

综 述

fMRI在股骨头缺血性坏死早期诊断及中西医结合疗效评估的研究进展*

张海熠¹ 王欧成¹ 徐祖健²
尧 麒¹ 刘 勇^{1,*}1.西南医科大学附属中医医院磁共振科
(四川 泸州 646000)2.西南医科大学附属中医医院骨科
(四川 泸州 646000)

【摘要】股骨头缺血性坏死(osteonecrosis of the femoral head, ONFH)是发生在髋关节的较为常见的骨科疾病,对患者生活质量和身体健康造成极大的影响。早诊断、早治疗对疾病的预后至关重要。临床上X线、CT和MRI是检查和诊断股骨头坏死不可缺少的影像方法,其中MRI及其功能成像(fMRI)具有无创、无辐射、软组织分辨率高等优势,在股骨头缺血性坏死的早期诊断和治疗评估方面有着较好的应用价值和前景。本文选取磁共振功能成像(fMRI),包括扩散成像(DWI)、波谱成像(MRS)、灌注成像(PWI)和动态对比增强磁共振成像(DCE-MRI)在股骨头缺血性坏死的诊断和中西医结合治疗疗效评估的应用现状和进展进行综述。

【关键词】股骨头缺血性坏死;早期诊断;
磁共振成像;功能磁共振成像;
中西医结合治疗

【中图分类号】R681.8; R445.2

【文献标识码】A

【基金项目】四川省中医药管理局面上项目(2023MS510);
西南医科大学自然科学基金青年苗圃项目(2020XYLH-065)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.07.056

Research Advancements in fMRI for the Early Diagnosis of Avascular Necrosis of the Femoral Head and Assessment of the Therapeutic Efficacy of Chinese and Western Medicines*

ZHANG Hai-yi¹, WANG Ou-cheng¹, XU Zu-jian², YAO Qi¹, LIU Yong^{1,*}.

1.Department of Magnetic Resonance Imaging, The Affiliated Chinese Traditional Medicine Hospital, Southwest Medical University, Luzhou 646000, Sichuan Province, China

2.Department of Orthopedics, The Affiliated Chinese Traditional Medicine Hospital, Southwest Medical University, Luzhou 646000, Sichuan Province, China

ABSTRACT

Osteonecrosis of the femoral head (ONFH), a common orthopedic disorder arising in the hip joint, significantly impacts the patient's quality of life and physical well-being. Early diagnosis and treatment are of paramount importance for the prognosis of this disease. In clinical practice, X-ray, CT, and MRI are indispensable imaging modalities for the examination and diagnosis of femoral head necrosis. Among them, MRI and functional MRI (fMRI) boast the merits of non-invasiveness, zero radiation exposure, and high resolution of soft tissues, especially in the early diagnosis and treatment evaluation of ONFH, where they exhibit superior application value and prospects. This article reviews the application status and advancements of functional magnetic resonance imaging (fMRI), including diffusion-weighted imaging (DWI), magnetic resonance spectroscopy (MRS), perfusion weighted imaging (PWI), and dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging (DCE-MRI) in the diagnosis of ONFH and the combined application of traditional Chinese and Western medicine treatment.

Keywords: Osteonecrosis of the Femoral Head; Early Diagnosis; Magnetic Resonance Imaging; Functional Magnetic Resonance Imaging; Combined Chinese and Western Medicine Treatment

股骨头缺血性坏死(osteonecrosis of the femoral head, ONFH)是临床常见的一种由于多种病因引起的股骨头血液供应中断或受损,导致骨髓成分及骨细胞死亡并影响组织修复,股骨头结构改变、股骨头塌陷、关节功能障碍的骨科难治性疾病^[1-2]。该病分为创伤性和非创伤性两大类。创伤性ONFH主要继发于外伤所致的股骨颈骨折和髋关节脱位^[3];非创伤性ONFH则与使用大剂量糖皮质激素、酒精、髋臼发育不良等因素有关,但其病因依旧不明确^[4-5]。中医学上将其归为“骨痹”“骨蚀”范畴^[6]。该病的临床诊疗并无特异性实验室检查手段,诊断和评估主要依靠影像学检查。X线及CT在其临床上应用较普遍,但由于分辨率相对较低,在早期诊断的灵敏度上有所欠缺^[7]。MRI不仅可以清晰显示出股骨头病灶,还可以显示出更多软组织、骨髓或积液等信息,相较于CT和X线有更大的诊断优势,能在疾病的早期及时发现问题。MRI“双线征”也是目前对于ONFH早期诊断的“金标准”^[8]。随着医学的不断发展,临床对于诊断的特异性和灵敏度等方面要求提高,急需更早期的判断疾病甚至预测发病,这对影像学在ONFH的诊察提出挑战,fMRI技术(functional magnetic resonance imaging)由于其对早期ONFH的发现和评估的优势性,在疾病的诊断和预后中逐渐受到关注。本文选取fMRI技术包括扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI),灌注成像(perfusion weighted imaging, PWI),磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)和动态对比增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI)就fMRI在ONFH的诊断和中西医结合治疗评估的应用现状和进展进行综述。

1 ONFH的中西医诊断及治疗概述

临床上,ONFH好发于青壮年,男性多于女性^[9]。临床初步判断主要依靠腹股沟区疼痛,痛觉放射至同侧臀部或膝关节,间歇性并逐渐加重等症状。在本病诊断及治疗的评估标准中,影像学检查(包括X线、CT、MRI)是主要的衡量方法。目前,影像学分期主要采用Ficat在1980年提出、Froberg等人补充的0-IV期分法^[10]。临床上通常将I-II期称为早期,III-IV期称为中晚期。不同时期股骨头坏死其治疗方案有所不同^[11]。早期ONFH采用中医保守治疗方式当前已成为应对ONFH的主要手段,中医诊治主要有三证^[6]:(1)肝肾亏损证。患者髋关节疼痛,伴有头晕目眩,腰膝酸软,下肢无力,舌紫暗或红,苔薄白或苔少,脉弦细。(2)湿热内阻证。患者体型多肥胖,下肢沉重,舌胖大,边有齿痕,苔黄厚腻,脉弦滑数。(3)气滞血瘀证。患者多急躁易怒,肌肤甲错,胸胁胀痛,舌紫暗,舌下络脉迂曲青紫,苔薄白,脉沉弦涩。在中医药病机和治疗方面,本病主要病机考虑为本虚标实,致病原因为痰、虚、瘀三种,与肝、脾、肾三脏最为密切,应以活血化瘀为主要治疗手段,配合祛痰化湿、补益肝肾结合治疗^[9,12-13]。(1)肝肾亏损证,注重滋补肝肾,舒筋通络,方用左归丸或补血荣筋丸。(2)湿热内阻证,注重清热利湿,宣痹通络,方用白虎桂枝汤、宣痹汤。(3)气滞血瘀证,注重祛瘀生新,调畅气机,

【第一作者】张海熠,男,硕士研究生,主要研究方向:中西医结合影像学。E-mail: ronricardo@163.com

【通讯作者】刘 勇,女,主任医师,主要研究方向:CT与MRI诊断。E-mail: ly61607h@163.com

方用桃红四物汤加枳壳、香附、延胡索^[6,14]。中晚期ONFH通常直接进行髋关节置换手术治疗^[15,11]。ONFH严重时可见肢体短缩,行走困难或者跛行,造成髋关节不可逆的损伤或残疾,甚至会引起其他代谢性疾病^[16-17]。早发现、早诊断、早治疗是缓解ONFH的关键,可给患者预后及未来生活状况带来极大改善^[18]。同时,对于接受保髋治疗的患者,治疗后随访和评估对改善ONFH患者的生活状况,延缓病情进展也十分重要^[19]。

2 fMRI在ONFH早期诊断的应用

2.1 DWI的应用 DWI是一种由分子层面观察水分子的位移分布为原理来提供组织微观结构细节的成像技术^[20-21]。对其成像产生影响的主要有b值、T₂穿透效应及各向异性等因素。在ONFH的早期诊断和应用研究中,DWI技术成为重点方向之一。Jaramillo等学者^[22]的实验中提出,DWI观察下干骺端缺血的早期扩散受限,缺血时间变长后扩散增加。闵红巍^[23]在对ONFH的比格狗模型研究中发现,局部ADC值的升高对超早期股骨头坏死的诊断具有一定意义。同样的,不同分期ONFH患者与健康对照组的对比研究中发现了类似现象,相对正常组,ADC数值在各个分期的患者股骨头坏死区均明显升高,其研究证实了ADC值在ONFH各阶段诊断中均具有灵敏度^[24]。另一项研究在应用MR SE-EPI-DWI序列基础上^[25],增加了b值弥散梯度,以增高检查敏感性、降低实验误差,经计算得出的ONFH患者股骨头ADC均值仍然都大于对照组正常股骨头的ADC均值,图像显示股骨头病变区域清晰,利用此规律可以推测早期股骨头缺血性坏死特点,提供一定诊断价值。李可敬等^[26]对激素性相关ONFH患者病灶区的ADC值进行计算和随访,进一步为超早期ONFH的诊断收集明确证据,得出DWI可以在分子水平上反映骨髓信息,通过对骨髓病变进行定量分析为ONFH的早期诊断提供依据。

也有部分研究认为,ADC值与ONFH的相关性以及DWI在该病的诊断价值中依然存在争议。Oner等学者^[27]对比各阶段ONFH之后提出,虽然DWI能提供一定有价值的诊断信息,但并不能明确疾病分期,意义相对有限。Betul等研究者^[28]在晚期ONFH的病人模型中未发现扩散受限,认为相对于传统的MRI,DWI技术在疾病的诊断、预后方面并无显著优势。在DWI的疾病鉴别探究中,Dirk等^[29]通过病灶靶区ADC值,无法有效分辨短暂时骨髓水肿(transient bone marrow edema, TBME)、ONFH以及软骨下不全骨折(subchondral insufficiency fractures, SIF),在ONFH与其他疾病鉴别实践中的价值有待证实。因此,DWI在ONFH的早期诊断方面存在一定作用,DWI成像能显示股骨头病变区域扩散情况,ADC值的变化在一些具体研究中展现出了诊断和评估价值,但具体效果与诊断精确度仍需进一步明确。

2.2 MRS的价值 MRS是一种利用核磁共振现象和化学位移作用进行特定原子核及其化合物定量分析的方法,涉及多个领域^[30]。最初,MRS技术主要应用于造血的红骨髓。1995年Bluemke等^[31]开始将其用于黄骨髓的脂质和水含量来观测股骨头内环境的变化,由此开始逐渐有学者通过MRS技术观察骨髓的代谢变化,测定股骨头代谢物含量,用来提示骨质的病变,该技术可以一定程度上避免病理活检,使得无创性检查和研究ONFH成为可能。Hou等^[32]就提出利用氢质子MRS来预测ONFH发病概率,选取单侧ONFH患者的健侧股骨头以及正常人股骨头分别对照,有ONFH发病风险的患者中,即使患者股骨头无形态学变化,其脂质和水的光谱仍比正常人窄。闫思好^[33]收集健康青年人以及使用小剂量糖皮质激素的非ONFH患者行¹H-MRS得到前瞻性结论,MRS可以清晰的反映股骨头细微变化,正常组Lip1、Lip2、cho以及cr代谢物含量在一定区域存在空间和性别的差异,激素使用组的cho和cr等代谢物在不同区域之间存在差别;而在不同磁共振序列测值和两阶段平均变化率的测定和计算中,测定的各个代谢物数值都具有一定的相关性,综合测量对比数据可以推断,MRS可以在糖皮质激素使用超早期评估股骨头变化,一定程度上能起到应对激素性ONFH的效用。综合来看,MRS在ONFH的预测和病因研究中都起着较明显的进展,不仅可以成为诊断该疾病的有力工具,还能从化合物角度出发为ONFH病因研究提供助力,为早期诊断提供精准指导。

2.3 MR-PWI和DCE-MRI的ONFH分期和预测价值 MR-PWI是无创反映组织微血管分布和血流灌注情况的功能成像技术,包括动态对比增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI)、动态磁敏感对比成像(dynamic susceptibility contrast perfusion weighted imaging, DSC-PWI)和动脉自旋标记增强(arterial spin labeling, ASL)^[34]。ONFH的PWI研究中,进展迅速的是DCE-MRI技术,相对于常规增强序列,DCE-MRI序列能够动态观察微血管循环的病理生理状态,如今已成为骨骼和肌肉领域的一种重要检查方法^[35-36,46]。张海平等^[37]使用PWI技术探讨灌注参数和国际ARCO分期的相关性,发现对照组和各个分期的iAUC值除I期和IV期之外,两两都有差异;K^{trans}值之间同样存在不同,数值可以反映ONFH分期,近年也有学者证明上述结论^[37]。周泽旺等^[38]随后对60例患者进行定量研究同样证实了K^{trans}值和ONFH分期有相关性。闫燃等^[39-40]对动物及临床分别实验指出,ONFH患者的异常主要表现为MaxSR减小、TTP延迟、MTT延长,隋冰冰^[41]在对患者在不同时段行T2*-首过灌注,结论再次佐证了这一判断,并且不同数值可作为分期依据,可以在股骨头尚未坏死时做提前预测。在DCE-MRI领域,比较广泛应用于ONFH疾病发生风险的预测。在较早的动物实验验证中,DCE-MRI序列在预测方面就显现出了巨大潜力,Scott等^[42]在1992年关于犬类的ONFH动物模型对传统自旋回波、脂肪抑制序列(STIR)和DCE-MRI进行了对比,发现DCE-MRI在诊断敏感性上相对另外两种存在明显优势。牛金亮等^[43]前瞻性的评估使用激素治疗的风湿病患者ONFH发病风险,接受激素治疗但未发生股骨病变的高风险受检者骨髓MCI较正常对照组高,血流灌注在干骺端和股骨头fEmax明显减低。马伟丽等^[44]分别选取酒精性ONFH患者与正常人实施对照,DCE-MRI在负重区、中间区、非负重区fEmax、Emax、TTP值说明ONFH患者和高风险人群血流灌注较正常人低。近年有学者^[45]进一步将DCE-MRI的时间-信号曲线细化处理,在不同ROIs区域内提取曲线下面积、最大斜率、容积转移常数、容积速率常数、血管外细胞外间隙容积分数及信号强度峰值等参数进行TIC分型,坏死区TIC主要为流出型和其他型,修复区TIC主要为流入型和平台型,两者TIC的主要分型的不同,提示可能是预测ONFH证据之一,对ONFH的预防和超早期诊断提供新思路。

虽然fMRI多种技术在ONFH的早期诊断方面发挥了作用和优势,但仍需进一步发展和研究。PWI和DCE-MRI也存在样本量较少的制约条件,fMRI技术仍未达到临床广泛应用的要求,目前并不是ONFH的常规检查方法。然而,即使相关研究并不完善,对于ONFH患者的诊断以及病因的进一步探索与思考,fMRI都具有明显的优势和巨大的潜力。随着研究的逐渐深入和磁共振设备的不断更新,fMRI在ONFH的应用有望成为临床的常规检查手段,发挥预测疾病、早期诊断的优势,使存在ONFH风险的患者能够在疾病尚未完全发生时获得早期预警。

3 fMRI对ONFH中西医结合治疗疗效的评估

DWI在ONFH的中西医结合治疗效果评价中也有应用。周泽旺等^[47]使用复方生脉成骨胶囊治疗肾虚血瘀证ONFH的患者,由于该证型正虚为本,邪实为标,适合中医药补肾活血治法,复方生脉成骨胶囊利用桃红四物汤为基本方,活血补益并举,另加木豆叶起到散瘀解毒消肿的功效,期望通过中医药治法改变股骨头缺血的微循环障碍,推迟股骨头置换术的实施时间;配合IVIM-DWI技术进行疗效评估,通过IVIM-DWI技术比对应得出,配合中医药治疗的患者在f、FF值上有显著好转,仅用西医治疗方法的股骨头微循环灌注及脂肪含量并无明显改观,利用DWI技术在该疾病的评估中获得清晰的影像学依据,从而对中西医结合治疗的效果做出准确客观的评价,解决了中医药疗效可视化的实际问题。DWI和ADC值相结合对中西医结合治疗效果观察、评价提供一定的诊断依据。

除预测ONFH发病风险和进行早期诊断之外,DCE-MRI对疾病治疗后疗效评估也有重要意义。在ONFH的治疗过程中,成本低廉的中医药治疗是研究和临床应用的热点,特别是非创伤性发病率较高的肝肾亏虚证,周泽旺等^[48]依靠DCE-MRI技术对进行中医补肾活血治疗的ONFH患者进行评估,对于具有明确辨证分型

的患者,治疗方式主要通过中草药内服的方式整体调整,通过灌注成像测量治疗后患者的股骨头坏死区微循环灌注参数 K^{trans} 、 K_{ep} 值,理解“补肾活血”治法和微循环改变的内在联系,反映“活血化瘀,健骨止痛”的具体效果,从而依据参数量化中医药治疗,得到对中草药内服治疗方案的有效评价。在现代医学治疗方面,沙思雨等^[49]基于DCE-MRI的定量和半定量参数对接受ONFH介入治疗的患者进行分析后发现,DCE-MRI能通过数据对治疗后的血液灌注情况进行精确量化,且Harris评分变化可以通过 K^{trans} 、 K_{ep} 进行估算和推测,从而拥有评估介入治疗疗效的能力,更具全面性。MR灌注成像技术涉及的领域较为丰富,成果卓著,敏感度明显高于常规检查方式。

当前研究仍旧具有局限性,且样本量较少,在一定程度上制约了技术的发展应用,对于实现该技术的广泛应用还有很长的一段距离。通过fMRI不同技术能够证实中医药方药的治疗可行性,评估中西医结合治疗的效果;探究不同证型的ONFH在影像学上的区别,发挥学科桥梁作用,推进中医影像学诊断标准化进程。

4 小结与展望

综上,股骨头缺血坏死疾病的fMRI应用和研究具有很好的前景。本文中磁共振功能成像包括扩散加权成像、灌注成像、磁共振波谱和动态对比增强磁共振成像多角度分析ONFH,不仅能提早疾病诊断,为治疗争取时间,也能在治疗后更直观的观察患者疗效,为下一步制定治疗方案提供数据支持。

在近年来的临床治疗方面,无创安全的中医治疗被更多患者接受和使用。目前,MRS研究相对较少,中医药在治法方药上提倡辨证治疗,以调节人体整体阴阳平衡为目标,MRS能获取活体生物物质代谢情况,在科学可见的方式下评估人体阴阳寒热和疾病病机变化,能为中医临床诊疗的发展提供思路和方法。虽然该方式在中西医结合诊断和治疗ONFH方面具有巨大潜力,但是其学术探索较为缺乏,研究成果较少,未来该技术在ONFH上的应用仍需要进一步的研究和探讨。在未来,继续研究骨骼影像学中与中医诊治及病因病机之间的联系,发挥fMRI在微血管性状、微循环灌注、骨组织活性、骨代谢等临床实验和研究方面的优势,将会让现代科学技术为传统医学的发展提供动力。目前研究还存在以下不足:(1)患者样本量较少,不具有较强说服力;(2)多数使用单一磁共振序列研究,多模态磁共振结合不足,等待多序列探讨;(3)近期相关科研较少,需要进一步研究;(4)中西医结合研究尚不明确,中医仍需影像量化。基于上述不足而导致中西医结合及早期诊断标准的制定受限,但相信未来多模态MRI及多种影像学方法与传统中医药结合,能为中医药发展提供动力,并能预测或早期诊断疾病,及时获得有效的中西医结合治疗,达到中医从医者“不治已病治未病”的良好愿景。

参考文献

- [1]中国医师协会骨科医师分会骨循环与骨坏死专业委员会,中华医学会骨科分会骨显微修复学组,国际骨循环学会中国区.中国成人股骨头坏死临床诊疗指南(2020)[J].中华骨科杂志,2020,40(20):1365-1376.
- [2]SulTan AA,Khlopas A,surace P,et al.The use of non-vascularized bone grafts to treat osteonecrosis of the femoral head: indications, techniques, and outcomes[J].Int Orthop,2019,3(6):1315-1320.
- [3]王岩,马剑雄,董本超,等.创伤性股骨头坏死动物模型的研究进展[J].中国中西医结合外科杂志,2022,28(05):749-752.
- [4]Liu C,li W,zhang C,et al.Previously unexplored etiology for femoral head necrosis:Metagenomics detects no pathogens in necrotic femoral head tissue[J].World Journal of Clinical Cases,2022,10(7):2138-2146.
- [5]Yan z,Zhan j,Qi w,et al.The protective effect of luteolin in glucocorticoid-induced osteonecrosis of the femoral head [J].Front Pharmacol,2020,11:1195.
- [6]柴威涛,郭成龙,魏玉娇,等.中医药治疗股骨头坏死的研究概况[J].中医临床研究,2022,14(29):141-144.
- [7]Tristan P,Julien P,Thomas C,et al.T1-weighted MRI images accurately represent the volume and surface of architectural mineral damage of osteonecrosis of the femoral head: comparison with high-resolution computed tomography[J].Bone,2020,130(C).
- [8]Gao R Z,Ji W H,Xia T W,et al.Three-dimensional-printed titanium alloy porous scaffold combined with trans-cinnamaldehyde for repairing osteonecrosis of the femoral head in a dog model[J].American Journal of Translational Research,2020,12(3).
- [9]魏涛,邓凯文,曾勇,等.骨蚀方治疗股骨头坏死的药理学机制[J].西南医科大学学报,2022,45(5):436-440.
- [10]高天阳,王丰哲,潘诗农.影像学诊断发育性髋关节发育不良并发股骨头坏死进展

- [J].中国医学影像技术,2020,36(12):1911-1914.
- [11]魏秋实,何伟,张庆文,等.围绝期股骨头坏死不同影像学表现研究[J].中国修复重建外科杂志,2021,35(09):1105-1110.
- [12]刘源,刘金豹,许波,等.补肾活血汤治疗股骨头坏死的分子靶点及机制:网络药理学及蛋白模块分析[J].中国组织工程研究,2021,25(17):2703-2710.
- [13]魏鹏洲,张意桐,梁晖,等.中医辨证治疗股骨头无菌性坏死的研究进展[J].中国当代医药,2021,28(24):29-32,37.
- [14]牟虹霖,侯德才,魏波,等.基于筋骨并重理论中医内治法联合髓芯减压+人工骨植骨术治疗股骨头缺血性坏死[J].长春中医药大学学报,2020,36(02):402-405.
- [15]郭晓忠.早期股骨头坏死的相关研究:任重道远[J].中华骨与关节外科杂志,2022,15(06):401-403.
- [16]王毅.成人股骨头缺血性坏死患者临床症状、CT与MRI影像学表现特点分析[J].中国CT和MRI杂志,2021,19(9):176-179.
- [17]YUE J,GUO X,WANG R,et al.Preliminary report of the outcomes and indications of single approach,double-channel core decompression with structural bone support and bone grafting for osteonecrosis of the femoral head[J].BMC Musculoskeletal Disord,2022,23(1):198.
- [18]陈长军,赵鑫,罗月,等.股骨头坏死保头治疗现状及预后影响因素的研究进展[J].中华骨科杂志,2021,41(1):49-57.
- [19]张东伟.全髋关节置换术治疗股骨颈骨折内固定术后股骨头缺血性坏死的效果评估[J].基层医学论坛,2020,24(2):219-220.
- [20]张慧慧,都丽娜,伍建林.DCE-MRI与DWI直方图分析评估乳腺癌分子分型、预后和新辅助治疗的研究进展[J].国际医学放射学杂志,2023,46(01):66-70.
- [21]阳艳洁,张凯,张丽娜,等.MR扩散加权成像在软组织肿瘤中的应用进展[J].磁共振成像,2021,12(10):121-124.
- [22]Jaramillo D,Connolly S A,Vajapeyam Sridhar,et al.Normal and ischemic epiphysis of the femur:diffusion MR imaging study in piglets[J].Radiology,2003,227(3).
- [23]冈红巍.股骨头坏死超早期诊断的实验研究[D].北京:清华大学医学部,2009.
- [24]史永惠.成人股骨头缺血性坏死的综合影像学分期研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [25]董越,王琰,王绍武,等.MR弥散加权成像诊断股骨头坏死[J].中国医学影像技术,2012,28(02):352-355.
- [26]李可敬,曲晓峰.磁共振弥散成像对早期激素性股骨头坏死的诊断价值[J].中国现代药物应用,2011,5(13):51-52.
- [27]Öner A Y,Levent A,Sergin A,et al.Staging of hip avascular necrosis: is there a need for DWI?[J].Acta Radiologica,2011,52(1).
- [28]Duran O B,Deniz O,Fuat O,et al.Diffusion-weighted magnetic resonance imaging of femoral head osteonecrosis in two groups of patients: legg-perthes-calve and avascular necrosis[J].La Radiologia medica,2016,121(3).
- [29]MUELLER D,SCHAEFFELER C,BAUM T,et al.Magnetic resonance perfusion and diffusion imaging characteristics of transient bone marrow edema,avascular necrosis and subchondral insufficiency fractures of the proximal femur[J].European Journal of Radiology,2014,83(10).
- [30]付玉婷,刘勇.弥散张量成像在脑小血管病伴抑郁中的应用研究[J].中国CT和MRI杂志,2023,21(4):171-173.
- [31]Blueumke D A,Petri M,Zerhouni E A.Femoral head perfusion and composition:MR imaging and spectroscopic evaluation of patients with systemic lupus erythematosus and at risk for avascular necrosis[J].Radiology,1995,197(2).
- [32]Hou CH,Shih TT F,Liu CY,et al.Proton MR spectroscopy of the femoral head—evaluation of patients at risk for avascular necrosis. [J].J Magn Reson Imaging,2006,24(2).
- [33]闫思好.多模态影像学观察激素使用早期患者股骨头变化[D].成都:成都医学院,2020.
- [34]喻黎,欧阳林.MR灌注加权成像评估创伤性脑损伤血脑屏障改变研究进展[J].中国医学影像技术,2020,36(10):1575-1578.
- [35]杨俊忠,胡浩,李佳实,等.DCE-MRI参数对股骨颈骨折术后股骨头坏死的评估[J].影像科学与光化学,2022,40(5):1143-1147.
- [36]陈绍宁,魏冰.动态对比增强磁共振成像与股骨头坏死患者病程进展关系及疗效评估价值[J].广东医学,2022,43(2):226-230.
- [37]张海平,敖国昆,袁小东,等.股骨头坏死磁共振灌注参数与ARCO分期的相关性[J].中国医学影像学杂志,2016,24(4):316-320.
- [38]周泽旺,冷西,曾道辉,等.IVIM-DWI与定量DCE-MRI对股骨头坏死微循环的评价及与ARCO分期的相关性[J].临床放射学杂志,2022,41(2):303-308.
- [39]闫燃,张雪哲.皮质类固醇致股骨头缺血性坏死的磁共振成像早期改变的实验研究[J].中日友好医院学报,2007(1):28-31,36,65.
- [40]闫燃,张雪哲.磁共振灌注成像诊断在股骨头缺血性坏死的初步应用[J].中华医学杂志,2008(16):1107-1110.
- [41]隋冰冰.T2*首过灌注MRI对早期股骨头缺血性坏死的临床研究[J].中国现代医药杂志,2012,14(12):106-107.
- [42]Nadel S N,Debatin J F,Richardson W J,et al.Detection of acute avascular necrosis of the femoral head in dogs:dynamic contrast-enhanced MR imaging vs spin-echo and STIR sequences[J].AJR.American Journal of Roentgenology,1992,159(6).
- [43]牛金亮,王峻,李文晋,等.激素治疗风湿病患者股骨头坏死风险评估的MRI研究[J].中国医学影像学杂志,2012,20(1):5-8.
- [44]马伟丽,赵德伟,王本杰,等.DCE-MRI对高危坏死股骨头微循环灌注的评价[J].磁共振,2023,27(36):5864-5869.
- [45]环大维,袁兆丰,樊维强,等.动态对比增强核磁评价股骨头坏死微循环灌注的改变[J].中国组织工程研究,2023,27(36):5864-5869.
- [46]Daugaard Cecilie L,Riis Robert GC,Bandak Elisabeth,et al.Perfusion in bone marrow lesions assessed on DCE-MRI and its association with pain in knee osteoarthritis:a cross-sectional study[J].Skeletal radiology,2020,49(5).
- [47]周泽旺,陈雷雷,叶秋丰,等.磁共振功能成像对复方生脉胶囊治疗肾虚血瘀型早期激素性股骨头坏死的评价分析[J].河北中医,2021,43(05):777-780.
- [48]周泽旺,李巧,李健萍.磁共振功能成像评价补肾活血中药治疗早期激素性股骨头坏死微循环变化的研究[J].影像研究与医学应用,2021,5(05):57-58.
- [49]沙思宇,许祖闪,侯红军,等.DCE-MRI评估早期股骨头缺血性坏死介入治疗疗效的研究[J].医学影像学杂志,2021,31(02):322-326.

(收稿日期:2023-07-07)

(校对编辑:孙晓晴)