

联合超声影像组学和临床特征构建列线图模型预测甲状腺乳头状癌病理侵袭性

刘 晗, 侯春杰, 魏 敏, 鲁科峰, 孙立涛, 汤靖岚

杭州医学院附属人民医院 浙江省人民医院超声科, 浙江 杭州 310014

[摘要] 目的:联合超声影像组学特征和临床特征构建列线图模型,并评估其对甲状腺乳头状癌(PTC)病理侵袭性的预测价值。方法:纳入2024年1月至2025年5月在浙江省人民医院诊断为PTC的224例患者,收集相关基线数据、实验室检查数据及超声原始图像。将患者按8:2随机分为训练队列($n=179$)和测试队列($n=45$)。同时收集浙江省人民医院2025年6—11月诊断为PTC的42例患者作为独立验证队列。将PTC结节存在包膜外侵犯、脉管浸润、神经侵犯、腺内播散、腺外侵犯、中央区及侧颈部淋巴结转移以及高危亚型等一系列病理特征标记为病理侵袭性阳性。对11个候选临床特征进行单因素分析,并在此基础上采用逐步logistic回归筛选PTC病理侵袭性的独立预测因子并构建临床特征预测模型。依次采用Mann-Whitney U检验、Spearman相关分析(阈值0.9)结合贪心递归删除及最小绝对收缩和选择算子(LASSO)回归筛选超声影像组学特征,将筛选出的特征输入八种机器学习模型构建预测模型,并基于曲线下面积(AUC)选择最佳算法。将临床特征模型和超声影像组学特征模型代入logistic回归模型后绘制列线图模型。采用受试者操作特征曲线、校准曲线和临床决策曲线评价列线图模型的整体判别能力、校准度及在不同阈值概率下的临床获益。结果:基于甲状腺结节大小构建的临床特征模型在训练队列和测试队列中预测PTC病理侵袭性阳性的AUC分别为0.889(95%CI:0.843~0.935)和0.934(95%CI:0.860~0.973)。共筛选出13个超声影像组学特征,基于逻辑回归算法构建的超声影像组学模型在训练队列和测试队列中预测PTC病理侵袭性的AUC分别为0.846(95%CI:0.791~0.902)和0.939(95%CI:0.871~1.000)。联合超声影像组学和临床特征的列线图模型在训练队列、测试队列和独立验证队列中预测PTC病理侵袭性阳性的AUC分别为0.902(95%CI:0.858~0.945)、0.982(95%CI:0.953~1.000)和0.803(95%CI:0.665~0.941),校准曲线显示预测概率与实际概率一致性较好,临床决策曲线显示模型的临床净获益较高。结



收稿日期(Received):2025-09-24 修改返回日期(Revised):2026-03-16 接受日期(Accepted):2026-04-10 网络预发表日期(Online):2026-04-24

基金项目(Funding):浙江省卫生健康重大科技计划委省共建项目(WKJ-ZJ-2546);浙江省卫生健康行业科技计划委省共建项目(WKJ-ZJ-26025)

第一作者(First author):刘 晗,主治医师,主要从事浅表器官超声诊断;E-mail:liuhanlhlhlh@163.com;ORCID:0000-0001-7235-4957

通信作者(Corresponding author):汤靖岚,副主任医师,主要从事甲状腺、乳腺超声诊断;E-mail:tangjinglan_85@163.com;ORCID:0000-0001-8790-8035

论: 构建并验证了一个联合超声影像组学特征和临床特征的列线图模型, 预测结果表现出良好的区分度、校准度和临床实用性。

[关键词] 甲状腺乳头状癌; 侵袭性; 风险评估模型; 超声影像组学; 列线图

[中图分类号] R445.1; R604 [文献标志码] A

A nomogram combining ultrasound radiomics and clinical features for predicting pathological invasiveness of papillary thyroid carcinoma

LIU Han, HOU Chunjie, WEI Min, LU Kefeng, SUN Litao, TANG Jinglan (*Department of Ultrasonography, Zhejiang Provincial People's Hospital, Affiliated People's Hospital, Hangzhou Medical College, Hangzhou 310014, China*)

Corresponding author: TANG Jinglan, E-mail: tangjinglan_85@163.com, ORCID: 0000-0001-8790-8035

[Abstract] **Objective:** To develop a nomogram model combining ultrasound radiomics and clinical features and to evaluate its predictive value for pathological invasiveness of papillary thyroid carcinoma (PTC). **Methods:** This study included 224 patients diagnosed with PTC between January 2024 and May 2025 at Zhejiang Provincial People's Hospital. Baseline clinical data, laboratory findings, and raw ultrasound images were collected. The patients were randomly divided into a training cohort ($n=179$) and a testing cohort ($n=45$) at an 8:2 ratio. Additionally, 42 patients diagnosed with PTC from June to November 2025 were enrolled as an independent validation cohort. Pathological invasiveness was defined as the presence of one or more of the following features: extrathyroidal extension, vascular invasion, perineural invasion, intraglandular dissemination, extra-glandular invasion, central or lateral cervical lymph node metastasis, or high-risk subtypes. Univariate analysis was performed on 11 candidate clinical features, followed by stepwise logistic regression to identify independent predictors and to construct a clinical feature-based model. Ultrasound radiomics features were screened using Mann-Whitney U test, Spearman's correlation analysis (threshold 0.9) with greedy recursive elimination, and least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression. The selected features were then input into eight machine learning algorithms to build predictive models, and the optimal algorithm was selected based on the area under the receiver operating characteristic (ROC) curve (AUC). A nomogram was subsequently constructed by integrating the clinical model and the ultrasound radiomics model into a logistic regression framework. The discriminative ability, calibration, and clinical utility of the nomogram were assessed using ROC curves, calibration curves, and clinical decision curves. **Results:** The clinical feature model based solely on nodule size achieved AUCs of 0.889 (95%CI: 0.843–0.935) and 0.934 (95%CI: 0.860–0.973) in the training and testing cohorts, respectively. Thirteen ultrasound radiomics features were selected. The radiomics model built with logistic regression yielded AUCs of 0.846 (95%CI: 0.791–0.902) and 0.939 (95%CI: 0.871–1.000) in the training and testing cohorts, respectively. The nomogram combining ultrasound radiomics and clinical features achieved AUCs of 0.902 (95%CI: 0.858–0.945) in the

training cohort, 0.982 (95%CI: 0.953–1.000) in the testing cohort, and 0.803 (95%CI: 0.665–0.941) in the independent validation cohort. Calibration curves demonstrated good agreement between predicted and observed probabilities, and clinical decision curves indicated favorable net clinical benefit. **Conclusion:** A nomogram model combining ultrasound radiomics and clinical features was successfully developed, which exhibited good discrimination, calibration, and clinical utility.

[**Key words**] Papillary thyroid carcinoma; Invasive; Risk assessment model; Ultrasound radiomics; Nomogram

[J Zhejiang Univ (Med Sci), 2026, 55(6): 485-494.]

[**缩略语**] 甲状腺乳头状癌(papillary thyroid carcinoma, PTC); 促甲状腺激素(thyroid-stimulating hormone, TSH); 甲状腺球蛋白(thyroglobulin, Tg); 三碘甲腺原氨酸(triiodothyronine, T_3); 甲状腺素(thyroxine, T_4); 甲状腺球蛋白抗体(thyroglobulin antibody, TgAb); 甲状腺过氧化物酶抗体(thyroid peroxidase antibody, TPOAb); 受试者操作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC 曲线); 最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO); 极端梯度提升(eXtreme Gradient Boosting, XGBoost); 轻量梯度提升机(light gradient boosting machine, LightGBM); 曲线下面积(area under the curve, AUC)

PTC是最常见的甲状腺癌类型,近年来发病率在全球范围内呈上升趋势^[1-2]。PTC的治疗方法主要包括手术治疗、热消融治疗、放射性碘治疗和内分泌治疗等。手术治疗是PTC的主要治疗手段,对于肿瘤局限于甲状腺内的患者,常采用甲状腺腺叶切除术或甲状腺全切除术^[3];对于存在颈部淋巴结转移的患者,还需行颈部淋巴结清扫术^[4-5]。研究表明,对于低风险的PTC结节,甲状腺腺叶切除术与甲状腺全切除术后患者存活率差异无统计学意义,但甲状腺全切除术可能增加术后并发症的风险^[6]。热消融治疗是PTC的重要治疗手段之一,但该技术的实施高度依赖术前对肿瘤生物学行为的综合判断。为规避因消融不彻底或进展风险所带来的不良预后,高侵袭性PTC患者在临床实践中常被严格排除在热消融治疗之外。放射性碘治疗主要用于清除术后残留的甲状腺组织以及治疗远处转移灶。对于高风险患者,术后放射性碘治疗可降低肿瘤复发和转移的风险^[7-8]。然而,对于低风险患者,放射性碘治疗的获益尚不明确,且可能带来一些不良反应。内分泌治疗则是通过服用甲状腺激素抑制TSH分泌,从而抑制肿瘤细胞生长,其治疗目标须根据患者复发风险分层设定。因此,术前预

测PTC侵袭性风险对于治疗决策至关重要。

超声检查因其便捷、无创、可重复性强等优点,成为PTC诊断的重要手段^[9-10]。在PTC诊断中,超声图像可显示肿瘤的多种特征,如形态、边界、回声、钙化等,这些特征对判断肿瘤的侵袭性具有重要意义^[11]。然而,超声诊断的准确性依赖于检查者的经验和技术水平。越来越多的研究表明,影像组学特征与PTC侵袭性密切相关^[12-14]。随着研究深入,影像组学在PTC术前评估中应用广泛^[15]。多项研究尝试通过提取超声图像特征来构建预测模型,以评估肿瘤的侵袭性、淋巴结转移情况等,为手术方案制订提供参考^[16]。此外,影像组学还在评估PTC患者预后方面发挥重要作用,通过分析影像特征与患者生存结局的关系,为患者的个体化治疗提供依据。然而传统的影像组学模型由于其黑盒效应,对模型的预测结果无法做出直观的解释。同时,单纯依赖影像特征而未能整合临床或实验室数据,也是制约其临床转化的重要瓶颈。

列线图作为一种可视化的预测工具,可以通过联合患者临床特征、影像组学特征构建能预测临床结局的模型,并以图形化的方式呈现,便于临床医生直观评估患者发生腺体外病理侵袭性

的风险。有研究通过对20例有远处转移和46例无远处转移的PTC患者进行全外显子组测序和基因Panel测序,结合临床变量构建了预测远处转移的列线图,能够较为准确地预测患者发生远处转移的风险^[17-18]。此外,列线图还可用于预测PTC的其他侵袭性相关指标,如中央区淋巴结转移、大量淋巴结转移等^[19],为临床决策提供重要参考。

本研究将PTC结节存在包膜外侵犯、脉管浸润、神经侵犯、腺内播散、腺外侵犯、中央区及侧颈部淋巴结转移以及高危亚型等一系列病理特征标记为病理侵袭性阳性^[20],通过超声影像组学模型联合临床特征建立的列线图来预测PTC结节的病理侵袭性,旨在为PTC结节治疗方式的选择提供依据。

1 对象与方法

1.1 研究对象

回顾性收集浙江省人民医院2024年1月至2025年5月诊断为PTC的224例患者的临床资料及结节超声图像。患者以8:2的比例被随机分为训练队列($n=179$)和测试队列($n=45$)。同时,收集浙江省人民医院2025年6—11月诊断为PTC的42例患者作为独立验证队列,用于验证模型的泛化能力。纳入标准:①术前接受超声检查;②临床资料完整,包括年龄、性别、甲状腺激素和抗体水平,以及由超声确定的PTC结节大小;③PTC结节包膜外侵犯、脉管浸润、神经侵犯、腺内播散、腺外侵犯、中央区及侧颈部淋巴结转移以及高危亚型等病理资料完整。排除标准:①PTC结节直径小于2 mm(直径小于2 mm的结节一般不建议行细针穿刺活检和放疗、化疗或消融手术);②图像无法观察及识别;③合并其他类型甲状腺癌。

1.2 构建临床特征预测模型

收集患者的基线数据及实验室检查数据构建临床特征预测模型,包括年龄、性别、Tg、总T₃、总T₄、TSH、游离T₃、游离T₄、TgAb、TPOAb和结节大小。在训练队列中进行特征筛选和建模:首先,对每个候选临床特征进行单因素分析,将 $P<0.05$ 的临床特征纳入多因素分析;然后,采用逐步logistic回归法进一步筛选独立预测因子;最后,将逐步logistic回归保留的特征代入二元逻辑回归模型,构建临床特征预测模型,并得到相应的

回归方程。采用ROC曲线评估模型的区分能力。

1.3 获取超声图像及筛选超声影像组学特征

使用昆仑 Resona R9 彩色多普勒超声系统(中国深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司)、LOGIQ™ E9(美国GE HealthCare公司)和ACUSON Sequoia 超声诊断系统(德国Siemens Healthineers公司)等采集超声图像,均配备高频线阵探头(探头频率6~15 MHz)。为便于图像分析和特征提取,所有超声图像均以Dicom格式采集,并在预处理前统一转换为nii格式。首先,对图像体素强度值进行离散化处理,以降低噪声干扰并统一强度标度,从而保证所有图像空间分辨率一致。随后采用min-max归一化方法(灰度范围0~255)对图像信号强度进行标化,以减小因成像设备差异和操作人员技术不同所导致的信号偏差。此外,应用Z-score归一化方法对图像灰度值进行处理,以降低因参数设置不一致引起的成像特征异质性。经上述处理后原始图像的物理尺寸为1260像素×910像素×1像素,体素尺寸为1 mm×1 mm×1 mm。最后由经验丰富的甲状腺超声专科医生使用ITK-SNAP 3.8.0软件手动勾画出与PTC对应的感兴趣区域作为目标区域。为了评估特征提取的可重复性,随机选择50例PTC患者的超声图像,由两名超声检查人员采用双盲方法独立进行感兴趣区分割,观察者间/内相关系数为0.86,提示一致性好。

提取的超声影像组学特征包括三类:几何特征、强度特征和纹理特征。几何特征用于描述肿瘤的三维形态特性;强度特征反映的是肿瘤内部体素灰度值的一阶统计分布规律;纹理特征则用于表征图像强度的模式特征,即灰度在空间上的二阶及高阶分布关系。本文采用灰度共生矩阵、灰度游程矩阵、灰度区域大小矩阵和邻域灰度差异矩阵等方法提取纹理特征。所有特征均通过基于Pyradiomics(<https://pyradiomics.readthedocs.io>)自主开发的影像特征分析程序提取。在训练队列中,首先对超声影像组学特征进行Mann-Whitney U检验,保留 $P<0.05$ 的特征。然后,采用Spearman相关分析(阈值0.9)结合贪心递归删除(greedy algorithm)策略去除冗余特征。在此基础上,使用Python scikit-learn包进行LASSO回归(十折交叉验证及最小均方误差准则)进一步筛选系数非零的特征,构建超声影像组学标签。

1.4 构建超声影像组学预测模型

基于训练集,将LASSO回归筛选出的特征输入逻辑回归、支持向量机、K-近邻算法、极端随机树、随机森林、XGBoost、LightGBM、多层感知器等八种机器学习模型,构建超声影像组学预测模型,通过比较AUC值选择最佳算法。

1.5 构建列线图模型及外部验证

将临床特征模型和超声影像组学特征模型代入logistic回归模型后绘制列线图模型,并绘制列线图模型在训练队列、测试队列及独立验证队列中的ROC曲线、校准曲线及临床决策曲线,评价模型的整体判别能力、校准度及在不同阈值概率下的临床获益。

1.6 统计学方法

采用SPSSAU、SPSS26.0和基于Python语言的Jupyter软件进行统计分析。符合正态分布的计量数据以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,组间比较采用 t 检验;不符合正态分布的计量数据以中位数(上下四分位数) $[M(Q_1,Q_3)]$ 表示,组间比较采用Mann-Whitney U检验;计数数据以例数(百分比) $[n(\%)]$ 表示,组间比较采用 χ^2 检验。Hosmer-Lemeshow检验用于评估模型的拟合优度。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 临床特征预测模型

单因素分析结果显示,与病理侵袭性阴性组比较,病理侵袭性阳性组甲状腺结节增大($P<0.01$),两组在其他临床特征上差异均无统计学意义(均 $P>0.05$),见表1。

以结节大小作为自变量,是否为病理侵袭性阳性作为因变量,得到回归方程 $\ln(p/1-p)=-3.019+0.344\times$ 结节大小(p 代表病理侵袭性阳性的概率, $1-p$ 代表病理侵袭性阴性的概率)。该模型在训练队列和测试队列中的AUC分别为0.889(95%CI: 0.843~0.935)和0.934(95%CI:0.860~0.973),见图1。

2.2 超声影像组学特征预测模型

LASSO回归模型的十折交

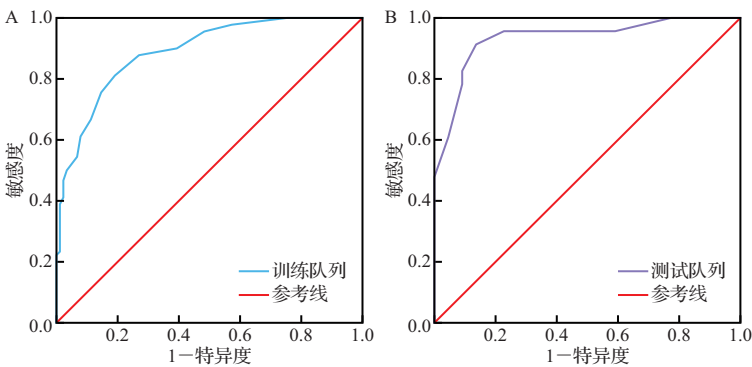
表1 临床特征影响甲状腺乳头状癌病理侵袭性的单因素分析结果

Table 1 Univariate analysis of clinical features associated with pathological invasiveness of papillary thyroid carcinoma

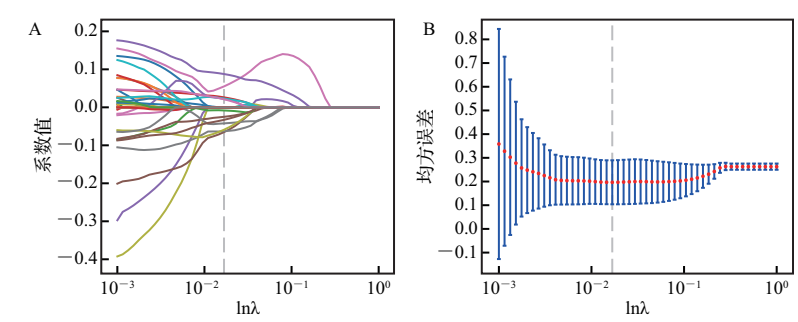
临床特征	$[M(Q_1,Q_3)$ 或 $n(\%)$ 或 $\bar{x}\pm s$]	
	病理侵袭性阴性组 ($n=89$)	病理侵袭性阳性组 ($n=90$)
年龄(岁)	42.0(35.0,52.0)	39.5(29.0,53.3)
男性	35(39.33)	43(47.78)
Tg($\mu\text{g/L}$)	48.0(6.5,85.5)	43.0(5.5,89.8)
总T ₃ (nmol/L)	1.10±0.20	1.08±0.25
总T ₄ (nmol/L)	89.7(80.4,101.6)	89.8(76.2,100.4)
TSH(ng/mL)	1.7(1.2,2.7)	1.9(1.3,3.1)
游离T ₃ (pmol/L)	3.4±0.4	3.4±0.5
游离T ₄ (pmol/L)	8.8±1.5	8.9±1.9
TgAb(IU/mL)	0.9(0.9,2.9)	0.9(0.9,8.2)
TPOAb(IU/mL)	1.2(0.5,3.8)	1.2(0.5,15.9)
结节大小(mm)	6.2±3.5	16.8±10.0**

** $P<0.01$. Tg:甲状腺球蛋白;T₃:三碘甲状腺原氨酸;T₄:甲状腺素;TSH:促甲状腺激素;TgAb:甲状腺球蛋白抗体;TPOAb:甲状腺过氧化物酶抗体。

叉验证结果见图2,经筛选后用于建模的特征共计13个(表2),其中original_shape_MinorAxisLength的权重系数最高,为0.082。基于这13个超声影像组学特征构建的八种机器学习模型在训练队列和测试队列中的ROC曲线如图3所示。鉴于逻辑回归模型在小样本量研究中稳定性及可解释性强,因此本研究选择逻辑回归算法作为主要模型算法建立超声影像组学模型,其AUC值在训练队列和测试队列中分别为0.846(95%CI: 0.791~0.902)和0.939(95%CI:0.871~1.000)。



A: 训练队列;B:测试队列.
图1 基于临床特征构建模型预测甲状腺乳头状癌病理侵袭性的受试者操作特征曲线
Figure 1 Receiver operating characteristic curves of the clinical feature model for predicting pathological invasiveness of papillary thyroid carcinoma

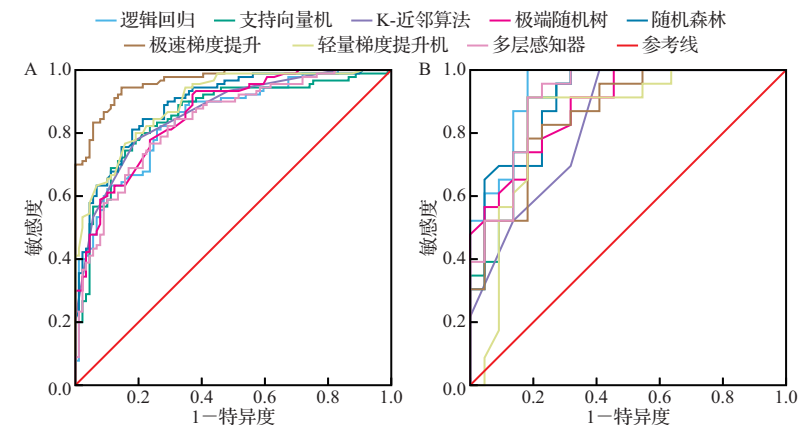


A: LASSO 回归模型的特征系数路径; B: 通过十折交叉验证选择最佳 λ 值. 虚线为最小误差值. LASSO: 最小绝对收缩和选择算子.

图2 基于LASSO回归的超声影像组学特征降维和筛选
Figure 2 Dimension reduction and feature selection of ultrasound radiomics features based on LASSO regression

表2 筛选后用于建模的超声影像组学特征及权重系数
Table 2 Ultrasound radiomics features and coefficients selected for modeling

特征名称	权重系数
original_shape_MinorAxisLength	0.082
original_glrlm_ShortRunEmphasis	-0.068
original_glszm_GrayLevelNonUniformityNormalized	-0.061
original_glszm_ZoneVariance	-0.058
original_glazm_ZoneEntropy	0.057
original_glszm_ZonePercentage	-0.042
original_shape_Sphericity	-0.030
original_glcmm_ClusterShade	0.025
original_glszm_SmallAreaLowGrayLevelEmphasis	-0.025
original_ngtmdm_Busyness	0.023
original_glszm_SmallAreaHighGrayLevelEmphasis	0.022
original_shape_SurfaceVolumeRatio	0.021
original_ngtmdm_Contrast	-0.004



A: 训练队列; B: 测试队列.
图3 基于超声影像组学特征构建模型预测甲状腺乳头状癌病理侵袭性的受试者操作特征曲线
Figure 3 Receiver operating characteristic curves of ultrasound radiomics-based models for predicting pathological invasiveness of papillary thyroid carcinoma

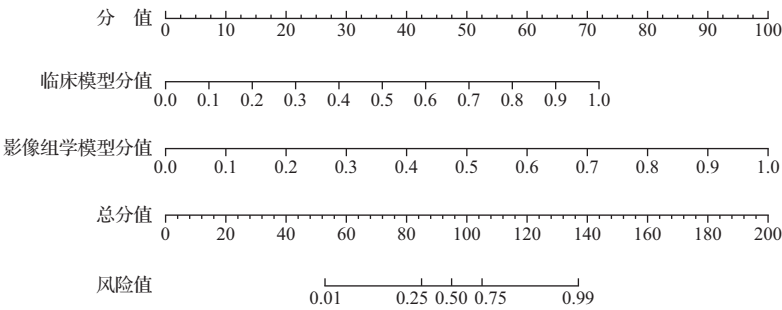
2.3 列线图构建及验证结果

联合超声影像组学特征和临床特征构建的列线图模型见图4。该列线图模型预测PTC病理侵袭性的AUC在训练队列中为0.902(95%CI: 0.858~0.945),在测试队列中为0.982(95%CI: 0.953~1.000),见图5A、B。无论在训练队列或测试队列,列线图校准曲线显示预测值与实测值均具有良好的一致性, Hosmer-Lemeshow 检验结果显示模型拟合良好(均 $P>0.05$)。临床决策曲线结果显示模型在两个队列中均展现出良好的临床净收益。在独立验证队列中,列线图模型预测PTC病理侵袭性的AUC为0.803(95%CI: 0.665~0.941),校准曲线显示预测概率与实际概率一致性较好,临床决策曲线显示其临床净收益较高,见图5C。提示列线图模型展现出优秀的临床预测能力和较高的应用价值。

3 讨论

既往对于PTC侵袭性的研究大多集中在对于单一侵袭性表现的预测上,如淋巴结转移、肿瘤包膜侵犯等^[14, 21-24]。然而,病理侵袭性这一概念可能包含多种病理性改变。本文资料将病理侵袭视作一个整体,包括包膜外侵犯、脉管浸润、神经侵犯、腺内播散、腺外侵犯、中央区及侧颈部淋巴结转移以及高危亚型等,构建可综合预测PTC多种侵袭性表现的模型。

已有多项研究报道了影像组学模型在预测PTC侵袭性方面的应用潜力^[24-25]。如Liu等^[24]通过对75例PTC患者的超声图像进行分析,提取了包括形态学、纹理在内的多种特征,构建了基于支持向量机的分类模型,在预测淋巴结转移方面取得了较好效果, AUC达到0.90; Lu等^[25]使用

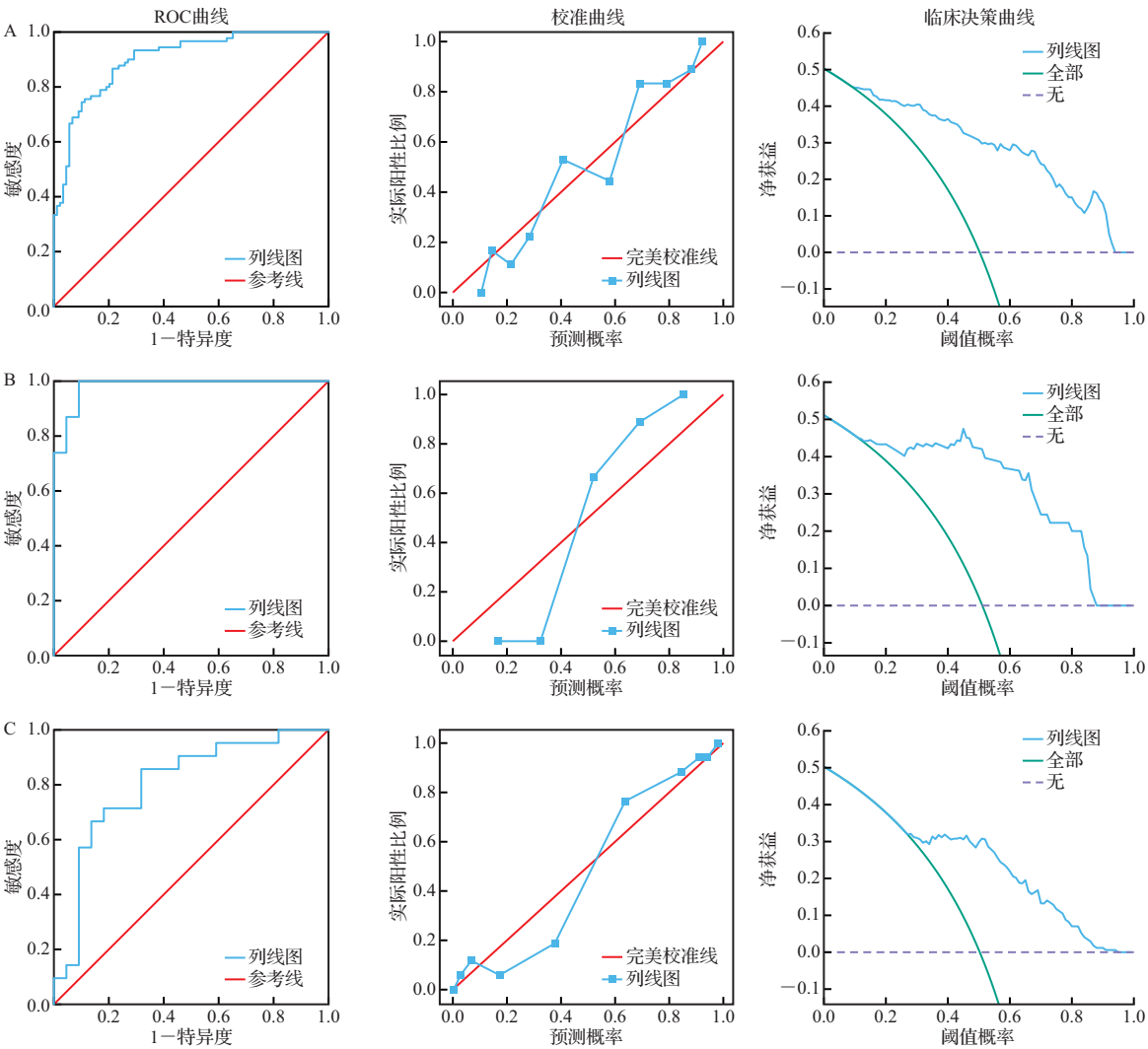


临床特征预测模型中,通过代入计算模型 $[\ln(p/1-p)=-3.019+0.344\times\text{结节大小}]$ 计算临床模型分值;超声影像组学特征预测模型中,将图片输入模型后计算出分值。

图4 联合超声影像组学和临床特征的甲状腺乳头状癌病理侵袭性预测列线图

Figure 4 Nomogram combining ultrasound radiomics model and the clinical feature model for predicting pathological invasiveness of papillary thyroid carcinoma

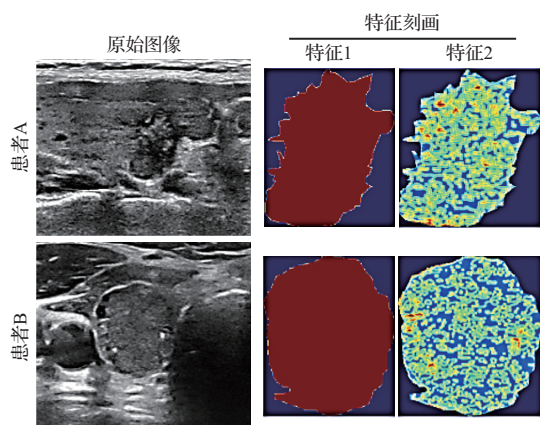
221例PTC患者的CT图像建立影像组学预测模型用于预测颈部淋巴结转移,模型在独立验证组中也取得了较好的效果(AUC:0.795~0.822)。影像组学的优势在于能够深入挖掘人眼无法感知的肿瘤内部异质性信息,如纹理特征、小波特征、形态学特征等^[26],可为PTC病理侵袭性研究提供更多信息。病理侵袭性阳性的PTC通常伴随更复杂的生物学行为改变,如



A:训练队列;B:测试队列;C:独立验证队列。ROC曲线:受试者操作特征曲线。
图5 联合超声影像组学和临床特征的列线图预测甲状腺乳头状癌病理侵袭性的ROC曲线、校准曲线和临床决策曲线

Figure 5 ROC curves, calibration curves, and clinical decision curves of the nomogram combining ultrasound radiomics model and the clinical feature model for predicting pathological invasiveness of papillary thyroid carcinoma

细胞密度增高、坏死、纤维化、微血管分布异常等^[27],这些微观结构改变会直接影响超声波在组织中的传播和散射,最终在超声图像上转化为特定的、可量化的影像组学特征。本文资料筛选获得的13个超声影像组学特征中,权重系数排名前两位的分别是original_shape_MinorAxisLength(以下简称特征1)和original_glrlm_ShortRunEmphasis(以下简称特征2)。通过观察病理侵袭性阳性、阴性典型患者的超声图像发现,在特征1的刻画图中,病理侵袭性阳性患者的结节边缘更不规则;在特征2的刻画图中,病理侵袭性阳性患者结节内部的红色光点较阴性患者明显更多,对应超声图像中的强光斑即钙化斑。见图6。结合临床特征分析结果,认为结节大小、结节形态、结节内钙化斑块数是预测病理侵袭性阳性的关键因素。



患者A,女性,年龄55岁,侧区淋巴结转移、包膜外侵犯,病理侵袭性阳性;患者B,女性,51岁,未见腺体外侵犯及淋巴结转移,病理侵袭性阴性。患者A结节形状(特征1: original_shape_MinorAxisLength)较患者B更加不规则,结节内的强光点(特征2: original_glrlm_ShortRunEmphasis)更多。

图6 甲状腺乳头状癌病理侵袭性阳性与阴性典型病例的超声影像组学关键特征示意图

Figure 6 Schematic diagram illustrating the key ultrasound radiomics features in typical cases of pathologically invasive-positive and invasive-negative papillary thyroid carcinoma

列线图可将复杂的统计学模型转化为易用的可视化评分工具,能够提供个体化的量化风险概率,更有助于临床医生尤其是外科医生开展术前决策^[28-29]。本文资料联合超声影像组学特征和临床特征模型构建的列线图模型在测试队列及独立验证队列中均表现出优异的预测性能,校准曲线显示模型预测概率与实际概率一致性较好,

证实该列线图模型对PTC病理侵袭性具备优秀的预测能力,可以帮助外科医生在术前更准确地识别高侵袭性病理特征的PTC患者,为制订个体化手术方案(如甲状腺全切除术或甲状腺腺叶切除术、是否行中央区淋巴结清扫、是否需要更精细的神经监测等)提供证据支持。对于预测为低风险的患者,该模型可帮助避免过度治疗,减少甲状旁腺功能减退、喉返神经损伤等手术并发症对生活质量的影晌;对于高风险患者,则可保障手术切除的彻底性。同时,医生可借助可视化的列线图与患者进行更高效的沟通,直观展示手术风险及预后,从而推动医患共同参与治疗决策。

本研究还存在一定局限性。首先,本文资料样本来自单中心且数量有限,需进一步扩大样本量来提升模型的稳定性,并在前瞻性、多中心研究中进一步验证模型的效能。其次,肿瘤的勾画由两位超声科医生完成,尽管一致性较高,但仍可能存在主观差异,未来可探索自动或半自动分割技术以减少人为误差。再次,本文资料采集的超声图像来自多种设备平台,未来需要在不同设备上验证模型的普适性。最后,本文资料对侵袭性的定义基于术后病理结果,而病理学评估本身也可能存在观察者间差异。

综上所述,基于本文资料成功开发并验证了一个联合超声影像组学特征和临床特征的列线图模型,其能够以无创、定量的方式个体化预测PTC病理侵袭性,表现出良好的区分度、校准度和临床实用性。未来将开发集成该模型的可视化软件或在线计算器,使其无缝嵌入医院的影像归档和通信系统或超声工作站,实现“即扫即评”的便捷操作;同时进一步探索将人工智能深度学习技术与影像组学结合,以期实现端到端的自动特征提取和风险预测。

本文附加文件见电子版。



志谢 本研究得到浙江省卫生健康重大科技计划委省共建项目(WKJ-ZJ-2546)和浙江省卫生健康行业科技计划委省共建项目(WKJ-ZJ-26025)支持

Acknowledgements This study was supported by Major Science and Technology Program of the Health Commission of Zhejiang Province Ministry-Province Co-construction Project

(WKJ-ZJ-2546) and Science and Technology Program of the Health Industry of the Health Commission of Zhejiang Province Ministry-Province Co-construction Project (WKJ-ZJ-26025)

作者贡献 刘晗、侯春杰、魏敏、鲁科峰、孙立涛和汤靖岚参与论文选题和设计或参与资料获取、分析或解释,起草研究论文或修改重要智力性内容.所有作者均已阅读并认可最终稿件,并对数据的完整性和安全性负责.具体见电子版

Author Contributions LIU Han, HOU Chunjie, WEI Min, LU Kefeng, SUN Litao and TANG Jinglan participated in brewing and designing experiments, or acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; drafting the work, or revising it critically for important intellectual content. All authors have read and approved the final manuscript, and take responsibility for the integrity and security of the data. See the electronic version for details

数据可用性 本研究的相关数据可根据合理请求从通信作者(E-mail:tangjinglan_85@163.com)处获得

Data Availability All relevant data supporting the findings of this study can be accessed upon reasonable request from the corresponding author at tangjinglan_85@163.com

医学伦理 本研究通过浙江省人民医院医学伦理委员会审查[浙人医伦审 2024 其他第(124)号]并符合 1964 年《赫尔辛基宣言》及之后的修订版或类似的伦理标准.研究豁免患者知情同意

Ethical Approval All procedures performed in this study involving human participants were in accordance with the ethical standards of Zhejiang Provincial People's Hospital (2024-124), and with the 1964 Helsinki declaration and its later amendments or comparable ethical standards. The exemption from informed consent for this study was approved

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献(References)

- [1] HUGHES D T, HAYMART M R, MILLER B S, et al. The most commonly occurring papillary thyroid cancer in the United States is now a microcarcinoma in a patient older than 45 years[J]. *Thyroid*, 2011, 21 (3): 231-236.
- [2] HAJEER M H, AWAD H A, ABDULLAH N I, et al. The rising trend in papillary thyroid carcinoma: true increase or over diagnosis [J]. *Saudi Med J*, 2018, 39 (2): 147-153.
- [3] LAMARTINA L, GRANI G, DURANTE C, et al. Recent advances in managing differentiated thyroid cancer[J]. *F1000Res*, 2018, 7: 86.
- [4] WU Z, HAN L, LI W, et al. Which is preferred for initial treatment of papillary thyroid cancer, total thyroidectomy or lobotomy[J]. *Cancer Med*, 2021, 10(5): 1614-1622.
- [5] 赵博慧, 黄泽浩, 黄樱城, 等. 超择区域性淋巴结清扫在甲状腺乳头状癌区域性侧颈淋巴结转移中的初步研究[J]. *中华肿瘤杂志*, 2021, 43(4): 484-489.
- [6] ZHAO Bohui, HUANG Zehao, HUANG Yingcheng, et al. Preliminary study of superselective lymph node dissection in regional lateral cervical lymph node metastasis of papillary thyroid carcinoma[J]. *Chinese Journal of Oncology*, 2021, 43(4): 484-489. (in Chinese)
- [7] KIM M J, LEE M C, LEE G H, et al. Extent of surgery did not affect recurrence during 7-years follow-up in papillary thyroid cancer sized 1-4 cm: preliminary results[J]. *Clin Endocrinol (Oxf)*, 2017, 87(1): 80-86.
- [8] KAMMORI M, FUKUMORI T, SUGISHITA Y, et al. Radioactive iodine (RAI) therapy for distantly metastatic differentiated thyroid cancer (DTC) in juvenile *versus* adult patients[J]. *Endocr J*, 2015, 62(12): 1067-1075.
- [9] GRAY K D, BANNANI S, CAILLARD C, et al. High-dose radioactive iodine therapy is associated with decreased risk of recurrence in high-risk papillary thyroid cancer[J]. *Surgery*, 2019, 165(1): 37-43.
- [10] BOURSIER L, CLERC URMES I, GARON J, et al. Ultrasound and cytological characteristics of non-invasive follicular thyroid neoplasm with papillary-like nuclear features compared to papillary carcinomas[J]. *Ann Endocrinol (Paris)*, 2020, 81(1): 28-33.
- [11] OSHITA M, ITO Y, MIYAMOTO T, et al. Ultrasound findings of noninvasive follicular thyroid neoplasm with papillary-like nuclear features compared with those of follicular variant of papillary carcinoma and encapsulated papillary carcinoma: a single-institution study in Japan[J]. *Endocr J*, 2020, 67(11): 1147-1155.
- [12] GU W J, YAN H X, LUO Y K, et al. Characterization of papillary thyroid microcarcinomas using sonographic features in malignant papillary thyroid cancer: a retrospective analysis[J/OL]. *Medicine*, 2015, 94(21): e841.
- [13] HU W, WANG H, WEI R, et al. MRI-based radiomics analysis to predict preoperative lymph node metastasis in papillary thyroid carcinoma[J]. *Gland Surg*, 2020, 9(5): 1214-1226.
- [14] YU J, DENG Y, LIU T, et al. Lymph node metastasis prediction of papillary thyroid carcinoma based on transfer learning radiomics[J]. *Nat Commun*, 2020, 11: 4807.

- [14] WU X, YU P, JIA C, et al. Radiomics analysis of computed tomography for prediction of thyroid capsule invasion in papillary thyroid carcinoma: a multi-classifier and two-center study[J]. **Front Endocrinol (Lausanne)**, 2022, 13: 849065.
- [15] 蒋丽晴. 超声影像组学预测甲状腺乳头状癌侵袭性的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
JIANG Liqing. The application of ultrasound radiomics in predicting the aggressiveness of papillary thyroid carcinoma[D]. Changsha: Central South University, 2023. (in Chinese)
- [16] LIU X, YAO J, WANG D, et al. Machine learning model for risk stratification of papillary thyroid carcinoma based on radiopathomics[J]. **Acad Radiol**, 2025, 32(5): 2545-2553.
- [17] LAN X, BAO H, GE X, et al. Genomic landscape of metastatic papillary thyroid carcinoma and novel biomarkers for predicting distant metastasis[J]. **Cancer Sci**, 2020, 111(6): 2163-2173.
- [18] YANG G, YANG F, ZHANG F, et al. Radiomics profiling identifies the value of CT features for the preoperative evaluation of lymph node metastasis in papillary thyroid carcinoma[J]. **Diagnostics (Basel)**, 2022, 12(5): 1119.
- [19] FENG J W, HONG L Z, WANG F, et al. A nomogram based on clinical and ultrasound characteristics to predict central lymph node metastasis of papillary thyroid carcinoma[J]. **Front Endocrinol (Lausanne)**, 2021, 12: 666315.
- [20] AL-QURAYSHI Z, SULLIVAN C B, PAGEDAR N, et al. Prevalence and risk of metastatic thyroid cancers and management outcomes: a national perspective[J]. **Laryngoscope**, 2021, 131(1): 237-244.
- [21] LI J, HE G, TONG Y, et al. A novel scoring system for the risk of papillary thyroid cancer metastases in lymph nodes posterior to the right of the recurrent laryngeal nerve[J]. **Endocr Pract**, 2021, 27(1): 15-20.
- [22] HU D, LIN H, ZENG X, et al. Risk factors for and prediction model of skip metastasis to lateral lymph nodes in papillary thyroid carcinoma[J]. **World J Surg**, 2020, 44(5): 1498-1505.
- [23] ZOU Y, SHI Y, SUN F, et al. Extreme gradient boosting model to assess risk of central cervical lymph node metastasis in patients with papillary thyroid carcinoma: individual prediction using SHapley Additive exPlanations[J]. **Comput Meth Programs Biomed**, 2022, 225: 107038.
- [24] LIU T, GE X, YU J, et al. Comparison of the application of B-mode and strain elastography ultrasound in the estimation of lymph node metastasis of papillary thyroid carcinoma based on a radiomics approach[J]. **Int J Comput Assist Radiol Surg**, 2018, 13(10): 1617-1627.
- [25] LU W, ZHONG L, DONG D, et al. Radiomic analysis for preoperative prediction of cervical lymph node metastasis in patients with papillary thyroid carcinoma [J]. **Eur J Radiol**, 2019, 118: 231-238.
- [26] PAN G H, ZHOU F, CHEN W B, et al. Advancing gastrointestinal stromal tumor management: the role of imagomics features in precision risk assessment[J]. **World J Gastrointest Surg**, 2024, 16(9): 2942-2952.
- [27] JIA W, CAI Y, WANG S, et al. Predictive value of an ultrasound-based radiomics model for central lymph node metastasis of papillary thyroid carcinoma[J]. **Int J Med Sci**, 2024, 21(9): 1701-1709.
- [28] KOOPMAN R J, MAINOUS A G. Evaluating multivariate risk scores for clinical decision making[J]. **Fam Med**, 2008, 40(6): 412-416.
- [29] VAN BELLE V, VAN CALSTER B. Visualizing risk prediction models[J/OL]. **PLoS One**, 2015, 10(7): e0132614.

[本文编辑 余 方 刘丽娜]

· 读者 · 作者 · 编者 ·

谁是作者?

国际医学期刊编辑委员会发布的《学术研究实施与报告和医学期刊编辑与发布的推荐规范》(<http://www.icmje.org/recommendations/>)提出根据以下四条标准确定作者身份:①对研究工作的思路或者设计有重要贡献,或者为研究获取、分析或解释数据;②起草研究论文或者在重要智力性内容上对论文进行修改;③对将要发表的本作最终定稿;④同意对研究工作的各个方面承担责任以确保与论文任何部分的精确性或诚信有关的问题得到恰当的调查和解决。所有被指定为作者的人都应该同时满足以上四条标准,而同时满足以上四条标准者也都应该被确定为作者。未满足以上四条标准而对论文有贡献者应该被致谢,如筹集研究基金、对研究团队进行综合管理、帮助写作、技术编辑、语言编辑和校样修改等。通信作者是在投稿、同行评议及出版过程中主要负责与期刊联系的人。