

· 论著 ·

MRI三维超短回波时间双回波脉冲序列联合增强评估前交叉韧带重建术后肌腱恢复*

李 慧*

厦门大学附属福州第二医院放射科 (福建 福州 350007)

【摘要】目的 探讨MRI三维超短回波时间双回波脉冲序列(d-UTE)联合增强评估前交叉韧带重建术(ACLR)后肌腱恢复情况。方法 选取厦门大学附属福州第二医院于2020年1月至2021年7月收治疑似ACL断裂损伤患者154例进行研究, 均行d-UTE联合增强、关节镜检查, 比对关节镜检查“金标准”, 评估d-UTE检查诊断效能及分度准确性及一致性, 并对关节镜检查确诊ACL完全断裂(III度)患者实施ACLR, 术后1个月、3个月、6个月、12个月进行常规MRI、d-UTE联合增强检查, 测定患侧、健侧前交叉韧带T2*值、短弛豫值(T2*s)、长弛豫值(T2*I)及短弛豫组水组分比例(FF), 分析肌腱恢复情况。结果 经关节镜检查, 154例疑似ACL断裂损伤患者中有142例确诊, I度61例、II度49例、III度32例, 12例ACL正常; 经d-UTE联合增强检查诊断ACL断裂损伤灵敏度、特异度及准确性分别为97.18%、91.67%及96.75%, 且经分度一致性结果显示, 准确性为88.02%、Kappa值为0.81%; 20例ACL完全断裂患者进行ACLR术治疗, 除T2*I外, 术后1个月、3个月、6个月及12个月患侧T2*、T2*s均高于健侧, FF则低于健侧($P<0.05$); 且健侧T2*、T2*s、T2*I、FF随时间变化无明显差异, 除T2*I外, 患侧随时间变化T2*、T2*s均有降低, FF有一定提高($P<0.05$)。结论 d-UTE联合增强检查诊断ACL断裂损伤具有较高价值, 且经ACLR术后测定T2*、T2*s、FF等定量指标可准确评估肌腱恢复。

【关键词】ACL断裂损伤; 前交叉韧带重建术; 关节镜; MRI; 超短回波时间双回波脉冲序列

【中图分类号】R681.3

【文献标志码】A

【基金项目】福州市科技计划项目(AFZ2020WS01010146)

DOI:10.3969/j.issn.1009-3257.2022.07.032

MRI Three-Dimensional Ultra-Short Echo Time Double Echo Pulse Sequence Combined with Enhanced Evaluation of Tendon Recovery after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction*

LI Hui*

Department of Radiology, Fuzhou Second Hospital, Xiamen University, Fuzhou 350007, Fujian Province, China

Abstract: *Objective* To investigate the MRI three-dimensional ultra-short echo time double-echo pulse sequence (d-UTE) combined with enhanced assessment of tendon recovery after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR). *Methods* Selected Fuzhou Second Hospital affiliated to Xiamen University from January 2020 to July 2021 admitted to the study of 154 patients with suspected ACL rupture injury. All patients underwent d-UTE combined enhancement, arthroscopy, and compared arthroscopy. "golden standards" to evaluate the diagnostic efficiency and accuracy and consistency of the d-UTE examination, and implement ACLR for patients with complete ACL rupture (degree III) diagnosed by arthroscopy, 1 month, 3 months, and 6 months after surgery, 12 months for routine MRI, d-UTE combined enhancement examination, determine the T2* value, short relaxation value (T2*s), long relaxation value (T2*I) and short relaxation of the affected side and the uninfected anterior cruciate ligament and the ratio of water component in Yu group (FF) was used to analyze the recovery of tendons. *Results* Through arthroscopy, 142 of the 154 patients with suspected ACL rupture were diagnosed, 61 cases were grade I, 49 cases were degree II, 32 cases were degree III, and 12 cases had normal ACL. The ACL rupture was diagnosed by d-UTE combined with enhanced examination. The damage sensitivity, specificity and accuracy were 97.18%, 91.67% and 96.75%, respectively, and the results of the indexing consistency showed that the accuracy was 88.02% and the Kappa value was 0.81%; 20 patients with partial and complete ACL rupture underwent ACLR in surgical treatment, except T2*I, T2* and T2*s of the affected side were higher than those of the unaffected side at 1 month, 3 months, 6 months, and 12 months after the operation, while FF was lower than that of the unaffected side ($P<0.05$); and there is no significant difference in the changes of T2*, T2*s, T2*I, and FF of the uninfected side over time. Except for T2*I, the changes of T2* and T2*s of the affected side over time have decreased, and FF has a certain increase ($P<0.05$). *Conclusion* d-UTE combined with enhanced examination is of high value in diagnosing ACL rupture injury, and quantitative indicators such as T2*, T2*s, FF after ACLR operation can accurately assess tendon recovery.

Keywords: ACL Fracture Injury; Anterior Cruciate Ligament Reconstruction; Arthroscopy; MRI; Ultra-Short Echo Time Double Echo Pulse Sequence

前交叉韧带(ACL)系膝关节重要稳定结构, 可受运动、撞击等因素导致韧带牵拉过度造成断裂损伤^[1]。而针对ACL断裂严重患者, 行前交叉韧带重建术(ACLR)为有效手段, 但ACLR术后肌腱移植恢复评估尚缺乏敏感工具。既往使用的Lachman试验、轴移试验、单腿跳跃试验、国际膝关节文献委员会膝关节评估表(IKDC)、美国特种外科医院膝关节评分(HSS)等评估均有一定不足^[2]。考虑到肌腱移植需经历缺血

坏死、细胞增殖、再血管化及胶原纤维塑形的过程, 采用于肌肉骨骼应用广泛的磁共振成像(MRI)技术随诊监测为最佳策略^[3]。但常规MRI成像诊断实质依赖的是病变组织长T₂信号, 当用于膝关节韧带、肌腱等短T₂组织检测时, 因信号衰减迅速, 甚至于信号接收模式进入前便已衰减到0, 由此表现为无或低信号, 这对于ACLR术后肌腱恢复评估是不利的^[4]。而随短T₂成分成像序列的研发, 通过3D径向K空间采集、高采样

【第一作者】李 慧, 女, 主治医师, 主要研究方向: 骨肌系统影像诊断。E-mail: 154450239@qq.com

【通讯作者】李 慧

效率及良好运动鲁棒性的MRI三维超短回波时间双回波脉冲序列(d-UTE)已解决常规MRI的局限性^[5]。且由相关研究证实测定d-UTE的T₂*等指标可定量评估ACLR术后肌腱移植恢复情况^[6]。而我国应用d-UTE技术稍迟,国内研究相对缺乏,兹本院以此为切入点展开研究,作报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取厦门大学附属福州第二医院于2020年1月至2021年7月收治疑似ACL断裂损伤患者154例进行研究,均行d-UTE动态增强、关节镜手术检查。

纳入标准:年龄18~60岁;均因外界创伤收治入院;均采用取腓绳肌腱ACLR;期间未行其他治疗患者;排除标准:年龄≥60岁老年人群;合并膝关节感染或其他病变;不符合MRI检查适应症或间隔3个月MRI复查无法耐受;对比剂过敏。其中,男54例、女26例,年龄18~58岁,平均年龄(32.15±5.24)岁。研究经医院伦理委员会准予实施,所纳入对象及家属均知情同意。

1.2 方法 患者均行常规MRI及d-UTE检查。仪器采用西门子Skyra 3.0T MRI仪,膝关节专用线圈。自膝关节前交叉韧带肌腱行常规矢状面T₁W1、T₂W1、T₂W1抑制脂肪及d-UTE序列平扫及增强扫描,序列相关参数设置:(1)T₁W1:TR 600ms,TE:17ms,层厚3mm,FOV:80×80×20mm,矩阵:68×66;(2)T₂W1及T₂W1抑制脂肪:TR:2500ms,TE:80ms,层厚3mm,FOV:100×100×39mm,矩阵:124×105;(3)d-UTE:TR:7.9ms,TE:0.08、3.2ms,层厚2.4mm,FOV:80×80×80~140×140×140mm,矩阵:88×88~124×124,反转角8~12°、延时固定2s。于平扫结束后,行d-UTE增强扫描,于前交叉韧带撕裂损伤处行0.1mL/kg钆喷酸葡胺注射液【国药准字:J20080063,厂商:拜耳先灵医药】匀速推注,控制时间5~8s。设置15个序列行动态扫描,每个序列扫描时间约55s,整体扫描时间850~900s。为凸显前交叉韧带肌腱组织短T₂成分,将d-UTE序列联合增强扫描获取原始图像中第一、二个回波系列图相减,用以去除长T₂成分信号,最终获取由短T₂成分信号构成的超短回波剪影差异图(SUTED),并采用最大强度投影手段对SUTED进行重建层厚2mm三维重建,获取肌腱三维空间图。

1.3 观察指标 统计d-UTE检查前ACL连续性、形态、信号及走行等特征,并根据ACL断裂损伤情况进行分度:(1)Ⅰ度:ACL连续性完整,韧带走行正常,呈低信号,其内见有点状、线条样信号增高影;(2)Ⅱ度:ACL部分撕裂,ACL局限性增粗,韧带走行正常,轮廓模糊,呈信号增高影;(3)Ⅲ度:ACL完全撕裂,韧带结构消失,连续性中断,呈信号增高影。比对关节镜检查“金标准”,评估d-UTE检查诊断效能及分度准确性及一致性,并对关节镜检查确诊ACL完全断裂(Ⅲ度)患者实施ACLR,于术后1个月、3个月、6个月、12个月进行常规MRI、d-UTE联合增强检查,测定患侧、健侧前交叉韧带T₂*值、短弛豫值(T₂*s)、长弛豫值(T₂*l)及短弛豫组水组分比例(FF),分析肌腱恢复情况。

1.4 统计学方法 应用SPSS 22.0软件作统计分析,以“%”表示计数资料,行 χ^2 检验,以“ $\bar{x} \pm s$ ”表示计量资料,行t检验,行Kappa值分析d-UTE检查与关节镜检查分度一致性,若P<0.05,差异有统计学意义。

2 结果

2.1 关节镜检查结果 经关节镜检查,154例疑似ACL断裂损伤患者中有142例确诊,Ⅰ度61例、Ⅱ度49例、Ⅲ度32例,12例ACL正常,见表1。

表1 d-UTE联合增强检查分度准确性及一致性

d-UTE联合增强	关节镜			合计	准确性	Kappa值
	Ⅰ度	Ⅱ度	Ⅲ度			
Ⅰ度	52	5	0	57	88.02%	0.81
Ⅱ度	9	43	2	54		
Ⅲ度	0	1	30	31		
合计	61	49	32	142		

2.2 d-UTE联合增强检查影像特征 经d-UTE联合增强检查影像特征显示:正常ACL呈连续性高信号,且ACL内部纤维走行正常;部分断裂ACL表现为局部增粗,内部纤维束部分断裂;完全断裂ACL表现为弥漫性增粗,走行异常,内部纤维束全部断裂,模糊。典型特征见图1所示。

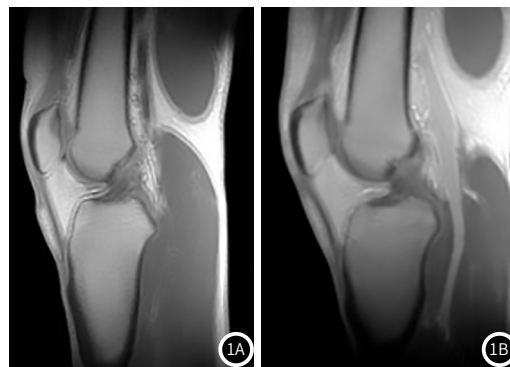


图1 男,26岁,左膝关节外伤病史。图1A: D-UTE平扫显示左膝前交叉韧带部分增粗模糊;图1B: 增强扫描显示左膝前交叉韧带部分纤维连续性中断、模糊。

2.3 d-UTE联合增强检查诊断效能 比对关节镜检查“金标准”,经d-UTE联合增强检查诊断ACL断裂损伤灵敏度、特异度及准确性分别为97.18%、91.67%及96.75%,且经分度一致性结果显示,准确性为88.02%、Kappa值为0.81%,见表2。

2.4 经ACLR术后患侧、健侧T₂*、T₂*s、T₂*l、FF结果 20例ACL部分、完全断裂患者进行ACLR术治疗,除T₂*l外,于术后1个月、3个月、6个月及12个月患侧T₂*、T₂*s均高于健侧,FF则低于健侧(P<0.05);且健侧T₂*、T₂*s、T₂*l、FF随时间变化无明显差异,除T₂*l外,患侧随时间变化T₂*、T₂*s均有降低,FF有一定提高(P<0.05),见表3。

3 讨论

ACL是连接胫骨、股骨重要支点,可承担机体运动约86%限制力,由此较易因各类因素作用形成ACL断裂损伤。对此,

表2 d-UTE联合增强检查诊断效能

d-UTE联合增强	关节镜		合计	灵敏度	特异度	准确率
	前交叉韧带断裂损伤	非前交叉韧带锻炼损伤				
前交叉韧带断裂损伤	138	1		97.18%	91.67%	96.75%
非前交叉韧带锻炼损伤	5	11				
合计	142	12	154			

表3 经ACLR术后患侧、健侧T2*、T2*s、T2*l、FF结果

侧别	时间	T2*	T2*s	T2*l	FF
患侧(n=20例)	术后1个月	3.01±0.12 ^a	1.93±0.06 ^a	22.68±2.73	73.85±0.32 ^a
	术后3个月	2.77±0.11 ^{a,b}	1.79±0.05 ^{a,b}	22.73±2.86	75.23±0.26 ^{a,b}
	术后6个月	2.52±0.08 ^{a,b}	1.66±0.05 ^{a,b}	22.72±2.88	76.55±0.19 ^{a,b}
	术后12个月	2.35±0.08 ^{a,b}	1.59±0.04 ^{a,b}	22.89±2.93	77.44±0.15 ^{a,b}
健侧(n=20例)	术后1个月	2.00±0.06	1.50±0.03	22.92±3.04	79.99±0.12
	术后3个月	2.02±0.05	1.51±0.02	22.96±3.01	79.97±0.11
	术后6个月	2.02±0.04	1.50±0.03	23.04±2.97	80.02±0.12
	术后12个月	2.01±0.06	1.49±0.03	23.01±2.98	80.01±0.13

注：^a表示与相应时点与健侧比较，差异具有统计学意义(P<0.05)；^b表示与患侧术前1个月比较，差异具有统计学意义(P<0.05)。

行关节镜检查为诊断“金标准”，但该方式属侵入性操作，于临床广泛应用有所制约。而凭借多方位成像、高空间分辨率等优势MRI检查为ACL断裂损伤诊断重要手段，尤以d-UTE联合增强检查更可明确韧带内部纤维束走行及信号强度。

由本文结果显示，比对关节镜“金标准”，经d-UTE联合增强检查灵敏度、特异度及准确率均高于90.0%，且分度诊断准确率达88.02%，Kappa值为0.81。提示ACL断裂损伤应用d-UTE联合增强检查具有较高诊断价值。这与张南等^[7]研究分析162例ACL断裂损伤患者应用MRI诊断，灵敏度96.01%、特异度95.68%呈较大相关性。但本研究仍有少数假阳性、假阴性病例存在，可能由既往病史、ACL结构、设备及运动伪影、骨髓附着点容积效应、邻近组织损伤等因素干扰所致。

经确认为ACL断裂损伤III度患者常采用ACLR进行治疗，由Fukuda T等^[8]分析8例腓绳肌腱自体移植重建的原发性单侧ACL断裂患者研究证实，由密集胶原蛋白、蛋白多糖等成分构成的肌腱移植经ACLR会经历韧带化及移植/骨界面腱骨愈合过程。且由Chu CR等^[9]系统阐述了韧带化的三个阶段：即早期炎症阶段(4周)、血运重建阶段(4~12周)及后期重塑阶段(12周以后)。且肌腱移植成熟多于术后9个月开始。故对于术后肌腱移植恢复情况评估有助于最佳康复方案指导实施。而据Liu J等^[10]研究通过尸体及活检组织证实，ACL断裂损伤系胶原蛋白浓度降低所致，而通过测定胶原蛋白结合水、游离水比例可一定程度反映肌腱损伤。由于定量指标T2*及T2*s可反映结合水，其中，T2*信号成分来源于胶原蛋白结合水，T2*s信号成分来源于胶原基质结合水，T2*l则反映韧带和肌腱游离水以及反映结合水组分比例的FF，对此，本文通过d-UTE联合增强检查测定经ACLR术后1个月、3个月、6个月及12个月T2*、T2*s、T2*l、FF水平，结果显示：患侧T2*、T2*s高于健侧，FF低于健侧，T2*l则无明显差异。于术后1个月居最高水平的T2*、T2*s(约为健侧的1.5倍、

1.3倍)，随时间逐渐降低，FF则见一定程度上升。可知检测d-UTE联合增强检查中T2*、T2*s、FF指标变化可较好反映肌腱移植恢复情况。这与上述ACLR术后肌腱移植组织学恢复机制时间相一致。且与Titchenal MR等^[11]认为ACLR术后短期内急性炎症反应，肌腱移植T2*为健康人群的1.5倍有一定类似性。而由国内陈宁等学者^[12]观点认为前交叉韧带病变胶原蛋白结构及含量、含水量均可引起T2*的变化亦证实本文结论准确性。

由于上述指标测定可受脂肪高信号、运动伪影、魔角效应、信噪比、翻转角、采集校正等因素干扰^[13-15]，为保证测量准确性，本文选择ACL胫骨部位插入，使其与魔角对齐，可最大限度降低内流物对T2*等指标测量的影响，且根据肌腱最佳加权因子0.3，调整d-UTE信噪比，并设置TE1 0.08、翻转角8~12°、延时2s，在信噪比较佳情况下获取组织轮廓清楚、高分辨率高影像图，并对梯度涡流及梯度延迟等因素导致的K空间轨迹失真于采样或重建时进行校正，以避免图像伪影出现，由此，本研究T2*、T2*s、T2*l、FF等定量指标真实、可靠，研究结论信服力较高。

综上所述，d-UTE联合增强检查诊断ACL断裂损伤具有较高价值，且经ACLR术后测定T2*、T2*s、FF等定量指标可准确评估肌腱恢复情况，可为后续最佳康复方案制定及实施提供重要决策。

参考文献

- [1] 张懿,姚婉贞,张晏境,等.膝关节肌腱和韧带的MRI新技术应用进展[J].国际医学放射学杂志,2020,43(6):711-715.
- [2] Chai F,Wan F,Jiang J,et al.Micro-scale assessment of the postoperative effect of anterior cruciate ligament reconstruction preclinical study using a 7.1T micro-magnetic resonance imaging[J].Exp Ther Med.2019,17(1):214-220.

(下转第101页)

- [3] 王博, 潘诗农. MRI评价前交叉韧带重建术后移植植物成熟度的研究进展[J]. 国际医学放射学杂志, 2020, 43(5): 582-585, 595.
- [4] 马立恒, 陈应明, 张朝晖, 等. 正常兔膝关节的三维UTE动态增强MRI实验研究[J]. 放射学实践, 2014(7): 766-769.
- [5] Covey D C, Sandoval K E, Riffenburgh R H. Contrast-enhanced MRI evaluation of bone-patellar tendon-bone and hamstring ACL autograft healing in humans: A prospective randomized study[J]. Orthop J Sports Med, 2018, 6(10): 2325967118800298.
- [6] Chu C R, Williams A A, West R V, et al. Quantitative magnetic resonance imaging UTE-T2* mapping of cartilage and meniscus healing after anatomic anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Am J Sports Med. 2014, 42(8): 1847-1856.
- [7] 张南, 钱学江, 刘中冲, 等. MRI对膝关节前交叉韧带损伤诊断的假阳性及假阴性的病例分析[J]. 医学影像学杂志, 2017, 27(5): 887-891.
- [8] Fukuda T, Wengler K, Tank D, et al. Abbreviated quantitative UTE imaging in anterior cruciate ligament reconstruction. BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(1): 426.
- [9] Chu C R, Williams A A. Quantitative MRI UTE-T2* and T2* Show Progressive and Continued Graft Maturation Over 2 Years in Human Patients After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction[J]. Orthop J Sports Med. 2019, 7(8): 2325967119863056.
- [10] Liu J, Nazaran A, Ma Y, et al. Single- and Bicomponent Analyses of T2* Relaxation in Knee Tendon and Ligament by Using 3D Ultrashort Echo Time Cones (UTE Cones) Magnetic Resonance Imaging[J]. Biomed Res Int. 2019, 2019: 8597423.
- [11] Titchenal M R, Williams A A, Chehab E F, et al. Cartilage subsurface changes to magnetic resonance imaging UTE-T2* 2 Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Correlate With Walking Mechanics Associated With Knee Osteoarthritis[J]. Am J Sports Med. 2018, 46(3): 565-572.
- [12] 陈宁, 袁慧书. 超短回波时间磁共振成像应用进展[J]. 中国介入影像与治疗学, 2016, 13(6): 378-381.
- [13] Chaudhari A S, Sveinsson B, Moran C J, et al. Imaging and T₂ relaxometry of short-T₂ connective tissues in the knee using ultrashort echo-time double-echo steady-state (UTEDESS) [J]. Magn Reson Med. 2017, 78(6): 2136-2148.
- [14] 王超, 周波, 张志, 等. 超短回波时间成像k空间轨迹失真的校正[J]. 波谱学杂志, 2016, 33(4): 597-608.
- [15] 李莎, 张艺宝, 吴昊, 等. 核磁共振超短回波时间序列技术研究进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(1): 55-59.

(收稿日期: 2021-09-06)