

✧ 骨骼肌肉影像学

MR T2^{*} mapping for quantitative evaluation of grafts maturity after anterior cruciate ligament reconstructionFAN Guangtao¹, SHI Zhengliang², HUANG Yilong¹, ZHANG Zhengguang¹,
CHEN Jiaxin¹, QI Tianfu¹, YANG Lizhu¹, LI Yanlin², HE Bo^{1*}(1. Department of Radiology, 2. Department of Sports Medicine, the First Affiliated Hospital of
Kunming Medical University, Kunming 650032, China)

[Abstract] **Objective** To explore the value of MR T2^{*} mapping for quantitative evaluation of grafts maturity after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR). **Methods** Three-dimensional fast imaging employing steady state acquisition (3D-FIESTA) and T2^{*} mapping of the injured knee were performed 1, 3 and 6 months after ACLR in 26 patients with anterior cruciate ligament (ACL) injury (ACLR group), also in 26 healthy adult volunteers (control group) for single time. International Knee Documentation Committee knee evaluation form (IKDC) was used to evaluate patients' clinical function in ACLR group 6 months after operation. T2^{*} values of grafts or ACL in ACLR group were compared among different time points after operation and with that in control group, and the correlations of T2^{*} values of grafts and IKDC scores 6 months after operation in ACLR group were analyzed. **Results** One and 3 months after operation, T2^{*} values of grafts in ACLR group were lower than that of ACL in control group. Six months after operation, T2^{*} values of grafts in ACLR group were higher than those of 1 and 3 months after operation (all $P < 0.01$). No significant difference of T2^{*} values was found between grafts in ACLR group 6 month after operation and those of ACL in control group, nor of T2^{*} values of grafts in ACLR group between 1 and 3 month after operation (all $P > 0.05$). T2^{*} values of grafts in ACLR group 6 months after operation were moderate negative correlated with IKDC score ($r = -0.525$, $P = 0.008$). **Conclusion**

MR T2^{*} mapping had a certain clinical value for noninvasive quantitative evaluation of grafts maturity after ACLR.**[Keywords]** anterior cruciate ligament reconstruction; graft; magnetic resonance imaging; maturity; T2^{*} mapping

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2022.11.023

MR T2^{*} mapping 定量评估膝关节前交叉韧带
重建术后移植物成熟度范广涛¹, 施政良², 黄益龙¹, 张振光¹, 陈佳鑫¹, 杞天付¹,
杨丽竹¹, 李彦林², 何波^{1*}

(1. 昆明医科大学第一附属医院医学影像科, 2. 运动医学科, 云南 昆明 650032)

[摘要] **目的** 探讨 MR T2^{*} mapping 定量评估膝关节前交叉韧带重建(ACLR)术后移植物成熟度的临床价值。**方法** 对 26 例因前交叉韧带(ACL)损伤而接受 ACLR 患者(ACLR 组)分别于术后 1、3、6 个月行膝关节三维稳态采集快速成像(3D-FIESTA)及 T2^{*} mapping 检查,另对 26 名健康成人志愿者(对照组)行单次膝关节同序列扫描。对 ACLR 组于术后 6 个月以统一国际膝关节文献委员会膝关节评估表(IKDC)进行临床功能评分;比较 ACLR 组术后各时间点移植物 T2^{*} 值及其与对照组 ACL 的 T2^{*} 值的差异,分析 ACLR 组术后 6 个月移植物 T2^{*} 值与 IKDC 评分的相关性。**结果**

[基金项目] 昆明医科大学研究生创新基金项目(2022S058)。**[第一作者]** 范广涛(1996—),女,云南昭通人,在读硕士。研究方向:骨骼肌肉系统影像学诊断。E-mail: 1792856023@qq.com**[通信作者]** 何波,昆明医科大学第一附属医院医学影像科,650032。E-mail: hebo_ydyy@qq.com**[收稿日期]** 2022-06-19 **[修回日期]** 2022-09-17

ACLR 组术后 1、3 个月移植植物 $T2^*$ 值低于对照组 ACL 的 $T2^*$ 值; ACLR 组术后 6 个月移植植物 $T2^*$ 值高于术后 1、3 个月 (P 均 <0.01); ACLR 组术后 6 个月移植植物与对照组 ACL 的 $T2^*$ 值、ACLR 组术后 1 与 3 个月移植植物 $T2^*$ 值差异均无统计学意义 (P 均 >0.05)。ACLR 组术后 6 个月移植植物 $T2^*$ 值与 IKDC 评分呈中度负相关 ($r = -0.525, P = 0.008$)。结论

MR $T2^*$ mapping 对无创定量评估 ACLR 术后移植植物成熟度具有一定价值。

【关键词】 前交叉韧带重建术; 移植植物; 磁共振成像; 成熟度; $T2^*$ mapping

【中图分类号】 R686; R445.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1003-3289(2022)11-1699-05

前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 损伤占膝关节损伤半数以上^[1], 肌腱移植 ACL 重建 (ACL reconstruction, ACLR) 术为常见及有效治疗方式, 术后移植植物成熟度与康复治疗决策及患者远期生活质量密切相关。目前评估移植植物成熟度的方法主要包括病理学检查、临床功能评分及常规 MRI。病理学检查是评价移植植物成熟度的金标准, 但有创。临床功能评分及患者报告结局量表 (patient-reported outcome measures, PROMS) 与膝关节稳定性相关, 但主观性强而敏感性不足。基于形态学的常规 MRI 难以定量评价移植植物、反映移植植物组织成分及微观结构变化。MR $T2^*$ mapping 可定量评估组织 $T2^*$ 弛豫时间, 反映组织含水量及胶原纤维结构的各向异性, 已用于评估 ACL 黏液样变性和运动后半月板变化^[2]。本研究观察 $T2^*$ mapping 定量评估 ACLR 术后移植植物成熟度的价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 前瞻性收集 2021 年 2 月—8 月 26 例因 ACL 损伤于昆明医科大学第一附属医院接受 ACLR 患者 (ACLR 组), 男 10 例、女 16 例, 年龄 19~44 岁、平均 (27.7 ± 8.0) 岁。纳入标准: ①年龄 18~45 岁; ②因单侧 ACL 损伤接受关节镜下自体腘绳肌腱 (包括半腱肌和股薄肌) 移植 ACLR。排除标准: ①膝关节手术史; ②罹患痛风、类风湿性关节炎等膝关节炎症; ③膝关节多发性韧带损伤、合并骨折; ④MR 检查禁忌证。同期招募 26 名正常成人志愿者为对照组, 男 12 名、女 14 名, 年龄 18~40 岁、平均 (30.3 ± 7.0) 岁。本研究经院伦理委员会批准 (2018-L-21), 受检者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用 GE Discovery 750W 3.0T MR 扫描仪及膝关节专用 16 通道线圈对 ACLR 组于术后 1、3、6 个月及对照组行膝关节 MR 扫描, 获取常规轴位、冠状位及矢状位脂肪抑制质子密度加权像 (proton density weighted imaging, PDWI) 和矢状位快速自旋回波 (fast spin echo, FSE)-T1WI、三维稳态

采集快速成像 (three dimensional fast imaging employing steady state acquisition, 3D-FIESTA) 及 $T2^*$ mapping, 使 3D-FIESTA 及 $T2^*$ mapping 扫描定位线平行于 ACL 走行。参数: 3D-FIESTA, TR 7.8 ms, TE 3.8 ms, FOV $16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$, FA 12° , 带宽 62.5 kHz, 矩阵 320×320 , 层厚 1 mm, 层间距 0, 激励次数 1; $T2^*$ mapping, TR 100 ms, TE 1.8、5.2、8.6、11.9、15.3、18.7、22.1、25.5 ms, FOV $16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$, FA 25° , 带宽 83.3 kHz, 矩阵 288×192 , 层厚 3 mm, 层间距 0, NEX 2。

1.3 图像分析 将 3D-FIESTA 与 $T2^*$ mapping 图像融合。由具有 3 及 10 年骨骼肌肉系统影像学诊断经验的住院医师及副主任医师各 1 名采用盲法独立阅片, 于融合图像显示移植植物或 ACL 面积最大层面沿其轮廓勾画 ROI (图 1、2), 尽量避开关节软骨、关节腔液体、骨组织等, 测量其 $T2^*$ 值; 重复 3 次, 取平均值, 以 2 名医师测量均值作为结果。

1.4 临床功能评分 由 1 名具有 20 年工作经验的运动医学科主任医师于术后 6 个月以国际膝关节文献委员会膝关节评估表 (International Knee Documentation Committee knee evaluation form, IKDC)^[3] 对 ACLR 组进行临床功能评分: IKDC 共 19 项, 分数 0~100, 0 分表示日常活动和体育活动非常受限, 100 分表示功能正常^[4]。

1.5 统计学分析 采用 SPSS 24.0 统计分析软件。以 Shapiro-Wilk 法对计量资料行正态性检验, 采用 Levene 法行方差齐性检验。以 $\bar{x} \pm s$ 表示符合正态分布的计量资料, 以单因素方差分析观察 ACLR 组术后各时间点间及其与对照组间临床资料及 $T2^*$ 值的差异, 采用 LSD- t 法行两两比较。以组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC) 评估观察者间测量结果的一致性: $ICC > 0.75$ 为一致性好, $0.4 \leq ICC \leq 0.75$ 为一致性较好, $ICC < 0.4$ 为一致性差。采用 χ^2 检验比较计数资料。以 Pearson 相关分析观察 ACLR 组术后 6 个月移植植物 $T2^*$ 值与 IKDC 评分的

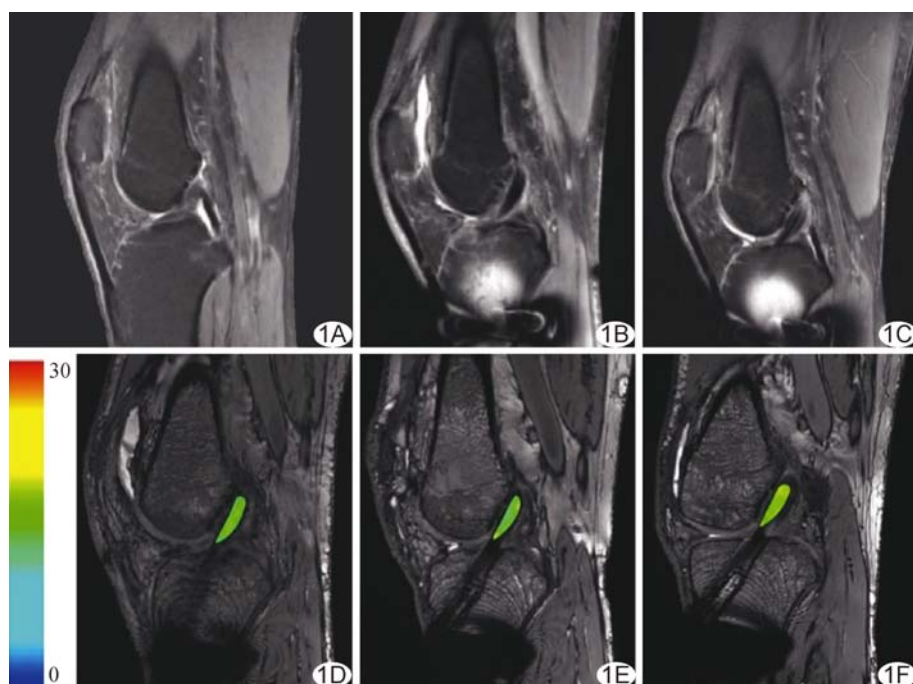


图1 ACLR组患者,男,33岁,因左侧ACL损伤而接受ACLR A.术前左膝关节矢状位PDWI示ACL正常结构消失,走行区结构紊乱并见片絮状稍高信号;B.术后1个月左膝关节矢状位PDWI示移植肌腱走行连续、髌上囊区少许积液;C.术后6个月左膝关节矢状位PDWI示移植肌腱形态信号正常,关节积液基本吸收;D~F.术后1(D)、3(E)、6(F)个月左膝关节矢状位3D-FIESTAR与T2* mapping融合图(伪彩区域为移植物ROI)示移植物T2*值分别为15.86、16.24、19.72 ms(色带代表T2*值)



图2 对照组受检者,男,30岁 A.右膝关节矢状位PDWI示ACL走行连续;B.右膝关节矢状位T2* mapping;C.右膝关节矢状位3D-FIESTAR与T2* mapping融合图(伪彩区域为ACL ROI)示T2*值为19.36 ms

相关性: $r \geq 0.7$ 为高度相关, $0.4 \leq r < 0.7$ 为中度相关, $r < 0.4$ 为低度相关。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料 ACLR组术后3、6个月分别有3例、2例失访。术后1、3、6个月ACLR组及与对照组受检者年龄、性别、身高、体质量及扫描膝关节侧别差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。见表1。

2.2 T2*值及其与IKDC评分的相关性 测量ACL及移植物T2*值的观察者间一致性好($ICC=0.817, P<0.001$)。术后1、3、6个月ACLR组移植物T2*值及对照组ACL的T2*值总体差异有统计学意义($F=11.739, P<0.001$)。两两比较,术后1、3个月ACLR组移植物T2*值低于对照组ACL,术后6个月ACLR组移植物T2*值高于术后1、3个月(P 均 <0.01);ACLR组术后6个月移植物与对照组ACL、ACLR组术后1与3个月移植物T2*值差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。见图3。

ACLR组术后6个月移植物T2*值与IKDC评分呈中度负相关($r=-0.525, P=0.008$,图4)。

3 讨论

ACLR术后移植物在关节内

表1 ACLR组与对照组一般资料比较

组别	年龄(岁)	性别(例/名)		身高(cm)	体质量(kg)	扫描膝关节(例/名)	
		男	女			左膝	右膝
ACLR 组							
术后 1 个月($n=26$)	27.7±8.0	10	16	169.46±9.03	65.81±14.10	11	15
术后 3 个月($n=23$)	27.8±7.6	9	14	168.73±8.79	63.78±12.25	10	13
术后 6 个月($n=24$)	28.1±8.0	10	14	168.67±8.54	65.56±13.77	11	13
对照组($n=26$)	30.3±7.0	12	14	164.65±7.94	62.62±12.00	9	17
F/χ^2 值	0.683	0.384		1.953	0.380	0.737	
P 值	0.564	0.943		0.126	0.767	0.864	

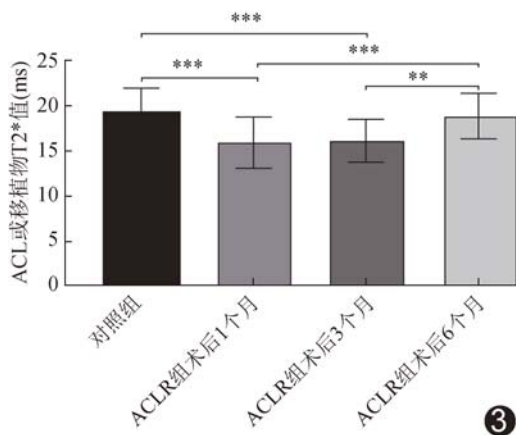


图3 ACLR 组术后各时间点间及其与对照组间 $T2^*$ 值比较柱状图 (注: * : $P < 0.01$; * * * : $P < 0.001$)

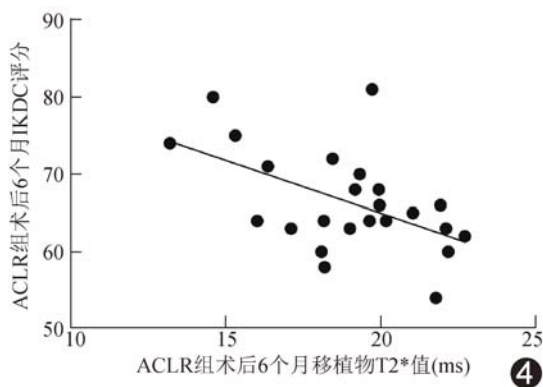


图4 ACLR 组患者术后 6 个月移植 $T2^*$ 值与 IKDC 评分的相关性散点图

重塑、成熟的过程被称为“韧带化”，是肌腱样移植体逐渐成熟向韧带样移植体转化的过程^[5-6]，期间移植体细胞数量、血管密度和细胞外基质成分，如胶原蛋白含量、胶原纤维等的排列方向等均发生一定变化。既往研究^[5-7]认为 ACLR 术后移植体愈合常须经历早期、重塑及成熟 3 个阶段。

对于 ACLR 术后移植体成熟期目前尚存争议。CLAES 等^[5]观察组织学层面的细胞排列、胶原束结构和血管化，提出 ACLR 术后移植体成熟早期发生于 ACLR 术后前 6 个月，术后 3~12 个月为移植体重塑阶段，成熟期始于术后 9 个月。 $T2^*$ mapping 可通过测量质子的自旋-自旋作用获得活体组织 $T2^*$ 值，进一步反映组织水含量、胶原蛋白含量和胶原纤维在基质内的取向等变化^[8]。本研究采用 $T2^*$ mapping 定量评估 ACLR 术后移植体 $T2^*$ 弛豫时间变化，进而定量分析移植体成熟度，结果显示术后 1 与 3 个月间移植体 $T2^*$ 值差异无统计学意义，术后 6 个月移植体 $T2^*$ 值高于术后 1、3 个月，与既往针对 ACL 修复的组织学

评估^[9]所见时间进程相符合；ACLR 组术后 6 个月移植体 $T2^*$ 值与对照组差异无统计学意义，提示术后 6 个月移植体状态与正常 ACL 类似。CHU 等^[10]报道，ACLR 术后 6 个月内移植体超短 TE 成像- $T2^*$ 及 $T2^*$ 值持续升高，并达到正常 ACL 水平，本研究结果与之相符。van GRONINGEN 等^[9]根据信噪比(signal to noise quotient, SNQ)变化评估 ACLR 术后移植体成熟度，发现移植体 SNQ 于术后约 6 个月时达峰，随后逐渐下降；但 HOFBAUER 等^[11]报道，ACLR 术后 6 个月移植体 SNQ 并不同于健康 ACL，术后 6 个月移植体尚未成熟或未完全愈合。

本研究结果提示，ACLR 术后 6 个月内，移植体处于韧带化早期阶段，其 $T2^*$ 值增加可能与含水量增加及胶原基质紊乱有关；术后 1 个月及 3 个月内移植体可能多处于早期炎症坏死阶段， $T2^*$ 值差异无统计学意义；术后 6 个月，部分移植体进入重塑阶段，其 $T2^*$ 值与处于炎症坏死阶段的 1、3 个月存在显著差异。本研究 ACLR 组术后 6 个月移植体 $T2^*$ 值与患者 IKDC 评分呈中度负相关，即术后 6 个月移植体 $T2^*$ 值越低，则 IKDC 评分越高，提示术后 6 个月移植体 $T2^*$ 值可能反映患者膝关节功能状态，与 van GRONINGEN 等^[9]基于 SNQ 的研究结果相悖，后者认为移植体 SNQ 与膝关节稳定性结果评分之间无明显相关。也有研究^[12]结果显示 ACLR 术后 6 个月移植体 SNQ 与术后 2 年 IKDC 评分呈负相关。上述研究结果不同的原因可能在于 $T2^*$ 值与 SNQ 反映 ACLR 术后移植体特性有所差异：SNQ 反映移植体信号强度，依赖于扫描设备及参数，且易受血管信号影响，而 $T2^*$ 值反映活体组织成分及微观结构等内在特性，能提供组织水及胶原纤维含量、胶原纤维排列方式及其他基质结构等信息。 $T2^*$ 值是否较 SNQ 更能反映 ACLR 术后患者膝关节功能状态尚待开展多中心、大样本研究进一步证实。

综上所述，MR $T2^*$ mapping 有助于动态监测 ACLR 术后早期移植体韧带化，对无创定量评估 ACLR 术后移植体成熟度具有一定价值。但本研究样本量较小，且随访时间较短，有待扩大样本量进一步观察。

[参考文献]

- [1] KAEDING C C, LÉGER-ST-JEAN B, MAGNUSSEN R A. Epidemiology and diagnosis of anterior cruciate ligament injuries[J]. Clin Sports Med, 2017, 36(1):1-8.
- [2] 郑孝众,周静,田甜,等. $T2^*$ mapping 评估男性半程马拉松后半月板改变[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(11):1711-1714.

- [3] van de GRAAF V A, WOLTERBEEK N, SCHOLTES V A, et al. Reliability and validity of the IKDC, KOOS, and WOMAC for patients with meniscal injuries[J]. Am J Sports Med, 2014, 42(6):1408-1416.
- [4] IRRGANG J J, ANDERSON A F, BOLAND A L, et al. Development and validation of the international knee documentation committee subjective knee form[J]. Am J Sports Med, 2001, 29(5):600-613.
- [5] CLAES S, VERDONK P, FORSYTH R, et al. The "ligamentization" process in anterior cruciate ligament reconstruction: What happens to the human graft? A systematic review of the literature[J]. Am J Sports Med, 2011, 39(11):2476-2483.
- [6] PAUZENBERGER L, SYRÉ S, SCHURZ M. "Ligamentization" in hamstring tendon grafts after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review of the literature and a glimpse into the future [J]. Arthroscopy, 2013, 29(10):1712-1721.
- [7] JANSSEN R P, SCHEFFLER S U. Intra-articular remodelling of hamstring tendon grafts after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2014, 22(9):2102-2108.
- [8] BEVERIDGE J E, MACHAN J T, WALSH E G, et al. Magnetic resonance measurements of tissue quantity and quality using T2* relaxometry predict temporal changes in the biomechanical properties of the healing ACL[J]. J Orthop Res, 2018, 36(6):1701-1709.
- [9] van GRONINGEN B, van der STEEN M C, JANSSEN D M, et al. Assessment of graft maturity after anterior cruciate ligament reconstruction using autografts: A systematic review of biopsy and magnetic resonance imaging studies[J]. Arthrosc Sports Med Rehabil, 2020, 2(4):e377-e388.
- [10] 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.
- [11] HOFBAUER M, SOLDATI F, SZOMOLANYI P, et al. Hamstring tendon autografts do not show complete graft maturity 6 months postoperatively after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2019, 27(1):130-136.
- [12] 陈荣进, 顾心怡, 向先祥. 前交叉韧带重建术后移植植物成熟度与膝关节功能的相关性研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2021, 35(6):704-709.

关键词

关键词又称主题词,是位于摘要之后,在论文中起关键作用的、最能说明问题的、代表论文特征的名词或词组。它通常来自于题目,也可以从论文中挑选。一般每篇论文要求2~5个关键词。每个关键词都可以作为检索论文的信息,若选择不当,会影响他人的检索效果。医学上现在主要使用美国《医学索引》(Index Medicus)的医学主题词表(Medical Subject Headings, MeSH)最新版作为规范,亦可参考中国医学科学院情报研究所翻译地英汉对照《医学主题词注释字顺表》。非主题词表的关键词为自由词,只有必要时,才可排列于最后。有些新词也可选用几个直接相关的主题词进行搭配。