用 SPSS 27.0 和 R 4.5.1 统计软件。计量资料以均数 $\pm$ 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 比较用 t 检验; 计数资料以构成比或率 (%) 表示, 比较用 χ^2 检验; 采用 LASSO 回归筛选自变量, 多因素一般 Logistic 回归模型进一步确定危险因素, 并基于最终有统计学意义的变量构建随机森林模型, 决策树数目设定为 800, 节点预选变量数设定为 3, 绘制受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线、决策曲线分析 (decision curve analysis, DCA) 验证模型的预测性能和临床效用。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组临床资料比较

本研究纳入 400 例患者, 68 例术后发生出血转化, 发生率为 17.00%。建模组与验证组术后出血转化率、性别构成、年龄、高血压患病率、糖尿病患病率、房颤率、脑梗死率、术前 NIHSS 评分、术前 SBP、术前 DBP、术前 GLU、PLT、HGB、WBC、CRP、CK、桥接率、术中替罗非班使用率、OTP、PTR、mTICI 分级构成、取栓方式构成、取栓次数、病变血管构成、DWI-FLAIR/CTP 不匹配率、术后 24 h SBP、阿司匹林使用率、氯吡格雷使用率、替罗非班使用率、华法林使用率、抗栓药物数量构成、抗栓药物剂量构成和术后 24 h NIHSS 评分比较, 经 χ^2/t 检验, 差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 1。

2.2 LASSO 回归分析筛选变量

以患者术后是否发生出血转化为因变量, 32 项临床资料作为自变量, 进行 LASSO 回归分析, 结果显示, $\lambda_{\min} = 0.00762$, $\lambda_{1se} = 0.03096$, 基于 $\lambda_{\min}$ 和 λ_{1se} 可分别筛选出 25 个和 12 个自变量, 考虑尽量降

表 1 两组临床资料比较

组别	<i>n</i>	术后出血转化 例(%)	男/女 例	年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$)	高血压 例(%)	糖尿病 例(%)	房颤 例(%)	脑梗死 例(%)	术前NIHSS评分 ($\bar{x} \pm s$)
建模组	280	48(17.14)	169/111	64.85 ± 8.00	163(58.21)	103(36.79)	65(23.21)	47(16.79)	13.46 ± 3.31
验证组	120	20(16.67)	73/47	65.40 ± 6.80	72(60.00)	41(34.17)	29(24.17)	23(19.17)	12.97 ± 3.53
χ^2/t 值		0.013	0.008	-0.658	0.111	0.250	0.042	0.330	1.330
<i>P</i> 值		0.908	0.929	0.511	0.740	0.617	0.837	0.566	0.184

组别	术前SBP/(mmHg, $\bar{x} \pm s$)	术前DBP/(mmHg, $\bar{x} \pm s$)	GLU/(mmol/L, $\bar{x} \pm s$)	GLU/(mmol/L, $\bar{x} \pm s$)	PLT/($\times 10^9/L$, $\bar{x} \pm s$)	HGB/(g/L, $\bar{x} \pm s$)	WBC/($\times 10^9/L$, $\bar{x} \pm s$)
建模组	148.73 ± 18.54	89.55 ± 10.07	5.98 ± 1.07	5.98 ± 1.07	204.59 ± 41.41	132.61 ± 15.10	8.09 ± 2.04
验证组	148.94 ± 19.08	89.68 ± 10.09	5.82 ± 1.06	5.82 ± 1.06	208.69 ± 39.77	134.08 ± 16.00	7.96 ± 1.94
χ^2/t 值	-0.103	-0.118	1.412	1.412	-0.917	-0.874	0.599
<i>P</i> 值	0.918	0.906	0.159	0.159	0.360	0.383	0.550

组别	CRP/(mg/L, $\bar{x} \pm s$)	CK/(u/L, $\bar{x} \pm s$)	桥接 例(%)	术中使用替罗非班 例(%)	OTP/(h, $\bar{x} \pm s$)	PTR/(min, $\bar{x} \pm s$)	mTICI分级 例(%)	
							2b ~ 3	0 ~ 2a
建模组	15.60 ± 5.18	142.06 ± 41.16	92(32.86)	94(33.57)	4.42 ± 1.43	45.33 ± 14.00	196(70.00)	84(30.00)
验证组	16.48 ± 4.89	134.85 ± 39.98	38(31.67)	38(31.67)	4.35 ± 1.44	43.67 ± 13.43	88(73.33)	32(26.67)
χ^2/t 值	-1.582	1.619	0.054	0.138	0.418	1.100	0.453	
<i>P</i> 值	0.114	0.106	0.816	0.710	0.676	0.272	0.501	

组别	取栓次数 ($\bar{x} \pm s$)	取栓方式 例(%)			病变血管 例(%)		DWI-FLAIR/CTP 不匹配 例(%)	术后 24 h SBP/ (mmHg, $\bar{x} \pm s$)
		支架取栓	抽吸取栓	联合取栓	前循环	后循环		
建模组	1.69 ± 0.70	114(40.71)	87(31.07)	79(28.21)	204(72.86)	76(27.14)	150(53.57)	140.74 ± 14.93
验证组	1.68 ± 0.70	51(42.50)	36(30.00)	33(27.50)	89(74.17)	31(25.83)	60(50.00)	140.08 ± 13.85
χ^2/t 值	0.234		0.112		0.074		0.430	0.414
<i>P</i> 值	0.815		0.946		0.786		0.512	0.679

组别	阿司匹林 例(%)	氯吡格雷 例(%)	替罗非班 例(%)	华法林 例(%)	抗栓药物数量 例(%)		抗栓药物剂量 例(%)		术后 24 h NIHSS 评分 ($\bar{x} \pm s$)
					1种	2种	常规	负荷	
建模组	169(60.36)	102(36.43)	69(24.64)	31(11.07)	189(67.50)	91(32.50)	226(80.71)	54(19.29)	7.50 ± 3.14
验证组	71(59.17)	42(35.00)	30(25.00)	12(10.00)	85(70.83)	35(29.17)	93(77.50)	27(22.50)	7.32 ± 3.22
χ^2/t 值	0.050	0.074	0.288	0.101	0.433		0.537		0.541
<i>P</i> 值	0.824	0.785	0.591	0.751	0.511		0.464		0.589

低二项式偏差,同时避免因自变量过多而导致模型过拟合,故本研究决定采用 λ_{1se} 作为变量筛选标准,最终筛选出自变量12个,即房颤、术前NIHSS评分、术前SBP、PLT、CRP、桥接、OTP、PTR、取栓次数、抗栓药物数量、抗栓药物剂量、术后NIHSS评分。见图1。

2.3 ACI血管内介入治疗术后出血转化的多因素一般Logistic回归分析

以患者术后是否发生出血转化(否=0,是=1)为因变量,LASSO回归筛选出的房颤(否=0,是=

1)、术前NIHSS评分(实测连续值)、术前SBP水平(实测值)、PLT水平(实测值)、CRP水平(实测值)、桥接(否=0,是=1)、OTP(实测值)、PTR(实测值)、取栓次数(实测值)、抗栓药物数量(1种=0,2种=1)、抗栓药物剂量(常规=0,负荷=1)为自变量、术后NIHSS评分(实测值),行多因素一般Logistic回归分析,结果显示:房颤[$\hat{OR}=4.308$ (95% CI: 1.688, 10.998)]、术前SBP水平升高[$\hat{OR}=1.036$ (95% CI: 1.012, 1.062)]、PLT水平降低[$\hat{OR}=0.979$ (95% CI: 0.968, 0.991)]、CRP水平

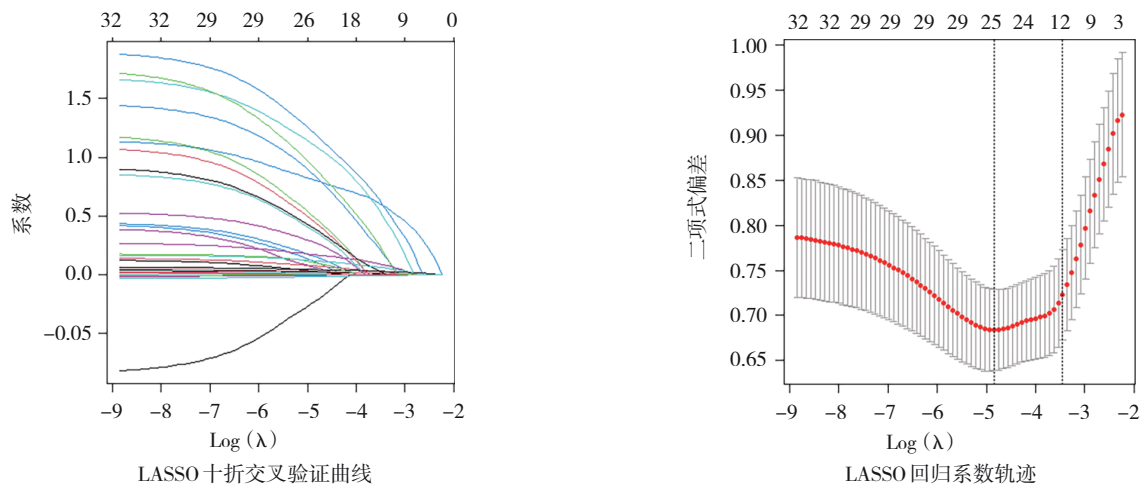


图 1 LASSO 回归分析筛选变量

升高[$\hat{OR}=1.140$ (95% CI: 1.034, 1.257)]、桥接治疗[$\hat{OR}=3.060$ (95% CI: 1.262, 7.423)]、PTR 延长[$\hat{OR}=1.059$ (95% CI: 1.021, 1.098)]、取栓次数增多[$\hat{OR}=3.030$ (95% CI: 1.607, 5.711)]、使用 2 种抗栓药物[$\hat{OR}=3.985$ (95% CI: 1.551, 10.236)]、抗栓药物采用负荷剂量[$\hat{OR}=5.149$ (95% CI: 1.845, 14.375)]均为 ACI 血管内介入治疗术后出血转化的独立危险因素 ($P<0.05$)。见表 2。

表 2 ACI 血管内介入治疗术后出血转化的多因素一般 Logistic 回归分析参数

自变量	b	S_b	Wald χ^2 值	P 值	$\hat{OR}$	95% CI	
						下限	上限
房颤	1.461	0.478	9.330	0.002	4.308	1.688	10.998
术前 NIHSS 评分	0.048	0.066	0.539	0.463	1.049	0.923	1.193
术前 SBP	0.036	0.012	8.569	0.003	1.036	1.012	1.062
PLT	-0.021	0.006	12.300	0.000	0.979	0.968	0.991
CRP	0.131	0.050	6.891	0.009	1.140	1.034	1.257
桥接	1.119	0.452	6.122	0.013	3.060	1.262	7.423
OTP	0.220	0.155	2.01	0.154	1.247	0.921	1.688
PTR	0.057	0.018	9.519	0.002	1.059	1.021	1.098
取栓次数	1.108	0.323	11.746	0.001	3.030	1.607	5.711
抗栓药物数量	1.383	0.481	8.251	0.004	3.985	1.551	10.236
抗栓药物剂量	1.639	0.524	9.790	0.002	5.149	1.845	14.375
术后 NIHSS 评分	0.133	0.074	3.255	0.071	1.143	0.989	1.320

2.4 ACI 血管内介入治疗术后出血转化的随机森林模型预测性能验证

ROC 曲线分析结果显示, 建模组 AUC=0.884 (95%CI: 0.832, 0.935), 验证组 AUC=0.876 (95% CI: 0.813, 0.938) (见图 2)。Hosmer-Lemeshow 检验结果显示, 建模组的模型预测值与实际值比较, 差异均无统计学意义 ($\chi^2=8.580$, $P=0.379$); 验证组的模型预测值与实际值比较, 差异均无统计学

意义 ($\chi^2=8.627$, $P=0.351$) (见图 3)。

2.5 ACI 血管内介入治疗术后出血转化的随机森林模型临床效用验证

DCA 曲线分析结果显示, 在高风险阈值 0.05 ~ 1.00 内, 采用随机森林模型对患者进行干预, 可获得更高的标准化净收益, 结合 ROC 曲线最佳临界阈值分析, 本模型最佳预测阈值为 0.22, 该阈值下建模组敏感性为 84.2%、特异性为 82.6%, 验证组

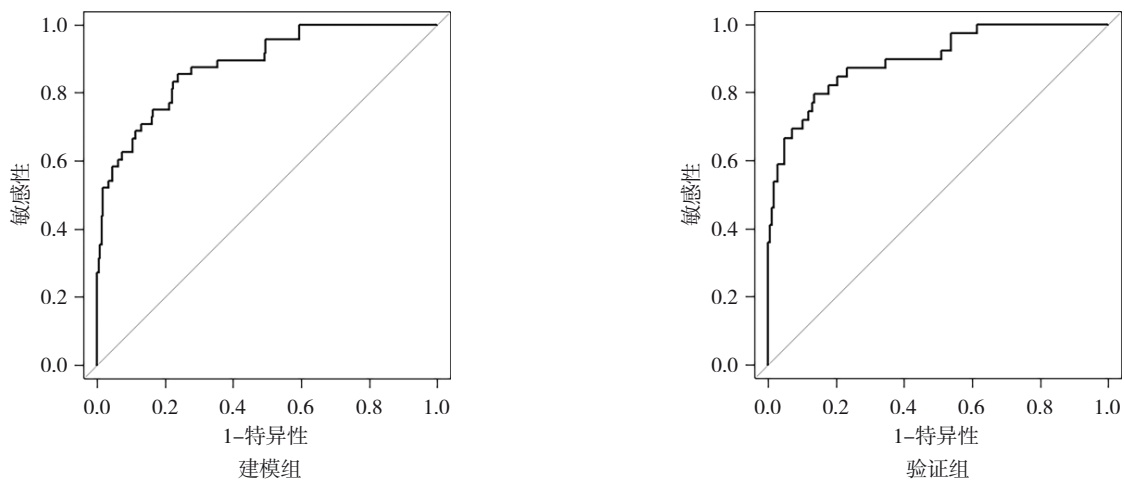


图2 ACI血管内介入治疗术后出血转化随机森林模型的ROC曲线

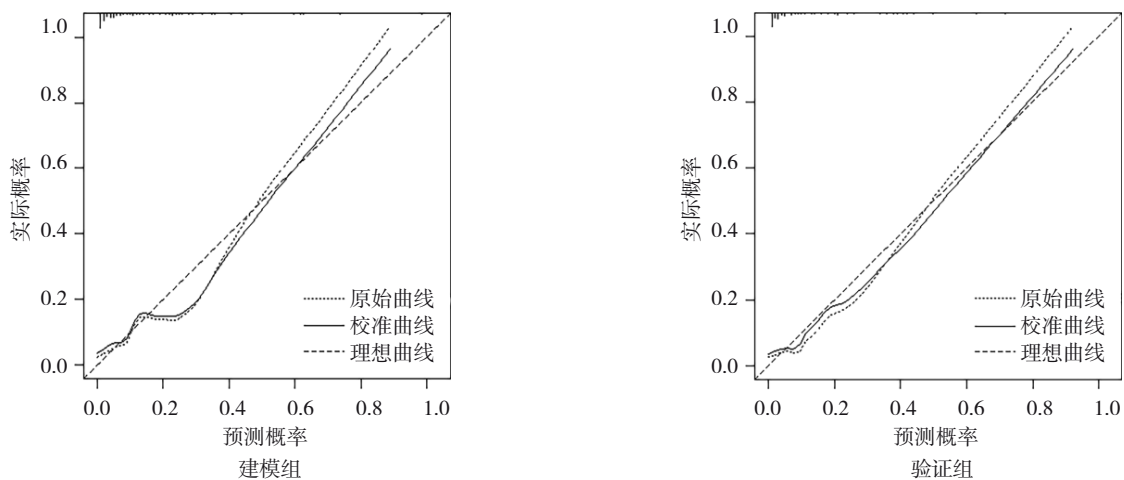


图3 ACI血管内介入治疗术后出血转化随机森林模型的校准曲线

敏感性为83.1%、特异性为81.9%；该阈值区间内假阳性、假阴性误判率均处于临床可接受范围，在0.05~0.22低阈值区间可最大程度筛出潜在高危

患者，适合术前快速初筛；0.22~1.00高阈值区间可精准锁定极高危人群，指导强化干预。见图4。

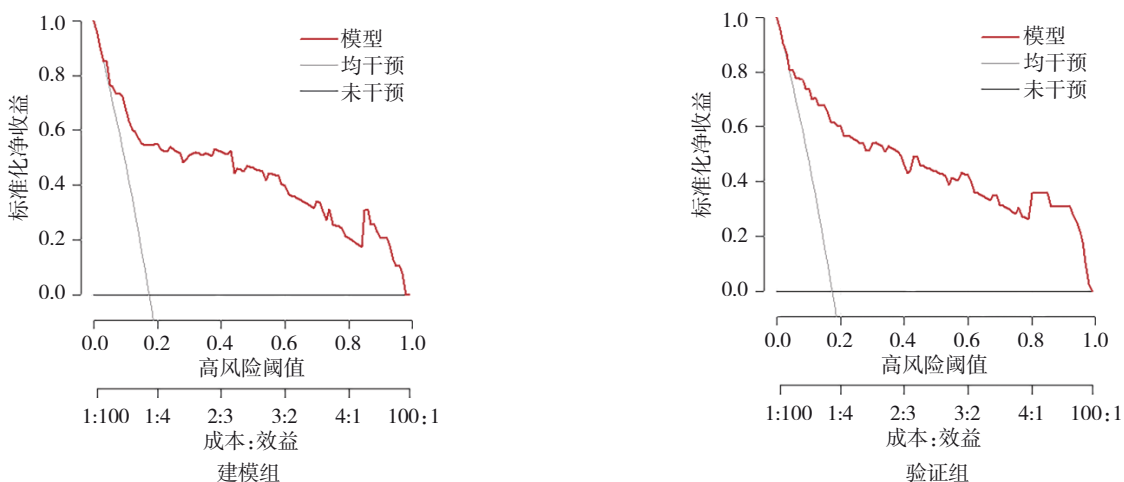


图4 ACI血管内介入治疗术后出血转化随机森林模型的DCA曲线

2.6 ACI 血管内介入治疗术后出血转化的随机森林模型可解释性分析

SHapley Additive exPlanations (SHAP) 分析结果显示, 抗栓药物剂量对模型预测贡献最大, 且

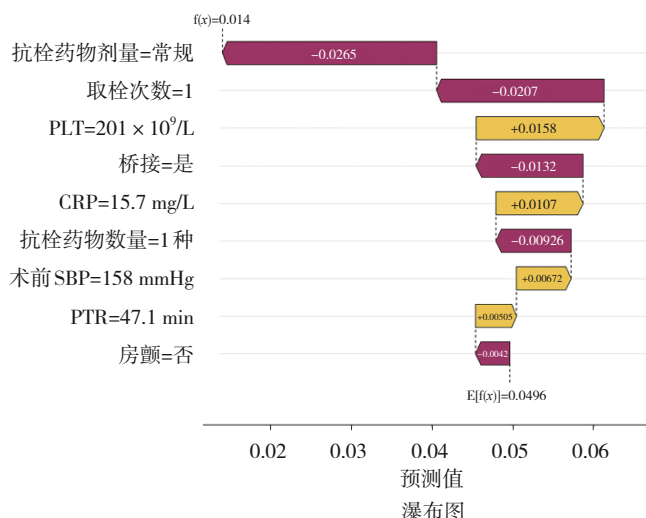


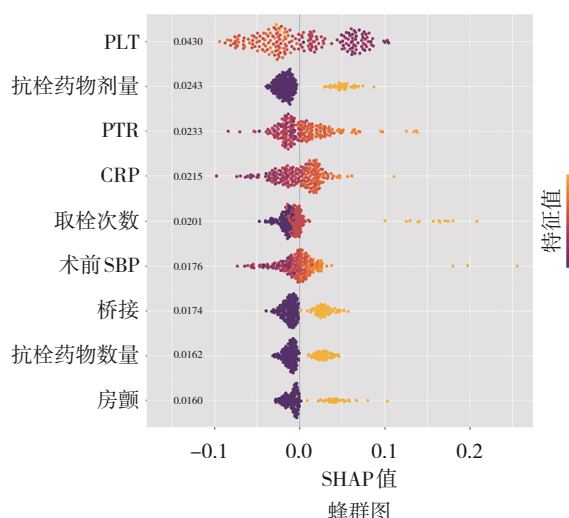
图5 ACI血管内介入治疗术后出血转化随机森林模型的SHAP可解释性分析

3 讨论

本研究纳入的ACI患者血管内介入治疗术后出血转化发生率为17.00% (68/400), 该数据处于既往文献报道的8.0%~44.7%^[9-11], 但不同研究间存在明显差异。分析差异原因: ①本研究排除了恶性肿瘤、严重血液系统疾病及器官功能障碍患者, 此类基础疾病会通过影响凝血功能、血管壁完整性增加出血风险, 而部分研究未做严格排除; ②本研究手术者均为资深神经介入医师, 取栓操作更趋精细, 且抗栓、溶栓药物的使用严格遵循操作规范, 减少了医源性出血; ③本研究以发病后2周~1个月的影像学结果为诊断依据, 部分研究则采用术后72 h内短期评估, 易将迟发性出血转化排除在外, 导致统计值偏高^[12]。

本研究结果显示, 房颤、术前SBP、PLT、CRP、桥接、PTR、取栓次数、抗栓药物种类、抗栓药物剂量均为ACI血管内介入治疗术后出血转化的独立危险因素。房颤增加术后出血转化风险, 可能与心源性栓塞导致的较大血栓负荷及远端微血管栓塞相关, 此类患者往往伴随更严重的缺血半暗带损伤及再灌注后毛细血管渗漏^[13]。术前SBP升高通过增加血管壁剪切应力、促进内皮细胞凋

低特征值会增加出血转化风险; 个体预测路径显示, 该患者基线风险0.0496, 经各因素累加后最终风险为0.0140。见图5。



亡及血脑屏障通透性增加, 为出血转化的发生创造血流动力学条件^[14]。PLT降低则直接削弱初级止血功能, 而CRP作为系统性炎症标志物, 其升高反映了白细胞介素、肿瘤坏死因子等促炎因子的过度释放, 加剧微血管炎症损伤^[15-16]。脑血管桥接是一种神经外科手术技术, 其采用患者自体血管组织连接病变血管上下游以恢复正常血流, 其增加出血风险可能与两方面有关: 一方面, 阿替普酶的纤溶作用可能破坏已缺血损伤的血管壁; 另一方面, 延迟的血管内操作增加了血管内膜损伤概率^[17-18]。PTR延长意味着更长时间的血管内操作及机械刺激, 反复取栓尝试则直接导致血管内皮机械性损伤、血脑屏障结构破坏及远端栓塞事件, 这些因素共同构成出血转化的解剖学基础^[19]。抗栓药物的种类与剂量反映了临床对高血栓负荷患者采取的强化治疗策略, 但过度的抗凝/抗血小板治疗在改善再灌注的同时, 必然增加出血并发症风险, 体现了治疗获益与风险之间的微妙平衡^[20-21]。

既往研究多单独讨论各危险因素独立致病机制, 本研究依托随机森林算法挖掘变量交互效应, 发现房颤与抗栓药物存在显著协同作用。房颤患者本身内皮损伤、凝血紊乱风险更高, 若同时联用2种抗栓药物或使用负荷剂量, 纤溶、抗血小板

作用叠加，血脑屏障破裂出血风险呈指数级上升^[22-23]；此外，术前高SBP合并低PLT、高CRP的患者，炎症损伤、血流剪切力、止血功能缺陷三重因素交互，出血转化风险显著高于单一危险因素人群^[24]，传统Logistic模型无法捕捉此类非线性协同效应，这也是本研究采用随机森林算法的核心优势之一。

建模方面，本研究采用LASSO回归分析进行变量筛选，其引入L1正则化项，有效实现了高维数据中的变量选择与降维，解决了传统Logistic回归中多重共线性导致的系数不稳定问题^[25]。本研究基于 λ_{1se} 准则从32个候选变量中筛选出12个关键预测因子，在保持模型可解释性的同时避免了过拟合风险。随机森林算法作为集成学习方法，通过构建多棵决策树并采用Bootstrap聚合策略，不仅能够捕捉变量间的非线性关系与交互作用，更通过特征重要性评估提供了生物学机制的直观解读。模型验证结果显示，建模组与验证组的AUC分别为0.884和0.876，表明该模型具有良好的判别能力。Hosmer-Lemeshow检验证实模型拟合优度良好，校准曲线分析显示预测概率与实际观测概率高度一致。DCA曲线分析进一步证实，在0.05~1.00的阈值概率范围内，采用本模型进行临床决策可获得净收益，体现了其临床实用性。SHAP分析明确抗栓药物剂量为首要贡献因素，为临床干预提供明确靶点。根据随机森林模型，将患者分为低危和高危，匹配差异化临床管理路径：①术前模型判定高危患者，术后转入神经重症监护病房，持续24 h有创血压监测，严格将SBP控制在 ≤ 130 mmHg；术后12、24和48 h 3次复查颅脑CT，提前筛查迟发性出血；暂缓负荷剂量抗栓药物，采用单药常规剂量维持，动态复查血小板、CRP指标。②术前低危患者，普通卒中病房监护，每6 h无创测血压，术后24 h单次CT复查，可按照指南标准方案使用双联抗栓药物，减少过度医疗监护资源消耗。

然而，本研究仍存在若干局限性：①单中心回顾性设计可能引入选择偏倚，且样本量相对有限，未来需开展多中心外部验证以评估模型泛化能力。②部分连续性变量仅采用单次测量值，未能动态监测其变异趋势；③影像组学特征未纳入

分析，可能遗漏重要预测信息；④尽管随机森林模型性能优异，但其“黑箱”特性限制了临床路径的直接推导，后续研究可结合SHAP值分析提升模型可解释性。

综上所述，本研究基于LASSO-随机森林算法构建的ACI患者血管内介入治疗术后出血转化预测模型，通过整合临床特征、手术参数及实验室指标，实现了对出血风险的精准量化评估。该模型具备良好的预测性能与临床适用性，可为围手术期风险分层管理提供决策支持，有助于优化抗栓策略、指导血压管控及改善患者预后。

参考文献：

- [1] 韩建峰. 急性脑梗死机械取栓治疗的研究进展[J]. 西安交通大学学报(医学版), 2025, 46(2): 197-202.
- [2] Duan Q, Li W, Zhang Y, et al. Nomogram established on account of Lasso-logistic regression for predicting hemorrhagic transformation in patients with acute ischemic stroke after endovascular thrombectomy[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2024, 243: 108389.
- [3] Chen Y, Lv W, Liu X, et al. Development of a prediction model for hemorrhagic transformation after intravenous thrombolysis in patients with acute ischemic stroke: a retrospective analysis[J]. BMC Med Inform Decis Mak, 2025, 25(1): 227.
- [4] Chen H, Lee J S, Michel P, et al. Endovascular stroke thrombectomy for patients with large ischemic core: a review[J]. JAMA Neurol, 2024, 81(10): 1085-1093.
- [5] Sun T, Yu H Y, Zhan C H, et al. Non-contrast CT radiomics-clinical machine learning model for futile recanalization after endovascular treatment in anterior circulation acute ischemic stroke[J]. BMC Med Imaging, 2024, 24(1): 178.
- [6] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性缺血性脑卒中诊治指南2018[J]. 中华神经科杂志, 2018, 51(9): 666-682.
- [7] World Medical Association. World medical association declaration of helsinki: ethical principles for medical research involving human participants[J]. JAMA, 2025, 333(1): 71-74.
- [8] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性脑梗死后出血转化诊治共识2019[J]. 中华神经科杂志, 2019, 52(4): 252-265.
- [9] Fu C H, Chen C H, Lin C H, et al. Comparison of risk scores in predicting symptomatic intracerebral hemorrhage after endovascular thrombectomy[J]. J Formos Med Assoc, 2022, 121(7): 1257-1265.
- [10] Ayub T, Barwari A, Finsterer J. Frequency, severity, risk factors, and outcome of hemorrhagic transformation in anterior and posterior stroke[J]. J Clin Med, 2024, 13(7): 2010.
- [11] Ciacciarelli A, Tessitore A, Fiume G, et al. Factors associated

- with hemorrhagic transformation after endovascular treatment despite early recanalization[J]. *J Neurol Sci*, 2023, 453: 120778.
- [12] Yu G, Kim Y J, Jeon S B, et al. Thromboelastography for prediction of hemorrhagic transformation in patients with acute ischemic stroke[J]. *Am J Emerg Med*, 2020, 38(9): 1772-1777.
- [13] Ahmed S R, Zeinhom M G, Ebied A A M K, et al. A multi-center study on the predictors of different subtypes of hemorrhagic transformation of brain infarction after thrombolysis in atrial fibrillation patients presented with embolic stroke[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 15655.
- [14] Maida C D, Norrito R L, Rizzica S, et al. Molecular Pathogenesis of Ischemic and Hemorrhagic Strokes: Background and Therapeutic Approaches[J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(12): 6297.
- [15] Tirandi A, Sgura C, Carbone F, et al. Inflammatory biomarkers of ischemic stroke[J]. *Intern Emerg Med*, 2023, 18(3): 723-732.
- [16] Zang Z, Che S, Liu H, et al. The predictive value of brain CT perfusion imaging and serum CRP for hemorrhagic transformation and clinical outcomes in acute ischemic stroke patients after intravenous thrombolysis[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2026, 264: 109347.
- [17] Tian B, Tian X, Shi Z, et al. Clinical and imaging indicators of hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke after endovascular thrombectomy[J]. *Stroke*, 2022, 53(5): 1674-1681.
- [18] Dong S, Yu C, Wu Q, et al. Predictors of symptomatic intracranial hemorrhage after endovascular thrombectomy in acute ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2023, 52(4): 363-375.
- [19] Jang K M, Choi H H, Nam T K, et al. Clinical outcomes of first-pass effect after mechanical thrombectomy for acute ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2021, 211: 107030.
- [20] Pulcine E, Seed M, Brandão L R, et al. Hemorrhagic transformation and stroke recurrence in children with cardiac disease receiving antithrombotic therapy for secondary stroke prevention[J]. *J Thromb Haemost*, 2021, 19(10): 2428-2439.
- [21] 刘仕庆, 赵凤仙, 周芯羽, 等. 阿司匹林对急性大动脉主干闭塞性脑梗死后癫痫发作的影响[J]. *中国现代医学杂志*, 2026, 36(5): 7-13.
- [22] Schnabel R B, Haeusler K G, Healey J S, et al. Searching for atrial fibrillation poststroke: a white paper of the AF-SCREEN international collaboration[J]. *Circulation*, 2019, 140(22): 1834-1850.
- [23] Thomas S E, Plumber N, Venkatapathappa P, et al. A review of risk factors and predictors for hemorrhagic transformation in patients with acute ischemic stroke[J]. *Int J Vasc Med*, 2021, 2021: 4244267.
- [24] Chen R, Jiang G, Liu Y, et al. Predictive effects of S100 β and CRP levels on hemorrhagic transformation in patients with AIS after intravenous thrombolysis: a concise review based on our center experience[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2023, 102(38): e35149.
- [25] Wang S, Jiang J, Gu X, et al. Radiomics signature and deep learning signature of intrathrombus and perithrombus for prediction of malignant cerebral edema after acute ischemic stroke: a multicenter CT study[J]. *Front Neurol*, 2025, 16: 1650970.

(童颖丹 编辑)

本文引用格式: 杨桂平, 钟广宏, 杨少明, 等. 基于 LASSO-随机森林算法的急性脑梗死血管内介入治疗术后出血转化预测模型的构建[J]. *中国现代医学杂志*, 2026, 36(16): 27-35.

Cite this article as: Yang G P, Zhong G H, Yang S M, et al. Development of a prediction model for hemorrhagic transformation after endovascular treatment of acute cerebral infarction based on LASSO and random forest algorithms[J]. *China Journal of Modern Medicine*, 2026, 36(16): 27-35.