XXXX DOI:

MRI影像组学联合临床指标及LI-RADS特征预测中晚期肝细胞癌TACE术后的肿瘤反应

张朋伟,魏 敏,杨朝凤,李 杨
(川北医学院附属医院放射科,南充 637000)

【摘 要】目的:探讨术前磁共振成像(magnetic resonance imaging,MRI)影像组学特征联合临床指标及肝脏影像报告和数据系统(liver imaging reporting and data system,LI-RADS)特征预测中晚期肝细胞癌(hepatocellular carcinoma,HCC)患者经动脉化疗栓塞术(transarterial chemoembolization,TACE)术后肿瘤反应的价值。**方法:**回顾性收集2020年1月至2024年7月于川北医学院附属医院接受TACE治疗的169例中晚期HCC患者的临床和影像学资料,按7∶3比例分为训练集(118例)和验证集(51例)。在术前MRI的轴位抑脂T2加权成像(fat suppression T2 weighted,FS-T_2WI)、动脉期和门静脉期图像上勾画肿瘤感兴趣区(region of interest,ROI)并提取影像组学特征。通过一致性分析和Spearman相关性检验剔除不稳定和冗余的影像组学特征,随后使用最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator,LASSO)回归对特征进一步降维,并计算每位患者的影像组学评分(Rad-score)。采用单因素和多因素logistic回归筛选出与肿瘤反应明显相关的临床指标及LI-RADS特征。然后,分别构建影像组学模型、临床模型和联合模型。通过受试者工作特征曲线下面积(area under the curve,AUC)、校准曲线、临床决策曲线分析(decision curve analysis,DCA)评价各模型预测性能和临床实用性。最后利用列线图对模型进行可视化展示。**结果:**本研究共纳入169例患者,其中有肿瘤反应患者106例,无肿瘤反应患者63例。最终共筛选出10个影像组学特征,并基于这些特征计算Rad-score。血小板与淋巴细胞比率(platelet-to-lymphocyte ratio,PLR)、肿瘤最大径和晕状强化是与肿瘤反应明显相关的独立预测因素。在训练集和验证集中,影像组学模型AUC分别为0.810、0.742,临床模型AUC分别为0.771、0.680,联合模型AUC分别为0.846、0.811,联合模型性能最优。校准曲线和DCA证实联合模型具有良好的校准度和临床实用性,采用列线图对联合模型进行可视化。**结论:**术前MRI影像组学联合临床指标及LI-RADS特征能有效预测中晚期HCC患者TACE术后的肿瘤反应。

【关键词】影像组学;肝细胞癌;肝脏影像报告和数据系统特征;经动脉化疗栓塞;列线图
【中图分类号】R445.3 **【文献标志码】**A **【收稿日期】**2025-03-27

MRI radiomics combined with clinical indices and LI-RADS features for predicting tumor response after transarterial chemoembolization in patients with intermediate and advanced hepatocellular carcinoma

Zhang Pengwei, Wei Min, Yang Chaofeng, Li Yang
(*Department of Radiology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College*)

【Abstract】*Objective*: To investigate the value of preoperative MRI radiomic features combined with clinical indices and LI-RADS features in predicting tumor response after transarterial chemoembolization (TACE) in patients with intermediate and advanced hepatocellular carcinoma (HCC). ***Methods*:** A retrospective analysis was performed for the clinical and imaging data of 169 patients with intermediate and advanced HCC who underwent TACE in Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College from January 2020 to July 2024, and the patients were divided into a training set (118 patients) and a validation set (51 patients) at a ratio of 7∶3. Regions of interest (ROIs) of the tumor were delineated on preoperative MRI images, including FS-T_2WI, arterial phase, and portal venous phase images, and radiomic features were extracted. Consistency analysis and Spearman correlation analysis were used to exclude unstable and redundant radiomic features, then a least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression analysis was used for further dimension reduction, and a radiomics score (Rad-score) was calculated for each patient. Univariate and multivariate logistic regression analyses were used to identify the clinical indices and LI-RADS features that were significantly associated with tumor response, and a radiomics model, a clinical model, and a combined

作者介绍:张朋伟,Email:zhagnpengwei177@qq.com,
研究方向:腹部疾病的影像诊断及介入治疗。
通信作者:李 杨,Email:552410618@qq.com。
基金项目:川北医学院科研发展计划资助项目(编号:CBY23-QNA51);
南充市市校科技战略合作专项资助项目(编号:22SXQT0294)。

model were constructed. The area under the receiver operating characteristic curve (AUC), the calibration curve, and the decision curve analysis (DCA) were used to assess the predictive performance and clinical practicability of each model. Finally, a nomogram was developed for visualization. ***Results***: A total of 169 patients were included in this study, among whom there were 106 patients with tumor response and 63 with no tumor response. A total of 10 radiomic features were selected, and the Rad-score was calculated based on these features. Platelet-to-lymphocyte ratio (PLR), maximum tumor diameter, and halo enhancement were identified as independent predictive factors that were significantly associated with tumor response. In the training and validation sets, the radiomics model had an AUC of 0.810 and 0.742, respectively, the clinical model had an AUC of 0.771 and 0.680, respectively, and the combined model had an AUC of 0.846 and 0.811, respectively, suggesting that the combined model had the best performance. The calibration curve and DCA showed that the combined model had good calibration and clinical practicability. A nomogram was employed to visualize the combined model.***Conclusion***: Preoperative MRI radiomics combined with clinical indices and LI-RADS features can effectively predict tumor response after TACE in patients with intermediate and advanced HCC.

【Key words】radiomics; hepatocellular carcinoma; LI-RADS features; transarterial chemoembolization; nomogram

原发性肝癌(primary liver cancer)是全球第六大常见癌症,也是第三大癌症相关死亡原因,其中肝细胞癌(hepatocellular carcinoma,HCC)约占75%~80%[1-2]。手术切除及肝移植是HCC的主要治愈手段,但由于多数患者确诊时已处于中晚期及供体短缺,许多患者无法接受根治性手术[3-4]。经动脉化疗栓塞术(transarterial chemoembolization,TACE)是巴塞罗那临床肝癌分期系统(Barcelona clinic liver cancer,BCLC)、美国国家综合癌症网络指南(National Comprehensive Cancer Network,NCCN)及中国《原发性肝癌诊疗指南(2024年版)》推荐的中晚期HCC患者标准的治疗方法[3,5-6]。然而,不同患者TACE术后的肿瘤反应可能受患者基本情况、肝脏贮备功能、免疫反应及肿瘤异质性等多种因素的影响存在差异有统计学意义[7-10]。因此,并非所有HCC患者接受TACE治疗均能获益,对治疗及预后改善至关重要。

动态增强MRI成像(dynamic contrast-enhanced MRI,DCE-MRI)具有无辐射、高分辨率及多序列成像优势,是肝癌诊断、分期及疗效评估的首选影像技术[12]。影像组学通过高通量提取定量影像特征,可提高癌症诊断、预后评估及疗效预测的准确性,已广泛应用于癌症研究[13]。Gao WY等[14]基于472例HCC患者的动态增强MRI影像组学特征,构建了预测HCC切除术后早期复发的模型,研究结果表明该模型具有良好的预测性能。既往研究表明TACE术前的临床指标及影像学特征也有助于预测术后肿瘤反应[15-18]。Zhang K等[19]的研究发现肿瘤最大径、瘤周低信号、肿瘤包膜不完整及形态不规则是TACE术后早期复发的独立危险因素,其构建的影像组学-影像学特征联合预测模型较单一影像组学模型明显提高了预测性能。Li JY等[20]的多中心回顾性研究发现肿瘤生长模式和白蛋白-胆红素分级(albumin-bilirubin,ALBI)与TACE术后肿瘤反应明显相关,联合影像组学、肿瘤生长模式和ALBI构建的预测模型性能最优。此外,LI-RADS特征(如马赛克结构、晕状强化等)已被证实可独立预测TACE术后肿瘤反应[18],但将影像组学、临床指标及LI-RADS特征均纳入预测模型进行综合分析的研究较少。因此,本研究旨在构建TACE术前MRI影像组学特征联合临床指标及LI-RADS特征的预测模型,并评估该模型在预测中晚期HCC患者TACE术后肿瘤反应中的价值,从而为优化HCC患者的个体化治疗方案提供帮助。

1 资料与方法

1.1 研究对象

研究收集了2020年1月至2024年7月期间在川北医学院附属医院就诊的HCC患者临床及影像数据。根据纳入和排除标准筛选后,最终纳入169例患者,按7∶3比例随机分为训练集(118例)和验证集(51例)。纳入标准:①临床诊断为中晚期HCC并接受TACE治疗;②术前1个月内完成上腹部动态增强MRI检查且图像质量合格;③术后3个月内通过影像学评估疗效。排除标准:①术前接受过其他抗肿瘤治疗;②临床或影像学资料不全;③合并其他恶性肿瘤。BCLC分期标准:中晚期HCC包括巴塞罗那肝癌分期B期及C期的患者,B期患者的诊断标准为多发病灶(其中至少1个直径>3cm或病灶数量>3个)且无血管侵犯或肝外转移,肝功能Child-Pugh A/B级且ECOG 0分;C期患者的诊断标准为存在血管侵犯或肝外转移,肝功能Child-Pugh A/B级且ECOG 1~2分。本研究为回顾性研究,经川北医学院附属医院医学伦理委员会审查批准(批准文号:2024ER452-1),豁免患者知情同意要求。

1.2 MRI检查设备及扫描方案

采用美国GE公司Discovery750 3.0T超导磁共振扫描仪，32通道全腹部相控阵体部线圈行肝脏平扫及动态增强扫描。患者在静息状态下取仰卧位，双臂上举，定位中心位于患者剑突下缘，扫描范围从膈顶至肝脏下缘。扫描序列包括：同反相位T1加权成像（in- and out-phase T1-weighted imaging，IP/OP T_1WI）、脂肪抑制快速自旋回波T2加权成像（Fat-suppressed fast spin-echo T2-weighted imaging，FS-T_2WI）、弥散加权成像（diffusion weighted imaging，DWI）；动态增强扫描时，通过手背静脉以2~5 mL/s的速率注射15~20 mL对比剂钆喷酸葡胺（gadopentetate dimeglumine，Gd-DTPA），分别在注射后约25~35 s（动脉期）、60~90 s（门静脉期）及180 s（延迟期）采集图像。扫描参数具体如下：① FS-T_2WI：重复时间/回波时间（repetition time/echo time，TR/TE）2 443/98 ms，视野（field of view，FOV）380 mm × 300 mm，矩阵304 × 192，层厚5 mm，层间距1 mm；②扩散加权成像（DWI）：TR/TE 4 096/(65-69) ms，b值50、200、800、1 000、1 500 s/mm^2，激励次数1次（b值<500 s/mm^2）或2次（b值≥800 s/mm^2），FOV 380 mm × 300 mm，矩阵128 × 101，层厚5 mm，层间距1 mm；三维肝脏容积加速采集T1加权成像（3D Liver Acquisition with Volume Acceleration Flexible T1-Weighted Imaging，3D LAVA-Flex T_1WI）：TR 4 ms，TE 1~2 ms，翻转角10°~15°，FOV 400 mm × 300 mm，矩阵304 × 205，层厚5 mm。

1.3 TACE操作方法

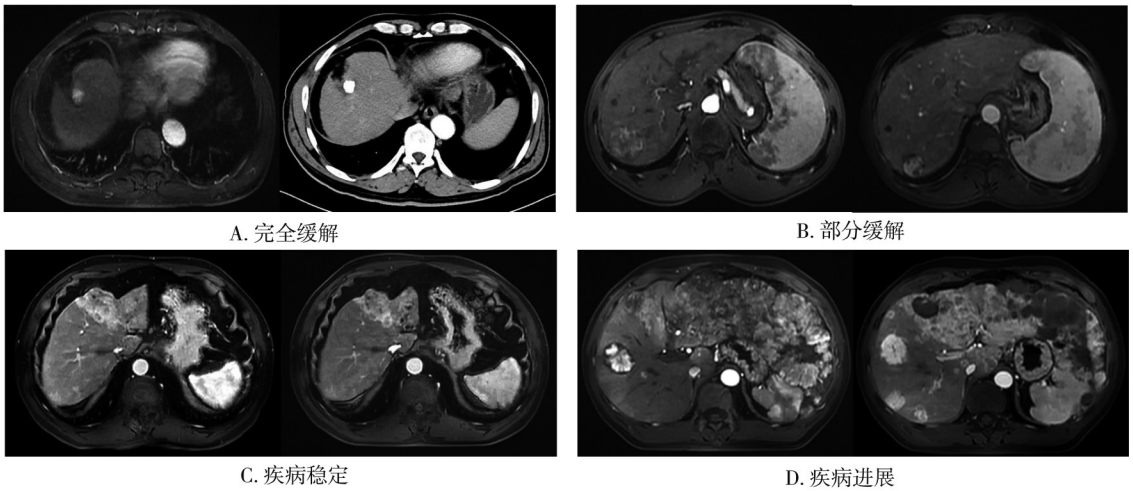
所有入选患者均成功接受了TACE治疗，治疗操作均按照现行的实践指南进行，并由具有超过10年临床经验的介入放射科医师实施。具体如下：经右侧股动脉入路置入5 F血管鞘组（泰尔茂公司，日本）并插入5F RH导管（泰尔茂公司，日本）至腹腔干或肝总动脉进行数字减影血管造影（Philips Azurion 7M20血管造影X线，飞利浦医疗系统公司，荷兰），全面评估肿瘤位置、大小、数量及血供。若肝脏区域血管稀少或肿瘤染色不充分，需进一步对肠系膜上动脉、胃左动脉等造影，确认异位起源或侧支供血。随后，经肝总动脉注入100 mL生理盐水与0.75 g 5-氟尿嘧啶（山西普德药业有限公司，中国）混合液进行灌注化疗，并使用2.4F微导管（波士顿科学公司，美国）超选择插管至肿瘤供血动脉分支，注入5~20 mL碘化油（江苏恒瑞公司，中国）+表柔比星（山东新时代药业有限公司，中国）+洛铂（海南长安国际制药有限公司，中国）混合乳剂进行栓塞，剂量根据肿瘤大小及血供调整，最多不超过30 mL。透视下以碘化油沉积浓密及门静脉小分支显影为栓塞终点，必要时可追加明胶海绵颗粒（杭州艾立康生物科技有限公司，中国）栓塞。术后患者平卧制动，压迫穿刺点止血。

1.4 疗效评价

基于改良的实体瘤疗效评价标准（modified response evaluation criteria in solid tumors，mRECIST）[21]，术后3个月内通过复查增强MRI或增强CT评估治疗效果（图1）。具体定义如下：完全缓解（complete remission，CR）：目标病灶在增强扫描动脉期中均无强化表现；部分缓解（partial remission，PR）：目标病灶有活性部分（增强扫描动脉期可见强化的区域）的直径总和缩小≥30%；疾病稳定（stable disease，SD）：目标病灶的缩小未达到PR标准，或增大未达到PD标准；疾病进展（progressive disease，PD）：目标病灶有活性部分（增强扫描动脉期可见强化的区域）的直径总和增加≥20%，或出现新病灶。本研究分为有反应组（TACE response group，TR）及无反应组（non-TACE response group，nTR），其中TR组包括CR和PR患者，nTR组包括SD和PD患者。

1.5 收集临床指标及LI-RADS特征

收集可能与肿瘤反应相关的临床指标，主要包括年龄、性别、饮酒史、乙肝病史及实验室指标，如甲胎蛋白（alpha fetoprotein，AFP）、异常凝血酶原（protein induced by vitamin K absence/antagonist-Ⅱ，PIVKA-Ⅱ）等。由2名放射科医生（从业3年以上）独立评估患者影像特征，若存在分歧则协商达成一致；若协商未果，由第3名资深放射科医生（从业10年以上）仲裁确定最终结果。评估内容包括：①肝硬化、肿瘤最大径、形态规整性、边缘光滑度、数量、门静脉癌栓及淋巴结转移；②LI-RADS主要特征：动脉期非环状高强化、非周边廓清、强化包膜；③支持HCC的次要特征：非强化包膜、“结



A. 完全缓解　B. 部分缓解

C. 疾病稳定　D. 疾病进展

图1 疗效评价示例图

节中结节”征象、马赛克结构、肿瘤内出血及脂肪变性；④支持恶性病变（尤其是非HCC）的次要特征：弥散受限、T_2WI轻-中度高信号、晕状强化、肿块内乏脂及乏铁，见图2。

1.6 提取及筛选影像组学特征

第1步，采用PyRadiomics软件包对所有MRI图像进行标准化预处理，通过三线性插值重采样至1mm³×1 mm³×1 mm³各向同性体素，并以固定面元宽度（Bin Width=30）进行灰度归一化。随后，将纳入患者的MRI图像以医学数字成像和通信（digital imaging and communications in medicine，DICOM）格式导入3D-Slicer软件进行肿瘤图像分割。放射科医师1分别在轴位FS-T_2WI、轴位动脉期、轴位门静脉期图像上沿病灶边缘逐层勾画ROI，对于多发病灶，仅勾画直径最大的病灶，并从勾画的ROI中分别提取定量影像学特征。为避免影像组学特征量纲差异的影响，对所有影像组学特征进行Z-score标准化处理。第2步，由放射科医师1和放射科医师2分别勾画从研究队列中随机选取51例患者的ROI并提取影像组学特征。间隔3个月后，由放射科医师1对同一组患者的ROI进行重新勾画并再次提取影像组学特征。通过组内相关系数（intraclass correlation coefficient，ICC）来评估观察者间和观察者内特征的稳定性。为确保所选特征具有较高的稳定性和可重复性，仅保留观察者间及观察者内ICC>0.75的特征进行下一步特征筛选。第3步，采用Spearman相关性检验对特征进行筛选。通过计算特征两两之间的Spearman相关系数（记作“R”），筛选出高相关性特征对（|R|>0.8）。对于每一对高相关性特征，保留其中1个特征，剔除另一个，从而减少特征之间的冗余性并降低模型过拟合的风险。第4步，采用LASSO回归进一步筛选影像组学特征。LASSO回归通过引入L1正则化项，能够将不重要特征的回归系数压缩至零，从而实现特征选择的目的。本研究通过10折交叉验证方法优化LASSO回归的调谐参数（λ），选择使交叉验证误差最小的λ值作为最终的正则化参数。第5步，将筛选出的FS-T_2WI、动脉期及门静脉期影像组学特征与其对应的非零系数相乘，通过线性组合计算每位患者的影像组学评分（Rad-score）。

1.7 建立并比较临床模型、影像组学模型及联合模型

采用单因素和多因素logistic回归在收集的临床指标及

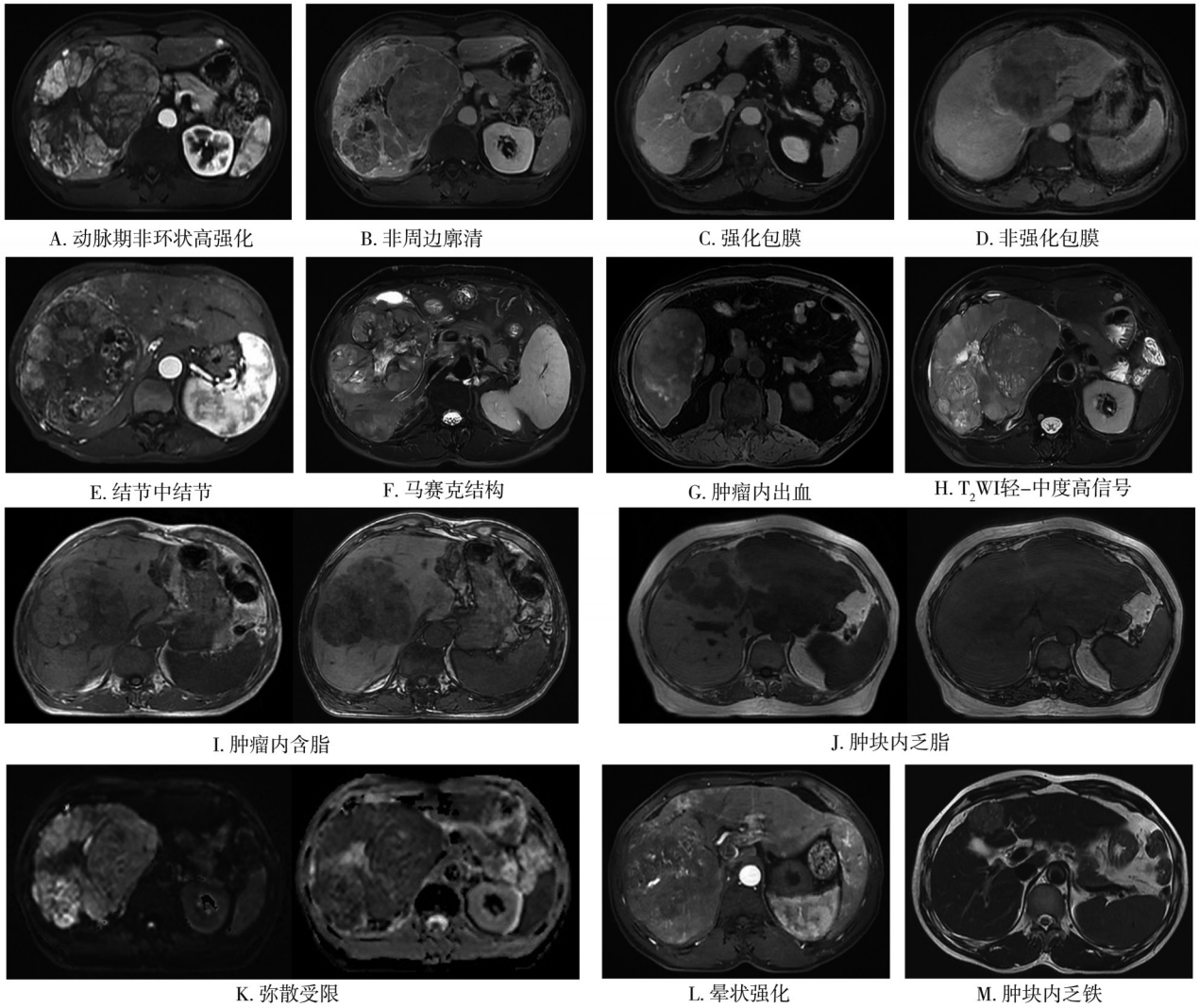


图2 LI-RADS特征示例图

LI-RADS特征中筛选出可能影响TACE治疗中晚期HCC患者肿瘤反应的独立预测因素，并基于独立预测因素构建临床预测模型。采用Riley RD等[22]提出的标准评估样本量是否符合分析要求，若符合分析要求则联合Rad-score与临床独立预测因素构建联合模型。采用AUC、校准曲线、临床决策曲线分析评价各模型的预测性能、校准度和临床实用性，并通过Delong检验比较不同模型之间AUC值的差异是否有统计学意义，最后利用列线图对模型进行可视化展示。

1.8 统计学方法

使用R语言（版本4.3.3）、SPSS 27.0进行统计学分析。符合正态分布的计量数据，用均值±标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，组间比较采用独立样本t检验；不符合正态分布的数据，以中位数（四分位法）即[M_d（P_{25}，P_{75}）]表示，采用Mann-Whitney U检验；分类变量以例数（百分比）[n（%）]表示，组间比较采用χ^2检验或Fisher确切概率法（当理论频数<5时）。根据约登指数最大值确定实验室指标的临界值。采用Delong检验比较不同模型之间AUC值的差异是否有统计学意义。检验水准α=0.05。

2 结 果

2.1 一般特征

本研究最终纳入169例患者，其中有肿瘤反应患者106例（62.72%），无肿瘤反应患者63例（37.28%），患者被随机分为训练集118例和验证集51例。训练集和试验集患者的基线特征（表1），训练集与验证集队列之间肿瘤形状、动脉期非环状高强化、肿块内乏铁P<0.05，差异具有统计学意义，上述3个变量不参与后续分析，其余变量P>0.05，差异无统计学意义。

表1 训练集和验证集患者TACE术前的基本临床特征及LI-RADS特征（n，%；$\bar{x} \pm s$）

变量	总体（n=169）	训练集（n=118）	验证集（n=51）	$t/\chi^2/Z$值	P值
年龄（岁）	59.76±11.86	59.94±11.17	59.33±13.43	0..304	0.761
性别				0.109	0.736
男	148（87.57）	104（88.14）	44（86.27）		
女	21（12.43）	14（11.86）	7（13.73）		
HBV				0.020	0.883
阳性	137（81.07）	96（81.36）	41（80.39）		
阴性	32（18.93）	22（18.64）	10（19.61）		
肝硬化				0.021	0.886
有	114（67.46）	80（67.80）	34（66.67）		
无	55（32.54）	38（32.20）	17（33.33）		
饮酒				3.381	0.066
有	46（27.22）	37（31.36）	9（17.65）		
无	123（72.78）	81（68.64）	42（82.35）		
TBIL（μmol/L）				0.130	0.716
<10.4	24（14.20）	16（13.56）	8（15.69）		
≥10.4	145（85.80）	102（86.44）	43（84.31）		
ALT（U/L）					1.000
<7.5	1（0.59）	1（0.85）	0（0.00）		
≥7.5	168（99.41）	117（99.15）	51（100.00）		
AST（U/L）				1.040	0.308
<30.5	20（11.83）	12（10.17）	8（15.69）		
≥30.5	149（88.17）	106（89.83）	43（84.31）		
GGT（U/L）				0.136	0.710
<101.5	66（39.05）	45（38.14）	21（41.18）		
≥101.5	103（60.95）	73（61.86）	30（58.82）		
ALP（U/L）				0.763	0.383
<178	118（69.82）	80（67.80）	38（74.51）		
≥178	51（30.18）	38（32.20）	13（25.49）		
NLR				0.920	0.337
<3.2	80（47.34）	53（44.92）	27（52.94）		
≥3.2	89（52.66）	65（55.08）	24（47.06）		
PLR				0.855	0.352
<116.2	77（45.56）	51（43.22）	26（50.98）		
≥116.2	92（54.44）	67（56.78）	25（49.02）		
AFP（μg/mL）				0.473	0.493

续表1

变量	总体(n=169)	训练集(n=118)	验证集(n=51)	$t/\chi^2/Z$值	P值
<400	86(50.89)	58(49.15)	28(54.90)		
≥400	83(49.11)	60(50.85)	23(45.10)		
PIVKA-Ⅱ(mAU/mL)				0.152	0.701
<40	16(9.47)	10(8.47)	6(11.76)		
≥40	153(90.53)	108(91.53)	45(88.24)		
MELD评分	5.59 ± 3.38	5.53 ± 3.61	5.73 ± 2.83	−0.342	0.737
PALBI评分	−2.36 ± 0.43	−2.33 ± 0.45	−2.42 ± 0.36	1.196	0.233
Child-pugh分级				1.000	0.318
A	140(82.84)	100(84.75)	40(78.43)		
B	29(17.16)	18(15.25)	11(21.57)		
BCLC分级				0.002	0.966
B	70(41.42)	49(41.53)	21(41.18)		
C	99(58.58)	69(58.47)	30(58.82)		
肿瘤最大径(cm)	8.80(5.90,11.30)	8.80(5.90,11.30)	9.10(6.00,11.05)	−0.400	0.686
肿瘤边缘				0.163	0.685
光滑	136(80.47)	94(79.66)	42(82.35)		
不光滑	33(19.53)	24(20.34)	9(17.65)		
肿瘤形状				4.400	0.036
规则	82(48.52)	51(43.22)	31(60.78)		
不规则	87(51.48)	67(56.78)	20(39.22)		
肿瘤数量				0.010	0.915
单发	119(70.41)	84(71.19)	35(68.63)		
多发	50(29.59)	34(28.81)	16(31.37)		
门静脉癌栓				2.180	0.140
有	59(34.91)	37(31.36)	22(43.14)		
无	110(65.09)	81(68.64)	29(56.86)		
淋巴结转移				0.110	0.738
有	36(21.30)	26(22.03)	10(19.61)		
无	133(78.70)	92(77.97)	41(80.39)		
动脉期非环状高强化				5.760	0.016
有	133(78.70)	87(73.73)	46(90.20)		
无	36(21.30)	31(26.27)	5(9.80)		
非周边廓清				3.22	0.073
有	131(77.51)	87(73.73)	44(86.27)		
无	38(22.49)	31(26.27)	7(13.73)		
强化包膜				0.010	0.915
有	115(68.05)	80(67.80)	35(68.63)		
无	54(31.95)	38(32.20)	16(31.37)		
非强化包膜				0.460	0.497
有	21(12.43)	16(13.56)	5(9.80)		
无	148(87.57)	102(86.44)	46(90.20)		
结节中结节				0.890	0.346
有	62(36.69)	46(38.98)	16(31.37)		
无	107(63.31)	72(61.02)	35(68.63)		
马赛克结构				0.030	0.856
有	134(79.29)	94(79.66)	40(78.43)		
无	35(20.71)	24(20.34)	11(21.57)		
肿瘤内出血				0.850	0.355
有	97(57.40)	65(55.08)	32(62.75)		
无	72(42.60)	53(44.92)	19(37.25)		
肿瘤内含脂				0.110	0.738
有	140(82.84)	97(82.20)	43(84.31)		

续表1

变量	总体(n=169)	训练集(n=118)	验证集(n=51)	$t/\chi^2/Z$值	P值
无	29(17.16)	21(17.80)	8(15.69)		
弥散受限					1.000
有	165(97.63)	115(97.46)	50(98.04)		
无	4(2.37)	3(2.54)	1(1.96)		
T_2WI轻-中度高信号					1.000
有	161(95.27)	112(94.92)	49(96.08)		
无	8(4.73)	6(5.08)	2(3.92)		
晕状强化				0.680	0.410
有	71(42.01)	52(44.07)	19(37.25)		
无	98(57.99)	66(55.93)	32(62.75)		
肿块内乏脂					1.000
有	6(3.55)	4(3.39)	2(3.92)		
无	163(96.45)	114(96.61)	49(96.08)		
肿块内乏铁				5.480	0.019
有	15(8.88)	6(5.08)	9(17.65)		
无	154(91.12)	112(94.92)	42(82.35)		

注：HBV(hepatitis B virus)：乙型肝炎病毒；TBIL(total bilirubin)：总胆红素；ALT(alanine aminotransferase)：丙氨酸氨基转移酶；AST(aspartate aminotransferase)：天冬氨酸转氨酶；GGT(gamma-glutamyl transpeptidase)：谷氨酰转肽酶；ALP(alkaline phosphatase)：碱性磷酸酶；NLR(neutrophil-to-lymphocyte ratio)：中性粒细胞/淋巴细胞比值；PLR(platelet-to-lymphocyte ratio)：血小板/淋巴细胞比值；AFP(alpha fetoprotein)：甲胎蛋白；PIVKA-Ⅱ(protein induced by vitamin K absence/antagonist-Ⅱ)：异常凝血酶原；MELD(model for end-stage liver disease)：终末期肝病模型评分；PALBI(platelet-albumin-bilirubin score)：血小板-白蛋白-胆红素评分。

2.2 建立临床模型

通过单因素、多因素logistic回归分析结果显示PLR(*OR*=1.726；95%CI=1.109~2.696；*P*=0.006)、肿瘤最大径(*OR*=1.147；95%CI=1.006~1.308；*P*=0.041)和晕状强化(*OR*=1.421；95%CI=1.178~2.998；*P*=0.049)是预测中晚期HCC患者TACE术后肿瘤反应的独立预测因素(表2)。因此，将PLR、肿瘤最大径和晕状强化纳入logistic回归分析，构建预测中晚期HCC患者TACE术后肿瘤反应的临床模型，其在训练集中AUC为0.771，在验证集中AUC为0.680。

2.3 建立影像组学模型

在FS-T_2WI、动脉期和门静脉期分别有1 025、1 096、1 074个特征满足观察者内ICC>0.75，955、1 063、998个特征满足观察者间ICC>0.75，取交集后，最终各序列分别保留了946个、1 049个和991个特征。随后，通过Spearman相关性检验去除高相关性冗余特征后，FS-T_2WI、动脉期和门静脉期分别保留107、113和122个特征。进一步采用LASSO回归进行特征降维，最终FS-T_2WI、动脉期和门静脉期分别筛选出4、5和1个非零系数的特征(表3)，然后计算每位患者的Rad-score。通过logistic回归构建预测中晚期HCC患者TACE术后肿瘤反应的影像组学模型，其在训练集中AUC为0.810，在验证集中AUC为0.742。

2.4 建立联合模型

根据Riley等提出的标准计算样本量，建立含4个变量的logistic模型需至少150例患者，其中阳性病例数≥60例，本研究纳入169例患者，其中有肿瘤反应患者106例，无肿瘤反应患者63例，符合分析要求。因此，联合Rad-score和临床独立预测因素(PLR、肿瘤最大径和晕状强化)，通过logistic回归构建预测中晚期HCC患者TACE术后肿瘤反应的联合模型，其在训练集中AUC为0.846，在验证集中AUC为0.811。

2.5 比较临床模型、影像组学模型和联合模型

应用AUC值评估模型区分度，结果显示联合模型在训练集中AUC为0.846(95%CI=0.775~0.917)，在验证集中AUC为0.811(95%CI=0.670~0.952)，均高于临床模型(训练集0.771，验证集0.680)和影像组学模型(训练集0.810，验证集0.742)(表4、图3)；Delong检验进一步证实，联合模型在验证集中的预测性能显著优于临床模型(Z=1.96，P=0.049)及影像组学模型(Z=2.32，P=0.021)。

根据校准曲线评估模型的校准度，联合模型的曲线与参考线(对角线)高度接近，表明模型的预测结果与实际观察结果之间具有良好的一致性，见图4。

根据临床决策曲线分析，联合模型在合理的阈值概率范围内展现出比临床模型和影像组学模型更大的净效益，表明其具有更高的临床实用性，见图5。

2.5 模型可视化

列线图利用带刻度的线段将联合模型中的各预后因素根据其加权系数转化为量化评分。基于患者的个体化数据，分别计算每个预后因素的相应分值并汇总为总评分，最终生成结局事件的预测概率。这一方法直观地呈现了联合模型的预测结果，便于临床医生快速评估患者的预后情况，见图6。

表2 临床指标及LI-RADS特征经单因素、多因素logistic回归分析结果

变量	单因素		多因素	
	*OR*值(95%CI)	*P*值	*OR*值(95%CI)	*P*值
年龄(岁)	0.98(0.948,1.014)	0.245		
性别(男/女)	2.519(0.811,7.820)	0.110		
HBV(阳性/阴性)	1.520(0.595,3.881)	0.382		
肝硬化(有/无)	1.589(0.721,3.500)	0.250		
饮酒(有/无)	0.966(0.433,2.157)	0.933		
TBIL(<10.4 vs. ≥10.4 μmol/L)	1.011(0.340,3.002)	0.985		
ALT(<7.5 vs. ≥7.5 U/L)	0.000(0.000,0.000)	1.000		
AST(<30.5 vs. ≥30.5 U/L)	0.133(0.017,1.070)	0.058		
GGT(<101.5 vs. ≥101.5 U/L)	0.365(0.158,0.847)	0.019	0.867(0.313,2.450)	0.801
ALP(<178 vs. ≥178 U/L)	0.232(0.102,0.527)	0.232		
NLR(<3.2 vs. ≥3.2)	0.490(0.226,1.061)	0.070		
PLR(<116.2 vs. ≥116.2)	1.916(1.082,3.465)	<0.001	1.726(1.109,2.696)	0.006
AFP(<400 vs. ≥400 μg/mL)	0.682(0.322,1.445)	0.318		
PIVKA-Ⅱ(<40 vs. ≥40 mAU/mL)	2.763(0.734,10.39)	0.133		
MELD评分	0.937(0.897,1.105)	0.996		
PALBI评分	1.303(0.577,2.942)	0.524		
Child-pugh分级(A vs. B)	0.538(0.196,1.480)	0.230		
BCLC分级(B vs. C)	0.520(0.238,1.136)	0.101		
肿瘤最大径(cm)	1.194(1.070,1.333)	0.002	1.147(1.006,1.308)	0.041
肿瘤边缘(光滑 vs. 不光滑)	0.639(0.258,1.585)	0.334		
肿瘤数量(单发 vs. 多发)	0.410(0.166,1.012)	0.053		
门静脉癌栓(有 vs. 无)	0.588(0.226,1.302)	0.191		
淋巴结转移(有 vs. 无)	0.338(0.138,0.825)	0.017	0.528(0.191,1.458)	0.218
非周边廓清(有 vs. 无)	2.248(0.974,5.184)	0.058		
强化包膜(有 vs. 无)	1.351(0.612,2.979)	0.456		
非强化包膜(有 vs. 无)	0.545(0.189,1.576)	0.263		
结节中结节(有 vs. 无)	0.650(0.304,1.392)	0.268		
马赛克结构(有 vs. 无)	0.371(0.128,1.079)	0.069		
肿瘤内出血(有 vs. 无)	0.665(0.311,1.420)	0.291		
肿瘤内含脂(有 vs. 无)	0.753(0.289,1.963)	0.561		
弥散受限(有 vs. 无)	0.837(0.074,9.510)	0.886		
T_2WI轻-中度高信号(有 vs. 无)	0.833(0.146,4.748)	0.837		
晕状强化(有 vs. 无)	1.302(1.139,3.658)	0.003	1.421(1.178,2.998)	0.049
肿块内乏脂(有 vs. 无)	0.583(0.352,27.58)	0.597		

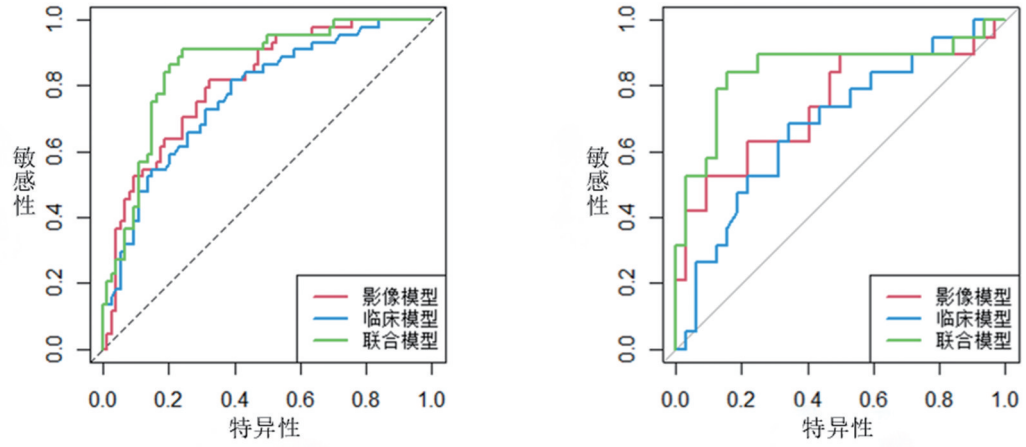
表3 最终筛选出10个特征的详细信息

序列	特征名称	类别	系数
FS-T_2WI	Idmn	GLCM	0.063 8
	ZoneEntropy	GLSZM	1.054 8
	MCC	GLCM	0.262 3
	GrayLevelNonUniformityNormalized	GLRLM	−0.542 7
动脉期	Correlation	GLCM	1.969 9
	Maximum2DDiameterSlice	Shape	1.439 0
	Median	First order	0.128 7
	SmallDependenceEmphasis	GLDM	−0.437 3
	GrayLevelNonUniformityNormalized	GLRLM	0.011 4
门静脉期	Idn	GLCM	0.274 4

注:Shape:形态特征;First order:一阶统计量特征;GLCM(gray level cooccurence matrix):灰度共生矩阵特征;GLRLM(gray level run length matrix):灰度游程矩阵特征;GLSZM(gray level size zone matrix):灰度区域大小矩阵特征;GLDM(gray level dependence matrix):灰度依赖性矩阵特征。

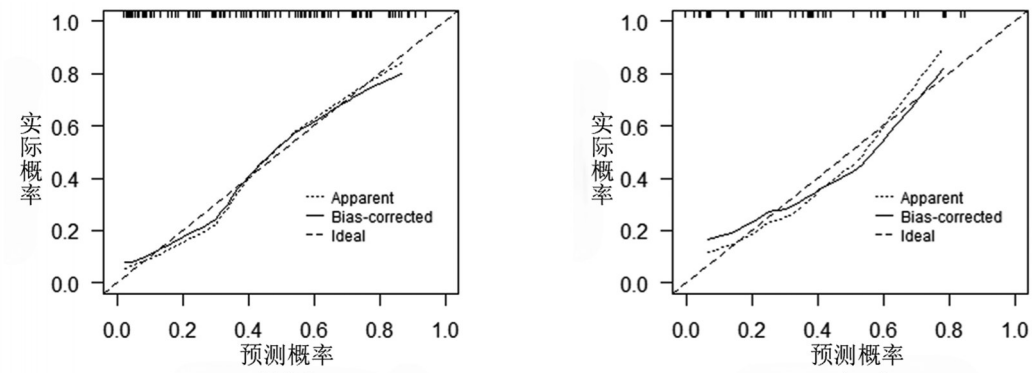
表4 各预测模型在训练集和验证集中的表现

分组	模型	灵敏度	特异度	阳性预测值	阴性预测值	准确率	F1评分	AUC（95%CI）	Delong检验（Z值,P值）
训练集	影像模型	0.614	0.824	0.675	0.782	0.745	0.643	0.810(0.731,0.888)	
	临床模型	0.591	0.797	0.634	0.766	0.720	0.612	0.771(0.684,0.857)	
	联合模型	0.659	0.824	0.690	0.803	0.763	0.674	0.846(0.775,0.917)	
验证集	影像模型	0.526	0.813	0.625	0.742	0.706	0.571	0.742(0.589,0.894)	2.32,0.021
	临床模型	0.368	0.844	0.583	0.692	0.667	0.452	0.680(0.526,0.835)	1.96,0.049
	联合模型	0.579	0.906	0.786	0.784	0.784	0.667	0.811(0.670,0.952)	



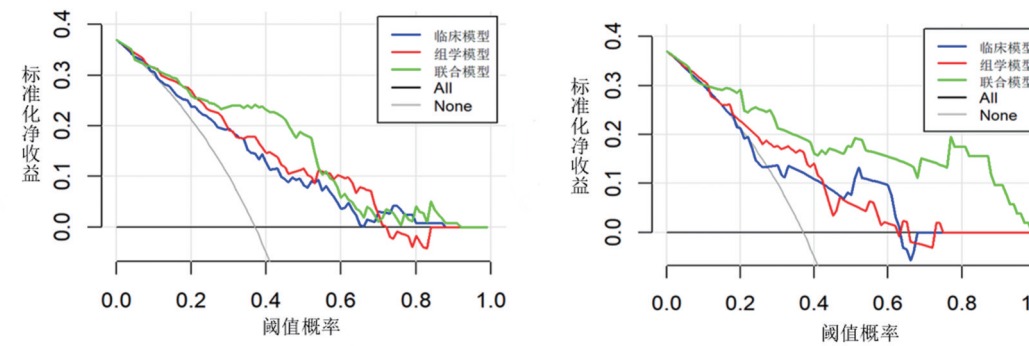
A. 训练集　　B. 验证集

图3 各预测模型的ROC曲线图



A. 训练集　　B. 验证集

图4 联合模型的校准曲线



A. 训练集　　B. 验证集

图5 临床模型、组学模型、联合模型的临床决策曲线

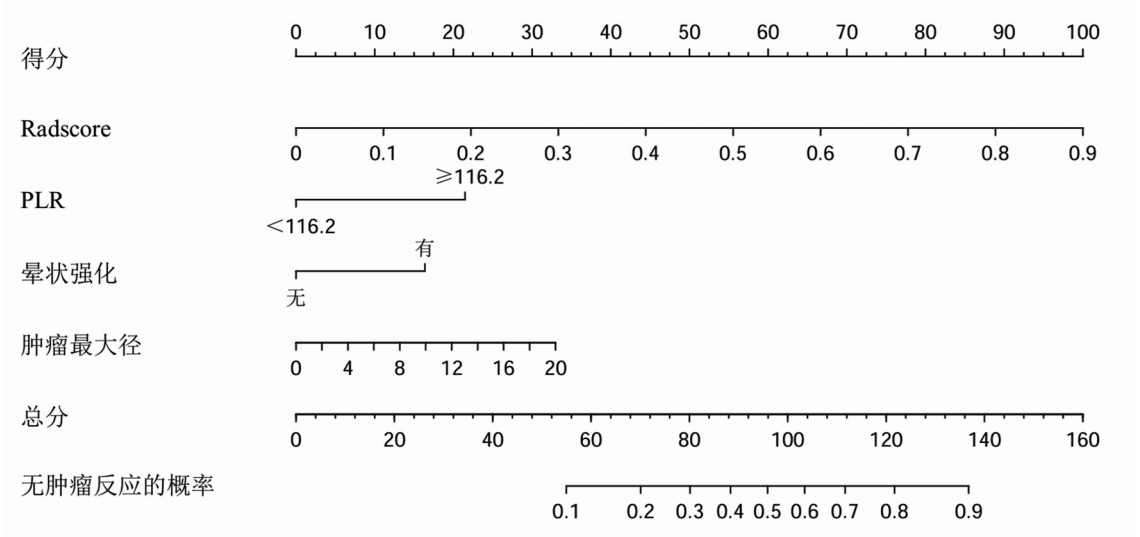


图6 列线图

3 讨 论

TACE已被广泛应用于中晚期HCC患者的治疗，但不同患者的肿瘤反应存在明显的个体差异，在术前准确预测肿瘤反应有助于HCC患者制定个体化治疗方案并改善患者预后。因此，本研究通过logistic回归构建了一种联合临床指标（PLR和肿瘤最大径）、LI-RADS特征（晕状强化）和术前MRI影像组学特征的预测模型，并系统评估了该模型用于预测中晚期HCC患者接受TACE术后肿瘤反应的临床应用价值。研究结果证实联合模型能有效预测TACE术后的肿瘤反应，可以为中晚期HCC患者的个体化治疗和临床决策提供参考依据。

影像组学通过从医学图像中提取高通量定量特征，深入揭示肿瘤的异质性，从而提高诊断和预后的准确性，为临床决策提供有力支持[13]。本研究提取了FS-T_2WI、动脉期、门静脉期肿瘤的影像组学特征，通过Spearman相关性检验及LASSO进行特征筛选，最终筛选出10个影像组学特征，包括8个纹理特征、1个形态特征、1个灰度直方图特征，其中纹理特征占比较高。纹理特征通过分析相邻体素关系评估肿瘤异质性，灰度直方图特征则通过量化灰度值分布评估肿瘤异质性[23,24]。形态特征反映了肿瘤的生长模式和侵袭性[25]，肿瘤的异质性和形态特征均是影响预后的重要因素[26-28]。在Cannella R等[29]基于增强MRI影像组学特征预测HCC患者TACE术后治疗反应的研究中，经过LASSO筛选出的组学特征同样以纹理特征居多，与本研究一致。此外，将上述影像组学特征进一步整合形成Rad-score，可以在保证预测性能的同时，明显降低数据维度并简化模型[30]。本研究通过logistic回归构建基于Rad-score的影像组学模型，其在训练集中AUC为0.810，在验证集中AUC为0.742，模型性能稳定。Li J等[20]对133例接受TACE治疗的HCC患者进行了多中心回顾性研究，利用随机森林算法从MRI图像中提取的影像组学特征中筛选出5个最优特征并计算Rad-score，基于Rad-score构建的预测模型在训练集、验证集和外部验证集中的AUC值分别为0.87、0.77和0.80。

在本研究中，通过单因素和多因素分析发现PLR、肿瘤最大径及晕状强化与HCC患者TACE术后的肿瘤反应高度相关。PLR是临床常用的炎症和免疫反应相关的生物标志物，在多种类型的癌症（如胃癌、肝癌、肺癌、乳腺癌等）中与患者的预后密切相关，高PLR通常提示肿瘤的恶性程度较高，且预后较差[31-33]，Schobert等[32]的研究发现PLR与肿瘤反应及无进展生存期（progression-free survival，PFS）明显相关，高PLR提示较差的肿瘤反应和较短的无进展生存期，与本研究结果一致。其原因可能是炎症和免疫抑制状态降低了肿瘤对治疗的敏感性[34]，并且血小板可能通过释放促炎因子和促血管内皮生成因子（vascular endothelial growth factor，VEGF），促进肿瘤的再生和耐药性[35]。肿瘤最大径与分期、治疗效果和复发风险密切相关，较大的肿瘤通常意味着较差的预后，这可能与肿瘤血供复杂和栓塞不完全有关[36-38]。晕状强化是LI-RADS中的

一种重要的影像特征，通常提示肿瘤边缘血供丰富，与肿瘤的侵袭性生长模式相关，并且晕状强化区域包含大量的新生血管和纤维化组织，这些微环境特性与肿瘤的耐药性和复发风险密切相关，具有晕状强化的肿瘤通常表现出更强的侵袭性和较差的预后[39-40]。

近年来，多项研究基于术前MRI影像组学特征构建了预测HCC患者TACE术后肿瘤反应的模型，并且通过联合临床特征（如肿瘤大小、AFP水平、Child-Pugh分级等），进一步提升模型的预测性能[18-19,42]。Liu Y等[42]的研究中结合影像组学和临床特征（瘤周强化和ALP）的联合模型对预测中晚期HCC患者TACE术后肿瘤反应的预测性能优于影像组学模型（AUC：0.871 vs. 0.847）。在另一项Kong C等[43]基于术前MRI影像组学预测HCC患者TACE术后疗效的研究中，影像组学模型在训练集和验证集中AUC分别为0.812和0.866，联合临床特征（AFP、Child-Pugh评分和BCLC分期）的联合模型AUC提高至0.861和0.884。本研究将独立预测因素与Rad-score联合构建联合模型，其预测性能（训练集AUC为0.846，验证集AUC为0.811）优于临床模型（训练集AUC为0.771，验证集AUC为0.680）和影像组学模型（训练集AUC为0.810，验证集AUC为0.742），并且通过Delong检验显示各模型预测性能之间的差异存在统计学意义（$P<0.05$）。校准曲线显示联合模型的预测结果与实际观察结果之间具有良好的一致性，并且DCA曲线显示联合模型的临床实用性优于临床模型和影像组学模型。

最后，本研究采用列线图对联合模型进行可视化，不仅可以量化各变量对预测结果的贡献，还能帮助临床医生快速计算HCC患者TACE术后的无肿瘤反应概率，为个体化治疗决策提供定量支持，使患者及其家属能够更清晰地理解病情和治疗预期，从而提升临床决策的科学性和患者满意度。

本研究也存在一定局限性：①本研究是单中心回顾性研究，其结果易选择偏倚的影响；②样本量较少，未来需通过多中心、大样本研究进一步验证其外推性和普适性；③仅基于术前因素的预测模型无法涵盖术中及术后动态变化，可能限制预测效果的全面性和准确性。

综上，术前MRI影像组学联合临床指标及LI-RADS特征能有效预测中晚期HCC患者TACE术后的肿瘤反应。

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] Rumgay H, Arnold M, Ferlay J, et al. Global burden of primary liver cancer in 2020 and predictions to 2040[J]. J Hepatol, 2022, 77(6): 1598-1606.

[3] Benson AB, D'Angelica MI, Abbott DE, et al. Hepatobiliary cancers, version 2.2021, NCCN clinical practice guidelines in oncology[J]. J Natl Compr Canc Netw, 2021, 19(5): 541-565.

[4] Abdelrahim M, Esmail A, Hibi T, et al. Focal update on immunotherapy and liver transplantation in the era of transplant oncology[J]. Curr Oncol, 2024, 31(9): 5021-5026.

[5] Reig M, Forner A, Rimola J, et al. BCLC strategy for prognosis prediction and treatment recommendation: The 2022 update[J]. J Hepatol, 2022, 76(3): 681-693.

[6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会医政司. 原发性肝癌诊疗指南（2024年版）[J]. 协和医学杂志, 2024, 15(3): 532-559.
Ministry of Health of the People's Republic of China, Department of Medical Administration. Primary Liver Cancer Diagnosis and Treatment Guidelines (2024 Edition) [J]. Peking Union Medical College Journal, 2024, 15(03): 532-559.

[7] Piscaglia F, Ogasawara S. Patient selection for transarterial chemoembolization in hepatocellular carcinoma: importance of benefit/risk assessment[J]. Liver Cancer, 2018, 7(1): 104-119.

[8] Kotsifa E, Vergadis C, Vailas M, et al. Transarterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma: why, when, how?[J]. J Pers Med, 2022, 12(3): 436.

[9] Jung Y, Choi MJ, Kim BM, et al. Transarterial embolization for sporadic renal angiomyolipoma: patient selection and technical considerations for optimal therapeutic outcomes[J]. Taehan Yongsang Uihakhoe Chi, 2022, 83(3): 559-581.

[10] Rhee H, Park YN, Choi JY. Advances in understanding hepatocellular carcinoma vasculature: implications for diagnosis, prognostication, and treatment[J]. Korean J Radiol, 2024, 25(10): 887-901.

[11] Kudo M, Han KH, Ye SL, et al. A changing paradigm for the treatment of intermediate-stage hepatocellular carcinoma: Asia-Pacific primary liver cancer expert consensus statements[J]. Liver Cancer, 2020, 9(3): 245-260.

[12] Feng Z, Zhao H, Guan S, et al. Diagnostic performance of MRI using extracellular contrast agents versus gadoxetic acid for hepatocellular carcinoma: a systematic review and meta-analysis[J]. Liver Int, 2021, 41(5): 1117-1128.

[13] Lambin P, Leijenaar RTH, Deist TM, et al. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine[J]. Nat Rev Clin Oncol, 2017, 14(12): 749-762.

[14] Gao WY, Wang WT, Song DJ, et al. A predictive model integrating deep and radiomics features based on gadobenate dimeglumine-enhanced MRI for postoperative early recurrence of hepatocellular carcinoma[J]. La Radiol Med, 2022, 127(3): 259-271.

[15] Gerena M, Molvar C, Masciocchi M, et al. LI-RADS treatment response assessment of combination locoregional therapy for HCC[J]. Abdom Radiol, 2021, 46(8): 3634-3647.

[16] Saito N, Nishiofuku H, Sato T, et al. Predictive factors of complete response to transarterial chemoembolization in intermediate stage hepatocellular carcinoma beyond up-to-7 criteria[J]. Cancers (Basel), 2023, 15(9): 2609.

[17] Ogasawara S, Chiba T, Ooka Y, et al. A prognostic score for patients with intermediate-stage hepatocellular carcinoma treated with transarterial chemoembolization[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0125244.

[18] Sheng Y, Wang Q, Liu HF, et al. Preoperative nomogram incorporating clinical factors, serological markers and LI-RADS MRI features to predict early recurrence of hepatocellular carcinoma treated with transarterial chemoembolization[J]. Acad Radiol, 2023, 30(7): 1288-1297.

[19] Zhang K, Zhang L, Li WC, et al. Radiomics nomogram for the prediction of microvascular invasion of HCC and patients' benefit from postoperative adjuvant TACE: a multi-center study[J]. Eur Radiol, 2023, 33(12): 8936-8947.

[20] Li J, Zhou M, Tong Y, et al. Tumor growth pattern and intra- and peritumoral radiomics combined for prediction of initial TACE outcome in patients with primary hepatocellular carcinoma[J]. J Hepatocell Carcinoma, 2024, 11: 1927-1944.

[21] Lencioni R, Llovet JM. Modified RECIST (mRECIST) assessment for hepatocellular carcinoma[J]. Semin Liver Dis, 2010, 30(1): 52-60.

[22] Riley RD, Snell KI, Ensor J, et al. Minimum sample size for developing a multivariable prediction model: PART II - binary and time-to-event outcomes[J]. Stat Med, 2019, 38(7): 1276-1296.

[23] Davnall F, Yip CSP, Ljungqvist G, et al. Assessment of tumor heterogeneity: an emerging imaging tool for clinical practice?[J]. Insights Imag, 2012, 3(6): 573-589.

[24] Zhou M, Zhang P, Mao Q, et al. Multisequence MRI-based radiomic features combined with inflammatory indices for predicting the overall survival of HCC patients after TACE[J]. J Hepatocell Carcinoma, 2024, 11: 2049-2061.

[25] Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H. Radiomics: images are more than pictures, they are data[J]. Radiology, 2016, 278(2): 563-577.

[26] Bonin S, Stanta G. Pre-analytics and tumor heterogeneity[J]. New Biotechnol, 2020, 55: 30-35.

[27] Vitale I, Shema E, Loi S, et al. Intratumoral heterogeneity in cancer progression and response to immunotherapy[J]. Nat Med, 2021, 27(2): 212-224.

[28] Bharath K, Kurtek S, Rao A, et al. Radiologic image-based statistical shape analysis of brain TumoursFree[J]. J. R. Stat. Soc. Ser. C. Appl. Stat., 2018, 67(5): 1357-1378.

[29] Cannella R, Cammà C, Matteini F, et al. Radiomics analysis on gadoxetate disodium-enhanced MRI predicts response to transarterial embolization in patients with HCC[J]. Diagnostics (Basel), 2022, 12(6): 1308.

[30] Liu A, Liu B, Duan X, et al. Development of a novel combined nomogram model integrating Rad-score, age and ECOG to predict the survival of patients with hepatocellular carcinoma treated by transcatheter arterial chemoembolization[J]. J Gastrointest Oncol, 2022, 13(4): 1889-1897.

[31] Templeton AJ, Ace O, McNamara MG, et al. Prognostic role of platelet to lymphocyte ratio in solid tumors: a systematic review and meta-analysis[J]. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev, 2014, 23(7): 1204-1212.

[32] Schobert IT, Savic LJ, Chapiro J, et al. Neutrophil-to-lymphocyte and platelet-to-lymphocyte ratios as predictors of tumor response in hepatocellular carcinoma after DEB-TACE[J]. Eur Radiol, 2020, 30(10): 5663-5673.

[33] Truffi M, Sottotetti F, Gafni N, et al. Prognostic potential of immune inflammatory biomarkers in breast cancer patients treated with neoadjuvant chemotherapy[J]. Cancers (Basel), 2022, 14(21): 5287.

[34] Guo Y, Wu W, Sun B, et al. Prognostic value of platelet-to-lymphocyte ratio in patients with unresectable hepatocellular carcinoma undergoing transarterial chemoembolization and tyrosine kinase inhibitors plus immune checkpoints inhibitors[J]. Front Oncol, 2024, 14: 1293680.

[35] Goubran HA, Burnouf T, Radosevic M, et al. The platelet-cancer loop[J]. Eur J Intern Med, 2013, 24(5): 393-400.

[36] Guo PT, Li YM, Zhu Z, et al. Prognostic value of tumor size in gastric cancer: an analysis of 2, 379 patients[J]. Tumor Biol, 2013, 34(2): 1027-1035.

[37] Xiao J, Shen K, Fan H, et al. Prognostic value of tumor size in gastric cancer: a retrospective cohort study based on SEER database[J]. Int J Surg Pathol, 2023, 31(7): 1273-1282.

[38] Prateepchaiboon T, Chang A, Pungpipattrakul N, et al. Factors affecting prognosis in hepatocellular carcinoma patients post-transarterial chemoembolization[J]. Indian J Gastroenterol, 2022, 41(4): 352-361.

[39] Chernyak V, Fowler KJ, Kamaya A, et al. Liver imaging reporting and data system (LI-RADS) version 2018: imaging of hepatocellular carcinoma in at-risk patients[J]. Radiology, 2018, 289(3): 816-830.

[40] Wang L, Ma X, Feng B, et al. Multi-sequence MR-based radiomics signature for predicting early recurrence in solitary hepatocellular carcinoma ≤5 cm[J]. Front Oncol, 2022, 12: 899404.

[41] Kuang YN, Li RZ, Jia P, et al. MRI-Based Radiomics: Nomograms predicting the short-term response after transcatheter arterial chemoembolization (TACE) in hepatocellular carcinoma patients with diameter less than 5cm[J]. Abdom Radiol, 2021, 46(8): 3772-3789.

[42] Liu Y, Liu Z, Li X, et al. Non-invasive assessment of response to transcatheter arterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma with the deep neural networks-based radiomics nomogram[J]. Acta Radiol, 2024, 65(6): 535-545.

[43] Kong C, Zhao Z, Chen W, et al. Prediction of tumor response *via* a pretreatment MRI radiomics-based nomogram in HCC treated with TACE[J]. Eur Radiol, 2021, 31(10): 7500-7511.

(责任编辑：周一青)