

• 临床研究 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2025.11.012

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250721.1433.005\(2025-07-21\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250721.1433.005(2025-07-21))

基于机器学习算法的不同脊柱结核患者术后伤口愈合不良风险预测模型的比较*

文菁莲¹, 唐 炜^{2△}, 吴成莉³, 李 润¹, 叶 青⁴, 彭国旋⁴

(1. 贵州医科大学附属医院手术室, 贵阳 550001; 2. 贵州医科大学附属医院护理部, 贵阳 550001; 3. 遵义市第一人民医院急诊外科, 贵州遵义 563003; 4. 贵州医科大学附属医院骨科, 贵阳 550001)

[摘要] **目的** 分析脊柱结核患者术后伤口愈合不良的危险因素,并基于机器学习算法构建预测模型和风险预测评分表,为早期防治术后伤口愈合不良提供参考依据。**方法** 回顾性分析 2017 年 1 月至 2024 年 2 月贵州省某 4 所三甲医院 420 例脊柱结核患者的临床资料。通过单因素和多因素分析确定术后伤口愈合不良的危险因素,并构建 logistic 回归、随机森林和支持向量机风险预测模型。使用受试者工作特征(ROC)曲线、精确度、召回率、准确度及 F1 值评估模型预测效能,进一步构建术后伤口愈合不良风险预测评分表。**结果** 在 420 例脊柱结核患者中,132 例发生术后伤口愈合不良,发生率为 31.43%。logistic 回归分析显示,BMI ≤ 18.5 kg/m²、术前白蛋白 ≤ 30 g/L、联合手术、术中出血量 $>1\ 000$ mL、术后 3 d 内直接胆红素 >8 μ mol/L、术后 3 d 内中性粒细胞计数 $\leq 75 \times 10^9$ /L 及 3 d 引流流量 >500 mL 是术后伤口愈合不良的危险因素($P < 0.05$)。基于机器学习算法的 3 种预测模型的比较中,随机森林模型的预测效能最佳。基于多因素分析结果的偏回归系数所构建的风险预测评分表得分为 0~11 分,当风险预测评分表得分 >6 分时,术后伤口愈合不良风险升高;该风险预测评分表的 ROC 曲线下面积(AUC)为 0.846(95%CI:0.769~0.923),表明风险预测评分表具有良好的预测效能。**结论** 基于机器学习算法的随机森林模型和风险预测评分表对于评估脊柱结核患者术后伤口愈合不良具有一定预测价值,可帮助医护人员早期识别术后伤口愈合不良高风险患者。

[关键词] 脊柱结核;伤口愈合不良;危险因素;机器学习算法;预测模型;预测评分表

[中图分类号] R529.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2025)11-2552-07

Comparison of different prediction models based on machine learning algorithms for the risk of poor postoperative wound healing in patients with spinal tuberculosis*

WEN Jinglian¹, TANG Wei^{2△}, WU Chengli³, LI Run¹, YE Qing⁴, PENG Guoxuan⁴

(1. Operating Room, the Affiliated Hospital of Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. Department of Nursing, the Affiliated Hospital of Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. Department of Emergency Surgery, the First People's Hospital of Zunyi, Zunyi, Guizhou 563003, China; 4. Department of Orthopedics, the Affiliated Hospital of Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

[Abstract] **Objective** To analyze risk factors for poor postoperative wound healing in spinal tuberculosis patients and construct prediction models along with a risk scoring table using machine learning algorithms, providing references for early prevention and management. **Methods** Clinical data from 420 spinal tuberculosis patients treated at four tertiary hospitals in Guizhou Province between January 2017 and February 2024 were retrospectively analyzed. Risk factors were identified through univariate and multivariate analyses. Logistic regression, random forest, and support vector machine prediction models were constructed. Model performance was evaluated using receiver operating characteristic (ROC) curves, precision, recall, accuracy, and F1-score. A risk prediction scoring table for poor postoperative wound healing was subsequently developed. **Re-**

* 基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合成果-LC[2024]040);贵州医科大学附属医院护理科研项目(gyfyhl-2023-A13, gyfyhl-2024-A11)。

△ 通信作者, E-mail: 411176975@qq.com。

sults Among the 420 patients with spinal tuberculosis, 132 experienced poor postoperative wound healing, with an incidence rate of 31.43%. Logistic regression analysis showed that $BMI \leq 18.5 \text{ kg/m}^2$, preoperative albumin $\leq 30 \text{ g/L}$, combined surgical procedure, intraoperative blood loss $> 1\,000 \text{ mL}$, direct bilirubin $> 8 \mu\text{mol/L}$ within 3 days after surgery, neutrophil count $\leq 75 \times 10^9/\text{L}$ within 3 days after surgery, and postoperative drainage volume $> 500 \text{ mL}$ were risk factors for poor postoperative wound healing ($P < 0.05$). In the comparison among the three risk prediction models constructed based on machine learning algorithms, the random forest model demonstrated the best predictive performance. A risk prediction scoring table was constructed based on the partial regression coefficients from the multivariate analysis, with a total score range from 0 to 11 points. A score > 6 points indicated an increased risk of poor postoperative wound healing. The area under the ROC curve (AUC) for this risk prediction scoring table was 0.846 (95%CI: 0.769 to 0.923), indicating good predictive performance. **Conclusion** The random forest model based on machine learning algorithms and the risk prediction scoring table have certain predictive value for assessing the risk of poor postoperative wound healing in patients with spinal tuberculosis; they can assist healthcare professionals in early identification of high-risk patients.

[Key words] spinal tuberculosis; poor postoperative wound healing; risk factors; machine learning algorithm; prediction model; prediction scoring table

脊柱结核是由结核杆菌在脊椎及其周围组织引起的感染,是导致脊柱畸形和瘫痪的主要原因之一^[1-2]。手术治疗在清除结核病灶、解除脊髓和神经压迫、矫正畸形及重建脊柱稳定性方面发挥关键作用^[1]。然而,术后伤口并发症中,伤口感染和愈合不良依然是临床常见问题,对术后恢复效果可产生严重影响^[1,3]。统计数据显示,骨科创伤手术后的伤口并发症发生率高达 10%,超过 50% 的患者面临术后伤口愈合不良^[4-6]。其中脊柱结核患者术后伤口愈合不良的发病率在 16.4%~42.8%^[7-9]。《中国骨科手术加速康复外科指南》^[10]强调预防和管理术后伤口并发症与手术技术同等重要,伤口并发症直接影响患者的康复进程。伤口愈合不良通常表现为渗液、渗血、肿胀裂开及延迟愈合等^[11]。若不及时处理,伤口愈合不良可导致继发感染、败血症或骨髓炎等^[12-13],延长患者住院时间、增加疾病负担,是非计划再手术的重要危险因素^[14-15]。因此,本研究旨在基于常规临床指标,利用机器学习算法构建风险预测模型及风险预测评分表,并比较各自的预测性能,为医护人员早期识别潜在脊柱结核患者术后伤口愈合不良的高危人群并制订促进伤口愈合的临床决策提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性收集 2017 年 1 月至 2024 年 2 月贵州省某 4 所三甲医院住院并接受脊柱结核手术的 420 例患者的病历资料,根据患者术后伤口愈合情况分为愈合良好组和愈合不良组。纳入标准:(1)临床病历诊断确诊为脊柱结核;(2)年龄 ≥ 18 岁;(3)手术方式为开放式病灶清除术及联合侧路病灶清除术等;(4)病历资料完整。排除标准:(1)合并急性期感染、泌尿系统感染、呼吸系统感染等;(2)合并肿瘤且脊柱区域放化疗史;(3)术前经治疗无法改善严重贫血或低蛋白血症。

伤口愈合不良诊断参照《中国骨科手术加速康复切口管理指南》^[10],即术后 8~10 d 伤口出现感染性或非感染性渗血、渗液、充血水肿、裂开及瘀斑形成等,出现以上任意一种及以上视为术后伤口愈合不良。样本量参考风险预测模型的样本量的 10 倍每变量事件数(events per variable, EPV)原则^[16],即阳性结局事件数量至少为模型变量数的 10 倍及以上。本研究分析脊柱结核患者伤口愈合不良的危险因素为 7 个,发病率为 31.43%,因此纳入风险预测模型变量数为 7 个,发病率为 31.43%,则训练集样本量: $N = 10 \times 7 / 31.43\% \times (1 + 10\%) \approx 249$ 例;训练集与验证集的比例为 7:3,验证集样本量: $N = 249 / 0.7 \times 0.3 \approx 107$ 例;因此,本研究总样本量不少于 356 例。本研究已通过贵州医科大学附属医院医学伦理委员会批准(审批号:2023 伦审第 894 号),免除患者知情同意。

1.2 方法

根据既往相关研究^[7-9,19,21]选择评价指标,记录患者性别、年龄、BMI、抗结核治疗时间、病程、手术部位、术前白蛋白、术前丙氨酸氨基转移酶水平、手术入路、手术节段数、切口长度、是否联合手术、手术时间、椎弓根螺钉数、是否术中输血、术中出血量、术后 3 d 引流量、术后 3 d 内白蛋白水平、术后 3 d 内淋巴细胞计数、术后 3 d 内直接胆红素、术后 3 d 内中性粒细胞计数等;若术前或术后 1~3 d 内有多次检查,以最近的一次为准。

1.3 统计学处理

采用 SPSS26.0 软件进行数据统计分析,计数资料采用例数或百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。将单因素分析中差异有统计学意义的因素进行多因素分析,检验水准为 $\alpha = 0.05$ 。多因素分析最终确定纳入构建风险预测模型的变量,风险预测模型构建采用十折交叉验证法;模型性能的

评估选用准确度、精确度、召回率、F1 值和受试者工作特征(curve of receiver operating, ROC)曲线下面积(area under curve, AUC)为评价指标,以 ROC 的 AUC 评估风险预测模型的综合预测能力^[17]。采用多因素分析结果中的偏回归系数建立风险评估模型的方程式,将方程式的偏回归系数取整数构建脊柱结核患者伤口愈合不良的风险预测评分表,采用 ROC 曲线分析确定评分表的截断值。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 单因素分析

2.1.1 一般资料比较

本研究 420 例脊柱结核患者中,伤口愈合良好组 288 例,愈合不良组 132 例,伤口愈合不良发生率为 31.43%;132 例伤口愈合不良患者中,出现渗液 88 例、渗血 19 例、红肿 22 例、裂开 2 例、脂肪液化 1 例;420 例患者中,胸椎结核 182 例、腰椎结核 224 例、颈椎结核 14 例,两组一般资料中 BMI 及病程比较,差异有统计学意义($P<0.05$),其余差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。

表 1 两组一般资料比较[n(%)]					
项目	<i>n</i>	愈合良好组 (<i>n</i> =288)	愈合不良组 (<i>n</i> =132)	χ^2	<i>P</i>
年龄				0.747	0.387
≤60 岁	300	202(70.14)	98(74.24)		
>60 岁	120	86(29.86)	34(25.76)		
性别				0.516	0.473
男	231	155(53.82)	76(57.58)		
女	189	133(46.18)	56(42.42)		
BMI				8.300	0.003
≤18.5 kg/m ²	83	46(15.97)	37(28.03)		
>18.5 kg/m ²	337	242(84.03)	95(71.97)		
抗结核治疗时间				0.058	0.809
≤3 个月	344	235(81.60)	109(82.58)		
>3 个月	76	53(18.40)	23(17.42)		
病程				4.421	0.035
≤3 个月	168	125(43.40)	43(32.58)		
>3 个月	252	163(56.60)	89(67.42)		
手术部位				0.140	0.961
胸椎	182	126(43.75)	56(42.42)		
腰椎	224	152(52.78)	72(54.55)		
颈椎	14	10(3.47)	4(3.03)		

2.1.2 临床资料比较

两组术前白蛋白、术前丙氨酸氨基转移酶、切口长度、联合手术、手术时间、椎弓根螺钉数、是否术中输血、术中出血量、术后 3 d 引流量、术后 3 d 内白蛋

白水平、术后 3 d 内淋巴细胞计数、术后 3 d 内直接胆红素、术后 3 d 内中性粒细胞计数比较,差异有统计学意义($P<0.05$),见表 2。

表 2 两组临床资料比较[n(%)]					
项目	<i>n</i>	愈合良好组 (<i>n</i> =288)	愈合不良组 (<i>n</i> =132)	χ^2	<i>P</i>
术前白蛋白				14.016	<0.001
≤30 g/L	47	21(7.29)	26(19.70)		
>30 g/L	373	267(92.71)	106(80.30)		
术前丙氨酸氨基转移酶				3.972	0.046
≤7 U/L	67	39(13.54)	28(21.21)		
>7 U/L	353	249(86.46)	104(78.79)		
手术入路				0.833	0.671
后正中	319	216(75.00)	103(78.03)		
左侧	47	32(11.11)	15(11.36)		
右侧	54	40(13.89)	14(10.61)		
手术节段数				0.733	0.392
≤5 节段	338	235(81.60)	103(78.03)		
>5 节段	82	53(18.40)	29(21.97)		
切口长度				9.817	0.002
≤10 cm	86	71(24.65)	15(11.36)		
>10 cm	334	217(75.35)	117(88.64)		
联合手术				16.804	<0.001
否	336	246(85.42)	90(68.18)		
是	84	42(14.58)	42(31.82)		
手术时间				8.044	0.005
≤5 h	249	184(73.89)	65(49.24)		
>5 h	171	104(36.11)	67(50.76)		
椎弓根螺钉数				7.248	0.007
≤5 个	203	152(52.78)	51(38.64)		
>5 个	217	136(47.22)	81(61.36)		
术中输血				8.570	0.003
否	137	107(37.15)	30(22.73)		
是	283	181(62.85)	102(77.27)		
术中出血量				13.051	<0.001
≤1 000 mL	295	218(75.69)	77(58.33)		
>1 000 mL	125	70(24.31)	55(41.67)		
术后 3 d 引流量				29.176	<0.001
≤500 mL	246	194(67.36)	52(39.39)		
>500 mL	174	94(32.64)	80(60.61)		
术后 3 d 内白蛋白				9.963	0.002
≤30 g/L	226	140(48.61)	86(65.15)		
>30 g/L	194	148(51.39)	46(34.85)		
术后 3 d 内淋巴细胞计数				4.151	0.042
≤20×10 ⁹ /L	401	279(96.88)	122(92.42)		

续表 2 两组临床资料比较[n(%)]					
项目	n	愈合良好组 (n=288)	愈合不良组 (n=132)	χ^2	P
>20×10 ⁹ /L	19	9(3.12)	10(7.58)	5.850	0.016
术后 3 d 内直接胆红素					
≤8 μmol/L	312	224(77.78)	88(66.67)		
>8 μmol/L	108	64(22.22)	44(33.33)	8.863	0.003
术后 3 d 内中性粒细胞计数					
≤75×10 ⁹ /L	58	30(10.42)	28(21.21)		
>75×10 ⁹ /L	362	258(89.58)	104(78.79)		

2.2 多因素分析

将单因素分析中差异有统计学意义的变量作为自变量,将术后伤口愈合不良作为因变量进行多因素分析,各变量赋值见表 3。所有指标的方差膨胀因子值在 1~5,处于正常范围内,变量间不存在多重共线性。结果显示,BMI≤18.5 kg/m²、术前白蛋白≤30 g/L、联合手术、术中出血量>1 000 mL、术后 3 d 引流量>500 mL、术后 3 d 内直接胆红素>8 μmol/L、术后 3 d 内中性粒细胞计数≤75×10⁹/L 是脊柱结核

患者术后伤口愈合不良的危险因素($P<0.05$),见表 4。

表 3 变量赋值	
项目	赋值
BMI	≤18.5 kg/m ² =0,>18.5 kg/m ² =1
病程	≤3 个月=0,>3 个月=1
术前白蛋白	≤30 g/L=0,>30 g/L=1
切口长度	≤10 cm=0,>10 cm=1
术前丙氨酸氨基转移酶	≤7 U/L=0,>7 U/L=1
联合手术	否=0,是=1
手术时间	≤5 h=0,>5 h=1
椎弓根螺钉数	≤5 个=0,>5 个=1
术中输血	否=0,是=1
术中出血量	≤1 000 mL=0,>1 000 mL=1
术后 3 d 引流量	≤500 mL=0,>500 mL=1
术后 3 d 内白蛋白	≤30 g/L=0,>30 g/L=1
术后 3 d 内淋巴细胞计数	≤20×10 ⁹ /L=0,>20×10 ⁹ /L=1
术后 3 d 内直接胆红素	≤8 μmol/L=0,>8 μmol/L=1
术后 3 d 内中性粒细胞计数	≤75×10 ⁹ /L=0,>75×10 ⁹ /L=1

表 4 脊柱结核患者术后伤口愈合不良相关因素的多因素分析(n=420)						
项目	β	SE	Wald	P	OR	95%CI
常量	-0.166	0.697	0.057	0.812	0.847	
BMI	-0.748	0.293	6.533	0.011	0.473	0.267~0.840
病程	0.389	0.251	2.404	0.121	1.476	0.902~2.413
术前白蛋白	-1.135	0.378	9.030	0.003	0.322	0.153~0.674
切口长度	0.425	0.367	1.342	0.247	1.529	0.745~3.139
术前丙氨酸氨基转移酶	0.033	0.332	0.010	0.920	1.034	0.539~1.982
联合手术	0.799	0.287	7.773	0.005	2.224	1.268~3.902
手术时间	0.082	0.271	0.090	0.764	1.085	0.637~1.846
椎弓根螺钉数	0.365	0.265	1.900	0.168	1.441	0.857~2.423
术中输血	-0.024	0.313	0.006	0.939	0.977	0.529~1.802
术中出血量	0.544	0.278	3.821	0.041	1.723	0.999~2.972
术后 3 d 引流量	0.836	0.261	10.297	<0.001	2.307	1.384~3.847
术后 3 d 内白蛋白	0.068	0.266	0.066	0.797	1.071	0.636~1.802
术后 3 d 内淋巴细胞计数	0.152	0.658	0.053	0.817	1.164	0.321~4.229
术后 3 d 内直接胆红素	0.698	0.275	6.442	0.011	2.010	1.172~3.447
术后 3 d 内中性粒细胞计数	-1.004	0.388	6.695	0.010	0.366	0.171~0.784

2.3 风险预测模型的构建

将多因素分析中差异有统计学意义的变量纳入构建风险预测模型,并计算模型精确度、召回率、准确度、F1 值、AUC。结果显示,随机森林的 AUC 最大,logistic 回归的 AUC 最小;随机森林的精确度、召回率及 F1 值最高,logistic 回归的准确度最高,而精确

度、召回率及 F1 值最低,支持向量机的准确度最低,见表 5。3 种风险预测模型 ROC 曲线的比较见图 1。采用 DeLong 检验对 3 种模型的 AUC 值进行比较,结果显示支持向量机与随机森林比较差异有统计学意义($P=0.001$),支持向量机与 logistic 回归比较及随机森林与 logistic 回归比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。

表 5 基于机器学习算法的预测模型的预测效能评价							
模型	观测值(<i>n</i>)		精确度(%)	召回率(%)	准确度(%)	F1 值	AUC(95% <i>CI</i>)
	是	否					
logistic 回归			72.79	86.21	77.09	81.55	0.753(0.693~0.817)
是	175	52					
否	28	39					
随机森林			78.57	98.52	76.92	86.61	0.805(0.749~0.861)
是	200	60					
否	3	31					
支持向量机			73.47	96.55	73.41	83.38	0.755(0.693~0.812)
是	196	71					
否	7	20					

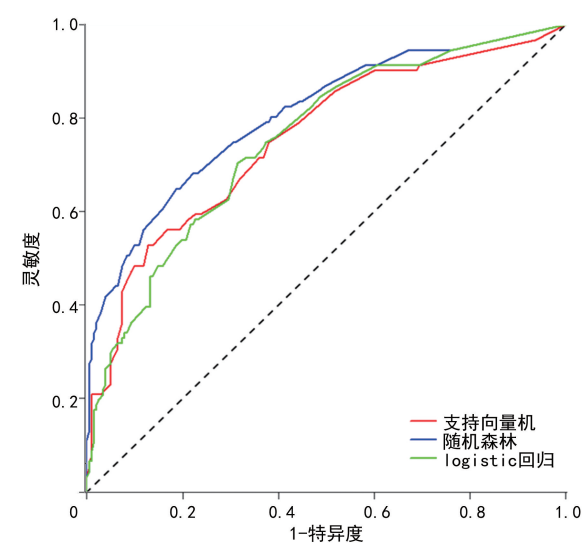


图 1 3 种风险预测模型的 ROC 曲线

2.4 风险预测评分表的构建

根据多因素 logistic 回归模型结果得术后伤口愈合不良风险评估模型的回归方程式： $\log(p/1-p) = -0.166 - 0.748 \times \text{BMI} - 1.135 \times \text{术前白蛋白} + 0.799 \times \text{联合手术} + 0.544 \times \text{术中出血量} + 0.836 \times \text{术后 3 d 引流流量} + 0.698 \times \text{术后 3 d 内直接胆红素} - 1.004 \times \text{术后 3 d 内中性粒细胞计数}$ 。通过上述方程式最终预测因子的偏回归系数四舍五入等比例取整数构建术后伤口愈合不良风险预测评分表，见表 6。因此，本研究风险预测评分表的方程式可表达为：风险分值=BMI+术前白蛋白+2×联合手术+2×术中出血量+2×术后 3 d 引流流量+2×术后 3 d 内直接胆红素+术后 3 d 内中性粒细胞计数，风险预测结果得分为 0~11 分。

将该风险预测评分表对 420 例脊柱结核患者术后伤口愈合不良的风险进行评分，并对评分结果进行 ROC 曲线分析，得出该评分表的截断值为 5.6 分，取整数为 6 分，风险预测评分表截断值对应的灵敏度为 0.911，特异度为 0.646，AUC 为 0.846 (95%CI: 0.769~0.923)，精确度为 77.55%，准确度为 76.15%，召回率为 98.02%，F1 值为 81.89%。结果

显示，以 6 分为伤口愈合不良风险的截断值时，Youden 指数最大值为 0.287，此时风险预测评分表的评估准确度最高，见图 2；因此，本研究将风险预测评分表评分≥6 分的患者划为高风险组，<6 分的划为低风险组。

表 6 脊柱结核患者术后伤口愈合不良风险预测评分表

变量	分组	评分(分)
BMI	≤18.5 kg/m ²	1
	>18.5 kg/m ²	0
术前白蛋白	≤30 g/L	1
	>30 g/L	0
联合手术	是	2
	否	0
术中出血量	≤1 000 mL	0
	>1 000 mL	2
术后 3 d 引流流量	≤500 mL	0
	>500 mL	2
术后 3 d 内直接胆红素	≤8 μmol/L	2
	>8 μmol/L	0
术后 3 d 内中性粒细胞计数	≤75×10 ⁹ /L	1
	>75×10 ⁹ /L	0

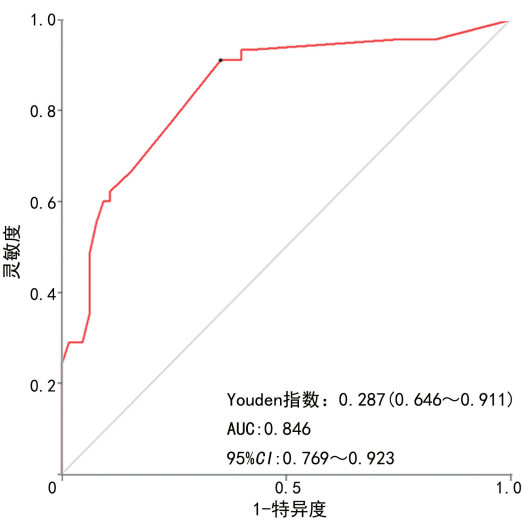


图 2 脊柱结核患者术后伤口愈合不良预测评分表 ROC 曲线

3 讨 论

脊柱结核患者由于结核杆菌感染,术后伤口愈合不良的风险高于其他手术^[18]。伤口愈合不良是伤口感染的主要原因之一,延误治疗可致脊柱结核术后伤口感染率高达 28%^[19],加重患者病情负担,影响患者康复。因此,构建早期识别术后伤口愈合不良高风险患者的评估工具,对预防该类患者术后伤口愈合不良的发生,促进患者康复具有重要指导意义。本研究采用 logistic 回归、随机森林和支持向量机 3 种机器学习算法进行建模并比较,结果显示随机森林模型在多项性能指标上表现优异。

通过 logistic 回归确定了 7 个模型预测因子,这些因子均为较易获得的临床指标,便于医护人员早期识别潜在的高风险患者。BMI≤18.5 kg/m² 及术前白蛋白≤30 g/L 被确认为是脊柱结核患者术后伤口愈合不良的高风险因素,这与袁雄辉等^[19]研究结果一致。由于结核病灶的慢性消耗、炎症介质对肝窦内皮细胞的损伤,以及组织器官缺血缺氧导致白蛋白合成减少,使患者 BMI 下降^[20]。白蛋白水平降低,导致胶体渗透压降低,容易出现组织渗血渗液,伤口红肿甚至裂开,增加伤口愈合不良的风险^[9,21]。联合手术的脊柱结核患者术后伤口愈合不良发生率较高,可能因为联合手术创伤较大,术中出血量增加,输血概率增大,从而引发机体高代谢应激^[12,22]。手术过程中,术区暴力牵拉导致的周围软组织损伤也减慢了伤口愈合速度^[7,23]。研究表明术后 3 d 内直接胆红素>8 μmol/L 及中性粒细胞计数≤75×10⁹/L 是影响伤口愈合不良的主要因素之一。既往研究指出胆红素具有抗炎作用^[24-25],在葡萄糖醛酸基转移酶作用下,胆红素与葡萄糖醛酸结合转变为直接胆红素^[26]。脊柱结核患者因感染结核杆菌及手术创伤,容易遭受炎症细胞侵袭,导致直接胆红素持续增加,以抵抗结核杆菌感染和炎症细胞侵袭,从而成为术后伤口愈合不良的预测指标之一^[26]。中性粒细胞计数作为传统的感染指标,广泛应用于感染诊断^[27]。既往研究表明中性粒细胞计数有助于早期预测术后手术部位感染的发生概率^[27-28]。脊柱结核患者术后通常会出现炎症细胞及炎症因子的改变,尤其以 B 细胞介导的非特异性细胞免疫功能减退最为明显,从而在术后 3~4 d 内免疫处于恢复状态,导致中性粒细胞计数降低,无法有效抵御炎症侵袭,增加了感染的风险,使伤口愈合不良的发生率上升^[27,29]。此外,若脊柱结核患者术后 3 d 引流量≥500 mL,易导致失血量增加,引发低蛋白血症和输血需求增加,术后容易发生严重电解质紊乱、贫血等并发症^[30]。免疫力受损导致患者对残留结核杆菌的抵抗力下降,可能引起残留结核杆菌对椎体及周围组织的二次破坏,同时引流量增加和伤口引流管留置时间延长也增加了手术部位感染的风险,是伤口愈合不良的高风险因素^[31]。

为了让模型更适合医务人员在临床中应用,

本研究构建了一种风险预测评分表,该评分表的 AUC 值为 0.846,具有较好的预测效能。本研究开发的评分表简单明了,便于医护人员通过综合常规实验室指标及临床观察结果快速筛查出脊柱结核术后伤口愈合不良的高风险人群,从而尽早实施干预措施,优化患者管理策略,降低术后并发症的发生,提升了临床决策的质量和效率。

综上所述,本研究基于机器学习算法构建脊柱结核患者术后伤口愈合不良的随机森林风险预测模型及风险预测评分表,预测效能较好。医护人员可根据临床实际情况结合风险预测评分表对术后伤口愈合不良的风险进行量化评估,早期防治伤口愈合不良的发生,降低术后伤口并发症的发生风险,提高手术医疗质量和安全性。本研究局限在于该研究为回顾性研究,无法明确术中脓肿是否清除彻底等具体术中指标,同时样本量有限,存在潜在未考虑的危险因素;其次本研究数据收集于 4 家三甲医院,不同手术医生存在手术及治疗差异,结果存在一定局限性;未来可开展同质化纵向的大样本量、多中心研究,为后续外部验证模型的临床转化应用提供参考依据。

参考文献

[1] RUPAREL S, TANAKA M, MEHTA R, et al. Surgical management of spinal tuberculosis-the past, present, and future[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(6):1307.

[2] BAGCCHI S. WHO's global tuberculosis report 2022[J]. *Lancet Microbe*, 2023, 4(1):e20.

[3] GAUTAM M P, KARKI P, RIJAL S, et al. Pott's spine and paraplegia[J]. *JNMA J Nepal Med Assoc*, 2005, 44(159):106-115.

[4] COOPER R A. Surgical site infections:epidemiology and microbiological aspects in trauma and orthopaedic surgery[J]. *Int Wound J*, 2013, 101(1):3-8.

[5] KURTZ S M, ONG K L, LAU E, et al. Prosthetic joint infection risk after TKA in the medicare population [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468(1):52-56.

[6] SCHAIRER W W, SING D C, VAIL T P, et al. Causes and frequency of unplanned hospital re-admission after total hip arthroplasty[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2014, 472(2):464-470.

[7] 高显达, 张迪, 张鹏, 等. 脊柱结核术后切口不愈合的危险因素分析[J]. *河北医科大学学报*, 2019, 40(4):425-428.

[8] JIANG G, ZHU Y, ZHANG M, et al. The risk factors of the postoperative poor wound healing in spinal tuberculosis patients: a single centre

- retrospective cohort study[J]. *Int Wound J*, 2022,19(7):1669-1676.
- [9] 胡光锋,白鹏程,殷华. 脊柱后路术后伤口愈合不良相关影响因素研究[J]. *川北医学院学报*, 2022,37(4):497-500.
- [10] 康焱,周宗科,杨惠林,等. 中国骨科手术加速康复切口管理指南[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2018,11(1):3-10.
- [11] 国家卫生健康委加速康复外科专业委员会骨科专家组,中国研究型医院学会骨科加速康复专业委员会,中国康复技术转化及促进会骨科加速康复专业委员会. 骨科加速康复手术切口操作与并发症防治专家共识[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2022,15(10):776-784.
- [12] SUN G, WU J, GAO C, et al. Inpatient outcomes of surgical treatment for spinal tuberculosis:10-year results from the us national inpatient sample[J]. *Turk Neurosurg*, 2020,30(5):714-722.
- [13] SWANSON T, OUSEY K, HAESLER E, et al. IWII wound infection in clinical practice consensus document: 2022 update [J]. *J Wound Care*, 2022,31(Suppl. 12):S10-21.
- [14] KEREZOU DIS P, ALVI M A, SPINNER R J, et al. Predictors of unplanned returns to the operating room within 30 days in neurosurgery: insights from a national surgical registry[J]. *World Neurosurg*, 2019,123:e348-370.
- [15] HARRIS L S, LUCK J E, ATHERTON R R. Suboptimal identification of patient-specific risk factors for poor wound healing can be improved by simple interventions[J]. *Int Wound J*, 2017,14(1):138-141.
- [16] PEDUZZI P, CONCATO J, KEMPER E, et al. A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis [J]. *J Clin Epidemiol*, 1996,49(12):1373-1379.
- [17] 侯正尧,李晋奇,杨勇,等. 机器学习临床预测模型构建策略与建议[J]. *医药导报*, 2024,43(12):2048-2056.
- [18] CHAURASIA A, OJHA V, BONAL O, et al. Non-healing wounds;a delayed wound infection by *Mycobacterium tuberculosis* [J]. *J Obstet Gynaecol India*, 2020,70(3):225-229.
- [19] 袁雄辉,潘瑞康,张剑. 脊柱结核术后手术部位感染危险因素分析[J]. *中国医学创新*, 2023,20(14):130-133.
- [20] BAO Y C, YU M, TANG L, et al. Changes in serum prealbumin and incision complications following spinal tuberculosis surgery:a preliminary study[J]. *Orthop Surg*, 2021,13(2):501-505.
- [21] JIANG G, OU Y, ZHU Y, et al. Development of a scoring scale for predicting the risk of postoperative complications after spinal tuberculosis debridement:a retrospective cohort study of 233 patients [J]. *Ann Palliat Med*, 2021,10(9):9372-9382.
- [22] 范俊,董伟杰,兰汀隆,等. 手术治疗脊柱结核病灶清除术后感染的疗效[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2020,30(10):896-903.
- [23] 中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会感染学组,中国医师协会骨科医师分会脊柱感染学组. 脊柱结核手术加速康复外科实施流程专家共识[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2023,16(1):1-16.
- [24] BOON A C, LAM A K, GOPALAN V, et al. Endogenously elevated bilirubin modulates kidney function and protects from circulating oxidative stress in a rat model of adenine-induced kidney failure[J]. *Sci Rep*, 2015,5:15482.
- [25] LI Y, SHENG H, YAN Z, et al. Bilirubin stabilizes the mitochondrial membranes during NLRP3 inflammasome activation[J]. *Biochem Pharmacol*, 2022,203:115204.
- [26] MARTELANC M, ŽIBERNA L, PASSAMONTI S, et al. Direct determination of free bilirubin in serum at sub-nanomolar levels[J]. *Anal Chim Acta*, 2014,809:174-182.
- [27] LIU H, LI Y, YI J, et al. Neutrophil-lymphocyte ratio as a potential marker for differential diagnosis between spinal tuberculosis and pyogenic spinal infection[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022,17(1):357.
- [28] 齐素红,王学民,陈长宝,等. 脊柱术后感染病原菌及 CD64 和中性粒细胞百分比的早期预测价值[J]. *中华医院感染学杂志*, 2021,31(3):429-433.
- [29] TAKAHASHI J, SHONO Y, HIRABAYASHI H, et al. Usefulness of white blood cell differential for early diagnosis of surgical wound infection following spinal instrumentation surgery[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006,31(9):1020-1025.
- [30] 王力,张文龙,邱南海,等. 胸腰椎结核术后并发症危险因素的多因素 logistic 回归分析[J]. *重庆医学*, 2018,47(18):2515-2517.
- [31] 黄锐. 脊柱结核手术相关并发症的危险因素分析及防治策略[D]. 银川:宁夏医科大学,2020.