

MRI Research Progress of Carpal Triangular Fibrocartilage Complex Injury*

综述

MRI在腕三角纤维软骨复合体损伤的研究进展*

赵志男¹ 牛金亮^{2,*}

1.山西医科大学医学影像学院

2.山西医科大学第二医院磁共振室

(山西太原 030001)

【摘要】三角纤维软骨复合体(triangular fibrocartilage complex, TFCC)位于远端尺骨和尺侧腕关节之间,是一种纤维软骨和韧带结构的复合体,起到稳定尺侧腕关节、远端尺桡关节(distal radioulnar joint, DRUJ)和传递轴向负荷的作用;TFCC损伤是腕关节尺侧疼痛最常见的原因。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)能够提供高对比度的软组织图像,是TFCC损伤最常用的影像学检查方式。MR定量成像技术、MR关节造影技术、3D各向同性成像技术、人工智能技术等新技术的应用,不仅可以更好的可视化TFCC的解剖结构,提高诊断的准确率;还可对TFCC的生化成分进行检测和量化,更好地了解TFCC的生理和病理情况,并最终有助于TFCC损伤的精确诊断、治疗规划以及改善预后。本文就MRI在TFCC损伤的诊断价值及最新进展进行综述。

【关键词】磁共振成像;腕关节损伤;三角纤维软骨复合体;影像学诊断

【中图分类号】R445.2

【文献标识码】A

【基金项目】基于全身磁共振的急性髓细胞白血病肿瘤负荷及相关分子生物学机制研究(YDZJSX2022A066)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.03.053

三角纤维软骨复合体(triangular fibrocartilage complex, TFCC)是腕关节尺侧一组包含复杂纤维软骨和韧带的结构,它将负荷从腕骨分散至前臂,并维持远端尺桡关节(distal radioulnar joint, DRUJ)的稳定性^[1]。TFCC损伤可导致尺侧腕关节疼痛并常伴有DRUJ不稳定,导致功能下降,早期准确诊断对于及时制定精细化治疗方案及改善预后至关重要。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)对软组织的分辨率较高,可以显示TFCC的信号强度及形态的变化,是目前诊断TFCC损伤最主要的辅助检查^[2]。本文就TFCC损伤的影像学表现及相关MRI新技术进行综述,以突出MRI在TFCC损伤诊断和治疗中的价值与潜力。

1 TFCC的解剖及生理

TFCC解剖结构复杂,有众多结构组成,主要包括三角纤维软骨(triangular fibrocartilage, TFC)、半月板同系物、掌侧和背侧桡尺远端韧带、尺月韧带、尺三角韧带、尺侧副韧带和尺侧腕伸肌(extensor carpi ulnaris, ECU)腱鞘等^[3]。在腕关节被施加轴向负荷或出现尺侧偏离时,TFCC作为尺骨和月骨之间的缓冲,起到稳定DRUJ的作用,同时也限制了腕关节的尺侧偏离,在前臂和手之间的负荷传递中起着不可或缺的作用^[1]。

2 TFCC损伤的机制及分型

TFCC的创伤性和退行性损伤是尺侧腕关节疼痛的常见原因^[4]。TFCC损伤分类主要采用Palmer分型标准,将损伤分为创伤性(I型)和退变性(II型)^[5]。I型损伤大多有明确的外伤史,通常发生在上肢摔伤或前臂旋转损伤之后,并常伴有DRUJ不稳定,导致功能下降;II型损伤为慢性进行性病变,多见于老年人,与年龄变化、长时间劳动和尺侧阳性变异有关。根据具体的损伤部位,TFCC损伤可分为数个亚型(表1)。

3 TFCC损伤的影像学诊断

目前,准确诊断TFCC损伤仍存在一定困难^[6]。其诊断主要依靠病史、临床特征、体格检查和关节镜及影像学等辅助检查^[2];其中,腕关节镜能直接观察尺侧腕关节结构,准确确定病变程度和范围,是诊断TFCC损伤的“金标准”^[7],但为有创性检查,临床应用受限。因此,影像学检查在诊断中显得尤为重要。

常规影像学检查包括X线、计算机断层扫描(computed tomography, CT)、MRI等。X线检查可发现骨折、退行性改变等问题,并了解腕关节各构成骨的相对位置,评估尺骨的变异情况及DRUJ是否稳定,但无法直接观察到TFCC损伤。CT是诊断DRUJ不稳定的首选成像方法,并能够清晰地显示腕骨的情况,但是依然无法显示TFCC的详细解剖^[8]。MRI检查无电离辐射,可以产生高分辨率的软组织图像并可视化TFCC的精细解剖结构,在评估软骨、韧带损伤方面具有较高的准确性,对于评估TFCC损伤具有重要意义^[9-10]。

4 TFCC损伤的MRI表现

4.1 直接征象 目前,高分辨率3T MRI是诊断TFCC损伤的首选成像手段^[11-12],其对于TFCC损伤的敏感性和特异性与腕关节镜检查相当,阴性预测值(negative predictive value, NPV)高达0.97^[13]。正常的TFCC由于T2值较短,在MRI上以低信号为主;当发生损伤时,其形态和信号强度会发生改变,表现为TFCC的信号增高甚至出现断裂,可伴有相关邻近结构的退行性改变。根据损伤分型不同,MRI表现各有特点(表1)。

4.2 间接征象 研究表明,许多间接征象如DRUJ积液、ECU的病理改变、尺骨茎突骨髓水肿、三角韧带断裂和信号改变、桡骨远端骨折(distal radius fracture, DRF)等,可弥补MRI直接征象的不足,提高TFCC损伤的诊断准确率。Caitlin等^[14]发现MRI直接评估TFCC撕裂敏感性仅为0.56,DRUJ积液的存在可使敏感性提升至0.89,且DRUJ积液较TFCC复杂的解剖结构更易评估。另外,相较于单独MRI直接评估,将MRI直接评估与ECU病理改变(腱鞘炎、肌腱病、撕裂或半脱位)、尺骨茎突骨髓水肿相结合可提高对周围TFCC撕裂的阳性预测值,表明ECU的病理改变、尺骨茎突骨髓水肿可作为诊断撕裂

【第一作者】赵志男,男,医师,主要研究方向:骨关节影像。E-mail: zzn664171670@163.com

【通讯作者】牛金亮,男,教授,主要研究方向:骨关节影像。E-mail: sxlsjy@163.com

的次级征象^[15]。Hur等^[16]发现当发生I B型TFCC撕裂时,三角韧带断裂和信号改变的发生率显著增高,这两种征象可作为I B型TFCC撕裂的预测标记。在DRF的患者中TFCC损伤的发生率高达96.5%,并且DRF的形态如背侧成角畸形和尺骨变异是TFCC损伤的独立预后因素^[17-18]。

4.3 TFCC特殊损伤 Palmer分类已被手外科医生和影像科医生广泛使用,有助于阐明损伤机制并指导临床治疗。然而,原始的Palmer分类系统没有涵盖所有的TFCC损伤类型。近来,研究者们又发现了几种未包括在原始Palmer分类系统中的创伤性损伤,包括TFC水平撕裂、病理性TFC关节囊脱离、TFCC桶柄状撕裂等^[19]。Zhan等^[20]通过对手术证实的TFCC损伤患者进行MRI检查,部分患者存在TFC水平撕裂,在脂肪抑制序列图像中TFC中央可见水平方向的线性高信号,与IA型损伤不同的是这种撕裂不会延伸到关节表面。另一部分患者存在病理性TFC关节囊脱离,MRI图像上表现为TFC与关节囊在背侧和掌侧边缘之间发生断裂。Theumann及Jose发现一些患者TFC与掌侧和背侧远端尺桡韧带部分分离;由于分离的TFC外观和移位与膝关节半月板的桶柄撕裂相似,因此他们将其描述为TFCC桶柄状撕裂^[21-22]。目前,主要依靠临床表现和影像学检查确定TFCC损伤的治疗方式;新发现的损伤模式,进一步完善和补充Palmer分类,这将为临床诊断和术前计划提供更加全面的指导^[19]。

5 TFCC损伤MRI诊断的局限性及改进方法

目前,MRI是术前诊断TFCC损伤的主要方法,但受TFCC损伤类型、患者年龄等影响,可能存在少数假阴性或假阳性情况^[23-24]。因此,高空间分辨率、高对比度分辨率和高信噪比图像对于准确识别TFCC解剖和病理至关重要。近年来MR定量技术、3D各向同性成像技术、MR关节造影技术、三维重建分割技术等MRI新技术在TFCC成像中的可行性已被证实,并进行了相关研究。

5.1 MR定量技术 常规MRI图像仅限于对TFCC体积和形态的评估,T2^[25]和T1rho^[26] mapping等定量技术能够识别关节软骨的生化组成^[27]和生物力学特性^[28],可评估TFCC中的纤维软骨的结构及功能改变。Rauscher^[29]通过对26名志愿者的腕关节进行扫描并测量T1、T1ρ和T2值,发现T1ρ值与年龄有显著的依赖性,T1ρ值的升高可能与细胞活力丧失及组织水合作用的增强有关,这可反映TFCC的退行性过程。杜康佳等^[30]通过对35名患者及30名志愿者进行双腕关节3D-Vibe联合T2 mapping成像,TFCC损伤组T2值较对照组明显增高,可能与软骨基质遭到了破坏,对水的渗透性增强有关;此发现有助于评估早期MRI常规扫描难以发现的TFCC损伤。

超短回波时间(ultrashort echo time, UTE)序列TEs值比常规序列短100-1000倍,可以直接成像肌肉骨骼系统中的短T2组织。结合UTE的定量技术可以测定UTE T2*^[31]和UTE T1rho^[32]值,较传统定量技术对早期结构改变的检测具有更高的灵敏度。Fujisaki^[33]对10名健康志愿者使用UTE技术进行腕关节扫描,结果表明负荷和拉伸应变的增加会导致TFC的T2*值降低,这有助于对TFCC的生物力学研究。Bae^[34]通过对TFCC的形态学和定量MR值评估,发现UTE T2和T1rho值通常随病理程度加重而增加,表明UTE T2和T1rho值可能是TFCC力学性能的一种合适的替代标记物。

5.2 MR关节造影技术(magnetic resonance arthrography, MRA) 在诊断TFCC外周性撕裂时,常规MRI准确率较低,主要由于TFCC尺侧附着处的间隙内有着高度血管化的疏松结缔组织,在T2WI及脂肪抑制序列图像上呈高信号,易被误诊为损伤^[35]; MR

关节造影技术结合了传统关节造影和MRI的优点,克服了两者的局限性,具有更高的诊断性能^[36]。根据造影剂进入腕关节腔的方式,可分为直接关节造影和间接关节造影。

直接关节造影技术是将造影剂直接注入到腕关节腔内,关节的膨胀会导致结构的分离和拉伸,从而获得更好的可视化,一般采取单室桡腕关节注射。当MRA图像中观察到缺损线或造影剂渗漏到桡侧远端关节时,认为TFCC撕裂;当TFCC的韧带发生形变或DRUJ内液体增加且TFCC信号增高时,认为TFCC可能撕裂。Asaad等^[37]以关节镜检查结果作为参考标准,MRA对于TFCC病变、韧带撕裂、软骨损伤均展现出较高的准确率;Petsatodis等^[38]通过对经关节镜检查证实TFCC撕裂的患者行常规MRI及MRA检查,结果表明对于TFCC撕裂,MRA准确率为97%,远高于常规MRI(准确率为65%)。此外,有研究表明在进行MR直接关节造影时,对腕关节施加牵引,可以使腕关节间隙增宽,这提高了关节软骨的可视化以及TFCC和固有韧带撕裂的检测,有利于TFCC损伤的诊断^[39]。

间接关节造影技术是通过静脉注入造影剂并延迟成像,造影剂从滑膜扩散到关节间隙,产生关节造影效果,从而增强结构之间的区分。Thomsen等^[40]发现与对比前图像相比,MR间接关节造影的对比后图像在评估舟月韧带损伤和I B型TFCC撕裂方面有着更高的准确率。Luetkens等^[41]通过静脉注射钆对比剂,可以提高TFCC中心凹和茎突附着病灶的对比度-信噪比(contrast-to-noise ratio, CNR),更好的评估尺侧TFCC损伤。

5.3 3D各向同性成像技术 TFCC的解剖结构复杂,结构细小,包括有斜行走向的微小韧带和较薄的软骨层;常规MRI扫描序列主要是2D序列,扫描层厚较厚,易受部分容积效应影响,并且需要在不同的正交平面中获取图像,不能进行多平面重构,难以清晰显示每个结构;而3D各向同性成像技术则拥有层厚薄、任意多平面重建,并且可减少部分体积效应等优势,并且3D各向同性成像技术只采集一次图像,而无需分别不同的正交平面采集,有利于节省时间。在对TFCC成像时,二者均可提供高质量图像^[42],3D各向同性成像技术通过获取多平面重构图像,缩短了总扫描时间^[43];因其可薄层扫描,减少部分容积效应对图像的影响,更清楚的显示TFCC的结构边缘,对于评估细微结构的损伤较2D序列有明显优势^[44]。Götestrand等^[45]通过对比3D SPACE序列和2D PDWI序列检查,结果表明3D各向同性序列图像质量明显优于2D序列,尤其是对舟月韧带、月三角韧带和TFCC中央凹可视化上,当需要评估这些结构时,可优先使用3D SPACE序列。

此外,Eunsun等^[46]通过将MRA与3D各向同性技术结合,在对TFC中心穿孔和舟月韧带、月三角韧带撕裂的诊断上与2D序列表现出相同的性能,具有取代2D序列的潜力。Huflage等^[47]在MRA联合3D各向同性技术的同时,进行多平面重构(Multiplanar reconstruction, MPR),以适应TFCC的三角形形状,提高对尺侧TFCC病变的诊断准确性。

5.4 超高场磁共振(ultra-high field magnetic resonance imaging, UHF-MRI)技术 研究表明3T MRI系统对TFCC损伤的敏感性、特异性和准确性均优于1.5T MRI系统^[48];随着UHF-MRI系统(4T及以上)越来越多地用于科学研究和临床评估,它们改善临床诊断的潜力也在增加。与较低的场强相比,较高的场强提供较高的信噪比,从而带来更高的分辨率,并可能改善组织对比度^[49]。Götestrand等^[50]对18名健康志愿者进行7T和3T MRI检查,结果表明7T在腕部解剖结构的可视化方面优于3T,在评估肌腱和神经时尤为明显。

5.5 人工智能(artificial intelligence, AI)技术 人工智能技术主

要是通过对影像的深度学习,协助医生对于病灶进行定性、定量评估,提高诊断的准确性^[51];当前,MRI AI技术主要包括影像组学和深度学习两类方法。滕佩宏等^[52]将影像组学首次应用于评估TFCC损伤,通过建立基于MRI的影像组学模型,在提高TFCC损伤的诊断率的同时,能够减少放射科医生的诊断主断性,避免漏诊或误诊。深度学习算法可以识别细微的体征,使用深度神经网络,通过多层级结构从数据集中提取特征。Lin等^[53]利用改进的MRNet框架准确评估TFCC损伤,验证了其从MRI扫描中提取特征检测TFCC损伤的可行性。

5.6 三维重建分割技术 由于TFCC结构的复杂性和潜在病变的多样性,很难区分亚结构的潜在病变,而基于影像数据集的三维重建分割技术已多次被证明是增强临床影像信息价值的一种选择。有研究表明即使常规MRI显示为阴性结果或轻微的结构损伤,也可能存在重大病变;相较于 μ -CT无法直接区分软组织结构,通过在常规MRI扫描的基础上对TFCC亚结构进行三维重建分割可以识别这些病变,这可能对更精确的诊断和治疗产生影响^[54]。

5.7 动态磁共振技术 相较于常规静态MRI扫描,动态磁共振技术不仅具有常规MRI的优点,还提供了对病变组织的动态观察功能。Fu等^[55]通过对TFCC损伤患者腕尺桡侧运动进行动态磁共振扫描,可以更直观地观察到TFCC损伤患者在运动过程中腕关节的运动和位置变化关系,这有助于了解疾病,提高TFCC诊断的准确性。

6 总结与展望

TFCC损伤是尺侧腕关节疼痛和DRUJ稳定性受损常见的原因,由于TFCC的解剖结构的复杂性,临床上准确诊断TFCC损伤仍存在困难。MRI作为一种非侵入性的检查方式,凭借其高分辨率的软组织成像,对于显示TFCC的解剖结构和评估损伤具有重要意义。MRI新技术的运用既可以更好的可视化TFCC的解剖结构,提高诊断的准确性,也可以提供更具体的组织组成和微环境的信息,早期识别病理改变。我们期望这些新技术在不久的将来应用于临床,有助于TFCC损伤的早期诊断、精准治疗及预后评价。

表1 TFCC损伤分型及MRI表现

损伤分型	损伤表现	MRI表现
创伤性 (I型)	I A TFC中央穿孔	低信号的TFC中出现线样高信号,而TFCC其他结构正常
	I B TFC尺侧撕裂	TFC三角韧带尺侧附着处不连续,损伤处表现为形态不规则高信号影
	I C TFC周围撕裂	尺月韧带及尺三角韧带不连续,高信号填充损伤处
	I D TFC桡侧撕裂	TFC桡侧与桡骨乙状切迹分裂,损伤处可见线样高信号
退变性 (II型)	II A TFC磨损	TFC局部变薄,表面磨损, 低信号TFC内信号强度增加
	II B TFC磨损,伴软骨软化	与II A型相似,伴有邻近月骨关节软骨变薄, 骨质内水肿样高信号
	II C TFC穿孔,伴软骨软化	TFC中央可见缺损,其内出现高信号影, 相邻月骨骨髓水肿伴软骨下囊肿
	II D TFC穿孔,软骨软化,伴月三角韧带损伤	与II C型相似,伴有月三角韧带处信号增高
	II E TFC穿孔,软骨软化,月三角韧带损伤, 伴尺腕关节、桡尺远端关节退行性骨关节炎	与II D型相似,伴有DRUJ骨质增生,关节内积液

参考文献

[1] Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y. Functional anatomy of the triangular fibrocartilage complex[J]. J Hand Surg Br, 1996, 21(5): 581-586.

[2] 曲玉磊, 刘永涛. 三角纤维软骨复合体损伤的诊断及治疗进展[J]. 实用骨科杂志, 2021, 27(3): 242-246.

[3] Palmer AK. Triangular fibrocartilage disorders: injury patterns and treatment[J]. Arthroscopy, 1990, 6(2): 125-132.

[4] Hermansdorfer JD, Kleinman WB. Management of chronic peripheral tears of the triangular fibrocartilage complex[J]. J Hand Surg Am, 1991, 16(2): 340-346.

[5] Palmer AK. Triangular fibrocartilage complex lesions: a classification[J]. J Hand Surg Am, 1989, 14(4): 594-606.

[6] Yoshioka H, Burns JE. Magnetic resonance imaging of triangular fibrocartilage[J]. J Magn Reson Imaging, 2012, 35(4): 764-778.

[7] Slutsky DJ. Current innovations in wrist arthroscopy[J]. J Hand Surg Am, 2012, 37(9): 1932-41.

[8] Cereza L, Del Piñal F, Atzei A, et al. Interdisciplinary consensus statements on imaging of DRUJ instability and TFCC injuries[J]. Eur Radiol, 2023, 33(9): 6322-6338.

[9] Ochman S, Wieskötter B, Langer M, et al. High-resolution MRI (3T-MRI) in diagnosis of wrist pain: is diagnostic arthroscopy still necessary?[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2017, 137(10): 1443-1450.

[10] 张永. 腕关节损伤的影像学特征及CT与MRI联合诊断的准确性分析[J]. 罕少疾病杂志, 2023, 30(1): 77-78.

[11] Jeantroux J, Becce F, Guerini H, et al. Athletic injuries of the extensor carpi ulnaris subsheath: MRI findings and utility of gadolinium-enhanced fat-saturated T1-weighted sequences with wrist pronation and supination[J]. Eur Radiol, 2011, 21(1): 160-166.

[12] Watanabe A, Souza F, Vezeridis PS, et al. Ulnar-sided wrist pain. II. Clinical imaging and treatment[J]. Skeletal Radiol, 2010, 39(9): 837-857.

[13] Zhao X, Yu A, Zhao H, et al. Diagnostic value of MRI in traumatic triangular fibrocartilage complex injuries: a retrospective study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2024 Jan 13; 25(1): 63.

[14] Boutin RD, Fritz RC. Displaced Flap Tears of the Triangular Fibrocartilage Complex: Frequency, Flap Location, and the "Comma" Sign on Wrist MRI[J]. AJR Am J Roentgenol, 2021, 217(3): 707-708.

[15] Nevalainen MT, Zoga AC, Rivlin M, et al. Extensor carpi ulnaris tendon

- pathology and ulnar styloid bone marrow edema as diagnostic markers of peripheral triangular fibrocartilage complex tears on wrist MRI: a case-control study[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33 (5): 3172-3177.
- [16] Hur Y, Ahn JM, Kim HJ, et al. Peripheral tear of the triangular fibrocartilage complex: diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging and diagnostic performance of the primary and secondary signs[J]. *Skeletal Radiol*, 2024, 53 (6): 1153-1163.
- [17] Yan B, Xu Z, Chen Y, et al. Prevalence of triangular fibrocartilage complex injuries in patients with distal radius fractures: a 3.0T magnetic resonance imaging study[J]. *J Int Med Res*, 2019, 47 (8): 3648-3655.
- [18] Lee HW, Kim KT, Lee S, et al. Fracture severity and triangular fibrocartilage complex injury in distal radius fractures with or without osteoporosis[J]. *J Clin Med*, 2024, 13 (4): 992.
- [19] Zhan H, Bai R, Qian Z, et al. Traumatic injury of the triangular fibrocartilage complex (TFCC)—a refinement to the Palmer classification by using high-resolution 3-T MRI[J]. *Skeletal Radiol*, 2020, 49 (10): 1567-1579.
- [20] Zhan H, Zhang H, Bai R, et al. High-resolution 3-T MRI of the triangular fibrocartilage complex in the wrist: injury pattern and MR features[J]. *Skeletal Radiol*, 2017, 46 (12): 1695-1706.
- [21] Theumann N, Kamel EM, Bollmann C, et al. Bucket-handle tear of the triangular fibrocartilage complex: case report of a complex peripheral injury with separation of the distal radioulnar ligaments from the articular disc[J]. *Skeletal Radiol*, 2011, 40 (12): 1617-1621.
- [22] Jose J, Arizpe A, Barrera CM, et al. MRI findings in bucket-handle tears of the triangular fibrocartilage complex[J]. *Skeletal Radiol*, 2018, 47 (3): 419-424.
- [23] Andersson JK, Andernord D, Karlsson J, et al. Efficacy of magnetic resonance imaging and clinical tests in diagnostics of wrist ligament injuries: a systematic review[J]. *Arthroscopy*, 2015, 31 (10): 2014-2020. e2.
- [24] Wang Z, Chen S, Liu B, et al. Abnormal MRI signal intensity of the triangular fibrocartilage complex in asymptomatic wrists[J]. *J Hand Surg Eur Vol*, 2023, 48 (4): 326-332.
- [25] Mosher TJ, Dardzinski BJ. Cartilage MRI T2 relaxation time mapping: overview and applications[J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2004, 8 (4): 355-368.
- [26] Regatte RR, Akella SV, Wheaton AJ, et al. 3D-T1rho-relaxation mapping of articular cartilage: in vivo assessment of early degenerative changes in symptomatic osteoarthritic subjects[J]. *Acad Radiol*, 2004, 11 (7): 741-749.
- [27] Welsch GH, Mamisch TC, Zak L, et al. Evaluation of cartilage repair tissue after matrix-associated autologous chondrocyte transplantation using a hyaluronic-based or a collagen-based scaffold with morphological MOCART scoring and biochemical T2 mapping: preliminary results[J]. *Am J Sports Med*, 2010, 38 (5): 934-942.
- [28] Wheaton AJ, Dodge GR, Elliott DM, et al. Quantification of cartilage biomechanical and biochemical properties via T1rho magnetic resonance imaging[J]. *Magn Reson Med*, 2005, 54 (5): 1087-1093.
- [29] Rauscher I, Bender B, Grözinger G, et al. Assessment of T1, T1ρ, and T2 values of the ulnocarpal disc in healthy subjects at 3 tesla[J]. *Magn Reson Imaging*, 2014, 32 (9): 1085-1090.
- [30] 杜康佳, 颜梅, 温生宝, 等. MRI 3D-Vibe联合T2 mapping成像对腕关节三角纤维软骨复合体损伤的评价及定量分析[J]. *磁共振成像*, 2023, 14 (7): 115-120.
- [31] 李慧. MRI三维超短回波时间双回波脉冲序列联合增强评估前交叉韧带重建术后肌腱恢复[J]. *罕少疾病杂志*, 2022, 29 (7): 94-96, 101.
- [32] Du J, Carl M, Diaz E, et al. Ultrashort TE T1rho (UTE T1rho) imaging of the Achilles tendon and meniscus[J]. *Magn Reson Med*, 2010, 64 (3): 834-842.
- [33] Fujisaki A, Aoki T, Narimatsu H, et al. Ultrashort time-to-echo quantitative magnetic resonance imaging of the triangular fibrocartilage: differences in position[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29 (6): 3219-3223.
- [34] Bae WC, Ruangchai jatuporn T, Chang EY, et al. MR morphology of triangular fibrocartilage complex: correlation with quantitative MR and biomechanical properties[J]. *Skeletal Radiol*, 2016, 45 (4): 447-454.
- [35] Haims AH, Schweitzer ME, Morrison WB, et al. Limitations of MR imaging in the diagnosis of peripheral tears of the triangular fibrocartilage of the wrist[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2002, 178 (2): 419-422.
- [36] Smith TO, Drew B, Toms AP, et al. Diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging and magnetic resonance arthrography for triangular fibrocartilaginous complex injury: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2012, 94 (9): 824-832.
- [37] Asaad AM, Andronic A, Newby MP, et al. Diagnostic accuracy of single-compartment magnetic resonance arthrography in detecting common causes of chronic wrist pain[J]. *J Hand Surg Eur Vol*, 2017, 42 (6): 580-585.
- [38] Petsatodis E, Pilavaki M, Kalogera A, et al. Comparison between conventional MRI and MR arthrography in the diagnosis of triangular fibrocartilage tears and correlation with arthroscopic findings[J]. *Injury*, 2019, 50 (8): 1464-1469.
- [39] Lee RK, Griffith JF, Ng AW, et al. Wrist traction during MR arthrography improves detection of triangular fibrocartilage complex and intrinsic ligament tears and visibility of articular cartilage[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2016, 206 (1): 155-161.
- [40] Thomsen NOB, Besjakov J, Björkman A. Accuracy of pre- and postcontrast, 3 T indirect MR arthrography compared with wrist arthroscopy in the diagnosis of wrist ligament injuries[J]. *J Wrist Surg*, 2018, 7 (5): 382-388.
- [41] Luetkens KS, Laas SF, Haßler S, et al. Contrast-enhanced MRI of the wrist: Intravenous application of gadolinium improves diagnosis in ulnar-sided injuries of the TFCC[J]. *Eur J Radiol*, 2021, 143: 109901.
- [42] Rehnitz C, Klaan B, von Stillfried F, et al. Comparison of modern 3D and 2D mr imaging sequences of the wrist at 3 Tesla[J]. *Rofo*, 2016, 188 (8): 753-762. English.
- [43] Park HJ, Lee SY, Kang KA, et al. Comparison of two-dimensional fast spin echo T2 weighted sequences and three-dimensional volume isotropic T2 weighted fast spin echo (VISTA) MRI in the evaluation of triangular fibrocartilage of the wrist[J]. *Br J Radiol*, 2018, 91 (1084): 20170604.
- [44] 罗铎, 王浩东, 吴海燕, 等. MRI 3D-MERGE序列对三角纤维软骨复合体损伤的诊断价值[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22 (10): 147-149.
- [45] Götstrand S, Björkman A, Björkman-Burtscher IM, et al. Visualization of wrist ligaments with 3D and 2D magnetic resonance imaging at 3 Tesla[J]. *Acta Radiol*, 2022, 63 (3): 368-375.
- [46] Oh E, Yoon YC, Park MJ. Diagnostic performance of wrist magnetic resonance (MR) arthrography: comparison of three-dimensional isotropic T1 weighted fast spin-echo MR arthrography and two-dimensional MR arthrography[J]. *Br J Radiol*, 2017, 90 (1071): 20160867.
- [47] Huflage H, Luetkens KS, Kunz AS, et al. Improved diagnostic accuracy for ulnar-sided TFCC lesions with radial reformation of 3D sequences in wrist MR arthrography[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31 (12): 9399-9407.
- [48] Lenk S, Ludescher B, Martirosan P, et al. 3.0 T high-resolution MR imaging of carpal ligaments and TFCC[J]. *Rofo*, 2004, 176 (5): 664-667.
- [49] Regatte RR, Schweitzer ME. Ultra-high-field MRI of the musculoskeletal system at 7.0T[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2007, 25 (2): 262-269.
- [50] Götstrand S, Björkman A, Björkman-Burtscher IM, et al. Visualization of wrist anatomy—a comparison between 7T and 3T MRI[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32 (2): 1362-1370.
- [51] Guiot J, Vaidyanathan A, Deprez L, et al. A review in radiomics: Making personalized medicine a reality via routine imaging[J]. *Med Res Rev*, 2022, 42 (1): 426-440.
- [52] 滕佩宏, 张卜天, 杨慧敏, 等. 基于MRI影像组学模型识别三角纤维软骨复合体损伤[J]. *磁共振成像*, 2022, 13 (09): 58-62.
- [53] Lin KY, Li YT, Han JY, et al. Deep learning to detect triangular fibrocartilage complex injury in wrist MRI: retrospective study with internal and external validation[J]. *J Pers Med*, 2022, 12 (7): 1029.
- [54] Hammer N, Hirschfeld U, Strunz H, et al. Can the diagnostics of triangular fibrocartilage complex lesions be improved by MRI-based soft-tissue reconstruction? an imaging-based workup and case presentation[J]. *Biomed Res Int*, 2017, 2017: 5870875.
- [55] Fu J, Zhang H, Wei K, et al. Design and performance analysis of a dynamic magnetic resonance imaging-compatible device for triangular fibrocartilage complex injury diagnosis[J]. *J Healthc Eng*, 2022 Jun 16; 2022: 9688441.

(收稿日期: 2024-11-14)

(校对: 韩敏求 排版: 张鸿燊)