

老年嵌顿疝肠坏死风险预测神经网络模型:融合生物学指标 Treg/Th17 比值与临床指标模型的验证与开发

罗坤, 吴淼*, 袁远洪

宜宾市第二人民医院胃肠疝外科, 四川宜宾 644000

[中图分类号] R656.2 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.1839.2026.0413

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 罗坤,吴淼,袁远洪.老年嵌顿疝肠坏死风险预测神经网络模型:融合生物学指标 Treg/Th17 比值与临床指标模型的验证与开发[J].解放军医学杂志,DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.1839.2026.0413.

[收稿日期] 2025-09-02 [录用日期] 2026-01-24 [上线日期] 2026-04-13

[摘要] **目的** 融合生物学指标调节性T细胞/辅助性T细胞17(Treg/Th17比值)与临床指标建立神经网络模型,为老年嵌顿疝肠坏死高危人群提供个性化的预测。**方法** 选取2023年1月—2025年1月于宜宾市第二人民医院就诊的140例嵌顿性腹股沟疝老年患者为研究对象进行回顾性分析,其中男95例,女45例;年龄65~83(74.6±8.2)岁。依据术中是否存在肠坏死分为无肠坏死组($n=88$)与肠坏死组($n=52$)。收集并比较两组患者的一般资料。采用最小绝对收缩和选择算子法(LASSO)回归筛选老年嵌顿疝肠坏死的变量。采用logistic回归分析老年嵌顿疝肠坏死的影响因素。采用计算机产生随机数法将总样本($n=140$)按7:3的比例分为训练集($n=98$)与验证集($n=42$),在训练集上使用Python 3.6构建反向传播(BP)神经网络模型,采用R软件(v3.5.3)结合rms程序包绘制校正曲线评估模型预测概率与实际发生概率的一致性,受试者操作特征(ROC)曲线及曲线下面积(AUC)评估模型的预测效能。采用决策曲线分析(DCA)评估模型在不同阈值概率下的临床净收益。**结果** (1)口服抗凝剂史、腹部手术史、嵌顿史、嵌顿类型、嵌顿时间、D-二聚体、中性粒细胞计数(NEUT)、Treg/Th17比值均是老年嵌顿疝肠坏死的影响因素($P<0.05$)。(2)Treg/Th17比值对模型分类的贡献度最高,其次是D-二聚体、嵌顿时间、嵌顿类型、NEUT、嵌顿史、口服抗凝剂史、腹部手术史。训练集和验证集的预测概率与实际概率具有良好的 consistency(Brier 分数=0.073、0.075),提示模型校准度良好。训练集中BP神经网络模型的预测准确率为94.21%,AUC为0.913(95%CI 0.821~0.965, $P<0.001$);验证集中的预测准确率为90.45%,AUC为0.896(95%CI 0.815~0.957, $P<0.001$),提示该模型准确性良好。DCA分析显示该模型的临床价值较高。**结论** 融合生物学指标 Treg/Th17 比值与临床指标建立的神经网络模型对老年嵌顿疝肠坏死风险具有较高的预测价值。

[关键词] 老年;嵌顿疝;肠坏死;Treg/Th17比值;神经网络模型

Development of a risk warning system for intestinal necrosis in elderly incarcerated hernias: A neural network model integrating biological indicators Treg/Th17 and clinical indicators

Luo Kun, Wu Miao*, Yuan Yuan-Hong

Department of Gastrointestinal Hernia Surgery, the Second People's Hospital of Yibin City, Yibin, Sichuan 644000, China

*Corresponding author, E-mail: gongziddtop@163.com

[Abstract] **Objective** A neural network model was established by integrating biological indicators such as regulatory T cells (Treg) and helper T cell 17 (Th17) with clinical indicators, providing personalized predictions for elderly patients at high risk of intestinal necrosis due to incarcerated hernia. **Methods** 140 elderly patients with incarcerated inguinal hernia who visited our hospital from January 2023 to January 2025 were selected as the research subjects, with 95 males and 45 females. The age ranged from 65 to 83 years, with an average age of (74.6±8.2) years. According to the presence or absence of intestinal necrosis during operation, the patients were divided into non-intestinal necrosis group ($n=88$) and intestinal necrosis group ($n=52$). The clinical data of the two groups were collected and compared. The least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression method was used to

[作者简介] 罗坤, 硕士研究生, 主治医师, 主要从事研究疝与腹壁等的临床研究

[通信作者] 吴淼, E-mail: gongziddtop@163.com

screen the influencing factors of intestinal necrosis in elderly incarcerated hernia. Logistic regression analysis was employed to identify the risk factors for intestinal necrosis in elderly incarcerated hernia. The total sample ($n=140$) was divided into a training set ($n=98$) and an internal validation set ($n=42$) in a 7:3 ratio using the random number generation method of the computer. The back propagation (BP) neural network model was constructed using Python 3.6 on the training set. Using R software (version 3.5.3) in conjunction with the rms package, a calibration curve was drawn to evaluate the consistency between the predicted probabilities of the model and the actual occurrence probabilities. The receiver operating characteristic (ROC) and the area under the curve (AUC) were used to assess the predictive efficacy of the model. The clinical net benefit of the model at different threshold probabilities was evaluated using decision curve analysis (DCA). **Results** (1) Oral anticoagulant history, abdominal surgery history, incarceration history, incarceration type, incarceration time, D-dimer, neutrophil count (NEUT) and Treg/Th17 were risk factors for intestinal necrosis in elderly patients with incarcerated hernia ($P<0.05$). (2) Treg/Th17 had the highest contribution to model classification, followed by D-dimer, impaction time, impaction type, NEUT, impaction history, oral anticoagulant history, abdominal surgery history. The predicted probabilities in the training set and the validation set were highly consistent with the actual probabilities (Brier score=0.073, 0.075), suggesting good model calibration. The prediction accuracy of the BP neural network model in the training set was 94.21%, with an AUC of 0.913 (95% CI 0.821-0.965, $P<0.001$). The prediction accuracy in the validation set was 90.45%, with an AUC of 0.896 (95% CI 0.815-0.957, $P<0.001$), the accuracy of this model is very good. DCA analysis showed that the model had high clinical value. **Conclusions** The neural network model based on Treg/Th17 fusion has a high predictive value for the risk of intestinal necrosis in elderly patients with incarcerated hernia.

[Key words] the elderly; incarcerated hernia; intestinal necrosis; Treg/Th17; neural network model

腹股沟区域的腹外疝统称为腹股沟疝，涵盖斜疝、直疝及股疝3种类型。当这3种疝型发生急性嵌顿时，均会导致疝内容物血液循环障碍，进而引发局部血液灌注不足，此病理过程常伴随多种严重并发症，包括组织水肿、急性炎症及疝内容物缺血性坏死等。尤其在高龄患者中，病情进展迅速且预后较差^[1]。研究显示，60岁以上人群腹股沟疝发生率超过50%，而嵌顿后肠坏死死亡率明显升高^[2]。传统上依赖临床症状(如剧烈腹痛、恶心呕吐、停止排便排气)和影像学检查进行诊断，但缺乏早期预警手段，常错失最佳治疗时机，导致确诊时肠管已发生不可逆的缺血坏死。因此，开发一种能在手术前、甚至在症状完全显现前预警肠坏死风险的工具具有重要临床价值。近年来，免疫调节机制在肠坏死中的作用逐渐受到重视。围手术期免疫学研究表明，创伤、手术等急性应激可在数小时内引发强烈的全身免疫反应，其中调节性T细胞(regulatory T cells, Treg)与辅助性T细胞17(T helper 17 cells, Th17)的平衡是关键的免疫调节枢纽，其失衡与组织炎症损伤程度密切相关^[3-4]。Treg通过抑制炎症反应保护组织，而Th17则通过分泌IL-17等促炎因子加剧炎症损伤，共同参与肠道的免疫反应。在嵌顿疝导致的肠缺血坏死过程中，Treg/Th17比值失衡可能加速病情进展^[5]。尽管Treg与Th17的体内动力学特征存在固有差异，但急诊手术麻醉前1~2h所捕获的免疫状态，可客观反映患者在接受确定性手术干预前，全身免疫系统对肠管嵌顿缺血这一急性应激状态的即时性、综合性应答。该时点的选择为探索其作为术前预测标志物的潜在价值提供了独特的研究视角与

实验基础。同时，人工智能，特别是以神经网络为代表的深度学习技术，在预测疝外科手术并发症及结局方面已展现出卓越的非线性模式识别能力，为整合多维度、复杂数据提供了成熟的方法学工具。神经网络模型在医疗领域已展现出较强的非线性映射能力，可整合多维度数据(如生物标志物、临床症状、影像学特征)进行模式识别。然而，目前对于Treg/Th17比值与嵌顿疝肠坏死风险的相关性研究较少。因此，本研究拟于急诊手术麻醉前1~2h采集患者外周血标本，构建融合Treg/Th17比值与神经网络的模型为老年嵌顿疝肠坏死高危人群提供个性化的预测。有望实现对肠坏死风险的早期、精准预测，为临床决策提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象 选取2023年1月—2025年1月于宜宾市第二人民医院就诊的140例嵌顿性腹股沟疝老年患者为研究对象进行回顾性研究，其中男95例，女45例；年龄65~83(74.6±8.2)岁。纳入标准：(1)临床诊断为嵌顿性腹股沟疝^[6]，且需要立即进行急诊手术；(2)年龄≥60岁；(3)疝内容物为肠管组织；(4)临床资料完整。排除标准：(1)择期手术；(2)严重心、肝、肾功能不全；(3)合并恶性肿瘤；(4)凝血功能障碍；(5)依从性较差；(6)免疫功能障碍。依据是否发生肠坏死将所有患者分为无肠坏死组($n=88$)与肠坏死组($n=52$)。肠坏死诊断标准^[7]：术中见肠管暗黑色或紫黑色、终末小动脉搏动消失、无动力蠕动、对刺激反应消失，并且术后病理提示肠坏死。本研究获宜宾市第二人民医院伦理委员会审批(2022-

12-013)。

1.2 一般资料收集 收集所有患者年龄、性别、体重指数(body mass index, BMI)、心率、平均收缩压、平均舒张压、吸烟史(≥ 10 年, 平均10支/d)、饮酒史(≥ 10 年, 酒精含量115~154 g/d)、糖尿病史、高血压史、高血脂症史、口服抗凝剂史、腹部手术史、慢性便秘、肠梗阻、嵌顿史、嵌顿类型、嵌顿时间等一般资料。

1.3 手术方式 所有患者均在急诊全身麻醉状态下行腹腔镜下经腹膜前疝修补术(transabdominal preperitoneal prosthesis, TAPP)。对于涉及肠管坏死、穿孔或高度怀疑坏死的患者, 先行疝囊高位结扎、组织修复, 然后二期行无张力疝修补术的方式进行治疗。补片修补手术通过脐周切口及锁骨中线脐下2 cm位置切口建立腹腔镜及操作通道, 在完整分离疝囊并确保腹膜前间隙完整性的前提下, 采用规格为15 cm \times 9 cm的自粘补片(PP1509G, 美国柯惠公司)完成缺损修补。高位结扎及组织修补手术需要经腹腔完整拖回疝囊, 经疝囊口行高位结扎手术。

1.4 实验室指标检测 手术麻醉前1~2 h, 采集患者肘静脉血5 ml, 以3000 r/min离心15 min, 留取血清置于4℃冰箱保存待测。采用电阻抗法及激光流式细胞术法通过血细胞分析仪(BC-6800Plus, 深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司)检测白细胞计数(white blood cell, WBC)、血小板计数(blood platelet count, PLT)、淋巴细胞计数、中性粒细胞计数(neutrophil, NEUT), 并计算中性粒细胞/淋巴细胞比值(neutrophils/lymphocyte, NLR); 采用免疫比浊法通过全自动生化分析仪(C3000, 深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司)检测C反应蛋白(C-reactive protein, CRP)水平; 采用磁珠凝固法检测凝血酶原时间(prothrombin time, PT)、活化部分凝血活酶时间(activated partial thromboplastin time, APTT), 凝固法检测纤维蛋白原(fibrinogen, Fib)水平, 免疫比浊法检测D-二聚体水平, 检测仪器均为全自动凝血分析仪(BC-6000, 深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司); 采用流式细胞仪(Navios EX, 美国贝克曼库尔特有限公司)检测Th17、Treg, 并计算Treg/Th17比值。

1.5 模型的构建与评价 采用最小绝对收缩和选择算子法(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)筛选出影响老年嵌顿疝肠坏死的核心变量, 并运用最小准则(1-SE), 采用10倍交叉验证法以调整筛选的变量的正则化参数 λ 。进一步采用logistic回归分析老年嵌顿疝肠坏死的危险因素。通过Python 3.6以二分类变量事件结局(预测的结果概率用0.5的阈值转换为二元结果)作为结果变量构建反向传播

(back propagation, BP)神经网络模型, 采用计算机产生随机数法将总样本($n=140$)按7:3的比例分为训练集($n=98$)与验证集($n=42$)。在训练集上构建BP神经网络模型, 并在验证集上评估模型的泛化性能。BP神经网络采用单隐藏层结构, 隐藏层神经元数量通过网络搜索结合10折交叉验证在训练集上确定, 以最小化交叉验证误差。模型使用ReLU(rectified linear unit)作为隐藏层激活函数, 输出层使用Sigmoid激活函数以获得概率输出。训练过程中采用Adam优化器, 以二元交叉熵作为损失函数。为评估输入变量对模型预测的贡献度, 采用基于连接权重的Garson算法计算变量重要性评分。该算法通过解析网络输入层与隐藏层之间的连接权重, 量化每个输入变量对输出结果的相对贡献, 评分越高表示该变量对模型分类决策的影响越大。采用R软件(v3.5.3)结合rms程序包绘制校正曲线评估模型预测概率与实际发生概率的一致性, 受试者操作特征(receiver operating characteristics, ROC)曲线及曲线下面积(area under the curve, AUC)评估模型的预测效能。计算并输出训练集和验证集的准确度、敏感度、特异度、F1评分等指标。采用决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评估模型在不同阈值概率下的临床净收益。

1.6 统计学处理 采用SPSS 23.0软件进行统计分析。计量资料以 $\pm s$ 表示, 两组间比较采用 t 检验, 计数资料以例(%)表示, 两组间比较采用 χ^2 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组一般资料比较 肠坏死组中有口服抗凝剂史、腹部手术史、慢性便秘、肠梗阻、嵌顿史 ≥ 2 次、股疝、嵌顿时间 ≥ 12 h的患者比例明显高于无肠坏死组($P < 0.05$), 两组年龄、性别、BMI、心率等其他一般资料差异均无统计学意义($P > 0.05$, 表1)。

2.2 两组实验室指标比较 肠坏死组CRP、D-二聚体水平及WBC、NEUT、NLR、Treg/Th17比值明显高于无肠坏死组($P < 0.05$), 淋巴细胞计数明显低于无肠坏死组($P < 0.05$), 两组Fib水平及PT、APTT、PLT差异均无统计学意义($P > 0.05$, 表2)。

2.3 老年嵌顿疝肠坏死风险的LASSO回归筛选变量 将表1、2中 $P < 0.05$ 的变量纳入LASSO回归分析, 基于最小准则的1个标准误差, 采用10倍交叉验证方法确定LASSO回归模型的调优参数 λ 。特征选择时, 以最小二项平均偏差对应的 λ 值作为筛选标准, 并依据最小准则、1-SE准则在最优 λ 值位置绘制虚线(图1A)。模型随 λ 值增加而逐渐压缩, 纳入模型的特征数量随之减少, 同时模型对主要变量的筛选精准度会提升, 依据 $\log(\lambda)$ 序列绘制系数剖

表1 两组嵌顿性腹股沟疝老年患者一般资料比较

Tab.1 Comparison of general data of two groups of elderly patients with incarcerated inguinal hernia

项目	无肠坏死组(n=88)	肠坏死组(n=52)	χ^2/t	P
年龄(岁, $\bar{x}\pm s$)	75.02±7.86	73.79±7.93	0.890	0.375
性别[例(%)]			0.412	0.521
男	58(65.9)	37(71.2)		
女	30(34.1)	15(28.8)		
BMI(kg/m ² , $\bar{x}\pm s$)	23.24±1.71	23.75±1.89	1.597	0.112
心率(次/min, $\bar{x}\pm s$)	87.22±4.82	88.71±4.86	1.758	0.081
平均收缩压(mmHg, $\bar{x}\pm s$)	121.03±5.63	122.36±5.55	1.363	0.175
平均舒张压(mmHg, $\bar{x}\pm s$)	86.73±4.51	85.64±4.45	1.138	0.257
吸烟史[例(%)]			0.121	0.728
无	23(26.1)	15(28.8)		
有	65(73.9)	37(71.2)		
饮酒史[例(%)]			0.136	0.712
无	21(23.9)	11(21.2)		
有	67(76.1)	41(78.8)		
糖尿病史[例(%)]			2.372	0.124
无	35(39.8)	14(26.9)		
有	53(60.2)	38(73.1)		
高血压史[例(%)]			0.487	0.485
无	32(36.4)	22(42.3)		
有	56(63.6)	30(57.7)		
高血脂症史[例(%)]			0.042	0.838
无	54(61.4)	31(59.6)		
有	34(38.6)	21(40.4)		
口服抗凝剂史[例(%)]			23.105	0.001
无	71(80.7)	28(53.8)		
有	17(19.3)	24(46.2)		
腹部手术史[例(%)]			6.838	0.009
无	75(85.2)	36(69.2)		
有	13(14.8)	16(30.8)		
慢性便秘[例(%)]			5.729	0.017
无	71(80.7)	32(61.5)		
有	17(19.3)	20(38.5)		
肠梗阻[例(%)]			32.731	<0.001
无	59(67.0)	10(19.2)		
有	29(33.0)	42(80.8)		
嵌顿史[例(%)]			3.860	0.049
<2次	78(88.6)	37(71.2)		
≥2次	10(11.4)	15(28.8)		
嵌顿类型[例(%)]			14.066	<0.001
斜疝	50(56.8)	17(32.7)		
直疝	9(10.2)	5(9.6)		
股疝	29(33.0)	30(57.7)		
嵌顿时间[例(%)]			21.977	<0.001
<12 h	73(83.0)	25(48.1)		
≥12 h	15(17.0)	27(51.9)		

BMI. 体重指数

表2 两组嵌顿性腹股沟疝老年患者实验室指标比较($\bar{x}\pm s$)Tab.2 Comparison of laboratory indicators between two groups of elderly patients with incarcerated inguinal hernia ($\bar{x}\pm s$)

指标	无肠坏死组(n=88)	肠坏死组(n=52)	t	P
WBC($\times 10^9/L$)	7.23 \pm 1.22	9.71 \pm 1.75	9.002	<0.001
CRP(mg/L)	4.18 \pm 1.02	17.89 \pm 3.46	27.831	<0.001
D-二聚体(mg/L)	0.16 \pm 0.04	0.52 \pm 0.18	14.197	<0.001
Fib(g/L)	3.78 \pm 0.72	3.94 \pm 0.85	1.137	0.257
PT(s)	11.65 \pm 1.27	11.82 \pm 1.24	0.777	0.439
APTT(s)	29.49 \pm 3.36	29.18 \pm 3.41	0.523	0.602
PLT($\times 10^9/L$)	170.87 \pm 28.95	174.25 \pm 31.06	0.638	0.525
NEUT($\times 10^9/L$)	5.29 \pm 1.43	8.43 \pm 2.02	9.840	<0.001
淋巴细胞计数($\times 10^9/L$)	1.34 \pm 0.21	0.78 \pm 0.15	18.338	<0.001
NLR	3.95 \pm 0.88	10.81 \pm 1.73	31.061	<0.001
Treg/Th17 比值	2.40 \pm 0.42	4.18 \pm 0.71	16.444	<0.001

WBC. 白细胞计数; CRP. C反应蛋白; Fib. 纤维蛋白原; PT. 凝血酶原时间; APTT. 活化部分凝血活酶时间; PLT. 血小板计数; NEUT. 中性粒细胞计数; NLR. 中性粒细胞/淋巴细胞比值; Treg/Th17 比值. 调节性T细胞/辅助性T细胞17 比值

面图, 经过验证后确定误差最小的最优 λ 值时, 最终模型中存在8个非零系数(图1B)。筛选的8个变量分别为口服抗凝剂史、腹部手术史、嵌顿史、嵌顿

类型、嵌顿时间、D-二聚体、NEUT、Treg/Th17 比值。

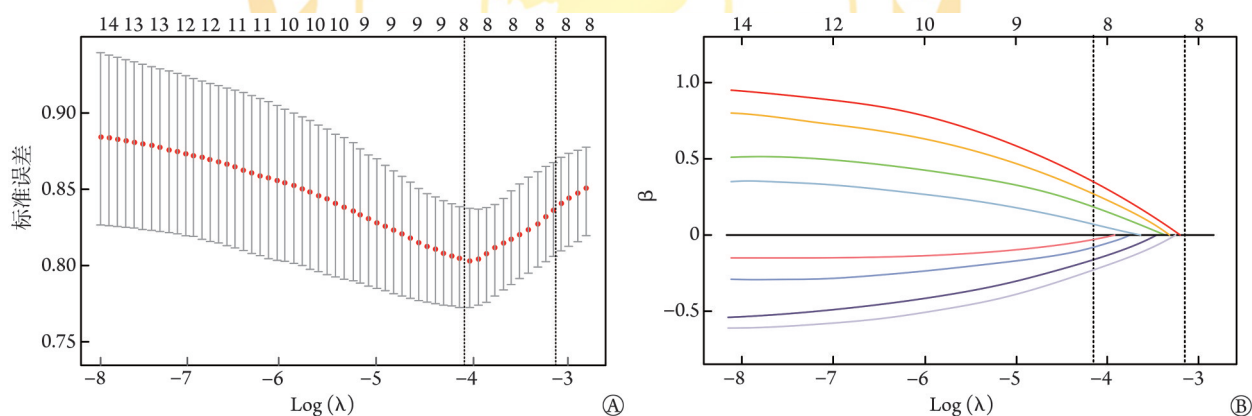


图1 LASSO回归筛选结果

Fig.1 The results of LASSO regression filtering

A. LASSO回归分析的交叉验证曲线; B. LASSO回归分析的系数路径。图中上排数字表示LASSO回归模型在不同 $\log(\lambda)$ 取值下, 模型中保留的具有非零回归系数的变量数量。LASSO. 最小绝对值收缩和选择算子

2.4 老年嵌顿疝肠坏死的危险因素分析 以LASSO回归筛选出的指标作为自变量, 以嵌顿疝肠坏死(有=1, 无=0)作为因变量纳入logistic回归分析, 结果显示, 口服抗凝剂史、腹部手术史、嵌顿史、嵌顿类型、嵌顿时间、D-二聚体、NEUT、Treg/Th17比值为老年嵌顿疝肠坏死的影响因素($P<0.001$, 表3)。

2.5 老年嵌顿疝肠坏死的BP神经网络模型 如图2所示, 以LASSO回归筛选的8个预测变量作为模型输入层: 口服抗凝剂史(X1)、腹部手术史(X2)、嵌顿史(X3)、嵌顿类型(X4)、嵌顿时间(X5)、D-二聚体(X6)、NEUT(X7)、Treg/Th17比值(X8), 以是否发生肠坏死(Y, 否=0, 是=1)作为输出层。将总样本($n=140$)按7:3的比例随机划分为训练集($n=98$)与验

证集($n=42$), 进行BP神经网络模型拟合。B1与B2分别为隐藏层与输出层的偏置项。当隐藏层数为1, 隐含层节点数为10时, BP神经网络的神经元的优化程度最优(图2A)。模型输出的准确率随神经网络模型迭代次数的增加而升高, 输出损失随神经网络模型迭代次数的增加而降低(图2B)。重要性评分排序显示: Treg/Th17比值(0.158分)、D-二聚体(0.146分)、嵌顿时间(0.143分)、嵌顿类型(0.137分)、NEUT(0.132分)、嵌顿史(0.129分)、口服抗凝剂史(0.124分)、腹部手术史(0.121分), 评分与模型的分影响呈正比, 评分越高表示模型分类影响越大。采用Bootstrap法(原始数据重复抽样1000次后)对BP神经网络模型进行内部验证, 外部验证通过验证集验证。

表3 老年嵌顿疝肠坏死的影响因素分析

Tab.3 Analysis of influencing factors for intestinal necrosis in elderly incarcerated hernia cases

变量	β	SE	Wald χ^2	OR	95%CI	P
口服抗凝剂史(有=1,无=0)	1.220	0.228	28.632	3.387	1.934~4.716	<0.001
腹部手术史(有=1,无=0)	1.219	0.243	25.165	3.383	1.945~4.784	<0.001
嵌顿史(有=1,无=0)	1.246	0.219	32.370	3.475	1.967~4.852	<0.001
嵌顿类型(股疝=1,非股疝=0)	1.279	0.232	30.392	3.594	2.058~4.883	<0.001
嵌顿时间(≥ 12 h=1,<12 h=0)	1.299	0.224	33.630	3.667	2.156~4.871	<0.001
D-二聚体(≥ 0.30 mg/L=1,<0.30 mg/L=0)	1.313	0.211	38.723	3.718	2.214~5.002	<0.001
NEUT($\geq 7.00 \times 10^9$ /L=1,< 7.00×10^9 /L=0)	1.263	0.237	28.299	3.535	2.101~4.826	<0.001
Treg/Th17 比值(≥ 3.30 =1,<3.30=0)	1.333	0.246	29.362	3.792	2.327~4.975	<0.001

NEUT. 中性粒细胞计数; Treg/Th17 比值. 调节性T细胞/辅助性T细胞17比值

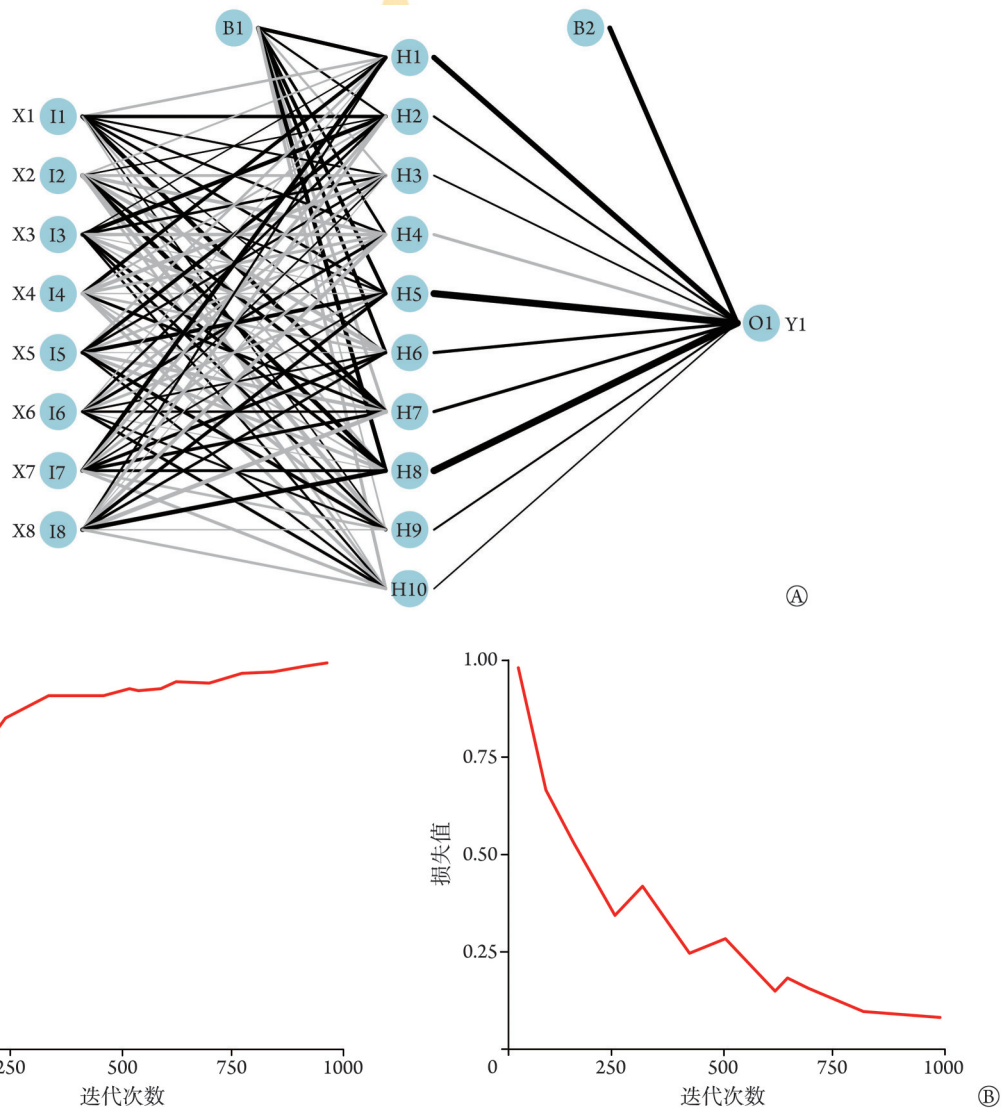


图2 BP神经网络模型及其迭代与准确率、输出损失的变化趋势图

Fig.2 BP neural network model and its trend chart of iteration and the changes in accuracy and output loss

A. BP神经网络模型; B. BP神经网络模型迭代与准确率、输出损失的变化趋势图。X1=口服抗凝剂史; X2=腹部手术史; X3=嵌顿史; X4=嵌顿类型; X5=嵌顿时间; X6=D-二聚体; X7=NEUT; X8=Treg/Th17 比值, Y1=发生嵌顿疝肠坏死。BP. 反向传播

结果显示, 训练集和验证集的预测概率与实际概率具有良好的一致性(Brier分数=0.073、0.075), 提示模型校准度良好(附图1)。

2.6 模型验证 ROC曲线分析结果显示, 训练集中BP神经网络模型的预测准确率为94.21%, AUC为0.913(95%CI 0.821~0.965, $P < 0.001$), 敏感度为

96.21%，特异度 75.37%，精确率 94.45%，阳性预测值 93.17%，阴性预测值 81.04%，F1 评分 93.91；验证集中的预测准确率为 90.45%，AUC 为 0.896(95%CI 0.815~0.957, $P < 0.001$)，敏感度为 96.68%，特异度 70.24%，精确率 82.53%，阳性预测值 92.94%，阴性预测值 80.21%，F1 评分 76.58(附图 2)。模型的准确率、敏感度及特异度等指标在训练集与验证集中均表现良好，提示模型具有较好的泛化能力和临床应用价值。

2.7 临床可用性评价 DCA 曲线分析结果显示，当高风险阈值为 0~0.90 时，净获益率 > 0 ，有临床意义；且高风险阈值在 0~0.90 之间取值越小，净获益率越高，临床意义越大(附图 3)。

3 讨 论

对于嵌顿性腹股沟疝老年患者，一经确诊，需尽早实施手术干预，通过手术将疝内容物复位或切除，以有效避免机械性肠梗阻及肠道绞窄坏死等严重并发症的发生，但仍有可能发生肠坏死等并发症，严重影响患者的生活质量。因此，建立早期预警系统以优化其干预时机具有重要意义。但现有方法多依赖炎症指标或影像学检查，缺乏特异性生物标志物，且术中判断易受主观经验影响。Treg/Th17 比值是超越传统炎症指标的新型、功能性生物标志物。在嵌顿疝所致肠缺血坏死的病理进程中，NEUT、CRP 水平升高等全身炎症反应虽是普遍现象，但更具决定性意义的是免疫调节网络的失衡。Treg 与 Th17 细胞分别代表免疫稳态中不可或缺的抑炎与促炎力量，Treg/Th17 比值定量地表征了机体在急性损伤下，控制炎症与组织修复的整体免疫调节能力，而非单纯的炎症强度。已有研究证实，在结肠炎患者中，Treg/Th17 比值失衡与器官损伤严重程度及预后密切相关^[8]。这提示该免疫失衡可作为嵌顿疝肠坏死发生的潜在生物标志物。神经网络模型在处理多维复杂非线性数据时展现出显著优势，这一特性使其在医疗预警领域得到了广泛应用。因此，本研究拟构建融合 Treg/Th17 比值与神经网络的模型，整合免疫失衡标志物与深度学习算法，有望提高预测效能，为老年嵌顿疝肠坏死管理提供新的解决方案。

老年嵌顿疝患者因腹壁薄弱、合并症多，易发生肠管嵌顿及后续缺血坏死。肠管嵌顿导致肠系膜血管受压，血流中断引发肠壁细胞缺氧引发组织损伤或坏死，这一过程在老年患者中因血管弹性下降而加速^[9]。再灌注时，大量炎症因子释放，激活树突状细胞等抗原提呈细胞，促进初始 CD4⁺ T 细胞向 Th17 细胞分化，同时抑制 Treg 细胞的功能。坏死性小肠结肠炎患者外周血 Th17 比例显著升高，Treg 功

能受抑。Treg/Th17 比值失衡是坏死性小肠结肠炎的重要生物标志物^[10]。本研究选取手术麻醉前作为外周血采集时点，旨在捕获肠坏死发生前机体的即时免疫状态。尽管 Treg 与 Th17 在体内的活化与迁移动力学存在差异，但现有研究证实，在重大创伤、手术等急性应激发生后的数小时内，外周血中即可呈现显著的免疫细胞表型与功能改变^[11]。对于嵌顿疝患者而言，此特定时点的血液标本所蕴含的免疫信息具有重要价值：首先，其时效性特征突出，能够反映由肠管嵌顿缺血这一急性病理事件所直接触发且尚未受到全身麻醉及手术创伤二次影响的初始免疫应答，因而最能代表疾病本身所致的病理生理负荷。其次，该时点的免疫状态与临床决策高度同步，是外科医师在决定是否施行肠切除术前，所能获得的最终全身性生物学状态信息，这为其转化为术前即时检测指标提供了可能。最后，此时点为探究急性肠缺血如何迅速破坏全身免疫稳态(特别是 Treg/Th17 比值平衡)提供了重要的临床依据。相关研究报道，嵌顿性股疝肠坏死患者发病 6 h 内术前外周血标本的 Th17 细胞数及相关促炎因子 IL-17A、TNF- α 水平等均快速升高^[12]。因此，此时点所获数据不仅构成了风险预测模型的基础，亦为深入理解嵌顿疝所致肠坏死进程中肠-免疫轴的交互机制提供了重要依据。研究显示，NEUT、D-二聚体水平升高与缺血性结肠炎风险增加密切相关^[13]。NEUT 升高提示炎症反应和感染。NEUT 通过释放蛋白酶和炎症介质加剧组织损伤，同时抑制 Treg 细胞的功能，导致免疫失衡。作为凝血和纤溶系统的标志性指标，D-二聚体在肠系膜血管血栓形成后，因纤溶系统被激活而呈现水平上升。另一研究表明，NEUT 和 D-二聚体水平的升高，是评估嵌顿疝患者肠坏死风险的重要指标，对于术前预测和诊断肠管坏死具有一定的价值^[14]。有研究认为，嵌顿疝肠坏死的进展与嵌顿时间存在紧密联系，随着嵌顿时间延长，肠管缺血加重，细胞代谢障碍导致肠壁通透性增加，组织会经历充血、炎症反应直至坏死等病理过程^[15]。然而，在临床实践中，肠坏死与嵌顿时间的直接关联性较弱，这主要源于不同患者间嵌顿严重程度的差异。有反复嵌顿病史的患者，往往提示其疝环较紧或存在肠管与疝囊粘连。这种情况容易对肠管血管造成压迫，进而引发肠壁的水肿及炎症反应。而反复的缺血再灌注损伤，则会进一步削弱肠黏膜的屏障功能，增加细菌易位及全身性感染的风险。对于这类具有嵌顿病史的嵌顿性腹股沟疝患者，需要特别警惕。当肠管再次发生嵌顿时，其所承受的压力会显著增大，导致自行复位更加困难，从而显著提升了肠坏死的发生风险^[16]。嵌顿类型在嵌顿性肠坏死中

扮演重要角色。嵌顿性股疝患者具有更高的肠坏死、肠切除风险。这主要归因于女性患者特有的生理结构：其骨盆较男性宽阔，联合腱与腔隙韧带相对薄弱，使得股管上口更为宽大。加之妊娠期间激素变化导致股管结构进一步松弛，当股疝发生时，疝囊更易从卵圆窝突出并发生绞窄，从而显著增加肠坏死的风险^[17]。研究发现，股疝患者中需行肠切除的比例明显高于斜疝患者^[18]，进一步印证了嵌顿类型对肠坏死预后的影响。抗凝剂可能增加出血风险，影响手术决策和预后。一方面，抗凝治疗可能掩盖肠坏死早期症状(如局部出血)，导致延误诊断；另一方面，急诊手术时需权衡抗凝药物对凝血功能的影响，可能增加术后血肿或再出血的风险^[19]。已有研究表明，口服抗凝剂史、嵌顿史、嵌顿疝时间、嵌顿性股疝、腹部手术史是腹股沟嵌顿疝肠坏死的危险因素^[20]。本研究显示，口服抗凝剂史、腹部手术史、嵌顿史、嵌顿类型、嵌顿时间、D-二聚体、NEUT、Treg/Th17均是老年嵌顿疝肠坏死的影响因素，与上述研究结果相符。

有研究显示，结合生物标志物和临床指标的神经网络模型在疝与腹壁外科疾病预警中表现出明显优势^[21]。本研究构建融合 Treg/Th17 比值的神经网络模型，结果显示该模型对于老年嵌顿疝肠坏死风险具有较好的预测能力，并且 Treg/Th17 比值对模型分类的贡献度最高。DCA 分析显示该模型的临床价值较高。

本研究遵循了从特征筛选到模型构建的递进分析思路。首先，LASSO 回归作为一种嵌入式的特征选择方法，因其能处理共线性并自动进行变量收缩，被用于从众多临床及生物学指标中筛选出最简洁、最相关的预测特征子集，其目的在于从众多候选变量中筛选出与结局密切相关且相互独立的信息特征，以提高后续模型的稳定性和预测性能，而非用于确认因果关系^[22]。随后，采用 logistic 回归对筛选出的特征进行验证性分析，旨在从传统流行病学角度评估其作为独立危险因素的统计学意义。然而，logistic 回归假设变量与结局间存在线性关系，而嵌顿疝致肠坏死的病理生理过程涉及复杂的非线性交互作用。为此，本研究进一步引入了具有单隐藏层的 BP 神经网络。神经网络通过非线性激活函数和层次化权重连接，能够自动捕捉并学习特征与结局之间复杂的非线性映射关系及潜在的高阶交互效应，这在理论上更适合处理此类复杂的临床预测问题。本研究结果显示，BP 神经网络模型展现了良好的预测性能，印证了其在处理此类非线性问题上的应用价值。本研究亦存在局限：首先，尽管采用了交叉验证、正则化及独立的验证集来缓解过拟合，但样

本量($n=140$, 事件数 52)对于神经网络模型而言仍属有限。未来需要通过多中心、大样本的外部队列验证来进一步确认模型的泛化能力。其次，研究为回顾性设计，存在固有的选择偏倚风险。最后，Treg/Th17 比值的检测需流式细胞术等专业技术，其临床推广的便捷性有待于开发更快速的检测方法。尽管如此，本研究初步证实了融合特异性免疫指标与人工智能算法在急诊外科风险预警中的可行性与价值。

综上所述，融合 Treg/Th17 比值建立的神经网络模型对老年嵌顿疝肠坏死风险具有较高的预测价值。基于本模型，未来可开发为急诊室的辅助决策工具，通过输入临床与实验室指标快速计算坏死风险，协助医师优先处理高危患者。同时，本研究采用的神经网络模型为后续整合影像学特征(如 CT 所见肠壁水肿、积气)留下了接口。为使模型更具普适性，未来可开展多中心、前瞻性队列研究进行外部验证，并尝试纳入更多反映肠道屏障功能与缺血再灌注损伤的分子标志物，以进一步完善预警系统。

【附加材料】

附图 1—3 见 <https://dx.doi.org/10.11855/j.issn.0577-7402.1839.2026.0413FJ>。

请扫描右方二维码获取。



【参考文献】

- [1] Ceresoli M, Carissimi F, Nigro A, et al. Emergency hernia repair in the elderly: multivariate analysis of morbidity and mortality from an Italian registry[J]. *Hernia*, 2022, 26(1): 165-175.
- [2] Bal J, Ilonzo N, Spencer P, et al. Loss of independence after emergency inguinal hernia repair in elderly patients: How aggressive should we be?[J]. *Am J Surg*, 2022, 223(2): 370-374.
- [3] 司小燕, 司新敏. 外周血瘦素水平, 辅助性 T 细胞 17/调节性 T 细胞比值与溃疡性结肠炎患者肠黏膜屏障功能障碍的相关性[J]. *临床内科杂志*, 2023, 40(3): 181-184.
- [4] Chen J, Feng R, Gong BB, et al. High-salt-driven gut microbiota dysfunction aggravates prostatitis by promoting AHR/SGK1/FOXO1 axis-mediated Th17 cell differentiation[J]. *Mil Med Res*, 2025, 12(10): 1501-1519.
- [5] Sun Y, Lin S, Wang H, et al. Regulatory role of PI16 in autoimmune arthritis and intestinal inflammation: implications for Treg cell differentiation and function[J]. *J Transl Med*, 2024, 22(1): 327-333.
- [6] 中华医学会外科学分会疝与腹壁外科学组, 中国医师协会外科医师分会疝和腹壁外科医师委员会. 成人腹股沟疝诊断和治疗指南(2018 年版)[J]. *中华胃肠外科杂志*, 2018, 21(7): 721-724.
- [7] Zhou J, Yuan X. Establishment of a risk prediction model for bowel necrosis in patients with incarcerated inguinal hernia[J]. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2024, 24(1): 39-45.
- [8] Mao N, Yu Y, He J, et al. Matrine ameliorates DSS-induced colitis by suppressing inflammation, modulating oxidative stress and remodeling the gut microbiota[J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(12): 6613-6620.

- [9] Dufay R, Garzelli L, Ben Abdallah I, *et al.* Acute arterial mesenteric ischaemia: comparison of partial and complete occlusion of the superior mesenteric artery[J]. *Insights Imaging*, 2025, 16(1): 97-108.
- [10] Zhu Q, Wang Y, Zhou Y, *et al.* L-cystine alleviates necrotizing enterocolitis by regulating ferroptosis and Th17 cell differentiation via the IL-6/STAT3 pathway[J]. *Commun Biol*, 2025, 9(1): 162-171.
- [11] Raheem A, Khan I, Ahmad I, *et al.* The emerging role of tissue regulatory T cells in tissue repair and regeneration[J]. *Front Immunol*, 2025, 16(1): 113-121.
- [12] Beji H, Bouassida M, Chtourou MF, *et al.* Predictive factors of bowel necrosis in patients with incarcerated femoral hernia[J]. *Hernia*, 2023, 27(6): 1491-1496.
- [13] Wu X, Bao Z. Population-based study of the clinical characteristics and risk factors of ischemic colitis[J]. *Turk J Gastroenterol*, 2021, 32(4): 393-400.
- [14] 姜笑明, 黄文海. 腹股沟嵌顿疝患者肠坏死的预测和危险因素分析[J]. *复旦学报(医学版)*, 2023, 50(5): 710-716.
- [15] Bouassida M, Dougaz MW, Beji H, *et al.* Intestinal ischemia in patients with incarcerated groin hernia: Proposal and validation of a score[J]. *Langenbecks Arch Surg*, 2022, 407(6): 2547-2554.
- [16] Numoto R, Taniguchi K, Imai Y, *et al.* Treatment of a left inguinal hernia with incarceration of the scope during colonoscopy: a case report and literature review[J]. *Surg Case Rep*, 2024, 10(1): 270-276.
- [17] Wang F, Ma Q, Liu X, *et al.* Managing ischemic and necrotic incarcerated femoral hernia contents and their risk factors[J]. *Hernia*, 2024, 28(4): 1373-1379.
- [18] Dwertmann AK, Soppe S, Hefermehl L, *et al.* Risk of bowel resection in incarcerated inguinal hernia: watch out for ASA score and hernia type [J]. *Langenbecks Arch Surg*, 2022, 407(8): 3711-3717.
- [19] Peng XF, Yu M, Wang DC. Establishment of a predictive model for seroma formation after TAPP repair for unilateral indirect inguinal hernia in males[J]. *Am Surg*, 2025, 91(3): 351-360.
- [20] 李征威, 张玉新, 王磊, 李志锋, 罗贤茂. 成人腹股沟嵌顿疝发生肠坏死的危险因素分析[J]. *中华疝和腹壁外科杂志(电子版)*, 2020, 14(4): 433-437.
- [21] 陈双, 黄恩民, 周太成, 等. 人工智能在疝与腹壁外科中应用的思考[J]. *中国实用外科杂志*, 2023, 43(6): 650-653.
- [22] Wang JB, Wu ZG, Bi GW, *et al.* Inflammatory bowel disease mediates the causal relationship between gut microbiota and colorectal cancer: identification of therapeutic targets and predictive modeling[J]. *J Cancer*, 2025, 16(13): 4008-4028.

(责任编辑: 纪方方)

解放军医学杂志®