

本文引用: 尼罗菲尔·艾尔肯, 菲尔东·阿布力孜, 印婷婷, 等. 基于新型炎症因子的反向传播人工神经网络模型对急性 ST 段抬高型心肌梗死患者冠状动脉病变严重程度分级的预测价值[J]. 中国动脉硬化杂志, 2026, 34(4): 335-343. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2026.04.007.

[文章编号] 1007-3949(2026)34-04-0335-09

· 临床研究 ·

# 基于新型炎症因子的反向传播人工神经网络模型对急性 ST 段抬高型心肌梗死患者冠状动脉病变严重程度分级的预测价值

尼罗菲尔·艾尔肯<sup>1</sup>, 菲尔东·阿布力孜<sup>2</sup>, 印婷婷<sup>1</sup>, 盖娟<sup>1</sup>, 范平<sup>1</sup>

1. 新疆医科大学第一附属医院心脏中心心功能科, 2. 新疆维吾尔自治区人民医院疼痛科, 新疆乌鲁木齐市 830000

**[摘要]** **[目的]** 探讨基于新型炎症因子的反向传播人工神经网络模型(BPNN)对急性 ST 段抬高型心肌梗死(STEMI)患者冠状动脉病变严重程度分级的预测价值。**[方法]** 选取 2022 年 1 月—2024 年 10 月新疆医科大学第一附属医院心脏中心收治的 234 例急性 STEMI 患者作为研究对象,按 7:3 的比例随机分为训练集(164 例)和测试集(70 例)。训练集按不同冠状动脉病变严重程度分级(SYNTAX 评分)分为低危组(0~22 分)54 例(32.9%)、中危组(23~32 分)62 例(37.8%)以及高危组(33 分以上)48 例(29.3%),比较训练集 3 组患者一般临床资料、血清炎症因子[高敏 C 反应蛋白(hs-CRP)、白细胞介素 6、肿瘤坏死因子  $\alpha$ ]以及新型炎症因子[中性粒细胞/淋巴细胞比值、血小板/淋巴细胞比值、泛免疫炎症值(PIV)、全身免疫炎症指数]水平,采用多因素有序 Logistic 回归分析获得急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的独立预测因素,构建随机森林模型和 BPNN 模型,通过 ROC 曲线分析的曲线下面积(AUC)以及由混淆矩阵计算出的准确度、灵敏度和特异度来评估模型的预测效能。**[结果]** 多因素有序 Logistic 回归分析结果显示,甘油三酯葡萄糖指数(TyG)、高敏 C 反应蛋白(hs-CRP)以及 PIV 为急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的独立预测因素( $P<0.05$ );基于这 3 个独立预测因素构建预测急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的随机森林模型和 BPNN 模型;随机森林模型显示,当生成 2 654 棵决策树时,预测高危、中危、低危以及袋外数据的总体错误率分别稳定在 15.3%、19.2%、30.5% 以及 21.4%,说明该模型的准确率是稳定的;通过 5 折交叉验证和网格搜索进行 BPNN 模型的超参数调优,筛选出的最佳参数组合为:BPNN 的网络拓扑结构为 3-4-2-3,最大迭代次数为  $10^7$  次,学习率为 0.5,此时平均准确率达到最高,为 84.3%。最终,模型经过 201 935 次迭代更新权重值后,损失函数达到最小值,为 20.659 917;训练集 BPNN 模型预测高危、中危、低危的 AUC 较随机森林模型分别升高 6.5%、8.9% 和 8.3% (均  $P<0.05$ ),测试集 BPNN 模型预测高危、中危、低危的 AUC 较随机森林模型分别升高 5.2%、9.4% 和 13.4% (均  $P<0.05$ ),无论训练集还是测试集,BPNN 模型预测高危、中危、低危的灵敏度、特异度以及准确度均高于随机森林模型。**[结论]** 基于 TyG、hs-CRP 以及 PIV 构建的 BPNN 模型和随机森林模型对于急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级均具有良好的预测效能,且 BPNN 模型优于随机森林模型。

**[关键词]** ST 段抬高型心肌梗死; 冠状动脉病变严重程度分级; 新型炎症因子; 反向传播人工神经网络模型

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

## Predictive value of a backpropagation artificial neural network model based on novel inflammatory factors for grading coronary artery lesions severity in patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction

NIROFEL · Elken<sup>1</sup>, FELDONG · Abulizi<sup>2</sup>, YIN Tingting<sup>1</sup>, GAI Juan<sup>1</sup>, FAN Ping<sup>1</sup>

1. Department of Cardiac Function, Heart Center, First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, 2. Department of Pain, People's Hospital of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830000, China

[收稿日期] 2025-12-14

[修回日期] 2026-03-15

[基金项目] 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项—科技援疆计划(2022E02111)

[作者简介] 尼罗菲尔·艾尔肯, 硕士, 住院医师, 研究方向为冠心病的预防与临床诊疗, E-mail: 157488588@qq.com。通信作者范平, 博士, 主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向为冠心病的预防与临床诊疗, E-mail: xjarrhyvip@163.com。

**[ABSTRACT]** **Aim** To investigate the predictive value of a backpropagation artificial neural network (BPNN) model based on novel inflammatory factors for the severity grading of coronary artery lesions in patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction (STEMI). **Methods** A total of 234 patients with acute STEMI admitted to the Cardiac Center of First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University from January 2022 to October 2024 were enrolled as study subjects. They were randomly divided into a training set (164 cases) and a test set (70 cases) at a 7 : 3 ratio. Based on the severity grading of coronary artery lesions (SYNTAX score), the training set was further classified into a low-risk group (0 ~ 22 points) with 54 cases (32.9%), a medium-risk group (23 ~ 32 points) with 62 cases (37.8%), and a high-risk group ( $\geq 33$  points) with 48 cases (29.3%). General clinical data, serum inflammatory factors (high sensitivity C-reactive protein (hs-CRP), interleukin-6 (IL-6), tumor necrosis factor- $\alpha$  (TNF- $\alpha$ )), and novel inflammatory factors (neutrophil-to-lymphocyte ratio (NLR), platelet-to-lymphocyte ratio (PLR), pan-immune inflammation value (PIV), systemic immune-inflammation index (SII)) were compared among three groups of acute STEMI patients in the training set. Multivariate ordinal Logistic regression analysis was used to identify independent predictors of coronary artery lesion severity grading in acute STEMI patients. Random forest models and BPNN models were constructed, and the predictive performance of the models was evaluated using the area under the curve (AUC) from ROC curve analysis, as well as accuracy, sensitivity, and specificity calculated from the confusion matrix. **Results** Multivariate ordinal Logistic regression analysis showed that the triglyceride-glucose index (TyG), hs-CRP, and PIV were independent predictors of coronary artery lesion severity grading in acute STEMI patients ( $P < 0.05$ ). Based on these three independent predictors, random forest models and BPNN models were constructed to predict the severity grading of coronary artery lesions in acute STEMI patients. The random forest model showed that when 2 654 decision trees were generated, the error rates for predicting high-risk, medium-risk, low-risk, and overall out-of-bag data stabilized at 15.3%, 19.2%, 30.5% and 21.4%, respectively, indicating stable accuracy of the model. Hyperparameter tuning of the BPNN model was performed using 5-fold cross-validation and grid search, and the optimal parameter combination was identified as follows: the network topology of the BPNN was 3-4-2-3, the maximum number of iterations was  $10^7$ , and the learning rate was 0.5, at which the average accuracy reached a maximum of 84.3%. Finally, after 201 935 iterations of weight updates, the loss function reached a minimum value of 20.659 917. In the training set, the AUC of the BPNN model for predicting high-risk, medium-risk, and low-risk was increased by 6.5%, 8.9% and 8.3%, respectively, compared with the random forest model (all  $P < 0.05$ ). In the test set, the AUC of the BPNN model for predicting high-risk, medium-risk, and low-risk was increased by 5.2%, 9.4% and 13.4%, respectively, compared with the random forest model (all  $P < 0.05$ ). In both the training and test sets, the sensitivity, specificity, and accuracy of the BPNN model for predicting high-risk, medium-risk, and low-risk were higher than those of the random forest model. **Conclusion** Both the BPNN model and the random forest model constructed based on TyG, hs-CRP, and PIV exhibit good predictive efficacy for the severity grading of coronary artery lesions in acute STEMI patients, and the BPNN model outperforms the random forest model.

**[KEY WORDS]** ST-segment elevation myocardial infarction; severity grading of coronary artery lesions; novel inflammatory factors; backpropagation artificial neural network model

急性ST段抬高型心肌梗死(ST-segment elevation myocardial infarction, STEMI)属于急性冠脉综合征中较为常见的类型,是一种很严重的心血管疾病,可并发多种致死性的并发症,若未在早期给予及时有效的治疗,死亡率极高<sup>[1-3]</sup>。相关研究<sup>[1]</sup>显示,目前我国冠心病患病人数超过1 100万人,其中每年约100万人死于急性STEMI。因此,通过综合评估急性STEMI患者冠状动脉病变严重程度,并根据病情做出准确的治疗决策对于改善STEMI患者预后至关重要。目前急性STEMI患者冠状动脉病变严重程度评估主要基于冠状动脉造影等有创操作,但时间较为滞后,临床上缺少无创并能用于早期预测急性STEMI患者冠状动脉病变严重程度的有效指

标<sup>[4-6]</sup>。相关研究<sup>[7]</sup>揭示,免疫炎症反应并非急性STEMI病程中的伴随现象,而是其发生、发展的核心驱动机制。在动脉粥样硬化斑块由稳定状态向易损状态转变的炎症爆发进程中,单核细胞、中性粒细胞等固有免疫细胞与T淋巴细胞等适应性免疫细胞共同介导炎症级联反应,该反应可促使细胞大量分泌基质金属蛋白酶降解斑块纤维帽,同时释放组织因子并激活凝血级联反应,最终诱发斑块破裂及血栓形成。因此,免疫炎症反应在急性STEMI的病程中发挥了至关重要的作用,炎症指标在评估急性STEMI患者冠状动脉粥样硬化斑块易损性以及不良心血管事件发生风险方面具有重要的预测价值。新型炎症因子如中性粒细胞/淋巴细胞比值

(neutrophil to lymphocyte ratio, NLR)、血小板/淋巴细胞比值(platelet to lymphocyte ratio, PLR)、泛免疫炎症值(pan immune inflammatory value, PIV)以及全身免疫炎症指数(systemic immune inflammatory index, SII),这些由血常规计算出的指标逐渐成了评估冠心病炎症风险的新工具<sup>[8]</sup>。它们不仅能帮助我们判断风险高低,还能预测斑块的稳定性和未来心血管事件风险,为临床早期干预和个体化治疗提供了重要参考<sup>[9]</sup>。目前构建的用于预测急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的 Logistic 等单一模型,预测表现大多一般,其预测效能和准确度较低,而较少应用随机森林模型、反向传播人工神经网络(backpropagation artificial neural network, BPNN)模型等准确度更高的机器学习模型。本研究拟构建基于新型炎症因子的随机森林模型和 BPNN 模型,用以预测急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级,并观察其预测效果,现报道如下。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究对象

选取 2022 年 1 月—2024 年 10 月新疆医科大学第一附属医院心脏中心收治的 234 例急性 STEMI 患者作为研究对象,按 7:3 的比例随机分为训练集(164 例)和测试集(70 例),训练集按冠状动脉病变严重程度分级不同分为低危组 54 例(32.9%)、中危组 62 例(37.8%)以及高危组 48 例(29.3%)。纳入标准:年龄 25~75 岁;临床症状、心电图表现、心肌酶符合《急性冠脉综合征急性快速诊治指南(2019)》中 STEMI 诊断标准<sup>[10]</sup>。排除标准:合并心肌炎、心脏瓣膜性疾病;合并严重肝、肾功能不全者;合并血液系统疾病、自身免疫性疾病;合并恶性肿瘤者;造影剂过敏者;合并急性感染性疾病。

### 1.2 冠状动脉病变严重程度分级评估标准<sup>[10]</sup>

本研究所有急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级,根据冠状动脉造影结果得到的 SYNTAX 评分进行。SYNTAX 评分是根据冠状动脉病变解剖特点进行危险分层的积分系统,按病变位置、严重程度、分叉、钙化等解剖特点定量评价冠状动脉病变的复杂程度。根据 SYNTAX 评分将患者分为低危组(0~22 分)、中危组(23~32 分)以及高危组(33 分以上)。

### 1.3 观察指标

(1)所有急性 STEMI 患者于入院时记录年龄、

性别、体重指数(body mass index, BMI)、高血压、脑梗死、2 型糖尿病、吸烟史(曾连续或累计吸烟超过 6 个月,且在此期间平均每日吸烟至少 1 支)等基本情况。(2)所有急性 STEMI 患者于入院当天急诊抽取静脉血 5 mL,3 000 r/min 离心 10 min,取上清液在 -80 °C 下保存待检。采用酶联免疫吸附法检测白细胞介素 6(interleukin-6, IL-6)、脑钠肽(brain natriuretic peptide, BNP)以及肿瘤坏死因子  $\alpha$ (tumor necrosis factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ )含量;采用化学发光法检测甘油三酯(triglyceride, TG)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、低密度脂蛋白(low density lipoprotein, LDL)、高密度脂蛋白(high density lipoprotein, HDL)、血糖、高敏肌钙蛋白 I(high sensitivity troponin I, hs-cTnI)、肌酸激酶同工酶 MB(creatine kinase isoenzyme MB, CK-MB)、肌红蛋白(myoglobin, Myo)。甘油三酯葡萄糖指数(triglyceride-glucose index, TyG) =  $\ln(TG \times \text{血糖}/2)$ ;采用速率散射比浊法检测高敏 C 反应蛋白(high sensitivity C-reactive protein, hs-CRP)。(3)记录患者入院血常规相关指标:中性粒细胞计数、单核细胞计数、淋巴细胞计数以及血小板计数。NLR = 中性粒细胞计数/淋巴细胞计数, PLR = 血小板计数/淋巴细胞计数, PIV = 中性粒细胞计数  $\times$  血小板计数  $\times$  单核细胞计数, SII = 中性粒细胞计数  $\times$  血小板计数/淋巴细胞计数。(4)所有急性 STEMI 患者入院时急诊完善心脏 B 超检查,记录患者左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)。

### 1.4 统计学处理分析

1.4.1 随机森林模型构建 采用 SPSS 25.0 统计学软件和 R 4.1.2 统计分析软件对训练集数据进行分析。符合正态分布的计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,3 组间数据比较采用单因素方差分析。计数资料采用例数和百分比描述,3 组间数据比较采用  $\chi^2$  检验。采用多因素有序 Logistic 回归分析获得急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的独立预测因素,构建随机森林模型(加载“random Forest”程序包)。利用袋外数据不同结局事件分类错误率以及总体错误率评估随机森林模型的稳定性,分别用平均准确率降低指数以及平均基尼指数两种方法评估各变量在随机森林模型中的重要程度。 $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

1.4.2 BPNN 模型构建 采用 SPSS 25.0 和 R 4.5.1 统计学软件对训练集数据进行分析。

基于多因素有序 Logistic 回归分析最终筛选的

独立预测因素,构建 BPNN 模型(加载“neuralnet”程序包)。通过交叉验证和网格搜索进行超参数调优,筛选出最佳参数,BPNN 根据损失函数  $J(x_i, y_i) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (y_i - h_0(x_i))^2$  反向传播梯度下降法训练多层反馈网络,最大程度迭代更新以及优化各特征变量的权重值,以达到最小的预测误差。

**1.4.3 模型评估与验证** 采用 SPSS 25.0 对训练集和测试集数据进行统计学分析。在训练集和测试集中对所构建的模型进行预测效能评估。通过 ROC 曲线分析的曲线下面积 (area under the curve, AUC) 以及由混淆矩阵计算出的准确度、灵敏度和特异度来评估模型的预测效能。采用 DeLong 检验比较两组 AUC 的差异。 $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 训练集 3 组患者一般临床资料比较

训练集共纳入 164 例急性 STEMI 患者,其中低危组 54 例(32.9%),中危组 62 例(37.8%),高危组 48 例(29.3%),年龄 35 ~ 72 岁,平均(56.6 ± 7.1)岁。其中男性 103 例(62.8%),女性 61 例(37.2%)。3 组患者 2 型糖尿病发生率、血糖、TG 以及 TyG 比较,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。其中,2 型糖尿病发生率、血糖、TG、TyG 在中危组和高危组分别较低危组显著升高(均  $P < 0.05$ ),而 3 组患者年龄、性别、BMI、高血压占比、脑血管病占比、吸烟占比、LVEF、TC、LDL、HDL 以及 BNP 等比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ;表 1)。

表 1. 训练集 3 组患者一般临床资料比较

Table 1. Comparison of general clinical data among three groups of patients in the training set

项目	低危组(n=54)	中危组(n=62)	高危组(n=48)	$F/\chi^2$	P
年龄/岁	55.3±6.8	56.7±7.2	57.4±7.2	0.435	0.576
男性/[例(%)]	34/20	38/24	31/17	0.321	0.714
BMI/(kg/m <sup>2</sup> )	23.6±2.4	24.3±2.2	24.9±2.7	0.654	0.467
高血压/[例(%)]	35(64.8)	45(72.6)	34(70.8)	0.478	0.625
2 型糖尿病/[例(%)]	15(27.8)	32(51.6) <sup>a</sup>	30(62.5) <sup>a</sup>	5.698	0.025
脑梗死/[例(%)]	13(24.1)	17(27.4)	20(41.7)	1.665	0.289
吸烟史/[例(%)]	25(46.3)	30(48.4)	21(43.8)	0.439	0.673
LVEF/%	57.4±3.5	54.7±3.8	52.2±4.1	1.487	0.256
血糖/(mmol/L)	8.1±1.3	9.8±1.2 <sup>a</sup>	11.6±1.5 <sup>a</sup>	3.678	0.017
TG/(mmol/L)	2.3±0.4	2.9±0.5 <sup>a</sup>	3.7±0.5 <sup>a</sup>	2.574	0.038
TC/(mmol/L)	5.5±0.7	5.8±0.8	6.0±0.9	1.156	0.194
LDL/(mmol/L)	3.2±0.3	3.4±0.4	3.6±0.5	0.367	0.664
HDL/(mmol/L)	0.8±0.1	0.8±0.2	0.7±0.1	0.218	0.793
hs-cTnI/(ng/L)	145.7±25.1	150.8±26.9	156.4±27.9	1.786	0.075
CK-MB/(μg/L)	7.7±2.1	7.8±2.0	7.9±2.1	1.249	0.286
Myo/(μg/L)	96.8±20.5	102.3±21.3	106.9±21.5	1.634	0.093
TyG	1.1±0.2	1.4±0.3 <sup>a</sup>	2.0±0.4 <sup>a</sup>	4.587	0.011
BNP/(ng/L)	112.6±16.8	118.7±17.9	126.7±17.5	1.489	0.126

注:a 为  $P < 0.05$ ,与低危组比较。

### 2.2 训练集 3 组患者血清炎症因子水平比较

训练集 3 组患者 hs-CRP、SII 以及 PIV 比较,差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。其中,hs-CRP 在中危组和高危组分别较低危组升高 15.9% 和 67.3% (均  $P < 0.05$ ),SII 在中危组和高危组分别较低危组

升高 6.5% 和 13.3% (均  $P < 0.05$ ),PIV 在中危组和高危组分别较低危组升高 22.2% 和 46.5% (均  $P < 0.05$ )。而 3 组患者 IL-6、TNF- $\alpha$ 、NLR 以及 PLR 比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ;表 2)。

表 2. 训练集 3 组患者血清炎症因子水平比较

Table 2. Comparison of serum inflammatory factor levels among three groups of patients in the training set

项目	低危组 (n=54)	中危组 (n=62)	高危组 (n=48)	F	P
hs-CRP/(mg/L)	11.3±2.4	13.3±2.5 <sup>a</sup>	18.9±2.6 <sup>a</sup>	6.789	<0.001
IL-6/(ng/L)	0.46±0.09	0.48±0.10	0.50±0.11	0.436	0.556
TNF-α/(ng/L)	4.5±0.6	4.8±0.7	5.2±0.7	1.346	0.146
NLR	4.4±0.5	4.7±0.6	4.9±0.7	0.779	0.369
PLR	213.4±23.5	220.8±24.8	227.6±27.3	0.926	0.234
SII	687.6±45.3	732.4±50.2 <sup>a</sup>	778.9±55.3 <sup>a</sup>	4.668	0.011
PIV	327.4±35.6	400.2±38.9 <sup>a</sup>	479.7±42.3	6.927 <sup>a</sup>	<0.001

注:a 为 P<0.05,与低危组比较。

2.3 预测患者冠状动脉病变严重程度分级的多因素有序 Logistic 回归分析

以患者冠状动脉病变严重程度分级为因变量(高危=2,中危=1,低危=0),以单因素分析中有统计学意义的指标,包括 2 型糖尿病(是=1,否=0)、血糖(实际值)、TG(实际值)、TyG(实际值)、hs-CRP(实际值)、SII(实际值)以及 PIV(实际值)为自变量,代入多因素有序 Logistic 回归模型。结果显示,TyG、hs-CRP 以及 PIV 为急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的独立预测因素(P<0.05)。其中 PIV 每增加 100 个单位,患者冠状动脉病变严重程度增加 1 个等级的概率增加 4.358 倍(OR = 5.358,95% CI:1.698 ~ 12.559,P<0.001;表 3)。

表 3. 预测患者冠状动脉病变严重程度分级的多因素有序 Logistic 回归分析

Table 3. Multivariate ordinal Logistic regression analysis for predicting the severity grading of coronary artery lesions in patients

自变量	β	SE	Wald	P	OR	95% CI
TyG	0.545	0.121	5.889	0.024	2.116	1.232 ~ 3.586
hs-CRP	0.723	0.134	6.789	0.011	2.581	1.297 ~ 4.332
PIV	1.678	0.345	13.558	<0.001	5.358	1.698 ~ 12.559
常数项	-1.489	0.397	13.558	<0.001		

2.4 随机森林模型的构建

基于独立预测因素 TyG、hs-CRP 以及 PIV,构建随机森林模型,建模过程中训练集产生了约 1/3 的袋外数据。图 1 显示了随机森林模型预测冠状动脉病变严重程度分级(高危、中危、低危)的错误率以及袋外数据预测的总体错误率,经反复验证,当生成 2 654 棵决策树时,预测高危、中危、低危以及袋外数据的总体错误率分别稳定在 15.3%、19.2%、30.5% 以及 21.4%,说明该模型的准确率是稳定

的。运用平均准确率降低指数以及平均基尼指数评价独立预测因素在随机森林模型中的重要程度和贡献率,结果显示,TyG、hs-CRP 以及 PIV 这 3 个特征变量均对预测患者冠状动脉病变严重程度分级起了关键作用,其重要性评分分别为 69.3、78.4、84.2 以及 21.6、24.3、26.4(图 2)。

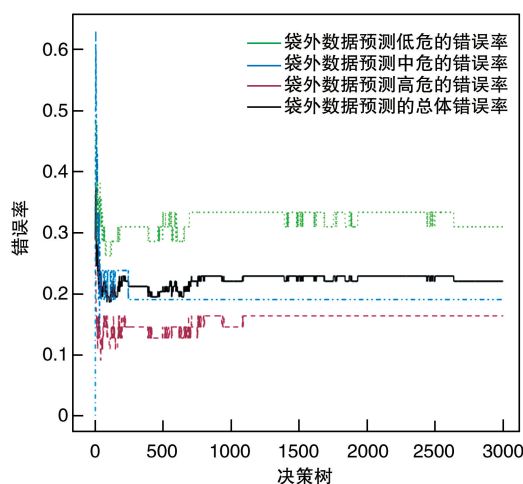


图 1. 随机森林模型的结构图

Figure 1. Structural diagram of the random forest model

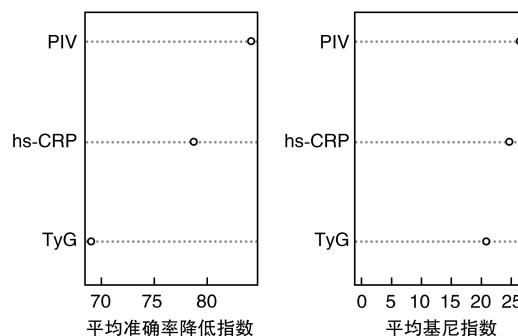


图 2. 平均准确率降低指数以及平均基尼指数的重要性评分图

Figure 2. Importance score plot of the mean decrease in accuracy and the mean decrease in Gini index

2.5 BPNN 模型的构建

基于独立预测因素 TyG、hs-CRP 以及 PIV,构建 BPNN 模型,通过 5 折交叉验证(即将数据集随机分为 5 份,使用其中 4 份子数据集作为模型的训练集,剩下 1 份子数据集用作模型的测试集,重复 5 次直至 5 份子数据集均被用于测试,并评估模型在 5 次迭代中测试集的平均准确率)和网格搜索进行超参数调优,筛选出的最佳参数组合为:BPNN 的网络拓扑结构为 3-4-2-3[hidden=c(4,2)],最大迭代次数为  $10^7$  次 (stepmax =  $10^7$ ),学习率为 0.5 (learning rate=0.5),此时平均准确率达到最高,为 84.3%。最终,模型经过 201 935 次迭代更新权重值后,损失函数达到最小值,为 20.659 917,训练结束,模型达到最佳拟合效果(图 3)。

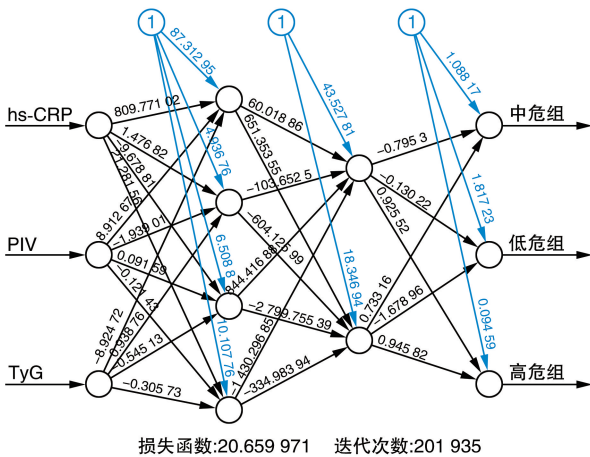


图 3. BPNN 模型结构图

基于 TyG、hs-CRP 以及 PIV 作为输入层的 3 个神经元构建 BPNN 模型,隐藏层的最佳神经元个数分别为 4 和 2,输出层为低危组、中危组以及高危组 3 个神经元,运用反向传播梯度下降法调整权重,图中黑色箭头上的数值为神经元之间的连接权重,蓝色箭头上的数值为偏置项的连接权重。

Figure 3. Structural diagram of the BPNN model

2.6 机器学习模型预测效能评估

训练集 BPNN 模型预测高危、中危、低危的 AUC 较随机森林模型分别升高 6.5%、8.9% 和 8.3% (均  $P < 0.05$ );测试集 BPNN 模型预测高危、中危、低危的

AUC 较随机森林模型分别升高 5.2%、9.4% 和 13.4% (均  $P < 0.05$ )。无论训练集还是测试集, BPNN 模型预测高危、中危、低危的灵敏度、特异度以及准确度均高于随机森林模型(图 4、图 5、表 4 和表 5)。

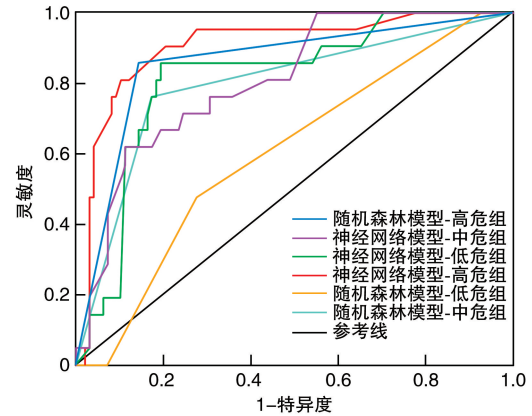


图 4. 训练集不同机器学习模型预测患者冠状动脉病变严重程度分级的 ROC 曲线

Figure 4. ROC curves of different machine learning models for predicting the severity grading of coronary artery lesions in the training set

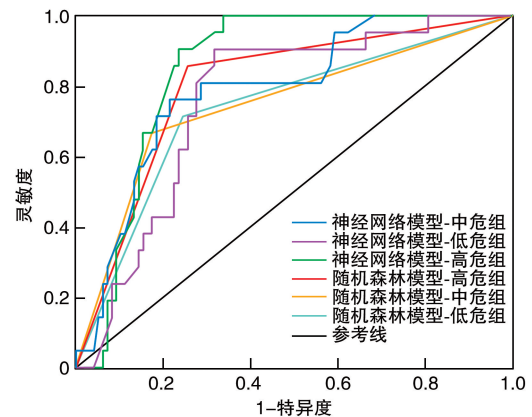


图 5. 测试集不同机器学习模型预测患者冠状动脉病变严重程度分级的 ROC 曲线

Figure 5. ROC curves of different machine learning models for predicting the severity grading of coronary artery lesions in the test set

表 4. 不同机器学习模型预测患者冠状动脉病变严重程度分级的 AUC

Table 4. AUC of different machine learning models for predicting the severity grading of coronary artery lesions in patients

模型类型		低危	中危	高危
随机森林模型	训练集	0.743 (95% CI:0.708 ~ 0.829)	0.756 (95% CI:0.715 ~ 0.832)	0.852 (95% CI:0.778 ~ 0.892)
	测试集	0.693 (95% CI:0.654 ~ 0.779)	0.734 (95% CI:0.689 ~ 0.811)	0.806 (95% CI:0.743 ~ 0.876)
BPNN 模型	训练集	0.805 (95% CI:0.755 ~ 0.844)	0.823 (95% CI:0.776 ~ 0.853)	0.907 (95% CI:0.836 ~ 0.942)
	测试集	0.786 (95% CI:0.724 ~ 0.837)	0.803 (95% CI:0.756 ~ 0.842)	0.848 (95% CI:0.811 ~ 0.914)

表 5. 不同机器学习模型预测患者冠状动脉病变严重程度分级的灵敏度、特异度以及准确度  
Table 5. Sensitivity, specificity, and accuracy of different machine learning models for predicting the severity grading of coronary artery lesions in patients

模型类型		低危			中危			高危		
		灵敏度/%	特异度/%	准确度/%	灵敏度/%	特异度/%	准确度/%	灵敏度/%	特异度/%	准确度/%
随机森林模型	训练集	83.3	89.1	87.2	80.6	89.2	86.0	83.3	94.8	91.5
	测试集	73.9	89.4	84.3	68.0	84.4	78.6	68.2	81.3	77.1
BPNN 模型	训练集	87.0	90.0	89.0	83.9	92.2	89.0	87.5	96.6	93.9
	测试集	78.3	89.4	85.7	76.0	88.9	84.3	77.3	87.5	84.3

### 3 讨论

近年来由于国家经济快速发展和人民生活质量的提高,急性 STEMI 在我国的发病率呈现逐年升高的趋势,由于急性 STEMI 可并发室颤、心源性休克、心力衰竭、心源性猝死等危及生命的并发症<sup>[11-13]</sup>,因此早期对急性 STEMI 病情严重程度作出准确的判断,对于指导临床决策以及改善患者预后至关重要。

本研究多因素有序 Logistic 回归分析显示, TyG、hs-CRP 以及 PIV 为急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的独立预测因素。相关研究<sup>[14-15]</sup>显示, TyG 升高直接营造“促炎-促氧化”环境,诱发免疫炎症反应、氧化应激损伤、糖脂代谢紊乱,促进冠状动脉粥样硬化性心脏病的发生、发展,可有效反映冠状动脉病变严重程度。由于免疫炎症反应是 STEMI 的重要发病机制,因此炎症相关的生物标志物也成了评估 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度以及发生不良心血管事件的重要预测因子<sup>[16-17]</sup>。作为新型的复合型炎症标志物, PIV 综合了中性粒细胞、单核细胞和血小板,全面反映了机体的免疫炎症潜力<sup>[18]</sup>。中性粒细胞、单核细胞作为免疫炎症细胞可浸润缺血的心肌,启动细胞因子炎症级联反应和氧化应激损伤,不仅可直接诱导心肌细胞损伤,促进动脉粥样硬化的发生、发展,还可引起脂质斑块的不稳定和易损性,并诱发 STEMI<sup>[19-20]</sup>。STEMI 患者冠状动脉狭窄与血栓形成密切相关,血小板不仅是血栓发生的重要介质,活化的血小板还可促进炎症因子的释放,从而加速动脉粥样硬化的发生、发展<sup>[19]</sup>。相关研究<sup>[19-20]</sup>显示,高水平的 PIV 与 STEMI 患者不良预后呈明显正相关。其可能原因推断与 PIV 可反映冠状动脉粥样硬化病变严重程度及脂质斑块易损性有关。当 PIV 升高时,中性粒细胞、单核细胞、血小板等促炎、促血栓成分相较

于淋巴细胞等抗炎、修复成分占据优势,机体处于全身促炎状态。这种由 PIV 反映的全身炎症状态可通过血液循环作用于冠状动脉粥样硬化斑块局部,诱导典型易损斑块病理特征,包括纤维帽变薄、脂质核心增大及斑块内新生血管渗漏。

近年来随着人工智能的快速发展,机器学习在医学研究中发挥着越来越重要的作用,因此有望借助机器学习实现 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的早期发现和精确预测。随机森林模型属于机器学习模型中的集成学习方法,由于其结果具有较高的准确度和泛化能力,因此近年来被逐渐应用于各类疾病的诊断、严重程度分级以及预后评估等方面<sup>[21-22]</sup>。而作为医学领域应用较为广泛的神经网络模型, BPNN 模型采用基于损失函数的反向传播梯度下降法训练多层反馈网络,最大限度地优化各特征变量的权重,从而实现最小化预测误差。对于冠心病、糖尿病等疾病, BPNN 均可找到合适的网络结构来进行学习,具有较好的非线性映射能力、拓展性、自适应性以及容错性<sup>[23]</sup>。邹琼等<sup>[23]</sup>基于年龄、糖尿病持续时间、收缩压、糖化血红蛋白、LDL 构建了用于预测 2 型糖尿病肾病的 BPNN 模型,结果显示,无论是训练集还是测试集,其预测效能和准确度都明显高于列线图模型、K 近邻模型、随机森林模型以及支持向量机模型,可用于及时准确识别 2 型糖尿病肾病。Wang 等<sup>[24]</sup>构建了用于预测冠心病 PCI 术后主要不良心血管事件发生风险的 BPNN 模型,结果证实 BPNN 模型在各评估参数上具有明显优势,预测误差更小,净收益率更高,具有更好的泛化能力和鲁棒性。而本研究基于多因素分析筛选出来的特征变量分别构建随机森林模型以及 BPNN 模型,未将单因素分析中有意义的所有变量(如 2 型糖尿病、血糖、SII 等)直接投入模型,其原因为:首先,单因素分析中有意义的变量构建的模型,其预测效能低于多因素分析筛选出来的特

征变量构建的模型,特征筛选的目标就是剔除这些有害变量,帮助模型聚焦于真正的信号,从而提升在新数据上的预测准确性;其次,当特征数量过多,而样本量相对有限时,数据在空间中会变得非常稀疏。对于 BPNN 而言,这意味着需要更多数据才能填满高维空间,找到有效的模式,多因素筛选能有效减少维度,降低模型对数据量的需求。相较于随机森林模型,基于 TyG、hs-CRP 以及 PIV 构建的 BPNN 模型的预测效能更高,为 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级的准确预测提供了算法支持和理论依据。

综上所述,基于 TyG、hs-CRP 以及 PIV 构建的 BPNN 模型和随机森林模型,对急性 STEMI 患者冠状动脉病变严重程度分级均具有良好的预测效能,且 BPNN 模型的预测效能优于随机森林模型。这为临床医师在早期精准识别 STEMI 高危人群,并依据不同危险分层制定精细化、个体化治疗方案提供了依据。针对模型识别出的高危人群,建议立即启动由心脏团队主导、以完全血运重建为目标、强化围术期抗栓治疗与精细化管理,同时兼顾出血与缺血风险的个体化决策。

本研究采用回顾性、单中心设计,训练集与测试集的样本量相对有限,这可能会对模型在更广泛人群中的稳定性和普适性产生影响。后续研究应借助更大规模、前瞻性、多中心的数据进行验证,并持续优化特征工程以及模型的可解释性,从而推动其应用于临床实践,改善高危急性 STEMI 患者的临床结局。

#### [参考文献]

- [1] 汪浩,唐雯奕,马渝,等. 中国 ST 段抬高型心肌梗死院前溶栓现状和影响因素的调查研究[J]. 中华急诊医学杂志, 2024, 33(11): 1529-1535.  
WANG H, TANG W Y, MA Y, et al. Current status and analysis of influencing factors of prehospital thrombolysis for ST segment elevation myocardial infarction in China[J]. Chin J Emerg Med, 2024, 33(11): 1529-1535.
- [2] 翟虎,张纯溪,王禹,等. 急性 ST 段抬高型心肌梗死患者急诊介入前心室颤动预测模型构建及验证[J]. 临床心血管病杂志, 2023, 39(6): 459-465.  
ZHAI H, ZHANG C X, WANG Y, et al. Construction and verification of a prediction model of ventricular fibrillation in patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction before primary percutaneous coronary intervention [J]. J Clin Cardiol, 2023, 39(6): 459-465.
- [3] ALENCAR J N, FERES F, MARCHI M F N, et al. Beyond STEMI-NSTEMI paradigm: dante pazzanese's proposal for occlusion myocardial infarction diagnosis[J]. Arq Bras Cardiol, 2024, 121(5): e20230733.
- [4] VOLL F, KUNA C, SCALAMOGNA M, et al. Timing of multivessel revascularization in stable patients with STEMI: a systematic review and network meta-analysis [J]. Rev Esp Cardiol (Engl Ed), 2025, 78(2): 127-137.
- [5] 王岚,马玉良,朱天刚,等. ST 段抬高型心肌梗死患者经皮冠状动脉介入治疗后左心室整体长轴应变减损对远期预后的影响[J]. 中国循环杂志, 2024, 39(5): 451-455.  
WANG L, MA Y L, ZHU T G, et al. Impaired global longitudinal strain predicts poor prognosis in patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction after percutaneous coronary intervention[J]. Chin Circ J, 2024, 39(5): 451-455.
- [6] DE ALENCAR NETO J N, SCHEFFER M K, CORREIA B P, et al. Systematic review and Meta-analysis of diagnostic test accuracy of ST-segment elevation for acute coronary occlusion[J]. Int J Cardiol, 2024, 402: 131889.
- [7] 贺威,李馨,王秋雨,等. 老年急性 ST 段抬高型心肌梗死患者急诊介入术后慢血流或无复流危险因素及预后分析[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2024, 26(7): 742-745.  
HE W, LI X, WANG Q Y, et al. Risk factors of slow blood flow or no reflow in STEMI patients after emergency PCI and their prognosis [J]. Chin J Geriatr Heart Brain Vessel Dis, 2024, 26(7): 742-745.
- [8] EYIOL A, EYIOL H, YILMAZ A, et al. Pan-immune-inflammatory value (PIV) and HALP score as independent prognostic indicators in acute coronary syndrome patients [J]. J Clin Med, 2026, 15(4): 1660.
- [9] AN S Y, CHE W Q, GAO Y X, et al. Predictive value of complete blood count indicators for short-term mortality in patients with combined coronary artery disease and chronic kidney disease [J]. Int J Nephrol Renovasc Dis, 2025, 18: 113-122.
- [10] 中国医师协会急诊医师分会, 国家卫健委能力建设与继续教育中心急诊学专家委员会, 中国医疗保健国际交流促进会急诊急救分会. 急性冠脉综合征急诊快速诊治指南(2019) [J]. 临床急诊杂志, 2019, 20(4): 253-262.  
Chinese College of Emergency Physicians, Expert Committee on Emergency Medicine of the Capacity Building and Continuing Education Center of the National Health Commission, Emergency Medicine Branch of China International Exchange and Promotive Association for Medical and Health Care. Guidelines for rapid diagnosis and treatment of acute coronary syndrome in emergency (2019)

- [J]. *J Clin Emerg*, 2019, 20(4): 253-262.
- [11] 任燕飞, 伍逸轩, 陈磊, 等. 急性 ST 段抬高型心肌梗死合并高血压患者的 CMRI 心外膜脂肪分析[J]. *中国循证心血管医学杂志*, 2024, 16(4): 425-428, 432. REN Y F, WU Y X, CHEN L, et al. Cardiac magnetic resonance imaging of epicardial adipose tissue in patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction complicated by hypertension[J]. *Chin J Evid Based Cardiovasc Med*, 2024, 16(4): 425-428, 432.
- [12] 王艳飞, 王华荣, 叶卉, 等. SI 及 NLR 对急性 ST 段抬高型心肌梗死短期预后的评估能力[J]. *河北医学*, 2023, 29(11): 1902-1905. WANG Y F, WANG H R, YE H, et al. Evaluation of SI and NLR for short-term prognosis in acute ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *Hebei Med*, 2023, 29(11): 1902-1905.
- [13] 袁祖贻. 2024 年《中国慢性冠脉综合征患者诊断及管理指南》更新要点和建议[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2024, 32(12): 1013-1019. YUAN Z Y. Key points and suggestions for the update of 2024 "diagnosis and management guidelines for chronic coronary syndrome patients in China"[J]. *Chin J Arterioscler*, 2024, 32(12): 1013-1019.
- [14] ZHOU J, HUANG H, HUANG H, et al. Association of triglyceride-glucose index and its combination with adiposity-related indices with the incidence of myocardial infarction; a cohort study from the UK Biobank[J]. *Int J Obes*, 2024, 48(10): 1498-1505.
- [15] CHEN N, XU Y, XU C, et al. Effects of triglyceride glucose (TyG) and TyG-body mass index on sex-based differences in the early-onset heart failure of ST-elevation myocardial infarction[J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2024, 34(3): 590-597.
- [16] EGGERS K M, BATRA G, LINDAHL B, et al. Temporal biomarker concentration patterns during the early course of acute coronary syndrome[J]. *Clin Chem Lab Med*, 2024, 62(6): 1167-1176.
- [17] REDDY K S S, VARADARAJ P, NALLUSAMY G, et al. Correlation between hemoglobin A1c (HbA1c) and high-sensitivity C-reactive protein (hs-CRP) in myocardial infarction patients and their six-month mortality follow-up[J]. *Cureus*, 2024, 16(8): e67070.
- [18] RAMASAMY J, MURUGIAH V, DHANAPALAN A, et al. Diagnostic utility of pan-immune-inflammation value (PIV) in predicting insulin resistance: results from the national health and nutrition examination survey (NHANES) 2017-2020[J]. *EJIFCC*, 2024, 35(2): 100-110.
- [19] 李晓超, 温澄非, 田苏. 单核细胞与高密度脂蛋白胆固醇比值联合内脏指数与 ST 段抬高型心肌梗死患者临床预后的关系[J]. *中国医刊*, 2024, 59(5): 533-537. LI X C, WEN C F, TIAN S. Relationship between monocyte to high-density lipoprotein cholesterol ratio combined with visceral index and clinical prognosis in patients with ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *Chin J Med*, 2024, 59(5): 533-537.
- [20] 李世添, 陈宇明, 韦吉伟. 血小板/淋巴细胞比值、中性粒细胞/淋巴细胞比值及危险分层评分对 ST 段抬高型心肌梗死行经皮冠状动脉介入术后主要心血管不良事件的预测价值[J]. *安徽医药*, 2023, 27(2): 328-332. LI S T, CHEN Y M, WEI J W. Predictive value of PLR, NLR and risk stratification score for major cardiovascular adverse events in patients with ST segment elevation myocardial infarction after direct percutaneous coronary intervention[J]. *Anhui Med Pharm J*, 2023, 27(2): 328-332.
- [21] XU C, KONG Y. Random forest model in tax risk identification of real estate enterprise income tax[J]. *PLoS One*, 2024, 19(3): e0300928.
- [22] KUMAGAI N, JAKOVLJEVIĆ M. Random forest model used to predict the medical out-of-pocket costs of hypertensive patients[J]. *Front Public Health*, 2024, 12: 1382354.
- [23] 邹琼, 吴曦, 张杨, 等. 基于麻雀搜索算法优化的 BP 神经网络模型对 2 型糖尿病肾病的预测研究[J]. *中国全科医学*, 2024, 27(8): 961-970. ZOU Q, WU X, ZHANG Y, et al. Prediction of type 2 diabetic nephropathy based on BP neural network optimized by sparrow search algorithm[J]. *Chin Gen Pract*, 2024, 27(8): 961-970.
- [24] WANG L, WANG Y, WANG W, et al. Predictive value of triglyceride glucose index combined with neutrophil-to-lymphocyte ratio for major adverse cardiac events after PCI for acute ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 12634.

(此文编辑 许雪梅)