

论 著

不同MRI扫描序列在膝关节软骨损伤早期及分级诊断的应用的研究*

左磊¹ 张武^{2,*} 杨景欣¹
刘强¹ 刘锴¹1.南阳医学高等专科学校第一附属医院
骨科2.南阳医学高等专科学校第一附属医院
医学影像科(河南 南阳 473000)

【摘要】目的 探讨磁共振(MRI)三维双激发平衡式稳态自由进动序列(3D-FIESTA-C)在膝关节软骨损伤早期诊断中的应用价值。**方法** 回顾性研究,纳入2022年1月至2024年4月经本院收治行择期关节镜手术的48例急性膝关节外伤住院患者,均行MRI常规序列、多回波梯度成像(MGRGE)、三维抑脂快速扰相梯度回波(3D-FS-SPGR)及3D-FIESTA-C序列扫描,测定各序列软骨信噪比(CNR)评估软骨成像质量,以膝关节镜手术为“金标准”,比对MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列对膝关节软骨损伤早期及分级的诊断价值。**结果** 根据膝关节解剖特征,每例患者2个膝关节均行6区域(髌骨、股骨内/外踝、股骨滑车及胫骨内/外侧平台)扫描,48例急性膝关节外伤住院患者共576处软骨,经关节镜手术结果显示正常软骨324处(56.25%),异常软骨252处(43.75%),其中I级、II级、III级、IV级依次为36、75、60、81处;MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列CNR比较,差异有统计学意义($P<0.05$),且3D-FIESTA-C序列CNR高于MGRGE、3D-FS-SPGR序列,3D-FS-SPGR序列CNR高于MGRGE序列($P<0.05$);MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列均可用于膝关节软骨损伤早期诊断,AUC值0.972~0.989不等,尤以3D-FIESTA-C序列诊断价值最高,敏感度、特异度依次为98.41%、99.38%;MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列均可用于膝关节软骨损伤分级诊断,尤以3D-FIESTA-C序列诊断价值最高,准确率为96.53%,Kappa值为0.892。**结论** MRI的3D-FIESTA-C序列扫描对急性膝关节外伤患者膝关节软骨损伤成像质量较高,有助于膝关节软骨损伤的早期识别及分级评估。

【关键词】 急性膝关节外伤; 膝关节软骨损伤; 磁共振; 三维双激发平衡式稳态自由进动序列
【中图分类号】 R684.7; R445.2
【文献标识码】 A
【基金项目】 河南省医学科技攻关计划项目(LHGJ20221052)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.07.050

Application of Different MRI Scan Sequences in Early and Graded Diagnosis Of Knee Cartilage Injury*

ZUO Lei¹, ZHANG Wu^{2,*}, YANG Jing-xin¹, LIU Qiang¹, LIU Kai¹.

1.Department of Orthopedics, The First Affiliated Hospital of Nanyang Medical College, Nanyang 473000, Henan Province, China

2.Department of Medical Imaging, The First Affiliated Hospital of Nanyang Medical College, Nanyang 473000, Henan Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the application value of magnetic resonance imaging (MRI) three-dimensional double excitation balanced steady state free precession sequence (3D-FIESTA C) in the early diagnosis of knee cartilage injury. **Methods** This retrospective study included 48 hospitalized patients with acute knee trauma who underwent elective arthroscopic surgery in our hospital from January 2022 to April 2024, all of whom underwent conventional MRI sequence, multiple echo gradient imaging (MGRGE), three-dimensional lipostatic rapid turbulent phase gradient echo (3D-FS-SPGR) and 3D-FIESTA C sequence scanning. The cartilage signal-to-noise ratio (CNR) of each sequence was determined to evaluate the quality of cartilage imaging, and the diagnostic value of MGRGE, 3D-FS-SPGR and 3D-FIESTA C sequences in the early stage and grade of knee cartilage injury was compared with knee arthroscopy as the gold standard. **Results** According to the anatomical characteristics of the knee joint, 6 areas (patella, medial/lateral malleolus of femur, trochlea of femur and medial/lateral platform of tibia) were examined in 2 knee joints of each patient. A total of 576 cartilage spots were found in 48 patients with acute knee joint trauma. Arthroscopic surgery results showed 324 normal cartilage spots (56.25%) and 252 abnormal cartilage spots (43.75%). Among them, grade I, grade II, grade III, grade IV were 36, 75, 60, 81; The CNR of MGRGE, 3D-FS-SPGR and 3D-FIESTA C sequences was statistically significant ($P<0.05$), and the CNR of 3D-FIESTA C sequences was higher than that of MGRGE and 3D-FS-SPGR sequences. The CNR of 3D-FS-SPGR sequence was higher than that of MGRGE sequence ($P<0.05$). MGRGE, 3D-FS-SPGR and 3D-FIESTA C sequences can be used for the early diagnosis of knee cartilage injury, with AUC values ranging from 0.972 to 0.989, especially 3D-FIESTA C sequences with the highest diagnostic value, sensitivity and specificity of 98.41% and 99.38%. MGRGE, 3D-FS-SPGR and 3D-FIESTA C sequences can be used in the classification diagnosis of knee cartilage injury, especially the 3D-FIESTA C sequence has the highest diagnostic value, with an accuracy rate of 96.53% and a Kappa value of 0.892. **Conclusion** 3D-FIESTA C sequence scan of MRI has high imaging quality for knee cartilage injury in patients with acute knee injury, which is helpful for early identification and grading evaluation of knee cartilage injury.

Keywords: Acute Knee Joint Injury; Knee Cartilage Injury; Magnetic Resonance; Three-dimensional Double Excitation Balanced Steady State Free Precession Sequence

膝关节软骨损伤是临床常见骨科疾病,分急性损伤及退变损伤,前者主要由急性膝关节外伤导致。在人口老龄化大背景下,膝关节软骨损伤病例日益增多^[1]。因关节软骨无血液供应,在出现损伤后修复困难,若未在早期及时诊断,可能延误治疗,使得膝关节软骨损伤进展为膝关节软骨退行性疾病,诸如骨关节炎等,进而严重损害患者健康^[2-3]。由此,及早识别膝关节软骨损伤并评估膝关节软骨分级至关重要。目前,磁共振(MRI)凭借软组织分辨率高、视野清晰及多平面多参数成像等优势,已成为膝关节软骨损伤诊断可靠且准确检查手段^[4]。但显示软骨敏感序列种类较多,包括多回波梯度成像(MGRGE)^[5]、三维抑脂快速扰相梯度回波(3D-FS-SPGR)^[6]及三维双激发平衡式稳态自由进动序列(3D-FIESTA-C)^[7]等。但何种序列在膝关节软骨损伤早期识别及分级诊断更为优选尚未统一意见。基于此,本文旨在探讨不同序列在膝关节软骨损伤的应用价值,作报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性研究,纳入2022年1月至2024年4月经本院收治行择期关节镜手术的48例急性膝关节外伤住院患者。

纳入标准:因急性膝关节外伤就诊,年龄 ≥ 18 岁;符合择期关节镜手术指征;患者及家属对研究知情同意。排除标准:合并全身感染;伴发骨关节炎患者;存在幽闭恐惧症。研究通过医院伦理委员会审查。

1.2 方法

1.2.1 检查方法 仪器选择 SIGNA™型1.5T MRI系统(美国GE公司)及适配8通道膝关节表面线圈。指导患者呈仰卧位,下肢自然伸直,脚先进,将膝关节放于线圈内。行常规T1加权成像(T1WI)、T2加权成像及质子加权成像(PDWI)序列以及MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列扫描,具体参数见表1。

【第一作者】左磊,男,主治医师,主要研究方向:骨科。E-mail: 292887687@qq.com

【通讯作者】张武,男,主治医师,主要研究方向:核磁共振影像学。E-mail: 262386653@qq.com

表1 不同序列参数设置

参数	T1WI	T2WI	PDWI	MGRGE	3D-FS-SPGR	3D-FIESTA-C
重复时间(TR)(ms)	550	3600	2340	650	20.4	5.1
回波时间(TE)(ms)	28	79	25	2.9	13	1.8
视野(FOV)(mm)	220×220	220×220	220×220	220×220	220×220	220×220
层厚(mm)	5	5	5	5	2	2
间距(mm)	1	1	1	1	1	1

1.2.2 图像分析 将扫描获取影像图上传至GE ADW 4.6后处理工作站,由2名高年资(工作年限12年、14年)影像医师在双盲下进行阅片,若意见相左,会同第3名医师商讨统一意见。

1.3 骨关节软骨损伤早期及分级标准 关节镜手术标准:参照Outerbridge软骨损伤分级标准^[8],具体见表2,MRI影像标准:依据Recht软骨损伤分级标准^[9],具体见表3。均以I~IV级视为骨关节软骨损伤发生,反之,视为骨关节软骨损伤未发生。

表2 Outerbridge软骨损伤分级标准

分级	关节镜下表现
0级	正常软骨,表面光滑
I级	软骨表面侵蚀,存在撕裂,撕裂深度<50%
II级	软骨表面变形且存在裂隙,深度≥50%,但未累及软骨下骨
III级	软骨存在裂隙,已暴露软骨下骨,但直径≤1cm
IV级	软骨全层损伤,软骨下骨暴露广泛,直径>1cm

表3 Recht软骨损伤分级标准

分级	关节镜下表现
0级	正常软骨,表面光滑,MRI混杂信号未见
I级	软骨表面不光滑,MRI内部信号不均匀
II级	关节表面不规则,其内异常>50%,骨质信号模糊,但软骨下低信号区轮廓正常,可见软骨下骨质增生或硬化
III级	软骨表面轮廓不规则,软骨层缺损≥50%,或软骨显示连续性中断,伴有低信号变形、下陷
IV级	软骨全层损伤,且直径1cm以上软骨出现低信号中断、消失

1.4 观察指标 测定各序列软骨信噪比(CNR)评估软骨成像质量,以膝关节镜手术为“金标准”,比对MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列对膝关节软骨损伤早期及分级的诊断价值。

1.5 统计学方法 采用SPSS 22.0软件行统计处理,计数资料以“%”表示,行 χ^2 检验,经受试者工作曲线(ROC)评估MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列早期识别膝关节软骨损伤诊断价值,行Kappa检验行一致性分析,若Kappa值>0.8,提示一致性较佳,若Kappa值处于0.4~0.8之间,提示一致性一般,若Kappa值<0.4,提示一致性差。若P<0.05,差异有统计学意义。

均行6区域(髌骨、股骨内/外踝、股骨滑车及胫骨内/外侧平台)扫描,48例急性膝关节外伤住院患者共576处软骨,经关节镜手术结果显示正常软骨324处(56.25%),异常软骨252处(43.75%),其中I级、II级、III级、IV级依次为36、75、60、81处。

2.2 各序列软骨信噪比比较 MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列CNR比较,差异有统计学意义(P<0.05),且3D-FIESTA-C序列CNR高于MGRGE、3D-FS-SPGR序列,3D-FS-SPGR序列CNR高于MGRGE序列(P<0.05),见表4。

2.3 不同MRI序列早期识别膝关节软骨损伤诊断价值 MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列均可用于膝关节软骨损伤早期诊断,AUC值0.972~0.989不等,尤以3D-FIESTA-C序列诊断价值最高,敏感度、特异度依次为98.41%、99.38%,见表5及图1。

2 结果

2.1 关节镜手术结果 根据膝关节解剖特征,每例患者2个膝关节

表4 不同术前分化程度增强CT纹理参数比较

序列	CNR
MGRGE(n=48例)	30.12±7.54
3D-FS-SPGR(n=48例)	47.39±8.25 ^a
3D-FIESTA-C(n=48例)	112.71±18.42 ^{ab}
F	588.667
P	0.000

注:与MGRGE比较,a: P<0.05;与3D-FS-SPGR比较,b: P<0.05。

表5 不同序列早期识别膝关节软骨损伤诊断价值

指标	ROC曲线			敏感度(%)	特异度(%)
	AUC	95%CI	P		
MGRGE	0.972	0.956~0.98	0.000	96.03(242/252)	98.46(319/324)
3D-FS-SPGR	0.981	0.968~0.995	0.000	97.22(245/252)	99.07(321/324)
3D-FIESTA-C	0.989	0.979~0.999	0.000	98.41(248/252)	99.38(322/324)

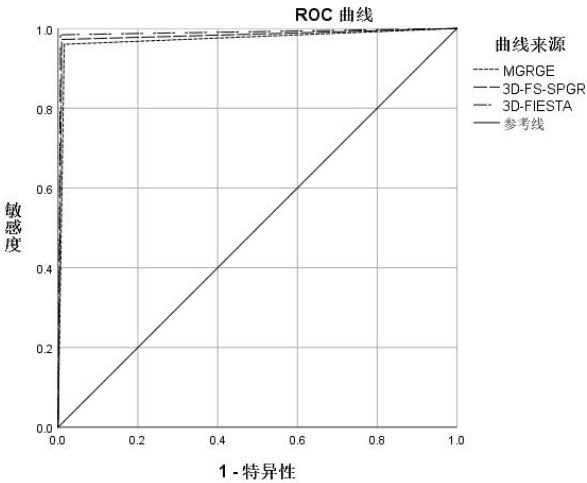


图1 不同序列早期识别膝关节软骨损伤诊断价值ROC结果。对角线由绑定值生成。

2.4 不同MRI序列评估膝关节软骨损伤分级诊断价值 MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列均可用于膝关节软骨损伤分级诊断，尤以3D-FIESTA-C序列诊断价值最高，准确率为96.53%，Kappa值为0.892，见表6~8。

表6 MGRGE序列评估膝关节软骨损伤分级诊断价值

检查序列		关节镜手术					合计	准确率	Kappa值
		0级	I 级	II 级	III级	IV级			
MGRGE	0级	319	10	0	0	0	329	89.76	0.691
	I 级	5	20	9	0	0	34		
	II 级	0	6	51	6	0	63		
	III级	0	0	15	50	4	69		
	IV级	0	0	0	4	77	81		
合计		324	36	75	60	81	576		

表7 3D-FS-SPGR序列评估膝关节软骨损伤分级诊断价值

检查序列		关节镜手术					合计	准确率	Kappa值
		0级	I 级	II 级	III级	IV级			
3D-FS-SPGR	0级	321	7	0	0	0	328	93.75	0.807
	I 级	3	25	5	0	0	33		
	II 级	0	4	61	4	0	69		
	III级	0	0	9	54	2	65		
	IV级	0	0	0	2	79	81		
合计		324	36	75	60	81	576		

表8 3D-FIESTA-C序列评估膝关节软骨损伤分级诊断价值

检查序列	关节镜手术					合计	准确率	Kappa值
	0级	I 级	II 级	III级	IV级			
3D-FIESTA-C 0级	322	4	0	0	0	326	96.53	0.892
I 级	2	30	3	0	0	35		
II 级	0	2	68	3	0	73		
III级	0	0	4	56	1	61		
IV级	0	0	0	1	80	81		
合计	324	36	75	60	81	576		

3 讨 论

膝关节关节软骨于关节表面附着，在维持膝关节活动上发挥有重要作用。在膝关节损伤发生早期，典型表现为关节软骨损伤。若未及时发现并进行针对性治疗，膝关节损伤可进一步发展退行性病变，可伴有运动功能受限、持续关节疼痛等，可对患者日常生活造成巨大影响^[10-11]。由此，加强膝关节早期诊断具有较强现实意义。

关节镜检查为膝关节软骨损伤诊断“金标准”，可清晰显示关节软骨形态，进而明确诊断。但该技术属有创检查，且操作相对困难，难以在临床中广泛应用。MRI属无创检查技术，通过特征信号可对软骨结构、形态以及组分等情况进行准确反映，现已成为膝关节软骨损伤诊断常用手段^[12-13]。不过MRI所用序列种类较多，不同序列下获得的软骨影像图各具特征^[14]，具体何种序列更有利于膝关节软骨损伤早期诊断及分级评估尚有待进一步深入研究。除常规序列外，现今常用新式序列主要有MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C三种，MGRGE是应用于全身各部位

的T2梯度回波序列，通过在同一重复时间采集多个时间点的回波数获得重T2加权图像，利于关节表面缺损显示及内部细微改变观察^[15]；3D-FS-SPGR序列由GE公司开发的，可在极短时间内成像获得清楚的T2/T1图像，可较好避免运动伪影干扰，对于关节软骨及周围组织(骨髓、关节液、韧带、脂肪及半月板等)显示效果较佳^[16]；至于3D-FIESTA-C为“黑血法”序列，是一种完全平衡的稳态一致成像脉冲序列，可为关节软骨分层提供重要信息^[17]。由本文结果显示：相比于MGRGE、3D-FS-SPGR序列，3D-FIESTA-C序列CNR更高，提示应用3D-FIESTA-C序列检查膝关节软骨损伤分辨率高，成像质量更高。原因在于3D-FIESTA-C是在Balabce-SSFP序列基础上优化改进而来，可克服磁敏感效应形成的条状伪影干扰，通过组织间隙含水脂肪信号T2/T1高信号对比以及软组织T2/T1低信号对比，故软骨及周围组织具有良好对比度^[18]。此外，MRI关于膝关节软骨损伤早期诊断及分级评估主要依靠膝关节软骨分层结构信号改变及形态变化。由本

文结果显示：MGRGE、3D-FS-SPGR及3D-FIESTA-C序列用于膝关节软骨损伤早期诊断及分级评估均有一定诊断价值，尤以3D-FIESTA-C序列诊断价值最高，具体分析^[19]：MGRGE序列可清晰显示关节软骨3层结构，表层呈高信号，与关节液接近，中层呈高信号，但较表明信号稍低，深层呈低信号，信号强度弱于后骨髓。但部分膝关节软骨损伤患者内部出现水肿改变，可呈异常高信号，由此可能会导致诊断偏差。3D-FS-SPGR序列则可显示关节软骨4层结构，表层呈高信号，较关节液稍高；中层呈稍低信号，稍高于关节液，较表层软骨稍低，深层为高信号，与表层软骨相似，内侧为钙化带，呈低信号，但边界与骨髓信号相当，区分困难，由此诊断亦存在一定偏差。3D-FIESTA-C序列可表现为相对明显的3层灰阶结构，以髌软骨为例，于外层滑动呈稍高信号，厚度较薄，信号强度低于关节液，但较抑脂后骨髓更高，中间层呈梭形，信号强度较骨髓稍高，较表层软骨稍低，内层表现为附着于骨表面的低信号带，强度较抑脂后骨髓低。由于CNR高，软骨与周围组织对比更为清楚，可尽量避免诊断偏倚出现。这与陈巧一^[20]等一项回顾性研究(共纳入366例膝关节软骨损伤患者)证实FIESTA-C、FS-3D-SPGR及MERGE序列对软骨损伤分级诊断Kappa值依次为0.892、0.787及0.556有一定类似。但本文存在一定局限：(1)以关节镜手术为“金标准”，但不同MRI序列可发现关节镜手术结果所不能显示的膝关节软骨损伤Ⅰ级的MRI异常信号改变，故对于膝关节软骨损伤Ⅰ级准确性有一定偏倚；(2)不同序列下参数设置不同，不排除未能调整至最佳参数获取影像图来分析的可能，亦可能对研究结论产生干扰。

综上所述：MRI的3D-FIESTA-C序列扫描对急性膝关节外伤患者膝关节软骨损伤成像质量较高，有助于膝关节软骨损伤的早期识别及分级评估。

参考文献

[1]朱志敏,李华,陈轶,等.MRI STIR序列诊断膝关节软骨损伤的效能[J].中国CT和MRI杂志,2023,21(11):150-152.

[2]Singh A,Mantebea H,Badar F,et al.Assessment of articular cartilage degradation in response to an impact injury using μ MRI[J].Connect Tissue Res,2024,65(2):146-160.

[3]Li C,Zheng Z.Cartilage targets of knee osteoarthritis shared by both genders[J].Int J Mol Sci,2021,22(2):569.

[4]张红伟,张云翔,王恩锋,等.MRI PDWI-FS序列在膝关节半月板损伤诊断和分级中的应用价值[J].中国CT和MRI杂志,2023,21(10):162-164.

[5]董宝明,张蕾,孔延亮,等.基于磁共振MERGE序列膝关节软骨厚度的定量研究[J].实用放射学杂志,2016,32(1):75-79.

[6]居敏昊,谢建强,姜亦伦,等.1.5T三维抗相梯度回波序列对膝关节软骨损伤的诊断价值分析[J].中国CT和MRI杂志,2017,15(2):122-124.

[7]Zhang J,Hao D,Duan F,et al.The rotating stretched curved planar reconstruction of 3D-FIESTA MR imaging for evaluating the anterior cruciate ligament of the knee joint[J].Magn Reson Imaging,2019,55:46-51.

[8]Outerbridge RE.Further studies on the etiology of chondromalacia patellae[J].J Bone Joint Surg Br,1964,46:179-90.

[9]Recht MP,Kramer J,Marcelis S,et al.Abnormalities of articular cartilage in the knee:analysis of available MR techniques[J].Radiology.1993,187(2):473-478.

[10]Hou D,Lu L,Tao R.Hsa-circ-0007482 Promotes proliferation and differentiation of chondrocytes in knee osteoarthritis[J].Cartilage,2024,19476035241250198.

[11]Fongsodsri K,Tiyasatkulkovit W,Chaisri U,et al.Sericin promotes chondrogenic proliferation and differentiation via glycolysis and Smad2/3 TGF- β signaling inductions and alleviates inflammation in three-dimensional models[J].Sci Rep,2024,14(1):11553.

[12]Klein E,Solomon D.Editorial commentary:arthroscopy is the gold standard for diagnosis of meniscal ramp lesions:magnetic resonance imaging also may be helpful[J].Arthroscopy,2023,39(3):600-601.

[13]Zaric O,Juras V,Szomolanyi P,et al.Frontiers of sodium MRI revisited:from cartilage to brain imaging[J].J Magn Reson Imaging,2021,54(1):58-75.

[14]石琴,张贵军.不同MRI序列对膝关节软骨损伤诊断敏感度及特异度分析[J].医学影像学杂志,2019,29(5):884-887.

[15]赵殿江,张璇,张春柱,等.3D MERGE序列在膝关节准动态运动轨迹模拟中的应用[J].临床放射学杂志,2017,36(2):260-263.

[16]Zhang Y,He X,Li J,et al.An MRI study of the tibial nerve in the ankle canal and its branches:a method of multiplanar reformation with 3D-FIESTA-C sequences[J].BMC Med Imaging,2021,21(1):51.

[17]Yang L,Niu D,Bai Z,et al.Application of 3D-FS-SPGR imaging combined synovial fluid GGCX detection in the evaluation of knee osteoarthritis[J].Adv Clin Exp Med,2020,29(6):701-706.

[18]罗伍星,张堃.3D-FIESTA-C序列显示下腰痛患者腰椎脊神经-椎间盘的图像质量[J].实用放射学杂志,2019,35(11):1845-1847,1877.

[19]Thakur U,Gulati V,Shah J,et al.Anterior cruciate ligament reconstruction related complications:2D and 3D high-resolution magnetic resonance imaging evaluation[J].Skeletal Radiol,2022,51(7):1347-1364.

[20]陈巧一,罗华,唐光才.膝关节软骨损伤磁共振扫描序列优化及流行病学研究[J].重庆医学,2018,47(35):4482-4486.

(收稿日期：2024-11-27) (校对编辑：韩敏求、姚丽娜)