论著

绝经后骨质疏松症皮质 骨孔率、矿化及形态的 MRI定量研究*

周 浪 孙斯琴 谢家骥 郭 威*

武汉市第三医院放射科 (湖北 武汉 430060)

【摘要】目的探讨绝经后骨质疏松症 (osteoporosis, OP)患者皮质骨孔率、形态结构、 矿化和类骨质密度MRI指标是否受到影响,并探讨 MRI指标与绝经后妇女骨密度(BMD)的关系。方法 回顾性分析本院于2021年6月到2023年6月期间收 治的30名OP患者和38名非OP患者的临床资料。在 1.5T时,对皮质骨孔率(孔隙水和总水)、类骨质密 度(结合水[BW])、形态结构(皮质骨厚度)和矿化(磷 [P]密度[³¹P]和³¹P/BW浓度比)进行量化,比较OP组 和非OP组之间的MRI测量结果,并评估其与BMD的 相关性。结果 OP组的骨质疏松症患者骨密度明显 高于非OP组(11.6mol/L vs 9.5mol/L; P=0.007; P=0.007), 总水密度(21.2mol/L vs 19.7mol/ L; P=0.03), 骨皮质厚度(4.8mm vs 5.6 mm; P<0.001)和³¹P密度(6.4mol/L vs 7.5mol/L; P=0.01) 明显低于非OP组。孔隙密度和总水密度与DXA和 外周定量CT骨密度呈负相关(P<0.001),而皮质骨 厚度和31P密度与DXA和外周定量CT BMD呈正相关 (P=0.01)。BW、³¹P密度、³¹P/BW浓度比与DXA呈正 相关(P<0.05),与外周定量CT无关。结论:皮质骨 的固态MRI能够帮助检测绝经后骨质疏松症中反映 孔洞、形态结构和矿化的参数的潜在损害。

【关键词】绝经后骨质疏松症;皮质骨孔率; 骨质疏松矿化;MRI定量研究 【中图分类号】R681 【文献标识码】A 【基金项目】武汉市科技局项目 (2023020201020544) DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.04.048

Quantitative MRI Study on Cortical Bone Porosity, Mineralization, and Morphological Structure in Postmenopausal Osteoporosis*

ZHOU Lang, SUN Si-Qin, XIE Jia-Ji, GUO Wei^{*}.

Department of Radiology, the Third Hospital of Wuhan, Wuhan 430060, Hubei Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate whether the cortical bone porosities, morphological structure, mineralization and Osteoid density in postmenopausal osteoporosis (OP) patients were affected by MRI, and to explore the relationship between MRI and bone mineral density (BMD) in postmenopausal women. Methods A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 30 OP patients and 38 non OP patients admitted to our hospital from June 2021 to June 2023. At 3.0T, the cortical bone porosity (pore water and total water), Osteoid density (bound water [BW]), morphological structure (cortical bone thickness) and mineralization (phosphorus [P] density [³¹P] and ³¹P/BW concentration ratio) were quantified, the MRI measurement results between OP group and non OP group were compared, and their correlation with BMD was evaluated. Results The bone density of osteoporosis patients in the OP group was significantly higher than that in the non OP group (11.6mol/L vs 9.5mol/L; P=0.007; P=0.007), total water density (21.2mol/L vs 19.7mol/L; P=0.03), bone cortex thickness (4.8 mm vs 5.6 mm; P<0.001), and ³¹P density (6.4mol/L vs 7.5mol/L: P=0.01), which were significantly lower than those in the non OP group. Pore density and total water density were negatively correlated with DXA and peripheral quantitative CT bone density (P<0.001), while cortical bone thickness and 31P density were positively correlated with DXA and peripheral quantitative CT BMD (P=0.01). BW, 31P density, and ³¹P/BW concentration ratio were positively correlated with DXA (P<0.05), but not with peripheral quantitative CT. Conclusion Solid state MRI of cortical bone can help detect potential damage to parameters reflecting pores, morphological structure, and mineralization in postmenopausal osteoporosis.

Keywords: Postmenopausal Osteoporosis; Cortical Foramen Rate; Osteoporosis Mineralization; MRI Quantitative Research

预测骨质疏松症(OP)骨折风险的临床标准是骨密度(BMD),通常用双能X线骨密度仪 (DXA)评估腰椎和髋部。然而,DXA有助于测量面密度,既不能区分皮质骨和松质骨,也 不能区分决定骨机械能力的结构和材料特性,这是OP骨折风险的主要决定因素^[1]。皮质 骨占全身骨量的80%,而抗骨质疏松症药物对这两个骨区的影响不同。最近研究发现^[2], 皮质骨面积和孔隙度的测量能够独立于年龄、性别、身高、体重和骨密度预测骨折。

众所周知,骨质疏松症的快速重塑会降低骨矿化程度,而治疗可以改善骨矿化,这 解释了一些与治疗相关的骨折复位不依赖于骨密度^[3]。虽然皮质骨微结构通常是用高分 辨率CT测量的,但超短回波时间(UTE)和零回波时间序列的固态MRI技术的进步使之成为 可能对组织中以前无法检测到的信号进行量化,这些组织具有类似固体的MRI特性,类似 于驻留在毛孔中的皮质骨水(称为孔隙水)和与类骨组织氢键结合的水(称为结合水)^[4]。此 外,尽管以前只能通过活组织检查才能量化骨骼的矿化程度,但磷(P)密度(³¹P)固态MRI 显示出人类手腕的骨矿物质。在身体研究中,孔隙水是衡量孔隙度的指标,用来预测骨 骼强度和密度。体重是衡量类骨密度的指标,它与骨屈服后的特性有关^[5]。去卵巢大鼠的 ³¹P MRI定量结果显示,去卵巢大鼠的³¹P MRI定量减少,但阿仑磷酸钠治疗后³¹P MRI定量 有所改善^[6]。最后,同时测量³¹P和BW可以产生一个无创性的骨矿化程度标志(即矿物质与 类骨密度的比率,由³¹P与BW的比率得出)^[7]。本研究的目的是探讨绝经后骨质疏松率、形 态结构、矿化和类骨质密度等MRI标志物是否对绝经后骨质疏松症有影响,以及MRI标志 物与绝经后妇女骨密度之间的关系。

1 资料与方法

1.1 研究资料回顾性分析本院于2021年6月到2023年6月期间收治的30名OP患者和38 名非OP患者的临床资料,该研究得到了医院伦理审查委员会的批准(2023025)。

纳入标准:50-75岁绝经后妇女;自上次月经以来超过2年;患者知情同意。排除标 准:目前或以前使用过已知的影响骨矿物质稳态的药物(如双磷酸盐、迪诺单抗、糖皮质 激素);MRI的禁忌症(植入或残疾);体重指数大于32;子宫切除术;每日饮用三种以上 酒精饮料;存在或有其他影响骨骼健康的疾病病史。

OP定义为任何部位的DXA骨密度T评分均小于或等于-2.5。68名绝经后妇女被分成两组: 30名患有OP的妇女没有接受过治疗,38名参照者年龄匹配,健康,没有OP。 30名未接受过OP治疗的女性(平均年龄65岁±6岁[SD];平均体重指数23.1±3.1)和38名 年龄匹配的无OP的健康参照者(以下简称非OP组,平均年龄63岁±5岁;平均体重指数 26.8±3.4岁)。所有68名参与研究的女性都接受了DXA和MRI检查。OP组和非OP组在年

龄、身高或体重方面有任何差异(P>0.05)。

1.2 研究方法使用GE Architect MRI仪器,磁场强度为3.0T,完整的方案约为50分钟,包括侦察检查和³¹P翻转角度校准,然后是两次UTE和一次零回波时间检查^[8]。MRI位于距内踝38%骨干线的胫骨中心,骨水用1HUTE磁共振定量,磷密度用³¹P无回声时间MRI定量。对于所有的MRI量化,都执行了骨膜和骨内膜的手动分割,并且根据我们描述的公式和方法用定制代码自动量化MRI标记。在图像分割的基础上计算两个形态生物标志物:皮质骨厚度通过将骨膜和骨内膜建模为同心圆来计算,皮质骨面积分数计算为皮质骨面积与骨膜边界面积的比率。

骨水的量化^[9]:皮质骨的绝对浓度(以摩尔/升为单位)和皮质 骨水参数使用下面方程式将皮质骨信号与附近已知水浓度的参考 样本的参考信号相参照来计算。骨矿化定量-骨磷的摩尔定量类 似地通过使用基于骨中磷的已知松弛参数和参考样品的方程来执 行。为了克服³¹P相对于1H低四个数量级的信噪比,通过复加法 计算每个骨中³¹P的摩尔浓度(方程中的Cbone)和参考摩尔浓度³¹P 的单值(方程中的CREF)。然后用³¹P与BW的浓度比作为骨矿化程 度的替代物。

采用Siemens Sensation AS 64层螺旋CT及GE Revolutiong ES 128层螺旋CT机,使用DXA(HOGIC)以阵列模式和标准位置方案测量全髋关节、股骨颈和腰椎后前部(L1-L4)的面积骨密度^[10]。在任何测量地点,基于-2.5或更低的T评分来确定分类OP。左侧胫骨的皮质骨体积BMD在增强后的外周定量CT(美国飞利浦 Brilliance TMCT 16排)上测量,横断面位于38%的骨干部位。扫描参数如下:像素大小0.4×0.4mm,层厚2.3mm,扫描速度25mm/s,辐射12.5mrem。使用软件Stratec版本6.00; N.K.处理图像。

1.3 统计学方法 所有数据分析用SPSS 26.0软件进行,P值<0.05 被认为具有统计学意义。各参数的正态分布采用Shapiro-Wilk检验。对正态分布用皮尔逊系数,对非正态分布用斯皮尔曼系数来评估相关性。类似地,使用正态分布的非配对t检验和非正态分布的Wilcoxon秩和检验来评估组间差异。

2 结 果

2.1 MRI测量鉴别OP和非OP女性 具体如图1-3所示,图1显示 了患有OP和非OP胫骨典型MRI扫描。图2中为相同的两名女性提 供了相应的皮质节段和重叠的彩色图。图3显示了不同组之间的 MRI参数比较框图。OP组总水和孔隙水密度均高于非OP组(平均 总水21.2mol/L±2.1vs19.7moL/L±1.9,P=0.03;平均孔隙水 11.6moL/L±2.3vs9.5mol/L±1.9,P=0.007)。OP组矿物质含量 (³¹P,6.3mol/L[IQR,0.6mol/L]vs7.1mol/L[IQR,1.2mol/L], P=0.005),皮质骨厚度和皮质面积分数的形态指标(平均皮质骨 厚度分别为4.8mm±0.5和5.6mm±0.7,P<0.001;平均皮质面 积分数,分别为0.69±0.06和0.75±0.05,P=0.007)。OP组和非 OP组BW和³¹P-BW浓度比无明显差异(P分别为0.13和0.12)。



图1 62岁无骨质疏松妇女(第1排)和70岁骨质疏松妇女(第2排),对每个非对比序列进行代表性的MRI轴向幅度扫描。胫骨上方的圆形结构是将信号强度转换为绝对浓度的校准参考样本。样品浓度和松弛时间与骨水性质大致匹配,因此在超短回声时间(UTE)ECH0 2图像上不可见。患有骨质疏松症患者UTE图像显示骨膜扩张和骨内吸收导致的特征性皮质变薄。磷31(²¹P)零回声时间(ZTE)图像显示0P受试者的磷信号普遍减少。IR=反转恢复,R-UTE=快速UTE。



图2A-图2B 62岁无骨质疏松妇女(第1排)和70岁骨质疏松妇女(第2排),皮质分割和定量参数彩图叠加在超短回波时间(UTE)图像。(2A)黄色边界描绘了覆盖在UTE ECHO 2图像上的手动绘制皮质骨轮廓,具有较强的骨组织对比度。每个MRI参数(2B)总水、(2C)孔隙水、(2D)结合水和(2E)彩色磷叠加在UTE ECHO 1图像上。R0I=感兴趣区域。



图3 箱体图显示骨质疏松(0P组)和非骨质疏松(非0P组)之间的平均值比较。在测量部位,双能X线骨密度仪(DXA)T评分为-2.5或更低,诊断为0P。方框代表中位数和10R。*P值小于0.05。

2.2 磁共振参数与DXA的相关性研究 具体如图4所示, DXA 测量的全髋部骨密度和股骨颈骨密度均与所有MRI参数相关(均 P<0.05)。全髋部骨密度与总含水量(r=-0.55; P<0.001)和孔隙 水(r=-0.69; P<0.0 0 1)呈负相关,这支持孔隙水是骨中孔隙空 间的量度,骨中大部分游离水存在于孔隙中。全髋部骨密度与体 重(r=0.38; P=0.03)、³¹P浓度(r=0.66; P<0.001)、³¹P/BW浓度 比(r=0.56; P<0.001)、皮质骨厚度(r=0.62; P<0.001)、皮质面 积分数(r=0.52; P=0.002)呈正相关,提示骨矿化量越大,骨大小 越大。股骨颈面积骨密度与总含水量(r=-0.45; P=0.008)和孔隙 水(r=-0.58; P<0.001)呈负相关,与髋部骨密度呈显著负相关与 BW(r=0.37; P=0.03)、³¹P密度(r=0.54; P<0.001)、³¹P/BW浓度 比(r=0.42; P=0.01)、皮质骨厚度(r=0.54; P<0.001)、皮质面积 分数(r=0.47; P=0.006)呈正相关。大多数MRI参数显示与腰椎区 域骨密度相似,但关系较弱。这种观察是因为腰椎骨小梁更多, 皮质骨比例更小。腰椎骨密度与总水分(r=-0.37; P=0.03)、孔 隙水(r=-0.47; P=0.004)呈负相关,与体重(r=0.35; P=0.04)、 ³¹P浓度(r=0.44; P=0.009)、³¹P/BW比值(r=0.34; P=0.04)、皮质 骨厚度(r=0.44; P=0.01)呈正相关。



图4 MRI标记物与双能X射线骨密度仪 (DXA)得出的全髋部骨密度 (ABMD)之间的关系。实线是最佳拟合线,虚线是回归线。总水量和孔隙水与密度值呈负相关,红点表示每个数据。

2.3 胫骨外周定量CT体积骨密度与MRI参数的相关性研究 具体如图5所示,描述了外周定量CT得出的体积骨密度和MRI 标记物之间的相关性。周围定量CT测量的体积骨密度与总水 (r=-0.83; P<0.001)和孔隙水(r=-0.84; P<0.001)呈显著负相 关,表明骨密度降低通常是由于孔隙扩大所致。此外,外周定 量CT测量的体积骨密度与矿物质³¹P浓度(r=0.44; P=0.01)和两 种形态指标(皮质骨厚度, r=0.51[P<0.001];皮质面积分数, r=0.52[P<0.001])呈正相关。体积BMD与BW(P=0.11)或³¹P/BW浓 度比(P=0.09)无相关性。



图5 MRI生物标记物与胫骨外周定量CT体积骨密度(VBMD)的相关性。实心黑线是最佳,虚线是最适合线。红点是每个的数据。总水量和孔隙水与密度值呈负相关。

3 讨 论

临床前研究表明,与测量单个聚集的全骨密度的双能X射线 吸收法相比,皮质骨孔率、形态结构和矿化的固态MRI标记物可 以独立地探测皮质骨健康的多方面贡献因素^[10]。在这项针对绝经 后妇女的初步研究中,MRI标记物有助于检测与骨质疏松症(OP) 相关的皮质骨质量损害,所有标记物都与骨密度(BMD)相关^[12]。 特别是,OP与孔隙率增加(P=0.007)、矿物质含量(P=0.01)和 皮质骨厚度(P<0.001)相关。此外,孔洞标志物与BMD呈负相关 (P<0.001),矿化和形态标志物与BMD呈正相关(P<0.001),支持 这些指标可以潜在地评估活体骨质量的技术有效性^[13]。

先前的研究表明^[13],随着年龄的增长和骨骼疾病的发展, 皮质骨水会受到损害。总水量与体积骨密度呈负相关,随着绝经 和肾性骨营养不良而升高。有研究随后证明了体内骨水评估的高 精确度^[15]。最近,与孔隙水密度相关的孔隙度指数被发现与慢 性肾脏疾病分期和肾脏生物标志有关。腰椎体重与体积骨密度呈 正相关,曲线下面积在诊断骨质疏松症方面有较高的价值。这 项研究表明^[16],与年龄匹配的对照组相比,患有OP的绝经后妇 女的孔隙度标志孔隙水和总水增加(孔隙水,P=0.007;总水, P=0.03)。重要的是,孔隙水解释了同一胫骨位置体积骨密度变化 的70%(r2=0.70),表明骨密度的变化反映了孔体积分数的差异。 然而,尽管体重与DXA时的BMD呈正相关,但组间没有差异。 考虑到先前报道的健康年轻人的BW值为10.4±0.8,而OP^[17]。

随着孔隙率的增加,OP也对皮质骨的形态结构产生不利影 响,表现为骨内吸收超过骨膜扩张。事实上,我们的研究发现OP 与较低的皮质骨厚度(P<0.001)和皮质面积分数(P=0.007)相关。 同样,从高分辨率外周定量CT获得的皮质骨形态结构和孔隙度参 数先前已被证明与意外骨折有关,与年龄、性别、身高、体重和 DXA时的骨密度无关^[18]。由于皮质骨强度和骨折风险由皮质骨结 构及其组成决定,因此皮质骨健康的综合评估可能会结合形态结 构和孔隙度的测量。皮质骨参数的量化尤其相关,因为骨小梁和 皮质骨对抗OP药物的治疗反应可能不同。抗吸收药降低皮质骨结 构和孔隙度的测量。皮质骨参数的量化尤其相关,因为骨小梁和 皮质骨对抗OP药物的治疗反应可能不同。抗吸收药降低皮质骨孔 率并增加厚度,合成代谢剂改善骨小梁质量,但有证据表明合成 代谢治疗增加皮质骨孔率并减少皮质骨厚度^[11]。此外,由于合成 代谢剂增加了骨的周转,长期治疗可能会降低骨的矿化程度。一 些研究发现^[11],连续或同时使用合成代谢药物和双膦酸盐治疗比 单独使用其中一种治疗更能改善骨骼质量。然而,由于治疗指南 将一些合成代谢药物限制在2年,一些双膦酸盐限制在3-5年,而 OP是一种长期的全身性骨病,持续抗骨折疗效的最佳治疗疗程仍 然是一个悬而未决的问题^[14]。先进的成像方法有助于全面评估皮质和小梁区,有助于加深我们对OP治疗的理解^[16]。

³¹P的固态MRI定量在临床前研究中显示出了希望。MRI ³¹P 评估区分正常和低磷血症兔,并与骨矿化程度和骨强度相关^[18]。 同样,去卵巢大鼠的MRI ³¹P降低,但经双膦酸盐治疗后改善。 虽然³¹P磁共振成像以前在活体中被证实,但实际的矿物质密度 直到最近才被报道^[19]。我们的研究认为³¹P密度在OP患者中较低 (P=0.01),且与BMD呈正相关(P<0.001)。我们提出的方案可能为 OP以外的骨病提供病理生理学方面的见解。骨软化症是一种脱矿 性疾病,需要活检才能诊断,因为DXA无法帮助将其与OP区分开 来^[20]。因此,直接³¹P定量可以为无创诊断提供一种手段。类似 地,2型糖尿病的特点是骨密度从正常到升高,尽管这些患者由 于皮质骨孔率增加以及异常矿化和胶原糖化而增加了骨折的风险 ^[21]。因此,量化³¹P与BW的浓度比作为骨骼矿化程度的替代指标, 可以深入了解骨周转、疾病或抗吸收治疗引起的矿化变化^[22]。

综上所述,固态MRI能够帮助检测绝经后骨质疏松症患者皮 质骨孔隙度、形态结构和矿化的损伤。未来的工作应该在更大的 群体中研究这些标记物,以确定它们是否可以检测药物治疗后骨 骼健康的变化。

参考文献

- [1]李雨蒙,朱文玲,谢智雯等. 绝经后女性急性骨质疏松性骨折与腰部椎旁肌肉CT定量的相关性[J].中国CT和MRI杂志,2024,22(01):149-151.
- [2]罗艳,陶敏芳.基于表观扩散系数影像组学对围绝经期女性骨质疏松诊断的初步探 讨[J].中国CT和MRI杂志,2024,22(01):158-161.
- [3] TZOULIS P, YAVROPOULOU M P, BANCHEV A, et al. Recent advancements in glucose dysregulation and pharmacological management of osteoporosis in transfusion-dependent thalassemia (TDT): an update of ICET-A (International Network of Clinicians for Endocrinopathies in Thalassemia and Adolescence Medicine) [J]. Acta Biomed, 2023, 94 (3): e2023178.
- [4]CHEN Z, LEI F, YE F, et al. MRI-based vertebral bone quality score for the assessment of osteoporosis in patients undergoing surgery for lumbar degenerative diseases[J]. J Orthop Surg Res, 2023, 18 (1): 257.
- [5] INIGO S A, TAMILSELVI R, BEHAM M P. A Review on imaging techniques and artificial intelligence models for osteoporosis prediction[J]. Curr Med Imaging, 2023.
- [6] TABATA Y, MATSUI S, MIYAMOTO M, et al. Transient osteoporosis of the hip with a femoral neck fracture during follow-up: a case report[J]. J Yeungnam Med Sci, 2023, 40 (2): 212-217.
- [7] SHIH Y J, CHANG W N, YANG S W. Heroin-induced osteoporosis presented with bilateral femoral neck insufficiency fractures in a male adult: a case report[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2023, 24(1): 296.
- [8] PANT A, SINGH J, BARNWAL R P, et al. Theranostic approach for the management of osteoporosis[J]. Crit Rev Ther Drug Carrier Syst, 2023, 40(3):95-121.
- [9] BADCHISH E. A rare presentation of transient osteoporosis of the talus: case report[J]. J Orthop Case Rep, 2023, 13 (4): 1-4.
- [10] ZHANG S, GUO Q, YANG Y, et al. Feasibility study of 3D FACT and IVIM sequences in the evaluation of female osteoporosis[J]. Bioengineering (Basel), 2023, 10(6).
- [11] ROCH P J, CELIK B, JACKLE K, et al. Combination of vertebral bone quality scores from different magnetic resonance imaging sequences improves prognostic value for the estimation of osteoporosis [J]. Spine J, 2023, 23 (2): 305-311.
- [12] KOMNOS G A, PARIDIS D I, BANIOS K T, et al. Regional migratory osteoporosis of the knee: a literature overview [J]. Musculoskelet Surg, 2023, 107 (2): 159-164.
- [13] BAE W C. Advances and shortfalls in MRI evaluation of osteoporosis[J]. Radiology, 2023, 307 (2): e223144.
- [14] 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, 307 (2):e221810.
- [15] PARHIALA M, UKKONEN M, SAND J, et al. Osteoporosis and sarcopenia are common and insufficiently diagnosed among chronic pancreatitis patients [J]. BMC Gastroenterol, 2023, 23 (1): 124.
- [16] KUCUKCILOGLU Y, SEKEROGLU B, ADALI T, et al. Prediction of osteoporosis using MRI and CT scans with unimodal and multimodal deep-learning models[J]. Diagn Interv Radiol, 2023.
- [17] XU J, WANG W Z, FAN X, et al. [Correlation Between Osteoarthritis and Osteoporosis in Men] [J]. Sichuan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban, 2023, 54 (2): 439-443.
- [18] 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, 171: 116743.
- [19] TOUSSIA-COHEN S, ESHED I, SEGAL 0, et al. Transient osteoporosis of the hip in pregnancy - a case series [J]. J Matern Fetal Neonatal Med, 2023, 36 (1): 2175659.
- [20]LI X, HU Y, XIE Y, et al. T2*-corrected Q-Dixon and reduced-FOV diffusion kurtosis imaging (DKI) parameters: correlation with QCTderived bone mineral density (BMD) and ability to identify abnormal BMD and osteoporosis in postmenopausal women[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13 (7): 4130-4146.
- [21]MIGLIORINI F, VECCHIO G, WEBER C D, et al. Management of transient bone osteoporosis: a systematic review[J]. Br Med Bull, 2023.
- [22]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, 2023, 33 (6): 3995-4006.

(收稿日期: 2024-01-15)