

综述

磁共振成像定量扫描技术在骨肌系统的应用

杨淳 张维升*

大连医科大学附属第一医院放射科

(辽宁大连 116011)

【摘要】疾病的发生及发展进程通常可以通过对特定物质的定量测定来进行分析,这对疾病的早期诊断和干预有重要意义。组织活检是定量分析的金标准,但因有创性限制了其应用范围,定量磁共振技术在非侵入性的基础上也能达到对人体疾病特异性物质进行定量分析的目的,并且还有其独特的优点,例如良好的再现性、没有采样误差等,对特定物质的定量分析方法也是多种多样。随着定量磁共振技术的不断发展,其可以对越来越多的物质进行定量分析,定量精度也在不断提高,本文就定量磁共振技术在骨肌系统的应用做一简要综述。

【关键词】磁共振成像;骨肌系统;定量分析

【中图分类号】R445.2

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2022.11.066

Application of Quantitative Scanning Techniques of Magnetic Resonance Imaging in Musculoskeletal System

YANG Chun, ZHANG Wei-sheng*

The First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, Liaoning Province, China

ABSTRACT

The occurrence and development of the disease can usually be analyzed by the quantitative determination of specific substances, which is of great significance for the early diagnosis and intervention of the disease. Tissue biopsy is the gold standard of quantitative analysis, but because its scope of application is limited by invasiveness, quantitative magnetic resonance technology can also achieve the purpose of quantitative analysis of human disease-specific substances on the basis of non-invasive, and it also has its unique advantages, such as good reproducibility, no sampling error, etc., and there are a variety of quantitative analysis methods for specific substances. With the continuous development of quantitative magnetic resonance technology, it can be used for quantitative analysis of more and more substances, and the quantitative accuracy is also improving. This paper briefly reviews the application of quantitative magnetic resonance technology in skeletal muscle system.

Keywords: *Magnetic Resonance Imaging; Skeletal Muscle System; Quantitative Analysis*

人体特定物质变化的定量分析常常能表征疾病的发生和发展,这对疾病的早期诊断和干预有重要意义。通常认为,组织活检是定量分析的金标准,但因有创性限制了其应用范围,磁共振成像定量扫描技术在非侵入性的基础上同样能达到对人体疾病特异性物质进行定量分析的目的,并且还有其独特的优点,例如良好的再现性、没有采样误差等,对特定物质的定量分析方法也是多种多样。随着技术不断发展,磁共振成像定量扫描技术可以对越来越多的物质进行定量分析,定量精度也在不断提高,有着非常广阔的应用前景。磁共振定量扫描技术包括:磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)、扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)、扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)、钠MR成像(Na magnetic resonance imaging, NaMRI)、化学交换依赖饱和转移(chemical exchange dependent saturation transfer, CEST)、磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)、 $T_1\rho$ 、 T_2 mapping、MRI动态增强扫描(dynamic contrast enhanced MRI, DCE-MRI),等等。本文就磁共振定量扫描技术在骨肌系统中的应用做一简要综述。

1 磁共振波谱

MRS技术通过观察磁共振的化学位移现象,加以分析得出物质的分子组成,应用于临床的MRS主要有2种:1H-MRS和31P-MRS。由于不同化合物中1H频率的差异,1H-MRS在MRS的谱的不同位置显示共振峰,根据结果来对化合物进行分类,1H-MRS可以对一些重要的分子进行定量测量,这些分子包括:N-乙酰天冬氨酸(N-acetylaspartate, NAA)、肌酸(creatine, Cr)、胆碱、乳酸、脂质、肌醇、 γ -氨基丁酸和谷氨酸/谷氨酰胺等^[1]。31P-MRS多集中在骨骼肌肉系统中的应用,可以在一次检查中提供有关骨骼肌肉结构和新陈代谢的信息,用来识别和量化骨髓和肌肉脂肪变性,可以在相同的体积内无创地、重复地对骨髓和肌肉的实际脂肪含量进行定量,对于骨质疏松症的基础研究和临床应用开发空间较大。目前,骨质疏松症相关研究中骨髓脂肪含量(bone marrow fat, BMF)的测量占有较为重要的地位。从临床角度看,骨骼质量可以通过骨髓脂肪体现,在骨质疏松症的筛查诊断、疗效检测方面, BMF是骨密度(bone mineral density, BMD)检查的有效补充。因此,定量评估肌肉和骨髓脂肪可进行较为准确的疾病检测和严重程度分级,降低骨质疏松症风险^[2-3]。有研究发现MRS评估腰椎间盘的退变程度同样是可行的^[4]。MRS还可以通过揭示水溶性胆碱代谢物的存在与否来帮助区分肌肉骨骼肿瘤的良恶性^[5-6]。近年来,随着新技术的开发, MRS经常与其他技术联合进行比较分析和研究,比如体内不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)联合MRS对骨质疏松和溶骨性转移性椎体压缩性骨折(vertebral compression fractures, VCFs)的鉴别诊断比单独使用MRS或IVIM-DWI更为准确有效^[7-8]。

目前MRS应用存在的问题有:①要进行正确的定量,必须知道测定对象化合物的构造;②不能将化学结构非常相似的类似物区别开来,要求定量结果准确的前提是定量峰与其他峰完全分离;③若样品浓度过低,灵敏度会大大降低;④MRS技术会使MRI检查时间明显增加,对于临床工作是一个极大的考验。相信MRS在临床中的应用会随着技术的进步突破而大大增加^[9]。

【第一作者】杨淳,男,硕士研究生,主要研究方向:骨肌系统。E-mail: 1924967057@qq.com

【通讯作者】张维升,男,教授,主要研究方向:骨肌系统。E-mail: dlzws@126.com

2 扩散加权成像

虽在Stejskal和Tanner在1965年提出DWI这个概念,但是直到1990年代才进入临床应用。DWI并不依赖组织的 T_1 或 T_2 值,而是取决于水分子的运动,它可以反映组织中水分子的微观布朗运动,其信号与体素中水分子的表观扩散系数成反比,它反映了水分子在不同组织中沿扩散梯度方向的平均扩散^[1]。对于骨肿瘤和肿瘤样病变,DWI在鉴别良、恶性骨肿瘤和肿瘤样病变方面有较大帮助,DWI表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)图表可通过ADC值定量区分不同组织成分,准确客观地判断肿瘤浸润程度,显示肿瘤范围的高灵敏度和特异性,比常规测序更有优势。ADC是DWI的量化值,已被证实具有骨和软组织肿瘤的良、恶性鉴别能力,并可在开始治疗前预测攻击性和潜在反应性。高ADC值代表低细胞组织,低ADC值代表高细胞组织,平均ADC值支持鉴别良、恶性软骨源性肿瘤和恶性非软骨源性骨肿瘤。恶性软骨源性骨肿瘤的平均ADC值明显高于恶性非软骨源性肿瘤,在评估ADC值时应单独考虑此类软骨源性肿瘤。DWI的改变还可以作为治疗反应的一个有效、早期的生物学标志物^[10-11]。对于关节软骨,DWI可以定量评估水分子在软骨中的扩散,在软骨损伤的早期,由于胶原纤维网格崩解、破坏,蛋白多糖(proteoglycan, PG)含量减少,造成软骨软骨结合水含量减少,透水性增加,关节软骨内水的自由扩散能力增加,DWI信号低,ADC值增加,表明DWI在早期关节软骨损伤的诊断中具有良好的临床应用价值。DWI也可用于软骨移植修复的随访,软骨修复组织的增殖明显高于参考软骨,反映了软骨的逐渐成熟^[12-13]。另外,DWI可以定量分析骨髓病变,为病变检测提供客观数据。ADC值的动态变化可能预示着骨髓水肿的病理结果^[14]。过去,强直性脊柱炎的影像诊断主要依靠X线检查和CT检查,目前DWI已可用于强直性脊柱炎(ankylosing spondylitis, AS)的早期诊断,因为DWI测量的软骨下骨髓的ADC值由于持续的病理炎症浸润而增加,强直性脊柱炎的软骨下骨髓脂肪变性可被认为是活动性炎症消退后的炎症性修复性改变。非活动期髋关节患者ADC值低于活动期患者,其原因可能是非活动期髋关节患者黄骨髓增多所致^[15-16]。

DWI存在的技术问题主要有:成像时间久、容易形成运动伪影、无法完全抑制背景信号、图像信噪比较差、对一些病变的特异性比较低等,容易影响到临床应用及检查结果的判读^[17]。

3 扩散张量成像

DTI基于由于不均匀磁场中的激发核的相位损失而引起信号损失,至少使用6个方向敏感的梯度阵列来测量不同方向的信号,并且量化水分子弥散特征。也就是说使用非均匀磁场中的激发核和扩散衰减引起的信号衰减效应,利用灵敏的梯度场测量各个方向的信号衰减,从而获得组织微观结构和功能变化的信息^[18]DTI可以反映组织中水分子的布朗运动,定量分析水分子分散的各项异性常用的量化参数有部分异性指数(fractional anisotropy, FA)和ADC值。全水分子各向异性分量在扩散张量中所占的比例即为FA的值,即各向异性的弥散程度。FA值受关节软骨中胶原纤维网络结构的影响,如果关节软骨有缺陷,关节软骨胶原的结构和胶原纤维异常,软骨中的水分子各项异性降低,FA值出现下降。采用FA值和ADC值可测定膝关节软骨PG和胶原含量,以真实、定量地评价骨关节炎,还可以通过FA值及ADC值的变化评估膝关节OA的严重程度^[19]。

目前DTI技术存在对于一些磁敏感变化较大的区域易造成图像失真等问题^[20-21]。

4 钠MR成像

NaMRI是基于使用特定的MRI采集序列和线圈直接检测组织中的钠离子,从而定量钠离子的浓度。因为在软骨中,钠离子平衡PG分子的糖胺聚糖侧链的固定负电荷,所以钠离子浓度的测量是PG含量的一个生物标志物,用于提高早期骨关节炎的检测准确率^[22]。NaMRI不仅可以检测膝关节手术后软骨生理变化,而且可

以评估术后的骨生长趋势。

虽然MRI射频线圈、梯度和平行成像技术的逐渐成熟提高了NaMRI的效果,但是仍存在图像信噪比和分辨率较低等问题^[20]。

5 化学交换依赖饱和转移

CEST是基于磁化传递技术,利用自由水与溶质中可交换氢质子的不同谐振频率来进行成像。CEST能够对人体物质进行测量,例如大分子物质(蛋白质及氨基酸、糖胺聚糖等)以及外源性物质。其中,酰胺质子转移(APT)成像技术是基于蛋白质酰胺基与水之间频繁的交换来进行成像。CEST适用于评估软骨基于其高饱和效率、低特异性吸收率和非侵入性的优点,已具有监测软骨修复手术后软骨重建过程的能力。PG是由一个核心蛋白和一个或多个共价连接的糖胺聚糖(glycosaminoglycan, GAG)链组成,在关节软骨和椎间盘中起重要作用,体内GAG浓度的定量对于了解许多常见疾病的病理生理学改变非常重要。CEST评估软骨中糖胺聚糖的浓度是通过生化显像可以预测早期OA中GAG的耗竭,评估GAG的浓度和分布,可用于骨关节炎的早期诊断和潜在治疗监测^[22-25]。除了关节软骨,CEST可作为评价椎间盘的一种可靠的定量显像技术,对于检测椎间盘早期变性以及对新兴再生疗法的治疗反应非常有用^[25]。

现已发现有多种物质可以用CEST进行量化,但由于获取相关数据较为困难,因此临床应用受到限制,还存在量化方案的不统一和磁场的要求较高等问题^[7]。

6 磁敏感加权成像

SWI是一种3D梯度回波技术,基于磁敏感加权成像发展而来,经特定的后处理可以进行组织中的磁化率分布的量化,在无电离辐射的情况下对骨骼肌肉进行形态学评估并且利用相位图信息而不是幅度图信息进行成像的一种技术^[1,26]。SWI在皮质骨成像时,由于皮质骨的表观横向弛豫率很大,为了获得可靠的SWI,常需要进行短回波时间SWI以获得皮质骨体素内部的相位信息。与皮质骨相似,小梁骨是反磁性的,SWI是非侵入性间接测量骨小梁密度的天然候选者,通过研究发现SWI对骨小梁体积密度敏感,鉴于测量骨密度对评估绝经后妇女和老年人骨折风险的重要作用,SWI可能会成为一种有用的诊断工具^[27]。并且有实验证明了绘制包括皮质骨、松质骨和骨髓在内的骨磁化率图的可行性,能够通过一次MRI扫描对骨骼及周围软组织进行全面评估^[28]。与传统MR图像相比,SWI能够可靠地评估髋关节Sharp's角、Tönnis角、Wiberg外侧中心边缘角和头颈骨干角的骨形态学测量结果,准确性高。在评估椎体后缘皮质、皮质断裂和骨折线的位移和最小高度方面,SWI可以比标准MRI序列更准确地对椎体骨折进行可靠的评估,特别是对于未愈合的椎体骨折患者。另外,由于SWI能够可靠地检测钙化性肌腱炎患者肩袖中的钙化,并且比标准的肩袖MR序列具有更高的敏感性和特异性,期待其在肩周炎患者中的应用^[26,29,30]。SWI还能够可靠区分脊柱转移瘤是以成骨细胞或溶骨细胞为主,能够以比标准MRI序列以更高的准确性可靠的区分以成骨细胞为主的脊柱转移瘤和溶骨型脊柱转移瘤^[31,32]。

目前,SWI存在的不足有:扫描时间较长,容易出现由患者运动引起的微小运动伪影,且图像质量还取决于图像后处理的稳健性和准确性,对同一图像分析得出的结果可能略有不同。当视场相位超过 π 弧度时,图像有混淆的可能,这使得很难获得特别大的钙化的确切形状和范围。在鉴别良恶性骨折中,ADC值可出现重叠,在骨和软组织肿瘤和骨感染的图像上也可出现重叠。

7 $T_{1\rho}$

$T_{1\rho}$ 反映旋转坐标系中自旋晶格弛豫时间($T_{1\rho}$ 弛豫时间)的变化,弛豫时间的变化反映了水中基质大分子的低频运动状态,二者中氢质子的能量交换为 T_1 值,以此生成 $T_{1\rho}$ 伪彩图。 $T_{1\rho}$ 成像不需要对比剂,也不需要关节运动后扫描,因此可部分替代延迟增强成像。 $T_{1\rho}$ 可通过检测软骨PG的变化,对活体内软骨早期退变

进行敏感可靠地量化。早期关节软骨变性的主要特征是PG损失, 骨形态无明显改变, 因为PG的丢失是早期关节软骨退化的重要触发因素和标志, 导致不可逆的形态改变, 因此可以通过检测PG含量来检测早期软骨退化。在软骨基质中, PG大分子可以通过亲水基团与水分子连接并且相互作用, T_1 值增加表明PG含量减少^[33]。此外, $T_1\rho$ 对于鉴别 I、II 级软骨退变也具有一定优势。

$T_1\rho$ 扫描需要高场强和高射频能量, 以及需要应用特殊脉冲序列, 因此扫描时间较长, 期待该挑战早日得到解决。

8 T_2 mapping

T_2 mapping测量的是组织 T_2 值, 即横向弛豫时间, 其代表的是组织特性参数, 在组织成份发生改变时, T_2 值会发生相应改变。常规的 T_2 -mapping是基于自旋回波(spin-echo,SE)技术, 能够通过直接获取正常组织与病变组织的 T_2 值为诊断疾病提供参考依据, 在临床与科研中发挥了越来越重要的作用, 凭借其比传统的MRI成像技术拥有更高的准确性、可重复性和客观性的特点, 几乎在全身各个系统的研究中均有应用, 但主要集中在骨肌系统和心血管系统。多个研究表明, T_2 mapping对关节软骨的水含量和胶原纤维非常敏感, 能反映关节软骨胶原纤维结构的完整性, 但特异性较低^[34-36]。体外研究表明, 关节软骨 T_2 mapping值与水含量呈正相关, 与GAG浓度呈负相关, 并随软骨退变程度加重而增高。目前认为, T_2 弛豫时间随软骨和肌肉结构的破坏而延长。

T_2 mapping易受其他一些因素的影响, 如背景均匀性、骨胶原纤维排列方向、磁化率的变化、激发回波, 等等。

9 MRI动态增强扫描

MRI 动态增强扫描是在快速注入对比剂后, 应用快速成像序列获得对比剂在毛细血管网、组织间隙的分布情况^[37]。软骨动态延迟增强(delayed gadolinium enhanced MRI of cartilage, DGEMRIC)是一种非侵入性分子成像技术, 用于定量评估软骨中的 GAG 含量。其原理是静脉注射顺磁造影剂钆(GD-DTPA)后, 通过滑膜渗入滑液, GD-DTPA与健康软骨内带负电荷的 GAG 侧链相互排斥, 扩散到软骨中GAG含量较低的区域, 从而缩短 T_1 组织的弛豫时间。健康软骨中GAG含量高, GD-DTPA不易积聚, T_1 弛豫时间较长; 在GAG减少的区域容易堆积, T_1 弛豫时间短, 研究表明软骨中GAG含量与 T_1 值有很好的相关性, 在膝关节软骨关节炎患者中, GAG含量可以被准确测量^[38]。DGEMRIC 可以与 T_2 -mapping 联合使用, 同时获取软骨中的 GAG 与胶原蛋白的信息, 可靠地评估软骨生化成分^[18]。

10 讨论

总之, 磁共振成像定量扫描技术对骨骼肌肉系统疾病的早期诊断、发病机制及预后有重要意义。但由于扫描时间长, 对磁场要求高, 一些技术在临床上的应用受到限制。相信经过不断发展, 磁共振定量扫描技术在临床应用的空间会更加广阔。

参考文献

- [1]曹际斌, 崔玲, 孙文阁, 等. 多发性硬化磁共振影像组学定量研究进展[J]. 磁共振成像, 2021, 12(2): 113-116.
- [2]ZHANG Y, ZHOU Z, WANG C, et al. Reliability of measuring the fat content of the lumbar vertebral marrow and paraspinal muscles using MRI mDIXON-Quant sequence[J]. 2018, 24(5): 302-307.
- [3]李轶雯, 袁慧书. 磁共振脂肪定量技术在骨质疏松症中的应用[J]. 中国医学影响杂志, 2017, 25(1): 52-55.
- [4]李永, 陈雪贞, 蔡兆熙, 等. 腰椎间盘退变的MR定量分析: MRS和 $T_1\rho$ 成像技术[J]. 中国医学影像技术, 2018, 34(S1): 45-48.
- [5]郭会利, 水根会, 郭克华, 等. 磁共振波谱分析在骨与软组织病变恶性鉴别诊断中的应用[J]. 中医正骨, 2011, 23(4): 30-32.
- [6]WANG C, LI C, HSIEN T, et al. Characterization of bone and soft-tissue tumors with in vivo 1H MR spectroscopy: initial results[J]. 2004, 232(2): 599-605.
- [7]罗明芳, 孙振博, 荣康, 等. 定量磁共振成像技术原理及研究进展[J]. 分子影像学杂志, 2020, 43(4): 572-576.
- [8]TAN H, XU H, LUO F, et al. Combined intravoxel incoherent motion diffusion-weighted MR imaging and magnetic resonance spectroscopy in differentiation between osteoporotic and metastatic vertebral compression fractures[J]. 2019, 14(1): 299.
- [9]HEIER C, GUERRON A, KOROTCOV A, et al. Non-invasive MRI and spectroscopy of

- mdx mice reveal temporal changes in dystrophic muscle imaging and in energy deficits[J]. 2014, 9(11): e112477.
- [10]SETIAWATI R, SUARNATA M, RAHARDJO P, et al. Correlation of quantitative diffusion weighted MR imaging between benign, malignant chondrogenic and malignant non-chondrogenic bone tumors with histopathologic type[J]. 2021, 7(3): e06402.
- [11]吴增杰, 董诚, 边甜甜, 等. 兔VX2恶性骨肿瘤浸润范围的DWI与病理对照研究[J]. 放射学实践, 2021, 36(1): 37-41.
- [12]朱莉, 邹文远, 敖锋. 三种MRI生理学定量技术对早期膝关节软骨损伤的诊断价值[J]. 陕西医学杂志, 2021, 50(3): 293-296.
- [13]FRIEDRICH K, MAMISCH T, PLANK C, et al. Diffusion-weighted imaging for the follow-up of patients after matrix-associated autologous chondrocyte transplantation [J]. 2010, 73(3): 622-628.
- [14]周爽, 查云飞, 邢栋, 等. 小视野DWI评价膝关节骨挫伤骨髓水肿的可行性研究[J]. 磁共振成像, 2021, 12(2): 52-56.
- [15]WANG D, YIN H, LIU W, et al. Comparative analysis of the diagnostic values of T_2 mapping and diffusion-weighted imaging for sacroiliitis in ankylosing spondylitis[J]. 2020, 49(10): 1597-1606.
- [16]REN C, ZHU Q, YUAN H, J C R. Mono-exponential and bi-exponential model-based diffusion-weighted MR imaging and IDEAL-IQ sequence for quantitative evaluation of sacroiliitis in patients with ankylosing spondylitis [J]. 2018, 37(11): 3069-3076.
- [17]史婧. MRI扩散加权成像在骨肌系统疾病的应用现状与进展研究[J]. 影像研究与医学应用, 2019, 3(21): 3-4.
- [18]张天顺, 向述天. 定量磁共振对膝关节软骨的应用研究进展[J]. 医学影像学杂志, 2021, 31(2): 347-350.
- [19]王可欣, 许铖龙, 于静红. DTI及 T_2 弛豫时间图成像技术在膝关节骨性关节炎诊断中的应用研究进展[J]. 疑难病杂志, 2017, 16(11): 1185-1188.
- [20]徐方旗, 孙奇, 朱星瑜, 等. 不同生理磁共振成像技术在早期膝关节关节炎诊断中的应用进展[J]. 中医正骨, 2016, 28(4): 64-68.
- [21]张涛. 磁共振扩散加权与弥散张量成像原理分析及比较[J]. 现代医用影像学, 2017, 26(2): 369-370.
- [22]RAYA J J O M R I J. Techniques and applications of in vivo diffusion imaging of articular cartilage[J]. 2015, 41(6): 1487-1504.
- [23]LING W, REGATTE R, NAVON G, et al. Assessment of glycosaminoglycan concentration in vivo by chemical exchange-dependent saturation transfer (gagCEST) [J]. 2008, 105(7): 2266-2270.
- [24]LEE Y, YANG J, JEONG H, et al. Assessment of the patellofemoral cartilage: Correlation of knee pain score with magnetic resonance cartilage grading and magnetization transfer ratio asymmetry of glycosaminoglycan chemical exchange saturation transfer[J]. 2017(35): 61-68.
- [25]TOGAO O, HIWATASHI A, WADA T, et al. A qualitative and quantitative correlation study of lumbar intervertebral disc degeneration using glycosaminoglycan chemical exchange saturation transfer, pfirrmann grade, and $T_1\rho$ [J]. 2018, 39(7): 1369-1375.
- [26]BÖKER S, ADAMS L, FAHLENKAMP U, et al. Value of susceptibility-weighted imaging for the assessment of angle measurements reflecting hip morphology[J]. 2020, 10(1): 20899.
- [27]DIEFENBACH M, MEINEKE J, RUSCHKE S, et al. On the sensitivity of quantitative susceptibility mapping for measuring trabecular bone density [J]. 2019, 81(3): 1739-1754.
- [28]DIMOV A, LIU Z, SPINCEMAILLE P, et al. Bone quantitative susceptibility mapping using a chemical species-specific R_2^* signal model with ultrashort and conventional echo data [J]. 2018, 79(1): 121-128.
- [29]ADAMS L, BRESSEM K, BÖKER S, et al. Diagnostic performance of susceptibility-weighted magnetic resonance imaging for the detection of calcifications: A systematic review and meta-analysis[J]. 2017, 7(1): 15506.
- [30]NÖRENBERG D, EBERSBERGER H, WALTER T, et al. Diagnosis of Calcific Tendonitis of the Rotator Cuff by Using Susceptibility-weighted MR Imaging [J]. 2016, 278(2): 475-484.
- [31]BÖKER S, ADAMS L, BENDER Y, et al. Differentiation of Predominantly Osteoblastic and Osteolytic Spine Metastases by Using Susceptibility-weighted MRI [J]. 2019, 290(1): 146-154.
- [32]WOOLEN S, KAZEROONI E, STEENBURG S, et al. Optimizing electronic release of imaging results through an online patient portal [J]. 2019, 290(1): 136-143.
- [33]沈思, 王昊, 张景, 等. 磁共振 $T_1\rho$ 成像对运动员与普通青年人群髌骨对照分析[J]. 中国介入影像与治疗学, 2015, 12(6): 353-356.
- [34]陆志华, 姚伟武, 胡曙光, 等. 应用磁共振软骨 T_2 图成像定量测定退变兔膝关节软骨[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2008(5): 450-455.
- [35]杨海涛, 王仁法, 张海林, 等. 膝关节软骨 T_2 弛豫时间测定在早期骨关节炎中的应用价值[J]. 医学影像学杂志, 2007(5): 511-513.
- [36]陆志华, 姚伟武, 翟楠, 等. 磁共振延迟增强软骨成像在实验性骨关节炎定量测定中的应用研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2009, 24(7): 608-611.
- [37]肖雪. 磁共振成像动态增强扫描在脊柱结核与脊柱转移瘤鉴别中的诊断价值[J]. 临床合理用药杂志, 2021, 14(9): 160-162.
- [38]VAN TIEL J, KOTEK G, REIJMAN M, et al. Is $T_1\rho$ mapping an alternative to delayed gadolinium-enhanced MR imaging of cartilage in the assessment of sulphated glycosaminoglycan content in Human osteoarthritic knees? an in vivo validation study [J]. 2016, 279(2): 523-531.

(收稿日期: 2021-07-11)

(校对编辑: 姚丽娜)