论著

能谱CT对长骨外伤性 骨髓水肿诊断及图像质 量分析*

沈 龙* 王 晨 杨启楠 河南省第二人民医院医学影像科 (河南郑州 451191)

【摘要】目的探究能谱CT对长骨外伤性骨髓水肿 的诊断价值并分析图像质量。**方法** 选取2023年8月 至2024年1月我院收治的长骨外伤患者70例,所有 患者均接受能谱CT扫描与磁共振成像(MRI)检查,以 MRI结果为金标准,分析能谱CT诊断长骨外伤性骨 髓水肿与MRI诊断的一致性,并根据水-羟基磷灰石 (water-HAP)物质分离技术,比较上肢与下肢骨髓水 肿患者正常区域与骨髓水肿区域的水物质密度,采 用受试者工作特征(ROC)曲线分析其对长骨外伤性骨 髓水肿的诊断价值。结果 70例长骨外伤患者中,经 MRI检查显示骨髓水肿共66例(94.29%),经能谱CT 检查显示骨髓水肿共64例(91.43%)。能谱CT诊断长 骨外伤性骨髓水肿结果与MRI诊断结果比较Kappa 检验一致性系数为0.785,且能谱CT检查诊断长骨 外伤性骨髓水肿的敏感性、特异性及准确性分别为 96.97%、100.00%、97.14%。上肢长骨外伤性骨 髓水肿患者与下肢长骨外伤性骨髓水肿患者骨髓水 肿区域的水物质密度值均高于正常区域(P<0.05)。 ROC特征曲线结果显示,水物质密度值诊断上肢 长骨外伤性骨髓水肿与下肢长骨外伤性骨髓水肿 的最佳截断值分别为964.890 mg/m³、942.895 mg/m³,AUC分别为0.936、0.938,特异性分别 100.00%。结论能谱CT诊断长骨外伤性骨髓水肿的 特异性及准确性较高,与MRI诊断的一致性较好, 同时water-HAP图显示的水物质密度值有助于对长 骨外伤性骨髓水肿进行定量分析。

【关键词】能谱CT;长骨外伤; 骨髓水肿;诊断价值;水-羟基磷灰石 【中图分类号】R551.3 【文献标识码】A 【基金项目】河南省医学科学院(20230010) DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.05.046

Diagnosis of Bone Marrow Edema Caused by Long Bone Trauma Using Energy Spectrum CT and Analysis of Image Quality*

SHEN Long^{*}, WANG Chen, YANG Qi-nan.

Department of Medical Imaging, the Second People's Hospital of Henan Province, Zhengzhou 451191, Henan Province, China

ABSTRACT

Objective To explore the diagnostic value of energy spectrum CT in bone marrow edema caused by long bone trauma and analyze image quality. Methods Seventy patients with long bone trauma admitted to the hospital from August 2023 to January 2024 were selected. All patients underwent energy spectrum CT scan and magnetic resonance imaging (MRI) examination. MRI results were used as the gold standard to analyze the consistency between energy spectrum CT and MRI in the diagnosis of bone marrow edema caused by long bone trauma. According to water-hydroxyapatite (water-HAP) images, the water substance density in normal and bone marrow edema areas of patients with upper and lower limb bone marrow edema was compared. The receiver operating characteristic (ROC) curve was used to analyze its diagnostic value in bone marrow edema caused by long bone trauma. Results Among the 70 patients with long bone trauma, MRI found bone marrow edema in 66 (94.29%) cases and energy spectrum CT found bone marrow edema in 64 (91,43%) cases. Kappa test showed that the consistency coefficient between energy spectrum CT and MRI for diagnosing bone marrow edema caused by long bone trauma was 0.785. The sensitivity, specificity and accuracy of energy spectrum CT for diagnosing bone marrow edema caused by long bone trauma were 96.97%, 100.00% and 97.14%, respectively. For patients with bone marrow edema caused by upper limb long bone trauma and lower limb long bone trauma, water substance density in bone marrow edema area was higher than that in normal area (P<0.05). ROC curves indicated that the optimal cutoff values of water substance density for diagnosing bone marrow edema caused by upper limb long bone trauma and lower limb long bone trauma were 964.890 mg/m³ and 942.895 mg/m³. The AUC values were 0.936 and 0.938. The specificity was 85.71% and 75.86%. The sensitivity was 91.40% and 100.00%. Conclusion Energy spectrum CT has high specificity and accuracy in diagnosing bone marrow edema caused by long bone trauma, and is consistent with MRI diagnosis. Meanwhile, water substance density displayed on water-HAP images is helpful for quantitative analysis of bone marrow edema caused by long bone trauma. Keywords: Energy Spectrum CT; Long Bone Trauma; Bone Marrow Edema; Diagnostic Value; Water Hydroxyapatite

长骨外伤是临床上常见的骨科疾病,常规X线片或CT均能进行准确诊断,但对于伴 有骨髓水肿患者的诊断准确率较低^[1]。骨髓水肿是在外伤等因素引起的生理学骨髓成分 非特异性改变,包括微骨折与微出血等细微结构改变,具体表现为骨基质中水分增多, 并伴有炎性因子浸润,其发生主要与外伤、骨基质力学异常改变有关^[2-3]。相关研究^[4]报 道,磁共振成像(MRI)检查能准确识别骨髓水肿,同时还能分辨隐匿性骨折,可作为骨 髓水肿的诊断金标准。但MRI检查具有扫描时间长、禁忌症较多等特点,应用于急性外 伤或重症患者具有一定的局限性^[5]。近年来,随着能源CT技术的不断发展,其定量分析 技术能准确测定人体骨质中的水、钙、羟基磷灰石等成分,同时能获取能量图成像与基 物质密度图像,为诊断及定量分析骨髓水肿提供了新路径^[6]。当前能源CT扫描应用于骨 髓水肿的研究较多,但大多集中于脊柱或关节创伤骨髓水肿,研究部位单一,而关于能 谱CT对长骨外伤性骨髓水肿的诊断价值则鲜有报道,鉴于此,本研究旨在探究能谱CT 在长骨外伤性骨髓水肿中的诊断及定量评估价值,以期为临床提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2023年8月至2024年1月我院收治的长骨外伤患者70例,其中男41 例,女29例,年龄22~67岁,平均年龄(46.28±6.05)岁。

纳入标准:伴有明确长骨外伤,均接受MRI及能谱CT检查;年龄在18岁以上;临床 资料完善,影像学资料详实。排除标准:伴有MRI检查禁忌症;MRI检查与能谱CT检查 间隔时间>48h;伴有骨髓造血异常、骨钙磷代谢异常或骨肿瘤患者;伴有长骨手术史 或陈旧性骨折病史;影像学图像质量较差,难以满足临床诊断要求。

1.2 方法

1.2.1 MRI检查方法 采用飞利浦3.0T MRI扫描仪,指导患者于检查前去掉身上金属异物,检查时取仰卧位,足先进,对患者长骨外伤相关部位行矢状位、冠状位、轴位扫描,扫描序列包括T1W1/T2W1序列:重复时间600ms/260ms,回波时间12ms/40ms, 层厚为3.0mm/3.5mm,层间距为3.5mm/3.5mm,矩阵为320×240/320×240,视野 160mm×160mm/160mm×160mm; TSE-FS-PDWI序列: 重复时间3200ms,回波时间12ms,层厚为3.0mm,层间距为0.6mm,矩阵为384×384,视野160mm×160mm,激励次数为2。

1.2.2 能谱CT检查方法 采用GE256排CT扫描仪(Revolution CT) 以能谱方式对患者长骨外伤部位进行扫描,扫描参数如下:管 电压为80/140kV,管电流为335mA,螺距0.992,旋转时间为 0.8s,准直宽度为80mm,获取患者软组织与骨算法重建图像, 同时将能谱数据传输至ADE工作站进行后处理,获取水-羟基磷灰 石(water-HAP)基物质密度灰阶图与70keV单能量图,最终将两种 图像相互融合,形成伪彩图。

1.2.3 影像分析方法 由两位具有5年及以上诊断经验的医师独立 对MRI检查结果进行评估与诊断,将均匀或不均匀T1W1低信号,

脂肪抑制T2W1序列不规则高信号判定为存在骨髓水肿,记为阳 性;对于未见骨髓水肿患者则记为阴性。当两位医师出现意见分 歧时,由第三位具有同样丰富经验的医师进行判断。由另外具有 同样诊断经验的医师对water-HAP图像进行独立阅片,评估患者 是否存在骨髓水肿情况,并测量患者正常区域与骨髓水肿区域的 水物质密度,具体测量方法如下:手动勾画出患者骨髓水肿区 域,在避免2mm以上骨皮质区情况下,选取三个连续的最大层面 进行测量,将ROI置于骨髓损伤区域与健侧正常区域的中央,最 终水物质密度值取两位医师测定的平均值。

1.3 统计学方法数据经软件SPSS 22.0分析,计数资料用百分比 表示,采用 x²检验。计量资料用(x ± s)表示,组间对比采用独 立样本t检验。一致性检验采用Kappa检验,当Kappa在0.75及以 上时表示一致性较好。采用受试者工作特征(ROC)曲线分析水物 质密度值对长骨外伤性骨髓水肿的诊断价值。P<0.05表示差异有 统计学意义。

2 结 果

2.1 MRI与能谱CT对不同部位长骨外伤性骨髓水肿的诊断结果 70例长骨外伤患者中,经MRI检查显示骨髓水肿共66例,检出率

表2 能谱CT对长骨外伤性骨髓水肿的诊断结果

检查方法		М	MRI		
		阳性	阴性		
能谱CT	阳性	64	0	64	
	阴性	2	4	6	
	合计	66	4	70	

为94.29%,其中对于桡骨处检出率最高为32.86%,肱骨处检出 率最低为4.29%;经能谱CT检查显示骨髓水肿共64例,检出率为 91.43%,其中对于桡骨处检出率最高为31.43%,肱骨处检出率 最低为4.29%。见表1。

表1 MRI与能谱CT对不同部位长骨外伤性骨髓水肿的诊断结果[例(%)]

检查方法	上肢				下肢		
	肱骨	桡骨	尺骨	胫骨	股骨	腓骨	
MRI	3	23	10	6	16	8	66
能谱CT	3	22	10	6	15	8	64

2.2 能谱CT对长骨外伤性骨髓水肿的诊断效能 经能谱CT诊断 为长骨外伤性骨髓水肿共64例,其中64例均与MRI检查结果相 符,符合率为100%,且能谱CT诊断长骨外伤性骨髓水肿结果与 MRI检查结果比较Kappa检验一致性系数为0.785,一致性较好。 见表2。能谱CT检查诊断长骨外伤性骨髓水肿的敏感性、特异性 及准确性分别为 96.97%、100.00%、97.14%。

2.3 上肢与下肢长骨外伤性骨髓水肿患者正常区域与骨髓水肿 区域的水物质密度值的比较 上肢长骨外伤性骨髓水肿患者与下 肢长骨外伤性骨髓水肿患者骨髓水肿区域的水物质密度值均高于 正常区域(P<0.05)。见表3。

2.4 水物质密度值对上肢与下肢长骨外伤性骨髓水肿患者 的诊断价值 绘制ROC特征曲线,结果显示,水物质密度值诊 断上肢长骨外伤性骨髓水肿与下肢长骨外伤性骨髓水肿的最佳 截断值分别为964.890 mg/m³、942.895 mg/m³,AUC分别为 0.936、0.938,特异性分别为85.71%、75.86%,敏感度分别为 91.40%、100.00%。见表4与图1。

2.5 能谱CT诊断长骨外伤性骨髓水肿的图像质量分析 典型病 例的能谱CT及MRI检查图像见图2。

表3 上肢与下肢长骨外伤性骨髓水肿患者正常区域与 一時水肿区域的水肿医瘤度值的比较(mg/m3)

	肖服 4		贝西皮值的比较(iiig/iii /	
部位	例数	正常区域	骨髓水肿区域	t值	P值
上肢	35	953.36±14.69	979.41±18.40	6.546	<0.001
下肢	29	935.64 ± 16.58	973.25±19.07	8.015	<0.001

表4 水物质密度值对上肢与下肢长<mark>骨外伤性骨髓水肿患</mark>者的诊断效能

部位	最佳截断点	AUC	标准误	渐进Sig	95%CI	约登指数	特异性(%)	敏感度(%)
上肢	964.89 mg/m ³	0.936	0.029	0.000	0.878~0.993	0.771	85.71	91.40
下肢	942.895 mg/m ³	0.938	0.031	0.000	0.876~1.000	0.759	75.86	100.00



图1A-图1B 水物质密度值诊断长骨外伤性骨髓水肿患者的ROC曲线。图1A为水物质密度值诊断上肢长骨外伤性骨髓水肿患者; 图1B为水物质密度值诊断下肢长骨外伤性骨髓水肿患者。



图2A-图2F 典型病例的能谱CT及MRI检查图像。图2A-2C: 典型病例,男,42岁,图2A: 能谱CT采用water-HAP物质分离技术,定量测量骨折周围区域水含量为976.99mg/cm³、正常区域水含量为952.88mg/cm³;图2B: 能谱CTwater-HAP伪彩图,由蓝到红,水含量逐渐增高;图2C: MRI检查图像。图2D-2F: 典型病例,女,50岁,图2D: 能谱CT采用water-HAP物质分离技术,定量测量骨折周围区域水含量为991.97mg/cm³、正常区域水含量为925.45mg/cm³;图2E: 能谱CTwater-HAP伪彩图,由蓝到红,水含量逐渐增高;图2F: MRI检查图像。

3 讨 论

骨髓水肿是指在长期应力或外伤等因素下引起的骨小梁间隙 变宽与细微骨折,并伴随组织间隙水分增多,呈现弥漫性充血与 出血等症状,根据骨髓水肿的产生原因可将其分为原发性与继发 性两类,其中原发性骨髓水肿主要指骨髓水肿综合征,继发性骨 髓水肿则与肿瘤、感染、创伤等多种因素有关^[7-8]。当前临床上长 骨外伤的发牛率较高,当患者伴有骨髓水肿时具有较高的临床漏 诊率,采用合理高效的诊断方案对长骨外伤性骨髓水肿患者进行 早期诊断,对于临床制定干预措施具有重要意义^[9]。现阶段临床上 MRI、CT等影像学手段是骨髓水肿患者的首选诊断方案,其中MRI 检查的敏感性与准确性较高,但难以在伴有MRI检查禁忌症的患 者中推广; CT扫描则有助于显示患者细微骨折情况, 在急重症患 者中具有较好的应用价值,但相关研究证实常规CT检查难以显示 出骨髓水肿情况,易导致漏诊情况发生,因此探究其他高效的诊 断方案十分关键^[10]。能谱CT是在传统CT基础上发展而来的新兴技 术,能在高、低两种能量中迅速切换,进而获取能谱数据,实现 物质分离与定量分析,在诊断骨髓水肿方面具有较大优势^[11-12]。

本研究纳入的70例长骨外伤患者中,经能谱CT检查显示骨 髓水肿共64例,均与MRI检查结果相符,能谱CT检查诊断长骨 外伤性骨髓水肿的敏感性、特异性及准确性分别为96.97%、 100.00%、97.14%,且与MRI诊断结果的一致性较好,提示能 谱CT诊断长骨外伤性骨髓水肿的特异性及准确性较高,与MRI诊 断的一致性较好。主要原因在于能谱CT能在常规解剖图像基础 上对人体松质骨中的水分和钙盐成分进行分离,获取水、HAP分 解图像,并将其与单能量图像相互融合,获取伪彩图,进而通 过彩色阈值对骨髓水肿区域进行准确评估。本研究中仍存在一 定的假阴性结果,这可能是因为部分年龄患者由于骨小梁结构 致密,加上骨髓间对比度较差,骨髓水肿程度不明显,使得视 觉评估能谱CT图像时出现偏倚,另外能谱CT检查评估结果在一 定程度上受到阅片医师专业水平与诊断经验的影响。邸云霞^[13] 等研究指出,与水钙基物质配对比较,将water-HAP作为物质配 对与椎体物质的真实组成成分更为接近。本研究发现上肢长骨外 伤性骨髓水肿患者与下肢长骨外伤性骨髓水肿患者骨髓水肿区域 的水物质密度值均高干正常区域,这与张红^[14]等的研究结果具 有一致性,说明water-HAP图显示的水物质密度值有助于对长骨 外伤性骨髓水肿进行定量分析。这是因为人体骨髓主要分为红骨 髓与黄骨髓,其中红骨髓主要成分为造血细胞,具有较高的含 水量,当出现急性创伤后,骨组织学常表现出充血、间质液增 多等病理表现,进而使得水肿区域水物质密度值显著升高^[15]。 本研究进一步采用ROC特征曲线,结果显示,水物质密度值诊 断上肢长骨外伤性骨髓水肿与下肢长骨外伤性骨髓水肿的最佳 截断值分别为964.890 mg/m³、942.895 mg/m³,AUC分别为 0.936、0.938,特异性分别为85.71%、75.86%,敏感度分别为 91.40%、100.00%,证实能谱CTwater-HAP图显示的水物质密 度值对于诊断长骨外伤性骨髓水肿患者的临床价值较高。通过对 典型患者的能谱CT图像进行质量分析,发现以水、HAP基物质 配对能有效降低骨质结构中含有的HAP对诊断结果产生干扰,并 将水物质密度值量化,获取water-HAP图;另外将基物质密度图 与单能量图像融合形成伪彩图,在临床急诊诊断中具有高效、简 易等优势。因此建议临床重点关注长骨外伤患者骨髓腔内水物质 密度值改变情况,提高骨髓水肿检出率,同时对于在此基础上指 导临床治疗方案制定,这对于改善患者预后水平意义重大。

综上所述,能谱CT诊断长骨外伤性骨髓水肿的特异性及准确 性较高,且water-HAP图显示的水物质密度值有助于对长骨外伤 性骨髓水肿进行定量分析,为临床提供了一种高效的骨髓水肿诊 断方案。

参考文献

- [1] DALOS D, MARSHALL P R, LISSY M, et al. Influence of leg axis alignment on MRI T2* mapping of the knee in young professional soccer players[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2024, 25(1): 144.
- [2]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(7):117-118.
- [3] 陈亚龙,肖新广,上官建伟.磁共振FLAIR-FS序列成像在诊断早期膝关节滑膜炎中的 应用研究[J]. 罕少疾病杂志,2024,31(4):92-94.
- [4]MILLIRON E, BERAN M C, DIBARTOLA A C. Editorial commentary: osteochondral allograft of the knee - diffuse edema at 6 months on MRI predicts failure[J]. Arthroscopy, 2024, 40 (9): 2453-2454.
- [5]LEE S M, KIM M, PARK C, et al. Deep Learning-reconstructed parallel accelerated imaging for knee MRI[J]. Curr Med Imaging, 2024, 20: e5048717.
- [6] BROWN J S, OLSSON O, ISACSSON A, et al. Clinical versus MRI grading of the medial collateral ligament in acute knee injury[J]. Res Sports Med, 2024, 32 (1): 12-16.
- [7] OSTERGAARD M, WETTERSLEV M, HADSBJERG A E, et al. The OMERACT whole-body MRI scoring system for inflammation in peripheral joints and entheses (WIPE) in spondyloarthritis - reference image atlas for the knee region[J]. Semin Arthritis Rheum, 2024, 65: 152384.
- [8] YI Y, CHI Z, WANG Y, et al. In vivo MRI of knee using a metasurface-inspired wireless coil[J]. Magn Reson Med, 2024, 91 (2): 530-540.
- [9]MARCEL A J, ALAIA E F, ALAIA M J, et al. Perspectives and institutional policies on patient safety and image quality regarding the use of kneespanning external fixators in MRI:a survey study of the Society of Skeletal Radiology [J]. Skeletal Radiol, 2024, 53 (3): 525-536.
- [10] SANTOMARTINO S M, KUNG J, YI P H. Systematic review of artificial intelligence development and evaluation for MRI diagnosis of knee ligament or meniscus tears [J]. Skeletal Radiol, 2024, 53 (3): 445-454.
- [11] AHMADI O, MOTIFIFARD M, HEYDARI F, et al. The Predictive value of point-ofcare ultrasonography versus MRI in assessing medial meniscal tears in patients with acute knee injury[J]. Clin Exp Emerg Med, 2024, 11 (2): 188-194.
- [12] DONNERS R, VOSSHENRICH J, GUTZEIT A, et al. New-Generation 0.55 T MRI of the knee-initial clinical experience and comparison with 3 T MRI[J]. Invest Radiol, 2024, 59 (4): 298-305.
- [13] MAHENDRAKAR P, KUMAR D, PATIL U. A comprehensive review on MRIbased knee joint segmentation and analysis techniques[J]. Curr Med Imaging, 2024, 20: e199361534.

- [14]KUHRIJ L S, MARANG-VAN D M P, van LIER L, et al. Reduction in use of MRI and arthroscopy among patients with degenerative knee disease in independent treatment centers versus general hospitals: a time series analysis[J]. Int J Qual Health Care, 2024, 36(1): mzae004.
- [15]HOLM P M, BLANKHOLM A D, NIELSEN J L, et al. Effects of neuromuscular control and strengthening exercises on MRI-measured thigh tissue composition and muscle properties in people with knee osteoarthritis - an exploratory secondary analysis from a randomized controlled trial[J]. Semin Arthritis Rheum, 2024, 65: 152390.
- [16] ROTTINGER T, LISITANO L, ABELMANN-BROCKMANN J, et al. The Trochlear paradox in native knees and its potential impact on total knee arthroplasty: an MRI-based correlation study investigating the effect of varying posterior femoral condyle angles on the patellofemoral joint[J]. J Clin Med, 2024, 13 (3): 790.
- [17] TSCHOPP M, PFIRRMANN C, BRUNNER F, et al. Morphological and quantitative parametric mri follow-up of cartilage changes before and after intraarticular injection therapy in patients with mild to moderate knee osteoarthritis: a randomized, placebo-controlled trial[J]. Invest Radiol, 2024, 59 (9): 646-655.
- [18] ZBYN S, LUDWIG K D, WATKINS L E, et al. Changes in tissue sodium concentration and sodium relaxation times during the maturation of human knee cartilage: Ex vivo (23) Na MRI study at 10.5 T[J]. Magn Reson Med, 2024, 91 (3): 1099-1114.
- [19] WEN D, ZHOU X, HOU B, et al. 3D-DESS MRI with CAIPIRINHA two- and fourfold acceleration for quantitatively assessing knee cartilage morphology[J]. Skeletal Radiol, 2024, 53 (8): 1481-1494.
- [20] ECKSTEIN F, WLUKA A E, WIRTH W, et al. 30 Years of MRI-based cartilage & bone morphometry in knee osteoarthritis: From correlation to clinical trials [J]. Osteoarthritis Cartilage, 2024, 32 (4): 439-451.
- [21]O'CONNELL D, GOLIGHTLY Y, LISEE C, et al. Interlimb differences in T1rho MRI relaxation times linked with symptomatic knee osteoarthritis following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Knee, 2023, 41: 353-359.
- [22]WANG Z Y, GAO W F, SHAO Y M, et al. [Clinical evaluation of plateletrich plasma in the treatment of early and middle stage knee osteoarthritis under 3. OT MRI T2 mapping sequence] [J]. Zhonghua Wai Ke Za Zhi, 2023, 61 (2): 138-144.

(收稿日期: 2024-04-26) (校对编辑:姚丽娜)

(上接第161页)

参考文献

- [1]陈游,李斌,戴携,等.血清瘦素及骨转化指标与下肢长骨骨折伴急性脊髓损伤患者 骨折愈合的关系[J].东南大学学报(医学版),2022,41(1):49-55.
- [2]Kronthaler S, Boehm C, Feuerriegel G, et al. Assessment of vertebral fractures and edema of the thoracolumbar spine based on water-fat and susceptibility-weighted images derived from a single ultra-short echo time scan[J]. Magn Reson Med, 2022, 87 (4): 1771-1783.
- [3] 何绪成, 叶菊, 周闪闪, 等. 双能CT虚拟去钙技术在踝关节处骨髓水肿中的诊断价值 [J]. 中国CT和MRI杂志, 2022, 20(4):169-172.
- [4]行海涛.膝骨关节炎周围骨髓水肿与股四头肌面积、半月板分级的相关性分析[J]. 罕少疾病杂志, 2021, 28 (4): 90-91.
- [5] Pastor M, Lukas C, Ramos-Pascual S, et al. Sacroiliac joint MRI for diagnosis of ax-SpA: algorithm to improve the specificity of the current ASAS MRI criteria[J]. Eur Radiol, 2023, 33(12):8645-8655.
- [6]谢卫东,张璇,李扬,等. 能谱CT水-羟基磷灰石分离技术在创伤性骨髓水肿中的应用价值[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2022, 28 (2): 173-176.
- [7]杨丽勤,朱默,金鹏飞,等.双能CT物质分离技术对强直性脊柱炎骶髂关节炎骨髓水 肿物质变化的定量分析[J].临床放射学杂志,2022,41(11):2101-2105.
- [8]杨洋,陶然,仪晓立,等.基于MRI的幼年特发性关节炎膝关节骨髓水肿特点及转归的 初步研究[J].中华放射学杂志,2022,56(6):650-655.

- [9] 吕登, 望云, 刘士远. 光谱CT在检测骨骼肌肉系统疾病中的临床应用 [J]. 医学影像学 杂志, 2023, 33 (3): 509-512.
- [10]赵新佳, 骆海虎, 骆华峰,等. MRI与CT检查在股骨头坏死诊断中的临床价值[J]. 医 学影像学杂志, 2023, 33 (5): 926-929.
- [11]马欢,万业达. 能谱CT物质分离技术在腰椎骨赘皮质羟基磷灰石和钙含量中的定量研究[J]. 中国医学影像学杂志, 2022, 30(9):964-967, 978.
- [12] 王诗耕,刘义军,李贝贝,等.下肢能谱CT静脉成像最佳重建能级和自适应统计迭代 重建权重[J].中国介入影像与治疗学,2023,20(10):625-629.
- [13] 邸云霞, 孔慧华, 牛晓伟. 基于主成分分析的多能谱CT图像分析方法研究 [J]. CT理 论与应用研究, 2022, 31 (6): 749-760.
- [14]张红,李泉霖,樊子健,等.能谱CT在评估膝关节急性外伤性骨髓水肿中的应用价值
 [J].医学影像学杂志,2023,33(5):852-856.
- [15]赵明月,刘义军,魏巍,等.能谱CT基物质成像技术测定骨密度及评估骨质状态的可 行性[J].中国医学影像技术,2022,38(11):1720-1725.

(收稿日期: 2024-04-07) (校对编辑:赵望淇)