

【DOI】 10.3969 / j.issn.1671-6450.2024.07.026

综 述

# MR 定量成像技术在骨性关节炎早期诊断中的应用研究进展

王晓辉综述 于静红审校



基金项目: 国家自然科学基金项目(82360339); 内蒙古科技计划项目(2021GG0192); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS08084); 内蒙古医科大学学科建设项目(YKD2023XK006)

作者单位: 010080 呼和浩特, 内蒙古医科大学研究生院(王晓辉); 010091 呼和浩特, 内蒙古医科大学第二附属医院影像科(于静红)

通信作者: 于静红, E-mail: yujinghong200@126.com

**【摘要】** 骨性关节炎(OA)是以软骨退变为主要病理改变,以关节疼痛、肿胀、活动受限为主要临床症状的退行性疾病,严重影响患者生活质量。磁共振是OA软骨退变的主要检测手段,不仅可以检测软骨形态学改变,近年发展的磁共振定量成像技术还可评估软骨生化成分改变。文章对诊断早期软骨退变MR定量成像技术的研究进展作一综述。

**【关键词】** 骨性关节炎; 磁共振定量成像技术; 诊断

**【中图分类号】** R684.3; R445.2 **【文献标识码】** A

**Research progress on quantitative imaging techniques for articular cartilage in MR** Wang Xiaohui\*, Yu Jinghong.\*

Inner Mongolia Medical University Graduate School, Inner Mongolia Province, Hohhot 010080, China

Funding program: National Natural Science Foundation of China project (82360339); Inner Mongolia Science and Technology Plan Project (2021GG0192); Natural Science Foundation Project of Inner Mongolia Autonomous Region(2021MS08084); Discipline Construction Project of Inner Mongolia Medical University(YKD2023XK006)

Corresponding author: Yu Jinghong, E-mail: yujinghong200@126.com

**【Abstract】** Osteoarthritis (OA) of the knee joint is a degenerative disease characterized by primary pathological changes in cartilage, with joint pain, swelling, and restricted movement as its main clinical symptoms, significantly impacting the quality of life for affected individuals. Magnetic resonance imaging (MRI) serves as the primary diagnostic tool for assessing OA cartilage degeneration. It not only detects morphological changes in cartilage but also, with the recent development of quantitative imaging techniques, evaluates alterations in the biochemical composition of cartilage. This article reviews and summarizes the research progress in MRI quantitative imaging techniques for the early diagnosis of cartilage degeneration and injury.

**【Key words】** Osteoarthritis; Quantitative magnetic resonance imaging; Diagnosis

骨性关节炎早期病理改变主要是关节软骨退变损伤,一旦损伤很难自我修复,最终可能演变成骨性关节炎(osteoarthritis, OA)。在疾病早期,OA患者可以通过物理治疗来改善关节功能,包括中低频冲击波、体外冲击波以及热磁电,也可以使用药物治疗减轻临床症状,延缓病情发展。随着疾病发展,晚期患者只能通过关节置换手术治疗。及早发现软骨退变并采取有效治疗可以阻止或减缓骨性关节炎的发展,因此,早期软骨退变的识别对于疾病治疗至关重要。MR是OA软骨退变首选检查手段,MR定量成像技术不仅可以观察软骨形态学改变,还可以对早期未发生形态学改变的软骨生化成分变化进行评估。为了提高对OA早期软骨退变的MR定量成像技术认识,文章

对其最新进展进行综述。

## 1 关节软骨结构

关节软骨是由少量软骨细胞及其合成分泌的细胞外基质(extracellular matrix, ECM)共同组成,ECM由水(60%~80%)、胶原纤维(15%~20%)、蛋白多糖(proteoglycan, PG, 1%~10%)和其他糖蛋白底物、矿物质和脂质等组成。ECM中胶原纤维主要有5种,含量最多的是II型胶原,主要作用是使关节软骨保持良好的延展性和张弛性。胶原纤维组成网架结构,蛋白多糖均匀地分散在网状结构,能使蛋白多糖保持稳定状态,当软骨发生退变时,胶原纤维网状结构发生改变进而蛋白多糖发生破坏,软骨降解。

## 2 关节软骨 MR 成像技术

MR 扫描除能了解关节软骨的形态学改变外,其近年发展的生理成像技术还可评估软骨生化成分改变,如 T2-mapping、软骨延迟钆增强成像(delayed gadolinium-enhanced MRI of cartilage, dGEMRIC)、钠成像等,它们能够对早期 OA 软骨内部退变进行定量评估,对临床治疗及预后评估有着重要意义。

**2.1 T2-mapping 成像** T2-mapping 成像技术是目前研究较多的软骨 MR 生理成像技术,它主要通过在一个 TR 时间内采集多个不同回波 TE 获得系列图像,然后用公式进行计算,得到 T2-mapping 伪彩图,测量组织的 T2 值<sup>[1]</sup>。T2-mapping 对软骨胶原纤维含量、排列方式及软骨水含量等成分的变化敏感,可间接反映蛋白多糖含量变化<sup>[2-3]</sup>。在正常关节软骨中,胶原纤维与软骨细胞以不同方式排列,蛋白多糖镶嵌其中。在 OA 早期时,软骨中胶原纤维结构紊乱破坏,蛋白多糖含量降低,自由水含量增加,导致 T2 值升高。孙兆男等<sup>[4]</sup>对 90 例受试者膝关节(OA 组 60 例、健康组 30 例)行 T2-mapping 成像发现,OA 组膝关节各个区域平均 T2 值均高于健康组,重度和轻度 OA 组股骨内外侧髁负重区平均 T2 值均显著高于健康组。唐毅等<sup>[5]</sup>对 110 例膝关节 OA 患者和 64 例健康人研究发现,OA 患者的股骨内、外侧髁软骨、胫骨内、外侧平台软骨以及髌骨软骨关节面 T2-mapping 值高于健康人群,重度退变者的股骨内、外侧髁软骨、胫骨内、外侧平台软骨以及髌骨软骨关节面 T2-mapping 值显著高于轻度退变者。结果表明 T2-mapping 值可以作为一种重要的指标,反映软骨组织的退变程度。有学者对采用改良伸直制动法建立兔膝关节模型后行 T2-mapping 扫描,并依据病理所见将兔分为正常组、早期退变组及中晚期退变组,研究发现造模组 T2 值较正常组高,T2 值随着软骨退变程度加重而增高,关节软骨病理切片及免疫组化显示 T2 值与 II 型胶原含量呈负相关,提示 T2-mapping 成像技术可以早期检测软骨生物成分变化<sup>[6]</sup>。T2-mapping 技术在早期 OA 诊断、定量评估以及后期随访都有较高价值,但易受魔角效应、部分容积效应、化学位移等影响,需要进一步改进优化。

**2.2 软骨延迟钆增强成像(dGEMRIC)** dGEMRIC 是静脉内注射二乙三胺五乙酸钆(gadolinium diethyl trisamge-pentoacetic acid, Gd-DTPA)后测量 T1 弛豫时间来间接评估软骨糖胺聚糖(glycosaminoglycan, GAG)含量的技术,也可以采用间接关节腔注射造影剂的方法来评估 GAG 含量变化。正常软骨内带负电荷的 GAG 排斥负电荷离子,同样也排斥带负电荷的 Gd-DTPA,软骨早期病变时,在 GAG 含量少的软骨区域,造影剂浓聚,Gd 具有很强的顺磁性,加速周围的质子弛豫,使 T1 时间缩短,导致病变区信号增强<sup>[7]</sup>。Terracciano 等<sup>[8]</sup>对兔行单侧交叉韧带横断术后制作骨性关节炎模型后行 dGEMRIC 扫描,发现随造模时间延长,受伤膝关节股骨内髁软骨 T1Gd 逐渐缩短,同时免疫组化显示 GAG 分布及含量逐渐减少,对 GAG 浓度与 T1Gd 值进行 Pearson 相关分析发现 T1Gd 与 GAG 含量呈正相关。有学者分别对 18 例接受基质诱导软骨细胞植入术和 32 例接受骨髓间充质干细胞技术治疗的膝关节 OA 患者进行观察,术后进行 6 年和 1 年的随访,并进行 dGEMRIC 检查,发现修复组织的

T1Gd 值达到了与周围原生正常软骨相似的值,术后患者国际膝关节文献委员会(IKDC)评分、膝关节损伤和骨关节炎结果评分(KOOS)和 Lysholm 膝关节评分较术前有所提高,提示 dGEMRIC 技术能够评估关节软骨体内再生情况<sup>[9-10]</sup>。这些研究结果为膝关节骨性关节炎的治疗随访提供了重要的临床证据,显示了 dGEMRIC 技术在评估治疗方法对软骨损伤和症状改善的有效性方面有重要意义。但 dGEMRIC 成像需要注射钆对比剂,对于有钆剂使用禁忌证的人群(肾功能不全者)不能使用,延迟扫描需要更长的时间;旋转框架内自旋晶格弛豫(T1ρ)成像是 dGEMRIC 成像的一种替代方法,对 GAG 含量敏感性高,具有很好的重复性和准确性,而且避免了 dGEMRIC 技术的复杂性和不确定性<sup>[11]</sup>。

**2.3 旋转框架内自旋晶格弛豫(the spin-lattice relaxation in the rotating frame, T1ρ)** T1ρ 是一个时间常数,又称旋转坐标系中的自旋晶格弛豫时间,它主要是在施加自旋锁定脉冲射频(RF)的诱导下,质子运动在旋转框架中进行测量组织中质子的弛豫时间,T1ρ 值与组织特征和自旋锁定脉冲的特征相关,它对晶格间的低频运动敏感,低频运动与大分子存在密切相关,因此适用于研究蛋白多糖大分子(GAG)与游离水之间的低频相互作用,可用于软骨早期病变分析<sup>[12]</sup>。研究发现<sup>[13-14]</sup>,骨关节炎患者的 T1ρ 值均明显高于正常人群,随着 OA 国际关节软骨修复协会(International Cartilage Repair Society, ICRS)评分级别升高,T1ρ 值也逐渐增加。张堃等<sup>[15]</sup>根据 Kellgren-Lawrence(KL)分级标准判断膝关节骨性关节炎(KOA)及健康人(1、2 级为轻度,3、4 级为重度)后检索文献,经过 Meta 软件分析结果(KOA 组 420 例、对照组 450 例)发现,KOA 组关节软骨 T1ρ 值均高于对照组,重度 KOA 患者关节软骨 T1ρ 值高于轻度 KOA 患者。这些研究提示关节软骨 T1ρ 成像技术可能在评估和监测骨性关节炎的过程中具有重要的临床意义,有助于评估病情的严重程度,并指导疾病治疗;但 T1ρ 成像技术对磁场均匀度要求较高,且易出现图像伪影和量化误差,给常规临床实践带来很大困难,目前主要应用于科研领域。

**2.4 钠离子成像(Na-MRI)** Na-MRI 用于软骨 GAG 测定,由于软骨中的钠离子紧紧吸附于带负电荷的 GAG 上且与其分布一致,所以当软骨中蛋白多糖(proteoglycans, PG)丢失时会释放出带正电荷的钠离子,Na-MRI 可间接评价 GAG/PG 的分布<sup>[16]</sup>。Shapiro 等<sup>[17]</sup>通过钠离子成像技术测量牛髌骨软骨内的钠浓度,考虑理想的 Donnan 平衡,将钠离子浓度转化为固定电荷浓度(FCD),将牛髌骨软骨内的 FCD(mM)和通过标准二甲基亚甲基蓝 PG 分析获得的 FCD 测量值进行比较,发现相关性很高( $r^2 = 0.81$ ),证明 Na-MRI 可精确测量关节软骨的 FCD 值。但人体内钠浓度较低,不能产生充足信号,它还需要较高的场强和特殊的线圈,限制了其研究应用。

**2.5 弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)** DTI 基于水分子扩散运动存在各向异性的原理,通过运用各向异性系数(fractional anisotropic, FA)值、表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)值等评价组织结构的相关信息。ADC 值代表水分子弥散能力,弥散能力越强,ADC 值越大,蛋白多糖具有较

强的吸水及储水功能,可反映蛋白多糖含量变化,FA 值可反映胶原纤维各向异性,各向异性越强,FA 值越高。赵丹丹等<sup>[18]</sup>对 114 例不同年龄段健康成人髌骨软骨行 DTI 扫描,发现随着年龄增长,髌骨软骨退变,FA 值下降,ADC 值升高,表明 DTI 技术对软骨的成分变化敏感。孙沛毅等<sup>[19]</sup>对临床需要膝关节镜检查的 30 例患者行膝关节 DTI 扫描,发现早期损伤组(关节镜 Outerbridge 分级 I、II 级)髌骨 FA 值较正常对照组降低,ADC 值较正常值增高,其准确性与关节镜检测结果相近。李明楷等<sup>[20]</sup>对 70 例受试者(OA 组 35 例、健康组 35 例)膝关节髌骨 DTI 扫描研究得出相似结果,还发现随软骨退变加重,ADC 值呈现升高趋势,而 FA 值呈现降低趋势。DTI 技术能定量反映关节早期软骨损伤,可作为软骨早期退变的监测手段,有可能成为评估 OA 患者病情严重程度和疾病进展的一种有效方法;但它采集时间长,空间分辨率和信噪比(SNR)较低,对运动伪影高度敏感<sup>[21]</sup>,未来随着技术发展,期望能够优化采集时间和提高信噪比,提升图像质量。

2.6 糖胺聚糖化学交换饱和转移成像(glycosaminoglycan chemical exchange saturation transfer, gagCEST) gagCEST 技术主要通过内源性对比剂 GAG 用于 OA 定量评估,CEST 技术包含化学交换过程和饱和转移过程,它是利用特定的饱和脉冲,对特定大分子中氢质子进行充分预饱和,饱和后的氢质子可与周围自由水中低能氢质子进行化学交换,使得自由水中部分氢质子饱和,再次行常规的 MR 扫描时饱和和质子无法产生共振,因而无法采集到信号,通过测量预饱和脉冲前后水分子 MR 信号变化差值,通过测定非对称性磁化转移率即 MTR<sub>asym</sub> 值可评估软骨 GAG 含量变化<sup>[22]</sup>。Schreiner 等<sup>[23]</sup>对 10 例健康青年志愿者行 7T 磁共振膝关节 gagCEST 检查,发现膝关节软骨不同部位的 MTR<sub>asym</sub> 均值有显著差异,表明 gagCEST 方法能够用于检测早期软骨病变。有研究发现<sup>[22, 24-25]</sup>膝关节或踝关节软骨损伤的 MTR<sub>asym</sub> 值低于正常软骨。Soellner 等<sup>[26]</sup>使用 gagCEST 成像技术评估了 21 例需要关节镜治疗的膝关节软骨损伤患者,并对其进行了与关节镜确定的 ICRS 评分的 Spearman 相关分析,发现随着形态学软骨缺损等级的增加, gagCEST 值显著降低,与 ICRS 评分呈负相关。gagCEST 成像技术有望成为一种用于软骨损伤诊断和分级的有力工具,它对 GAG 具有很高的选择性,无需使用外源性对比剂或专门的线圈或硬件,但需要较长扫描时间和复杂的后处理,且对静磁场(B<sub>0</sub>)的不均匀性敏感。Wei 等<sup>[22]</sup>对静磁场的不均匀性进行了改进,提高了图像质量,从而增强了这种技术的可靠性和应用前景。

2.7 磁敏感定量成像技术(quantitative susceptibility mapping, QSM) QSM 是近几年兴起的磁共振定量成像技术,主要应用于研究人体的中枢神经系统,如铁代谢相关性疾病、颅内出血、颅内血管畸形、脑肿瘤等疾病,在关节软骨方面的文献、实验研究较少。它是基于梯度回波序列(GRE)估计磁化率体素方向空间分布的成像技术,获得的 GRE 图分为幅位图和相位图,常规磁共振图像是利用幅位图信息,QSM 利用相位信息得到局部磁场变化特性,并通过局部磁场到磁化率的反演计算,得到组织内部磁化率的定量分布<sup>[27]</sup>。QSM 对组织中的主要磁感性强

度源(如脱氧血红蛋白、铁沉积物、蛋白质、胶原纤维的取向)具有很高的敏感度<sup>[28]</sup>。目前有研究发现 QSM 技术可以应用于软骨成像,在早期 OA 阶段能够检测软骨结构变化。Dymerska 等<sup>[29]</sup>使用 7T 磁共振成像技术对 6 例未成年人膝关节软骨行 QSM 技术,发现能够观察到软骨中的血管分布和胶原纤维层次结构。Wei 等<sup>[30]</sup>对猪膝关节股骨软骨及 9 例志愿者膝关节行相位成像发现胶原纤维均具有各向异性的磁敏感性。有学者对临床 OA 患者行膝关节 QSM 技术,发现 OA 患者的软骨磁化率值的标准差显著低于健康对照组,随着 OA 软骨变薄程度加重,磁敏感性值的标准差值减小<sup>[21, 28]</sup>。QSM 技术可在早期 OA 阶段准确检测软骨结构变化,它不需要增加额外扫描时间和其他扫描序列,具有早期检测软骨退化的潜力。

### 3 总结及展望

MR 软骨成像技术可以在软骨发生形态学变化之前,间接反映组织的生理生化成分变化。它可以对早期软骨退变进行定量评估,并在术后疗效随访显示出一定潜能。然而,不同的 MR 定量成像技术各有优势和不足,有些技术机制、实验结论方面存在不一致性,还需要进一步临床及实验数据去验证。总之,关节软骨 MR 定量成像技术对 OA 早期诊断、预后判断及术后随访具有重要意义,具有较大的临床应用前景。

### 参考文献

- [1] 王可欣,石磊,于静红,等. 膝关节骨性关节炎软骨基质金属蛋白酶 1 的表达与磁共振 T<sub>2</sub>-mapping 的相关性研究[J]. 临床放射学杂志, 2019, 38(9): 1718-1723. DOI: 10. 13437/j. cnki. jcr. 2019. 09. 033.
- [2] 石磊,于静红,张晰尧. 膝关节骨性关节炎模型软骨 T<sub>2</sub>-mapping 表现与蛋白多糖含量的相关分析[J]. 放射学实践, 2019, 34(12): 1375-1379. DOI: 10. 13609/j. cnki. 1000-0313. 2019. 12. 019.
- [3] 李伟,于泽晨,贾岩波,等. 距骨软骨损伤 MR T<sub>2</sub>-mapping 与软骨基质金属蛋白酶-1 表达的相关性研究[J]. 磁共振成像, 2021, 12(5): 44-49. DOI: 10. 12015/issn. 1674-8034. 2021. 05. 010.
- [4] 孙兆男,王旭超,徐敏,等. 磁共振 T<sub>2</sub> mapping 成像评价膝关节骨性关节炎软骨损伤的应用价值[J]. 磁共振成像, 2019, 10(9): 680-684. DOI: 10. 12015/issn. 1674-8034. 2019. 09. 008.
- [5] 唐毅,张辉,黄恺,等. 磁共振 T<sub>1</sub>rho 序列、T<sub>2</sub>mapping 技术在膝关节早期软骨退变早期诊断中的评估价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2024, 22(4): 163-165. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-5131. 2024. 04. 050.
- [6] 罗慕晴,李宏伟,向辉春,等. 3.0T MR T<sub>1</sub>ρ 及 T<sub>2</sub>mapping 评估兔股骨内侧髌关节软骨退变[J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(10): 1446-1451. DOI: 10. 13929/j. issn. 1003-3289. 2022. 10. 002.
- [7] 徐贤,陈敏,张君,等. 磁共振 T<sub>2</sub> mapping 和 dGEMRIC 对膝关节再生软骨的纵向评估[J]. 中国医学影像学杂志, 2021, 29(5): 484-488. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-5185. 2021. 05. 016.
- [8] Terracciano R, Carcamo-Bahena Y, Royal ALR, et al. Quantitative high-resolution 7T MRI to assess longitudinal changes in articular cartilage after anterior cruciate ligament injury in a rabbit model of post-traumatic osteoarthritis[J]. Osteoarthritis and Cartilage Open, 2022, 4(2): 100259. DOI: 10. 1016/j. ocarto. 2022. 100259.
- [9] Shetty AA, Kim SJ, Shanmugasundaram S, et al. Injectable cultured

- bone marrow derived mesenchymal cells vs chondrocytes in the treatment of chondral defects of the knee-RCT with 6 years follow-up [J]. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma* 2022 28: 101845. DOI: 10.1016/j.jcot.2022.101845.
- [10] Xian X ,Jingming G ,Shuyun L ,et al. Magnetic resonance imaging for non-invasive clinical evaluation of normal and regenerated cartilage [J]. *Regenerative Biomaterials* 2021 8( 5) : 1-13. DOI: 10.1093/rb/rbab038.
- [11] Akella SV ,Reddy Regatte R ,Gougoutas AJ ,et al. Proteoglycan-induced changes in T1 $\rho$ -relaxation of articular cartilage at 4T [J]. *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine* 2001 46( 3) : 419-423. DOI: 10.1002/mrm.1208.
- [12] 卢世鑫 ,张格日乐 ,付庆鹏. 膝关节骨关节炎患者关节软骨 T1 rho 的影响因素分析 [J]. *中国骨与关节杂志* 2023 12( 10) : 721-727. DOI: 10.3969/j.issn.2095-252X.2023.10.001.
- [13] O'connell D ,Golightly Y ,Lisee C ,et al. Interlimb differences in T1 $\rho$  MRI relaxation times linked with symptomatic knee osteoarthritis following anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *The Knee* 2023 41: 353-359. DOI: 10.1016/j.knee.2023.02.006.
- [14] Farrow LD ,Elias JJ ,Li M ,et al. Patellar dislocation in adolescent patients: Influence on cartilage properties based on T1 $\rho$  relaxation times [J]. *The American Journal of Sports Medicine* 2023 51( 14) : 3714-3723. DOI: 10.1177/03635465231205562.
- [15] 张堃 ,朱克俭 ,李平 ,等. 3.0T MR T2 mapping 及 T1 $\rho$  区分膝骨关节炎患者与健康人: Meta 分析 [J]. *中国介入影像与治疗学* , 2019 16( 2) : 101-106. DOI: 10.13929/j.1672-8475.201809005.
- [16] Brinkhof S ,Froeling M ,Janssen RPA ,et al. Can sodium MRI be used as a method for mapping of cartilage stiffness [J]. *Magnetic Resonance Materials in Physics ,Biology and Medicine* 2020 34( 3) : 327-336. DOI: 10.1007/s10334-020-00893-x.
- [17] Shapiro EM ,Borthakur A ,Gougoutas A ,et al. 23Na MRI accurately measures fixed charge density in articular cartilage [J]. *Magnetic Resonance in Medicine* 2002 47( 2) : 284-291. DOI: 10.1002/mrm.10054.
- [18] 赵丹丹 ,李红 ,秦灏 ,等. DTI 在正常成人髌骨软骨的初步应用及临床意义 [J]. *磁共振成像* 2016 7( 2) : 131-135. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2016.02.009.
- [19] 孙沛毅 ,邓德茂 ,付春华 ,等. DTI 与 T<sub>2</sub><sup>\*</sup> mapping 评估髌股关节表面软骨早期损伤的对比研究 [J]. *临床放射学杂志* 2019 38( 9) : 1712-1717. DOI: 10.13437/j.cnki.jcr.2019.09.032.
- [20] 李明楷 ,石磊 ,王可欣 ,等. 磁共振弥散张量成像在评估骨关节炎髌骨软骨退变中的应用 [J]. *疑难病杂志* 2018 17( 9) : 918-921 , 973. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6450.2018.09.013.
- [21] Wei H ,Lin H ,Qin L ,et al. Quantitative susceptibility mapping of articular cartilage in patients with osteoarthritis at 3T [J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 2019 49( 6) : 1665-1675. DOI: 10.1002/jmri.26535.
- [22] Wei W ,Jia G ,Flanigan D ,et al. Chemical exchange saturation transfer MR imaging of articular cartilage glycosaminoglycans at 3 T: accuracy of B0 field inhomogeneity corrections with gradient echo method [J]. *Magnetic Resonance Imaging* 2014 32( 1) : 41-47. DOI: 10.1016/j.mri.2013.07.009.
- [23] Schreiner MM ,Zbyn S ,Schmitt B ,et al. Reproducibility and regional variations of an improved gagCEST protocol for the in vivo evaluation of knee cartilage at 7 T [J]. *Magnetic Resonance Materials in Physics ,Biology and Medicine* 2016 29: 513-521. DOI: 10.1007/s10334-016-0544-5.
- [24] Schmitt B ,Zbyn S ,Stelzener D ,et al. Cartilage quality assessment by using glycosaminoglycan chemical exchange saturation transfer and 23Na MR imaging at 7 T [J]. *Radiology* 2011 260( 1) : 257-264. DOI: 10.1148/radiol.11101841.
- [25] Abrar DB ,Schleich C ,Radke KL ,et al. Detection of early cartilage degeneration in the tibiotalar joint using 3 T gagCEST imaging: A feasibility study [J]. *Magnetic Resonance Materials in Physics ,Biology and Medicine* 2021 34( 2) : 249-260. DOI: 10.1007/s10334-020-00868-y.
- [26] Soellner S ,Welsch G ,Gelse K ,et al. gagCEST imaging at 3 T MRI in patients with articular cartilage lesions of the knee and intraoperative validation [J]. *Osteoarthritis and Cartilage* 2021 29( 8) : 1163-1172. DOI: 10.1016/j.joca.2021.04.012.
- [27] Yuen J ,Hung J ,Wiggermann V ,et al. Multi-echo GRE imaging of knee cartilage [J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 2017 45( 5) : 1502-1513. DOI: 10.1002/jmri.25438.
- [28] Zhang Q ,Geng J ,Zhang M ,et al. Cartilage morphometry and magnetic susceptibility measurement for knee osteoarthritis with automatic cartilage segmentation [J]. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery* , 2023 13( 6) : 3508-3521. DOI: 10.21037/qims-22-1245.
- [29] Dymerska B ,Bohndorf K ,Schennach P ,et al. In vivo phase imaging of human epiphyseal cartilage at 7 T [J]. *Magnetic resonance in medicine* 2018 79( 4) : 2149-2155. DOI: 10.1002/mrm.26858.
- [30] Wei H ,Dibb R ,Decker K ,et al. Investigating magnetic susceptibility of human knee joint at 7 Tesla [J]. *Magnetic Resonance in Medicine* , 2017 78( 5) : 1933-1943. DOI: 10.1002/mrm.26596.

( 收稿日期: 2024 - 02 - 06)