

急性肌肉拉伤的MRI应用进展

廖红莉, 代立松, 周红梅, 徐向阳*



作者单位: 华中科技大学同济医学院附属梨园医院放射科, 武汉 430077

*通信作者: 徐向阳, E-mail: xuxy169@hotmail.com

中图分类号: R445.2; R685 文献标识码: A DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2021.01.030

本文引用格式: 廖红莉, 代立松, 周红梅, 等. 急性肌肉拉伤的MRI应用进展[J]. 磁共振成像, 2021, 12(1): 121-124.

[摘要] 急性肌肉拉伤是一种急性间接肌肉损伤, 常见于日常生活和运动中。仅根据临床症状和体格检查难以准确诊断。常规MRI软组织分辨率高, 是急性肌肉拉伤诊断和预后评估的重要手段。近年发展的肌肉MR弹性成像、T2弛豫时间图、磁共振扩散加权成像、扩散张量成像和磁共振波谱具有从微观结构、病理和生理层面为急性肌肉拉伤的诊断提供定量、客观依据的潜力。作者对应用于急性肌肉拉伤的各项MRI技术进行综述。

[关键词] 急性肌肉拉伤; 磁共振成像; 磁共振弹性成像; T2弛豫时间图; 磁共振扩散加权成像; 扩散张量成像; 磁共振波谱

Progress in magnetic resonance imaging application of acute muscle strain

LIAO Hongli, DAI Lisong, ZHOU Hongmei, XU Xiangyang*

Department of Radiology, Liyuan Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430077, China

*Correspondence to: Xu XY, E-mail: xuxy169@hotmail.com

Received 06 Sep 2020, Accepted 28 Nov 2020; DOI:10.12015/issn.1674-8034.2021.01.030

Cite this article as: Liao HL, Dai LS, Zhou HM, et al. Progress in magnetic resonance imaging application of acute muscle strain[J]. Chin J Magn Reson Imaging, 2021, 12(1): 121-124.

Abstract Acute muscle strain is defined as an acute indirect muscle injury and is common in daily life. In clinical practice, it is difficult to accurately diagnose based on symptoms and physical examination. Conventional magnetic resonance imaging (MRI) has high soft tissue resolution and is critical for the diagnosis and prognosis evaluation of acute muscle strain. Novel MRI techniques developed in recent years, including muscle MR elastography (MRE), T2 mapping, magnetic resonance diffusion weighted imaging (DWI), diffusion tensor imaging (DTI) and magnetic resonance spectroscopy (MRS), make it possible to observe the micro structure of strained muscle and provide quantitative and objective evidence for the diagnosis of acute muscle strain. This article reviews the various MRI techniques for acute muscle strain.

Key words acute muscle strain; magnetic resonance imaging; magnetic resonance elastography; T2 mapping; diffusion weighted imaging; diffusion tensor imaging; magnetic resonance spectroscopy

肌肉拉伤是一种急性间接肌肉损伤, 是指肌肉收缩超过其自身的限度引起肌肉、肌腱细微损伤或撕裂^[1], 往往引起受损部位剧烈疼痛、肿胀和活动受限^[2]。骨骼肌是运动系统的动力部分, 通过肌腱与骨骼连接。骨骼肌内肌束膜、肌外膜的胶原纤维与肌腱内的胶原纤维相连续。收缩肌肉产生的力通过这些结缔组织和肌腱传递到骨骼。肌肉与肌腱相接的部位称作肌肉肌腱连接处(myotendinous junction, MTJ), 肌肉肌腱在此呈指状交叉, 可缓冲肌肉力量的传递^[3]。但MTJ承受拉力的能力有限, 因此是急性肌肉拉伤的常见部位^[4]。

急性肌肉拉伤是最常见的肌肉损伤类型, 若未得到及时、有效地康复治疗则会有较高的概率发生再次拉伤。因此, 准确诊断并制定合理的康复计划至关重要。在大多数情况下, 急性肌肉拉伤可以根据病史和体格检查做出初步诊断, 但难以对肌肉及其附属结构的损伤直观量化。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)是一种基于原子核共振原理的成像方式, 具有较高的时间、空间分辨率, 具有无创性、无辐射及优良的软组织对比度等优点, 可多平面、多序列、多对比度成像, 被认为是诊断肌肉损伤的金标准, 可评估损伤范围和程度。此外, 近年来包括肌肉MR弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)、T2弛豫时间图(T2 relaxation time mapping)、磁共振扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)和扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)、磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)在内的MRI新技术在急性肌肉拉伤的评估也具有巨大的潜力, 为该疾病的诊断和评估提供微观的、病理和生理层面的依

据。笔者将对应用于急性肌肉拉伤的各项MR技术进行综述。

1 常规MRI技术的应用

常规MRI技术目前是临床上最常用于急性肌肉拉伤诊断的技术。目标肌肉接受MR多平面采集, 其中, 轴位图像有利于显示受伤的肌肉的横截面积以及肌肉周围或筋膜周围的出血程度, 而冠状位有助于评估损伤的纵向范围。二者综合应用可以确定损伤部位及严重程度^[5]。肌肉组织根据所采用序列呈现其不同信号强度。通常, 由于水分含量低、胶原蛋白含量高, 肌肉在T1加权像(T1 weighted image, T1WI)呈等信号, 而肌腱和腱膜在T1WI呈低信号。相对于肌肉和纯水, 脂肪的T1弛豫时间更短, 在T1WI表现为高信号。因此T1WI更有助于观察肌肉解剖结构的变化及慢性病变, 如肌肉脂肪化、萎缩及瘢痕。MRI常规脂肪抑制T2加权像(T2 weighted image, T2WI)常用于急性肌肉拉伤的诊断和评估, 根据结构像做出客观诊断。由于其T2弛豫时间较短, 肌肉在T2WI呈中等信号。肌腱和腱膜含纤维成分较多, 质子密度低于肌肉, 所以在T2WI信号强度较肌肉组织略低。脂肪具有较高的质子密度和较长T2弛豫时间, 在T2WI呈高信号。自由水和炎症导致的组织水肿的组织的T2弛豫时间长, 水分子含量较为敏感的MRI成像序列对肌肉内出血及水肿敏感, 能清晰显示肌肉损伤情况, 包括脂肪抑制快速自旋回波T2加权成像(fast spin echo T2 weighted imaging, FSE T2WI)、质子密度加权成像(proton density weighted imaging, PDWI)、中间加权成像

收稿日期: 2020-09-06 接受日期: 2020-11-28

(intermediate weighted imaging, IWI)以及短时间反转恢复(short tau inversion recovery, STIR)技术,特别适用于检测急性肌肉拉伤或炎性水肿。

急性肌肉拉伤典型的MRI表现为肌肉水肿、血肿、肌腱撕裂以及部分或全部肌肉撕裂^[6]。一般,对水分子含量较为敏感的MRI成像序列能较好地显示急性肌肉拉伤。高信号水肿和出血集中在MTJ、肌肉肌腱周围或在肌筋膜交界处的肌肉外围^[7]。肌肉间质性水肿或出血表现为高信号液体沿肌肉纤维和束延伸,呈典型的羽毛状外观。梭状肌拉伤时,位于肌腹末端的MTJ处出现局部或沿肌束间隙扩散的高信号,轴向T2加权脂肪抑制图像显示呈“牛眼征”^[8]。肌肉拉伤损伤肌腱时,导致明显的肌肉及肌腱回缩,肌腱部分撕裂的MRI表现为肌腱局部性中断,形态欠规则,撕裂处呈不均匀长T1、长T2信号;肌腱完全撕裂时,矢状位T2加权脂肪抑制的MR图像显示撕裂的肌组织向下移位,液体充满间隙,肌腱断端挛缩、增粗及信号不均^[8]。

2 肌肉MR弹性成像的应用

肌肉MR弹性成像是一种测量人体组织硬度和弹性的MR技术,被认为“影像触诊”。急性肌肉拉伤造成的肌肉撕裂可以通过肌肉弹性减低反映出来。该技术通过在常规MR中增加一套产生机械振动的激发装置,向受检部位施加振动,对被检组织内部质点位移进行成像处理,从而获得反映受检组织内部的弹性系数空间分布图^[9]。正常情况下,肌肉在运动的过程中其刚度随肌肉收缩的强度及负荷的增加而增加。弹性系数空间分布图中呈现正常或较高刚度色阶。肌肉拉伤造成肌纤维撕裂使肌肉弹性降低或消失,即肌肉的刚度下降。在弹性系数空间分布图上,肌肉撕裂部位呈现低刚度色阶。因此,弹性系数空间分布图可以提供有关肌肉受损状态的力学性质的定量信息,帮助诊断急性肌肉拉伤的损伤情况^[10-12]。

3 T2弛豫时间图

T2弛豫时间图是一种定量成像技术,能根据组织T2值的变化反映组织内部成分和生化信息的变化,对各肌肉的损伤程度进行半定量分析。该技术采用多回波快速自旋回波序列,通过计算不同组织的T2弛豫时间来反映组织的信号强度,即该组织成分的T2值^[13]。将采集不同回波时间获得的影像再经过软件处理,最终得到T2 mapping伪彩图。T2值与水及肌纤维排列结构有关。肌腱胶原纤维排列有序、结构完整, T2值较低;胶原纤维排列和结构紊乱、自由水及其自由度增加, T2升高。急性肌肉拉伤时出现的肌肉水肿、炎症等改变导致肌细胞外间隙的自由水增加^[14]。所以,急性拉伤的肌肉T2值较正常肌肉显著增高。且T2 mapping伪彩图的T2值越高,图像中色调越高,肌肉受伤越严重,所以T2 mapping伪彩图可反映肌肉损伤的严重程度及损伤部位^[15-16]。

4 磁共振扩散加权成像

磁共振扩散加权成像是唯一能够检测活体组织内水分子扩散运动的无创性方法。通过利用水分子的自由扩散运动特性进行成像, DWI从水分子扩散运动受限制的方向和程度等信息间接反映组织微观结构的变化。影响DWI扩散信号的因素主要有b值、表观扩散系数(ADC)、各向异性、T2穿透效应等。其中, ADC值可被用于肌肉损伤的诊断和评估。肌肉损伤程度越高,纤维断裂的数量越多,自由水扩散程度越大, ADC越高^[17]。因而,水分子扩散能力的程度可以反映肌肉拉伤的程度。DWI可以提供有关组织中流体运动的分子信息,能够反映水分子扩散情况及微观结构变化,诊断急性肌肉拉伤的敏感度及特异度优于常规MRI^[18]。DWI的信号强度取决于组织内微观水平的水分子的随机布朗运动或自由扩散的程度。急性肌肉拉伤导致肌纤维间自由水含量增加, ADC增高。DWI上骨骼肌损伤的区域和大致轮廓表现为不同程度的低信号^[19]。目

前DWI多用于特发性肌炎、骨肌肿瘤等肌肉疾病研究与应用,在肌肉创伤方面有待进一步探究。

5 扩散张量成像

扩散张量成像(DTI)是基于水分子的扩散运动获取不同组织各向异性信息的磁共振成像技术^[20]。组织中的水分子扩散运动被完整的细胞膜阻挡,使水分子沿肌纤维长轴方向运动。DTI在DWI基础上利用水在组织扩散,量化肌纤维的方向各向异性和肌肉结构参数。DTI对宏观肌肉的微观结构变化非常敏感,能直观显示肌肉微观结构的改变以对肌肉损伤进行早期监测和量化。正常情况下,肌肉纤维排列有序。急性肌肉拉伤时,断裂肌纤维的DTI图像显示肌纤维结构排列紊乱,水分子自由扩散能力增强,各项参数发生改变。 λ_1 表示平行于肌纤维长轴方向的扩散系数, λ_2 、 λ_3 表示垂直于肌纤维长轴方向的扩散系数,急性肌肉拉伤肌纤维断裂,水分子受限程度减轻,具体表现为扩散张量的三个本征值(λ_1 、 λ_2 、 λ_3)升高、平均各向异性分数(fractional anisotropy, FA)显著降低以及表观扩散系数(ADC)增大^[21]。DTI还可以动态检测肌肉纤维结构,肌纤维断裂可以通过成像直观地显示,从结构和分子运动水平情况来表现肌肉损伤形态和代谢改变,进而评估肌肉损伤情况。DTI具有无创性、在体检测重复性等优点,对肌肉拉伤的诊治具有明显优势^[22-26]。

6 磁共振波谱

磁共振波谱(MRS)是利用磁共振化学位移现象来测定组成物质的分子成分的一种检测方法,也是目前唯一可测得活体组织代谢物的化学成分和含量的检查方法。该技术根据代谢物的化学位移特性分离代谢物来提供有关组织组成的信息,可以作为通过提供骨骼肌组织生化成分的信息,监测体内组织代谢来确定肌肉功能的无创性技术手段。用于波谱研究的原子核有³¹P、¹H、²³Na、¹³C、⁷Li、¹⁹F等,目前对骨骼肌损伤方面的波谱学检测及研究主要集中在¹H-MRS和³¹P-MRS两方面^[27]。由于³¹P是三磷酸腺苷、磷酸肌酸和无机磷酸盐的组成部分,与大多数肌肉内代谢物与能量转换相关^[28],因此³¹P-MRS已被用于研究肌肉能量消耗与运动有关变化的模式,从而间接估计肌肉功能。肌肉损伤会导致其PCr升高, ATP下降,因而可以使用³¹P-MRS定量评价肌肉的损伤程度^[29]。

7 MRI的应用价值

目前,常规MRI被广泛应用于急性肌肉损伤的诊断和评估。对于临床可疑肌肉拉伤的患者,及时确定其受伤肌肉的定位及损伤程度对临床治疗及改善预后有极大价值。X线片及CT对急性肌肉拉伤的成像中作用有限,超声检查对急性肌肉拉伤轻微病灶较不敏感,且操作者依赖性强^[4]。MRI具有出色的空间分辨率和软组织对比度,被广泛用于诊断及评估肌肉损伤^[30]。轻度(I、II度)急性肌肉拉伤的治疗存在较大争议,但急性肌肉拉伤导致肌肉肌腱完全断裂时通常会采用手术治疗。MRI评估急性肌肉拉伤损伤情况,为治疗方案的制订提供重要信息,并且有助于在术前帮助外科医生精准定位^[18]。

MRI在急性肌肉损伤预后评估中也发挥重要作用。一些基于MRI表现的肌肉损伤分级系统(表1)可以用于急性肌肉拉伤随访,同时在预后方面也具有重要参考价值。改良版Peetrons分级系统^[31]是基于原版Peetrons超声影像分级系统,其1、2级损伤中,水肿的大小与康复时长成正相关;2级损伤的康复时长较1级损伤显著增加^[32]。英国田径运动肌肉损伤分级(British Athletics Muscle Injury Classification, BAMIC)^[33]和Chan等^[34]提出肌肉拉伤的分级系统都是基于MRI表现。经过研究证明, BAMIC中较高等级的损伤往往需要更长的时间才能重回训练或比赛,但较低等级的损伤(如I、II级损伤)之间所需康复时间则没有明显差异^[31]。Pollock等^[35]回顾性研究BAMIC的临床适用性时,发现肌腱肌涉及肌腱损伤

的运动员重返赛场时间较长且出现较高的复发率。Waterworth等^[36]研究出急性肌肉拉伤的运动员至少缺席一场比赛,与MRI显示出的多处肌肉受累,MTJ拉伤,深部位拉伤和肌肉肌腱撕裂之间存在关联。van der Made等^[37]发现,与没有肌肉肌腱受累的损伤相比,肌肉肌腱完全撕裂和肌肉肌腱在MRI上呈现波浪状的损伤明显需要更长的康复时间。Entwisle等^[38]发现涉及股二头肌远端MTJ的损伤提示更长的康复时间及较高的复发率,需要通过MRI来确定损伤是否涉及该部位以及其损伤程度。除此之外,有研究发现小腿肌肉拉伤在MRI上涉及结缔组织(肌膜、肌腱膜、肌肉肌腱、肌肉腱膜)损伤往往导致所需康复时间延长^[39]。

表1 基于MRI表现的肌肉损伤分级系统

分级系统	改良版Peetrons分级系统	BAMIC	Chan等的分级系统
0级	MRI阴性	MRI阴性	—
1级	水肿但无结构破坏	CSA<10%, 长径<5 cm, 宽度<5 cm	少于5%的肌纤维断裂; 在液体敏感的序列上呈现羽毛状高信号
2级	组织部分撕裂	CSA:10%~50%, 长度5~15 cm, 宽度<5 cm	肌肉或MTJ的水肿和出血沿筋膜延伸 肌纤维部分断裂,肌纤维间隙及周围筋膜出现水肿或水肿
3级	组织完全断裂	CSA>50%, 长度>15 cm, 宽度>5 cm	肌纤维完全断裂。断端回缩,由血肿填充断端。
4级	—	组织完全断裂	—
损伤定位	—	a=肌筋膜;b=肌肉或MTJ;c=肌腱	1、近端MTJ 2、肌腹 A=近端;B=中部;C=远端 a=肌腹内;b=肌筋膜;c=肌筋膜或周围筋膜;d=MTJ;e=综合 3、远端MTJ

注:CSA=横截面积

8 小结

综上所述,急性肌肉拉伤常于高强度运动中发生,借助磁共振影像学检查有助于获得精确诊断,其中检查方式包括临床上广泛使用的常规MR技术和极具潜力的MRI新技术。虽然后者在急性肌肉拉伤的诊断和随访方面具有巨大的潜力,但目前多用于实验研究,临床上应用最广泛的仍然是常规MR技术。了解肌肉组织的解剖基础及拉伤机制,结合MRI检查对急性肌肉拉伤精确诊断、评估预后,可以为医师给出相应的康复计划提供依据,帮助伤者尽早恢复运动机能。

作者利益冲突声明:全体作者均声明无利益冲突。

参考文献[References]

[1] Järvinen TA, Järvinen M, Kalimo H. Regeneration of injured skeletal muscle after the injury. *Muscles Ligaments Tendons J*, 2014, 24, 3(4): 337-345. DOI:10.1123/jsr.2016-0107

[2] Sherry MA, Johnston TS, Heiderscheit BC. Rehabilitation of acute hamstring strain injuries. *Clin Sports Med*, 2015, 34(2): 263-284. DOI: 10.1016/j.csm.2014.12.009

[3] Knudsen AB, Larsen M, Mackey AL, et al. The human myotendinous junction: an ultrastructural and 3D analysis study. *Scand J Med Sci Sports*, 2015, 25(1): e116-e123. DOI:10.1111/sms.12221

[4] Flores DV, Mejía Gómez C, Estrada-Castrillón M, et al. MR imaging of muscle trauma: anatomy, biomechanics, pathophysiology, and imaging appearance. *Radiographics*, 2018, 38(1): 124-148. DOI: 10.1148/rg.2018170072

[5] Crema MD, Yamada AF, Guermazi A, et al. Imaging techniques for muscle injury in sports medicine and clinical relevance. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2015, 8(2): 154-61. DOI:10.1007/s12178-015-9260-4

[6] Thierfelder KM, Gerhardt JS, Gemescu IN, et al. Imaging of hip and thigh muscle injury: a pictorial review. *Insights Imaging*, 2019, 15,

10(1): 20. DOI:10.1186/s13244-019-0702-1

[7] Rubin DA. Imaging diagnosis and prognostication of hamstring injuries. *Am J Roentgenol*, 2012, 199(3): 525-533. DOI:10.2214/AJR.12.8784

[8] Mendiguchia J, Alentorn-Geli E, Idoate F, et al. Rectus femoris muscle injuries in football: a clinically relevant review of mechanisms of injury, risk factors and preventive strategies. *Br J Sports Med*, 2013, 47(6): 359-366. DOI:10.1136/bjsports-2012-091250

[9] Wang XY, Yang ZH, Zhou C. MR elastography and its clinical application. *Chin J of Med Imaging*, 2013, 21(5): 392-394. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5185.2013.05.023

王向阳, 杨正汉, 周诚. MR弹性成像及其临床应用. *中国医学影像学杂志*, 2013, 21(5): 392-394. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2013.05.023

[10] Kennedy P, Macgregor LJ, Barnhill E, et al. MR elastography measurement of the effect of passive warmup prior to eccentric exercise on thigh muscle mechanical properties. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 46(4): 1115-1127. DOI:10.1002/jmri.25642

[11] Ito D, Numano T, Mizuhara K, et al. A new technique for MR elastography of the supraspinatus muscle: a gradient-echo type multi-echo sequence. *Magn Reson Imaging*, 2016, 34(8): 1181-1188. DOI:10.1016/j.mri.2016.06.003

[12] Schrank F, Warmuth C, Görner S, et al. Real-time MR elastography for viscoelasticity quantification in skeletal muscle during dynamic exercises. *Magn Reson Med*, 2020, 84(1): 103-114. DOI: 10.1002/mrm.28095

[13] Li WW, Chen J. Application of diffusion tensor imaging and T2 mapping in acute anterior cruciate ligament and knee cartilage injury. *J Diagn Imaging Int Radiol*. 2019, 28(6): 427-432.

李文文, 陈军. 磁共振DTI及T₂ mapping在急性前交叉韧带损伤并软骨损伤中的应用价值. *影像诊断与介入放射学*, 2019, 28(6): 427-432.

[14] Pei QQ. Research of application value of MR T2 mapping in rotator cuff injury. *GanSu University of Chineses Medicine*. 2018.

裴琴琴. MR T2 mapping在肩袖损伤中的应用价值研究. *甘肃中医药大学*, 2018.

[15] Guermazi A, Roemer FW, Robinson P, et al. Imaging of muscle injuries in sports medicine: sports imaging series. *Radiology*, 2017, 285(3): 1063. DOI:10.1148/radiol.2017174038

[16] Esposito A, Campana L, Palmisano A, et al. Magnetic resonance imaging at 7T reveals common events in age-related sarcopenia and in the homeostatic response to muscle sterile injury. *PLoS One*, 2013, 8(3): e59308. DOI:10.1371/journal.pone.0059308

[17] Nocerino EA, Aliprandi A, Tavana R, et al. Evaluation of muscle tears in professional athletes using diffusion-weighted imaging and apparent diffusion coefficient: preliminary results. *Acta Biomed*, 2019, 90(3): 238-244. DOI:10.23750/abm.v90i3.7157

[18] Lo HC, Hung ST, Kuo DP, et al. Quantitative diffusion-weighted magnetic resonance imaging for the diagnosis of partial-thickness rotator cuff tears. *J Shoulder Elbow Surg*, 2016, 25(9): 1433-1441. DOI:10.1016/j.jse.2016.01.020

[19] Khoo MM, Tyler PA, Saifuddin A, et al. Diffusion-weighted imaging (DWI) in musculoskeletal MRI: a critical review. *Skeletal Radiol*, 2011, 40(6): 665-681. DOI:10.1007/s00256-011-1106-6

[20] Hespel AM, Cole RC. Advances in high-field MRI. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 2018, 48(1): 11-29. DOI: 10.1016/j.cvsmp. 2017. 08.002

[21] Zeng PE, Zhou Y, Liu JY. Research advances of functional MRI in evaluation of muscle injury. *Int J Med Radiol*, 2019, 42(2): 189-192.

曾飘娥, 周延, 刘剑羽. 功能MRI在肌肉损伤中的应用进展. *国际医学放射学杂志*, 2019, 42(2): 189-192.

[22] Froeling M, Oudeman J, Strijkers GJ, et al. Muscle changes detected with diffusion-tensor imaging after long-distance running. *Radiology*, 2015, 274(2): 548-562. DOI:10.1148/radiol.14140702

[23] Cermak NM, Noseworthy MD, Bourgeois JM, et al. Diffusion tensor MRI to assess skeletal muscle disruption following eccentric exercise. *Muscle Nerve*, 2012, 46(1): 42-50. DOI:10.1002/mus.23276

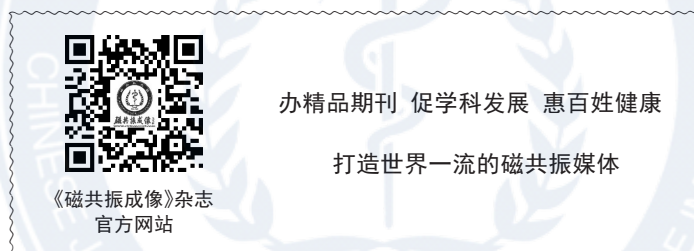
[24] Li P. Magnetic resonance diffusion tensor imaging and biomechanical characteristics of skeletal muscle injury in different periods. *Chengdu Sport University*. 2018.

李平. 骨骼肌损伤不同时期的磁共振弥散张量成像与生物力学特征研究. *成都体育学院*, 2018.

[25] Oudeman J, Nederveen AJ, Strijkers GJ, et al. Techniques and applications of skeletal muscle diffusion tensor imaging: a review. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 43(4): 773-788. DOI:10.1002/jmri.25016

[26] Longwei X. Clinical application of diffusion tensor magnetic resonance imaging in skeletal muscle. *Muscles Ligaments Tendons J*, 2012, 2(1): 19-24.

- [27] Kalia V, Leung DG, Sneag DB, et al. Advanced MRI techniques for muscle imaging. *Semin Musculoskelet Radiol*, 21(4): 459-469. DOI: 10.1055/s-0037-1604007
- [28] Moll K, Gussew A, Hein C, et al. Combined spirometry and 31 P-MRS of human calf muscle during high-intensity exercise. *NMR Biomed*, 2017, 30(7). Epub 2017 Mar 24. DOI:10.1002/nbm.3723
- [29] Kong HJ, Gao F, Wu JJ, et al. Advances in medical imaging of sports injury. *J Beijing Sport University*, 2018, 41(4): 61-74. 孔含静, 高飞, 吴钧杰, 等. 运动损伤的医学成像研究进展. *北京体育大学学报*, 2018, 41(4): 61-74.
- [30] Kerkhoffs GM, van Es N, Wieldraaijer T, et al. Diagnosis and prognosis of acute hamstring injuries in athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(2): 500-509. DOI: 10.1007/s00167-012-2055-x
- [31] Wangenstein A, Guermazi A, Tol JL, et al. New MRI muscle classification systems and associations with return to sport after acute hamstring injuries: a prospective study. *Eur Radiol*, 2018, 28(8): 3532-3541. DOI:10.1007/s00330-017-5125-0
- [32] Ekstrand J, Lee JC, Healy JC. MRI findings and return to play in football: a prospective analysis of 255 hamstring injuries in the UEFA Elite Club Injury Study. *Br J Sports Med*, 2016, 50(12): 738-743. DOI: 10.1136/bjsports-2016-095974
- [33] Pollock N, James SL, Lee JC, et al. British athletics muscle injury classification: a new grading system. *Br J Sports Med*, 2014, 48(18): 1347-1351. DOI:10.1136/bjsports-2013-093302
- [34] Chan O, Del Buono A, Best TM, et al. Acute muscle strain injuries: a proposed new classification system. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2012, 20(11): 2356-2362. DOI:10.1007/s00167-012-2118-z
- [35] Pollock N, Patel A, Chakraverty J, et al. Time to return to full training is delayed and recurrence rate is higher in intratendinous ('c') acute hamstring injury in elite track and field athletes: clinical application of the British Athletics Muscle Injury Classification. *Br J Sports Med*, 2016, 50(5): 305-310. DOI:10.1136/bjsports-2015-094657
- [36] Waterworth G, Wein S, Gorelik A, et al. MRI assessment of calf injuries in Australian Football League players: findings that influence return to play. *Skeletal Radiol*, 2017, 46(3): 343-350. DOI: 10.1007/s00256-016-2564-7
- [37] van der Made AD, Almusa E, Whiteley R, et al. Intramuscular tendon involvement on MRI has limited value for predicting time to return to play following acute hamstring injury. *Br J Sports Med*, 2018, 52(2): 83-88. DOI:10.1136/bjsports-2017-097659
- [38] Entwisle T, Ling Y, Splatt A, et al. Distal musculotendinous T Junction injuries of the biceps femoris: an MRI case review. *Orthop J Sports Med*, 2017, 5(7): 2325967117714998. Published 2017 Jul 20. DOI: 10.1177/2325967117714998
- [39] Prakash A, Entwisle T, Schneider M, et al. Connective tissue injury in calf muscle tears and return to play: MRI correlation. *Br J Sports Med*, 2018, 52(14): 929-933. DOI:10.1136/bjsports-2017-098362



(上接第117页)

- [25] Thoeny HC, Kessler TM, Simon-Zoula S, et al. Renal oxygenation changes during acute unilateral ureteral obstruction: assessment with blood oxygen level-dependent mr imaging: initial experience. *Radiology*, 2008, 247(3): 754-761. DOI:10.1148/radiol.2473070877
- [26] Xing JZ, Liu AL, Song QW, et al. BOLD MRI of rat kidney changes during acute unilateral ureteral obstruction at 3.0 T. *Chin J Magn Reson Imaging*, 2011, 2(6): 439-445. DOI:10.3969/j.issn.1674-8034.2011.06.010 邢金子, 刘爱连, 宋清伟, 等. 3.0T BOLD MRI 技术对大鼠急性单侧输尿管梗阻肾损害的研究. *磁共振成像*, 2011, 2(6): 439-445. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8034.2011.06.010
- [27] Giannarini G, Kessler TM, Roth B, et al. Functional multiparametric magnetic resonance imaging of the kidneys using blood oxygen level dependent and diffusion-weighted sequences. *J Urol*, 2014, 192(2): 434-439. DOI:10.1016/j.juro.2014.02.048
- [28] Zha T, Ren X, Xing Z, et al. Evaluating renal fibrosis with R2* histogram analysis of the whole cortex in a unilateral ureteral obstruction model. *Acad Radiol*, 2019, 26(8): e202-e207. DOI:10.1016/j.acra.2018.07.010
- [29] Conlin CC, Oesingmann N, Bolster B, et al. Renal plasma flow (RPF) measured with multiple-inversion-time arterial spin labeling (ASL) and tracer kinetic analysis: validation against a dynamic contrast-enhancement method. *Magn Reson Imaging*, 2017, 37(4): 51-55. DOI: 10.1016/j.mri.2016.11.010
- [30] Hu GW, Liu BL, Zhong SY, et al. Magnetic resonance arterial spin labeling in renal fibrosis from obstructive nephropathy: an experimental study. *Chin J Med Imaging*, 2019, 27(10): 732-735. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5185.2019.10.003 胡根文, 刘宝良, 钟淑媛, 等. 磁共振动脉质子自旋标记成像在梗阻性肾病-肾纤维化中的实验研究. *中国医学影像学杂志*, 2019, 27(10): 732-735. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2019.10.003
- [31] Villa G, Ringgaard S, Hermann I, et al. Phase-contrast magnetic resonance imaging to assess renal perfusion: a systematic review and statement paper. *Magma (New York, N. Y.)*, 2020, 33(1): 3-21. DOI: 10.1007/s10334-019-00772-0
- [32] Correas JM, Anglicheau D, Gennison JL, et al. Élastographie rénale. *Nephrol Ther*, 2016, 12(2): S25-S34. DOI: 10.1016/j.nephro.2016.02.014
- [33] Zhang JG, Xing ZY, Zha TT, et al. Longitudinal assessment of rabbit renal fibrosis induced by unilateral ureteral obstruction using two-dimensional susceptibility weighted imaging. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 47(6): 1572-1577. DOI:10.1002/jmri.25915
- [34] Zhang JG, Xing ZY, Zha TT, et al. Feasibility of susceptibility weighted imaging in the evaluation of renal fibrosis induced by unilateral ureteral obstruction in white rabbits. *Natl Med J China*, 2017, 97(45): 3573-3578. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2017.45.012 张京刚, 邢兆宇, 查婷婷. 磁敏感加权成像评估单侧输尿管梗阻兔模型致肾纤维化的可行性. *中华医学杂志*, 2017, 97(45): 3573-3578. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2017.45.012
- [35] Wang F, Jiang R, Takahashi K, et al. Longitudinal assessment of mouse renal injury using high-resolution anatomic and magnetization transfer MR imaging. *Magn Reson Imaging*, 2014, 32(9): 1125-1132. DOI: 10.1016/j.mri.2014.07.012