

基于磁共振小肠造影影像组学预测小肠克罗恩病活动性炎症

吴红红, 崔颖, 江洋, 赵宇飞, 于谦, 彭新桂

【摘要】 目的:探讨基于磁共振小肠造影对比增强序列的影像组学分析对小肠克罗恩病活动性炎症的诊断效能。**方法:**回顾性分析了 82 例末端回肠受累克罗恩病患者的磁共振小肠造影及临床资料, 患者以磁共振活动指数(MaRIA)为参照标准分为无-轻度活动组和中-重度活动组, 使用 ITK-SNAP 对磁共振小肠造影延迟增强图像上的感兴趣区进行勾画, 运用 PyRadiomics 软件对感兴趣区进行特征提取, 之后使用 FeAture Explorer Pro 将提取的特征按 7:3 比例随机分为训练集和测试集(训练集 58 例, 31/27=阳性/阴性;测试集 24 例, 13/11=阳性/阴性), 并进行特征降维及建模。将建立的影像组学模型应用到测试集中进行验证。最后采用受试者操作特征曲线评估影像组学模型对克罗恩病活动性炎症的诊断效能。**结果:**从磁共振小肠造影延迟增强图像中共提取出 374 个特征, 经过特征降维、筛选后, 最终 3 个特征被纳入到影像组学模型中, 克罗恩病活动性炎症影像组学模型为: $1.248 \times \text{wavelet-HLL_firstorder_Kurtosis} + 0.717 \times \text{wavelet-LLL_first order_90Percentile} + 1.116 \times \text{wavelet-LLL_glcm_JointAverage}$ 。训练集结果显示影像组学模型区分无-轻度活动性及中-重度活动性的曲线下面积(AUC)为 0.953(95%CI:0.8949~0.9938), 敏感度 90.3%, 特异度 88.9%, 测试集的影像组学模型的 AUC 为 0.881(95%CI:0.7109~0.9926), 敏感度 84.6%, 特异度 81.2%。**结论:**基于磁共振小肠造影对比增强图像的影像组学模型对克罗恩病小肠活动性炎症具有较高的诊断效能。

【关键词】 克罗恩病; 磁共振小肠造影; 影像组学; 活动性炎症

【中图分类号】 R445.2; R574.622 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2022)07-0846-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.07.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Prediction of active inflammation of small intestinal in Crohn's disease based on MRE imaging WU

Hong-hong, CUI Ying, JIANG Yang, et al. Department of Radiology, Zhongda Hospital, Medical School, Southeast University, Nanjing 210009, China

【Abstract】 Objective: This study aimed to investigate the diagnostic efficacy of contrast enhanced magnetic resonance enterography in the diagnosis of active inflammation of the small intestine in Crohn's disease. **Methods:** A retrospective analysis was performed on 82 patients with terminal ileal involvement with CD. Patients were divided into the stable-mild activity and the moderate-severe activity group according to the magnetic resonance activity index (MaRIA) as the reference standard. ITK-SNAP was used to delineate the regions of interest on the delayed enhanced MR images, and PyRadiomics software was used to extract features of ROI. Then FeAture Explorer Pro was used to randomly divide extracted features into training set and test set in a ratio of 7:3 (training set: 58, 31/27=positive/negative; test set: 24, 13/11=positive/negative), select feature and develop model. The radiomics model was applied to the test set for validation. Finally, we used the receiver operating characteristic curve (ROC) to evaluate the diagnostic efficacy of the radiomics model for distinguishing stable-mild activities and moderate-severe activities in CD. **Results:** A total of 374 features were extracted from the delayed enhanced MRI enterography images. In FeAture Explorer Pro, after feature dimension reduction and selection, the final three features were incorporated into the radiomics model, as shown below: $\text{Radscore} = 1.248 \times \text{wavelet-HLL_firstorder_Kurtosis} + 0.717 \times \text{wavelet-LLL_first order_90Percentile} + 1.116 \times \text{wavelet-LLL_glcm_Joint Average}$. The area under curve, sensitivity and speci-

作者单位: 210009 南京, 东南大学附属中大医院放射科, 东南大学医学院

作者简介: 吴红红(1995-), 女, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 住院医师, 主要从事磁共振诊断研究。

通讯作者: 彭新桂, E-mail: xingui2005peng@126.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(81501523, 81871412)

ficity of the radiomics model for stable-mild activity and moderate-severe activity was 0.953 (95%CI: 0.8949~0.9938), 90.3%, 88.9% in the training set, and 0.881 (95%CI: 0.7109~0.9926), 84.6%, 81.2% in the test set.**Conclusion:** The radiomics model based on contrast-enhanced magnetic resonance enterography (MRE) is effective in the diagnosis of active inflammation of the small intestine in Crohn's disease.

【Key words】 Crohn's disease; Magnetic resonance enterography; Radiomics; Activity

克罗恩病(Crohn's disease, CD)是一种非特异性肠道炎症性疾病,以慢性和复发性为疾病特征。亚太地区人口发病率约为 1.37/10 万,并且近年来在我国呈逐渐上升趋势^[1]。其发病机制目前尚不清楚,目前多数研究认为其可能与自身免疫异常有关^[2]。目前药物治疗是 CD 最常用、最有效的治疗方法,但 CD 是否存在活动性炎症,其治疗方法却是不同的^[3],因此,准确诊断 CD 活动性炎症对患者病情的评估和临床治疗方法的选择具有重要意义。

CD 的常用检查方法包括内镜检查、小肠钡剂灌肠造影检查、小肠计算机断层成像(computed tomography enterography, CTE)和磁共振小肠造影(magnetic resonance enterography, MRE)^[4]。CTE 及 MRE 检查不仅可以观察肠壁情况,还可以观察肠腔内外的情况,比如肠痿、腹腔脓肿、淋巴结是否肿大等, MRE 检查较 CTE 具有更高的软组织分辨率以及无电离辐射等优点,更有利于 CD 患者的长期评估和随访^[5-6]。但是,CTE 及 MRE 诊断是否存在活动性炎症还受限于诊断经验及主观评价。近年来,影像组学作为人工智能的一个领域,是从医学图像中提取大量定量特征的绝佳工具,并以统计学和机器学习方法筛选最有价值的特征用以训练机器学习模型,旨在达到更为准确、客观的诊断^[7]。本研究旨在建立并验证基于磁共振小肠造影延迟增强图像的影像组学模型对 CD 活动性炎症的诊断效能,为 CD 患者个体化精准治疗提供影像学依据。

材料与方法

1.研究对象

本研究已获得东南大学附属中大医院医学伦理委员会批准(批准号:2021ZDSYLL163-P01)。回顾性分析 2017 年 1 月—2021 年 1 月行 MRE 的 194 例患者的病例资料。纳入标准:①本院诊断为 CD;②末端回肠有病灶;③MRE 检查与 C 反应蛋白(CRP)、红细胞沉降率(ESR)等实验室检查之间的时间间隔小于 2 周;④患者克罗恩病活动指数(Crohn's disease activity index, CDAD)等临床资料完整。排除标准:①肠道准备不充分或成像质量差影响病变肠段评估;②患有小肠肿瘤或其他盆腔疾病。最终纳入 82 例 CD 患者,包括中-重度活动期 44 例,无-轻度活动期 38 例。

2.磁共振小肠造影检查

在行 MRE 检查前患者禁食 6~8 h,前一天晚上需进行清肠:口服 3000~4000 mL 等渗聚乙二醇电解质溶液(和爽,深圳万和制药有限公司)。磁共振检查前 1 h 需均匀口服 2000 mL 2.5%等渗甘露醇溶液(仲宁,南京正大天晴制药有限公司)。并在检查前 10 min 肌肉注射盐酸消旋山莨菪碱注射液(6-542,杭州民生药业有限公司)10 mg 以减少胃肠道蠕动。所有患者均采用 3.0T MRI 仪(Philips Ingenia II, 荷兰)和 16 通道体部相控阵线圈,取仰卧、头先进位。MRE 扫描序列主要包括:T₂WI 快速自旋回波(TSE)序列; T₁WI Dixon 序列;扩散加权成像(diffusion weigh-

表 1 磁共振成像序列及参数

序列	T ₂ -TSE	T ₁ -Dixon	DWI	T ₁ 平扫期	T ₁ 延迟期
TR(ms)	1100	3.5	2510	3.9	3.1
TE(ms)	80	1.31/2.2	87	1.35/2.4	1.49
FOV(mm ²)	450×348	450×380	450×401	400×356	420×360
层数	40	70	42	85	105
层厚(mm)	3	4	5	4	3
层间距(mm)	0	-2	1	-2	-1.5
矩阵	376×249	252×217	152×133	308×272	280×240
体素(mm)	1.2×1.39	1.6×1.6	2.96×3.01	1.3×1.3	1.5×1.5
定位	冠状面	冠状面	冠状面	冠状面	冠状面
b 值(s/mm ²)	—	—	0,1000	—	—
扫描时间(s)	120	15	210	60	18
信号平均次数	1	1	3	1	1

注:TSE,快速自旋回波;Dixon,水脂分离成像;DWI,扩散加权成像;TR,重复时间;TE,回波时间;FOV,视野。

ted imaging, DWI), 采用 EPI 序列; 多期增强 T_1 WI, 采用 mDixon 序列, 屏扫期、动脉期(对比剂注射后 25~30 s)、静脉期(对比剂注射后 60~70 s)、延迟期(约对比剂注射后 4 min)扫描。各序列扫描参数见表 1。采用双通道高压注射器(MEORAO, 康高实业有限公司)注入对比剂钆喷酸葡胺(Gd-DTPA, 广东康臣药业有限公司), 剂量 0.2 mmol/kg, 注射速率 2 mL/s^[8]。

3. 磁共振图像分析及 MaRIA 指数

采用克罗恩病磁共振活动性指数(magnetic resonance index of activity, MaRIA)作为本研究的参照标准, 其计算公式为 $\text{MaRIA} = 1.5 \times \text{肠壁厚度} + 0.02 \times \text{RCE} + 5 \times \text{水肿} + 10 \times \text{溃疡}$ ^[9]。计算方法如下: ①肠壁厚度(mm); ②相对强化程度(relative contrast enhancement, RCE), 计算公式如下: $\text{RCE} = 100 \times [(\text{WSI}_{\text{增强后}} - \text{WSI}_{\text{增强前}}) / \text{WSI}_{\text{增强前}}] / (\text{噪声 SD}_{\text{增强后}} / \text{噪声 SD}_{\text{增强前}})$, $\text{WSI}_{\text{增强前}}$ 及 $\text{噪声 SD}_{\text{增强前}}$ 为屏扫期肠壁信号强度及背景噪声的标准差值, $\text{WSI}_{\text{增强后}}$ 及 $\text{噪声 SD}_{\text{增强后}}$ 为静脉期肠壁信号强度及背景噪声的标准差值, 二者均测量 3 次取其平均值。当肠壁表现为分层强化时, 将 ROI 放置在粘膜层, 因为此时粘膜层强化最明显^[10]; ③肠壁是否水肿(肠壁信号值是否高于同层腰大肌信号值, 是: 1 分, 否: 0 分); ④粘膜溃疡(粘膜表面的局限性凹陷, 是: 1 分, 否: 0 分)。MaRIA < 7 分被认为是病变肠段处于非活动期, ≥ 7 分且 < 11 分被认为是轻度活动期, ≥ 11 分被认为是中-重度活动期^[11]。本试验将患者分为无-轻度活动性(阴性)和中-重度活动性(阳性)两组来进行研究。

4. 影像组学分析

①图像分割: 由上述两位放射科医生使用软件 ITK-SNAP 3.8.0 (<https://www.itk-snap.org>) 在冠状面延迟增强图像上沿异常增厚强化肠段轮廓手动绘制感兴趣区, 勾画过程中注意避开肠腔内空气或对比剂、肠腔外脂肪等(图 1)。当两位医生意见不一致时, 另一名具有 18 年腹部影像诊断经验的放射科医生进行评估和校正。

②特征提取、降维及模型建立: 使用 PyRadiomics 3.0.1 (<https://www.radiomics.io/pyradiomics.html>) 在感兴趣区中进行特征提取, 包括一阶统计(first order statistics)、形状(shape)、灰度

共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)、灰度相关矩阵(gray level dependence matrix, GLDM)、灰度游程矩阵(gray level run length matrix, GLRLM)、灰度区域大小矩阵(gray level size zone matrix, GLSZM)、邻域灰度差分矩阵(neighbourhood gray-tone difference matrix, NGTDM)等组学特征。

使用 FeAture Explorer Pro(0.3.6 版本)从数据集中按 7:3 比例随机选取 58 例作为训练集(31 例阳性, 27 例阴性), 另外 24 例作为独立测试集(13 例阳性, 11 例阴性)。为更好地探索不同特征与组别之间的相关性, 对特征矩阵进行归一化处理, 计算每个特征向量的均值和标准差, 每个特征向量减去平均值, 再除以标准差。删除皮尔森相关系数大于 0.99 的特征对以降维。采用递归特征消除对特征进行选择。

基于选定的影像组学特征, 采用 Logistic 回归建立二分类影像组学模型来区分无-轻度活动期与中-重度活动期肠段。影像组学研究流程图如图 2 所示。

5. 统计分析

采用 SPSS 23.0 统计软件及 Python(3.7.6) 进行统计分析, $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。符合正态性及方差齐性的资料采用独立样本 t 检验进行分析, 不符合正态性或方差齐性即采用非参数秩和检验(Mann-Whitney U 检验)。采用 Logistic 回归对选定的特征进行模型建立。采用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析影像组学模型的诊断性能。

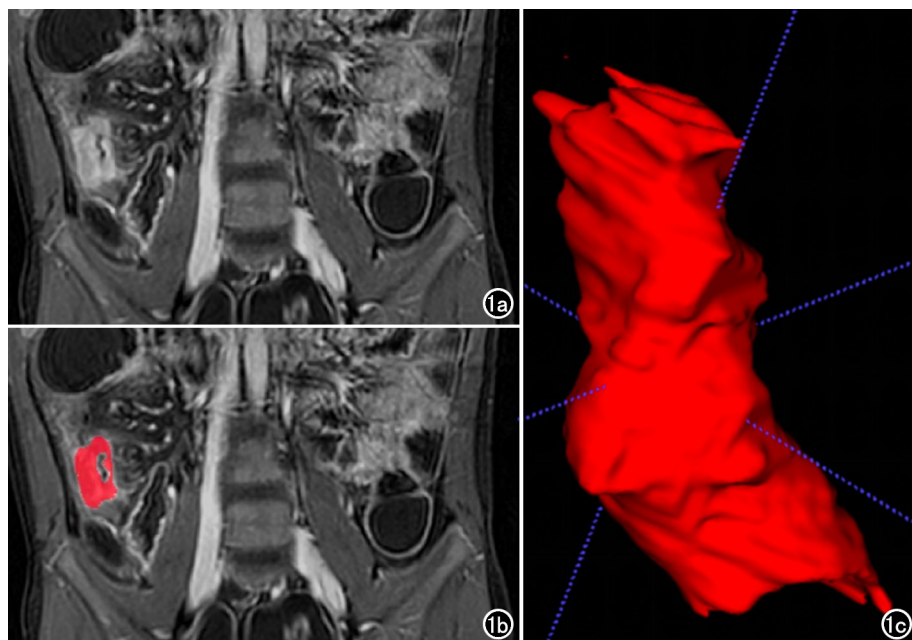


图 1 ROI 勾画示意图。男, 38 岁, 克罗恩病末端回肠受累, 在增强延迟期 MR 图像上沿病变肠段在每个连续层面上勾画。a、b) 延迟期病变肠段 ROI 勾画前后图像; c) 基于病变肠段体积的 3D 图像。

结 果

1.一般资料

训练集包括 58 名患者,男女比例为 38:20,平均年龄为 31(22,48)岁;测试集包括 24 名患者,男女比例为 19:5,平均年龄(34±15)岁。45%(37/82)的患者 CDAI<150 分,46%(38/82)的患者 MaRIA<11 分。患者人口统计学和临床资料见表 2。

2.影像组学分析结果

在训练集中共提取到 374 个特征,包括:14 个形状特征(shape),18 个一阶特征(first order); 22 个灰度共生矩阵(Gray level co-occurrence matrix, GLCM)特征,320 个小波变换特征(wavelet)。删除相关系数大于 0.99 的冗余特征后,得到 308 个特征,通过递归特征消除,最终选择 3 个特征(图 3a、b),通过 logistic 回归建立预测模型:

活动性炎症影像组学模型 = 1.248 × wavelet-HLL_firstorder_Kurtosis + 0.717 × wavelet-LLL_firstorder_90 Percentile+ 1.116 × wavelet-LLL_glc-cm_Joint Average

3.影像组学模型的诊断效能

本研究影像组学模型对无-轻度活动性与中-重度活动性的预测概率如图 3c、d 所示。训练集与测试集对无-轻度活动性与中-重度活动性的诊断效能如图 3e 所示。训练集的曲线下面积(area under curve, AUC)为 0.953(95%CI:0.8949~0.9938),敏感度为 90.3%,特异度为 88.9%,测试集的 AUC 为 0.881(95%CI:0.7109~0.9926),敏感度为 84.6%,特异度为 81.2%。

讨 论

本研究基于 MRE 延迟增强图像建立了一个预测克罗恩病无-轻度活动性与中-重度活动性的影像组学模型,该影像组学模型对二者的区分具有极好的诊断效能,并且敏感度及特异度也较高。

影像组学的发展改变了放射诊断医师利用影像图像对疾病诊断的方式^[12]。影像组学从医学图像感兴趣区中提取大量定量特征,除了从原始图像中提取形状、一阶直方图、纹理特征等基础信息,还能提取出更为精准的小波变换特征,这些是诊断医师无法用肉眼

表 2 克罗恩病患者一般基线资料

一般资料	训练集(n=58)				测试集(n=24)			
	无-轻度活动组 (n=27)	中-重度活动组 (n=31)	Z/ χ ² 值	P 值	无-轻度活动组 (n=11)	中-重度活动组 (n=13)	Z/ χ ² 值	P 值
性别(男/女)	19/8	19/12	0.527	0.468	8/3	11/2	0.630	—
年龄(岁)	41(27,49)	26(19,41)	−2.107	0.035 *	25(19,32)	40(30,51)	−1.974	0.047 *
BMI(kg/m ²)	19.0(17.6,21.9)	19.5(18.3,22.0)	−0.811	0.417	21.9(18.7,22.2)	21.8(18.4,24.1)	−0.029	1.000
CRP(mg/L)	0.82(0.8,4.2)	7.7(0.8,22.9)	−2.334	0.02 *	0.8(0.8,21.1)	9.76(4.7,19.3)	−2.119	0.035 *
ESR(mm/h)	10.0(3.0,20.5)	14.0(7.0,25.5)	−2.107	0.044 *	7.0(2.0,18.0)	13.0(7.5,28.5)	−2.235	0.026 *
CDAI[n(%)]								
≤150 分	21(78%)	5(16%)			10(91%)	3(23%)		
>150 分	6(22%)	26(84%)			1(9%)	10(77%)		

注: BMI, 体重指数; CRP, C 反应蛋白; ESR, 红细胞沉降率; CDAI, 克罗恩病活动指数; 连续变量采用中位数(P25, P75)表示。

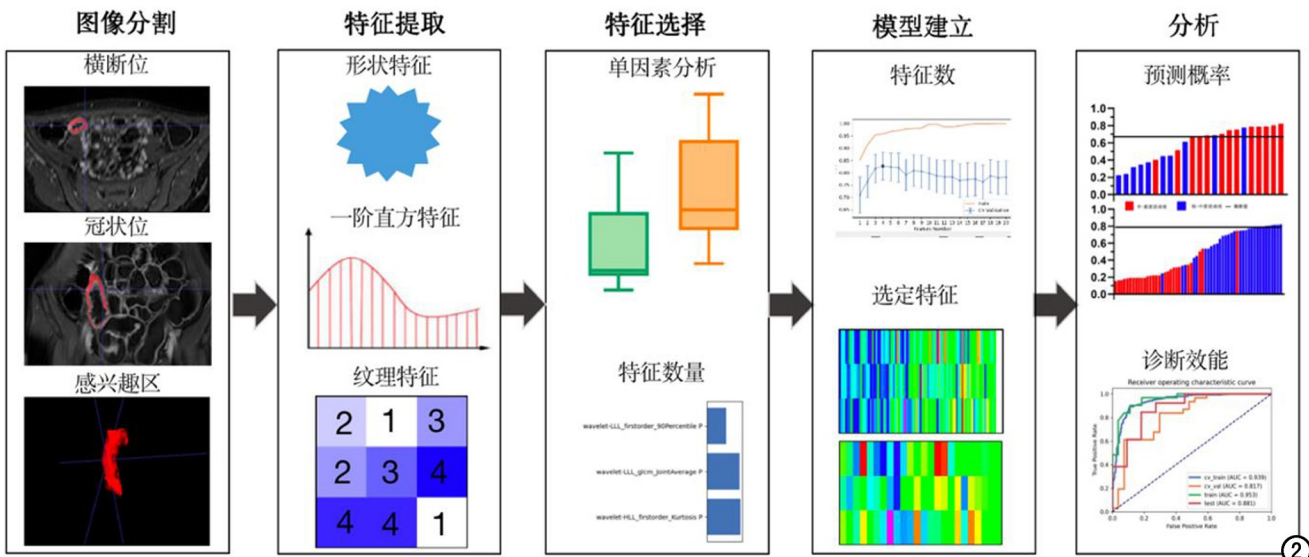


图 2 影像组学流程示意图。

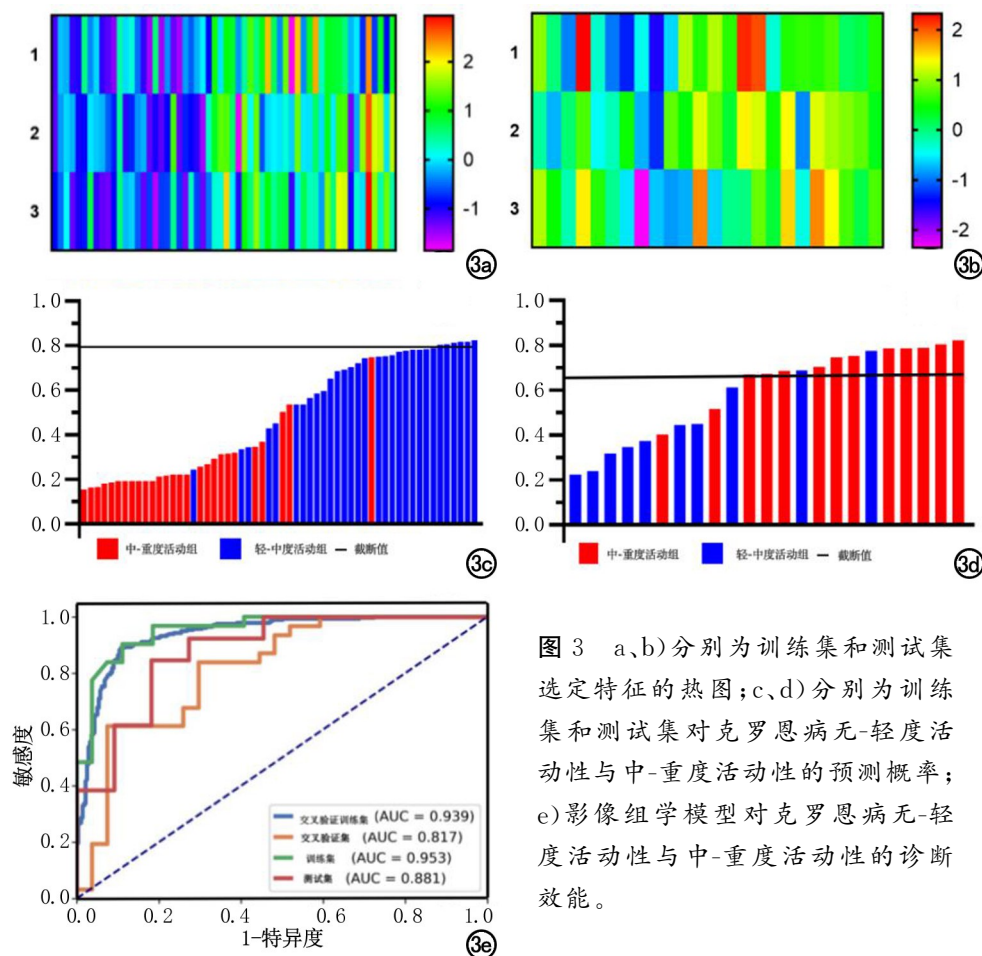


图 3 a、b)分别为训练集和测试集选定特征的热图;c、d)分别为训练集和测试集对克罗恩病无-轻度活动性与中-重度活动性的预测概率;e)影像组学模型对克罗恩病无-轻度活动性与中-重度活动性的诊断效能。

观察到的^[13]。影像组学已成功地应用于评估克罗恩病纤维化及狭窄等^[14-17],其从感兴趣区内提取整体及微观图像特征,并且部分研究证实这些特征与病理结果或实验室指标具有一定的相关性,能够无创地评估病变肠段的纤维性狭窄程度。其中 Li 等^[14]以病理组织活检为金标准,比较了不同 CT 机器、不同病变肠段、不同炎症程度下肠道纤维性狭窄的区别,对临床正确指导患者治疗具有重要意义,此外还将影像组学模型与常规影像进行了比较,得出影像组学比人工阅片具有更高的诊断效能,说明影像组学可以更高效地、有用地对图像进行信息提取。据笔者所知,目前尚无研究使用基于 MRE 增强图像的影像组学分析评估 CD 肠道病变的活动性。

本研究采用基于 MRE 的影像组学方法,对 CD 患者受累的末端回肠进行 ROI 勾画及建立模型,从而无创预测病变肠段的活动性。本研究最终筛选出 3 个影像组学特征,其中 wavelet-HLL_firstorder_Kurtosis 和 wavelet-LLL_firstorder_90 Percentile 均属于一阶特征,是基于单体素的,可全局反映病灶内部结构灰度级强度分布状态,而 wavelet-LLL_glcmm_Joint Average 属于二阶特征,是基于双体素的,描述了相邻体素之间的情况,可反映病灶的异质性^[18-21]。基于以上

特征构建的影像组学模型的诊断效能、敏感度、特异度均较高,在训练集中, AUC 可达 0.953 (敏感度 90.3%, 特异度 88.9%), 测试集中 AUC 为 0.881 (敏感度 84.6%, 特异度 81.2%)。有研究^[22]报道基于 DWI 影像组学对末端回肠活动性的判断,但是该研究的 AUC (训练集 0.801, 测试集 0.794) 明显低于本研究,且特异度较低 (训练集 60%, 测试集 54.5%)。此外,本研究影像组学模型仅需要在 MRE 延迟增强图像进行分析,而放射科医生需要在不同序列以及不同增强时期对图像进行解读,影像组学分析大大提高了 MRE 对肠段活动性炎症的评估能力,可弥补传统方法在 MRE 图像上解读肠道活动性的局限性。

本试验尚存在一些局限性:①样本量相对较小,并且数据来自单中心,可能存在选择偏倚;②本试验的金标准不是传统意义上的金标准——内镜检查,而是 MaRIA 指数,这可能存在一定争议,但 MaRIA 指数已被广泛证实为克罗恩病活动度和严重程度的最具特征性的 MR 指标之一;③有部分文献^[23]认为从 MRI 中提取的特征比从 CT 图像中提取的特征更为复杂,可重复性也更低。但 MRE 检查由于非侵入式、无辐射等原因,总体上来说更符合患者与医生的临床需求。

本研究建立的基于磁共振小肠造影对比增强延迟期图像的影像组学模型对克罗恩病小肠活动性炎症具有较高的诊断效能,磁共振影像组学特征有潜力成为一种可靠的、无创的且实用的影像学生物标志物,帮助临床医师快速准确判断肠道活动性炎症,指导克罗恩病患者进行个体化治疗,具有广泛的临床应用前景。

参考文献:

- [1] Ng WK, Wong SH, Ng SC. Changing epidemiological trends of inflammatory bowel disease in Asia [J]. Intest Res, 2016, 14 (2): 111-119.
- [2] Ribaldone DG, Pellicano R, Actis GC. Pathogenesis of inflammatory bowel disease: basic science in the light of real-world epidemiology [J]. Gastrointest Dis, 2019, 1 (1): 129-146.
- [3] 杨可乐, 李响, 王兴东, 等. MR 小肠造影与扩散加权成像表观扩散

- 系数对 Crohn 病活动性的诊断价值[J].磁共振成像,2020,11(1):40-44.
- [4] 朱建国,李海歌,曹鹏.克罗恩病多模态磁共振成像[J].放射学实践,2017,32(10):1070-1074.
- [5] Seung SL, Ah YK, Yang SK, et al. Crohn disease of the small bowel: comparison of CT enterography, MR enterography, and small-bowel follow-through as diagnostic techniques [J]. Radiology, 2009, 251(3): 751-761.
- [6] 黄梦庭,于群,韩萍.炎症性肠病的 CT 与 MRI 研究及进展[J].临床放射学杂志,2021,40(3):607-610.
- [7] Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, et al. Artificial intelligence in radiology[J]. Nat Rev Cancer, 2018, 18(8): 500-510.
- [8] Sipponen T, Nuutinen H, Turunen U, et al. Endoscopic evaluation of Crohn's disease activity: comparison of the CDEIS and the SES-CD[J]. Inflamm Bowel Dis, 2010, 16(12): 2131-2136.
- [9] Ordás I, Rimola J, Alfaro I, et al. Development and validation of a simplified magnetic resonance index of activity for Crohn's disease [J]. Gastroenterology, 2019, 157(2): 432-439.
- [10] Rimola J, Ordás I, Rodríguez S, et al. Magnetic resonance imaging for evaluation of Crohn's disease: validation of parameters of severity and quantitative index of activity[J]. Inflamm Bowel Dis, 2011, 17(8): 1759-1768.
- [11] Rimola J, Rodríguez S, García-Bosch O, et al. Magnetic resonance for assessment of disease activity and severity in ileocolonic Crohn's disease[J]. Gut, 2009, 58(8): 1113-1120.
- [12] Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H. Radiomics: images are more than pictures, they are data[J]. Radiology, 2016, 278(2): 563-577.
- [13] Song Y, Zhang J, Zhang YD, et al. Feature explorer (FAE): a tool for developing and comparing radiomics models[J]. PloS One, 2020, 15(8): e0237587.
- [14] Li X, Liang D, Meng J, et al. Development and validation of a novel computed-tomography enterography radiomic approach for characterization of intestinal fibrosis in Crohn's disease[J]. Gastroenterology, 2021, 160(7): 2303-2316.
- [15] Lin S, Lin X, Li X, et al. Making qualitative intestinal stricture quantitative: embracing radiomics in IBD[J]. Inflamm Bowel Dis, 2020, 26(5): 743-745.
- [16] Tabari A, Kilcoyne A, Jeck WR, et al. Texture analysis of magnetic resonance enterography contrast enhancement can detect fibrosis in Crohn disease strictures[J]. J Pediatr Gastroenterol Nutr, 2019, 69(5): 533-538.
- [17] Stidham RW, Enchalady B, Waljee AK, et al. Assessing small bowel stricturing and morphology in Crohn's disease using semi-automated image analysis[J]. Inflamm Bowel Dis, 2020, 26(5): 734-742.
- [18] Kumar V, Gu Y, Basu S, et al. Radiomics: the process and the challenges[J]. Magn Reson Imaging, 2012, 30(9): 1234-1248.
- [19] 郭峰,罗琦,郑伊能,等.基于 CT 影像组学模型术前预测喉癌淋巴结转移[J].放射学实践,2021,36(11):1365-1369.
- [20] 谢凯,孙鸿飞,林涛,等.影像组学中特征提取研究进展[J].中国医学影像技术,2017,33(12):1792-1796.
- [21] 史张,刘崎.影像组学技术方法的研究及挑战[J].放射学实践,2018,33(6):633-636.
- [22] 丁洪蕾,周科峰,蒋科芳,等.基于 DWI 影像组学判断克罗恩病患者末端回肠炎活动性的研究[J].浙江医学,2021,43(14):1551-1554.
- [23] 苏会芳,周国锋,谢传森,等.放射组学的兴起和研究进展[J].中华医学杂志,2015,95(7):553-556.

(收稿日期:2021-09-03 修回日期:2021-12-24)