

# MRI 多模态影像组学鉴别肝细胞肝癌与肝富血供良性病变的应用价值

杨晨, 朱帆东, 夏阳, 楼天奇, 张敏鸣, 赵振华

**【摘要】 目的:**探讨基于  $T_2$ WI、DWI 的影像组学鉴别肝细胞肝癌(HCC)与肝富血供良性病变(BLLs)的价值。**方法:**回顾性收集 114 例经病理证实为 HCC( $n=77$ )、血管瘤( $n=23$ )、肝局灶性结节样增生( $n=8$ )、肝血管平滑肌脂肪瘤( $n=4$ )、肝脓肿( $n=2$ )患者的临床与影像资料,所有患者均在术前行 3.0T MRI 增强检查。利用 ITK-SNAP 软件勾画病灶,通过最小绝对收缩和选择算子回归以及最小冗余最大相关筛选影像组学特征,计算影像组学分数(Rad-score),使用多元 logistic 回归算法构建预测模型。绘制受试者工作特性(ROC)曲线评估预测模型的效能,并与两位不同年资影像医生的诊断结果进行比较。**结果:**筛选得到 5 个  $T_2$ WI 特征、6 个 DWI 特征,计算 Rad-score,结合 3 个临床独立预测因子(年龄、性别、病灶位置)用于建立诺模图。与临床预测模型、影像组学模型相比,诺模图模型在训练集、测试集中显示出较高的诊断效能,AUC 分别为 0.988、0.955,敏感度分别为 0.981、0.958,特异度分别为 0.923、0.727,准确度分别为 0.962、0.886,其诊断效能显著优于医生 1(AUC=0.808, $P<0.001$ )及医生 2(AUC=0.780, $P<0.001$ )。**结论:**基于 MRI 多模态影像组学的诺模图模型在鉴别 HCC 与 BLLs 方面明显优于单一预测模型和传统影像诊断,可作为临床诊断的辅助工具。

**【关键词】** 肝细胞肝癌;影像组学;富血供病变;磁共振成像;扩散加权成像

**【中图分类号】** R735.7; R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)05-0581-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.05.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**The radiomics-based classification of hepatocellular carcinoma and blood-rich benign liver lesions on multiparametric MRI** YANG Chen, ZHU Fan-dong, XIA Yang, et al. Department of Radiology, Shaoxing Hospital, Zhejiang University, Zhejiang 312000, China

**【Abstract】 Objective:** To explore the value of radiomics based on  $T_2$ WI, DWI in differentiating hepatocellular carcinoma (HCC) from blood-rich benign liver lesions (BLLs). **Methods:** The clinical and imaging data of 114 patients with HCC ( $n=77$ ), hemangioma ( $n=23$ ), hepatic focal nodular hyperplasia ( $n=8$ ), hepatic angiomyolipoma ( $n=4$ ) and hepatic abscess ( $n=2$ ) confirmed by pathology were retrospectively collected. All patients underwent 3.0T MRI enhanced examination before surgery. The lesions were delineated by ITK-SNAP software, and the radiomics features were screened by minimum absolute contraction and selection operator regression and minimum redundant maximum correlation and the radiomics score was calculated. Multivariate Logistic regression algorithm was used to construct prediction models. The efficacy of prediction models was evaluated by receiver operating characteristic (ROC) curves and compared with the results of two radiologists with different seniority. **Results:** Five  $T_2$ WI features and six DWI features were screened, and rad-score was calculated, which was combined with three independent clinical predictors (age, sex and location of lesions) to construct a nomogram model. Compared with clinical prediction model and radiomics model, the nomogram model showed higher diagnostic efficiency in training set and test set, with AUC of 0.988 and 0.955, sensitivity of 0.981 and 0.958, specificity of 0.923 and 0.727, accuracy of 0.962 and 0.886, respectively. The efficacy was significantly better than that of doctor 1 (AUC=0.808,  $P<0.001$ ) and

作者单位:312000 浙江,浙江大学绍兴医院(绍兴市人民医院)放射科(杨晨、朱帆东、赵振华);312000 浙江,绍兴市妇幼保健院放射科(夏阳);311811 浙江,诸暨市第二人民医院放射科(楼天奇);310009 浙江,浙江大学附属第二医院放射科(张敏鸣)

作者简介:杨晨(1997-),女,浙江金华人,硕士研究生,主要从事肝、肺影像相关研究工作。

通讯作者:赵振华, E-mail:zhao2075@163.com

基金项目:浙江省卫生健康科技计划(2022KY1321);浙江省医药卫生厅面上项目(2020KY323);绍兴市人民医院青年科研基金项目(2021YB05、2021YB06),绍兴市肿瘤功能分子成像与介入诊疗重点实验室资助

doctor 2 (AUC=0.780,  $P<0.001$ ). **Conclusions:** The nomogram model based on multimodal MRI radiomics is superior to the single prediction model and traditional imaging diagnosis in distinguishing HCC from blood-rich benign liver lesions, and can be used as an auxiliary tool for clinical diagnosis.

**【Key words】** Hepatocellular carcinoma; Radiomics; Blood-rich lesions; Magnetic resonance imaging; Diffusion weighted imaging

肝细胞肝癌 (hepatocellular carcinoma, HCC) 约占原发性肝癌的 85%~90%，是一种高发病率、高致死率的恶性肿瘤<sup>[1]</sup>。作为少数可被影像检查定性的疾病之一，HCC 典型的影像表现为“快进快出”的强化模式<sup>[2]</sup>。然而不同的病因、分化程度和病理改变等可使 HCC 表现出不同的强化模式，与某些良性病变的影像表现重叠，如高分化的 AFP 阴性 HCC 与中央瘢痕不明显的肝局灶性结节样增生 (focal nodular hyperplasia, FNH)、中心伴有坏死的 AFP 阴性 HCC 与中央低信号区未延迟强化的 FNH<sup>[3]</sup>、非肝硬化背景下的 HCC 与脂肪含量稍低的肝脏血管平滑肌脂肪瘤 (hepatic angiomyolipoma, HAML) 等<sup>[4]</sup>。某些良性病变也可与 HCC 的影像表现相似，如 T<sub>2</sub>WI 无“灯泡征”的纤维变性血管瘤、快速填充型血管瘤<sup>[5,6]</sup>等。此外，传统影像诊断方式具有主观局限性，增加了误诊的风险。影像组学通过计算机可提取大量影像深层定量信息，在肿瘤诊断与鉴别诊断、病理亚型分型及治疗效果评价中得到应用<sup>[7,8]</sup>。本研究旨在构建和验证基于 MRI 的多模态影像组学预测模型，探讨其在鉴别 HCC 与肝内富血供良性病变方面的价值。

## 材料与方法

### 1. 病例资料

本研究为回顾性研究方法，经医院伦理委员会批准，免除患者知情同意。病例纳入标准：①病灶影像表现为富血供，定义为动脉期或门脉期病灶主体均匀或部分 (大于 50%) 强化程度高于周围肝实质；②病灶最短径  $\geq 1$  cm<sup>[9]</sup>。病例排除标准：①患者在进行 MRI 检查之前接受过对该病灶的任何治疗；②影像质量不佳影响病灶观察者；③临床资料缺失者。

本研究最终纳入 114 例患者，其中 HCC 77 例，由手术或穿刺病理确诊；富血供良性病变 37 例，包括肝血管瘤 (hepatic hemangioma, HH) 23 例，FNH 8 例，HAML 4 例，肝脓肿 2 例，由病理确诊或影像检查随访确诊。3 例肝血管瘤由影像随访确诊，其余良性病变由手术或穿刺病理确诊。本研究纳入的肝血管瘤患者接受手术较多，可能由于病灶体积较大有出血风险、随访过程增大趋势。

### 2. MRI 检查方法

所有患者均在术前接受腹部 MRI 平扫及增强检查，MRI 检查采用德国 Siemens Verio 3.0T 超导型 MR 扫描仪和 8 通道相控阵表面线圈。平扫轴面主要序列及扫描参数：视野 380 mm×380 mm，层厚 6 mm，间隔 1.2 mm；主要扫描序列包括 T<sub>2</sub>WI 抑脂序列 (TR 1200 ms, TE 81 ms)、T<sub>1</sub>WI 抑脂序列 (TR 3.25 ms, TE 1.13 ms)、DWI 序列 (b 值取 0 及 800 s/mm<sup>2</sup>, TR 7400 ms, TE 73 ms) 以及同反相位序列 (TR 254 ms, 同相位 TE 2.46 ms、反相位 TE 6.15 ms)。增强扫描对比剂使用钆双胺 (欧乃影)，剂量 0.1 mmol/kg，注射流率为 3 mL/s；层厚 5 mm，层间距 1 mm，矩阵 162×288，视野 350 mm×282 mm，翻转角 10°。

### 3. VOI 分割和组学特征提取

T<sub>2</sub>WI、DWI 图像分别以 DICOM 格式导入 ITK-SNAP (www.itksnap.org) 软件 (图 1)，由两位对术后病理不知情的影像医生 (医生 1 和医师 2 分别有 10 年和 3 年诊断经验) 分别手动勾画随机挑选的 30 个病灶，评估组间差异；1~2 周后，由医生 2 再次勾画这些病灶，评估组内差异，并由其完成剩余病例的 ROI 勾画。

使用 A. K 影像组学分析软件 (Version: 3.2.0. R, GEhealthcare) 获得 396×2 个影像组学特征。影

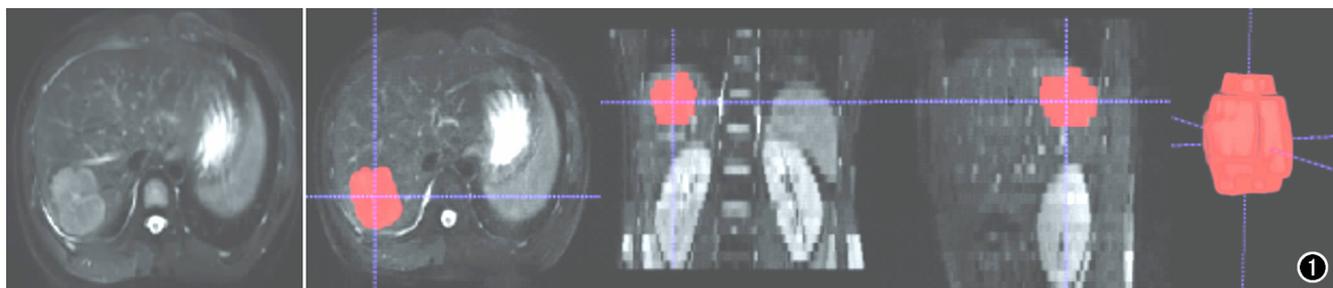


图 1 患者，男，59 岁，肝右叶占位，病理结果提示 HCC。在 T<sub>2</sub>WI 横轴面图像勾画病灶，并在冠状面和矢状面调整病变边缘，最终形成一个三维立体结构，即兴趣区容积 (VOI)。

像特征中的缺失值及异常值用中位数填充后进行 Z-score 标准化处理,使之集中在 -1 和 +1 之间,使用最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)回归以及最小冗余最大相关筛选出系数不为 0 的影像组学特征。

#### 4. 影像组学模型的建立

将提取的影像组学特征按系数加权线性组合,计算出每例患者的影像组学分数(radiomics score, Rad-score),构建影像组学模型。通过单因素方法和多因素逻辑回归分析临床风险因素,得到临床独立预测因子,构建临床预测模型。通过多元逻辑回归算法和 5 倍交叉验证(5 fold cross verification, 5-FCV)建立并验证诺模图模型。

#### 5. 传统 MRI 诊断

比较在同等条件下传统影像与影像组学的效能,医生 1 和医生 2 在只能看到每例患者的 T<sub>2</sub>WI、DWI 图像以及相关临床资料的情况下,分别对病灶进行良、恶性分类。4 周后,得到所有影像图像(T<sub>2</sub>WI、DWI、ADC、T<sub>1</sub>WI 及其增强序列)以及相关临床资料后,两位医师再次进行良恶性分类,将两次结果分别与影像组学最佳预测模型进行比较。

#### 6. 统计学分析

采用 SPSS 23.0 软件进行统计学分析。符合正态分布的定量资料以均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,组间比较采用独立样本 *t* 检验;不符合正态分布的定量资料以中位数(上、下四分位)表示,组间比较采用 Wilcoxon 秩和检验。分类变量的组间比较采用  $\chi^2$  检验或 *F* 检验。采用 R 语言(version 4.0.3)软件进行影像组学特征的分析、模型的构建及评价等。绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线、校准曲线、决策曲线分析(decision curve analysis, DCA),计算 ROC 曲线下面积(area under curve, AUC),用于评估模型效能,并用 Delong 检验比较两

两模型之间的 AUC。以  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 结果

### 1. 一般资料

77 例 HCC 患者的平均年龄为 64.0(58.5, 69.5) 岁,37 例 BLLs 患者的平均年龄(49.1±13.3) 岁。

对患者以 7:3 的比例分层随机抽样,分为训练组( $n=79$ )与测试组( $n=35$ )。临床风险因素经单因素方法及多因素逻辑回归分析,结果显示年龄、性别、病灶位置作为临床独立预测因子(表 1、2)。

HCC 患者中有 70 例表现为“快进快出”,5 例表现为“渐进性强化”,2 例表现为“持续强化”;27 例影像提示肝硬化。7 例不典型强化病例中,AFP 水平均 < 400 ng/mL,仅有 1 例发现肝硬化。

表 2 多因素逻辑回归分析 HCC 和良性富血供病变的相关临床风险因素

临床风险因素	B	P 值	OR (95%CI)
年龄	0.135	0.001	1.145(1.060,1.237)
性别	-2.565	0.002	0.077(0.015,0.390)
AFP 水平	-20.571	0.999	0
病变位置	-2.603	0.003	0.074(0.013,0.418)

### 2. 影像组学特征

T<sub>2</sub>WI 和 DWI 分别得到 5、6 个影像组学特征,根据各自的系数加权进行线性组合,计算 Rad-score,公式如下:

$$\text{Rad-score} = -0.812 \times \text{T2\_HighIntensitySmallAreaEmphasis} + -1.194 \times \text{T2\_Sphericity} + -1.722 \times \text{T2\_ShortRunHighGreyLevelEmphasis\_AllDirection\_offset4\_SD} + -0.734 \times \text{T2\_ShortRunHighGreyLevelEmphasis\_AllDirection\_offset1\_SD} + 0.219 \times \text{T2\_Correlation\_angle0\_offset7} + 0.637 \times \text{DWI\_InverseDifferenceMoment\_angle0\_offset7} + -0.343 \times \text{DWI\_Inertia\_angle45\_offset7} + -0.345 \times \text{DWI\_HaralickCorrelation\_AllDirection\_offset4\_SD} + -1.617 \times \text{DWI\_ClusterShade\_angle90\_offset4} + 0.088 \times \text{DWI\_uniformity} + -0.758 \times \text{DWI\_stdDeviation} + 1.778$$

表 1 单因素方法分析 HCC 和 BLLs 的相关临床风险因素 (例)

临床风险因素	训练组( $n=79$ )				测试组( $n=35$ )			
	BLLs ( $n=26$ )	HCC ( $n=53$ )	$t/Z/\chi^2$ 值	P 值	BLLs ( $n=11$ )	HCC ( $n=24$ )	Z 值	P 值
年龄(岁)	50.2±12.2	61.9±9.4	-4.695	<0.001	46.6±16.0	63.5(62.0,70.0)	-3.066	0.002
性别			17.179	<0.001			/	0.041
男	11	46			5	20		
女	15	7			6	4		
AFP 水平			/	0.026			/	0.146
≥400ng/mL	0	10			0	6		
<400ng/mL	26	43			11	18		
病灶最大径(mm)	56.5±29.0	47.0(34.0,67.0)	-0.49	0.654	55.3±20.9	38.5(33.0,53.8)	-1.404	0.160
病变位置			7.345	0.007			/	0.258
左	15	14			6	7		
右	11	39			5	17		

### 3. 预测模型的验证与比较

临床预测模型、影像组学模型以及诺模图模型的 ROC 曲线分析结果显示,训练组中三种预测模型的最佳阈值(即 best cut-off 值)分别为 0.69、0.57、0.34,约登指数分别为 0.60、0.71、0.92;验证组中,三种预测模型的最佳阈值分别为 0.46、0.78、0.56,约登指数分别为 0.59、0.66、0.78(图 2a、b)。诺模图展示了 4 个独立预测因子(图 2c)。图 3 展现了诺模图模型较好的鉴别能力,其在训练集与测试集的校准曲线见图 4a、b,两线基本重合。DCA 结果显示,三个预测模型均具有临床实用性,其中诺模图模型在鉴别 HCC 与 BLLs 方面具有较高的总体净效益(图 4c、d)。Delong 检验结果显示,临床预测模型、影像组学模型与诺模图模型在训练组中差异均有统计学意义(表 3)。因此,将诺模图模型与两位医生的诊断效能进行比较,不论在 T<sub>2</sub>WI+DWI 还是在加入增强序列的情况下,诺模

图模型的诊断效能均显著优于传统影像诊断( $P < 0.05$ )。

### 讨论

既往研究认为多序列影像组学模型的诊断效能优于单序列模型<sup>[10,11]</sup>,本研究联合 T<sub>2</sub>WI、DWI 建立临床预测模型、影像组学模型、诺模图模型<sup>[12,13]</sup>,用于鉴别 HCC 与多类型的 BLLs,且避免了对比剂的危害,扩大受益患者群体。本研究结果显示 T<sub>2</sub>WI 联合 DWI 的影像组学模型具有一定的诊断参考价值,联合临床风险因素可以显著提升 HCC 与肝良性富血供病变的鉴别诊断效能。诺模图模型的 AUC 显著高于影像组学模型及临床预测模型( $P$  值分别为 0.012、0.014),可作为最优模型,其训练组和测试组中 AUC 分别为 0.988、0.955,说明该模型具有较高的准确性与可重复性。

表 3 三种预测模型及两位影像医生在训练集和验证集中的 AUC、敏感度、特异度、准确度

模型	AUC (95%CI)	特异度	敏感度	准确度	P 值
训练组					
临床预测模型	0.902(95%CI 0.815, 0.958)	0.808	0.887	0.861	0.014*
影像组学模型	0.873(95%CI 0.779, 0.937)	0.769	0.811	0.797	0.012*
诺模图模型	0.988(95%CI 0.932, 1.000)	0.923	0.981	0.962	Ref
T <sub>2</sub> WI+DWI 序列					
医生 1	0.885(95%CI 0.793, 0.946)	0.808	0.962	0.911	0.007*
医生 2	0.856(95%CI 0.759, 0.925)	0.769	0.943	0.886	0.004*
加入增强序列					
医生 1	0.923(95%CI 0.841, 0.971)	0.885	0.962	0.937	0.029*
医生 2	0.885(95%CI 0.793, 0.946)	0.808	0.962	0.911	0.007*
验证组					
临床预测模型	0.879(95%CI 0.724, 0.964)	0.727	0.875	0.829	0.096
影像组学模型	0.830(95%CI 0.665, 0.935)	0.727	0.792	0.771	0.174
诺模图模型	0.955(95%CI 0.825, 0.996)	0.727	0.959	0.886	Ref
T <sub>2</sub> WI+DWI 序列					
医生 1	0.909(95%CI 0.763, 0.980)	0.818	1.000	0.943	0.544
医生 2	0.714(95%CI 0.537, 0.853)	0.636	0.792	0.743	0.014*
加入增强序列					
医生 1	0.934(95%CI 0.796, 0.990)	0.909	0.958	0.943	0.157
医生 2	0.850(95%CI 0.689, 0.948)	0.909	0.792	0.829	0.733

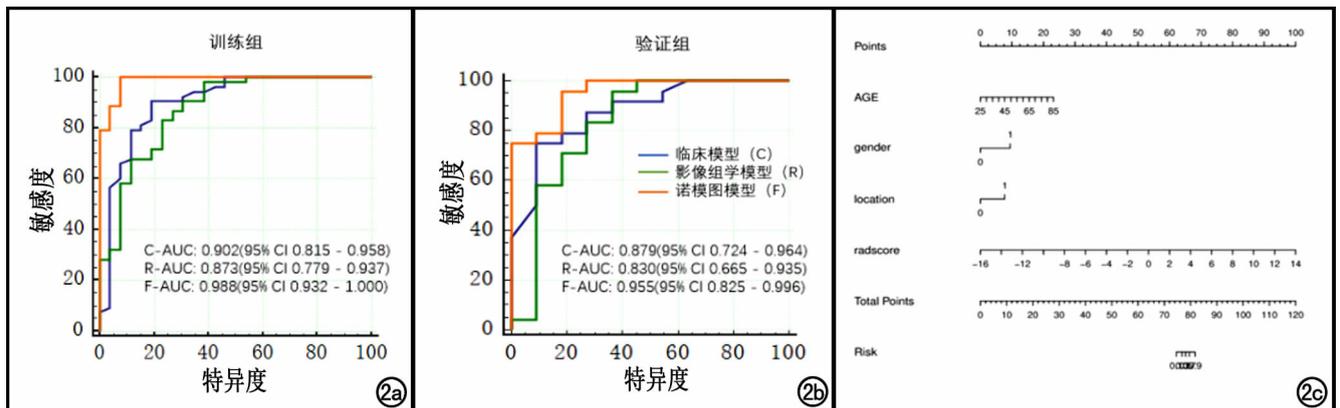


图 2 a) 训练组临床预测模型、影像组学模型及诺模图模型的 ROC 曲线; b) 验证组三种模型的 ROC 曲线; c) 诺模图。

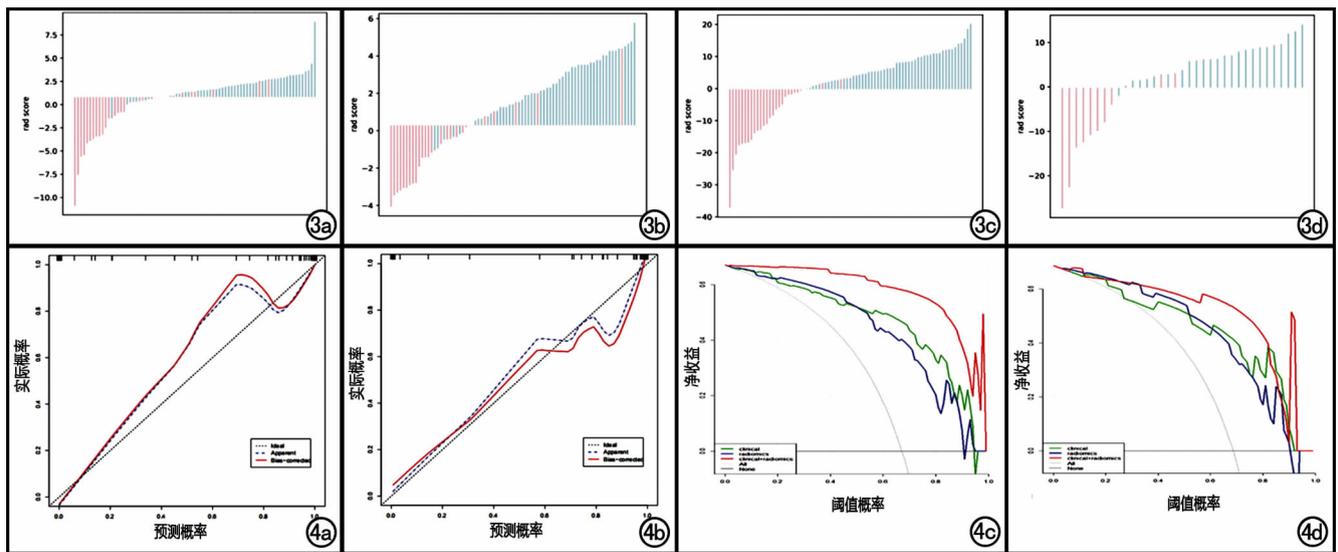


图3 Rad-score分布图。a~c为训练组数据,d为验证组数据。分值 $>0$ 预测为HCC,分值 $<0$ 预测为肝脏富血供良性病变。a)影像组学模型;b)临床预测模型;c)诺模图模型训练组数据;d)诺模图模型验证组数据。

图4 a)诺模图模型训练组的校准曲线;b)诺模图模型测试组的校准曲线;c)三种预测模型训练组的DCA;d)三种预测模型测试组的DCA。

临床因素对于疾病的诊断与鉴别诊断具有重要意义。年龄、性别、病灶位置作为本研究中的临床独立预测因子,与流行病学研究结果一致<sup>[14]</sup>。作为常用的肿瘤标志物,AFP单独使用时的敏感度和特异度一直存在争议,有研究认为阈值为20 ng/mL时敏感度较高、特异度较低,阈值为200 ng/mL时敏感度和特异度之和最高,阈值为400 ng/mL时,特异度较高,敏感度较低<sup>[15,16]</sup>。本研究AFP阈值为400 ng/mL,其水平在良恶性组间差异无统计学意义,通过查阅文献,笔者认为可能的原因如下:①15%~30%高分化HCC的血清AFP值可保持在正常水平<sup>[17]</sup>;②本研究纳入了体积较小的HCC<sup>[18]</sup>,其分泌的AFP处于低水平;③抗病毒治疗影响AFP阳性率<sup>[19]</sup>。

影像组学纹理特征已成功应用于肝恶性肿瘤的鉴别、各类肝良性肿瘤的鉴别以及恶性肿瘤之间的鉴别<sup>[20,21]</sup>。本研究通过LASSO回归筛选出11个影像组学特征,标准差(stdDeviation)、均匀性(uniformity)量化ROI内强度分布变化,球形度(Sphericity)提示病灶的形状,在良性组与HCC之间的差异具有统计学意义,表明良恶性病变的形状特征和信号差异具有诊断价值。Haralick Correlation、自相关(Correlation)、逆差距(Inverse Difference Moment)、集群阴影(Cluster Shade)、惯量(Inertia)等多个灰度共生矩阵特征,通过相邻像素间的关系反映ROI内灰度均匀程度,可以挖掘出肉眼所不能识别的纹理结构的微小差异,有研究认为灰度共生矩阵可以反映细胞水肿、坏死等<sup>[22]</sup>。高灰度短游程因子(Short Run High Grey

Level Emphasis)反映ROI纹理的粗糙程度,其值越大说明纹理越细;高密度小区域因子(High Intensity Small Area Emphasis)描述了同质性区域的特征<sup>[23]</sup>。与良性病灶相比,HCC细胞分化异质性强,图像纹理粗糙,以上参数有助于HCC与BLLs的鉴别。

诺模图模型联合临床因素和影像组学特征,显示出更高的诊断价值。张源等<sup>[24]</sup>认为基于DCE-MRI的影像组学模型在鉴别fp-AML与n-HCC方面优于传统影像诊断,与本研究结果一致。在同等条件下,两位不同年资医生与诺模图模型间的AUC差异均有统计学意义。加入增强序列后,医生2的AUC值、敏感度、特异度、准确度与未加增强序列的医生1一致,而医生1的诊断效能提高,但与诺模图模型差异仍有统计学意义。此结果表明诺模图模型在鉴别HCC与BLLs方面明显优于传统影像诊断,有望成为传统影像诊断的辅助工具。

本研究存在以下局限性:①总体样本量较小,且不同病理性质的良性富血供病变数量分布不均匀。②模型的准确性和临床实用性有待外部验证。③本研究为回顾性研究,样本选择偏倚是不可避免的,这将在未来的前瞻性研究中得到证实。

综上所述,基于MRI多模态影像组学模型在鉴别HCC与BLLs方面具有较高的诊断效能及良好的临床应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for

- 36 Cancers in 185 Countries[J]. CA Cancer J Clin, 2021, 71(3): 209-249.
- [2] 任阿红, 杨大为, 徐辉, 等. LI-RADS v2018 MR 辅助征象对肝细胞癌的诊断价值研究[J]. 放射学实践, 2021, 36(4): 425-430.
- [3] Nie P, Yang G, Guo J, et al. A CT-based radiomics nomogram for differentiation of focal nodular hyperplasia from hepatocellular carcinoma in the non-cirrhotic liver[J]. Cancer Imaging, 2020, 20(1): 20.
- [4] 刘文浩, 夏军. 肝血管平滑肌脂肪瘤与非肝硬化肝细胞癌: CT/MR 鉴别诊断与病理对照研究[J]. 罕少疾病杂志, 2021, 28(5): 59-62.
- [5] Zarghampour M, Fouladi DF, Pandey A, et al. Utility of volumetric contrast-enhanced and diffusion-weighted MRI in differentiating between common primary hypervascular liver tumors[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 48(4): 1080-1090.
- [6] Vernuccio F, Cannella R, Porrello G, et al. Uncommon imaging evolutions of focal liver lesions in cirrhosis[J]. Abdom Radiol (NY), 2019, 44(9): 3069-3077.
- [7] Laghi A, Voena C. CT-based radiomics for biliary tract cancer: a possible solution for predicting lymph node metastases[J]. Radiology, 2019, 290(1): 99-100.
- [8] Santos JMM, Oliveira BC, Araujo-Filho JAB, et al. State-of-the-art in radiomics of hepatocellular carcinoma: a review of basic principles, applications, and limitations[J]. Abdom Radiol (NY), 2020, 45(2): 342-353.
- [9] Li J, Wang J, Lei L, et al. The diagnostic performance of gadoteric acid disodium-enhanced magnetic resonance imaging and contrast-enhanced multi-detector computed tomography in detecting hepatocellular carcinoma: a meta-analysis of eight prospective studies[J]. Eur Radiol, 2019, 29(12): 6519-6528.
- [10] Wu JJ, Liu A, Cui JJ, et al. Radiomics-based classification of hepatocellular carcinoma and hepatic haemangioma on precontrast magnetic resonance images[J]. BMC Med Imaging, 2019, 19(1): 23.
- [11] 卢俊, 李祥, 黎海亮. 基于 ADC 和增强 MRI 的影像组学模型预测低级别胶质瘤 TERT 启动子突变状态[J]. 放射学实践, 2022, 37(5): 538-542.
- [12] Li R, Wu GY, Wang R. Application values of 3.0T magnetic resonance diffusion weighted imaging for distinguishing liver malignant tumors and benign lesions[J]. Oncol Lett, 2018, 15(2): 2091-2096.
- [13] Li M, Chen T, Zhao WL, et al. Radiomics prediction model for the improved diagnosis of clinically significant prostate cancer on biparametric MRI[J]. Quant Imaging Med Surg, 2020, 10(2): 368-379.
- [14] 张景, 靳恒军, 张芳, 等. DWI 和 T<sub>2</sub>WI 直结肠癌体积测量与壁外血管侵犯、淋巴结转移的相关性[J]. 放射学实践, 2020, 35(9): 1151-1156.
- [15] 周宇辰, 袁国盛, 胡承光, 等. 降低 AFP 诊断阈值并联合检测 DCP 显著提高肝细胞癌的诊断率[J]. 肝脏, 2019, 24(5): 507-509, 518.
- [16] 田州, 张建淮. 甲胎蛋白诊断和筛查原发性肝癌的阈值分析[J]. 临床肝胆病杂志, 2018, 34(11): 2352-2355.
- [17] 阎春英, 付佐君, 刘贵生, 等. 热休克蛋白 90 联合甲胎蛋白在肝细胞癌早期诊断中的价值[J]. 世界华人消化杂志, 2021, 29(21): 1215-1221.
- [18] Luo P, Yin P, Hua R, et al. A Large-scale, multicenter serum metabolite biomarker identification study for the early detection of hepatocellular carcinoma[J]. Hepatology, 2018, 67(2): 662-675.
- [19] Qian X, Liu S, Long H, et al. Reappraisal of the diagnostic value of alpha-fetoprotein for surveillance of HBV-related hepatocellular carcinoma in the era of antiviral therapy[J]. J Viral Hepat, 2021, 28(1): 20-29.
- [20] Stocker D, Marquez HP, Wagner MW, et al. MRI texture analysis for differentiation of malignant and benign hepatocellular tumors in the non-cirrhotic liver[J]. Heliyon, 2018, 4(11): e00987.
- [21] Cannella R, Rangaswamy B, Minervini MI, et al. Value of texture analysis on gadoteric acid-enhanced MRI for differentiating hepatocellular adenoma from focal nodular hyperplasia[J]. AJR Am J Roentgenol, 2019, 212(3): 538-546.
- [22] Pan L, Chen J, Zha TT, et al. Evaluation of renal ischemia-reperfusion injury by magnetic resonance imaging texture analysis: an experimental study[J]. Magn Reson Med, 2021, 85(1): 346-356.
- [23] 徐圆, 尚松安, 曹正业, 等. 基于灰度共生矩阵鉴别小细胞肺癌和非小细胞肺癌[J]. 中国临床医学影像杂志, 2019, 30(9): 621-624.
- [24] 张源, 赵香田, 王明亮, 等. 基于动态增强 MRI 影像组学模型鉴别非肝硬化背景下乏脂肪型肝血管平滑肌脂肪瘤和甲胎蛋白阴性肝细胞癌的价值[J]. 中华医学杂志, 2022, 102(3): 196-200.

(收稿日期: 2022-07-26 修回日期: 2022-10-24)