

论 著

IVIM-DWI联合DCE-MRI定量参数与MRE活动性分级评估克罗恩病活动性的对比研究*

毛良强¹ 朱建国^{1,*} 李海歌¹
 陈建秋¹ 郭浩东¹ 张紫燕¹
 温 泉² 崔伯塔²

1.南京医科大学第二附属医院医学影像科
 (江苏 南京 210011)

2.南京医科大学第二附属医院消化内科
 (江苏 南京 210011)

【摘要】目的 研究体素内不相干运动DWI(IVIM-DWI)联合动态增强MRI(DCE-MRI)定量参数在克罗恩病(CD)活动性评估中的价值,并与基于磁共振肠造影(MRE)的活动性分级比较,讨论两者鉴别CD活动性的效能差异。**方法** 回顾性收集CD患者96例,所有患者均接受常规MRE、IVIM-DWI和DCE-MRI扫描。于病变最显著区测量功能MRI定量参数;依据临床活动性评分(HBI)分为缓解组、轻中度活动组和重度活动组,比较MRE活动性分级及功能MRI定量参数的组间差异,对组间具有统计学意义的IVIM-DWI和DCE-MRI定量参数进一步行多元有序Logistic回归分析,采用ROC曲线比较MRE活动性分级和功能MRI定量参数鉴别CD活动性的诊断效能。**结果** 随病情加重,MRE活动性分级提高($P<0.001$); ADC_{fast} 升高($P<0.001$), Fraction of ADC_{fast} 降低($P=0.001$); K^{trans} 和 K_{ep} 升高($P<0.001$ 、 $P=0.005$)。有序Logistic回归显示 K^{trans} 和 ADC_{fast} 是鉴别CD活动性的独立预测因子。ROC曲线分析显示功能MRI组合定量参数($K^{trans}+ADC_{fast}$)($AUC=0.871$)鉴别缓解组和活动组的诊断效能优于MRE活动性分级($AUC=0.744$)($P=0.027$)。**结论** 功能MRI模型在鉴别CD活动性方面比MRE活动性分级具有更好的诊断效能。

【关键词】 体素内不相干运动;动态增强磁共振;磁共振肠造影;活动性分级;克罗恩病

【中图分类号】 R445.2; R574

【文献标识码】 A

【基金项目】 江苏省卫生健康委员会高层次卫生人才“六个一工程”(LG2018072)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.03.055

A Comparative Study of IVIM-DWI Combined with DCE-MRI Quantitative Parameters and MRE Activity Classification in the Assessment of Crohn's Disease Activity*

MAO Liang-qiang¹, ZHU Jian-guo^{1,*}, LI Hai-ge¹, CHEN Jian-qiu¹, GUO Hao-dong¹, ZHANG Zi-yan¹, WEN Quan², CUI Bo-ta².

1.Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210011, Jiangsu Province, China

2.Department of Gastroenterology, the Second Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210011, Jiangsu Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the value of intravoxel incoherent motion DWI (IVIM-DWI) combined with dynamic contrast-enhanced MRI (DCE-MRI) quantitative parameters in the assessment of Crohn's disease (CD) activity and to compare the diagnostic value of functional MRI quantitative parameters and grading system based on MR enterography. **Methods** A total of 96 patients with CD were retrospectively collected and all underwent conventional MRE, IVIM-DWI and DCE-MRI scans. Quantitative parameters of functional MRI were measured in the most significant area of the lesion. According to the clinical activity score (HBI), the patients were divided into remission group, mild to moderate activity group and severe activity group. The differences between groups in MRE activity grade and functional MRI quantitative parameters were compared. The statistically significant functional MRI quantitative parameters between groups were analyzed by ordinal logistic regression, and the ROC curve analysis was used to compare diagnostic performance of MRE activity grading and functional MRI quantitative parameters in identifying CD activity. **Results** With the disease aggravation, MRE activity grade increased ($P<0.001$). ADC_{fast} increased ($P<0.001$), Fraction of ADC_{fast} decreased ($P=0.001$). K^{trans} and K_{ep} increased ($P<0.001$, $P=0.005$). Ordinal logistic regression showed that K^{trans} and ADC_{fast} were independent predictors for discriminating CD activity. ROC curve analysis showed that functional MRI combined quantitative parameters ($K^{trans}+ADC_{fast}$) ($AUC=0.871$) had better diagnostic performance than MRE activity grade ($AUC=0.744$) in differentiating remission group and active group ($P=0.027$). **Conclusion** Functional MRI model has better diagnostic performance than MRE activity grading in identifying CD activity.

Keywords: Intravoxel Incoherent Motion; Dynamic Contrast-Enhanced MRI; Magnetic Resonance Enterography; Crohn's Disease; Activity Grading System

克罗恩病(crohn's disease, CD)是一种慢性、持续性炎性疾病,以回盲部好发,常合并狭窄、脓肿和瘘管等并发症^[1],因为CD不同疾病阶段的医疗管理方法不同,为了帮助临床医生选择最佳治疗策略,区分不同阶段CD的活动性是非常重要的^[2]。磁共振肠造影(magnetic resonance enterography, MRE)是一种无电离辐射且非侵入性的成像技术,被广泛用于诊断CD和评估疾病活动性^[3-4]。目前,多种MRE活动性评分系统被报道可用于评估CD的活动性^[3],但不同评分系统各有优缺点,尚无一致标准;Tielbeek等^[4]提出了基于常规MRE评估CD总体活动性的分级标准,经过测试对比,发现该分级标准不仅诊断准确性高而且便于初学者掌握。

以动态增强磁共振(dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI)和体素内不相干运动扩散加权成像(introvoxel incoherent motion diffusion weighted imaging, IVIM-DWI)为代表的功能MRI成像技术已被越来越多的学者^[5-9]应用于CD的研究中。既往研究表明^[5-6],DCE-MRI可以评估病变组织的血管通透性等微循环信息,衍生的药物代谢动力学参数可用于评估CD活动性^[5]和监测疗效^[6];IVIM-DWI能够不使用对比剂便可获得水分子的扩散和微循环灌注等信息^[7],已被用于评估CD纤维化^[8]和活动性^[9]。

目前尚未发现有既往研究将IVIM-DWI和DCE-MRI技术联合运用于评估CD活动性,本研究以简化版的CD临床活动性评分(harvey-bradshaw index, HBI)为标准,研究IVIM-DWI联合DCE-MRI定量参数对于CD活动性评估的价值,并与基于MRE的活动性分级比较,讨论两者鉴别CD活动性的效能差异。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集2018年12月至2021年12月经我院消化内科收治的炎性肠病患者102例。

纳入标准:经肠镜(结肠镜或胶囊小肠镜)、病理证实的肠道CD患者;具备完善的临床信息供消化科医生进行HBI评分;住院期间接受了常规MRE、IVIM-DWI及DCE-MRI

【第一作者】毛良强,男,在读研究生,主要研究方向:腹部影像学。E-mail: maoliangqiang123@163.com

【通讯作者】朱建国,男,主任医师,主要研究方向:腹部影像学。E-mail: zhujianguo@njmu.edu.cn

成像检查；年龄18~70岁。排除标准：有肠道手术史；图像质量差，影响诊断；合并肠道肿瘤。102例患者中，4例因图像质量差被排除，2例因有肠道手术史被排除。

最终纳入研究的患者共96例，男/女= 69/27，年龄19~65岁，平均34.43 ± 12.54岁。根据HBI评分^[10]，将96例患者分为三组：缓解组(HBI ≤ 4)41例，轻中度活动组(5 ≤ HBI ≤ 8)37例，重度活动组(HBI ≥ 9)18例。

1.2 检查方法 MRI检查使用GE公司3.0 T MR扫描仪(Signa HDxt)及配套的8通道腹盆腔线圈。患者口服2.5%的甘露醇溶液以充盈肠道，检查开始前，静脉注射山莨菪碱20 mg抑制肠蠕动。

常规MRE序列：冠状位T₂单次激发快速自旋回波序列(层厚/间距5 mm/1 mm，TR/TE 2800 ms/80 ms)；轴位T₂快速自旋回波脂肪抑制序列(层厚/间距4 mm/2mm，TR/TE 12000 ms/90 ms)；轴位T₁三维容积超快速扫描序列(层厚/间距4 mm/0 mm，TR/TE 4.5 ms/1.7 ms)；冠状位T₁三维容积超快速扫描序列(层厚/间距3 mm/0 mm，TR/TE 4.5 ms/1.7 ms)。

根据常规MRE，于病变最显著肠段行IVIM-DWI扫描，轴位单次 激发自旋平面回波序列：层厚/间距4 mm/0 mm，TR/TE 10000 ms/60 ms，FOV 40 cm × 30 cm，矩阵96 × 130，参照Kurugol等^[11]报道，设置7个b值，包括0、50、100、200、400、600、800 mm²/s，弥散方向3合1，层数16，扫描时长3 min 40 s。

根据常规MRE，于病变最显著肠段行DCE-MRI扫描，采用三维容积超快速扫描序列，扫描参数：轴位，层厚/间距4 mm /0 mm，TR/TE 2.9 ms/1.1 ms，矩阵224 × 160，FOV 42 cm，翻转角12°，连续采集30个时相，时间分辨率6 s，时长3 min 14 s；在对比剂注射前扫描5个时相作为蒙片，翻转角分别为4°、6°、8°、10°、12°。对比剂使用钆双胺注射液(欧乃影)。

1.3 MRE活动性分级 3位具有10年以上消化道MRI诊断经验的放射科医师，对临床资料以及IVIM-DWI和DCE-MRI功能数据分析结果均不知情，依据Tielbeek等^[4]提出的基于常规MRE征象的评分系统，共同阅片并对每一患者的MRE征象进行分析，如有不一致之处，通过讨论达成共识，并作为最终结果进行MRE活动性分级，分为轻度、中度和重度。基于常规MRE的分级标准见表1。

1.4 DCE-MRI和IVIM-DWI分析 DCE-MRI数据处理：使用GE公司开发的Omni-Kinetics软件包，选择Extended Tofts Liner模型，由2名具有5年以上腹部影像诊断经验的主治医师，采用双盲法在腹主动脉绘制感兴趣区(region of interest, ROI)，生成动脉输入函数，并在病变肠管强化最显著区绘制ROI，得到伪彩图和相应容积转运常数(K^{trans})、速率常数(K_{ep})、血管外细胞外间隙体积分数(V_e)、单位组织内血浆容量(V_p)参数值。

IVIM数据处理：使用GE公司ADW4.6工作站及配套的Functool后处理软件包，由上述2名主治医师，采用双盲法在病变最显著区域绘制ROI，得到表观扩散系数(ADC_{standard})、慢速扩散ADC(ADC_{slow})、快速扩散ADC(ADC_{fast})和快速扩散ADC分数(Fraction of ADC_{fast})参数值。DCE-MRI和IVIM-DWI图像分析典型案例见图1~图10。

1.5 统计学分析 数据处理分析采用统计软件SPSS 25.0和Medcalc 19.6，P<0.05有统计学差异。

使用组内相关系数(ICC)评价两位主治医师测量数据一致性，ICC系数>0.75认为数据一致性好，ICC<0.4认为一致性差；最终数据为两位医师测量值的算术平均值，并用于后续统计分析处理。分类变量使用构成比的形式表达，采用卡方检验进行组间比较。符合正态分布的连续变量表示为均值±标准差，不符合则表示为中位值(四分位距)；符合正态分布且方差齐同的连续变量采用方差分析进行组间比较，否则采用非参数(Kruskal-Wallis)检验。对有统计学差异的IVIM-DWI和DCE-MRI定量参数，进一步行多元有序Logistic回归，评价各功能参数对于CD病情活动性分级的诊断价值。使用受试者操作特征曲线(receiver operator characteristic curve, ROC曲线)对比分析IVIM-DWI联合DCE-MRI的单一和组合定量参数以及MRE活动性分级鉴别CD活动性的诊断效能。

2 结果

2.1 观察者之间一致性 ICC检验显示IVIM-DWI和DCE-MRI功能参数的一致性(可重复性)良好，8个功能参数ICC系数在0.918~0.958之间(表2)。

2.2 三组间人口学、MRE活动性分级和功能MRI定量参数的比较 人口学资料中：性别(P=0.581)与年龄(P=0.567)三组间比较无统计学差异；MRE活动性分级组间比较存在显著差异(P<0.001)，随病情加重，分级显著升高；IVIM-DWI定量参数ADC_{fast}和Fraction of ADC_{fast}组间比较存在显著差异，ADC_{fast}随病情加重，数值增高(P<0.001)，而Fraction of ADC_{fast}降低(P= 0.001)，ADC_{standard}、ADC_{slow}无统计学差异(P= 0.299、P= 0.301)；动态增强MRI定量参数K^{trans}和K_{ep}组间比较差异显著(P< 0.001、P= 0.005)，均随病情加重，数值增高，V_e、V_p无统计学差异(P= 0.105、P=0.140)(表3)。有序Logistic回归结果表明K^{trans}(P< 0.001)和ADC_{fast}(P=0.001)是鉴别CD活动性的独立预测因子(表4)。

2.3 MRE活动性分级和功能MRI定量参数诊断CD活动性的准确性分析 ROC曲线分析(表5，图 11)显示功能MRI组合定量参数(K^{trans}+ADC_{fast})鉴别缓解期和活动期CD的AUC值最高(AUC = 0.871)，与K_{trans}(AUC = 0.808)相比无统计学差异(P= 0.065)，但显著高于MRE活动性分级(AUC=0.744)(P=0.027)和ADC_{fast}(AUC = 0.799)(P= 0.044)。(K^{trans}+ADC_{fast} AUC vs MRE活动性分级AUC)=(0.871 vs 0.744，P=0.027)。

表1 基于MRE的活动性分级标准

MRE征象	MRE征象评分			
	0	1	2	3
肠壁厚度	≤3mm	>3mm且≤5mm	>5mm且≤7mm	>7mm
肠壁T ₂ 信号	正常	轻度增高	中度增高	明显增高
肠壁强化程度	正常	轻度强化	中度强化	明显强化
肠壁强化模式	无	均匀强化	黏膜强化	分层强化
病变总长度	0cm	>0cm且≤5cm	>5cm且≤15cm	>15cm
“梳齿”征	无	有		
并发症 肠扭转	无	有		
脓肿	无	有		
瘘	无	有		
严重狭窄	无	有		

注：1、当存在多个病变肠段时，最终评分以评分最高的肠段为准。2、轻度：所有单个征象评分均< 3分、总评分≤ 8分且无并发症；中度：任一单个征象评分为3分或9 ≤ 总评分≤ 13，且无并发症；重度：总评分≥ 14或存在任一并发症。3、管腔缩小> 80%且同时伴有狭窄前扩张、管壁增厚> 3 mm和肠壁T2信号增高(中度或重度)被认为是具有活动性的严重狭窄。

表2 两位医师测量的病变肠壁IVIM-DWI和DCE-MRI 定量参数一致性检验

参数	ICC系数	95% CI
ADC _{standard} (×10 ⁻³ mm ² /s)	0.945	0.923~0.962
ADC _{slow} (×10 ⁻³ mm ² /s)	0.958	0.942~0.971
ADC _{fast} (×10 ⁻³ mm ² /s)	0.918	0.889~0.945
Fraction of ADC _{fast}	0.944	0.920~0.960
K ^{trans} (min ⁻¹)	0.934	0.867~0.958
K _{ep} (min ⁻¹)	0.955	0.942~0.981
V _e	0.954	0.920~0.970
V _p (×10 ⁻¹)	0.949	0.923~0.968

注：ICC= intraclass correlation coefficient = 组内相关系数；95% CI = 95% confidence interval = 95%置信区间

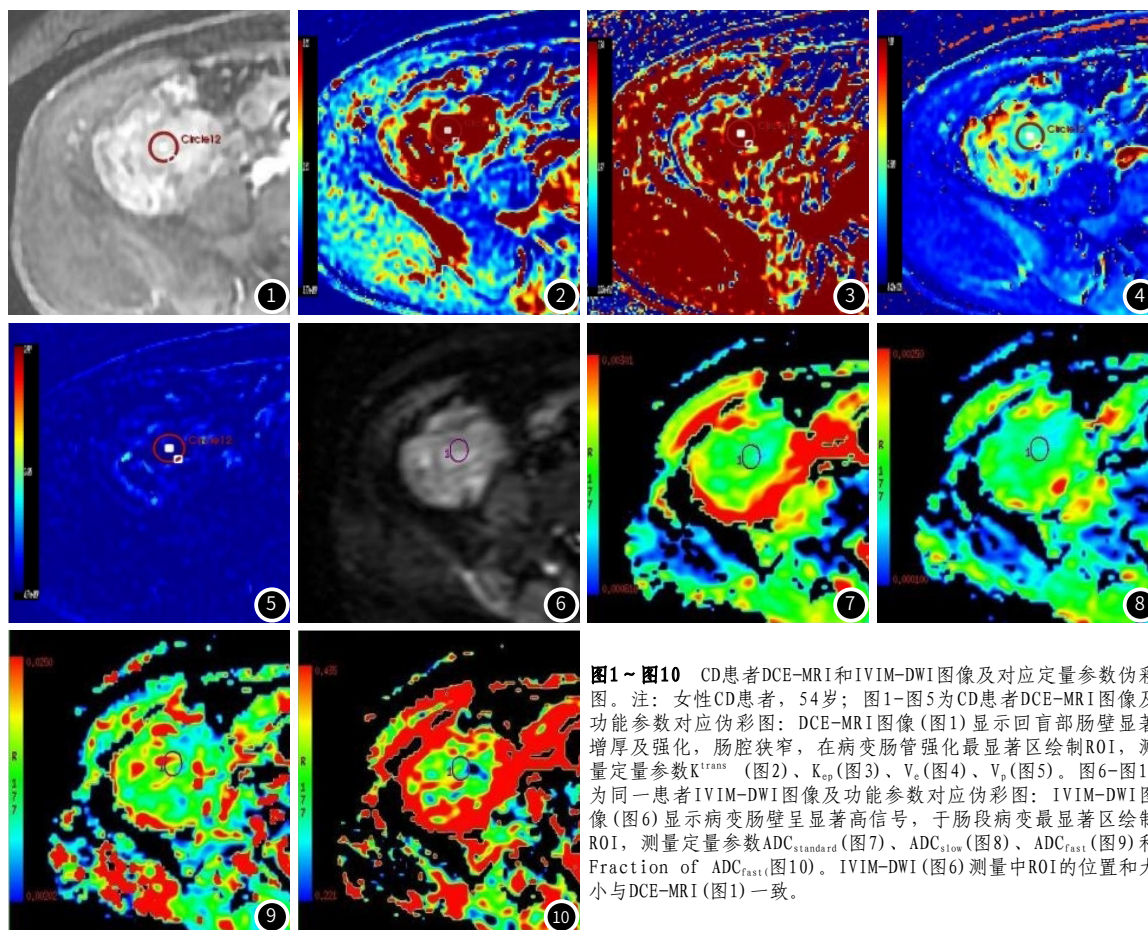


图1~图10 CD患者DCE-MRI和IVIM-DWI图像及对应定量参数伪彩图。注：女性CD患者，54岁；图1-图5为CD患者DCE-MRI图像及功能参数对应伪彩图：DCE-MRI图像(图1)显示回盲部肠壁显著增厚及强化，肠腔狭窄，在病变肠管强化最显著区绘制ROI，测量定量参数 K^{trans} (图2)、 K_{ep} (图3)、 V_e (图4)、 V_p (图5)。图6-图10为同一患者IVIM-DWI图像及功能参数对应伪彩图：IVIM-DWI图像(图6)显示病变肠壁呈显著高信号，于肠段病变最显著区绘制ROI，测量定量参数 $ADC_{standard}$ (图7)、 ADC_{slow} (图8)、 ADC_{fast} (图9)和Fraction of ADC_{fast} (图10)。IVIM-DWI(图6)测量中ROI的位置和大小与DCE-MRI(图1)一致。

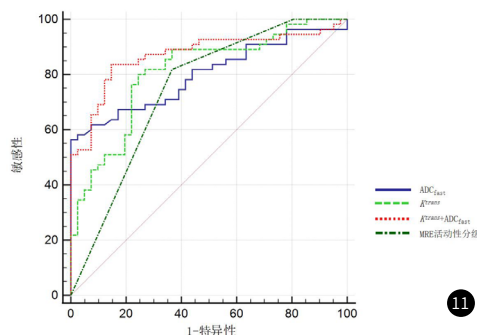


图11 MRE活动性分级和功能MRI定量参数鉴别缓解组和活动组CD的ROC曲线。

表3 三组间人口学资料、MRE活动性分级、IVIM-DWI及DCE-MRI定量参数的比较

参数	缓解组	轻中度活动组	重度活动组	P值
人口学资料 性别(男/女)	32/9	25/12	13/5	0.581
年龄(岁)	36.24 ± 11.64	38.35 ± 13.76	34.78 ± 10.97	0.567
常规MRE MRE活动性分级(轻/中/重)	8/18/15	0/9/28	0/1/17	<0.001#
IVIM-DWI $ADC_{standard}$ ($\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)	1.01(0.39)	0.96(0.44)	0.99(0.37)	0.299
ADC_{slow} ($\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)	1.13(0.49)	1.10(0.44)	1.36(0.72)	0.301
ADC_{fast} ($\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)	9.02(3.82)	13.00(6.19)	15.98(4.06)	<0.001*
Fraction of ADC_{fast} (%)	36.20(22.40)	25.80(17.15)	23.05(11.04)	0.001*
DCE-MRI K^{trans} (min^{-1})	1.33(0.89)	1.98(1.01)	3.59(1.94)	<0.001*
K_{ep} (min^{-1})	1.71(1.20)	2.17(1.46)	2.65(1.81)	0.005*
V_e	0.79(0.34)	0.91(0.40)	0.95(0.31)	0.105
$V_p(\times 10^{-1})$	0.29(0.44)	0.45(0.82)	0.09(0.86)	0.140

注：#：MRE活动性分级组间比较采用 χ^2 检验。*：IVIM-DWI和DCE-MRI定量参数均不符合正态分布，组间比较采用非参数(Kruskal-Wallis)检验。

表4 功能MRI定量参数有序Logistic回归分析结果

项目	估算值	OR值	95% CI	P值
ADC _{fast}	0.213	1.237	1.091~1.404	0.001
K ^{trans}	1.351	3.861	2.042~7.301	<0.001

注：OR = odds ratio = 比值比

表5 鉴别CD缓解组和活动组的受试者工作特性曲线分析结果

参数	AUC	P	敏感性	特异性
MRE活动性分级	0.744	<0.001	81.82	63.41
ADC ^{fast}	0.799	<0.001	56.36	100
K ^{trans}	0.808	<0.001	80.00	75.61
K ^{trans} +ADC ^{fast}	0.871	<0.001	83.64	85.37

注：AUC = area under the curve = 受试者工作特性曲线下面积

3 讨论

近年来，已有多种基于MRE活动性评分系统被报道可用于评估CD的活动性^[3]，Tielbeek等^[4]提出了基于MRE的CD活动性分级标准，通过测试对比，发现该分级方法不仅可用于评估CD患者肠道整体病变活动性，而且具有准确性高、方便快捷，便于掌握的优点；本研究采用该分级标准，发现该活动性分级方法能够区分不同严重程度CD；然而上述评分系统均是基于常规MRE的主观性评分，具有一定的局限性，相关荟萃分析^[12]表明评估者的经验水平可显著影响使用常规MRI诊断CD活动性的敏感性和特异性；而以DCE-MRI和IVIM-DWI为代表的功能MRI技术具有客观、定量分析病变的特点，已被越来越多的学者应用于CD的研究中^[5-9]。

DCE-MRI是一种无电离辐射且非侵入性的功能成像方法，能够定量分析新生血管通透性及微循环灌注的信息^[13]。与既往研究结果类似^[5, 14-15]，本研究发现，随着CD活动性升高，病变肠段K^{trans}、Kep数值越高。其病理基础可能是：CD患者病变肠段通透性高的新生血管增多，所以对比剂更容易通过新生血管进入血管外、细胞外间隙^[16]；K^{trans}代表对比剂从血管内向细胞外间隙的通过率，Kep代表渗漏到血管外细胞外间隙的对比剂分子流回血管内的速率^[17]；所以病变肠段炎症反应越严重，则新生血管越多，血管通透性越高，继而K^{trans}和Kep数值越高。

相关研究^[18]发现IVIM技术可分别表征水分子扩散和微血管灌注，张彩红等^[9]研究发现随CD活动性升高，ADC_{fast} (p = 0.020)显著升高，而Fraction of ADC_{fast}显著降低 (p = 0.021)。与既往研究结果^[9, 18]一致，本研究发现IVIM-DWI定量参数ADC_{fast}和Fraction of ADC_{fast}组间比较差异显著，随活动性升高，ADC_{fast}数值增高，Fraction of ADC_{fast}数值降低；其病理基础可能是：CD病变肠壁因微血管通透性增加而舒张功能受限，出现血流加速及血管壁内外交换加速的现象^[19]，而Carr等^[20]使用病理标本灌注的方法证实病变肠段具有血管容量的减低的特点，因为ADC_{fast}增高代表灌注增加，Fraction of ADC_{fast}下降代表血管容量减低，同时病变肠壁灌注主要取决于血流速度和血管容量，所以病变组织可能通过增加血流流速而不是增加血管容量来增加灌注，从而表现为ADC_{fast}升高而Fraction of ADC_{fast}下降。

本研究以HBI为参考标准，通过单因素分析，发现MRE活动性分级、IVIM-DWI定量参数(ADC_{fast}和Fraction of ADC_{fast})和DCE-MRI定量参数(K^{trans}和Kep)能够区分CD活动性；有序Logistic回归提示ADC_{fast}和K^{trans}是鉴别CD活动性的独立预测因子；在鉴别CD缓解组和活动组准确性研究中，我们发现功能MRI模型(K^{trans}+ADC_{fast})的AUC值最高，其诊断效能显著优于基于常规MRE征象

的活动性分级。

本研究存在的缺陷与不足：1. 受限于单中心回顾性研究，本研究样本量偏小，今后需进一步扩大样本量并多中心验证以获得更可靠的结果；2. 受限于本单位设备条件，本研究每个病例只选择病变最显著肠段行功能MRI检查，暂无法扫描所有病变肠管；3. 病变最显著肠段的选择可能具有主观性。

综上所述，功能MRI模型和基于常规MRE征象的活动性分级均可用于鉴别CD活动性；与主观性的MRE活动性分级相比，功能MRI模型具有客观、定量分析病变的特点，并且在鉴别CD活动性方面具有更好的诊断效能，可以作为判别CD活动性的一种新选择。

参考文献

[1]袁新平,许静,朱莉莉.MSCT对克罗恩病、肠结核的鉴别诊断价值分析[J].中国CT和MRI杂志,2021,19(10):160-162.

[2]谢洁勋,罗圣熙.经腹超声与MSCT在诊断克罗恩病中的应用比较[J].中国CT和MRI杂志,2022,20(4):156-158.

[3]ROZENDORN N,AMITAI M M,ELIAKIM R A,et al.A review of magnetic resonance enterography-based indices for quantification of Crohn's disease inflammation[J].Therapeutic advances in gastroenterology,2018,11(1756284818765956.

[4]TIELBEEK J A,BIPAT S,BOELLAARD T N,et al.Training readers to improve their accuracy in grading Crohn's disease activity on MRI[J].European radiology,2014,24(5):1059-1067.

[5]吴亚红,朱建国,张发明,等.MRI动态增强定量参数在评估肠道克罗恩病病变活动性中的应用价值[J].实用放射学杂志,2017,33(1):59-62.

[6]韩晖云,朱建国,李海歌,等.磁共振动态增强在克罗恩病疗效评估中的应用[J].医学影像学杂志,2017,27(11):2164-2167+70.

[7]张梦晨,李雪华,黄斯韵,等.MRI体素内不相干运动与成人克罗恩病肠壁炎症和纤维化的相关性[J].中华放射学杂志,2019,53(3):212-217.

[8]ZHANG M C,LI X H,HUANG S Y,et al.IVIM with fractional perfusion as a novel biomarker for detecting and grading intestinal fibrosis in Crohn's disease[J].European radiology,2019,29(6):3069-3078.

[9]张彩红,向丽园,朱建国,等.磁共振成像活动性分级与体素内不相干运动在克罗恩病临床评估中的应用[J].临床放射学杂志,2021,40(8):1539-1544.

[10]HE C,ZHANG J,CHEN Z,et al.Relationships of capsule endoscopy Lewis score with abdominal disease activity indices,C-reactive protein,and small bowel transit time in pediatric and adult patients with small bowel Crohn's disease[J].Medicine,2017,96(33):e7780.

[11]Kurugol S,Freiman M,Afacan O,et al.Motion-robust parameter estimation in abdominal diffusion-weighted MRI by simultaneous image registration and model estimation[J].Medical Image Analysis,2017,39:124-132.

[12]WU L M,XU J R,GU H Y,et al.Is magnetic resonance imaging a reliable diagnostic tool in the evaluation of active Crohn's disease in the small bowel?[J].Journal of clinical gastroenterology,2013,47(4):328-338.

[13]朱建国,张发明,刘斐,等.功能磁共振在克罗恩病中的应用:磁共振定量动态增强和扩散加权成像的相关性研究[J].临床放射学杂志,2015,34(11):1778-1782.

[14]ZHU J,ZHANG F,LUAN Y,et al.Can dynamic contrast-enhanced MRI (DCE-MRI) and diffusion-weighted MRI (DW-MRI) evaluate inflammation disease:A preliminary study of crohn's disease[J].Medicine,2016,95(14):e3239.

[15]曾琦.弥散加权成像MRI和动态增强MRI在活动性肠道克罗恩病诊断中的应用[J].中国CT和MRI杂志,2020,18(2):113-116.

[16]张庆,徐香玖,周星,等.DCE-MRI定量参数与宫颈鳞癌临床分期的相关性研究[J].实用放射学杂志,2016,32(1):64-67.

[17]陈天佑,强金伟,李若坤,等.MR DCE-PWI 及 IVIM-DWI 定量绝经前后正常子宫内膜微循环改变[J].实用放射学杂志,2016(2):232-235.

[18]FREIMAN M,PEREZ-ROSSELLO J M,CALLAHAN M J,et al.Characterization of fast and slow diffusion from diffusion-weighted MRI of pediatric Crohn's disease[J].Journal of magnetic resonance imaging : JMIR,2013,37(1):156-163.

[19]BHATNAGAR G,DIKAIOS N,PREZZI D,et al.Changes in dynamic contrast-enhanced pharmacokinetic and diffusion-weighted imaging parameters reflect response to anti-TNF therapy in Crohn's disease[J].The British journal of radiology,2015,88(1055):20150547.

[20]CARR N D,PULLAN B R,SCHOFIELD P F.Microvascular studies in non-specific inflammatory bowel disease[J].Gut,1986,27(5):542-549.

(收稿日期: 2022-03-14)

(校对编辑: 姚丽娜)