

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.04.019

基于 DCE-MRI 影像组学联合临床因素的列线图 术前预测乳腺癌腋窝淋巴结转移的价值

李飞龙, 张潇斐, 任国政

(平顶山市第一人民医院 磁共振室, 河南平顶山 467000)

【摘要】目的 探讨基于动态对比增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging, DCE-MRI)影像组学联合临床因素的列线图术前预测乳腺癌腋窝淋巴结(axillary lymph node, ALN)转移的价值。**方法** 回顾性收集 2023 年 1 月至 2025 年 5 月于平顶山市第一人民医院经病理证实的 80 例乳腺癌患者资料,按 7:3 比例随机划分为训练集(56 例)和内部验证集(24 例)。所有患者术前均行 DCE-MRI 检查,在 T1 加权成像(T1-weighted imaging, T₁WI)增强序列上逐层勾画感兴趣区(region of interest, ROI),提取影像组学特征。建立多因素 Logistic 回归模型并绘制列线图。采用受试者操作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线评价模型的区分度。**结果** 训练集中 ALN 转移阳性 27 例,阴性 29 例;内部验证集中阳性 12 例,阴性 12 例。最终筛选出 9 个与 ALN 转移最相关的影像组学特征。联合模型(Radscore+MRI 报告的 ALN 状态)在训练集和内部验证集中的曲线下面积(area under the curve, AUC)分别为 0.912(95%CI: 0.841 ~ 0.983)和 0.873(95%CI: 0.754 ~ 0.992),均优于单一临床模型或影像组学模型。**结论** 基于 DCE-MRI 影像组学联合临床因素的列线图可有效提高术前预测乳腺癌 ALN 转移的准确性,为个体化治疗决策提供无创辅助工具。

【关键词】 乳腺癌; 腋窝淋巴结转移; 动态对比增强磁共振成像; 影像组学; 列线图

【中图分类号】 R737.9

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2026) 04-0093-05

The value of a nomogram based on DCE-MRI radiomics combined with clinical factors in predicting preoperative axillary lymph node metastasis of breast cancer

LI Feilong, ZHANG Xiaofei, REN Guozheng

(Magnetic Resonance Room, Pingdingshan First People's Hospital, Pingdingshan 467000, Henan, China)

【Abstract】Objective To investigate the value of a nomogram based on dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging (DCE-MRI) radiomics combined with clinical factors in predicting preoperative axillary lymph node (ALN) metastasis of breast cancer. **Methods** The data of 80 patients with breast cancer confirmed by pathology in Pingdingshan First People's Hospital from January 2023 to May 2025 were collected retrospectively, and randomly divided into training set (56 cases) and internal validation set (24 cases) according to the ratio of 7 vs. 3. All patients were examined by DCE-MRI before surgery, and the region of interest (ROI) was delineated layer by layer on the T1-weighted imaging (T₁WI) enhanced sequence to extract the radiomics features. A multivariate Logistic regression model was established based on clinical and pathological factors, and a nomogram was drawn. In addition, the receiver operator characteristic (ROC) curve was used to evaluate the discrimination of the model. **Results** There were 27 positive cases and 29 negative cases of ALN metastasis in the training set, 12 positive cases and 12 negative cases in the internal validation set. Finally, 9 radiomics features most relevant to ALN metastasis were screened. The area under the curve (AUC) of the combined model (ALN status reported by Radscore+MRI) in the training set and the internal validation set were 0.912 (95%CI: 0.841–0.983) and 0.873 (95%CI: 0.754–0.992), respectively, which were superior to the single clinical model or the radiomics model. **Conclusion** The nomogram based on DCE-MRI radiomics combined with clinical factors can effectively improve the accuracy of preoperative prediction of ALN metastasis in breast cancer, providing a non-invasive auxiliary tool for individualized treatment decisions.

【Key words】 Breast cancer; Axillary lymph node metastasis; Dynamic-contrast enhanced magnetic resonance imaging; Radiomics; Nomogram

收稿日期: 2025-07-11。

作者简介: 李飞龙, 硕士, 主治医师, 研究方向: 影像诊断。E-mail: 13393768366@163.com。

腋窝淋巴结(axillary lymph node, ALN)状态是乳腺癌预后评估和临床治疗决策的关键因素^[1]。前哨淋巴结活检(sentinel lymph node biopsy, SLNB)是判断 ALN 转移的诊断“金标准”,但该检查属有创操作,存在淋巴水肿等术后并发症风险。动态对比增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging, DCE-MRI)的形态学及纹理特征与 ALN 转移具有一定相关性^[2-3],但常规影像征象对 ALN 的诊断效能有限。影像组学可高通量从医学图像中提取定量特征,在肿瘤预测领域中已展现出良好应用潜力^[4-6]。然而,现有基于 DCE-MRI 的影像组学研究普遍存在样本量偏小、缺乏外部验证队列、建模方法不统一等问题^[7-9]。基于此,本研究回顾性收集 80 例乳腺癌患者的临床及影像资料,提取瘤内及瘤周区域的影像组学特征,联合临床相关因素构建列线图预测模型,旨在为术前预测乳腺癌 ALN 转移提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究为单中心回顾性研究设计,纳入 2023 年 1 月至 2025 年 5 月平顶山市第一人民医院接受术前 DCE-MRI 的浸润性乳腺癌患者。采用 PASS 15.0 软件进行样本量估算,设定预期曲线下面积(area under the curve, AUC) ≈ 0.85 , $\alpha = 0.05$, $1 - \beta = 0.80$, 计算至少需要 72 例;考虑 10% 脱落,最终纳入 80 例,实际检验效能 Power = 0.82。本研究经平顶山市第一人民医院伦理委员会批准(批件号:PYLL2026072101),回顾性病例分析豁免知情同意。

纳入标准:①病理确诊为原发性浸润性乳腺癌;②术前 2 周内行 DCE-MRI;③行同侧腋窝淋巴结清扫或 SLNB;④资料完整。排除标准:①术前放化疗;②双侧乳腺癌或远处转移;③ MRI 图像质量差;④合并其他恶性肿瘤或严重系统性疾病。研究期间共筛选 326 例患者,按排除标准剔除 116 例(术前放化疗 42 例、双侧/远处转移 38 例、图像质量差 16 例、合并其他疾病 12 例、资料不全 8 例),最终纳入 80 例女性患者,年龄 28 ~ 76 岁,中位 51 岁;按 7:3 随机分为训练集 56 例和内部验证集 24 例。

1.2 方法

1.2.1 MRI 图像采集

扫描设备为飞利浦 Achieva 3.0T MR,采用 16 通

道乳腺线圈。序列包括 T₁ 加权成像(T1-weighted imaging, T₁WI)、脂肪抑制 T₂ 加权成像(fat-suppressed T2-weighted imaging, T₂WI-FS)、弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI) (b = 0、800 s/mm²)及 DCE-MRI(VIBE 序列, TR/TE = 4.5/1.8 ms, 翻转角 15°, 层厚 1.5 mm)。经肘静脉团注射对比剂 Gd-DTPA, 剂量 0.1 mmol/kg, 注射速率 2.5 ml/s;共采集 7 个时相(1 个蒙片 + 6 期增强),总扫描时长约 7 min。

1.2.2 图像评估与感兴趣区(region of interest, ROI)勾画

由 2 名放射科医师独立阅片,记录 ALN 短径、皮质厚度、门样结构及强化模式(短径 ≥ 10 mm 或皮质厚度 ≥ 3 mm 定义为可疑阳性)。选取 DCE-MRI 第 2 期增强图像,采用 ITK-SNAP 软件手动勾画瘤内 ROI,勾画时避开坏死、囊变及出血区域;以瘤内 ROI 向外扩 3 mm 生成瘤周 ROI。

1.2.3 影像组学特征提取与观察者一致性评价

使用 PyRadiomics 软件提取影像组学特征共计 1 218 个。采用组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)评价两位医师 ROI 勾画的观察者间一致性, ICC = 0.92(95% CI: 0.88 ~ 0.95),提示观察者间一致性良好。

1.2.4 数据集划分、特征筛选与模型构建

80 例患者按 7:3 随机划分为训练集 56 例和内部验证集 24 例。特征筛选、模型拟合仅在训练集完成,验证集仅用于模型效能评估。① ICC > 0.75 保留影像组学稳定的特征;② Z-Score 标准化后直接应用于验证集;③ 最小绝对值收缩与选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)回归 + 10 折交叉验证,筛选出 9 个非零系数影像组学特征,计算 Radscore;④ 在训练集内,将 Radscore 和临床变量纳入多因素 Logistic 回归,构建联合预测模型,并以列线图可视化呈现。在内部验证集独立评价模型预测效能。

列线图中各变量得分经线性插值后求和得到总分,总分通过 Logistic 回归的转换函数映射为预测概率: $P = 1 / [1 + e^{-(\text{Total Score} \times 0.0186 - 0.0205)}]$, 其中 Total Score 为总分, 0.018 6 和 0.020 5 分别为基于验证集计算的尺度因子和截距校正,确保概率预测与回归模型输出一致。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 26.0 进行常规数据统计分析,特征筛选和建模借助 R 语言(4.2.1)实现。符合正态分布的计量资料以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,采用 *t* 检验进行组间数据比较;不符合正态分布的资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,并进行 Mann-Whitney *U* 检验。计数资料以例(%)表示,组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率

法。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基线资料

结果显示,各变量在训练集与内部验证集中分布均衡(均 $P>0.05$),具有可比性。单因素分析显示,MRI ALN 状态在 ALN 转移阳性组与阴性组间差异有统计学意义($P=0.003$)(表 1)。

表 1 患者基线资料及 ALN 转移单因素分析

变量	训练集 ($n=56$ 例)		内部验证集 ($n=24$ 例)		$t/\chi^2/Z$	P
	阳性 ($n=27$)	阴性 ($n=29$)	阳性 ($n=12$)	阴性 ($n=12$)	训练/验证	训练/验证
年龄 ($\bar{x}\pm s$, 岁)	52.3±9.7	49.8±10.2	51.8±9.5	50.2±10.1	0.94/0.41	0.352/0.685
绝经 [例 (%)]	15 (55.6)	13 (44.8)	7 (58.3)	6 (50.0)	0.63/0.17	0.427/0.680
肿瘤最大径 [$M(Q_1, Q_3)$, cm]	2.8 (2.0, 4.1)	2.5 (1.8, 3.6)	2.7 (2.1, 3.9)	2.4 (1.9, 3.5)	1.22/0.89	0.224/0.374
组织学分级 III 级 [例 (%)]	12 (44.4)	9 (31.0)	5 (41.7)	4 (33.3)	1.06/0.18	0.303/0.671
Ki-67≥20% [例 (%)]	19 (70.4)	17 (58.6)	8 (66.7)	7 (58.3)	0.83/0.18	0.363/0.670
分子分型 (Luminal B/HER2+/三阴) [例 (%)]	18 (66.7)	15 (51.7)	8 (66.7)	6 (50.0)	1.30/0.69	0.255/0.406
MRI ALN 可疑阳性 [例 (%)]	18 (66.7)	8 (27.6)	8 (66.7)	3 (25.0)	8.62/4.00	0.003/0.046

注: ALN: 腋窝淋巴结; MRI: 磁共振成像。

2.2 影像组学特征筛选

经 ICC 检验保留 962 个稳定特征。LASSO 回归在 $\lambda=0.036$ 时获得最优解,共筛选出 9 个非零系数

特征,其中 6 个来自瘤内区域、3 个来自瘤周区域(扩张 3 mm)(表 2)。

表 2 LASSO 筛选的 9 个影像组学特征及系数

序号	特征名称	来源区域	系数
1	wavelet-LLL_glc_m_Correlation	瘤内	0.215
2	wavelet-HLH_firstorder_Skewness	瘤内	-0.142
3	log-sigma-3-mm_glszm_ZoneEntropy	瘤周	0.198
4	original_shape_MaximumDiameter	瘤内	0.087
5	wavelet-HHH_glr_m_RunLengthNonUniformityNormalized	瘤内	-0.113
6	wavelet-LLL_glszm_SmallAreaEmphasis	瘤内	0.176
7	wavelet-LHL_glc_m_ClusterShade	瘤周	-0.095
8	exponential_glc_m_Contrast	瘤内	0.131
9	square_glr_m_LongRunHighGrayLevelEmphasis	瘤周	0.064

注: LASSO: 最小绝对值收缩与选择算子。

2.3 多因素 Logistic 回归及列线图构建

将单因素分析中有意义的 MRI ALN 状态(赋值:可疑阳性=1,阴性=0)及 Radscore(连续变量)纳入多因素 Logistic 回归分析,结果显示二者均为 ALN 转移的独立预测因子(均 $P<0.05$)(表 3)。基于上述 2 个变量构建列线图(图 1),用于预测 ALN 转移概率。根据列线图转换公式,总分 110 分对应的预测概率为 0.718,与列线图读取结果一致。

表 3 ALN 转移多因素 Logistic 回归分析

变量	β	SE	Wald χ^2	OR (95%CI)	P
Radscore	2.314	0.682	11.513	10.115 (2.658 ~ 38.504)	<0.001
MRI ALN 可疑阳性	1.875	0.743	6.37	6.521 (1.520 ~ 27.987)	0.012
常数项	-1.102	0.431	6.539	0.332	—

注: MRI: 磁共振成像; ALN: 腋窝淋巴结。

2.4 模型效能评估

临床模型(仅含 MRI ALN 状态)、影像组学模型

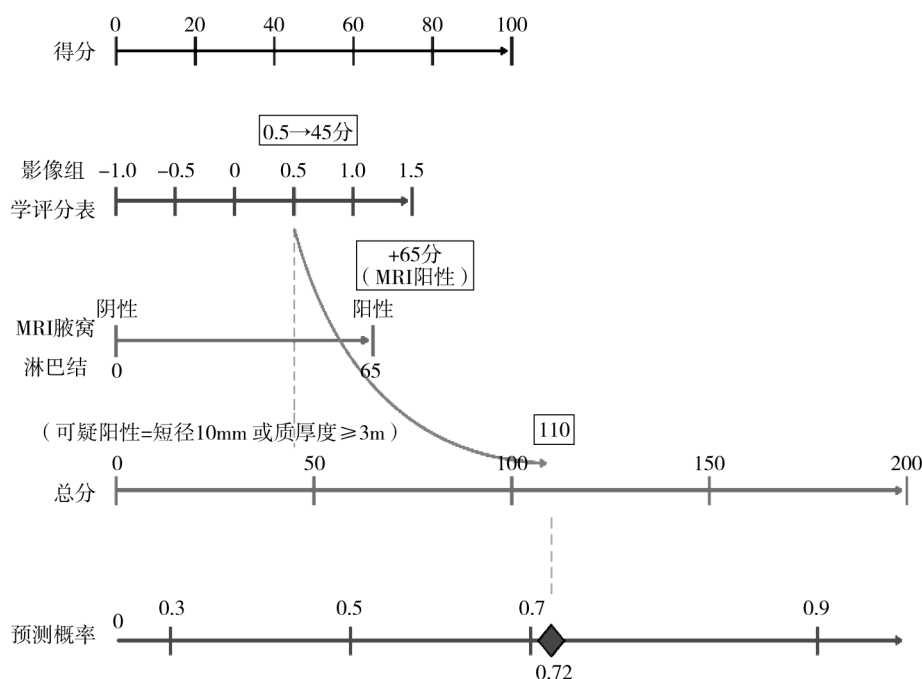


图1 术前预测乳腺癌ALN转移的列线图模型

注：ALN：腋窝淋巴结；MRI：磁共振成像。

(仅含 Radscore)及联合模型(列线图)的受试者操作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线见图2。联合模型训练集曲线下面积(area under the curve, AUC)为0.912(95%CI:0.841~0.983),最佳截断值为0.482,敏感度86.7%,特异度82.1%;内部验证集AUC为0.873(95%CI:0.754~0.992),最佳截断值为0.503,敏感度83.3%,特异度75.0%,提示模型泛化能力良好,过拟合风险较低。最佳截断值根据约登指数(Youden index)确定。校准曲线显示,联合模型在训练集和内部验证集中预测概率与实际病理结果的校准线均接近理想对角(Hosmer-Lemeshow 检验 P 分别为0.621和0.487),提示校准度良好(图3)。决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)显示,阈值为0.1~0.8时,联合模型的临床净获益明显优于单一模型(图4)。

3 讨论

联合模型在训练集和内部验证集中AUC分别为0.912和0.873,显著优于单一临床模型,表明影像组学可挖掘DCE-MRI中与乳腺癌ALN转移相关的微观异质性信息。

本研究的主要创新包括:①采用LASSO回归筛选出9个最具预测价值的特征,其中wavelet-LLL_glcmm_Correlation系数为正,提示纹理越规则转

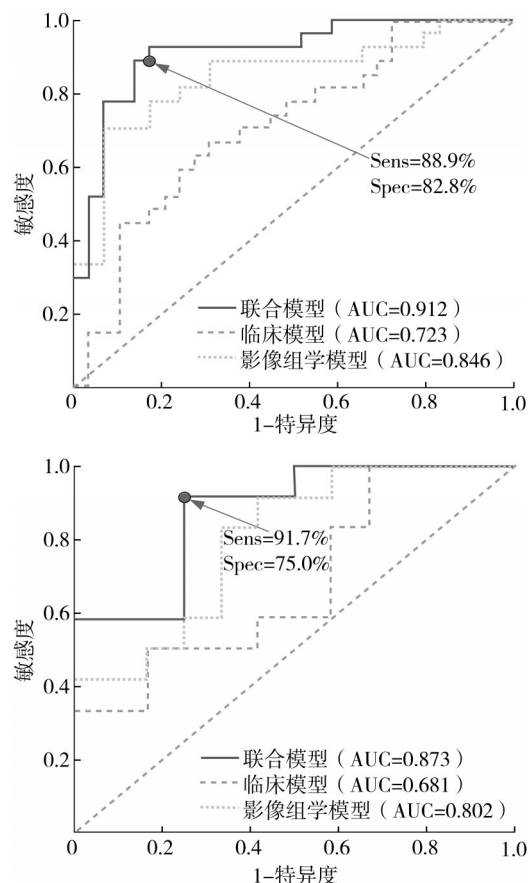


图2 ROC曲线

注：ROC：受试者操作特征；AUC：曲线下面积。

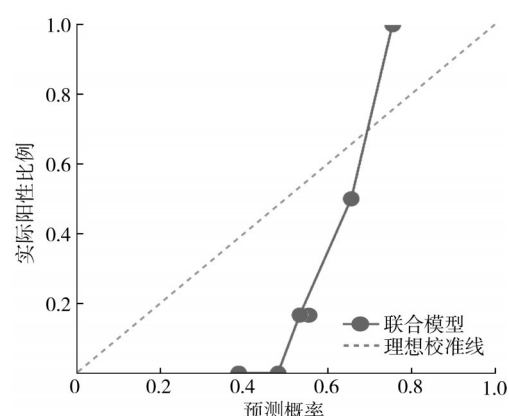
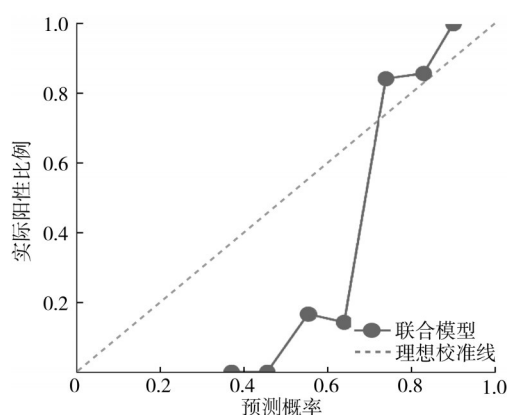


图3 校准曲线

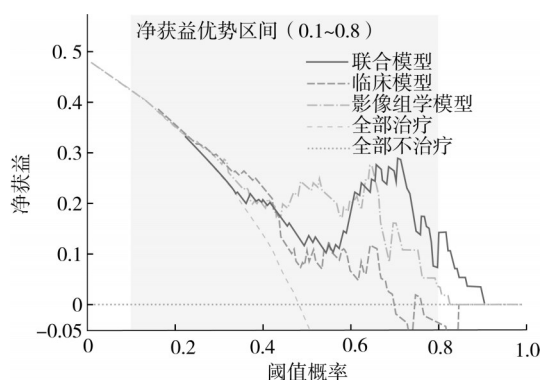


图4 DCA 曲线

注：DCA：决策曲线分析。

移风险越大,与已有报道^[10]一致;②同时纳入瘤内及瘤周特征,log-sigma-3-mm_glszm_ZoneEntropy的入选体现了瘤周异质性的贡献;③将影像组学评分与MRI形态学信息结合构建列线图,兼顾定量特征与临床经验,实用性更强。

与既往研究相比,本研究结果与Dong等^[7]的Meta分析结论一致(汇总AUC约为0.853),且加入临床变量后AUC提升至0.911以上,与Wang等^[8]的多

模态模型效果相当。Han等^[9]的研究基于T₂WI序列,而本研究采用DCE-MRI,后者更能反映肿瘤血供特征,理论上更具优势。

本研究局限性:①样本量有限(80例),训练集与内部验证集AUC的差距为0.039,过拟合风险可控;②单中心回顾性设计可能存在选择偏倚;③本研究未探索联合模型在不同分子分型中的适用性;④ROI排除区域面积占比未进行观察者一致性评估;⑤未纳入DCE-MRI药代动力学参数。

综上,基于DCE-MRI影像组学联合临床因素的列线图可有效提高术前预测乳腺癌ALN转移的准确性,为临床个体化决策提供无创辅助工具。本模型目前仍处于回顾性验证阶段,决策阈值需前瞻性研究予以确定,现阶段不应替代SLNB。

参考文献

- [1] 史晓飞,王小雷,徐东亮,等. 动态对比增强MRI参数联合临床病理特征对乳腺癌腋窝淋巴结转移的预测价值[J]. 临床放射学杂志, 2025, 44 (10): 1862-1866.
- [2] 钱吉芳,朱大林,张旭霞,等. 影像组学对乳腺癌腋窝淋巴结转移诊断价值的Meta分析[J]. 磁共振成像, 2025, 16 (3): 44-50.
- [3] 张舒妮,赵楠楠,李阳,等. 多模态影像组学列线图术前预测乳腺浸润性导管癌腋窝淋巴结转移的价值[J]. 磁共振成像, 2024, 15 (4): 78-87.
- [4] 夏旭东,段成洲,李铭,等. 基于MRI影像组学列线图预测乳腺癌腋窝淋巴结转移[J]. 磁共振成像, 2022, 13 (1): 118-122.
- [5] 郑彭玮,林桂涵,陈炜越,等. 基于DCE-MRI瘤内及瘤周影像组学的列线图预测早期乳腺癌腋窝淋巴结负荷的价值[J]. 放射学实践, 2024, 39 (10): 1333-1339.
- [6] QI Y J, SU G H, YOU C, *et al.* Radiomics in breast cancer: Current advances and future directions[J]. Cell Rep Med, 2024, 5(9):101719.
- [7] DONG F, LI J, WANG J, *et al.* Diagnostic performance of DCE-MRI radiomics in predicting axillary lymph node metastasis in breast cancer patients: A meta-analysis[J]. PLoS One, 2024, 19(12):e0314653.
- [8] WANG Q, LIN Y, DING C, *et al.* Multi-modality radiomics model predicts axillary lymph node metastasis of breast cancer using MRI and mammography[J]. Eur Radiol, 2024, 34(9):6121-6131.
- [9] HAN L, ZHU Y, LIU Z, *et al.* Radiomic nomogram for prediction of axillary lymph node metastasis in breast cancer[J]. Eur Radiol, 2019, 29(7):3820-3829.
- [10] WU P Q, GUO F L, WANG J, *et al.* Development and validation of a dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging-based habitat and peritumoral radiomic model to predict axillary lymph node metastasis in patients with breast cancer: a retrospective study[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(12): 8211-8226.