

## MRI radiomics combined with clinical indexes and ultrasonic features for predicting lymph node metastasis of endometrial carcinoma

LIU Wen<sup>1</sup>, LIU Yuanqing<sup>2</sup>, LI Xiaojing<sup>3</sup>, HU Chunhong<sup>2\*</sup>

(1. Department of Obstetrics and Gynecology Ultrasound, 2. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215031, China; 3. Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215005, China)

**[Abstract]** **Objective** To explore the value of MRI radiomics combined with clinical indexes and ultrasonic features for predicting lymph node metastasis (LNM) of endometrial carcinoma (EC). **Methods** Totally 225 EC patients were retrospectively enrolled, including 117 cases in training set, 51 cases in test set and 57 cases in external validation set. Radiomic features of EC were extracted and selected from pelvic MRI to construct MRI radiomics model. Univariate and multivariate logistic regression analyses were performed to screen the independent impact factors of LNM of EC from clinical indexes and ultrasonic features defined by international endometrial tumor analysis (IETA) group, and then clinical and ultrasound models were established, respectively, and a combined model was further constructed based on the above models. Then receiver operating characteristic curve was drawn, and the area under the curve (AUC) was calculated to evaluate the predictive performance of the combined model for EC LNM. Decision curve analysis (DCA) and calibration curves were used to assess the clinical net benefit and calibration of the models, respectively. **Results** The clinical and ultrasound models were constructed based on age and carbohydrate antigen 125 (CA125), as well as endometrial thickness (EMT), while the MRI radiomics model was established based on 5 optimal radiomics features. AUC of the combined model for predicting EC LNM was 0.895, 0.870 and 0.890 in training set, test set and external validation set, respectively, which were comparable to that of MRI radiomics model (0.852, 0.809 and 0.816, respectively, all  $P > 0.05$ ) and higher than that of clinical model (0.727, 0.774 and 0.731, respectively) and ultrasound model (0.701, 0.596 and 0.723, respectively) (all  $P < 0.05$ ). Moreover, the combined model achieved higher clinical net benefit within the threshold range of 0—0.47 compared with MRI radiomics model in training set, and its predicted probabilities were closer to the actual outcomes in all sets. **Conclusion** MRI radiomics combined with clinical index and ultrasonic features could be used to accurately predict EC LNM.

**[Keywords]** carcinoma, endometrioid; lymphatic metastasis; magnetic resonance imaging; radiomics

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.014

## MRI 影像组学联合临床参数及超声表现预测 子宫内膜癌淋巴结转移

刘 文<sup>1</sup>, 刘原庆<sup>2</sup>, 李筱菁<sup>3</sup>, 胡春洪<sup>2\*</sup>

(1. 苏州大学附属第一医院妇产超声科, 2. 放射科, 江苏 苏州 215031;  
3. 苏州大学附属第二医院放射科, 江苏 苏州 215005)

**[摘要]** **目的** 观察 MRI 影像组学联合临床参数及超声表现预测子宫内膜癌淋巴结转移(LNM)的价值。**方法** 回顾性纳入 225 例子宫内膜癌, 包括训练集 117 例、测试集 51 例及外部验证集 57 例; 于盆腔 MRI 中提取并筛选肿瘤影像组学特征、构建 MRI 影像组学模型; 以单及多因素 logistic 回归分析于临床参数及国际子宫内膜肿瘤分析(IETA)组织定义的

**[第一作者]** 刘文(1990—), 女, 江苏南通人, 在读硕士。研究方向: 妇科肿瘤影像学。E-mail: lanceliu5321@163.com

**[通信作者]** 胡春洪, 苏州大学附属第一医院放射科, 215031。E-mail: sdhuchunhong@sina.com

**[收稿日期]** 2025-11-24 **[修回日期]** 2026-03-11

超声表现中筛选子宫内膜癌 LNM 的独立影响因素,分别构建临床及超声模型,并基于上述 3 个模型构建联合模型。绘制受试者工作特征曲线,计算曲线下面积(AUC),评估联合模型预测子宫内膜癌 LNM 效能,分别以决策曲线分析(DCA)及校准曲线评估模型净收益及校准度。**结果** 基于年龄及糖类抗原 125(CA125)构建临床模型、基于子宫内膜厚度(EMT)构建超声模型、基于 5 个最优影像组学特征构建 MRI 影像组学模型。联合模型预测训练集、测试集和外部验证集子宫内膜癌 LNM 的 AUC 分别为 0.895、0.870 及 0.890,与 MRI 影像组学模型相当(AUC 分别为 0.852、0.809 及 0.816,  $P > 0.05$ )并显著高于临床(AUC 分别为 0.727、0.774 及 0.731)及超声模型(AUC 分别为 0.701、0.596 及 0.723,  $P < 0.05$ );其在 0~0.47 阈值区间内于训练集的临床净收益高于 MRI 影像组学模型,且在各集的预测概率更接近真实结果。**结论** MRI 影像组学联合临床参数及超声表现能较准确地预测子宫内膜癌 LNM。

**【关键词】** 癌,子宫内膜样;淋巴转移;磁共振成像;影像组学

**【中图分类号】** R737.33; R445.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1003-3289(2026)03-0387-06

子宫内膜癌(endometrial carcinoma, EC)以淋巴结转移(lymph node metastasis, LNM)为最主要转移途径,有无 LNM 是术中是否行淋巴结清扫及预测远期预后的重要参考<sup>[1-2]</sup>。根据影像学表现及糖类抗原 125(carbohydrate antigen 125, CA125)水平可评估 EC 有无 LNM<sup>[3]</sup>;但传统 MRI 评估 LNM 敏感度低<sup>[4]</sup>。有无深肌层浸润、肿瘤大小及组织分化程度均为 EC 发生 LNM 的危险因素<sup>[4]</sup>;国际子宫内膜肿瘤分析(international endometrial tumor analysis, IETA)超声表现可在一定程度上反映上述病理征象,但单独评估效能不足<sup>[5]</sup>。本研究观察 MRI 影像组学联合临床参数及超声表现预测 EC LNM 的价值。

**1 资料与方法**

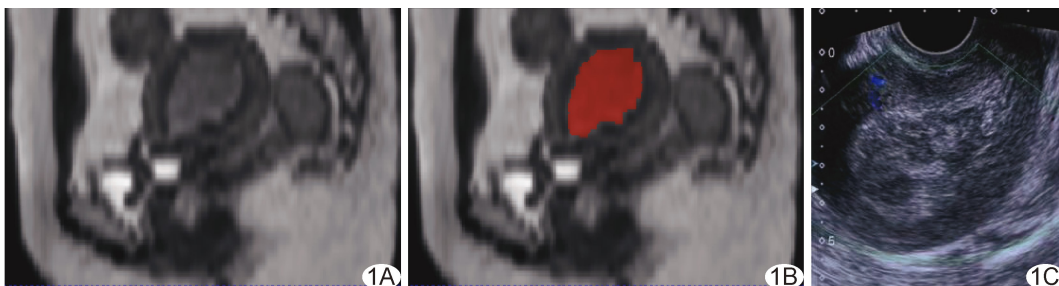
**1.1 研究对象** 回顾性分析 2016 年 1 月—2024 年 12 月苏州大学附属第一医院(A 中心)及第二医院(B 中心)共 225 例 EC,年龄 30~70 岁、平均(57.6±8.1)岁,按 7:3 比例将 A 中心 168 例分为训练集( $n=117$ ,含 LNM 阳性 31 例、阴性 86 例)与测试集( $n=51$ ,含 LNM 阳性 5 例、阴性 46 例),以 B 中心 57 例为外部验证集( $n=57$ ,含 LNM 阳性 8 例、阴性 49 例)。纳入标准:①接受全子宫+双侧输卵管卵巢切除+淋巴结清扫术且经术后病理证实诊断;②于术前 2 周内接受盆腔 MR 及经阴道超声检查。排除合并其他恶性肿瘤、术前接受放射/化学治疗或资料不全者。本研究经医院伦理委员会批准[(2025)伦审批第 695 号]并豁免知情同意书。

**1.2 MR 检查** A 中心采用 Siemens Skyra、Siemens Prisma、Philips Ingenia 或 GE Signa HDxt MR 仪, B 中心采用 Siemens Prisma 或

Philips Ingenia MR 仪行盆腔扫描。扫描序列及参数:①轴位 T1W, TR 420~600 ms, TE 8~20 ms;矢状位 T2W, TR 3 000~5 500 ms, TE 80~100 ms, FOV 240 mm×240 mm,层厚 5 mm;③轴位弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI), TR 3 500~8 000 ms, TE 40~75 ms, FOV 300 mm×300 mm,层厚 5 mm,  $b=0,1 000 \text{ s/mm}^2$ 。之后经肘静脉以流率 2 ml/s 注射钆对比剂[A 中心为钆喷酸葡胺(377 mg/ml)、B 中心为钆双胺(287 mg/ml)]0.1 mmol/kg 体质量,采集轴位增强 T1WI。

**1.2.1 数据预处理及勾画 ROI** 对 MRI 数据行 N4 偏置场校正、校准、重采样、降噪、Z 转化及多序列图像配准等预处理,并重采样为 1 mm 各向同性体素。由 1 名具有 8 年经验的影像科医师采用 ITK-SNAP 软件基于矢状位 T2WI、参考其他序列图像沿肿瘤边缘逐层勾画 EC ROI 并生成肿瘤感兴趣容积(volume of interest, VOI),见图 1。1 周后随机于 A 中心抽取 30 例,由上述医师及另 1 名具有 8 年经验的影像科医师重新勾画 ROI 并提取特征,将结果用于一致性检验。

**1.2.2 提取及筛选特征** 将 ROI 与配准图像导入 Feature Explorer 软件,提取 EC 影像组学特征;保留组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC) > 0.8 者,以最大相关最小冗余(maximum relevance minimum redundancy, MRMR)及最小绝对



**图 1** 患者女,46 岁,EC 伴 LNM A、B. 基于预处理后矢状位 T2WI(A)勾画肿瘤 ROI 示意图(B); C. 子宫正中矢状切面 CDFI

收缩和选择算子 (least absolute shrinkage and selection operator, LASSO) 算法筛选最优特征并计算影像组学评分 (radiomics score, Radscore)。

1.3 超声检查 A 中心采用 GE Voluson E8、E10 或 Siemens Acuson 超声诊断仪, B 中心采用 GE Voluson E10、Siemens Acuson、Hitachi ALOKA 及 Aplio i800-409 超声诊断仪, 均配备频率 5~9 MHz 的经阴道探头。由具有 8 年经验的超声科医师行经阴道超声检查, 由另 2 名具有 8 年经验并熟练掌握 IETA 的超声科医师根据 IETA 定义基于正中矢状切面图测量子宫内膜厚度 (endometrium thickness, EMT)、肿瘤前后径 (anteroposterior diameter of the tumor, tAP)、肿瘤前后径/子宫前后径 (tAP/anteloposterior diameter of the uterus, tAP/uAP), 并将彩色/能量多普勒脉冲重复频率设为 0.3~0.9 kHz<sup>[6]</sup>, 记录彩色血流评分 (color Doppler score, CDscore) (图 1C): 1 分, 无血流信号; 2 分, 少量血流信号; 3 分, 中等量血流信号; 4 分, 大量血流信号<sup>[6]</sup>。2 名医师意见不一时经协商达成共识。

1.4 建模方法及统计学分析 采用 R 4.4.1 和 SPSS 26.0 统计分析软件。以  $\bar{x} \pm s$  表示正态分布计量资料, 行独立样本 *t* 检验; 以中位数 (上下四分位数) 表示不符合正态分布计量资料, 行 Mann-Whitney *U* 检验。以  $\chi^2$  检验或 Fisher 精确概率法比较计数资料。采用单及多因素 logistic 回归分析于临床参数及超声表现中筛选 EC LNM 的独立影响因素, 分别以之构建临床及超声模型。基于最优影像组学特征构建 MRI 影像组学模型; 并以之联合临床及超声模型构建联合模型。绘制受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线, 以曲线下面积 (area under the curve, AUC) 评估各模型预测效能并以 DeLong 检验进行比较。分别以决策曲线分析 (decision curve

analysis, DCA) 及校准曲线评估模型净收益及校准度。P<0.05 为差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 集间比较 训练集与测试集临床参数、EC 超声表现及 Radscore 差异均无统计学意义 (P 均>0.05)。见表 1。

2.2 构建模型 利用 ROC 曲线、以 LNM 为二分类结局确定 56 岁为年龄的最佳截断值。单及多因素 logistic 回归分析显示, 年龄、CA125、EMT、tAP 及 Radscore 均为 EC 发生 LNM 的独立影响因素 (P 均<0.05, 表 2); 其中 tAP 方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 为 6.979, 与 EMT 存在共线性, 故予剔除; 最终基于年龄及 CA125 构建临床模型、基于 EMT 构建超声模型。

于 MRI 中提取 6 752 个 EC 影像组学特征, 最终筛选出 5 个最优特征, 包括 2 个一阶特征、2 个灰度共生矩阵 (gray level co-occurrence matrix, GLCM) 特征及 1 个灰度游程矩阵 (gray level run-length matrix, GLRLM) 特征 (图 2) 用于构建 MRI 影像组学模型, 以之联合临床及超声模型构建联合模型 (图 3)。

2.3 模型效能 联合模型预测训练集、测试集及外部验证集 EC LNM 的 AUC 分别为 0.895、0.870 及 0.890; 其在各集的效能与 MRI 影像组学模型相当 (P 均>0.05) 并显著高于临床及超声模型 (P 均<0.05)。见表 3 及图 4。DCA 结果显示, 0~0.47 阈值区间内, 联合模型在训练集的临床净收益高于其他模型; 0.12~0.42 阈值区间内, 其在测试集的临床净收益与 MRI 影像组学模型相近且高于其他模型; 0.14~0.50 阈值区间内, 其在外部验证集的临床净收益高于其他模型 (图 5)。校准曲线显示, 联合模型在各集的 Brier 分数均低于其他模型, 其预测概率更接近真实结果 (图 6)。

表 1 训练集、内部及外部验证集患者临床参数、EC 超声表现及 Radscore 比较

集别	年龄(例)		高血压(例)		CA125(例)		EMT(mm)
	<56岁	≥56岁	无	有	<35 U/ml	≥35 U/ml	
训练集 (n=117)	56	61	67	50	87	30	10.00(5.00,17.00)
测试集 (n=51)	23	28	33	18	44	7	11.00(6.00,17.00)
外部验证集 (n=57)	19	38	44	13	43	14	15.00(8.00,23.00)
Z/ $\chi^2$ 值*	0.109		0.816		2.936		-0.336
P 值*	0.741		0.366		0.087		0.737

集别	tAP(mm)	tAP/uAP	CDscore(例)				Radscore
			1分	2分	3分	4分	
训练集 (n=117)	11.00(6.90,17.00)	0.30(0.20,0.46)	72	29	7	9	0.19(0.07,0.45)
测试集 (n=51)	11.00(7.00,18.00)	0.25(0.20,0.43)	35	10	3	3	0.23(0.10,0.37)
外部验证集 (n=57)	17.00(10.00,24.00)	0.38(0.30,0.61)	23	8	6	20	0.28(0.09,0.42)
Z/ $\chi^2$ 值*	-0.066	-0.559	0.854				-0.447
P 值*	0.948	0.576	0.837				0.655

注: \* : 训练集与测试集比较

表 2 单及多因素 logistic 回归分析筛选 EC LNM 的独立影响因素

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(≥56 岁)	2.415(1.018,5.730)	0.046	6.297(1.463,27.105)	0.013
高血压(有)	2.337(1.012,5.395)	0.047	1.381(0.400,4.762)	0.610
CA125(≥35 U/ml)	5.486(2.213,13.597)	<0.001	3.860(1.159,12.851)	0.028
EMT(mm)	1.084(1.033,1.138)	0.001	1.135(1.007,1.279)	0.038
tAP(mm)	1.086(1.037,1.137)	<0.001	—	—
tAP/uAP	23.162(2.535,211.660)	0.005	0.004(0,1.969)	0.081
CDscore(2 分)	2.774(1.061,7.250)	0.037	2.328(0.555,9.758)	0.248
CDscore(3 分)	3.404(0.678,17.078)	0.137	1.547(0.179,13.374)	0.692
CDscore(4 分)	3.631(0.856,15.408)	0.080	4.979(0.584,42.450)	0.142
Radscore	611.486(54.556,6853.735)	<0.001	472.133(26.772,8326.194)	<0.001

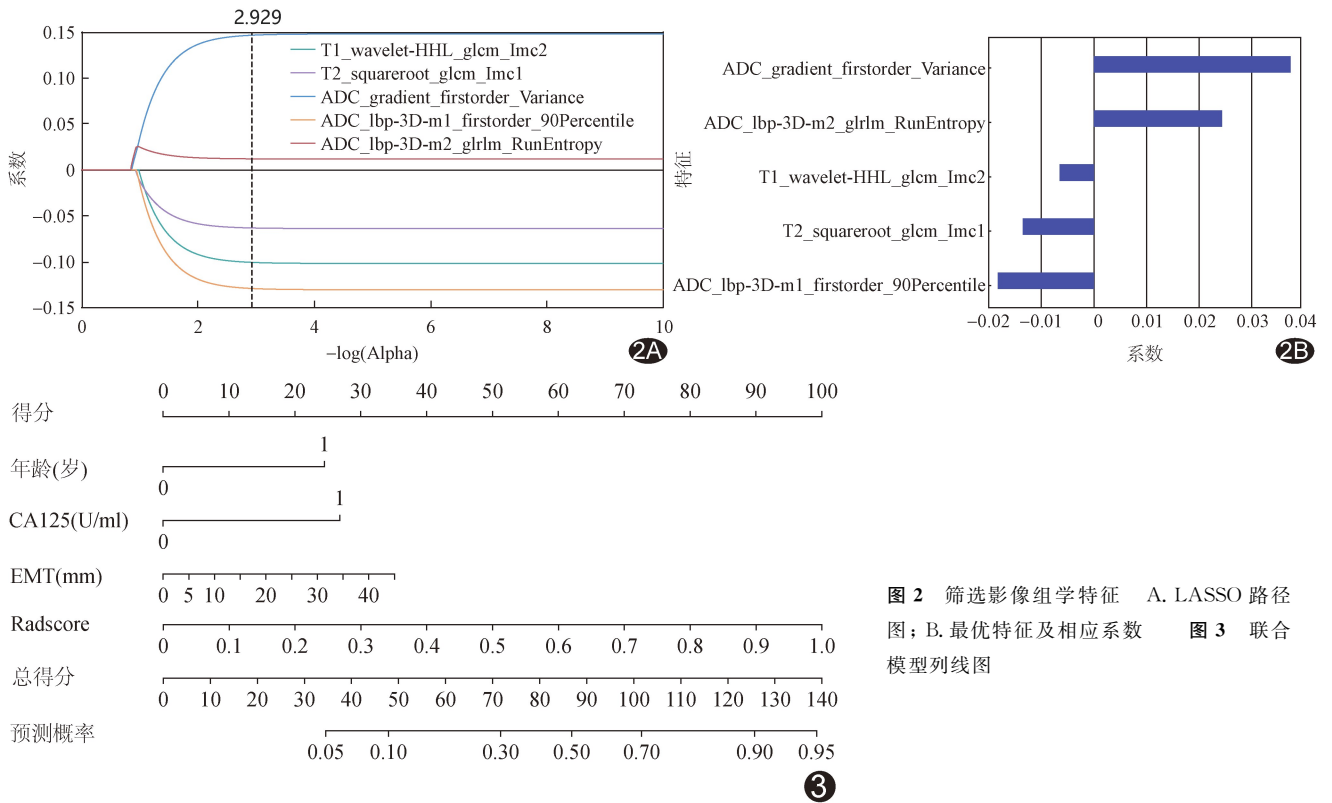


图 2 筛选影像组学特征 A. LASSO 路径图; B. 最优特征及相应系数 图 3 联合模型列线图

表 3 各模型预测不同数据集 EC LNM 效能

模型	集别	AUC(95%CI)	敏感度(%)	特异度(%)
临床模型	训练集	0.727(0.619,0.835)	51.60	83.70
	测试集	0.774(0.600,0.948)	100	43.50
	外部验证集	0.731(0.522,0.940)	62.50	81.60
超声模型	训练集	0.701(0.594,0.809)	67.70	66.30
	测试集	0.596(0.338,0.853)	100	26.10
	外部验证集	0.723(0.489,0.957)	75.00	83.70
MRI 影像组学模型	训练集	0.852(0.774,0.931)	80.60	77.90
	测试集	0.809(0.618,1.000)	60.00	95.70
	外部验证集	0.816(0.679,0.954)	100	57.10
联合模型	训练集	0.895(0.828,0.961)	93.50	75.60
	测试集	0.870(0.739,1.000)	100	71.70
	外部验证集	0.890(0.766,1.000)	87.50	87.80

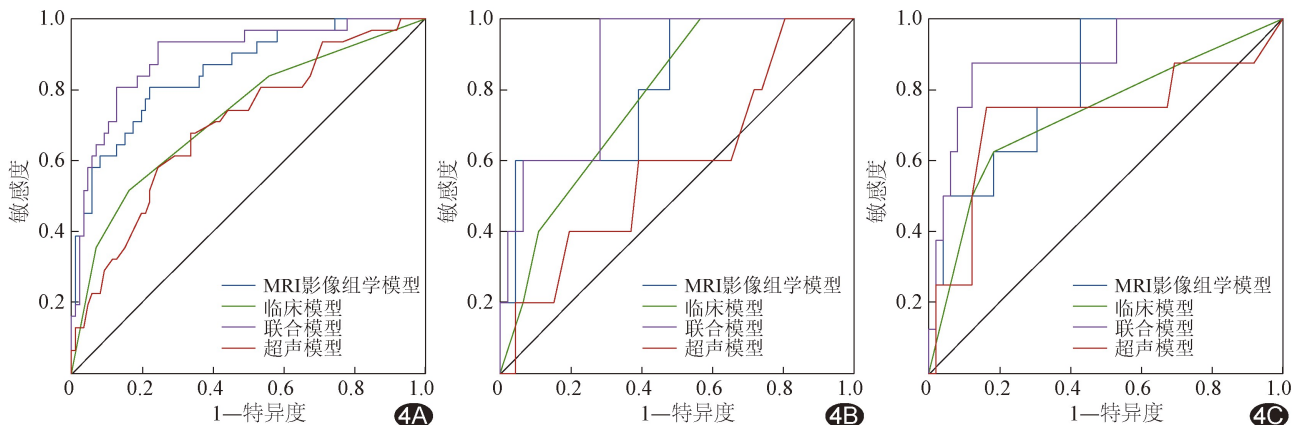


图 4 模型预测各集 EC LNM 的 ROC 曲线 A. 训练集; B. 测试集; C. 外部验证集

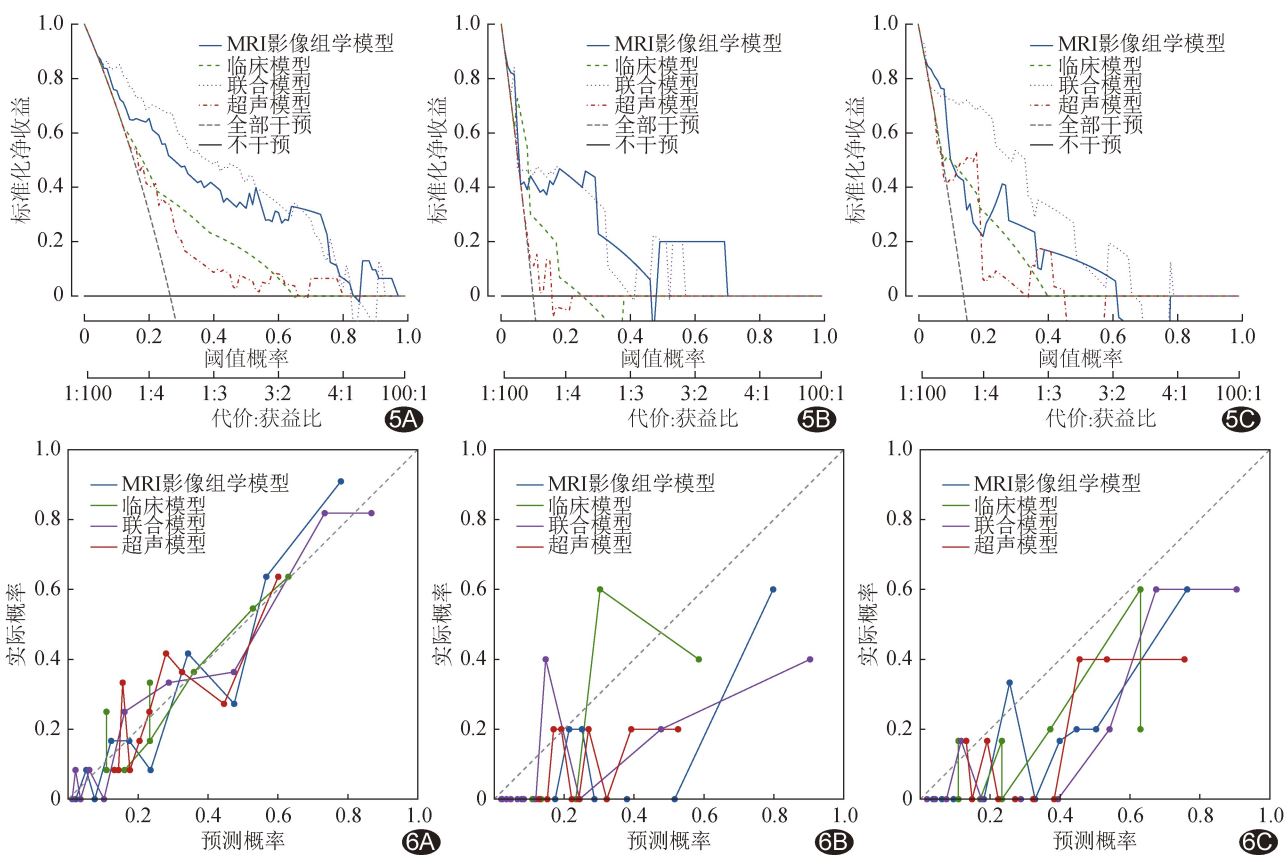


图 5 模型预测各集 EC LNM 的 DCA 图 A. 训练集; B. 测试集; C. 外部验证集 图 6 模型预测各集 EC LNM 的校准曲线 A. 训练集; B. 测试集; C. 外部验证集

### 3 讨论

清扫淋巴结可能引起深静脉血栓、淋巴囊肿、手术部位感染等并发症。对于 EC, 存在 LNM 时需进行包括淋巴结清扫术在内的全面分期手术, 而无 LNM 时更宜行全子宫+双侧输卵管卵巢切除术, 故术前无创、精准识别 LNM 低风险患者至关重要。常规影像学评估 LNM 能力有限; 利用影像组学能充分挖掘肿瘤内部信息、弥补常规影像学的不足<sup>[7]</sup>。

恶性肿瘤转移与其异质性密切相关<sup>[8]</sup>, 基于原发灶影像组学表现可量化肿瘤组织病理学水平的微观异质性。本研究提取 EC 影像组学特征预测 LNM, 最终基于 2 个一阶特征、2 个 GLCM 特征及 1 个 GLRLM 特征构建 MRI 影像组学模型, 反映了肿瘤单体素分布的均匀性与一致性及体素空间分布特性, 其预测 EC LNM 的 AUC 为 0.809 ~ 0.852, 高于既往研究<sup>[9]</sup>结果。

本研究发现年龄 $\geq 56$ 岁及CA125 $\geq 35$  U/ml的EC发生LNM风险增加,与QUAN等<sup>[10]</sup>结论相符;但CA125水平可受多种生理因素影响而出现波动,导致临床模型预测EC LNM效能有限(AUC=0.727~0.774)。

超声IETA定义常用于鉴别良、恶性内膜病变及危险分层。本研究结果显示,EMT及tAP均为EC发生LNM的独立影响因素,与既往研究<sup>[11-12]</sup>结论相似;二者均反映肿瘤恶性程度与转移潜能,剔除tAP后单独以EMT构建的超声模型的预测效能亦有限。

本研究基于临床、超声及MRI影像组学模型构建的联合模型的预测效能(AUC=0.870~0.895)与MRI影像组学模型(AUC=0.809~0.852)相当,而0~0.47阈值区间内其在训练集的临床净收益高于、Brier分数低于MRI影像组学模型,预测概率与实际结果吻合度较高。

综上所述,MRI影像组学联合年龄、CA125及EMT能较准确地预测EC LNM,尤其可为术前活检病理不明确者制定手术策略提供可靠依据。但本研究为回顾性分析,且未纳入超声IETA特征肿块血管模式及术前活检病理结果;有待后续进一步优化模型、利用大样本外部数据集加以验证。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:刘文研究设计和实施、撰写和修改文章;刘原庆图像处理和分析;李筱菁研究实施;胡春洪指导、审阅文章。

### [参考文献]

- [1] CROSBIE E J, KITSON S J, MCALPINE J N, et al. Endometrial cancer[J]. *The Lancet*, 2022, 399:1412-1428.
- [2] ASAMI Y, HIRANUMA K, TAKAYANAGI D, et al. Predictive model for the preoperative assessment and prognostic modeling of lymph node metastasis in endometrial cancer[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1):19004.
- [3] COLOMBO N, CREUTZBERG C, AMANT F, et al. ESMO-ESGO-ESTRO consensus conference on endometrial cancer: Diagnosis, treatment and follow-up[J]. *Ann Oncol*, 2016, 27(1):16-41.
- [4] ABU-RUSTUM N, YASHAR C, AREND R, et al. Uterine neoplasms, version 1. 2023, NCCN clinical practice guidelines in oncology[J]. *J Natl Compr Canc Netw*, 2023, 21(2):181-209.
- [5] ERIKSSON L S E, EPSTEIN E, TESTA A C, et al. Ultrasound-based risk model for preoperative prediction of lymph node metastases in women with endometrial cancer: Model-development study[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2020, 56(3):443-452.
- [6] LEONE F P, TIMMERMAN D, BOURNE T, et al. Terms, definitions and measurements to describe the sonographic features of the endometrium and intrauterine lesions: A consensus opinion from the international endometrial tumor analysis (IETA) group [J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2010, 35(1):103-112.
- [7] TAO Y, WEI Y, YU Y, et al. Development and validation of a nomogram based on multiparametric MRI for predicting lymph node metastasis in endometrial cancer: A retrospective cohort study[J]. *Acad Radiol*, 2025, 32(5):2751-2762.
- [8] SALA E, MEMA E, HIMOTO Y, et al. Unravelling tumour heterogeneity using next-generation imaging: Radiomics, radiogenomics, and habitat imaging [J]. *Clin Radiol*, 2017, 72(1):3-10.
- [9] XU X, LI H, WANG S, et al. Multiplanar MRI-based predictive model for preoperative assessment of lymph node metastasis in endometrial cancer[J]. *Front Oncol*, 2019, 9:1007.
- [10] QUAN Q, LIAO Q, YIN W, et al. Serum HE4 and CA125 combined to predict and monitor recurrence of type II endometrial carcinoma[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):21694.
- [11] EPSTEIN E, FISCHEROVA D, VALENTIN L, et al. Ultrasound characteristics of endometrial cancer as defined by international endometrial tumor analysis (IETA) consensus nomenclature: Prospective multicenter study [J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2018, 51(6):818-828.
- [12] TEMUR I, KUCUKGOZ GULEC U, PAYDAS S, et al. Prognostic value of pre-operative neutrophil/lymphocyte ratio, monocyte count, mean platelet volume, and platelet/lymphocyte ratio in endometrial cancer [J]. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*, 2018, 226:25-29.