

综述

定量磁共振评估骨质疏松症研究进展

关丽荣¹ 徐 成^{2,*}

1.山西医科大学医学影像学院

(山西 太原 030001)

2.山西省人民医院磁共振室

(山西 太原 030012)

【摘要】骨质疏松症是骨折的主要危险因素，除了骨矿化成分之外，骨微结构及微环境的变化对骨的完整性同样重要。常规MRI测得的信号强度比可用于脊柱手术患者的骨质疏松筛查，使用超短回波时间磁共振成像可以定量评估骨孔隙度、胶原基质、骨的矿化成分等，利用水脂分离技术能测量骨髓脂肪含量、组成以及T2*值，体素内不相干运动技术反映骨髓灌注情况，人工智能技术如纹理分析及深度学习进一步发展了MRI技术，本文总结了近期使用磁共振方法评估骨质疏松症的研究进展。

【关键词】骨质疏松症；MRI；超短回波时间序列；骨髓脂肪；信号强度；骨密度；人工智能

【中图分类号】R445.2

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.08.058

Research Progress in Quantitative Evaluation of Osteoporosis by Magnetic Resonance Imaging

GUAN Li-rong¹, XU Cheng^{2,*}.

1.School of Medical Imaging, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

2.Department of MRI, Shanxi Provincial People's Hospital, Taiyuan 030012, Shanxi Province, China

ABSTRACT

Osteoporosis is a major risk factor for fracture. In addition to bone mineralization, changes in bone microstructure and bone microenvironment are also important for bone integrity. The signal intensity ratio measured by conventional MRI can be used for the screening of osteoporosis in patients undergoing spinal surgery. Ultrashort echo time MRI can be used to quantitatively evaluate bone porosity, collagen matrix, and mineralization grade of bone, and water-lipid separation technology can be used to measure bone marrow fat content, composition, and T2* value. Intravoxel incoherent motion imaging reflects bone marrow perfusion. Artificial intelligence techniques such as texture analysis and deep learning have further developed MRI techniques. This paper summarizes recent advances in the use of MRI methods to evaluate osteoporosis.

Keywords: Osteoporosis; MRI; Ultrashort Echo Time; Bone Marrow Fat; Signal Strength; Bone Density; Artificial Intelligence

骨质疏松症(osteoporosis, OP)是一种全身系统性代谢性的骨骼疾病，主要和骨量减少、骨微结构破坏有关，易发生骨折。OP可以分为两大类，原发性以及继发性，前者包括发生在儿童、青少年的特发性骨质疏松症、绝经后骨质疏松症及老年人的退行性骨质疏松症，后者为疾病或药物导致的结果，占全部OP的不到5%。OP发生的非常隐匿，在首次骨折发生之前通常没有症状，治疗不及时和骨折严重影响患者的生活质量，甚至威胁生命。因此，在骨折之前及时检出和监测骨强度的变化对于OP患者至关重要。临床上常用双能X线吸收测定仪(dual energy X-ray absorptiometry, DXA)量化腰椎和髋关节的骨密度(bone mineral density, BMD)诊断OP，但是由于骨赘的存在，可能会存在偏差。骨强度是骨密度和骨质量的综合反映，骨微结构及骨微环境的变化对骨的完整性同样重要。

骨是由65%的无机基质(主要是羟基磷灰石钙晶体)和35%的有机基质(胶原蛋白、蛋白聚糖等)组成。无机基质提供硬度和刚度，有机基质是可变形的，从而为组织提供抗拉强度。由于这两种材料的结合，骨组织同时具有可变形性和刚度。骨组织是由皮质骨和小梁骨组成，皮质骨覆盖整个骨表面，更加致密，在压缩时起作用，小梁骨是由相互连接的小梁杆和板组成的复杂三维网络，负责组织抵抗负载力。骨组织中存在骨孔隙，骨小梁部位的孔隙很大，大多数皮质骨孔隙很小(小于100 μ m)，因此皮质骨孔隙定量测量存在难度。另一方面，骨髓是由造血组织岛和脂肪细胞的混合组成，周围环绕着血管窦，分布在骨小梁骨孔隙中。定量MRI技术已经出现，以量化病理中骨微结构及骨髓中水、脂肪组成，细胞和灌注的变化，并帮助了解骨微环境在骨质疏松症中的作用。

1 常规MRI技术

常规MRI图像可检测隐匿性骨折，还可以分析骨折的原因，提供多样的信息^[1-2]。常规T₁WI图像的定性评估被认为是临床实践中骨骼评估的关键，主要应用于骨盆、髋关节和脊柱。Bandirali等人^[3]引入了基于T₁WI中L1-L4椎体的平均信噪比，称M-score，M-score机理是OP患者骨髓脂肪增加，T₁WI表现为更高的信号强度(signal intensity, SI)，因此，M-score有助于评估OP患者骨髓脂肪变化。Ehresman等人^[4]进一步改进了M-score，提出了椎体骨质量(vertebral bone quality, VBQ)评分，将VBQ评分设置为相对指标，可消除不同个体的差异，可以在来自不同制造商的多个MR系统中推广^[4]。在脊柱手术患者中，OP虽然很常见，但由于诊断的缺陷会漏诊，同时骨质量下降与术后的后遗症和并发症有关。VBQ评分可以用于脊柱手术患者的OP筛查^[5-6]，VBQ评分<3.05基本上排除了OP^[6]，对OP及脆性骨折的诊断能力总体上优于DXA^[7]。Kadri等人提出单层VBQ评分，即L1椎体与L1脑脊液SI的比值，是术前评估骨骼更快捷的方式^[5]。VBQ评分提供了一种可以快速评估骨质量的新型评分，基于VBQ评分计算骨髓脂肪的主要误差源于部分容积效应和阈值选择，未来需要进一步扩大研究人群，并研究其在临床上的效用。

2 UTE

2.1 技术原理 常规MRI技术擅长对肌肉、骨髓等软组织成像。由于皮质骨、肌腱及韧带等短T2组织的信号快速衰减，常规MRI图像上显示不佳，表现为低或无信号。而UTE序列在脉冲发出后就开始采集信号，极大缩短了TE时间，既保持了常规MRI相当的信噪比，又

【第一作者】关丽荣，女，硕士在读，主要研究方向：骨骼肌肉影像学。E-mail: guanlirong@163.com

【通讯作者】徐 成，男，主任医师，主要研究方向：功能磁共振。E-mail: xucheng0509@163.com

实现了体内短T2组织的直接成像。为了更好地显示短T2组织,需要抑制周围的长T2组织信号,因此在常规UTE的基础上又衍生了一些序列,预饱和技术、反转脉冲抑制长T2组织技术、双回波脉冲序列等。UTE成像使短T2组织的直接成像及定量测量成为可能。

2.2 UTE技术在OP中的应用 骨中的水赋予骨骼粘弹性,它的定量可以提供骨机械性能的信息,以不同的形式分布:与有机物(如胶原基质)结合的结合水(bound water, BW),可间接反映类骨质的状态;以游离状态存在于骨孔隙中的孔隙水(pore water, PW),可反映骨孔隙度。当OP发生时,类骨质的丢失导致BW(短T2组织)减少,孔隙增大使PW(稍长T2组织)增多,因此分离这两种水能更好地预测OP。

双组分分析可以区分、评估骨结合水和游离水,除了水成分外,人类骨组织中还含有大量脂肪成分影响MRI信号,包含脂肪含量的三组分拟合方法使得测量更准确^[8],然而,三组分分析又需要更长的扫描时间,难以应用于临床。抑制比(suppression ratio, SR)和孔隙度指数(porosity index, PI)是最近开发的基于UTE的快速骨骼评估的指标^[9-10],它们利用长T2组织抑制序列计算出信号强度比,可以间接测量皮质骨孔隙度。Li等人发现皮质骨孔隙度随年龄增长而增加,这可能是老年人骨强度受损的原因之一^[11]。骨骼强度主要取决于骨骼结构和亚体素的材料属性,研究^[11-13]显示骨孔隙度与骨的硬度具有良好的相关性,可用于补充当前的骨折评估系统。Jerban等人利用UTE结合磁化传递(UTE magnetization transfer, UTE-MT)成像测量大分子质子分数(macromolecules fraction, MMF),准确测量皮质内骨孔隙,远超过高分辨率 μ CT^[14]。UTE-MT可以摒除掉组织纤维取向与主磁场方向的夹角产生的魔角效应,对肌腱成像,可以测量由OP引起的肌腱破坏^[15]。小梁骨比皮质骨代谢更活跃,可用来检测早期骨质流失,Ma等人^[16]发现短TR/TI组合的反转脉冲技术可以充分抑制小梁骨内所有的长T2组织,包括骨髓脂肪和PW,该新技术可以选择性地对小梁骨内的胶原蛋白结合水(collagen bound water, CBW)成像,骨胶原基质通过赋予骨拉伸强度和弹性,可以从另一方面评估骨折风险^[17]。Liu等人研究了人体腰椎小梁骨的各种MRI成分,包括结合水质子分数、孔隙水质子分数、总水质子分数,有望在临床实践中对小梁骨健康进行综合评估^[18]。最近Jones等人利用固态磁共振¹H UTE和³¹P零回波时间序列扫描绝经后妇女的皮质骨,发现OP过程中骨孔隙度增大、骨皮质厚度变薄,骨的磷密度等矿物质含量减少,早期发现骨的潜在损伤^[19],周浪等人的研究也发现固态磁共振成像对检测骨的潜在损伤有一定作用^[20]。利用UTE技术可以清楚地显示骨皮质的形态结构,还能先于形态结构定量测量骨的孔隙度和胶原蛋白等生化成分的微变化,用于早期评估OP及骨折风险,然而UTE技术通常扫描时间长,临床操作难度大,需要更多的研究来实现快速、准确的扫描方式。

3 磁共振波谱与化学位移编码-MRI

3.1 技术原理 MRS是一种单体素方法,不仅可以评估体素中的脂肪量,还可以评估脂肪成分,但它成像范围小,而且非常耗时,在临床上应用不广泛。化学位移编码-MRI(Chemical Shift Encoding-MRI, CSE-MRI)是一种水脂分离技术,利用水和脂肪氢质子进动频率的差异,在同反相位采集两个回波信号进行计算,从而将水信号和脂肪信号分离。要精确定量脂肪需要克服磁场不均匀性,可以利用质子密度脂肪分数(proton-density fat fraction, PDFF)对脂肪进行定量,同时也能利用T2*评估骨微环境磁化率变化,该技术应用在不同的厂家有不同的名称,包括GE的IDEAL、飞利浦的mDIXON-Quant以及西门子的Q-Dixon。

3.2 MRS与CSE-MRI在OP中的应用 骨髓脂肪组织是骨髓中的“空间填充物”,它是一种独特的脂肪库,具有与其他脂肪库不同的特性和功能,并且对骨量和骨质量起着动态作用。在骨髓内,成骨细胞和脂肪细胞来源于一个共同的间充质干细胞,当发生OP时,间充质干细胞向脂肪细胞而不是成骨细胞分化,从而导致骨微结构破坏,骨髓脂肪增加,还有通过自分泌和旁分泌的因素对骨转换的潜在影响,如骨髓脂肪细胞合成的脂联素积极调节骨重塑。PDFF可以精确地对脂肪进行定量^[21-22],研究表明,

PDFF与BMD呈负相关,可以区分OP患者与健康受试者^[23],即使在纠正年龄差异以及BMD的骨髓脂肪含量差异之后也是如此^[24]。Gassert等人发现PDFF可以区分有或无骨质疏松性椎体骨折(osteoporotic vertebral fracture, OVf)^[25],Leonhardt等人发现在T2*和BMD未出现显著变化前,OVf患者的PDFF的纵向变化更大,表明PDFF是识别骨折风险敏感的生物标志物^[26]。骨髓脂肪组成也会影响骨骼健康,骨髓脂肪中的饱和脂肪酸越多,越容易发生OP和骨折^[27-28]。Mattioli等人利用MRS测量女性跟骨的脂肪组成,发现不饱和脂肪酸中单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸存在不平衡,多不饱和脂肪酸分数(polyunsaturated fatty acids fraction, fPUFA)在绝经后、OP患者中增加,有利于开展OP患者的营养调节^[29]。这些关于脂质组成的初步发现表明,骨髓脂肪的不同成分与骨骼健康有着不同的关联,还需要大量研究明确其对骨骼的影响。此外,肌肉和骨骼在生物力学和生化方面是相互关联的,目前公认OP涉及整个肌肉骨骼系统。利用CSE-MRI可同时评估OP患者椎旁肌肉的情况,多项研究显示椎旁肌肉的PDFF值与椎体的BMD呈负相关^[30-31],骨量异常患者椎旁肌肉的横截面积在6个月内纵向显著下降^[32]。CSE-MRI的另一个生物标志物R2*值常用来评估T2*值($R2^*=1/T2^*$),由于OP患者小梁间隙扩大、小梁-骨髓界面减少、红骨髓脂肪转化,导致磁化率变化,从而导致T2*弛豫时间的变化。研究发现T2*与BMD和小梁骨参数密切相关^[33-35],可用于评估小梁骨微观结构。Leonhardt等人^[34]、Schmeel等人^[36]发现T2*可以深入了解椎体骨折的原因(即骨质疏松性、创伤性、恶性)。一项研究进一步发现,PDFF与T2*值相结合,可以提高骨量减少和OP的鉴别能力^[37]。T2*与BMD相关性较弱,不足以作为单独的临床诊断指标,它可以作为PDFF和BMD的补充参数,用于OP的定量评估^[38]。

4 IVIM

体素内不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)是DWI技术的延伸,通过减少相位编码方向FOV及减少单次激发平面回波成像所需的读出持续时间能输出更好的扩散成像,它使用多个b值和双指数信号模型计算定量参数,伪灌注分数(f)和伪扩散系数(D*)代表了灌注的特征,而扩散系数(D)则反映了与组织细胞度有关的水分子的真实弥散运动。基础研究报道了髓内血管在OP进展中的重要作用,并评估了OP的治疗反应^[39]。IVIM技术可以定量获得的骨髓水分子扩散运动和灌注特征,D值随着BMD的降低而减小,原因可能是脂肪疏水使水分子的真实扩散运动受到显著限制,D值可能反映了随着BMD的丢失脂肪含量的增加^[40-41]。最近一项研究发现D*可能是OVf患者椎体塌陷和不愈合的定量预测因子,OVf引起的动脉损伤导致灌注减低被认为是骨不愈合的机制之一,这可以帮助判断OVf患者保守治疗后的预后以及是否需要早期手术干预^[42]。

5 人工智能

与人工智能结合的后处理技术比如纹理分析、机器学习最近也被应用于骨组织的研究。纹理分析利用与图像对比度相关的像素信息和空间分布特点,量化纹理参数,反映组织的异质性,主要用于骨微结构分析。利用T1WI分析小梁骨纹理可以发现肉眼看不到的骨骼塌陷、骨小梁微结构的异常,骨异质性大的受试者BMD低、骨小梁微结构差^[43]。从常规MRI中提取的纹理特征能够预测骨折,与对照组相比,有脆性骨折的女性对比度和熵更高,均匀性更低^[44]。机器学习模拟人脑进行分析学习以及解释数据,卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)是最常用的深度学习网络,Yabu等人用CNN检测磁共振图像上的新发的OVf,模型的诊断能力可与两名经验丰富的脊柱外科医生相媲美^[45]。Takahashi等人比较了三种机器学习模型,发现随机森林(random forest, RF)可以早期预测OVf不愈合的情况^[46]。由于手动分割在临床上既费力又不切实际,Jones等人利用深度学习在UTE图像上可以快速准确地自动分割皮质骨的孔隙度及几何形状,UTE成像时间过长,可以利用深度学习减少扫描时间^[47]。人工智能加强了MRI序列的潜在用途,能够提取与骨骼脆性和骨质流

失相关的参数,获取某些未知的组织学特征。

6 小 结

OP发生非常隐匿,随着病情进展容易并发骨折,所以早期诊断和监测OP的进展及预防脆性骨折是必要的。常规图像上的VBQ评分可以提高OP的筛查率,UTE可以显示骨皮质的形态结构,评估骨孔隙度、胶原蛋白等,利用CSE-MRI可以对骨骼中的脂肪含量进行高精度测量,T2*评估OP过程中的磁化率变化,IVIM可发现骨髓内水分子弥散和灌注变化,早期预测骨折不愈合的情况,当前的成像技术与人工智能相结合,能全面了解OP情况下骨组织中发生的细微变化。MRI特异性问题包括非标准硬件(如线圈)和方法、成本高、成像时间长和复杂的后处理,导致小规模的研究难以推广到大量人群,定量MRI标志物缺乏标准化。然而MRI可以检测OP患者的骨微结构和骨髓生理病理变化,作为一种可行性选择,为OP患者提供更早期、更全面的肌肉骨骼健康有价值的信息。

参考文献

- [1]李俊,胡清华,方民杰.对比分析MRI与MSCT对膝关节隐匿性骨折的诊断价值[J].罕少疾病杂志,2024,31(07):117-118.
- [2]刘再义,范祖平,尹增辉,等.低场磁共振对膝关节隐匿性骨折诊断价值的探讨[J].罕少疾病杂志,2011,18(03):46-48.
- [3]Bandirali M,Di Leo G,Papini GD,et al.A new diagnostic score to detect osteoporosis in patients undergoing lumbar spine MRI[J].Eur Radiol,2015,25(10):2951-2959.
- [4]Ehresman J,Pennington Z,Schilling A,et al.Novel MRI-based score for assessment of bone density in operative spine patients.[J].Spine J,2020,20(4):556-562.
- [5]Kadri A,Binkley N,Hernando D,et al.Opportunistic use of lumbar magnetic resonance imaging for osteoporosis screening[J].Osteoporos Int,2022,33(4):861-869.
- [6]Pu M,Zhong W,Heng H,et al.Vertebrae bone quality score provides preoperative bone density assessment for patients undergoing lumbar spine surgery:a retrospective study[J].J Neurosurg Spine,2023:1-10.
- [7]Ehresman J,Schilling A,Yang X,et al.Vertebrae bone quality score predicts fragility fractures independently of bone mineral density[J].Spine J,2021,21(1):20-27.
- [8]Lu X,Jerban S,Wan L,et al.Three-dimensional ultrashort echo time imaging with tricomponent analysis for human cortical bone[J].Magn Reson Med,2019,82(1):348-355.
- [9]Li C,Seifert A C,Rad H S,et al.Cortical bone water concentration:dependence of MR imaging measures on age and pore volume fraction[J].Radiology,2014,272(3):796-806.
- [10]Rajapakse CS,Bashoor-Zadeh M,Li C,et al.Volumetric cortical bone porosity assessment with MR imaging:validation and clinical feasibility[J].Radiology,2015,276(2):526-535.
- [11]Li Cheng,Seifert Alan C,Rad Hamidreza Saligheh,et al.Cortical bone water concentration:dependence of mr imaging measures on age and pore volume fraction[J].Radiology,2016,280(2):653.
- [12]Jones BC,Jia S,Lee H,et al.MRI-derived porosity index is associated with whole-bone stiffness and mineral density in human cadaveric femora[J].Bone,2021,143:115774.
- [13]Jerban S,Ma Y,Alenezi S,et al.Ultrashort echo time (UTE) MRI porosity index (PI) and suppression ratio (SR) correlate with the cortical bone microstructural and mechanical properties:Ex vivo study[J].Bone,2023,169:116676.
- [14]Jerban S,Ma Y,Wong J H,et al.Ultrashort echo time magnetic resonance imaging (UTE-MRI) of cortical bone correlates well with histomorphometric assessment of bone microstructure[J].Bone,2019,123:8-17.
- [15]Jerban S,Ma Y,Afsahi A M,et al.Lower macromolecular content in tendons of female patients with osteoporosis versus patients with osteopenia detected by ultrashort echo time (UTE) MRI[J].Diagnostics (Basel),2022,12(5):1061.
- [16]Ma Y J,Chen Y,Li L,et al.Trabecular bone imaging using a 3D adiabatic inversion recovery prepared ultrashort TE cones sequence at 3T[J].Magn Reson Med,2020,83(5):1640-1651.
- [17]Liu J,Liao J W,Li W,et al.Assessment of osteoporosis in lumbar spine:in vivo quantitative MR imaging of collagen bound water in trabecular bone[J].Front Endocrinol (Lausanne),2022,13:801930.
- [18]Liu J,Chen J D,Li P,et al.Comprehensive assessment of osteoporosis in lumbar spine using compositional MR imaging of trabecular bone[J].Eur Radiol,2022.
- [19]Jones B C,Lee H,Cheng C C,et al.MRI quantification of cortical bone porosity,mineralization,and morphologic structure in postmenopausal osteoporosis[J].Radiology,2023:221810.
- [20]周浪,孙斯琴,谢家骥,等.绝经后骨质疏松症皮质骨孔率、矿化及形态的MRI定量研究[J].中国CT和MRI杂志,2024,22(4):157-159.
- [21]Hernando D,Kramer J H,Reeder S B,et al.Multipeak fat-corrected complex R2* relaxometry:theory,optimization,and clinical validation[J].Magn Reson Med,2013,70(5):1319-1331.
- [22]Shan B,Ding H,Lin Q,et al.Repeatability and image quality of IDEAL-IQ in human lumbar vertebrae for fat and iron quantification

- across acquisition parameters[J].Comput Math Methods Med,2022:2229160.
- [23]Chang F X,Fan D H,Huang G,et al.Lumbar spine bone mineral density measurement:comparison of dual-energy X-ray absorptiometry and fat content evaluation by dixon chemical shift MRI[J].Int J Gen Med,2022,15:6415-6424.
- [24]Cheng X g,Li K,Zhang Y,et al.The accurate relationship between spine bone density and bone marrow in humans[J].Bone,2020,134:115312.
- [25]Gassert F T,Kufner A,Gassert F G,et al.MR-based proton density fat fraction (PDFF) of the vertebral bone marrow differentiates between patients with and without osteoporotic vertebral fractures[J].Osteoporos Int,2022,33(2):487-496.
- [26]Leonhardt Y,Ketschau J,Ruschke S,et al.Associations of incidental vertebral fractures and longitudinal changes of MR-based proton density fat fraction and T2* measurements of vertebral bone marrow[J].Front Endocrinol (Lausanne),2022,13:1046547.
- [27]Chang F X,Fan D H,Huang G,et al.Lumbar spine bone mineral density measurement:comparison of dual-energy X-ray absorptiometry and fat content evaluation by dixon chemical shift MRI[J].Int J Gen Med,2022,15:6415-6424.
- [28]Cheng X g,Li K,Zhang Y,et al.The accurate relationship between spine bone density and bone marrow in humans[J].Bone,2020,134:115312.
- [29]Gassert F T,Kufner A,Gassert F G,et al.MR-based proton density fat fraction (PDFF) of the vertebral bone marrow differentiates between patients with and without osteoporotic vertebral fractures[J].Osteoporos Int,2022,33(2):487-496.
- [30]Yang Q,Yan D,Wang L,et al.Muscle fat infiltration but not muscle cross-sectional area is independently associated with bone mineral density at the lumbar spine[J].Br J Radiol,2022,95:20210371.
- [31]Han G,Zou D,Liu Z,et al.Paraspinal muscle characteristics on MRI in degenerative lumbar spine with normal bone density,osteopenia and osteoporosis:a case-control study[J].BMC Musculoskelet Disord,2022,23(1):73.
- [32]Gassert F T,Glanz L,Boehm C,et al.Associations between bone mineral density and longitudinal changes of vertebral bone marrow and paraspinal muscle composition assessed using MR-based proton density fat fraction and T2* maps in patients with and without osteoporosis[J].Diagnostics (Basel),2022,12(10):2467.
- [33]Wu H Z,Zhang X F,Han S M,et al.Correlation of bone mineral density with MRI T2* values in quantitative analysis of lumbar osteoporosis[J].Arch Osteoporos,2020,15(1):18.
- [34]Leonhardt Y,Gassert F T,Feuerriegel G,et al.Vertebrae bone marrow T2* mapping using chemical shift encoding-based water-fat separation in the quantitative analysis of lumbar osteoporosis and osteoporotic fractures[J].Quant Imaging Med Surg,2021,11(8):3715-3725.
- [35]周翠伽,胡秋根,陈海雄,等.MR Dixon、T2mapping、T2*-mapping技术定量评估腰椎原发性骨质疏松症的可行性研究[J].中国CT和MRI杂志,2021,19(9):157-160,179.
- [36]Schmeel F C,Luetkens J A,FeiBt A,et al.Quantitative evaluation of T2* relaxation times for the differentiation of acute benign and malignant vertebral body fractures[J].Eur J Radiol,2018,108:59-65.
- [37]Li G,Xu Z,Li X,et al.Adding marrow R2 to proton density fat fraction improves the discrimination of osteopenia and osteoporosis in postmenopausal women assessed with 3D FACT sequence[J].Menopause,2021,28(7):800-806.
- [38]Liu Z,Huang D,Jiang Y,et al.Correlation of R2* with fat fraction and bone mineral density and its role in quantitative assessment of osteoporosis[J].Eur Radiol,2023.
- [39]Liu X,Tu Y,Zhang L,et al.Prolyl hydroxylase inhibitors protect from the bone loss in ovariectomy rats by increasing bone vascularity[J].Cell Biochem Biophys,2014,69(1):141-149.
- [40]Yang H,Cui X,Zheng X,et al.Preliminary quantitative analysis of vertebral microenvironment changes in type 2 diabetes mellitus using FOCUS IVIM-DWI and IDEAL-IQ sequences[J].Magn Reson Imaging,2021,84:84-91.
- [41]Li X w,Lu R,Xie Y x,et al.Identification of abnormal BMD and osteoporosis in postmenopausal women with T2*-corrected Q-Dixon and reduced-FOV IVIM:correlation with QCT.Eur Radiol,2022,32(7):4707-4717.
- [42]Ogon I,Takebayashi T,Takashima H,et al.Intravoxel Incoherent motion factors affecting collapse and nonunion of osteoporotic vertebral fracture[J].Global Spine J,2023:21925682231167788.
- [43]Heilbronner A K,Koff M F,Breighner R,et al.Opportunistic evaluation of trabecular bone texture by MRI reflects bone mineral density and microarchitecture[J].J Clin Endocrinol Metab,2023.
- [44]Zaworski C,Cheah J,Koff M F,et al.MRI-based texture analysis of trabecular bone for opportunistic screening of skeletal fragility[J].J Clin Endocrinol Metab,2021,106(8):2233-2241.
- [45]Yabu A,Hoshino M,Tabuchi H,et al.Using artificial intelligence to diagnose fresh osteoporotic vertebral fractures on magnetic resonance images[J].Spine J,2021,21(10):1652-1658.
- [46]Takahashi S,Terai H,Hoshino M,et al.Machine-learning-based approach for nonunion prediction following osteoporotic vertebral fractures[J].Eur Spine J,2022.
- [47]Jones B C,Wehrli F W,Kamona N,et al.Automated,calibration-free quantification of cortical bone porosity and geometry in postmenopausal osteoporosis from ultrashort echo time MRI and deep learning[J].Bone,2023:116743.

(收稿日期:2023-09-04)

(校对编辑:姚丽娜)