



· 论 著 ·

# 基于增强CT多区域影像组学特征联合临床危险因素构建结肠癌术前脉管侵犯预测模型

李婉萍<sup>1, 2</sup>, 郑文斌<sup>3</sup>

1. 汕头大学医学院, 广东 汕头 515041 ;
2. 普宁市人民医院医学影像科, 广东 普宁 515300 ;
3. 汕头大学医学院第二附属医院医学影像科, 广东 汕头 515041

[摘要] 目的: 探讨基于增强计算机断层成像 (computed tomography, CT) 多区域影像组学特征联合临床危险因素预测结肠癌术前脉管侵犯 (lymphovascular invasion, LVI) 的价值。方法: 回顾并分析2018年1月—2024年10月普宁市人民医院经病理学检查确诊的结肠癌患者资料, 分为训练集和验证集。从静脉期CT图像分别勾画肿瘤核心区及瘤周3 mm区域, 提取影像组学特征。采用 $t$ 检验、Spearman相关性分析和最小绝对收缩与选择算子 (the least absolute shrinkage and selection operator, LASSO) 回归筛选特征, 分别构建肿瘤核心区、瘤周区及双区域融合的影像组学模型。通过logistic回归筛选临床独立危险因素, 并与最优影像组学模型构建临床-影像组学联合模型。采用受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线评估模型性能, 计算曲线下面积 (area under curve, AUC)、灵敏度、特异度、F1分数及准确度等指标。结果: 最终纳入136例患者按照7:3的比例随机分为训练集 (95例) 和验证集 (41例)。双区域融合影像组学模型 (模型3) 表现最优, 验证集AUC为0.863 (95% CI 0.720~1.000)。临床-影像联合模型进一步提升了预测效能, 验证集AUC达0.873 (95% CI 0.740~1.000), 灵敏度、特异度分别为0.808和0.800。Logistic回归分析显示性别 (OR=2.446, 95% CI 1.056~5.665,  $P=0.037$ ) 和临床分期 (OR=3.838, 95% CI 1.045~14.096,  $P=0.043$ ) 是LVI的独立危险因素。结论: 基于增强CT多区域影像组学特征联合临床危险因素构建的预测模型可有效评估结肠癌术前LVI状态, 为个体化治疗决策提供参考依据。

[关键词] 结肠癌; 计算机断层成像; 脉管侵犯; 影像组学

中图分类号: R735.3+5; R445.3 文献标志码: A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2025.05.010

基金项目: 无。

利益冲突: 作者声明无利益冲突。

伦理批件: 伦审【2025】第04号。

知情同意: 不需要。

引用本文: 李婉萍, 郑文斌. 基于增强CT多区域影像组学特征联合临床危险因素构建结肠癌术前脉管侵犯预测模型 [J]. 肿瘤影像学, 2025, 34(5): 515-523.

Funding: no.

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: lunshen No.4 of 2025.

Informed consent: not required.

Cite this article: LI W P, ZHENG W B. Multi-region radiomics features from enhanced CT combined with clinical risk factors for preoperative prediction of lymphovascular invasion in colon cancer [J]. Oncoradiology, 2025, 34(5): 515-523.

**Multi-region radiomics features from enhanced CT combined with clinical risk factors for preoperative prediction of lymphovascular invasion in colon cancer** LI Wanping<sup>1, 2</sup>, ZHENG Wenbin<sup>3</sup> (1. Shantou University Medical School, Shantou 515041, Guangdong Province, China; 2. Department of Radiology, Puning People's Hospital, Puning 515300, Guangdong Province, China; 3. Department of Radiology, The Second Affiliated Hospital of Shantou University Medical College, Shantou 515041, Guangdong Province, China)

Correspondence to: ZHENG Wenbin E-mail: hwenb@126.com

[Abstract] **Objective:** To evaluate the value of combining multi-region radiomics features from enhanced computed tomography (CT) with clinical risk factors for predicting preoperative lymphovascular invasion (LVI) in colon cancer. **Methods:** A retrospective analysis was conducted on pathologically confirmed colon cancer patients at Puning People's Hospital from January 2018 to October 2024. Patients were randomly divided into a training set and a validation set. Radiomics features were extracted from venous-phase CT images by delineating the tumor core and peritumoral 3 mm region. Features were selected using  $t$ -tests, Spearman correlation

analysis, and the least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression to construct three radiomics models: tumor core, peritumoral, and combined dual-region models. Independent clinical risk factors were identified using logistic regression and integrated with the optimal radiomics model to develop a clinical-radiomics combined model. Model performance was evaluated using receiver operating characteristic (ROC) curve, with the area under curve (AUC), sensitivity, specificity, F1-score, and accuracy as metrics. **Results:** A total of 136 patients were included and randomly allocated to the training set (95 cases) and the validation set (41 cases) at a ratio of 7 : 3. The dual-region radiomics model (Model 3) demonstrated the best performance, with a validation AUC of 0.863 (95% CI 0.720-1.000). The clinical-radiomics combined model further improved predictive performance, achieving a validation AUC of 0.873 (95% CI 0.740-1.000), with sensitivity and specificity of 0.808 and 0.800, respectively. Logistic regression identified gender (OR=2.446, 95% CI 1.056-5.665,  $P=0.037$ ) and clinical stage (OR=3.838, 95% CI 1.045-14.096,  $P=0.043$ ) as independent risk factors for LVI. **Conclusion:** The prediction model combining multi-region radiomics features from enhanced CT with clinical risk factors effectively assesses preoperative LVI status in colon cancer, providing valuable reference for individualized treatment decision-making.

[ **Key words** ] Colon cancer; Computed tomography; Lymphovascular invasion; Radiomics

根据2022年全球癌症统计数据<sup>[1]</sup>, 结直肠癌 (colorectal cancer, CRC) 发病率和死亡率在全球范围内均位居所有恶性肿瘤的前十位。在中国, 结直肠癌的发病率和死亡率均位列恶性肿瘤的前五位, 且男性的死亡率高于女性, 结肠癌发病率略高于直肠癌<sup>[2]</sup>。脉管侵犯 (lymphovascular invasion, LVI) 作为肿瘤侵袭性生物学行为的重要表征, 包括血管侵犯和淋巴管侵犯, 指在邻近病灶的血管和淋巴管腔内存在肿瘤细胞, 是造成淋巴结转移或远处器官转移的早期关键步骤<sup>[3]</sup>。既往研究<sup>[4-8]</sup>证实, 结肠癌LVI状态不仅是影响患者预后的独立危险因素, 更是指导辅助化疗周期决策的重要依据, 并且LVI阳性与无病生存期 (disease free survival, DFS) 和总生存期 (overall survival, OS) 显著相关。因此术前诊断结肠癌LVI状态, 对实施个体化治疗以及改善患者预后具有重要的临床意义。然而, 目前诊断LVI仍基于术后标本的病理学诊断。增强计算机体层成像 (computed tomography, CT) 作为结肠癌术前常规影像学检查<sup>[9]</sup>, 虽能提供影像学上LVI相关的形态表现, 但诊断效能仍有提升空间。而新兴的影像组学技术通过将医学影像转化为高通量定量特征数据, 能够最大程度地反映肿瘤内部的异质性信息<sup>[10]</sup>。本研究通过整合影像组学特征与临床信息, 构建术前预测结肠癌LVI状态的联合模型, 以期提升临床决策的精准度。

## 1 资料和方法

### 1.1 一般资料

回顾并收集2018年1月—2024年10月普宁市人民医院结肠癌患者的临床和影像学资料。纳入标准: ①术前行CT增强检查; ②术前未经过治疗; ③经结肠癌根治术, 术后病理学检查确诊为结肠癌, 且病理学检查证实LVI (-) 或LVI (+)。排除标准: ①CT图像具有明显运动伪影或者未进行增强CT扫描。②影像存储与传输系统 (picture archiving and communication system, PACS) 数据不全。所有患者按照7 : 3的比例随机分为训练集和验证集, 分别进行模型建立和内部验证。本次研究为回顾性研究, 已获得医院伦理委员会的批准, 免除知情同意。

### 1.2 检查方法

采用荷兰Philips公司的Brilliance iCT128排螺旋CT机对所有患者行CT检查。扫描参数: 管电压120 kV, 管电流50~450 mA, 螺距0.925, 采集矩阵512 × 512, 视野180 mm × 180 mm。扫描采集层厚5.0 mm, 重建层厚3.0 mm。所有患者先行腹部CT平扫, 再行静脉造影剂对比增强扫描, 对比造影剂为碘海醇 (含碘300 mg/mL), 采用高压泵注射器快速注入, 静脉注射造影剂1.5~2.0 mL/kg, 速率为2.0~2.5 mL/s, 注射造影剂后分别于30 s和70 s记录动脉期和门静脉期图像。扫描范围自膈底至会阴部。

### 1.3 图像预处理和分割

首先对图像进行归一化处理，减少因成像设备或参数造成的差异。通过线性映射将CT图像灰度值标准化至固定范围，并将体素大小调整为统一分辨率。静脉期CT图像以DICOM格式导入到3D Slicer 5.2.2版本，由1名有5年工作经验的医师在不知病理学检查结果的情况下从静脉期CT图像逐层勾画肿瘤感兴趣区（region of interest, ROI），勾画时不包括肿瘤坏死区域，避免肠管管腔内的气体、液体等，对肿瘤ROI进行勾画后，合成感兴趣容积（volume of interest, VOI）。图像分割完成30 d后随机抽取50例患者，以同样方法再次勾画并提取影像组学特征，计算组内相关系数（intra-class correlation coefficient, ICC），当 $ICC > 0.75$ ，表示可信度良好，可用于之后的研究。

### 1.4 影像组学特征提取及特征筛选

采用Python3.7.6版本（<https://www.python.org/>）的Pyradiomics包，提取ROI的影像组学特征。本研究应用了统计学方法对特征进行筛选和降维，从而达到对模型建立关键特征的筛选的目的。首先，符合正态分布的数据，采用 $t$ 检验进行分析；对于不符合正态分布的数据，则使用秩和检验，进行特征的初步筛选。为了避免数据间的共线性并减少冗余，进一步通过Spearman相关性分析进行特征处理和筛选。随后，对数据进行标准化处理，并应用最小绝对收缩与选择算子（the least absolute shrinkage and selection operator, LASSO）回归算法对已提取的特征进行降维。通过10次交叉验证，选择最佳的 $\alpha$ 值，最终筛选出对模型建立具有显著意义的影像组学特征。整个过程中以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

### 1.5 临床特征筛选

收集的临床资料包括年龄、性别、病理学T分期、病理学N分期、临床分期、肿瘤分化程度、肿瘤位置、病理肿瘤最大径、病理淋巴结转移数目、术前癌胚抗原（carcinoembryonic antigen, CEA；正常范围 $< 5 \mu\text{g/L}$ ）及糖类抗原19-9（carbohydrate antigen 19-9, CA19-9；正

常范围 $< 35 \text{ U/mL}$ ）水平。将所有患者进行单因素logistic回归分析，筛选出与LVI相关的变量（ $P < 0.05$ ）。随后将单因素分析中具有统计学意义的变量纳入多因素logistic回归分析，计算各变量的OR值及95% CI，以确定独立危险因素。

### 1.6 影像组学模型、临床模型、临床-影像联合模型构建

采用6种机器学习分类器包括支持向量机（support vector machine, SVM）、K最近邻（k-nearest neighbor, KNN）、轻量级梯度提升机（light gradient boosting machine, LightGBM）、随机梯度下降（stochastic gradient descent, SGD）分类器、随机森林（random forest, RF）、极限梯度提升算法（extreme gradient boosting, Xgboost），根据3个分组的影像组学特征建立模型，并应用验证集数据验证。

在临床特征筛选基础上，采用逐步回归法构建临床模型，使用Python语言绘制受试者工作特征（receiver operating characteristic, ROC）曲线评估模型性能，并计算曲线下面积（area under curve, AUC）以衡量模型的预测能力。基于多因素logistic回归分析的临床独立危险因素，和经过LASSO回归算法得到的最佳影像组学模型特征，进行数据级前融合，并且纳入新的训练集和验证集资料。采用上步筛选出的最佳机器学习分类器，进行模型构建和模型效能评估，绘制ROC曲线、决策曲线（decision curve analysis, DCA）、校准曲线、混淆矩阵来可视化模型的诊断效能，最终模型被保存为pkl文件，供后续研究者加载使用，作为模型复现和进一步研究的基础。

### 1.7 统计学处理

采用SPSS 25.0软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示，非正态分布的计量资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示。计数资料以 $n(\%)$ 表示。采用 $t$ 检验（正态分布）或Mann-Whiney  $U$ 检验（非正态分布）比较计量资料的组间差异。采用 $\chi^2$ 检验或Fisher精确概率检验比较计数资料的组间差异。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结 果

### 2.1 一般临床资料

回顾并收集结肠癌患者共478例, 最终纳入136例行结肠癌根治术并经术后病理学检查确诊

结肠癌的患者(图1)。所有患者按照7:3的比例随机分为训练集(95例)和验证集(41例), 分别进行模型建立和内部验证。训练集与验证集之间临床资料比较结果见表1, 年龄、性别、病理学T分期、病理学N分期、临床分期等临床资料差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。

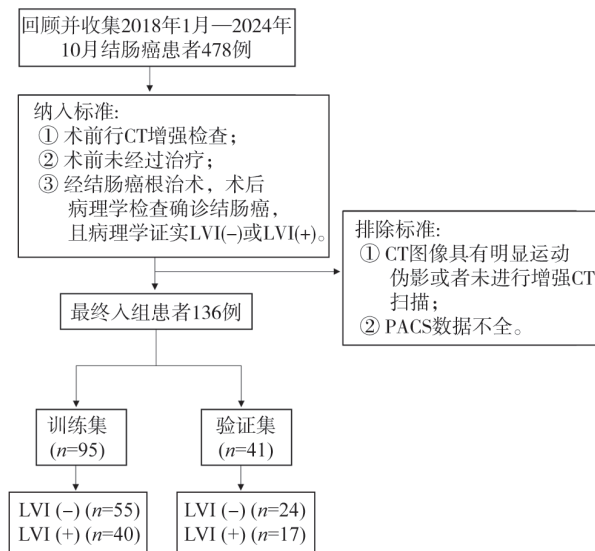


图1 研究设计流程图

Fig.1 Research design flow chart

表1 基线资料特征

Tab.1 Characteristics of baseline data

临床变量	总数 (n=136)	训练集 (n=95)	验证集 (n=41)	统计量	P值
性别				$\chi^2=0.006$	0.941
女性	69 (50.7)	48 (50.5)	21 (51.2)		
男性	67 (49.3)	47 (49.5)	20 (48.8)		
年龄/岁 $\bar{x}\pm s$	65.3 ± 12.2	64.6 ± 12.5	67.0 ± 11.5	$t=1.027$	0.313
病理学T分期					0.688 <sup>*</sup>
Tis	2 (1.5)	1 (1.1)	1 (2.4)		
T1	3 (2.2)	3 (3.2)	0 (0)		
T2	5 (3.7)	3 (3.2)	2 (4.9)		
T3	118 (86.8)	83 (87.4)	35 (85.4)		
T4	8 (5.9)	5 (5.3)	3 (7.3)		
病理学N分期				$\chi^2=3.36$	0.186
N0	52 (38.2)	38 (40)	14 (34.1)		
N1	48 (35.3)	29 (30.5)	19 (46.3)		
N2	36 (26.5)	28 (29.5)	8 (19.5)		

续表

临床变量	总数 (n=136)	训练集 (n=95)	验证集 (n=41)	统计量	P值
临床分期					0.694*
0	2 (1.5)	1 (1.1)	1 (2.4)		
I	6 (4.4)	4 (4.2)	2 (4.9)		
II	44 (32.4)	33 (34.7)	11 (26.8)		
III	82 (60.3)	55 (57.9)	27 (65.9)		
IV	2 (1.5)	2 (2.1)	0 (0)		
分化程度					0.346*
高	2 (1.5)	2 (2.1)	0 (0)		
中	116 (85.3)	78 (82.1)	38 (92.7)		
低分化及其他	18 (13.2)	15 (15.8)	3 (7.3)		
肿瘤位置				$\chi^2=0.848$	0.357
左半结肠	81 (59.6)	59 (62.1)	22 (53.7)		
右半结肠	55 (40.4)	36 (37.9)	19 (46.3)		
肿瘤最大径/cm $\bar{x}\pm s$	5.2 $\pm$ 1.9	5.1 $\pm$ 2.0	5.3 $\pm$ 1.5	$t=0.216$	0.643
淋巴结转移数目M ( $P_{25}$ , $P_{75}$ )	1.0 (0.0, 3.0)	1.0 (0.0, 3.0)	1.0 (0.0, 3.0)	$U=0.075$	0.785
CA19-9/ (U·mL <sup>-1</sup> )				$\chi^2=0.022$	0.883
<35	95 (69.9)	66 (69.5)	29 (70.7)		
$\geq 35$	41 (30.1)	29 (30.5)	12 (29.3)		
CEA/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )				$\chi^2=0.758$	0.384
<5	54 (39.7)	40 (42.1)	14 (34.1)		
$\geq 5$	82 (60.3)	55 (57.9)	27 (65.9)		
LVI				$\chi^2=0.005$	0.944
-	79 (58.1)	55 (57.9)	24 (58.5)		
+	57 (41.9)	40 (42.1)	17 (41.5)		

注：右半结肠，包括升结肠、横结肠右侧半；左半结肠，包括横结肠左侧半、降结肠和乙状结肠；\*为采用Fisher精确概率检验。

## 2.2 影像组学特征筛选

从肿瘤核心区 (VOI1)、瘤周 (VOI2) 中分别提取出1 130个既定的影像组学特征。研究分为肿瘤组 (VOI1)、瘤周组 (VOI2)、肿瘤与瘤周双区域融合组 (VOI3) (图2)。采用t检验

及相关性分析后肿瘤组、瘤周组、融合组分别保留22、60、79个特征，经LASSO回归算法筛选，通过10次交叉验证，选择最佳的 $\alpha$ 值 (图3)，最终肿瘤组、瘤周组、融合组分别保留9、15、15个特征。筛选后特征包括一阶特征和纹理特征。

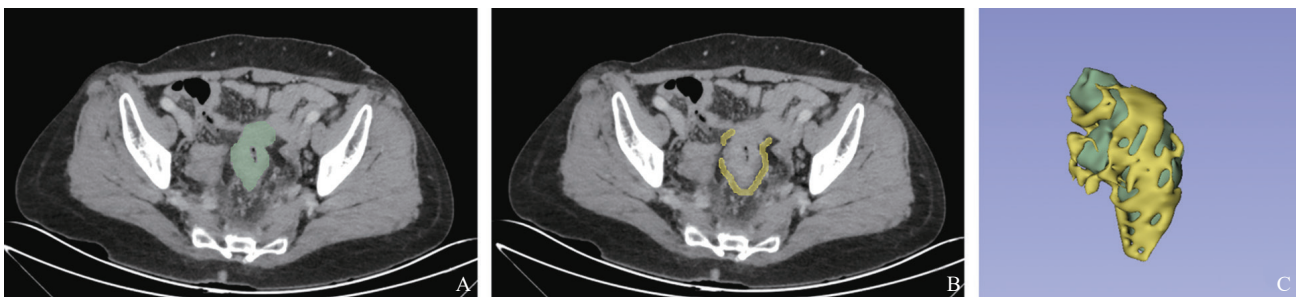


图2 结肠癌患者的轴位增强CT静脉期勾画示意图

Fig. 2 Manual segmentation schematic diagram of axial enhanced CT in the venous phase of colon cancer patient

A: 绿色区域为单层肿瘤核心ROI (ROI1) ; B: 黄色区域为单层瘤周3 mm ROI (ROI2) ; C: 单层ROI融合得到的VOI图像。

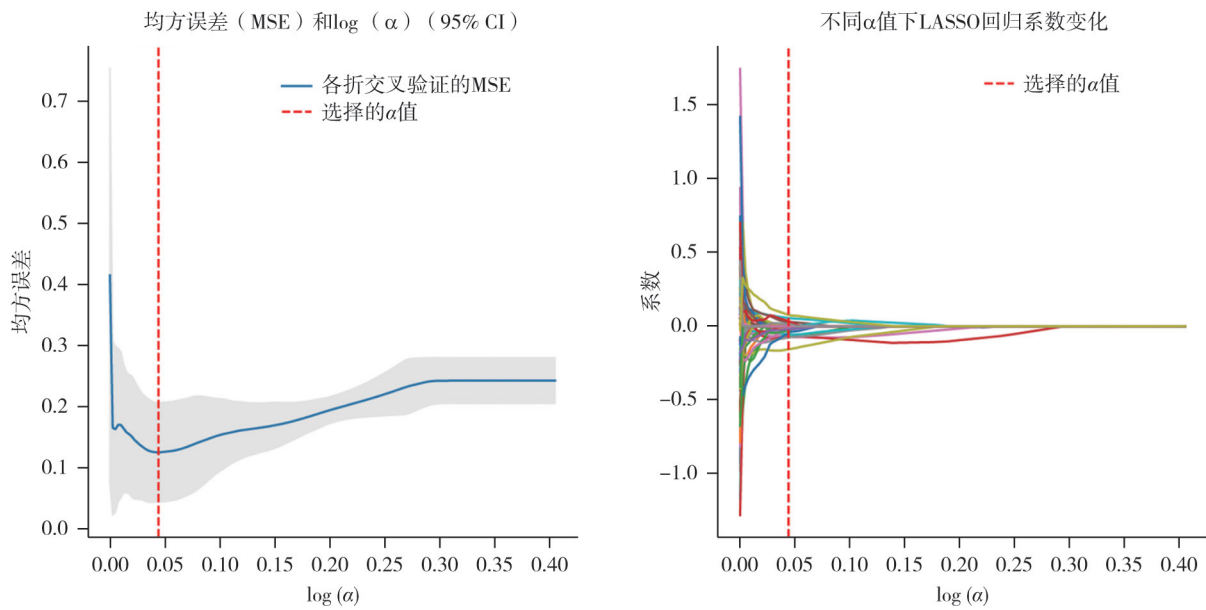


图3 基于LASSO回归算法筛选影像组学特征

Fig. 3 LASSO regression analysis for selection of radiomics features

红色虚线标记了选择的 $\alpha$ 值, 该值对应的特征系数组合是最终采用的。

### 2.3 评估影像组学模型效能

采用6种机器学习分类器建立3个模型, 分别为肿瘤组(模型1)、瘤周组(模型2)、融合组(模型3), 综合评价模型的ROC曲线, DCA曲线、校准曲线、灵敏度、特异度等多种指标, 以验证集AUC为主要评价标准, 选择最佳的影像组学模型3(融合组)和机器学习分类

器模型LightGBM, 模型3(融合组)训练集AUC为0.892、灵敏度为0.855、特异度为0.800、F1分数为0.855、准确度为0.832, 验证集的AUC为0.863、灵敏度为0.741、特异度为0.714、F1分数为0.784、准确度为0.732。各模型效能指标及ROC曲线如表2和图4所示。

表2 结肠癌患者术前LVI预测模型的效能比较

Tab.2 Performance comparison of prediction models for LVI in colon cancer patients

模型	数据集	灵敏度	特异度	F1 分数	准确度	AUC	95% CI
模型1(肿瘤组)	训练集	0.689	0.618	0.724	0.663	0.716	0.651~0.781
	验证集	0.714	0.550	0.667	0.634	0.667	0.559~0.774
模型2(瘤周组)	训练集	0.780	0.750	0.807	0.768	0.887	0.793~0.980
	验证集	0.692	0.600	0.720	0.659	0.814	0.677~0.950
模型3(融合组)	训练集	0.855	0.800	0.855	0.832	0.892	0.799~0.985
	验证集	0.741	0.714	0.784	0.732	0.863	0.720~1.000
临床-影像联合模型	训练集	0.845	0.838	0.867	0.842	0.906	0.822~0.989
	验证集	0.808	0.800	0.840	0.805	0.873	0.740~1.000

### 2.4 评估临床模型、临床-影像组学联合模型效能

收集的临床资料包括年龄、性别、病理学T分期、病理学N分期、临床分期、肿瘤分化程度、肿瘤位置、肿瘤最大径、淋巴结转移数目、

CEA及CA19-9水平。首先对所有变量进行单因素logistic回归分析, 筛选出与LVI相关的变量( $P < 0.05$ )为性别、病理学N分期、临床分期、肿瘤分化程度、肿瘤最大径、淋巴结转移数目、术前CA19-9水平(表3)。随后将单因

素分析中具有统计学意义的变量纳入多因素 logistic 回归分析, 结果显示性别 (OR=2.446, 95% CI 1.056~5.665,  $P=0.037$ ) 和临床分期 (OR=3.838, 95% CI 1.045~14.096,  $P=0.043$ ) 与 LVI 有统计学意义, 确定为独立危险因素并构建临床模型, 临床模型 AUC 为 0.820。将临床

特征及影像组学最优模型 (模型3) 的影像组学特征进行联合模型构建, 联合模型训练集 AUC 为 0.906、灵敏度为 0.845、特异度为 0.838、F1 分数为 0.867、准确度为 0.842, 验证集 AUC 为 0.873、灵敏度为 0.808、特异度为 0.800、F1 分数为 0.840、准确度为 0.805 (表 2 及图 4)。

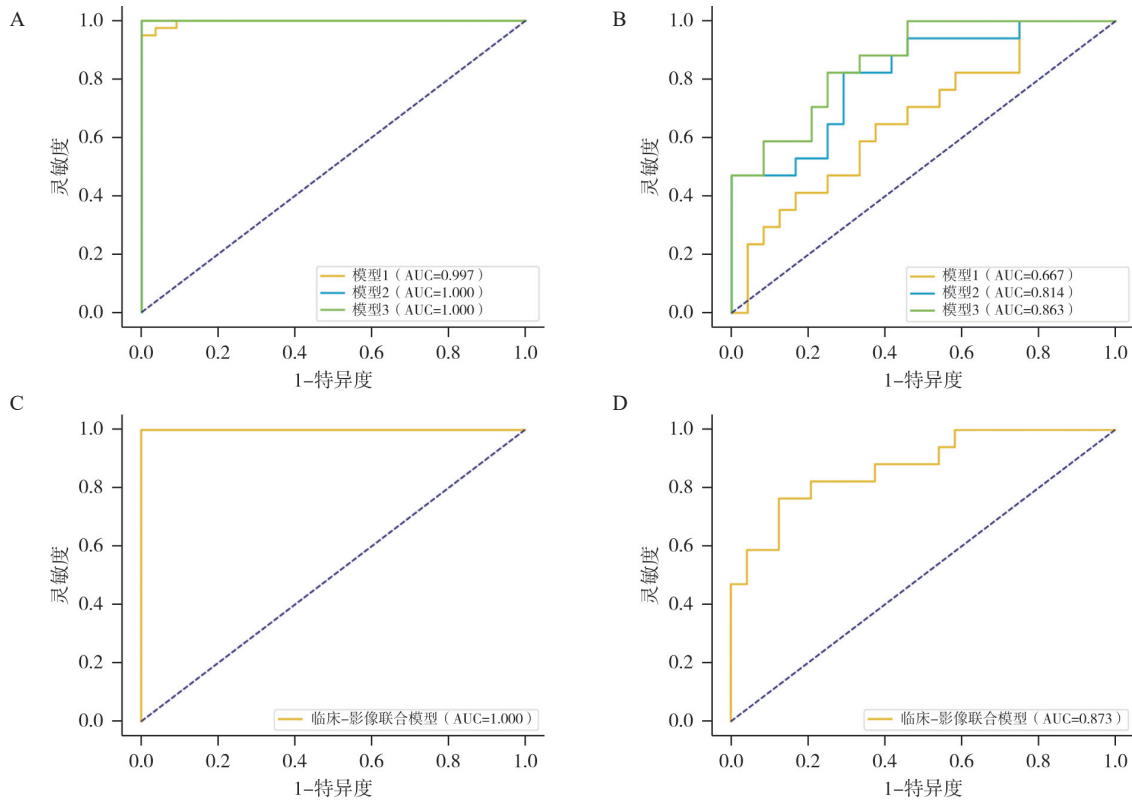


图4 多种模型预测结肠癌术前LVI ROC曲线

Fig.4 ROC curve of multiple models prediction for LVI in colon cancer patients

A: 模型1~3训练集; B: 模型1~3验证集; C: 临床-影像联合模型训练集; D: 临床-影像联合模型验证集。

表3 Logistic回归分析筛选结肠癌术前预测LVI的独立危险因素

Tab. 3 Independent risk factors by logistic regression analysis for LVI in colon cancer patients

变量	单因素分析		多因素分析	
	OR值 (95% CI)	P值	OR值 (95% CI)	P值
年龄	1.020 (0.991~1.050)	0.180	—	—
性别	2.061 (1.031~4.120)	0.041	2.446 (1.056~5.665)	0.037
病理学T分期	2.007 (0.894~4.509)	0.092	—	—
病理学N分期	3.784 (2.248~6.370)	<0.010	1.098 (0.349~3.456)	0.873
临床分期	6.799 (2.965~15.593)	<0.010	3.838 (1.045~14.096)	0.043
肿瘤分化程度	6.355 (2.010~20.095)	0.002	2.705 (0.739~9.903)	0.133
肿瘤位置	0.597 (0.295~1.211)	0.153	—	—
肿瘤最大径	0.809 (0.660~0.991)	0.041	0.818 (0.636~1.053)	0.120
转移淋巴结数目	1.330 (1.150~1.539)	<0.010	1.117 (0.929~1.343)	0.239
CA19-9	2.292 (1.087~4.833)	0.029	1.529 (0.625~3.740)	0.353
CEA	1.591 (0.784~3.227)	0.198	—	—

### 3 讨 论

本研究通过多区域影像组学特征分析, 研究关注肿瘤核心区域的影像组学特征, 并纳入了瘤周区域的特征, 并进一步融合了双区域特征, 通过多区域分析提供更丰富的生物学信息, 有助于更准确地评估LVI状态。

研究比较了6种机器学习算法, 最终确定LightGBM为最优算法。LightGBM以其高效特征筛选与梯度提升机制适用于处理高维度、非线性的影像组学数据。本研究通过灵敏度、特异度、F1分数、准确度和AUC这些指标对影像组学模型的预测性能进行比较, 显示模型1(肿瘤组)训练集与验证集数据差异较小, 提示原发灶影像组学特征具有较高稳定性; 模型1(肿瘤组)验证集灵敏度(0.714)较模型2(瘤周组0.692)高, 说明模型1更能准确识别出肿瘤原发灶且泛化较好; 模型2(瘤周组)验证集AUC(0.814)较模型1(肿瘤组0.667)高, 说明模型2整体分类性能更优; 模型3(融合组)验证集在影像组学模型中具有最好的LVI预测效能, 模型3验证集的AUC为0.863、灵敏度为0.741、特异度为0.714、F1分数为0.784、准确度为0.732。通过系统比较多种算法, 我们为结肠癌LVI预测提供了更优的建模方法。

本研究发现, 临床分期为结肠癌LVI的独立危险因素。Wang等<sup>[7]</sup>和Zhong等<sup>[11]</sup>的研究成果分别显示, 临床分期Ⅳ期、ⅢC期是结肠癌患者LVI的独立因素, 这与本研究结果相似, 说明肿瘤分期在评估LVI风险中具有重要地位。既往研究<sup>[12-14]</sup>认为, 结肠癌LVI的危险因素为术前肿瘤生物标志物(CA19-9或CEA)、病理学T分期等, 与本次研究结论不同, 可能与本研究样本量大小、纳入排除标准不同有关。除此之外, 本次研究在多区域影像组学背景下也进一步验证了性别及临床分期在LVI预测中的重要性, 提升了模型的预测性能。

梁翠珊等<sup>[13]</sup>利用联合增强CT影像组学特征

及术前CEA水平预测结直肠癌LVI状态时, 联合模型训练组和验证组的一致性指数(C-index)分别为0.751、0.749, 高于影像组学组(训练组0.719, 验证组0.720)。本研究联合模型AUC(0.873)高于梁翠珊等的C-index(0.749), 可能得益于多区域特征融合和更优的算法选择。郑文霞等<sup>[15]</sup>利用光谱CT细胞外容积(extracellular volume, ECV)影像组学及临床联合模型, 在结直肠癌血管淋巴管以及神经侵犯的预测上优于纯临床及纯影像组学模型。而本研究基于常规增强CT, 通过多区域分析和临床因素整合, 取得了相当的预测性能。陈吉虎等<sup>[14]</sup>学者利用结直肠癌CT增强静脉期图像构建影像组学模型并联合LVI危险因素术前CEA水平构建的联合模型, 验证集AUC(0.751)高于影像组学模型(0.730)。Li等<sup>[16]</sup>基于CT增强影像组学预测直肠癌LVI状态的研究中, 影像组学与临床联合模型验证集(AUC为0.818)的性能也优于临床模型(AUC为0.709)。但略低于本研究联合模型验证集(AUC为0.873), 我们推测, 由于本研究采用了多模态信息融合(影像组学+临床因素)的建模方法, 在提升预测性能方面具有更多的优势。

综上所述, 本研究在多区域影像组学分析、机器学习算法优化、临床-影像联合建模有助于评估术前结肠癌LVI状态, 从而帮助临床医师为结肠癌患者量身定制更加个性化的治疗策略。然而, 本研究存在样本量较小、单中心数据以及未纳入新兴生物标志物等局限性, 仍需在后续研究中加以改进。未来可通过多中心协作、自动化分割工具和多组学融合进一步提升研究的创新性和临床转化价值。

#### 第一作者:

李婉萍 (ORCID: 0009-0000-5533-0072), 同等学力研究生在读, 主治医师。

#### 通信作者:

郑文斌 (ORCID: 0000-0002-1750-4999), 博士, 主任医师, E-mail: hwenb@126.com。

#### 作者贡献声明:

李婉萍: 文献查阅, 图像处理及分析数据, 撰写论文; 郑文斌: 选题, 审稿。

## [参 考 文 献]

- [1] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. *CA Cancer J Clin*, 2024, 74(3): 229–263.
- [2] 上海市抗癌协会结直肠癌专业委员会. 结直肠癌早筛、早诊、早治上海方案(2023年版) [J]. *中国癌症杂志*, 2024, 34(1): 13–66.  
Colorectal Cancer Special Committee of Shanghai AntiCancer Association. Shanghai plan for early screening, diagnosis and treatment of colorectal cancer (2023 edition) [J]. *China Oncol*, 2024, 34(1): 13–66.
- [3] DRESEN R C, PETERS E M, RUTTEN H T, et al. Local recurrence in rectal cancer can be predicted by histopathological factors [J]. *Eur J Surg Oncol*, 2009, 35(10): 1071–1077.
- [4] ZHANG L J, DENG Y X, LIU S R, et al. Lymphovascular invasion represents a superior prognostic and predictive pathological factor of the duration of adjuvant chemotherapy for stage III colon cancer patients [J]. *BMC Cancer*, 2023, 23(1): 3.
- [5] GUAN Z, ZHANG X Y, LI X T, et al. Correlation and prognostic value of CT-detected extramural venous invasion and pathological lymph-vascular invasion in colon cancer [J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2022, 47(4): 1232–1243.
- [6] CHO S S, PARK J W, KANG G H, et al. Prognostic impact of extramural lymphatic, vascular, and perineural invasion in stage II colon cancer: a comparison with intramural invasion [J]. *Dis Colon Rectum*, 2023, 66(3): 366–373.
- [7] WANG X F, CAO Y H, DING M M, et al. Oncological and prognostic impact of lymphovascular invasion in colorectal cancer patients [J]. *Int J Med Sci*, 2021, 18(7): 1721–1729.
- [8] BETGE J, POLLHEIMER M J, LINDTNER R A, et al. Intramural and extramural vascular invasion in colorectal cancer: prognostic significance and quality of pathology reporting [J]. *Cancer*, 2012, 118(3): 628–638.
- [9] 国家卫生健康委员会医政司, 中华医学会肿瘤学分会. 国家卫健委中国结直肠癌诊疗规范(2023版) [J]. *中国实用外科杂志*, 2023, 43(6): 602–630.  
Hospital Authority of National Health Commission of the People's Republic of China; Chinese Society of Oncology, ASSOCIATION C M. Chinese protocol of diagnosis and treatment of colorectal cancer of the National Health Commission (2023 edition) [J]. *Chin J Pract Surg*, 2023, 43(6): 602–630.
- [10] LAMBIN P, RIOS-VELAZQUEZ E, LEIJENAAR R, et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis [J]. *Eur J Cancer*, 2012, 48(4): 441–446.
- [11] ZHONG J W, YANG S X, CHEN R P, et al. Prognostic value of lymphovascular invasion in patients with stage III colorectal cancer: a retrospective study [J]. *Med Sci Monit*, 2019, 25: 6043–6050.
- [12] 桑温昌, 李兆德, 张晓东, 等. 结直肠癌患者脉管侵犯的危险因素及预后分析 [J]. *中华诊断学电子杂志*, 2019, 7(3): 203–206.  
SANG W C, LI Z D, ZHANG X D, et al. Analysis of risk factors and prognosis on vascular invasion in patients with colorectal cancer [J]. *Chin J Diagn Electron Ed*, 2019, 7(3): 203–206.
- [13] 梁翠珊, 黄燕琪, 何 兰, 等. 基于影像组学方法术前预测结直肠癌淋巴血管侵犯 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2018, 26(3): 191–196.  
LIANG C S, HUANG Y Q, HE L, et al. Preoperative prediction of lymphovascular invasion of colorectal cancer based on radiomics approach [J]. *Chin J Med Imag*, 2018, 26(3): 191–196.
- [14] 陈吉虎, 李 瑞, 刘 浩, 等. 影像组学术前预测结直肠癌淋巴血管侵犯的价值 [J]. *临床放射学杂志*, 2022, 41(3): 495–499.  
CHEN J H, LI R, LIU H, et al. The value of radiomics in preoperative prediction of lymphovascular invasion in colorectal cancer [J]. *J Clin Radiol*, 2022, 41(3): 495–499.
- [15] 郑文霞, 王莉莉, 陈杏彪, 等. 光谱CT细胞外容积临床-影像组学模型预测结直肠癌血管淋巴管及神经侵犯 [J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2023, 29(5): 551–559.  
ZHENG W X, WANG L L, CHEN X B, et al. Spectral CT extracellular volume clinical-radiomics models for prediction of vascular lymphatic and nerve invasion in colorectal cancer [J]. *Chin Comput Med Imag*, 2023, 29(5): 551–559.
- [16] LI M, JIN Y M, RUI J, et al. Computed tomography-based radiomics for predicting lymphovascular invasion in rectal cancer [J]. *Eur J Radiol*, 2022, 146: 110065.  
(收稿日期: 2025-06-23 修回日期: 2025-08-12)