

• 骨骼肌肉影像学 •

UTE- T_2^* 定量评估肩袖术后早期愈合情况的可靠性

谢玉雪, 陶虹月, 胡忆文, 张宇阳, 鹿蓉, 陈爽

(华中科技大学同济医学院附属同济医院 李小明)

【编者按】目前临床上,关节镜肩袖撕裂修补术后的评估多采用主观性很强的评分方法,而本研究推荐了一种新颖的磁共振成像技术——超短回波时间(UTE),UTE 能显示回波时间(TE)值非常短的组织信号,如骨皮质、肌腱、韧带及半月板等,用 UTE 技术评判肩袖术后的愈合情况无疑更为客观,因此该研究值得借鉴。

【摘要】目的:探讨超短回波时间(UTE)- T_2^* 技术评估关节镜下肩袖修复(ARCR)术后肩袖早期愈合情况的可行性。方法:搜集 65 例接受单侧 ARCR 术并于术后早期行 UTE- T_2^* 扫描的患者资料。2 名放射科医师和 1 名肩关节外科医师独立对术后肩袖影像进行观察评估,评估内容包括 Sugaya 分型和 T_2^* 值的测量。将冈上肌腱等分为外侧亚区(腱-骨愈合区)、中间亚区和内侧亚区,测量相应的 T_2^* 值。Sugaya 分型的观察者间和观察者内一致性采用 Kappa 检验;不同亚区 T_2^* 值的观察者间和观察者内一致性利用 Bland-Altman 法;外侧亚区 T_2^* 值与 Sugaya 分型的关联性采用 Pearson 相关分析。结果:Sugaya 分型的观察者间和观察者内均呈中等一致性(观察者间 Kappa=0.40~0.50,观察者内 Kappa=0.53~0.62);而不同亚区 T_2^* 值的观察者间和观察者内均达到高度一致性(观察者间 $r=0.82\sim0.89$,观察者内 $r=0.83\sim0.96$)。外侧亚区 T_2^* 值与 Sugaya 分型具有高度相关性($r=0.88, P<0.05$)。不同 Sugaya 分型的肩袖外侧亚区 T_2^* 值的方差分析及 LSD 两两多重比较显示:除 I 型和 II 型间 T_2^* 值无统计学差异($P>0.1$),其余各型两两比较 T_2^* 值均具有统计学差异(P 均 <0.05)。结论:与 Sugaya 分型的半定量评估相比,UTE- T_2^* 技术对术后肩袖愈合的定量评估具有更高的可重复性和临床可行性。

【关键词】肩袖撕裂;超短回波时间(UTE);磁共振成像

【中图分类号】R684.73; R445.2 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2020)02-0217-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2020.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Reliability of UTE- T_2^* in quantificative assessment of early healing after arthroscopic rotator cuff repair**

XIE Yu-xue, TAO Hong-yue, HU Yi-wen, et al. Department of Radiology, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China

【Abstract】Objective: The purpose of this study was to investigate the feasibility of UTE- T_2^* analysis of early-stage healing in patients after arthroscopic rotator cuff repair (ARCR). Methods: Sixty-five patients with unilateral ARCR who underwent UTE- T_2^* scan at early follow-ups were retrospectively analyzed. Sugaya classification and UTE- T_2^* measurement on postoperative MRI data were conducted by two radiologists and one surgeon independently. Repaired supraspinatus tendon was divided into lateral (tendon-bone healing zone), middle and medial subregions, and the corresponding T_2^* value was measured. The reliability of Sugaya classification was analyzed using Kappa analysis. The reliability of T_2^* values was analyzed by using the intra- and inter-observer correlation coefficients of Bland-Altman plots. Correlations between the T_2^* value of lateral subregion and Sugaya classification was analyzed using Pearson correlation coefficient. Results: The inter- and intra-observer agreement of Sugaya classification were moderate (inter Kappa=0.40~0.50, intra Kappa=0.53~0.62), whereas the

作者单位:200040 上海,复旦大学附属华山医院放射科

作者简介:谢玉雪(1992-),女,河南信阳人,硕士,主要从事骨关节创伤影像学的诊断研究工作。

通讯作者:陈爽, E-mail: shuang6895@aliyun.com

基金项目:国家重点研发计划资助(2018YFC2000205);国家自然科学基金(81671652)

inter- and intra-observer correlation coefficient regarding T_2^* values of different subregions were excellent (inter $r=0.82\sim0.89$, intra $r=0.83\sim0.96$). On the other hand, significant correlation was found between T_2^* values of lateral subregion and Sugaya classification ($r=0.88, P<0.05$). Variance analysis showed that there were significant differences in T_2^* values of lateral subregion for different types of Sugaya classification ($P<0.05$). LSD test showed that there was no significant difference in T_2^* values between type I and type II ($P>0.1$), while the remaining comparisons were significant (all $P<0.05$). **Conclusions:** The quantitative assessment of postoperative rotator cuff healing using UTE- T_2^* technique is more reproducible and clinically feasible in comparison to the semiquantitative assessment of Sugaya classification.

【Key words】 Rotator cuff tears; Ultrashort echo time; Magnetic resonance imaging

肩袖撕裂是最常见的肩部疾病,会导致肩部功能丧失,并引起巨大疼痛和不适。目前,关节镜下肩袖修复术(arthroscopic rotator cuff repair, ARCR)已成为症状性肩袖撕裂的主要治疗方法。然而,ARCR 术后发生肩袖再撕裂的几率仍然很高,因此准确地评估修复术后肌腱的愈合情况并进一步指导临床决策,尽可能避免或减少术后再撕裂的发生显得尤为重要。Sugaya 分型是目前临床上最常用的评价肩袖愈合情况的方法,但这种半定量形态学方法无法提供准确的评估数据。随着近年来磁共振技术的发展,采用 MRI 序列定量评估肌腱等短 T_2 组织成为可能,超短回波时间(ultrashort echo time, UTE)- T_2^* 技术就是代表之一^[1]。 T_2^* 值能够反映短 T_2 组织的含水量及胶原纤维等的改变,从而能检测术后早期愈合过程中的生化改变。 T_2^* 值的测量易受运动伪影、温度、水合作用、魔角效应和信噪比等诸多因素的影响^[2-4],因此保证测量的可重复性是获得真实 T_2^* 值的前提。本研究评估观察者间及观察者内 T_2^* 值测量的一致性,并与传统半定量 Sugaya 分型进行比较,探讨 UTE- T_2^* 技术定量评价修补术后肩袖早期愈合情况的可行性。

材料与方法

1.研究对象

搜集本院运动医学科 2016~2018 年由同 1 位主任医师施行 ARCR 手术的患者。纳入标准:①单纯冈上肌肌腱撕裂包括部分撕裂和小-中型全层撕裂^[5];②

术前症状持续时间 <12 个月。排除标准:①术前合并肩关节僵硬;②合并盂唇损伤;③患侧有肩关节手术史;④合并类风湿性关节炎或糖尿病等其他全身性疾病。最终 65 例患者纳入本研究。65 例患者中,单纯冈上肌肌腱部分撕裂 23 例,全层撕裂 42 例;患侧为右肩 29 例,左肩 36 例;男 25 例,女 40 例。症状持续时间为 (7.72 ± 2.86) 个月;平均随访时间 $9.83(4\sim14)$ 个月。男性患者的平均年龄为 (52.41 ± 13.78) 岁,女性为 (58.32 ± 9.33) 岁。本研究通过本院伦理审查委员会审核,所有参与者均签署知情同意书。

2.手术方法

全麻后常规进行肩关节活动度检查。关节镜置入并探查盂肱关节,然后将关节镜置入肩峰下间隙,清除肩峰下间隙滑膜组织,必要时切除肩峰下缘骨赘行肩峰成型术。清理损伤肩袖,大结节足印区去皮质化,采用双排缝合技术。所有患者均经过术后标准康复程序^[6]。

3.MRI 扫描

所有患者于术后早期行 MRI 检查。采用 GE Discovery MR 750 3.0T 磁共振扫描仪,选用 8 通道肩关节线圈。患者取仰卧位,肩关节中立位,上臂伸直与 B0 场平行,手掌朝上,用绑带固定以保证所有肩关节位置相同。MRI 扫描前,所有患者休息 2h 以上,以避免运动、康复训练活动造成的组织生化改变。扫描序列及参数见表 1。常规质子抑脂(PD-FS)序列用于术后肩袖半定量评估,UTE- T_2^* 序列用于术后肩袖的

表 1 MRI 扫描序列及参数

参数	斜冠状面/横轴面 PD-FS	斜矢状面 T_1 WI	斜冠状面 UTE- T_2^*
TR(ms)	2682	553	85.6
TE(ms)	42	1	0.032,3.1,6.8,10.2
视野(mm×mm)	180×180	200×200	140×140
激励次数(次)	2	2	1
层厚(mm)	4	4	2.4
层数	16	16	12
扫描时间(min:s)	1:31	1:57	5:24
带宽(Hz)	31.25	31.25	62.50

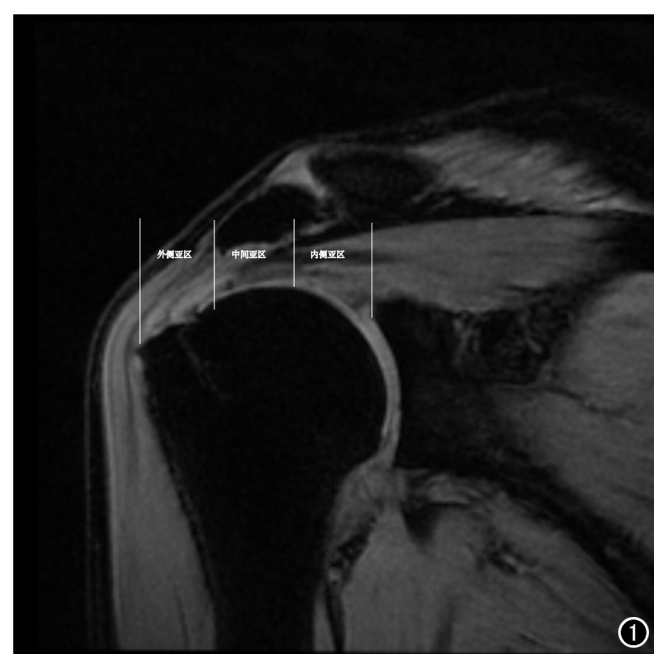


图 1 UTE- T_2^* 冈上肌腱的分区示意图。

定量评估。

4. MRI 评估方法

采用 Sugaya 分型^[7]进行术后肩袖愈合情况的半定量评估。I 型:肌腱完整,具有足够的厚度,在每个层面上均表现为均匀的低信号;II 型:有局部高信号,但各层面均有足够厚度的肌腱;III 型:肌腱厚度不足,但没有明显不连续性信号,提示部分层厚再撕裂;IV 型:在 1~2 个层面存在小的不连续性,提示小型全层再撕;V 型:存在 2 个层面以上的明显全层不连续信号,提示中到大型全层再撕。在 UTE- T_2^* 序列第 1 个回波图像上,选择冈上肌腱显示最佳层面勾画感兴趣区(ROI):肱骨大结节至肱骨头的最内侧面,然后将 ROI 复制到其它回波^[7]。将在不同回波图像上获取的信号拟合到一个单指数衰减模型上得出 T_2^* 值及 T_2^* map,并将 ROI 等分为 3 个亚区:外侧亚区(腱-骨愈合区),中间亚区(肌腱区域)和内侧亚区(肌腱-肌肉连接区)(图 1)^[8]。由 2 位放射科医师(观察者 1 是具有 12 年专业培训的骨科放射学主治医师,观察者 2 是具有 5 年专业培训

的骨科专科住院医师)和 1 位外科医生(观察者 3 是经过 4 年专业培训的肩关节外科住院医师)进行所有图像的评估。每位观察者先后进行 2 次测量(间隔 2 个月记忆洗脱期),所得数据用于计算观察者间、观察者内一致性。另观察者 1 和观察者 2 间隔 3 个月后再进行 1 次评估,Sugaya 分型存在分歧时经讨论达成一致意见,取两者平均测量值作为最终 T_2^* 值,所得 Sugaya 分型和 T_2^* 值进行相关性分析。

5. 统计学分析

采用 R 语言(版本 3.5.1)进行数据分析。Sugaya 分型的观察者间及观察者内一致性采用 Kappa 检验。 T_2^* 值的一致性使用 Bland-Altman 图法分析。不同 Sugaya 分型间的外侧亚区 T_2^* 值的差异采用单因素方差分析,具有统计学差异再利用 LSD 检验进行两两多重比较。外侧亚区 T_2^* 值与 Sugaya 分型间的关联性采用 Pearson 相关分析。 $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

结 果

术后随访过程中,65 例患者未发现 Sugaya V 型

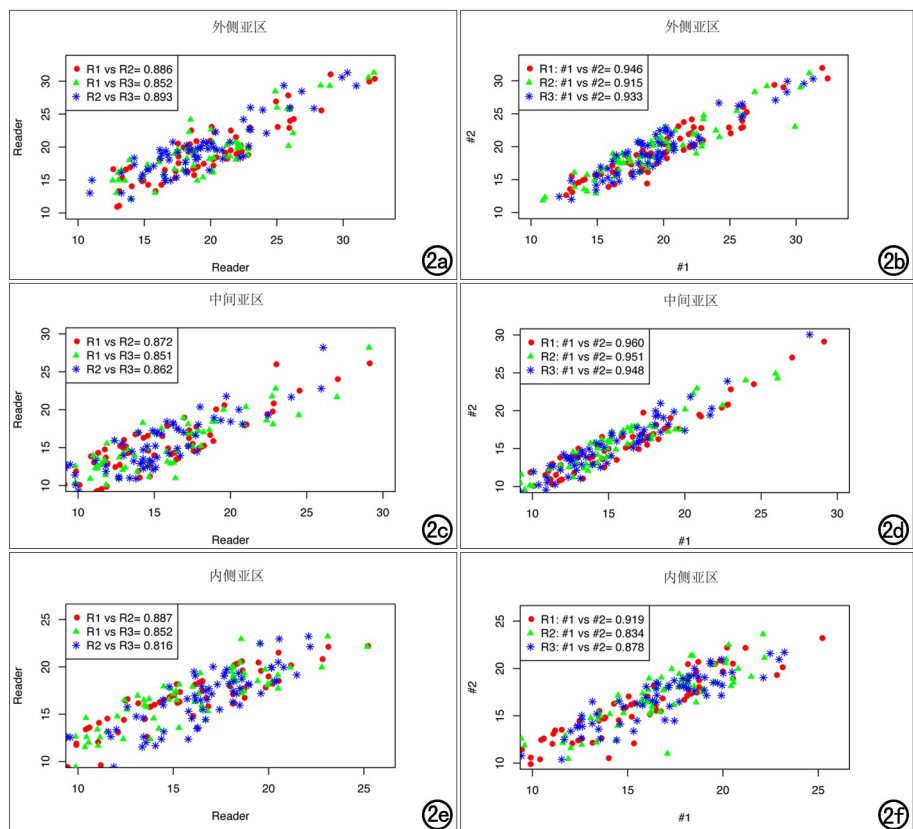


图 2 T_2^* 值的 Bland-Altman 图。a) 外侧亚区 T_2^* 值的观察者间相关系数图; b) 外侧亚区 T_2^* 值的观察者内相关系数图; c) 中间亚区 T_2^* 值的观察者间相关系数图; d) 中间亚区 T_2^* 值的观察者内相关系数图; e) 内侧亚区 T_2^* 值的观察者间相关系数图; f) 内侧亚区 T_2^* 值的观察者内相关系数图。

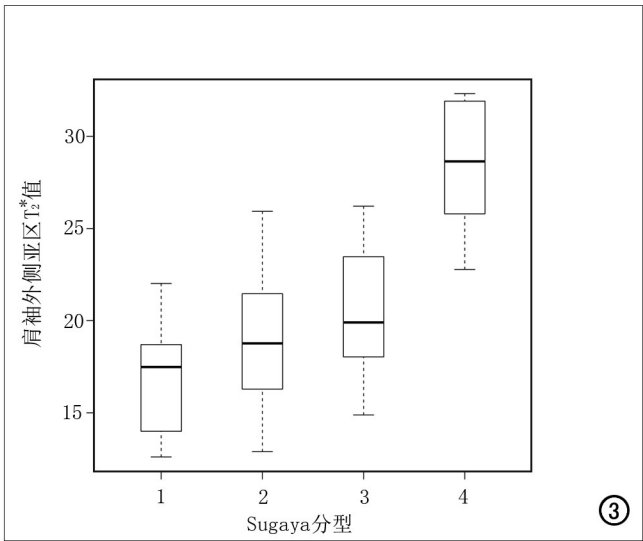


图 3 外侧亚区 T₂^{*} 值与 Sugaya 分型间相关性。

肩袖。Sugaya 分型显示出中度一致性(观察者间 Kappa 系数为 0.40~0.50,观察者内 Kappa 系数为 0.53~0.62)。而肩袖不同亚区 T₂^{*} 值的 Bland-Altman 图显示出观察者间(相关系数为 0.82~0.89)及观察者内(相关系数为 0.83~0.96)高度的一致性(图 2)。不同亚区 T₂^{*} 值的观察者间、观察者内偏倚和一致性界限见表 2。术后肩袖的 Sugaya 分型与外侧亚区 T₂^{*} 值表现出高度相关性($r=0.88, P<0.05$,图 3)。不同 Sugaya 分型的肩袖外侧亚区 T₂^{*} 值具有统计学差异($F=32.89, P<0.001$,图 4);两两组间的多重比较显示:I 型和 II 型间的 T₂^{*} 值无统计学差异($P>0.1$);I 型和 III 型、I 型和 IV 型、II 型和 III 型、II 型和 IV 型、III 型和 IV 型间 T₂^{*} 值差异均具有统计学意义(P 均 <0.05)。

讨 论

1. 研究背景

肩袖是由冈上肌腱、冈下肌腱、小圆肌腱和肩胛下肌腱组成的一组肌腱复合体,包绕在肱骨头周围,是维持肱骨头稳定和控制肩关节旋转的最重要结构,主要由水、胶原及蛋白聚糖组成。肩袖撕裂是肩关节最常见的运动损伤,据报道占肩部疾病的 70%^[9],其中冈

上肌腱受累最为常见。因此本研究纳入的肩袖撕裂均为冈上肌腱撕裂。目前,ARCR 术是肩袖撕裂的主要治疗方式,在影响肩袖术后结果的相关因素中,肩袖自身的愈合情况一直以来受到高度的重视^[10-12]。然而,术后肩袖的愈合情况通常是不可预测的,术后发生再撕裂将造成严重的破坏性后果。因此,应用无创的方式进行术后愈合情况的评估,对于肩袖患者早期的康复训练和后续治疗方案的制定具有重要的指导意义。

MRI 被公认为评价肌腱等软组织的首选影像检查方法^[13]。常规 MRI 序列可以用来显示肩袖愈合的形态学评估,但随着 MRI 技术的发展,形态学评估已转向功能学评估,尤其是对组织生化结构方面的评估。UTE-T₂^{*} 作为一种新的功能成像技术,不仅能对组织生化结构进行定量分析,还能在短 T₂ 成分衰减之前快速采集其信号从而有效显示短 T₂ 成分。目前已有较多研究应用 UTE-T₂^{*} 技术评估肌腱生化结构方面的价值。Chang 等^[14]发现 UTE-T₂^{*} 值与跟腱内胶原纤维排列的有序性相关;de 等^[15]进一步研究发现,跟腱的退变过程表现为含水量增加,胶原含量减少、排列紊乱,而这些都是导致 UTE-T₂^{*} 值升高的因素。另一方面,Krepkin 等^[16]研究发现 UTE-T₂^{*} 评估冈上肌腱撕裂具有可行性,同时肩袖 T₂^{*} 值与代表冈上肌腱力学特性的超声剪切波速度呈负相关。在肩袖愈合过程中,水、胶原纤维这两个主要成分发生了改变^[17],而 T₂^{*} 值对胶原纤维在肌腱内部的方向、磁场中的方向,以及含水量这些肩袖愈合的最具特异性的标志物非常敏感^[18-21]。目前尚未见 UTE-T₂^{*} 技术评估肩袖术后愈合的相关研究,本研究应用该技术定量分析 ARCR 术后冈上肌腱的愈合情况,评估术后肩袖 T₂^{*} 值在多个观察者中的一致性,并与常用的 Sugaya 半定量评估方法进行比较,探究 UTE-T₂^{*} 技术在该领域的应用可重复性和临床可行性。

2. 研究结果分析

Sugaya 等^[7]提出的术后肩袖 5 型分级系统,是以半定量和主观方式评估术后肩袖的愈合状态,可重复性差^[22,23]。本研究亦发现,Sugaya 分型的观察者间、观察者内显示中度一致性。近年来,有学者^[24]将

表 2 T₂^{*} 的观察者内和观察者间一致性分析

	偏倚			标准差			一致性界限		
	外侧亚区	中间亚区	内侧亚区	外侧亚区	中间亚区	内侧亚区	外侧亚区	中间亚区	内侧亚区
R1-R2	0.58	0.38	-0.87	2.12	2.21	1.78	(-3.58,4.74)	(-3.95,4.71)	(-4.36,2.62)
R1-R3	0.23	0.47	-0.93	2.38	2.37	1.97	(-4.43,4.89)	(-4.18,5.12)	(-4.79,2.93)
R2-R3	-0.37	0.08	-0.05	1.97	2.05	1.8	(-4.23,3.49)	(-3.94,4.10)	(-3.58,3.48)
R1(#1-#2)	0.46	0.3	-0.29	1.46	1.28	1.48	(-2.40,3.32)	(-2.21,2.81)	(-3.19,2.61)
R2(#1-#2)	-0.18	-0.23	-0.3	1.75	1.23	1.68	(-3.61,3.25)	(-2.64,2.18)	(-3.59,2.99)
R3(#1-#2)	-0.04	-0.2	-0.14	1.54	1.26	1.46	(-3.06,2.98)	(-2.67,2.27)	(-3.00,2.72)

注:R1 为观察者 1,R2 为观察者 2,R3 为观察者 3,#1 为第 1 次测量,#2 为第 2 次测量

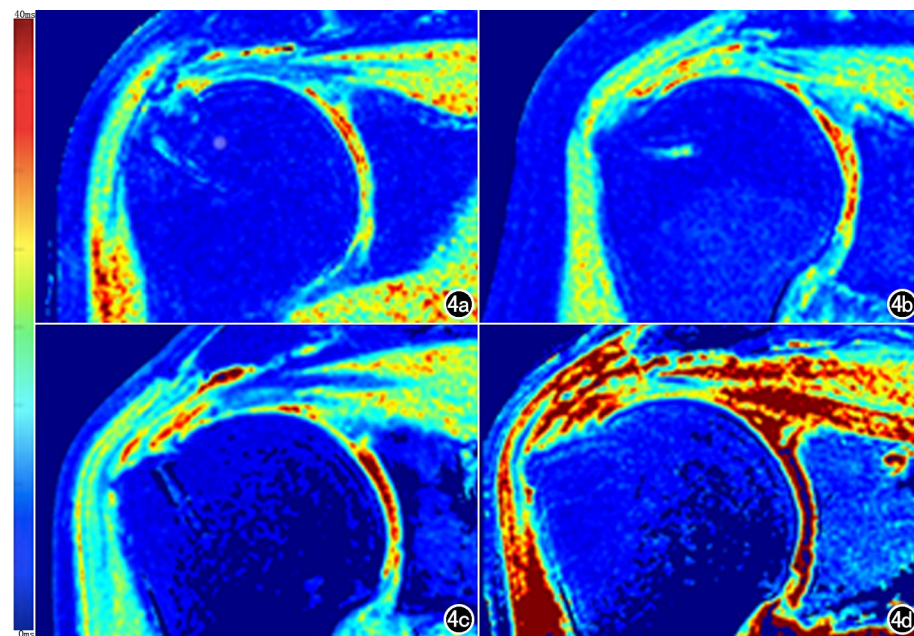


图4 ARCR术后不同分型冈上肌腱的UTE-T₂* map斜冠状面扫描图。由左侧的色阶参考图可看出,术后Sugaya分型越高,冈上肌腱中红色信号越多,即T₂*值越大;仅Sugaya I型和II型间差异不明显。a) Sugaya I型; b) Sugaya II型; c) Sugaya III型; d) Sugaya IV型。

UTE-T₂*技术应用于肩袖的评估,然而该研究未涉及一致性分析,亦未指出测量值的可靠性。本研究采用Bland-Altman法评估3名医生的观察者间及观察者内一致性,结果显示即使3名观察者具有不同经验水平和不同亚专科,观察者间及观察者内仍然显示出高度一致性;Bland-Altman图显示,3个观察者中观察者3(外科住院医师)的观察者间和观察者内的可靠性略低。由于临床经验较少(较难分辨肌腱与术后关节积液的界限),观察者3倾向于测量比其他观察者更大的区域,导致UTE-T₂*测量值呈较大趋势。总体而言,尽管一致性存在细微的变化,由3名观察者测量的UTE-T₂*值重复性仍然高于Sugaya分型,说明UTE-T₂*技术评价术后肩袖愈合情况具有良好的可重复性。

本研究不同Sugaya分型(I~IV型)的术后肩袖外侧亚区T₂*值的方差分析结果显示,术后早期(1年内)不同Sugaya分型间肩袖T₂*值表现出明显差异;并且外侧亚区T₂*值与Sugaya分型呈高度相关性,提示UTE-T₂*技术在评估肩袖术后早期愈合情况中具有应用价值。Sugaya分型这种半定量分析方法会导致分型不准确。既往研究表明,肩袖术后1年内的信号变化多样,多表现为信号增高(Sugaya II型),但这种表现并不能代表修复异常,且和临床评分结果无相关性^[25]。本研究发现术后Sugaya II型的肩袖T₂*值高于I型,但无统计学差异,提示修复术后肩袖信号增

高并不伴随生化水平的增高,可能为术后正常表现;而术后完整肌腱(I、II型)和再撕裂肌腱(III、IV型)的T₂*值具有明显统计学差异,提示二者胶原纤维的空间排列及水含量存在明显差异,表明UTE-T₂*技术可监测肩袖术后早期的愈合情况,及早发现术后肩袖的再撕裂,指导临床决策。

本研究的局限性。①仅纳入部分撕裂-中型撕裂患者(<3cm),这可能是导致术后未收集到Sugaya V型肩袖的原因,因此未能分析Sugaya V型肩袖的T₂*结果;②UTE-T₂*技术对术后肩袖的评估缺乏病理对照(考虑病理取材属有创性操作);③魔角效应对T₂*值影响很大,本研究使用绑带固定方法以保证扫描侧肩关节处于相同位置,以减少魔角效应的影响;④样本量相对较少,需扩大

样本量进一步深入分析。

UTE-T₂*技术能从组织生化构成方面定量评估ARCR术后早期阶段的肩袖愈合情况,与Sugaya分型的半定量评估相比,该技术具有更高的观察者间和观察者内可靠性。

参考文献:

- [1] 蒋小莉,查云飞,王娇,等.3D-UTE评价腰椎间盘软骨终板缺损与椎间盘退变的相关性[J].放射学实践,2015,30(9):952-955.
- [2] Bydder M, Rahal A, Fullerton GD, et al. The magic angle effect; a source of artifact, determinant of image contrast, and technique for imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2007, 25(2):290-300.
- [3] Diaz E, Chung CB, Bae WC, et al. Ultrashort echo time spectroscopic imaging (UTESI): an efficient method for quantifying bound and free water[J]. NMR Biomed, 2012, 25(1):161-168.
- [4] Biswas R, Bae W, Diaz E, et al. Ultrashort echo time (UTE) imaging with bi-component analysis: bound and free water evaluation of bovine cortical bone subject to sequential drying[J]. Bone, 2012, 50(3):749-755.
- [5] DeOrio JK, Cofield RH. Results of a second attempt at surgical repair of a failed initial rotator-cuff repair[J]. J Bone Joint Surg Am, 1984, 66(4):563-567.
- [6] 刘少华,李宏,孙亚英,等.关节镜下单排与缝线桥技术修复中型肩袖撕裂——临床与磁共振评价[J].中国运动医学杂志,2017,36(2):97-100.
- [7] Sugaya H, Maeda K, Matsuki K, et al. Functional and structural outcome after arthroscopic full-thickness rotator cuff repair: single-row versus dual-row fixation[J]. Arthroscopy, 2005, 21(11):1307-1316.

- [8] Anz AW, Lucas EP, Fitzcharles EK, et al. MRI T_2 -mapping of the asymptomatic supraspinatus tendon by age and imaging plane using clinically relevant subregions[J]. *Eur J Radiol*, 2014, 83(5): 801-805.
- [9] Xu C, Zhao J, Li D. Meta-analysis comparing single-row and double-row repair techniques in the arthroscopic treatment of rotator cuff tears[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2014, 23(2): 182-188.
- [10] Chung SW, Kim JY, Yoon JP, et al. Arthroscopic repair of partial-thickness and small full-thickness rotator cuff tears: tendon quality as a prognostic factor for repair integrity[J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(3): 588-596.
- [11] Cummins CA, Murrell GA. Mode of failure for rotator cuff repair with suture anchors identified at revision surgery[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2003, 12(2): 128-133.
- [12] Nho SJ, Brown BS, Lyman S, et al. Prospective analysis of arthroscopic rotator cuff repair: prognostic factors affecting clinical and ultrasound outcome[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2009, 18(1): 13-20.
- [13] Loew M, Magosch P, Lichtenberg S, et al. How to discriminate between acute traumatic and chronic degenerative rotator cuff lesions: an analysis of specific criteria on radiography and magnetic resonance imaging[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2015, 24(11): 1685-1693.
- [14] Chang EY, Du J, Statum S, et al. Quantitative bi-component T_2^* analysis of histologically normal Achilles tendons[J]. *Muscles Ligaments Tendons J*, 2015, 5(2): 58-62.
- [15] de Mos M, van El B, DeGroot J, et al. Achilles tendinosis: changes in biochemical composition and collagen turnover rate[J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(9): 1549-1556.
- [16] Kreppin K, Bruno M, Raya JG, et al. Quantitative assessment of the supraspinatus tendon on MRI using T_2/T_2^* -mapping and shear-wave ultrasound elastography: a pilot study[J]. *Skeletal Radiol*, 2017, 46(2): 191-199.
- [17] Koike Y, Trudel G, Uhthoff HK. Formation of a new enthesis after attachment of the supraspinatus tendon: A quantitative histologic study in rabbits[J]. *J Orthop Res*, 2005, 23(6): 1433-1440.
- [18] Du J, Chiang AJ, Chung CB, et al. Orientational analysis of the Achilles tendon and enthesis using an ultrashort echo time spectroscopic imaging sequence[J]. *Magn Reson Imaging*, 2010, 28(2): 178-184.
- [19] Fullerton GD, Rahal A. Collagen structure: the molecular source of the tendon magic angle effect[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2007, 25(2): 345-361.
- [20] Henkelman RM, Stanisz GJ, Kim JK, et al. Anisotropy of NMR properties of tissues[J]. *Magn Reson Med*, 1994, 32(5): 592-601.
- [21] Benjamin M, Bydder GM. Magnetic resonance imaging of entheses using ultrashort TE (UTE) pulse sequences[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2007, 25(2): 381-389.
- [22] Kluger R, Bock P, Mittlbock M, et al. Long-term survivorship of rotator cuff repairs using ultrasound and magnetic resonance imaging analysis[J]. *Am J Sports Med*, 2011, 39(10): 2071-2081.
- [23] Niglis L, Collin P, Dosch JC, et al. Intra- and inter-observer agreement in MRI assessment of rotator cuff healing using the Sugaya classification 10 years after surgery[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2017, 103(6): 835-839.
- [24] Zhu Y, Cheng X, Ma Y, et al. Rotator cuff tendon assessment using magic-angle insensitive 3D ultrashort echo time cones magnetization transfer (UTE-Cones-MT) imaging and modeling with histological correlation[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(1): 160-168.
- [25] Crim J, Burks R, Manaster BJ, et al. Temporal evolution of MRI findings after arthroscopic rotator cuff repair[J]. *Am J Roentgenol*, 2010, 195(6): 1361-1366.

(收稿日期:2019-08-10 修回日期:2019-10-30)