

· 综述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.14.024

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240319.1134.002\(2024-03-19\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240319.1134.002(2024-03-19))

## 关节软骨浅表层及其损伤的 MRI 研究进展\*

刘振宇<sup>1</sup>, 齐美玲<sup>1</sup>, 甄俊平<sup>2△</sup>

(1. 山西医科大学医学影像学院, 太原 030001; 2. 山西医科大学第二医院影像科, 太原 030001)

**[摘要]** 关节软骨浅表层(SFZ)是关节软骨的最上层,其损伤在临床上较为常见,及时发现并进行治疗,可以延缓发展为骨性关节炎(OA)的进度,减轻患者的痛苦和经济负担。MRI 是目前评价关节软骨损伤最敏感的无创检查技术。常规 MRI 对早期检测软骨形态学改变前的细微退变存在局限性,在关节软骨病变损伤处于不可逆转阶段时才可以发现。近些年来,随着 3T、7T 等高场强 MRI 技术的发展,其对软骨内的水分子、胶原纤维及组织各向异性的探测具有相当的优势,可对关节软骨 SFZ 超微结构及其生化成分改变做出定量分析及功能成像。该文对 MRI 在关节软骨 SFZ 及其损伤方面诊断价值的最新研究进展进行综述。

**[关键词]** 关节软骨;浅表层;损伤;定量或功能;磁共振;综述

**[中图法分类号]** R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)14-2207-05

## Research advances in MRI on superficial zone and its injury of articular cartilage\*

LIU Zhenyu<sup>1</sup>, QI Meiling<sup>1</sup>, ZHEN Junping<sup>2△</sup>

(1. College of Medical Imaging, Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030001, China; 2. Department of Imaging, the Second Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030001, China)

**[Abstract]** Articular cartilage superficial zone (SFZ) is the top layer of articular cartilage and its injuries are common in clinic. Therefore its find in time and conducting the treatment can delay the progress rate of osteoarthritis (OA) and alleviate the pain and economic burden of the patients. At present, MRI is the most sensitive noninvasive examination technique to evaluate articular cartilage injury. Conventional MRI is limited in the early detection of subtle degeneration before cartilage morphological changes existence, and articular cartilage lesions can only be detected when the injury is in an irreversible stage. In recent years, with the development of high field intensity MRI techniques such as 3T and 7T, the detection of water molecules, collagen fibers and tissue anisotropy in cartilage has considerable advantages, which can make the quantitative analysis and functional imaging for the ultrastructure and biochemical composition changes of SFZ in articular cartilage. This article reviews the latest research progress on diagnostic value of MRI on articular cartilage SFZ and injuries.

**[Key words]** articular cartilage; superficial zone; injury; quantitation or function; magnetic resonance imaging; review

关节软骨浅表层(superficial zone, SFZ)可以使关节平稳运动,在维持关节稳定方面发挥着重要作用,其损伤较为常见,且是骨性关节炎(osteoarthritis, OA)的早期改变,因此对 SFZ 损伤进行诊断具有一定意义<sup>[1-4]</sup>。MRI 是目前评价关节软骨损伤首选的影像学检测方法<sup>[5-6]</sup>。传统的 MRI 在关节软骨显像及损伤的诊断中发挥了重要作用,但由于技术限制其在观察 SFZ 细微退变方面存在局限性<sup>[7]</sup>。近年来出现了一系列定量和功能 MRI 成像技术,在观察 SFZ 超微

结构及生化成分改变的定量计算与评估方面具有重要价值,包括 T2 mapping、T1rho mapping 和超短 TE 成像(ultra-short time of echo, UTE)等<sup>[8]</sup>。本文对针对 SFZ 的 MRI 技术研究进行综述。

### 1 关节软骨 SFZ 的成分与结构

关节软骨主要由细胞外基质与软骨细胞组成,细胞外基质主要由胶原纤维(collagen fiber, CF)、蛋白多糖(proteoglycan, PG)和水组成,缺乏血管和神经,仅通过扩散获得营养,故其损伤之后很难自我修

复<sup>[9-12]</sup>。根据 CF 网络结构不同及 PG 和水的含量不同,可将关节软骨分为 4 层:浅表层(切线层)、移行层(中央层)、放射层(深层)和钙化层<sup>[13]</sup>。

关节软骨 SFZ 主要由走向与关节面平行的 CF 构成,软骨细胞排列也与关节面平行,PG 含量最低、水含量最高,厚度约占全层的 10%~20%<sup>[13]</sup>。关于 SFZ 的超微结构,有研究在透射电镜下观察到鼠 SFZ 由 2~3 层细胞组成,软骨细胞呈长梭形或扁椭圆形,胞突少而短,内质网丰富,线粒体和糖原颗粒较多,高尔基体可见,软骨基质中胶原原纤维细而密集<sup>[14]</sup>。此外在动物模型的研究中发现,马具有巨大的关节解剖、成熟的软骨损伤手术技术应用等优势,与人体最接近<sup>[15]</sup>。

## 2 多序列 MRI 对关节软骨分层及 SFZ 的显影

定量和功能 MRI 成为近些年研究热点,包括 T1rho mapping、T2 mapping、钆延迟增强 MR 软骨成像(delayed gadolinium enhanced magnetic resonance imaging of cartilage, dGEMRIC)、UTE 成像(UTE imaging)、扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI) & 弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)、黏多糖的化学交换饱和转移(glycosaminoglycan chemical exchange saturation transfer, gagCEST)及钠成像(Sodium imaging)。基于软骨各层的生理变化和物质含量不同,定量和功能 MRI 可以识别出关节软骨各层 CF 排列、PG 含量和水含量的不同,通过对关节软骨分层来显示 SFZ<sup>[8]</sup>。各功能序列原理及优势如下:T2 mapping 采用多回波快速自旋回波序列,即通过采集相同重复时间(TR)、不同恢复时间(TE)的一系列加权影像,测量不同 TE 的 MRI 信号强度,计算每个体素的 T2 值,可在体素水平上对组织的 T2 值进行定量分析,同时通过生成灰度或伪彩图来提供客观数据,其优势在于可反映胶原成分含量及 CF 方向的变化;T1rho mapping 与 T2 mapping 相似,除了在磁化倾斜到横向平面后,还需要一个额外的射频脉冲,优势在于可反映 PG 含量的变化;UTE 可以捕捉短 T2 组织信号,优势在于软骨分层更加贴近组织学分层和反映软骨中快弛豫和慢弛豫水质子的信号<sup>[8,13,16-17]</sup>。

现有研究中,NAMIRANIAN 等<sup>[18]</sup>使用 UTE 技术将人体膝关节标本分为深层(软骨下骨侧软骨厚度的 2/3)和浅层(软骨厚度的 1/3)。SHAO 等<sup>[19]</sup>使用 UTE 技术对尸体的髌骨软骨进行分层,在放射层深部和钙化层上方,分成浅层(20%深度)、中层(50%深度)和放射层(30%深度)3 个区域。有研究<sup>[20]</sup>使用 T1rho mapping 技术对丹麦长白猪的髌骨软骨进行扫描,可以识别关节软骨的四层带状结构。SCHENK 等<sup>[21]</sup>使用 T2 mapping 技术将膝关节软骨的感兴趣

区域(ROI)分为两个大小相等的层面,分别为深层(最接近骨-软骨界面)和浅层(最接近关节面),这些研究实现了对关节软骨的分层显示。在一些动物模型中可以直接显示 SFZ,且与组织学分层一致,而在大部分人体相关的 MRI 研究中将关节软骨划分浅层、中层和深层(或浅层和深层),与组织学分层仍存在一定差异<sup>[22]</sup>。

一些学者联合人工智能对软骨及软骨 SFZ 进行快速成像和准确的定量评估,常用的技术有压缩传感(compressed sensing, CS)和磁共振指纹分析(MR fingerprinting, MRF)<sup>[23-24]</sup>。CS 具有缩短扫描时间和提高空间分辨率的优势<sup>[25-26]</sup>。MRF 技术可同时测量多个组织特性,同时估计多个 MRI 参数(如 T1、T2 和 T1ρ 等),减少扫描时间和提高 T1 和 T2 精度<sup>[27]</sup>。可见 CS 及 MRF 技术在研究 SFZ 方面具有巨大潜力,可以在一定程度上弥补 MRI 分层与组织学分层存在差异的缺陷。

## 3 关节软骨 SFZ 损伤

### 3.1 关节软骨 SFZ 损伤的特征

软骨损伤早期表现为 SFZ 超微结构及其生化成分改变(PG 的丢失、胶原结构的改变和水分含量的增加等)导致的软骨软化、变性等;随后出现表面纤维化、裂隙等,随着损伤的进一步加重,逐渐发展为软骨局部变薄、软骨部分或者全层缺损及软骨下骨改变<sup>[28-32]</sup>。此外,已有研究证明在软骨损伤过程中,SFZ 最先出现变化,这可能与 SFZ 在人体行走、跑步等过程中更容易受到机械负荷的影响有关<sup>[33-36]</sup>。

软骨损伤的诊断“金标准”是关节镜,评价关节软骨损伤的分级评分方法多种多样,目前应用较多的是国际软骨修复协会软骨损伤分级系统,但其分级尚未聚焦于 SFZ,通过对比可以发现国际软骨修复协会软骨损伤分级中的 1 级(接近正常,仅有表浅的、钝性的缺口和/或表浅的开裂)和 2 级(异常,损伤深度小于软骨厚度的一半)可以更好地反映软骨 SFZ 损伤<sup>[37]</sup>。

### 3.2 SFZ 损伤的 MRI 表现

在 MRI 图像上,软骨 SFZ 损伤最先表现为内部基质成分的变化,表现为异常信号<sup>[28]</sup>。随着病程的发展,表现为表浅的裂隙及缺损,但受分辨率不足等因素的影响,目前使用 MRI 对软骨表面裂隙及较浅的缺损显影方面具有一定挑战性,其诊断结果与关节镜的相关性差<sup>[38-39]</sup>。张键等<sup>[40]</sup>在猪膝关节 OA 模型中,可以观察到深度达到关节软骨全层厚度 10%的微小缺损,是现有研究中能观察到 SFZ 缺损的最小深度。基于 MRI 技术限制,其对 SFZ 损伤的诊断价值在于观察超微结构及其生化成分的变化,但 MRI 分级评分标准暂无报道。

MRI 常规序列在软骨损伤时可以观察到局部软

骨变薄、信号改变、软骨部分或者全层缺失及软骨下骨的改变。关节软骨损伤在 T1WI 上表现为等信号, 软骨形态可正常、变薄及局限性缺损; 在 PDWI 和 T2WI 抑脂像上, 关节软骨损伤表现关节软骨内短条状、斑片状及不规则高信号; 此外, 关节软骨下骨及骨髓均可见斑片状、片絮状长 T1 及长 T2 异常信号<sup>[41]</sup>。可见传统 MRI 主要通过厚度变化、信号改变及部分或全层缺损来间接表明 SFZ 受损, 无法直接观察。

定量 MR 中的 T1rho mapping 与 T2 mapping 有助于在软骨形态发生改变前通过信号变化判断软骨 SFZ 早期损伤, 其中 T1rho mapping 灵敏度比 T2 mapping 更高<sup>[42-44]</sup>。在 SFZ 损伤时, 由于胶原蛋白网络结构的改变和水含量的增加, 其 T2 值较正常软骨高; T1rho 值则与 PG 的变化呈负相关, 损伤时会出现 PG 丢失, 导致 T1rho 值较正常软骨高<sup>[13,45-46]</sup>。但有些情况下, 也可出现 T2 值和 T1rho 值下降的情况, KANEKO 等<sup>[42]</sup>研究发现在早期软骨浅层可出现 T2 值和 T1rho 值下降的情况, 推测可能与细胞外基质成分变化有关, 具体机制不清。有研究使用 IL-1 $\beta$  诱导猪髌骨软骨发生生化成分改变, 然后通过 T1rho mapping 技术对其进行扫描, 可以捕捉到髌骨软骨 SFZ 的 T1rho 值明显增高, 这表明 T1rho mapping 技术对检测 SFZ 损伤是敏感的<sup>[20]</sup>。TENG 等<sup>[47]</sup>在研究髌骨软骨 T2 值和 T1rho 值与膝关节屈曲力矩 (knee flexion moment, KFM) 和 KFM 冲量之间的关系中发现, 与深层软骨相比, KFM 和 KFM 冲量脉冲的增加与浅层软骨的弛豫时间变化有更强的相关性。上述研究均表明定量 MRI 在研究软骨 SFZ 损伤具有优势, 特别是在一些动物模型中可直接看到组织学 SFZ 损伤导致的信号改变, 但在人体中直接报道 SFZ 损伤的文献较少。

近些年有关 UTE 的研究也日益增多, 有研究表明, 浅层的 UTE 测量值与机械力学的相关性很高<sup>[19]</sup>。SU 等<sup>[48]</sup>研究发现, 由于软骨退变过程中基质大分子 (如 CF、PG) 含量的降低, 故 UTE 磁化转移率与 MRI 骨关节炎膝关节评分分级呈中度负相关, UTE 绝热自旋晶格弛豫时间 (UTE-adiabtic T1 $\rho$ ) 值与骨关节炎膝关节评分分级呈中度正相关, 且 UTE 磁化转移率诊断灵敏度高, UTE-adiabtic T1 $\rho$  诊断特异灵高。当前 UTE 技术对软骨损伤的研究主要集中在软骨深层, 关于 SFZ 的研究较少, 但 UTE 技术与 T1rho mapping、T2 mapping 相比, 可以更加精确地显示 SFZ 损伤, 因而具有独特的优势<sup>[49]</sup>。

#### 4 展 望

对关节软骨 SFZ 损伤的诊断, 关节镜是从表面观察到软骨 SFZ 的裂隙缺损, 无法观察到内部基质成分改变; 与关节镜相反, MRI 是从内部观察到基质成分

改变, 但受分辨率影响在观察裂隙方面存在局限性, 故二者一致性并不是很高<sup>[50]</sup>。所以未来需要 MRI 多序列模态应用联合其他技术 (如造影剂、关节镜等) 或者人工智能, 以准确和快速评估关节软骨 SFZ 的损伤, 开发更多新的序列来提高对 SFZ 诊断的精准度。此外, 针对经典序列联合功能序列的合成磁共振使用, 还需要制定统一的软骨 SFZ 损伤影像诊断分级标准。

#### 参考文献

- [1] SAITO T. The superficial zone of articular cartilage[J]. *Inflamm Regen*, 2022, 42(1):14.
- [2] MAENO HARA Y, CHIJIMATSU R, TACHIBANA N, et al. Lubricin contributes to homeostasis of articular cartilage by modulating differentiation of superficial zone cells[J]. *J Bone Miner Res*, 2021, 36(4):792-802.
- [3] SUN Y, ZHANG K, DONG H, et al. Layered mechanical and electrical properties of porcine articular cartilage[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2022, 60(10):3019-3028.
- [4] YUH C, LAURENT M P, ESPINOSA-MARZAL R M, et al. Transient stiffening of cartilage during joint articulation: a microindentation study[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021, 113:104113.
- [5] EBRAHIMKHANI S, JAWARD M H, CICUTTI NI F M, et al. A review on segmentation of knee articular cartilage: from conventional methods towards deep learning[J]. *Artif Intell Med*, 2020, 106:101851.
- [6] NISCHAL N, IYENGAR K P, HERLEKAR D, et al. Imaging of cartilage and chondral defects: an overview[J]. *Life (Basel)*, 2023, 13(2):363.
- [7] OEI E H G, VAN ZADELHOFF T A, EIJGEN-RAAM S M, et al. 3D MRI in osteoarthritis[J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2021, 25(3):468-479.
- [8] BRUNO F, ARRIGONI F, PALUMBO P, et al. New advances in MRI diagnosis of degenerative osteoarthropathy of the peripheral joints[J]. *Radiol Med*, 2019, 124(11):1121-1127.
- [9] 高艺洋, 李相生. 踝关节软骨损伤的功能磁共振成像研究进展[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(9):167-170.
- [10] LI X, LI S, QIAN J, et al. Early efficacy of type I collagen-based matrix-assisted autologous chondrocyte transplantation for the treatment of ar-

- ticular cartilage lesions[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9:760179.
- [11] HAGHWERDI F, KHOZAEI R M, TAGHI-YAR L, et al. Application of bone and cartilage extracellular matrices in articular cartilage regeneration[J]. *Biomed Mater*, 2021, 16(4):1133.
- [12] GILBERT S J, BONNET C S, BLAIN E J. Mechanical cues: bidirectional reciprocity in the extracellular matrix drives mechano-signalling in articular cartilage[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(24):13595.
- [13] 于海霞, 沈怡颖, 张晏境, 等. 定量 MRI 技术在跑步人群膝关节软骨中的应用进展[J]. *国际医学放射学杂志*, 2022, 45(5):588-593.
- [14] 卢小冬, 林如辉, 陈文列, 等. 透骨消痛胶囊对早期骨关节炎软骨细胞超微结构与软骨基质的影响[J]. *康复学报*, 2017, 27(2):33-39.
- [15] RUEDIGER T, HORBERT V, REUTHER A, et al. Thickness of the stifle joint articular cartilage in different large animal models of cartilage repair and regeneration [J]. *Cartilage*, 2021, 13(Suppl. 2):438-452.
- [16] AFSABI A M, SEDAGHAT S, MOAZAMIAN D, et al. Articular cartilage assessment using ultrashort echo time MRI: a review[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2022, 13:892961.
- [17] LOMBARDI A F, MA Y, JANG H, et al. AcidoCEST-UTE MRI reveals an acidic microenvironment in knee osteoarthritis[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(8):4466.
- [18] NAMIRANIAN B, JERBAN S, MA Y, et al. Assessment of mechanical properties of articular cartilage with quantitative three-dimensional ultrashort echo time (UTE) cones magnetic resonance imaging[J]. *J Biomech*, 2020, 113:110085.
- [19] SHAO H, CHANG E Y, PAULI C, et al. UTE bi-component analysis of  $T_2^*$  relaxation in articular cartilage [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2016, 24(2):364-373.
- [20] 李智慧, 陆勇, 蒋梅花, 等. 正常膝关节软骨 MRI  $T_{1\rho}$  序列表现初步研究[J]. *生物医学工程与临床*, 2014, 18(4):333-337.
- [21] SCHENK H, SIMON D, WALDENMEIER L, et al. Regions at risk in the knee joint of young professional soccer players: Longitudinal evaluation of early cartilage degeneration by quantitative  $T_2$  mapping in 3 T MRI[J]. *Cartilage*, 2021, 13(Suppl. 1):595-603.
- [22] BANJAR M, HORIUCHI S, GEDEON D N, et al. Review of quantitative knee articular cartilage MR imaging[J]. *Magn Reson Med Sci*, 2022, 21(1):29-40.
- [23] SHARAFI A, ZIBETTI M V W, CHANG G, et al. 3D magnetic resonance fingerprinting for rapid simultaneous  $T_1$ ,  $T_2$ , and  $T_{1\rho}$  volumetric mapping of human articular cartilage at 3 T [J]. *NMR Biomed*, 2022, 35(12):e4800.
- [24] KIJOWSKI R, SHARAFI A, ZIBETTI M V W, et al. Age-dependent changes in knee cartilage  $T(1)$ ,  $T(2)$ , and  $T(1\rho)$  simultaneously measured using MRI fingerprinting[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 57(6):1805-1812.
- [25] ZIBETTI M V W, BABOLI R, CHANG G, et al. Rapid compositional mapping of knee cartilage with compressed sensing MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(5):1185-1198.
- [26] FEUERRIEGEL G C, WEISS K, KRONTHALER S, et al. Evaluation of a deep learning-based reconstruction method for denoising and image enhancement of shoulder MRI in patients with shoulder pain[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(7):4875-4884.
- [27] TIPPREDDY C, ZHAO W, SUNSHINE J L, et al. Magnetic resonance fingerprinting: an overview [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(13):4189-4200.
- [28] KOMARRAJU A, GOLDBERG-STEIN S, PEDERSON R, et al. Spectrum of common and uncommon causes of knee joint hyaline cartilage degeneration and their key imaging features[J]. *Eur J Radiol*, 2020, 129:109097.
- [29] SHI W, KANAMOTO T, AIHARA M, et al. Articular surface integrity assessed by ultrasound is associated with biological characteristics of articular cartilage in early-stage degeneration[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1):11970.
- [30] HENAO-MURILLO L, PASTRAMA M I, ITO K, et al. The relationship between proteoglycan loss, overloading-induced collagen damage, and cyclic loading in articular cartilage[J]. *Cartilage*, 2021, 13(Suppl. 2):1501-1512.
- [31] KOSONEN J P, ESKELINEN A S A, OROZCO G A, et al. Injury-related cell death and proteoglycan loss in articular cartilage: numerical model combi-

- ning necrosis, reactive oxygen species, and inflammatory cytokines[J]. *PLoS Comput Biol*, 2023, 19(1):e1010337.
- [32] TORZILLI P A, ALLEN S N. Effect of articular surface compression on cartilage extracellular matrix deformation [J]. *J Biomech Eng*, 2022, 144(9):091007.
- [33] KROUPA K R, GANGI L R, ZIMMERMAN B K, et al. Superficial zone chondrocytes can get compacted under physiological loading: a multi-scale finite element analysis [J]. *Acta Biomater*, 2023, 163:248-258.
- [34] SCHREINER A J, STOKER A M, BOZYNSKI C C, et al. Clinical application of the basic science of articular cartilage pathology and treatment[J]. *J Knee Surg*, 2020, 33(11): 1056-1068.
- [35] PELLICORE M J, GANGI L R, MURPHY L A, et al. Toward defining the role of the synovium in mitigating normal articular cartilage wear and tear [J]. *J Biomech*, 2023, 148:111472.
- [36] SHU D, CHEN F, GUO W, et al. Acute changes in knee cartilage and meniscus following long-distance running in habituate runners: a systematic review on studies using quantitative magnetic resonance imaging[J]. *Skeletal Radiol*, 2022, 51(7):1333-1345.
- [37] 代岭辉. 膝关节软骨损伤修复重建指南(2021) [J]. *中国运动医学杂志*, 2022, 41(4):249-259.
- [38] 王晓明, 万玉珍, 陈丽娟, 等. 膝关节软骨损伤 MRI 表现与关节镜病理分级的对比研究[J]. *现代医用影像学*, 2016, 25(3):446-448.
- [39] WALTER S S, FRITZ B, KIJOWSKI R, et al. 2D versus 3D MRI of osteoarthritis in clinical practice and research[J]. *Skeletal Radiol*, 2023, 52(11):2211-2224.
- [40] 张键, 林坚平, 周钢, 等. MRI 半定量评估早期膝关节关节炎软骨退变[J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26(3):425-429.
- [41] 朱泽, 蔡卫东. 超高场 MR 常规序列对青年膝关节软骨及软骨下骨损伤的诊断价值[J]. *贵州医药*, 2019, 43(12):1977-1978.
- [42] KANEKO Y, NOZAKI T, YU H, et al. Assessing patterns of T2/T1rho change in grade 1 cartilage lesions of the distal femur using an angle/layer dependent approach[J]. *Clin Imaging*, 2018, 50:201-207.
- [43] IKUTA F, TAKAHASHI K, KIUCHI S, et al. Effects of repeated intra-articular hyaluronic acid on cartilage degeneration evaluated by T1rho mapping in knee osteoarthritis[J]. *Mod Rheumatol*, 2021, 31(4):912-918.
- [44] XIA W, ZHANG Y, LIU C, et al. Quantitative T2 mapping magnetic resonance imaging of articular cartilage in patients with juvenile idiopathic arthritis [J]. *Eur J Radiol*, 2023, 160:110690.
- [45] ZHAO H, LI H, LIANG S, et al. T2 mapping for knee cartilage degeneration in young patients with mild symptoms[J]. *BMC Med Imaging*, 2022, 22(1):72.
- [46] ZELENSKI N, FALK D P, D'AQUILLA K, et al. Zone- and layer-specific differences in proteoglycan content in patellofemoral pain syndrome are detectable on T1rho MRI[J]. *Skeletal Radiol*, 2020, 49(9):1397-1402.
- [47] TENG H L, CALIXTO N E, MACLEOD T D, et al. Associations between patellofemoral joint cartilage T1rho and T2 and knee flexion moment and impulse during gait in individuals with and without patellofemoral joint osteoarthritis [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2016, 24(9):1554-1564.
- [48] SU X, ZHANG Y, GAO Q, et al. Preliminary study on the assessment of early cartilage degeneration by quantitative ultrashort echo time magnetic resonance imaging in vivo[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(7):3803-3812.
- [49] CHENG K Y, MOAZAMIAN D, MA Y, et al. Clinical application of ultrashort echo time (UTE) and zero echo time (ZTE) magnetic resonance (MR) imaging in the evaluation of osteoarthritis [J]. *Skeletal Radiol*, 2023, 52(11):2149-2157.
- [50] 古丽尼尕尔·吾斯曼, 黄志兰, 伊力亚·阿洪江, 等. 骨关节炎软骨早期 MRI 信号异常与软骨形态学缺损的相关性[J]. *中国骨与关节杂志*, 2021, 10(11):811-815.