

## 磁共振 T2 mapping 成像对移植软骨的评估价值

陈 敏<sup>1</sup>, 徐 贤<sup>1</sup>, 韩邵军<sup>1</sup>, 唐艳华<sup>1</sup>, 张 君<sup>1</sup>, 董天明<sup>1</sup>, 左盼利<sup>2</sup>, 安宁豫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军总医院放射科, 北京 100853

<sup>2</sup>西门子(中国)有限公司医疗业务领域磁共振事业部, 北京 100102

通信作者: 安宁豫 电话: 010-66876358, 电子邮件: anywlx@aliyun.com

**摘要:** **目的** 探讨磁共振 T2 mapping 成像对基质诱导的自体软骨细胞移植 (MACI/MACT) 术后的评估价值。**方法** 4 例接受 MACI 治疗的膝关节软骨损伤患者 (10 处软骨损伤), 分别在术后 1、3、6 个月进行磁共振 T2 mapping 检查, 测量各时间点移植区与正常区软骨全层的 T2 值, 并进行统计学分析。各个时间点移植区与正常区 T2 值比较采用配对 *t* 检验, 移植区 T2 值的纵向对比采用单因素方差分析。**结果** MACI 术后 1、3、6 个月移植区的 T2 平均值分别为 (82.40 ± 15.23)、(71.09 ± 13.06)、(53.80 ± 4.86) ms。术后 6 个月内移植区 T2 值均大于正常区, 1、3 个月组差异均有统计学意义 (*P* 均 < 0.01), 6 个月组差异无统计学意义 (*P* = 0.196)。术后 1、3、6 个月移植区 T2 值纵向变化差异有统计学意义 (*P* = 0.03)。**结论** 磁共振 T2 mapping 成像能够无创、动态地监测移植软骨的修复过程, 可作为软骨修复术后评估的有力工具。

**关键词:** T2 值; 软骨; 膝关节; 基质诱导的自体软骨细胞移植

**中图分类号:** R445.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-503X(2014)01-0086-06

**DOI:** 10.3881/j.issn.1000-503X.2014.01.016

## Quantitative T2 Mapping Evaluates the Repaired Articular Cartilage

CHEN Min<sup>1</sup>, XU Xian<sup>1</sup>, HAN Shao-jun<sup>1</sup>, TANG Yan-hua<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>,  
DONG Tian-ming<sup>1</sup>, ZUO Pan-li<sup>2</sup>, AN Ning-yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiology, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

<sup>2</sup>Division of Magnetic Resonance Imaging, Healthcare Business, Siemens Ltd. China, Beijing 100102, China

Corresponding author: AN Ning-yu Tel: 010-66876358, E-mail: anywlx@aliyun.com

**ABSTRACT: Objective** To evaluate the value of T2 mapping in monitoring the repaired cartilage after matrix-associated autologous chondrocyte implantation/transplantation (MACI/MACT). **Methods** Four patients (10 plug cartilages) were examined three times by T2 mapping at 1, 3, and 6 months using a 3.0 Tesla MR scan system. Quantitative mean (full-thickness) T2 values were calculated in the transplanted area and control cartilage. Paired *t*-tests were used to compare the T2 values between transplanted and control cartilage. For analysis of longitudinal T2 values, one-way analyses of variance were performed among 1, 3, and 6 months after MACI. **Results** The mean T2 values of the transplanted area at 1, 3, and 6 months after MACI were (82.40 ± 15.23), (71.09 ± 13.06), (53.80 ± 4.86) ms, respectively. There were significant differences between the transplanted and control cartilage at 1 and 3 months (both *P* < 0.01) after MACI, but not at 6 months (*P* = 0.196). There were significant differences among T2 values of 1, 3, and 6 months after MACI in transplanted area (*P* = 0.03). **Conclusion** T2 mapping provides a useful tool for monitoring the biochemical development of the transplanted cartilage and can be used to evaluate the cartilage repair noninvasively.

**Key words:** T2 value; cartilage; knee; matrix-induced autologous chondrocyte implantation/transplantation

*Acta Acad Med Sin*, 2014,36(1):86-91

关节软骨损伤是一种常见病, 由于其内缺乏血管、淋巴和神经, 损伤后自我修复的能力非常有限。基质诱导的自体软骨细胞移植技术 (matrix-associated autologous chondrocyte implantation/transplantation, MACI/MACT) 作为最新的软骨移植术可以达到接近于正常透明软骨修复的效果<sup>[1-2]</sup>, 临床应用前景广阔。磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 是评价关节软骨最敏感的无创性方法, 在关节软骨成像中的重要应用价值已经被广泛认识与接受, 但常规的磁共振成像主要是用来评估软骨的形态学变化。近年来, 国内外采用最新的磁共振 T2 mapping 和软骨延迟增强成像 (delayed gadolinium enhanced MRI of the cartilage, dGEMRIC) 对移植软骨进行随访分析, 结果显示在软骨移植修复初期, 软骨形态未出现明确改变之前就已有生物力学指标 (T2 值或 T1 值) 的变化<sup>[3]</sup>。目前, T2 mapping 用于关节软骨损伤及修复的评估研究多是大跨度、中远期的对比分析, 而对于 MACI 术后的早期随访观察国内外尚无相关报道。本研究旨在通过对 MACI 术后 1、3、6 个月 T2 值随访比较, 从生物力学角度探讨磁共振 T2 mapping 成像对移植软骨修复过程的评估价值。

## 对象和方法

**对象** 本研究纳入 4 例 MACI 患者 (女 3 例, 男 1 例), 共 8 个膝关节 10 处软骨缺损 (股骨内侧髁 2 处, 股骨滑车 4 处, 髌骨 4 处)。患者平均年龄 ( $46.5 \pm 4.5$ ) 岁 (40 ~ 50 岁)。软骨缺损平均面积 ( $1.959 \pm 1.2098$ )  $\text{cm}^2$  ( $0.8 \sim 5.0 \text{ cm}^2$ ,  $n = 10$ ), 按照国际软骨修复协会 (International Cartilage Repair Society, ICRS) 标准, 缺损程度均为 III ~ IV 度。检查前所有受试者均签署知情同意书。

**MR 检查** 采用 Skyra 3.0 T 高场强磁共振扫描仪 (Siemens Ltd., Germany) 和 15 通道膝关节表面线圈。采用脚先进、仰卧位模式, 扫描时尽量保持膝关节位于线圈中央。扫描序列包括矢状位 3D-VIBE, 高分辨冠状位、矢状位和横轴位质子脂肪抑制序列 (Fat Saturation Protein Density Weighted Imaging, FS-PDWI) 以及矢状位 T2 mapping 序列。T2 mapping 扫描均在患者静卧 30 min 后进行。

成像参数: 矢状位 3D-VIBE: TR 11.60 ms, TE

5.44 ms, FOV  $150 \times 150$  mm, 矩阵  $381 \times 448$ , 扫描时间 5 min 27 s; 高分辨冠状位 FS-PDWI: TR 2400.0 ms, TE 35.0 ms, FOV  $140 \times 140$  mm, 矩阵  $381 \times 448$ , 扫描时间 4 min 42 s; 高分辨矢状位 FS-PDWI: TR 3000.0 ms, TE 31.0 ms, FOV  $140 \times 140$  mm, 矩阵  $336 \times 448$ , 扫描时间 4 min 44 s; 高分辨横轴位 FS-PDWI: TR 3790.0 ms, TE 31.0 ms, FOV  $140 \times 140$  mm, 矩阵  $336 \times 448$ , 扫描时间 4 min 27 s; T2 mapping: 采用 5 个回波 SE 序列矢状位扫描, TR 1921.3 ms, TE 13.8/27.6/41.4/55.2/69 ms, FOV  $160 \times 160$  mm, 矩阵  $384 \times 384$ , 扫描时间 8 min 42 s。

**图像处理** 所有图像数据传输至 syngo workplace (Siemens Ltd., Germany) 后处理工作站, 由两位经培训后的放射科医师进行双盲读片, 完成数据测量及记录。对测量结果一致性好者, 取其平均值作为最终结果, 如果测量结果差异较大, 则重新测量得出一致性结论。感兴趣区 (region of interest, ROI) 的选择: 结合 3D-VIBE 及高分辨矢状位 FS-PDWI 图像, 移植区 ROI 尽量包全修复组织全层 (图 1); 正常区 ROI 为移植区旁 5 mm, 且高分辨 FS-PDWI 图像上显示表面完整、内部无信号异常的软骨 (图 2)。

**T2 值测量方法:** 图像数据经软件生成 T2 mapping 伪彩图, 对照高分辨矢状位 FS-PDWI 图像, 同步描绘感兴趣区软骨边界, 选择感兴趣区显示最好层面重复测量 3 次取平均值。尽量保持不同时间点移植区和正常区 ROI 在同一位置 (图 3)。

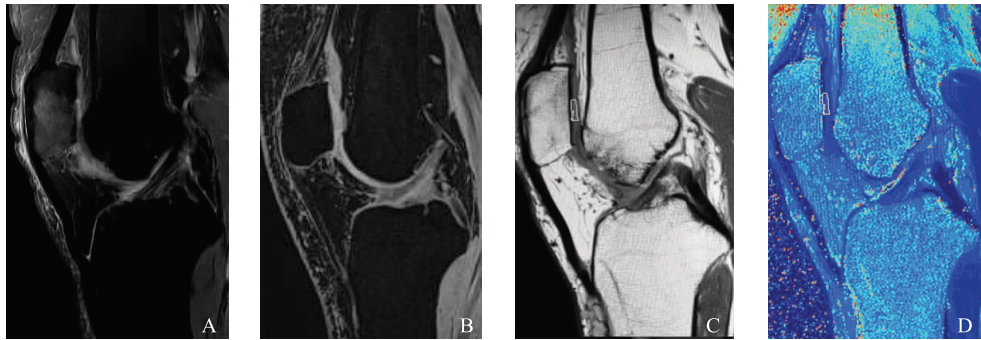
**统计学处理** 采用 SPSS 13.0 统计软件, 定量数据均以均数  $\pm$  标准差表示, 各个时间点移植区与正常区的 T2 值比较采用配对  $t$  检验, 移植区 T2 值的 1、3、6 个月纵向比较采用单因素方差分析,  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 结 果

磁共振 T2 map 图像定量测量结果显示, MACI 术后 1、3、6 个月移植区 T2 值分别为 ( $82.40 \pm 15.23$ )、( $71.09 \pm 13.06$ )、( $53.80 \pm 4.86$ ) ms, 均大于正常区的 ( $52.77 \pm 12.37$ )、( $50.14 \pm 6.43$ )、( $50.43 \pm 7.70$ ) ms, 其中术后 1 个月和 3 个月移植区与正常区的 T2 值差异有统计学意义 ( $P$  均  $< 0.01$ ), 而术后 6 个月差异无统

计学意义 ( $P=0.196$ )。纵向对比研究发现, MACI 术后 1、3、6 个月移植软骨的 T2 值变化有统计学意义 ( $P=0.03$ )。随着随访时间延长, T2 值逐渐下降, 并接近正常区 (图 4、5)。术后 6 个月移植区 T2 值明显

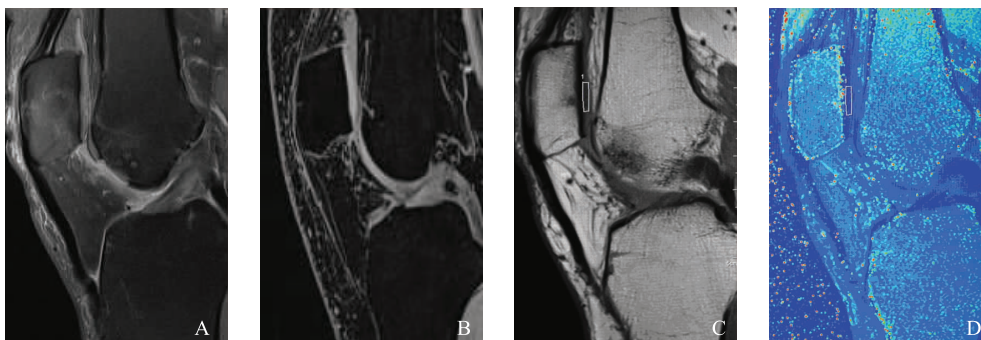
低于 1 ( $P=0.001$ ) 和 3 个月 ( $P=0.014$ ), 而 1 和 3 个月移植区 T2 值相比差异无统计学意义 ( $P=0.204$ )。正常区 T2 值在术后各随访时间点差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。



A. 高分辨矢状位 FS-PDWI 图像; B. 3D-VIBE 图像; C. T2 map 解剖图; D. T2 map 伪彩图  
A. high-resolution FS-PDWI image; B. 3D-VIBE image; C. T2 map anatomical image; D. T2 map pseudocolor image

图 1 移植区感兴趣区 (白色方框所示区域)

Fig 1 The region of interest of the transplanted area (denoted by the white box)



A. 高分辨矢状位 FS-PDWI 图像; B. 3D-VIBE 图像; C. T2 map 解剖图; D. T2 map 伪彩图  
A. high-resolution FS-PDWI image; B. 3D-VIBE image; C. T2 map anatomical image; D. T2 map pseudocolor image

图 2 正常区感兴趣区 (白色方框所示区域)

Fig 2 The region of interest of the control cartilage (denoted by the white box)



A、B、C 图分别为同一例患者 MACI 术后 1、3、6 个月的 T2 map 图, 感兴趣区保持在同一位置 (彩色)

A, B, and C images are T2 map images at 1, 3 and 6 months after MACI of the same patient, with region of interest remaining in the same position (color-coded)

图 3 MACI 术后 1、3、6 个月移植区感兴趣区

Fig 3 The region of interest of the transplanted area at 1, 3 and 6 months after MACI

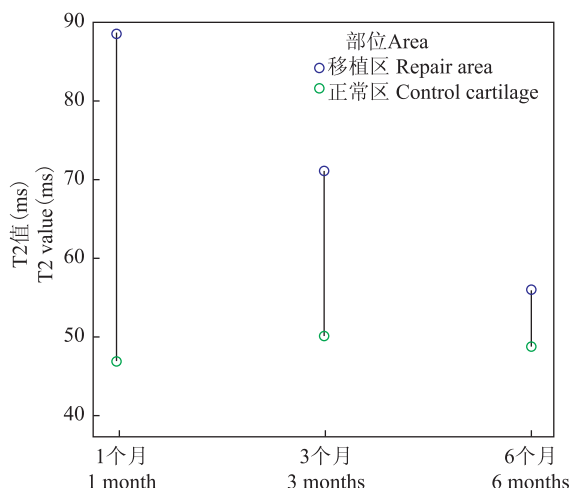


图 4 MACI 术后 1、3、6 个月移植区与正常区 T2 值的比较  
 Fig 4 Comparison of T2 values (ms) in the transplanted and control cartilage at 1, 3, and 6 months after MACI

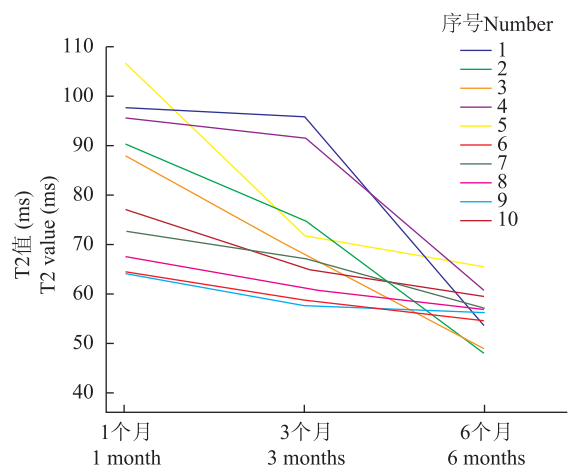


图 5 10 处软骨缺损移植区术后 1、3、6 个月 T2 值变化 (n = 10)  
 Fig 5 T2 values of the transplanted area at 1, 3, and 6 months after MACI (n = 10)

## 讨 论

目前,常用的软骨 MRI 生物学检测技术主要包括 dGEMRIC 和 T2 mapping 成像, dGEMRIC 根据软骨内负电荷密度成像间接反映软骨组织中的糖胺聚糖 (glycosaminoglycan, GAG) 含量,该方法需要注射对比剂,且对比剂静脉注射后至少需要等待 90 min (注射后患者需行走 15 min) 方可行 T1 mapping 扫描<sup>[4-5]</sup>。而 T2 mapping 因无需对比剂,扫描时间较短,已经成为关节 MRI 生化成像中的主要序列。国内外大量的研究已经证实 MR T2 mapping 是目前评价软骨最有效的无创性技术之一,但现有的 T2 mapping 研究只对 MACI

术后中远期疗效进行观察,并未对其术后早期变化进行密切追踪随访。本研究采用 T2 mapping 技术,通过对软骨移植患者术后 6 个月内的定期随访,评估移植软骨的早期生化修复过程。

T2 值主要反映软骨内胶原的含量、构象及水含量的变化,在软骨的修复过程中可以监测胶原的重构<sup>[3]</sup>。关节软骨主要由 II 型胶原 (15% ~ 22%)、蛋白多糖 (proteoglycan, PG) (4% ~ 7%) 和水 (60% ~ 85%) 组成,PG 是由蛋白核心和大量负电荷的 GAG 复合而成<sup>[6]</sup>。软骨内胶原含量、胶原纤维各向异性和水含量是软骨 T2 值变化的主要决定因素,PGs 含量的变化对 T2 值影响不大<sup>[7]</sup>。本研究中,MACI 术后 6 个月内移植区 T2 值均高于正常区,且以 1 个月和 3 个月尤为显著,提示移植区内水含量、胶原纤维含量及构象发生了变化。有研究表明关节软骨损伤时,胶原网状结构的破坏和胶原纤维排列改变能够使水的通透性增加;同时胶原网断裂使积聚的 PG 分散展开,暴露更多的阴离子,从而进一步增加软骨内的水含量,使软骨 T2 值升高<sup>[8]</sup>。MACI 术后早期,软骨基质尚未形成,胶原纤维排列杂乱也可使 T2 值增高。此外,手术创伤造成表面软骨水肿、关节液渗入也是 T2 值增高的影响因素<sup>[3,9]</sup>。

本研究发现 MACI 术后 6 个月内随着时间的进展,移植软骨的 T2 值逐渐下降,并趋于正常。Zheng 等<sup>[1]</sup>研究 MACI 术后软骨的组织及生化特性时发现:术后 48h 移植体内软骨细胞从胶原膜上游离,散乱分布于纤维胶中,无明确的软骨基质形成;术后 21d 时,结构紊乱的软骨样基质形成,软骨细胞散在分布于其中。Loeuille 等<sup>[10]</sup>报道在老鼠软骨发育成熟过程中,随着老鼠年龄的增长,胶原含量增加, T2 值呈现逐渐下降趋势。因此,在软骨的修复过程中,随着胶原的形成 (含量增多、排列趋于规整) T2 值逐渐下降。此外,手术创伤的恢复和渗液吸收也会促使 T2 值进一步下降。

随访至术后 6 个月时,移植区 T2 值与正常区无明显差别,提示随着修复组织成熟,移植软骨内水含量和胶原含量及排列方向基本接近正常。本研究中患者所行均是最新的自体软骨移植技术 (autologous chondrocyte transplantation, ACI) ——MACI,它以生物材料为支架,最终形成透明或透明样软骨修复<sup>[1-2,11-12]</sup>。术前从患者软骨非负重区取出正常自体关节软骨,体外分离出软骨细胞,培养扩增后种植在 I/III 型双层胶原膜上;手术时修剪成与缺损部位相似的形状,用

生物蛋白胶将其粘贴在缺损处<sup>[13-14]</sup>。MACI 使患者免去了再次手术的创伤,且术后并发症(如软骨细胞脱落、移植块过度增生)的发生率较其他软骨移植术明显下降<sup>[14-16]</sup>。动物实验发现,MACI 术后随着软骨的修复其 T2 值逐渐减低,并接近于正常区,且经病理证实为透明软骨修复<sup>[12]</sup>。Domayer 等<sup>[11]</sup>采用 T2 mapping 对比微骨折术(microfracture, MFX)和 MACI 术后正常区与移植区 T2 值变化(relative T2, rT2),提示 rT2 越接近于 1 表示修复组织的胶原和水含量越接近正常组织。本研究 rT2 随着随访时间延长也逐渐接近 1。Zheng 等<sup>[1]</sup>研究发现 MACI 术后 6 个月 75% 再生为透明样软骨。本研究中 6 个月时移植区 T2 值与正常区差别无统计学意义,提示移植术在不断塑形过程中,软骨胶原及自由水含量向正常靠近逐渐形成透明软骨样的修复组织。

Trattinig 等<sup>[17]</sup>利用 T2 mapping 技术定量测定 MACI 术后患者不同时期移植区 T2 值结果显示,在术后早期阶段组(3~13 个月)移植区 T2 值明显高于邻近的正常软骨,长期随访组(19~42 个月)移植区 T2 值降低至接近正常软骨。该研究中 6 个月时移植区与正常区 T2 值有区别,与本研究结果存在一定差异,可能的原因:(1)本研究随访时间较短,未追踪 6 个月以后 T2 值的变化;(2)Trattinig 等<sup>[17]</sup>研究中早期阶段组时间跨度较大,且各时间点病例数单一(每个时间点仅 1 例患者),造成选择误差。因此,有待更大样本量、更长时间的随访观测。

为了排除个体间差异,本研究均选择同例患者的邻近正常软骨作为内对照以进行比较研究;由于移植区周围形态正常的软骨 T2 值与远处正常的软骨 T2 值也存在差异<sup>[18]</sup>,本研究正常区 ROI 选择的是旁开移植区 5 mm 以外的形态和信号正常的软骨。此外,运动对软骨的 T2 值也存在影响<sup>[19-20]</sup>。研究发现无论是正常志愿者还是软骨移植的患者,运动后软骨 T2 值均明显下降,尤其是表层软骨<sup>[6,21-22]</sup>。Kaab 等<sup>[23]</sup>研究运动对软骨结构改变时,发现动物在休息 30 min 后运动导致软骨结构改变完全恢复。因此,本研究所有受试者在进行 MRI 检查前 3h 内均无剧烈运动,且均静卧 30 min 后行 T2 mapping 扫描,旨在消除运动对软骨的影响。

本研究还存在一定局限性。首先,样本量相对较少、随访时间相对较短,进行大样本量、更长时间的随访评估将更有助于证实这一结果的准确性。其次,MR 随访无病理组织学对照,是因为本研究中患者术

后的临床症状改善明显,均未达到关节镜检查的标准,且关节镜作为一种有创检查技术,其患者接受性较低。今后本课题组将会补充动物实验内容,进行 T2 mapping 与病理结果的对照研究,更全面地评估 MRI 技术对监测移植软骨修复过程的随访价值。最后,本研究未对移植软骨的 T2 值空间分布进行比较,由于此研究中部分患者的移植软骨较薄且厚度不均匀,无法对其进行精确的分层比较。

综上,本研究结果显示,磁共振 T2 mapping 成像是可以定量分析移植软骨内组织成分的变化。MACI 术后 6 个月内移植软骨 T2 值均高于正常区,但移植区 T2 值随着随访时间延长逐渐接近正常透明软骨,提示移植术在不断塑形过程中形成透明软骨样的修复组织。因此,T2 mapping 能够无创、动态监测移植软骨的修复过程,并提供修复组织的生化信息,可作为软骨移植术后评估的有力工具。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng MH, Willers C, Kirilak L, et al. Matrix-induced autologous chondrocyte implantation (MACI): biological and histological assessment [J]. *Tissue Eng*, 2007, 13(4): 737-746.
- [2] Briggs TW, Mahroof S, David LA, et al. Histological evaluation of chondral defects after autologous chondrocyte implantation of the knee [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2003, 85(7): 1077-1083.
- [3] Welsch GH, Mamisch TC, Marlovits S, et al. Quantitative T2 Mapping during follow-up after matrix-associated autologous chondrocyte transplantation (MACT): full-thickness and zonal evaluation to visualize the maturation of cartilage repair tissue [J]. *J Orthop Res*, 2009, 27(7):957-963.
- [4] Roos EM, Dahlberg L. Positive effects of moderate exercise on glycosaminoglycan content in knee cartilage: a four-month, randomized, controlled trial in patients at risk of osteoarthritis [J]. *Arthritis Rheum*, 2005, 52(11):3507-3514.
- [5] Shirai T, Kobayashi M, Nakamura S, et al. Longitudinal evaluation of cartilage after osteochondral autogenous transfer with delayed gadolinium-enhanced MRI of the cartilage (dGEMRIC) [J]. *J Orthop Res*, 2012, 30(2):221-225.
- [6] 唐艳华, 徐贤, 江波, 等. 3.0T 磁共振成像上健康青年人膝关节软骨 T2 值及厚度值的定量分析研究 [J]. *中国医学科学院学报*, 2013, 35(2):131-135.
- [7] Nieminen MT, Rieppo J, Töyräs J, et al. T2 relaxation reveals spatial collagen architecture in articular cartilage: a comparative quantitative MRI and polarized light microscopic

- study [J]. *Mag Resonan Med*, 2001, 46(3):487-493.
- [8] Mosher TJ, Dardzinski BJ. Cartilage MRI T2 relaxation time mapping: overview and applications [J]. *Semin Musculoskel et Radiol*, 2004, 8(4):355-368.
- [9] Welsch GH, Mamisch TC, Domayer SE, et al. Cartilage T2 assessment at 3-T MR imaging: *in vivo* differentiation of normal hyaline cartilage from reparative tissue after two cartilage repair procedures-initial experience [J]. *Radiology*, 2008, 247(1):154-161.
- [10] Loeuille D, Olivier P, Watrin A, et al. The biochemical content of articular cartilage: an original MRI approach [J]. *Biorheology*, 2002, 39(1-2):269-276.
- [11] Domayer SE, Kutscha-Lissberg F, Welsch G, et al. T2 mapping in the knee after microfracture at 3.0T: correlation of global T2 values and clinical outcome-preliminary results [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2008, 16(8):903-908.
- [12] Watrin-Pinzano A, Ruaud JP, Cheli Y, et al. Evaluation of cartilage repair tissue after biomaterial implantation in rat patella by using T2 mapping [J]. *Magma*, 2004, 17(3-6):219-228.
- [13] 张仲文, 侯世科, 杨造成, 等. 基质诱导的自体软骨细胞移植术修复膝关节软骨缺损 10 例术后 2 年的随访 [J]. *中华关节外科杂志*, 2010, 4(6):734-741.
- [14] Dai XS, Cai YZ. Matrix-induced autologous chondrocyte implantation addressing focal chondral defect in adolescent knee [J]. *Chin Med J*, 2012, 125(22):4130-4133.
- [15] Micheli LJ, Browne JE, Erggelet C, et al. Autologous chondrocyte implantation of the knee: multicenter experience and minimum 3-year follow-up [J]. *Clin J Sport Med*, 2001, 11(4):223-228.
- [16] Basad E, Ishaque B, Bachmann G, et al. Matrix-induced autologous chondrocyte implantation versus microfracture in the treatment of cartilage defects of the knee: 2-year randomised study [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2010, 18(4):519-527.
- [17] Trattnig S, Mamisch TC, Welsch GH, et al. Quantitative T2 mapping of matrix-associated autologous chondrocyte transplantation at 3 Tesla: an *in vivo* cross-sectional study [J]. *Invest Radiol*, 2007, 42(6):442-448.
- [18] Chang G, Xia D, Sherman O, et al. High resolution morphologic imaging and T2 mapping of cartilage at 7 Tesla: comparison of cartilage repair patients and healthy controls [J]. *Magn Reson Mater Phy*, 2013, 26(6):539-548.
- [19] Mosher TJ, Smith HE, Collins C, et al. Change in knee cartilage T2 at MR imaging after running: a feasibility study [J]. *Radiology*, 2005, 234(1):245-249.
- [20] Rubenstein JD, Kim JK, Morova-Protzner I, et al. Effects of collagen orientation on MR imaging characteristics of bovine articular cartilage [J]. *Radiology*, 1993, 188(1):219-226.
- [21] Mamisch TC, Trattnig S, Quirbach S, et al. Quantitative T2 mapping of knee cartilage: differentiation of healthy control cartilage and cartilage repair tissue in the knee with unloading-initial results [J]. *Radiology*, 2010, 254(3):818-826.
- [22] Mosher TJ, Smith HE, Collins C, et al. Change in knee cartilage T2 at MR imaging after running: a feasibility study [J]. *Radiology*, 2005, 234(1):245-249.
- [23] Kaab MJ, Ito K, Clark JM, et al. Deformation of articular cartilage collagen structure under static and cyclic loading [J]. *J Orthop Res*, 1998, 16(6):743-751.

(收稿日期: 2013-08-23)