

T2 Mapping评价三角纤维软骨复合体损伤的认识进展

杜康佳¹, 温生宝^{2*}

¹青海大学研究生院, 青海 西宁

²青海大学附属医院, 青海 西宁

收稿日期: 2022年4月27日; 录用日期: 2022年5月21日; 发布日期: 2022年5月31日

摘 要

三角纤维软骨复合体(TFCC)位于腕部尺侧, 是腕关节活动的重要组成部分。TFCC损伤是导致腕尺侧疼痛的重要原因, 会造成很多生活中的不便。由于其形态复杂, 结构微小, 故损伤时影像及临床医生对其精确诊断有一定的困难。随着影像技术的发展, 对TFCC损伤的诊治有了进一步的提高。目前磁共振成像(MRI)是无创性观察TFCC损伤的重要检查方法; T2 Mapping可定量分析TFCC损伤, 为临床诊治提供重要信息。

关键词

磁共振成像(MRI), T2 Mapping, 三角纤维软骨复合体损伤

Progress in Understanding the Evaluation of Damage of Triangular Fibrocartilage Complex by T2 Mapping

Kangjia Du¹, Shengbao Wen^{2*}

¹Graduate School of Qinghai University, Xining Qinghai

²Qinghai University Affiliated Hospital, Xining Qinghai

Received: Apr. 27th, 2022; accepted: May 21st, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

Triangular fibrocartilage complex (TFCC) is located at the ulnar side of the wrist, which is an im-
*通讯作者。

文章引用: 杜康佳, 温生宝. T2 Mapping 评价三角纤维软骨复合体损伤的认识进展[J]. 临床医学进展, 2022, 12(5): 4776-4782. DOI: 10.12677/acm.2022.125693

portant part of wrist activity. TFCC injury is an important cause of wrist ulnar pain, which can cause a lot of inconvenience in life. Due to its complex shape and small structure, it is difficult for the imaging and clinicians to accurately diagnose injury. With the development of imaging technology, the diagnosis and treatment of TFCC injury have been further improved. At present, magnetic resonance imaging (MRI) is an important examination method for noninvasive observation of TFCC injury; T2 Mapping can quantitatively analyze TFCC injury and provide important information for clinical diagnosis and treatment.

Keywords

Magnetic Resonance Imaging (MRI), T2 Mapping, Triangular Fibrocartilage Complex (TFCC) Injury

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

腕关节三角纤维软骨复合体(triangular fibrocartilage complex, TFCC)由一组复杂的纤维软骨和韧带结构组成,在腕部生物力学中起着重要的作用;主要功能为稳定关节(远端尺桡关节和尺腕关节)和传导负荷(大约 20%负荷由腕尺侧的 TFCC 传导) [1] [2]。TFCC 损伤是尺侧腕关节疼痛的常见原因[1] [2]。TFCC 损伤会严重影响腕关节的功能,一旦损伤,将严重影响患者的日常生活,甚至不能完成开关门、拧毛巾等日常活动。近年来,人们对 TFCC 的认识越来越全面,在临床中 TFCC 损伤也受到更多的重视,而无创性精确评估 TFCC 损伤程度依旧是困扰临床医生的一大难题[3]。目前磁共振成像(MRI)是诊断 TFCC 损伤最重要的辅助检查[3]。T2 Mapping 可以对软骨进行定量分析,检测软骨损伤的早期病变,通过比较早期软骨损伤和正常软骨的 T2 弛豫时间,评估软骨损伤的程度,为早期诊断及治疗监测提供帮助[4]。

2. 三角纤维软骨复合体

2.1. TFCC 的解剖结构

TFCC 是腕部外源性掌韧带的尺侧部分,位于尺骨远端和腕骨近端之间,主要由固有三角纤维软骨盘(triangular fibrocartilage discus, TFC)、尺侧腕伸肌腱鞘(extensor carpi ulnaris, ECU)、尺侧副韧带(ulnocarpal ligament, UCL)及半月板同源物(meniscal homolog, MH)组成[5];其中固有三角纤维软骨包含纤维软骨中央盘及毗邻的背侧桡尺韧带(dorsal radioulnar ligament, DRUL)和掌侧桡尺韧带(volar radioulnar ligament, VRUL),TFC 的各组成部分与桡骨远端相连;背、掌桡尺韧带加强中央盘的边缘,使之增厚;纤维软骨中央盘为中央薄、外周厚的双凹形,中央盘将尺骨头与腕骨隔开[6]。尺侧腕韧带包含尺三角韧带(ulnotriquetral ligament, UTL)、尺月韧带(ulnolunate ligament, ULL),尺三角韧带和尺月韧带位于 TFCC 的掌侧;在尺骨中央凹和尺骨茎突底部与 VRUL 近端连接,向远端延伸,附着在月骨和三角骨上,提供月骨和月三角关节的掌侧稳定[1] [2]。尺侧腕伸肌腱鞘位于复合体的尺侧背侧[6];半月板同源物与中央盘共同起于尺骨背侧靠近尺骨的边缘,有尸解证实其附着于豌豆骨[5]。

2.2. TFCC 的血供

TFCC 的血供主要由外周动脉通过背侧和掌侧的骨间前动脉及尺侧的尺动脉穿支供应[7]。Bednar 等

进行的尸体标本组织学分析表明, 只有 10%到 40%的 TFCC 由穿透性血管供应, 软骨盘的中央部分和桡骨附件构成区无血管供应[8]。

2.3. TFCC 的损伤分型

目前, 临床多采用的 TFCC 损伤分型系统为 1989 年由 Palmer [9]提出的损伤分型, Palmer 根据病理部位将 TFCC 损伤分为创伤性(I 类)和退行性(II 类)。创伤性损伤根据病变部位将病变分为 A、B、C 及 D4 个亚型。IA 型指 TFCC 水平部位的撕裂或穿孔, 撕裂为位于 TFCC 桡侧附着处 2~3 mm 的宽约 1~2 mm 的狭缝; IB 型指 TFCC 尺侧附着点创伤性撕脱, 伴或不伴尺骨茎突骨折; IC 型指 TFCC 周围撕裂, 即 TFCC 远端附着在月骨(尺月韧带)或三角骨(尺三角韧带)上发生的撕脱; ID 型指 TFCC 在乙状切迹远端附着于桡骨上的外伤性撕脱, 伴或不伴乙状切迹骨折。退行性损伤根据退变的范围及位置将病变分为 A、B、C、D 及 E5 个亚型; IIA 型指 TFC 磨损; IIB 指 TFC 磨损以及月骨尺侧或尺骨头桡侧磨损或软骨软化; IIC 型指 TFC 穿孔(多位于无血管区、卵圆形)以及月骨/尺骨磨损或软骨软化; IID 型指 TFC 穿孔、月骨/尺骨磨损或软骨软化以及月三角韧带撕裂; IIE 型指 TFC 穿孔、月骨/尺骨磨损或软骨软化、月三角韧带完全撕裂以及尺腕关节退行性关节炎。

2.4. TFCC 损伤的病因及发病机制

创伤性: TFCC 损伤多由前臂的急性旋转损伤, 前臂尺侧轴向负荷合并强拉伤或跌倒时旋前位手部着地所致。退行性: TFCC 损伤可由于尺腕关节的慢性过度负荷导致, 常于腕关节尺侧慢性负荷、尺骨撞击综合征或尺骨正变异等相关。

2.5. TFCC 损伤的临床表现

症状: 腕关节尺侧疼痛最常见, 患者可出现局部肿胀, 关节活动受限; 尺神经激惹(损伤牵拉或卡压)时会表现出环、小指的麻木。体征: “尺腕应力试验”阳性提示 TFCC 损伤[10]; “钩试验”、“蹦床试验”阳性提示三角纤维软骨复合体中央凹撕裂, Atzei 等[11]证明“钩试验”比“蹦床试验”更精确。

2.6. TFCC 的影像学表现

目前, X 线、CT、MRI、MRA、腕关节镜是诊断 TFCC 损伤的主要辅助检查, X 线是检查腕关节疾病的首选检查, X 线检查主要用来观察是否存在尺骨正变异, 同时检查是否存在腕部骨折[12]; 但 X 线对软组织分辨率有限, 仅能显示关节间隙增宽或狭窄等间接征象, 不能显示 TFCC 的软骨及韧带损伤情况[13]。CT 较 X 线相比, 可显示清楚显示 X 线不易显示的隐匿性骨折、骨关节面下骨质破坏、硬化及周围软组织的损伤情况, 但辐射剂量较大[14]。腕关节镜为有创检查, MRA 需注射造影剂。高场强 MRI 具较高的软组织分辨率, 可以清晰直观地显示软组织和韧带的形态及信号[15], 故多采用 MRI 检查作为 TFCC 的常规检查。

MRI 检查中 PD-FS 序列显示 TFCC 损伤最佳[16]: 创伤性: IA 型: 表现为 TFC 中心出现裂隙样高信号影; IB 型: 表现为尺骨茎突连接部或尺骨茎突凹处韧带附着处结构模糊, 损伤处表现为高信号; IC 型: 表现为尺月韧带/尺三角韧带不连续, 断端结构模糊, 信号增高; ID 型: 表现为桡骨乙状切迹连接部形态欠规整, 信号增高。退变性: IIA 型: 表现为 TFC 变薄, 内可见中等信号影, TFC 结构完整; IIB 型: 表现为 TFC 变薄, 内见中等信号影, 月骨内见水肿样高信号影, 关节软骨不规则、缺失; IIC 型: 表现为 TFC 变薄, 内见高信号影, 与 IA 中心穿孔的裂隙样高信号影不同, 月骨水肿囊变, 关节软骨不规则、缺失; IID 型: 表现为 FC 变薄, 内见高信号影, 月骨水肿, 关节软骨不规则、缺失, 月三角韧带撕裂, 损

伤处结构模糊; IIE 型: 表现为 TFC 变薄, 内见高信号影, 邻近月/三角骨囊变, 软骨变薄, 月三角韧带撕裂, 桡尺远端关节骨质增生[16] [17]。

3. 关节软骨的组织学表现

关节软骨主要由软骨细胞和细胞外基质(extracellular matrix ECM)组成, 为透明软骨; 其中, 软骨细胞的含量不足 10%, 细胞外基质主要包括蛋白多糖(proteoglycans, PG)、水、胶原。胶原主要为 II 型胶原, 关节软骨的分层与胶原纤维的排列方式密切相关。水是最主要组成部分, 约占总质量的 80%, 多为游离状态, 具有利于软骨变形和传导负荷的功能[18]。蛋白多糖可以将大量水分吸引到软组织中, 从而使其能够抵抗压缩[19]。顾名思义, TFCC 通常被视为是一种纤维软骨结构, 但 Milz 等[20]研究表明, TFCC 是一种不均匀结构, 其中组织表型从桡尺向尺侧转移, 在 TFCC 的尺侧, 半月板同源物为纤维状, 但在桡侧, 中央盘为纤维软骨状。

4. T2 Mapping

4.1. T2 Mapping 成像原理

磁共振成像是一种可重复、非破坏性、非侵入性的技术, 利用非电离辐射产生高对比度图像。T2 Mapping 技术是通过组织深度评估软骨结构完整性及含水量的技术[21]; 扫描中通常采用多层面多回波的 SE 序列, 在静磁场中施加一个 90°射频脉冲, 质子自旋间相互作用, 传导能量, 导致静磁化去相位和整体信号衰减; T2 弛豫时间即为质子在受激励后释放能量这一过程所需时间。为了计算 T2 值, 需要获取多次回波的图像, 通过拟合曲线来计算信号强度(signal intensity, SI)与 TE 之间的衰减时间常数; T2 值通常使用单指数衰减方程在逐像素的基础上计算: $SI = S_0 \cdot \exp(-TE/T_2)$, 其中 S_0 是指表观质子密度[22]。灰阶的图像经过后处理工作站获得 T2 伪彩图, 在感兴趣区(region of interest, ROI)勾画, 计算机计算获得 T2 值。

4.2. T2 Mapping 成像的影响因素

在关节软骨成像中, 胶原蛋白含量及排列方向、蛋白多糖、含水量是影响 T2 值的重要影响因素[23], T2 值可定量反应关节软骨成分的变化。Smith [24]等研究表明: 软骨 T2 值主要由胶原含量和纤维排列决定; 从软骨表面到最深处, T2 值逐渐减低, 这主要是由于胶原纤维层的不同和含量的不同。Watrin [25]等通过人类和动物实验证明, 软骨的 T2 值与软骨蛋白多糖、含水量之间存在直接关系。软骨中的 T2 值与蛋白多糖的分布成反比, 而与水的分布成正比。综上所述, 关节软骨 T2 弛豫时间的增加与软骨的超微结构损伤有相关关系。在健康状态下, 关节软骨内的水分子是均匀分布的, 但关节软骨损伤时, 水的通透性增高, 暴露更多的蛋白多糖的侧基链基团, 导致吸收更多的水分子[26], 损伤时的软骨水分较正常软骨的变化明显, 因此, 水分子是软骨损伤敏感的特征参数, 可以早期定量的体现软骨的损伤程度[27]。

4.3. T2 Mapping 的临床应用

在腕关节的应用中, 祁艳梅[28]等人对 81 名健康志愿者行双侧腕关节冠状位 T2 Mapping 及常规 MR 检查, 选取最大腕关节 TFCC 层面, 勾画 5 个区域, 分别为桡侧软骨、腕关节三角纤维软骨盘、纤维血管组织、类半月板、三角纤维软骨盘的尺侧附着处; 结果显示, 腕关节软骨不同区域 T2 值不同, 表明 T2 Mapping 成像可直观显示腕关节 TFCC 形态, 定量分析 TFCC 不同区域 T2 值变化, 不受性别及是否利手的影响。李伟[29]等回顾性分析了 53 例慢性外侧踝关节不稳患者, 结果表明, 慢性外侧踝关节不稳患者的距骨软骨损伤主要发生在距骨内侧, 研究通过优化后的 T2 Mapping 成像技术扫描, 能够定量测定

软骨损伤程度, 能为临床早期治疗慢性外侧踝关节不稳提供重要的影像学定量参考[30]。Meng [31]等研究表明, T2 Mapping 技术可以评估膝关节骨性关节炎早期软骨和半月板基质退变, 并帮助启动治疗和检测疾病进展。类风湿性关节炎(Rheumatoid arthritis, RA)是一种以骨和软骨损伤为主要特征的炎性关节疾病[32], Renner [33]等人对 30 例 RA 患者进行 T2 Mapping 成像, 并在掌指关节的 6 个软骨区绘制 T2 松弛时间图, 显示关节软骨的胶原纤维网络和水分子变化, 结果为抗环瓜氨酸肽抗体阳性患者(anti-citrullinated peptide antibodies, ACPA)和类风湿因子(rheumatoid factor, RF)阳性患者以及疾病持续时间较长的患者的 T2 弛豫时间显著增加, 说明软骨早期发生改变; 这些数据表明, 通过 T2 Mapping 的扫描, 可以定位和量化 RA 患者手部关节软骨损伤。

5. 其他 MRI 技术在关节软骨中的应用

随着 3-Tesla(3T)MRI 的出现, T2 Mapping、T1rho 成像、弥散加权成像(DWI)、延迟钆增强 MR 成像(dGEMRIC)等是能够很好的显示关节软骨的磁共振成像技术[34], 可以用来评估关节软骨基质成分的变化, 并提供软骨代谢和相关生化信息[35]。在软骨损伤中, 最有效的 MR 图像生物标记是 T2 Mapping 序列[36]。T1 弛豫时间被用作探测软骨生化变化的替代参数[37]; T1 参数描述了旋转框架中的自旋晶格弛豫, 它用来探测运动受限的水分子与局部大分子环境之间的相互作用。关节软骨中的细胞外基质为水分子提供运动受限的环境, 细胞外基质的变化, 如蛋白多糖的丢失, 将反映在 T1 的测量中[38]。Makela [39]等人和 Duvvuri [40]等人进行的研究指出, 蛋白多糖的化学位移 NH 和 OH 基团与组织水之间的质子交换可能是导致 T1 值变化的重要弛豫机制。DWI 是利用梯度场中布朗运动引起的相位不一致导致的水分子信号衰减原理; 由于水分子的扩散率对软骨基质的水化非常敏感, 因此, 水的自由扩散为测定软骨内的水含量提供了一种可能, 软骨基质内的水分子减少后, 表观扩散系数(ADC)值增加[41]。软骨的延迟钆增强 MR 成像技术可以用于评价关节软骨的分子组成[42], 但需要注射钆造影剂, 对于钆造影剂过敏患者并不适用。综上, T2 Mapping 可作为非侵入性方法评估三角纤维软骨复合体损伤。

6. 总结与展望

与常规 MRI 序列相比, T2 Mapping 在定量测量及对软骨生物化学成分等微观变化方面具有优势。随着磁共振分子成像技术的发展, T2 Mapping、T1 rho 成像、延迟钆增强 MR、²³Na MRI 等新技术已是国内外研究的热点[43]。T2 Mapping 技术定量评价软骨组织学在诊断方面已取得一定进展, 有助于 TFCC 损伤的诊断, 并在治疗评估方面发挥重要作用。

参考文献

- [1] Daun, M., et al. (2020) Magnetic Resonance Imaging of the Triangular Fibrocartilage Complex. *Topics in Magnetic Resonance Imaging*, 29, 237-244. <https://doi.org/10.1097/RMR.0000000000000253>
- [2] Bain, G.I., Munt, J.M. and Turner, P.C. (2008) New Advances in Wrist Arthroscopy. *Arthroscopy*, 24, 355-367. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2007.11.002>
- [3] 刘路, 王志新, 陈山林, 刘波, 朱瑾, 刘畅. 三角纤维软骨复合体结构的解剖及磁共振表现比较[J]. 中华医学杂志, 2021, 101(12): 836-840.
- [4] Xu, J., et al. (2011) Value of T2-Mapping and DWI in the Diagnosis of Early Knee Cartilage Injury. *Journal of Radiology Case Reports*, 5, 13-18. <https://doi.org/10.3941/jrcr.v5i2.515>
- [5] Zhan, H.L., et al. (2017) High-Resolution 3T Magnetic Resonance Imaging of the Triangular Fibrocartilage Complex in Chinese Wrists: Correlation with Cross-Sectional Anatomy. *Chinese Medical Journal*, 130, 817-822. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.202746>
- [6] Cody, M.E., et al. (2015) MR Imaging of the Triangular Fibrocartilage Complex. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*, 23, 393-403. <https://doi.org/10.1016/j.mric.2015.04.001>

- [7] Ng, A., *et al.* (2017) MR Imaging of the Traumatic Triangular Fibrocartilaginous Complex Tear. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **7**, 443-460. <https://doi.org/10.21037/qims.2017.07.01>
- [8] Bednar, M.S., Arnoczky, S.P. and Weiland, A.J. (1991) The Microvasculature of the Triangular Fibrocartilage Complex: Its Clinical Significance. *Journal of Hand Surgery*, **16**, 1101-1105. [https://doi.org/10.1016/S0363-5023\(10\)80074-7](https://doi.org/10.1016/S0363-5023(10)80074-7)
- [9] Palmer, A.K. (1989) Triangular Fibrocartilage Complex Lesions: A Classification. *Journal of Hand Surgery*, **14**, 594-606. [https://doi.org/10.1016/0363-5023\(89\)90174-3](https://doi.org/10.1016/0363-5023(89)90174-3)
- [10] 肖琦科, 魏玉珊. 60 例三角纤维软骨复合体损伤治疗的回顾性分析[J]. 西南国防医药, 2016, 26(9): 1002-1004.
- [11] Atzei, A., *et al.* (2021) The Hook Test Is More Accurate than the Trampoline Test to Detect Foveal Tears of the Triangular Fibrocartilage Complex of the Wrist. *Arthroscopy*, **37**, 1800-1807. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2021.03.005>
- [12] 高斌, 张聪聪, 邹宾, 郭旺, 李永平. 腕关节镜治疗三角纤维软骨复合体损伤研究进展[J]. 国际骨科学杂志, 2020, 41(6): 330-333.
- [13] 祁艳梅, 唐治, 周晟. 腕关节损伤的影像学检查研究进展[J]. 西北国防医学杂志, 2020, 41(9): 589-594.
- [14] Mallee, W.H., *et al.* (2015) Computed Tomography versus Magnetic Resonance Imaging versus Bone Scintigraphy for Clinically Suspected Scaphoid Fractures in Patients with Negative Plain Radiographs. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, No. 6, Article No. CD010023. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010023.pub2>
- [15] 王志利, 徐丹凤, 吉幸双, 赵树军, 刘兵. 3.0T MRI 对腕骨间韧带损伤早期诊断的价值[J]. 中国矫形外科杂志, 2018, 26(20): 1893-1897.
- [16] Oneson, S.R., *et al.* (1996) MR Imaging Interpretation of the Palmer Classification of Triangular Fibrocartilage Complex Lesions. *RadioGraphics*, **16**, 97-106. <https://doi.org/10.1148/radiographics.16.1.97>
- [17] 李军, 甘伟, 刘维久, 刘创宇. 腕关节不稳合并三角纤维软骨复合体损伤患者早期磁共振成像表现[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(12): 160-162.
- [18] 吴艳, 曾旭文, 梁治平, 钟敏之, 黄结玲, 谭源满. T2 Mapping 评价关节软骨损伤及修复的研究进展[J]. 生物医学工程与临床, 2015(2): 208-211.
- [19] Roughley, P., *et al.* (2006) The Involvement of Aggrecan Polymorphism in Degeneration of Human Intervertebral Disc and Articular Cartilage. *European Cells & Materials*, **11**, 1-7. <https://doi.org/10.22203/eCM.v011a01>
- [20] Milz, S., *et al.* (2007) An Immunohistochemical Study of the Triangular Fibrocartilage Complex of the Wrist: Regional Variations in Cartilage Phenotype. *Journal of Anatomy*, **211**, 1-7. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2007.00742.x>
- [21] Liess, C., *et al.* (2002) Detection of Changes in Cartilage Water Content Using MRI T2-Mapping *In Vivo*. *Osteoarthritis and Cartilage*, **10**, 907-913. <https://doi.org/10.1053/joca.2002.0847>
- [22] Eagle, S., Potter, H.G. and Koff, M.F. (2017) Morphologic and Quantitative Magnetic Resonance Imaging of Knee Articular Cartilage for the Assessment of Post-Traumatic Osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Research*, **35**, 412-423. <https://doi.org/10.1002/jor.23345>
- [23] Lüssea, S., *et al.* (2000) Evaluation of Water Content by Spatially Resolved Transverse Relaxation Times of Human Articular Cartilage. *Magnetic Resonance Imaging*, **18**, 423-430. [https://doi.org/10.1016/S0730-725X\(99\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0730-725X(99)00144-7)
- [24] Smith, H.E., *et al.* (2001) Spatial Variation in Cartilage T2 of the Knee. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **14**, 50-55. <https://doi.org/10.1002/jmri.1150>
- [25] Watrin, A., *et al.* (2001) T2 Mapping of Rat Patellar Cartilage. *Radiology*, **219**, 395-402. <https://doi.org/10.1148/radiology.219.2.r01ma32395>
- [26] Hochberg, M.C., *et al.* (2019) Effect of Intra-Articular Sprifermin vs Placebo on Femorotibial Joint Cartilage Thickness in Patients with Osteoarthritis: The FORWARD Randomized Clinical Trial. *JAMA*, **322**, 1360-1370. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.14735>
- [27] Argentieri, E.C., Burge, A.J. and Potter, H.G. (2018) Magnetic Resonance Imaging of Articular Cartilage within the Knee. *Journal of Knee Surgery*, **31**, 155-165. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1620233>
- [28] 祁艳梅, 邓兴, 王媛, 陈晓飞, 董馥闻, 王闻奇, 等. T2 Mapping 成像评价健康成年人腕关节三角纤维软骨复合体差异[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(3): 448-452.
- [29] 李伟, 初占飞, 于泽晨, 于静红, 贾岩波, 王宗博. 基于序列优化的 T2-Mapping 定量成像技术评价踝关节距骨骨软骨损伤[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(27): 4333-4337.
- [30] 刘国彬, 张国平, 任庆云, 雷立存, 赵峰, 高宏阳, 等. 踝关节不同姿势下 MRI 检查对其周围韧带及肌腱损伤的诊断价值: 单中心、诊断性试验[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(4): 598-602.
- [31] Meng, X.H., *et al.* (2017) Quantitative Evaluation of Knee Cartilage and Meniscus Destruction in Patients with Rheu-

- matoid Arthritis Using T1 ρ and T2 Mapping. *European Journal of Radiology*, **96**, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.09.018>
- [32] McInnes, I.B. and Schett, G. (2011) The Pathogenesis of Rheumatoid Arthritis. *New England Journal of Medicine*, **365**, 2205-2219. <https://doi.org/10.1056/NEJMra1004965>
- [33] Renner, N., et al. (2020) T2 Mapping as a New Method for Quantitative Assessment of Cartilage Damage in Rheumatoid Arthritis. *The Journal of Rheumatology*, **47**, 820-825. <https://doi.org/10.3899/jrheum.180728>
- [34] Meyer, J.S.M. and Jaramillo, D.M.M. (2008) Musculoskeletal MR Imaging at 3 T. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*, **16**, 533-545. <https://doi.org/10.1016/j.mric.2008.04.004>
- [35] Welsch, G.H., et al. (2009) Multimodal Approach in the Use of Clinical Scoring, Morphological MRI and Biochemical T2-Mapping and Diffusion-Weighted Imaging in Their Ability to Assess Differences between Cartilage Repair Tissue after Microfracture Therapy and Matrix-Associated Autologous Chondrocyte Transplantation: A Pilot Study. *Osteoarthritis and Cartilage*, **17**, 1219-1227. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2009.03.018>
- [36] Nieminen, M.T., et al. (2000) Quantitative MR Microscopy of Enzymatically Degraded Articular Cartilage. *Magnetic Resonance in Medicine*, **43**, 676-681. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2594\(200005\)43:5<676::AID-MRM9>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2594(200005)43:5<676::AID-MRM9>3.0.CO;2-X)
- [37] Regatte, R.R., et al. (2004) 3D-T1 ρ -Relaxation Mapping of Articular Cartilage: In Vivo Assessment of Early Degenerative Changes in Symptomatic Osteoarthritic Subjects. *Academic Radiology*, **11**, 741-749. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2004.03.051>
- [38] Li, X., et al. (2005) In Vivo 3T Spiral Imaging Based Multi-Slice T(1 ρ) Mapping of Knee Cartilage in Osteoarthritis. *Magnetic Resonance in Medicine*, **54**, 929-936. <https://doi.org/10.1002/mrm.20609>
- [39] Makela, H.I., et al. (2001) Proton Exchange as a Relaxation Mechanism for T1 in the Rotating Frame in Native and Immobilized Protein Solutions. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **289**, 813-818. <https://doi.org/10.1006/bbrc.2001.6058>
- [40] Duvvuri, U., et al. (2001) Water Magnetic Relaxation Dispersion in Biological Systems: The Contribution of Proton Exchange and Implications for the Noninvasive Detection of Cartilage Degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **98**, 12479-12484. <https://doi.org/10.1073/pnas.221471898>
- [41] Miller, K.L., et al. (2004) Steady-State Diffusion-Weighted Imaging of in Vivo Knee Cartilage. *Magnetic Resonance in Medicine*, **51**, 394-398. <https://doi.org/10.1002/mrm.10696>
- [42] 程喆, 冷晓明, 李红, 代向党, 乔继红. 3D 延迟增强 MR 成像(dGEMRIC)检测髋关节发育不良中退变软骨的价值评估[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2016, 14(3): 117-119.
- [43] Cotofana, S., et al. (2011) In Vivo Measures of Cartilage Deformation: Patterns in Healthy and Osteoarthritic Female Knees Using 3T MR Imaging. *European Radiology*, **21**, 1127-1135. <https://doi.org/10.1007/s00330-011-2057-y>