

· 骨骼肌肉影像学 ·

基于能谱 CT 物质分离技术对急性和慢性骨质疏松性椎体骨折的定量研究

王洁森, 郑修竹, 闫晟, 邱晓茜, 李长勤, 秦健

【摘要】 目的:基于能谱 CT 物质分离技术,探讨能谱 CT 在鉴别椎体急、慢性骨质疏松性骨折的应用价值。**方法:**选取同时接受能谱 CT、MRI 以及 DXA 检查的患者 90 名。根据 MRI 影像表现将骨质疏松性骨折的椎体分为急性压缩骨折组和慢性压缩骨折组。根据 Genant 椎体骨折分级标准将椎体压缩骨折程度分为 3 级。通过受试者操作特征(ROC)曲线评估 HAP-水、钙-水两种基物质的诊断性能。**结果:**急、慢性骨质疏松性骨折的椎体间 HAP-水、钙-水值的差异均有统计学意义($P < 0.05$)。在不同压缩骨折程度下, HAP-水、钙-水值在急、慢性骨质疏松性骨折组间差异均有统计学意义($P < 0.05$)。通过 ROC 曲线分析,当 HAP-水值 > 992.5 、钙-水值 > 1018 时,诊断为急性脆性骨折的敏感度分别为 73.17%、95.12%,特异度分别为 85.58%、72.12%。HAP-水、钙-水值鉴别急、慢性骨质疏松性骨折的 AUC 分别为 0.913、0.871,差异无统计学意义($P > 0.05$)。**结论:**双能 CT HAP-水、钙-水图像在定量评估骨质疏松性骨折椎体骨髓水肿方面具有较高的特异性和准确性。

【关键词】 骨质疏松; 双能 CT; 椎体骨折

【中图分类号】 R814.42; R681 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)07-0937-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.07.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quantitative study of the material separation technology of spectral CT in diagnosing acute and chronic osteoporotic vertebral fractures WANG jie-miao, ZHENG xiu-zhu, YAN sheng, et al. Department of Radiology, Shandong First Medical University Second Hospital, Shandong 271000, China

【Abstract】 Objective: To investigate the clinical value of spectral CT in the diagnosis of acute and chronic osteoporotic fractures by the material decomposition technique of spectral CT. **Methods:** 90 osteoporotic fractures patients who underwent chest spectral CT, dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) and MRI were selected. Vertebrae with osteoporotic fractures were divided into acute compression fracture group and chronic compression fracture group according to MRI imaging performance. The fracture level of vertebral body compression was classified by grade of height loss according to the Genant vertebral fracture grading system. The value of each base substance in identifying acute and chronic osteoporotic fractures of the vertebral body was analyzed by ROC curves. **Results:** The differences in intervertebral HAP-water and calcium-water values were statistically significant between acute and chronic osteoporotic fractures ($P < 0.05$). The differences in HAP-water and calcium-water values were statistically significant between acute and chronic osteoporotic fracture groups at different degrees of compression fracture ($P < 0.05$). By ROC curve analysis, the sensitivity of the diagnosis of acute fragility fracture was 73.17% and 95.12%, and the specificity was 85.58% and 72.12% when the HAP-water value > 992.5 and calcium-water value > 1018 , respectively. The AUCs of HAP-water and calcium-water values to identify acute and chronic osteoporotic fractures were 0.913 and 0.871, respectively, with no statistically significant difference ($P > 0.05$). **Conclusion:** Dual-energy CT reconstructions of HAP-water and calcium-water images have high specificity and diagnostic accuracy in the quantitative assessment of vertebral bone marrow edema in osteoporotic fractures.

【Key words】 Osteoporosis; Dual-energy computed tomography; Vertebrae fracture

作者单位: 271000 山东, 山东第一医科大学第二附属医院医学影像科

作者简介: 王洁森(1995-), 女, 山东枣庄人, 硕士, 主要从事影像医学与核医学研究。

通讯作者: 秦健, E-mail: sdqinjian@126.com

基金项目: 山东第一医科大学学术提升计划基金资助项目(2019QL017); 泰安市科技发展计划项目(2021NS270)

骨质疏松症是世界范围内最常见的代谢性骨疾病之一, 容易增加骨折的风险。胸腰椎椎体是最常见的骨质疏松性骨折的发生部位^[1]。与附件骨折相比, 胸腰椎压缩骨折通常没有明显的症状, 容易导致临床医生的漏报。因此, 需要找到一种准确且有效的检查方法来发现和定位胸腰椎压缩骨折, 以便及时地治疗和预防相关并发症。

目前, MRI 是诊断急性椎体骨折的金标准^[2,3]。但由于 MRI 检查费用较高、耗时较长且禁忌症较多等特点, 其应用常受到限制。传统 CT 可以观察到骨皮质的细微改变, 但在鉴别急性和慢性骨折方面缺乏准确性^[4]。近年来, 能谱 CT 在临床中的应用显著增加, 多种后处理算法已被开发出来^[5-7], 它们的性能越来越受到放射科医生和临床医生的关注。

对于急性椎体压缩骨折, 已有研究表明双能 CT (dual-energy computed tomography, DECT) 衍生的虚拟无钙 (virtual non calcium, VNCa) 技术诊断骨髓水肿的准确率很高^[8-10]。与钙相比, 羟基磷灰石 [Hydroxyapatite, HAP, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] 与骨矿物质的真实成分具有更高的相似性^[11]。然而, DECT 虚拟无羟基磷灰石 (virtual non Hydroxyapatite, VN-HAP) 技术用于检测异常水肿的实际有效性尚不明确。本研究的目的是以 MRI 为参照标准, 利用能谱 CT 物质分离技术对骨折椎体内的水-HAP、水-钙物质对进行定量分析, 探讨能谱 CT 虚拟无钙及虚拟无钙技术对急、慢性椎体骨质疏松性骨折的诊断效能。

材料与方法

1. 研究对象

回顾性收集 2021 年 10 月—2022 年 5 月在本院同时接受能谱 CT、MRI 以及双能 X 射线骨密度仪 (dual-energy X-ray absorptiometry, DXA) 检查的患者的病例资料。本研究得到医院医学伦理委员会的批准, 所有参与者均签署书面知情同意书。纳入标准: ①骨质疏松性椎体骨折患者; ②临床及影像资料完整。排除标准: ①脊柱术后的患者; ②影像图像质量不佳 (伪影遮盖脊柱) 的患者; ③CT、MRI 及 DXA 检查平均间隔时间超过 3 天的患者。最终纳入 90 例患者的病例资料, 男 51 例, 女 39 例, 年龄 40~90 岁, 平均 69.24 ± 12.68 岁。

2. 扫描方法

DXA 检查采用美国 HOLOGIC 公司骨密度仪, 使用腰椎标准体位, 对患者椎体进行扫描, 去除明显增生、硬化的椎体后, 通过后处理获得腰椎 T 值。

采用 GE Healthcare Discovery MR750 3.0T MR 仪对脊柱进行 MRI 检查。矢状面 T_1 WI: TR 560 ms,

TE 最小满, 层厚 4 mm; 间隔 2 mm; 激发次数 (NEX) 4。矢状面 T_2 WI: TR 3000 ms, TE 100 ms, 层厚 4 mm, 间隔 2 mm, NEX 2。矢状面 T_2 加权脂肪抑制成像: TR 1800 ms, TE 120 ms, 层厚 4 mm; 间隔 2 mm。

采用 GE Revolution CT 机进行双能 CT 扫描。管电压为 80/140 kV, 层厚与间隔均为 5 mm, 薄层 1.25 mm, 螺距 0.984, 球管旋转时间 0.8 s/转, 重建模式为 Std, 自适应统计迭代重建 (adaptive statistical iterative reconstruction V, Asir-V) 为 40%。

3. 数据采集与分析

所有 CT 和 MR 图像均从 PACS 中检索, CT 和 MRI 之间的时间间隔 ≤ 3 天。骨髓水肿在 MRI 上的信号特点为: T_1 WI 为低信号, T_2 WI 为不均匀高或低信号, T_2 WI 压脂为不均匀高信号。根据椎体在 MRI 上的信号特点, 将骨质疏松性椎体骨折分为急性骨折组和慢性骨折组: ①急性骨折组为伴或不伴骨折线的骨髓水肿的椎体; ②慢性骨折组为无骨髓水肿的椎体。所有椎体的 MR 图像均由两名具有 3 年以上 MRI 诊断经验的医师进行双盲测定, 意见不同时协商解决。

参考 Genant 椎体骨折分级标准^[12], 在脊柱矢状面图像上, 根据椎体高度丢失程度进行椎体压缩骨折程度分级: 1 级, $< 25\%$; 2 级, $25\% \sim 40\%$; 3 级, $> 40\%$ 。所有图像均采用骨窗重建, 层厚为 2 mm。

将能谱 CT datefile 1.25 mm 序列的所有图像传送到 AW4.72 后处理计算机, 分别测量骨质疏松性骨折椎体的 HAP-水、钙-水值。取椎体矢状面正中间层面, 将圆形感兴趣区 (region of interest, ROI) 绘制在椎体高度保留最高的位置, 避开椎体静脉丛、骨皮质、骨质增生等 (图 1)。

4. 统计分析

采用 SPSS 25.0 (IBM SPSS Statistics 25; www.ibm.com/legal/copytrade.shtml) 及 Medcalc 19.0.4 软件 (<https://www.medcalc.org/>) 进行统计学分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验对数据进行正态分布检验, 符合正态分布的数据以均数 $\pm$ 标准差表示, 不符合正态分布的数据以中位数 $\pm$ 四分位间距表示。符合正态分布数据两组间比较采用独立样本 t 检验, 三组间比较采用单因素方差分析 (analysis of variance, ANOVA), 其中两两比较使用 LSD 法。不符合正态分布的数据组间比较采用非参数检验。采用 Medcalc 软件进行受试者操作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析, 计算曲线下面积 (area under curve, AUC), 依据约登指数确定临界值、特异度以及敏感度。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

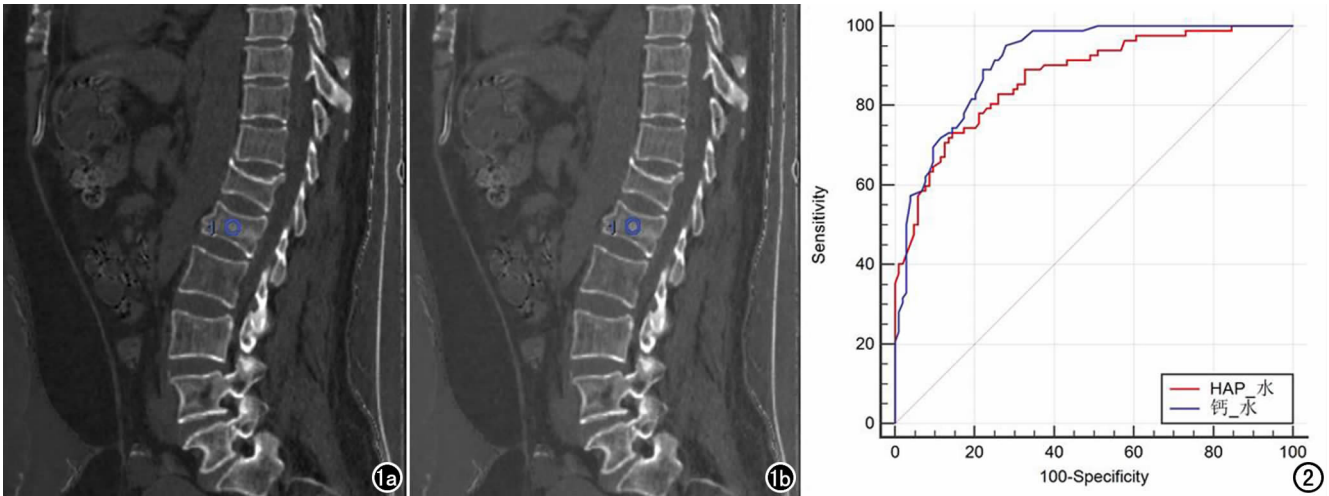


图 1 能谱 CT 基物质图像 ROI 区选取,在骨折椎体保留高度最高层面勾画 ROI。a)HAP-水图;b)钙-水图。
图 2 HAP-水、钙-水值鉴别急、慢性椎体脆性骨折的 ROC 曲线,钙-水的 AUC 最大,为 0.913。

结 果

1. 研究群体

本研究共纳入的 90 名患者中,包括 186 个骨折椎体(107 个胸椎,79 个腰椎)。其中,急性脆性骨折椎体 82 个(44.1%),慢性脆性骨折椎体 104 个(55.9%),急、慢性脆性骨折组间性别及年龄差异无统计学意义($P>0.05$,表 1)。

表 1 急、慢性脆性骨折组间一般资料分析

临床资料	急性脆性骨折组	慢性脆性骨折组	χ^2/Z	P
性别/例			2.903 ^a	0.088
男	45(54.9%)	44(42.3%)		
女	37(45.1%)	60(57.7%)		
年龄/岁	68±21	76±16	1.540 ^b	0.123

注:年龄以中位数±四分位间距表示;^a组间比较采用卡方检验;^b组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。

2. 急、慢性骨折椎体间 HAP-水、钙-水值比较

以脊柱 MR 影像为参照标准,将骨折椎体分为两组。采用两个独立样本 t 检验对 HAP-水、钙-水值进行统计分析,急性脆性骨折组的椎体的 HAP-水、钙-水值均高于慢性脆性骨折组的椎体,且差异均有统计学意义($P<0.05$,表 2)。

表 2 急、慢性脆性骨折组间各基物质对值比较

基物质对	急性脆性骨折组	慢性脆性骨折组	t	P
HAP-水	999.95±11.66	981.23±11.67	10.865	<0.001
钙-水	1045.48±18.20	1008.82±20.83	12.590	<0.001

根据 Genant 椎体骨折分级标准,将压缩骨折分为轻、中、重度骨折,经独立样本 t 检验及独立样本

Mann-Whitney U 检验得出,在不同压缩程度下 HAP-水、钙-水值在急、慢性脆性骨折组间差异均有统计学意义($P<0.05$,表 3)。

表 3 不同压缩程度骨折椎体急、慢性组间各基物质对值比较

不同压缩程度基物质对	急性脆性骨折组	慢性脆性骨折组	t/Z	P
轻度				
HAP-水	999.91±10.19	983.28±9.90	5.109	<0.001
钙-水	1045.65±18.22	1019.32±30.01	3.672	0.001
中度				
HAP-水	999.32±10.38	979.89±12.96	5.855	<0.001
钙-水	1047.00±17.05	1009.00(40.00)	5.247 [*]	<0.001
重度				
HAP-水	1000.55±14.56	981.51±11.40	6.502	<0.001
钙-水	1040.00(32.00)	1007.13±15.80	6.515 [*]	<0.001

注:^{*}采用 Mann-Whitney U 检验,其他为 t 检验。

3. 轻、中、重度骨折椎体间 HAP-水、钙-水值比较

经单因素 ANOVA 检验,三组间 HAP-水、钙-水值差异均具有统计学意义($P<0.05$),见表 4。三组之间两两比较,轻度与中度压缩骨折椎体间 HAP-水、钙-水值差异均具有统计学意义($P<0.05$);中度与重度压缩骨折椎体间 HAP-水、钙-水值差异无统计学意义($P>0.05$),轻度与重度压缩骨折椎体间,HAP-水、钙-水值差异均有统计学意义($P<0.05$),见表 5。

4. ROC 曲线分析

HAP-水区分椎体急、慢性脆性骨折的 ROC 曲线的 AUC 为 0.871(95%CI:0.815~0.916)。其中 HAP-水值>992.5 时,诊断为急性脆性骨折的敏感度及特异度分别为 73.17%、85.58%,Youden 指数为 0.588。钙-水区分胸腰椎急、慢性脆性骨折的 ROC 曲线的 AUC 为 0.913(95%CI:0.863~0.949),钙-水值

表 4 不同压缩程度间椎体的 HAP-水、钙-水值比较

基物质对	轻度	中度	重度	F	P
HAP-水	995.31±12.52	987.81±15.29	987.34±15.19	5.022	0.008
钙-水	1038.58±24.68	1023.70±28.82	1018.28±24.03	9.568	<0.001

>1018 时诊断为急性脆性骨折的敏感度及特异度分别为 95.12%、72.12%，Youden 指数为 0.672。两者间的 AUC 差异无统计学意义(图 2,表 6)。

表 5 轻、中、重度压缩骨折组各基物质对值两两比较的 P 值

组间比较	HAP-水	钙-水
轻度与中度	0.011	0.004
中度与重度	0.853	0.226
轻度与重度	0.003	0.000

表 6 各基物质对的诊断效能分析

基物质对	AUC(95%CI)	敏感度	特异度	Youden index	P
HAP-水	0.87(0.82~0.92)	73.17%	85.58%	0.588	0.128
钙-水	0.91(0.86~0.95)	95.12%	90.24%	0.672	

讨 论

骨质疏松性椎体骨折(osteoporotic vertebral fractures,OVFs)是骨质疏松的主要并发症,常见于胸腰椎,也被称为脆性骨折。由于体内破骨细胞和成骨细胞活性的失衡,脂肪细胞增多,从而导致骨脆性增加,特别是在松质骨比例较高的干骺端区域,如脊柱、髋关节、桡骨远端、股骨近端或肱骨近端。然而,值得注意的是,未得到明确诊断的骨折并不代表没有症状,它们通常与背部疼痛和活动减少有关,经常被患者及医生忽视,或者被归因于其他常见的病因,如退行性关节疾病^[13]。因此,及时准确地诊断脆性骨折尤为重要。

MRI 上发现的水肿是由于正常脂肪骨髓被更富含水的材料取代导致的,与机械应力损伤和功能不全骨折相关的病理特点是纤维化、骨髓脂肪坏死、骨小梁微骨折和矿化不良^[14]。急性骨折可以破坏骨髓小梁,导致出血或间质液体渗漏到骨髓间隙。能谱 CT 可以通过应用两种不同的 X 射线能谱,把任意某个组织分离成两种不同的基物质,其中,区分椎体内钙、水、脂肪等不同的物质成分,称为物质分离技术^[15]。若分离出的这两种基物质为该组织的主要成分,则可以反映该物质在体内的存在情况。物质分离技术可以通过减去骨小梁上的 HAP 或钙的影响,直接显示椎体中水含量,从而更有效地检测骨髓水肿的差异。

已有多项研究表明,能谱 CT 虚拟无钙技术在诊断腕骨、膝关节及跟骨骨髓水肿方面展现了较高的效能^[16-19]。对于急性椎体骨折,不管是颜色编码 VNCa 图像进行的定性评估,还是绘制 ROI 进行的定量评估,其在诊断骨髓水肿方面同样具有很高的准确性、特异性及敏感性^[8-10]。Pan 等^[20]通过能谱 CT 的 HAP-水分解技术初步证实了 VNHAP 图像在分析骨髓水肿范围方面同样具有较高的准确性。到目前为止,还没有通过能谱 CT 物质分离技术同时对 HAP-水、钙-

水两种物质对进行定量评估,比较两者对急性骨质疏松性骨折的诊断效能。此外,本研究没有对压缩骨折程度进行分级,全面评估了两者在不同压缩骨折程度下对急性压缩骨折的诊断效能。

本研究基于能谱 CT 物质分离技术重建 VN-HAP、VNCa 图像,测量骨折椎体内 HAP-水、钙-水物质对的值。在本研究中急性压缩骨折组各基物质对的值均高于慢性压缩骨折组,差异均具有统计学意义。这可以通过以下事实来解释:液体(相对高密度)可以替代黄色骨髓(相对低密度),从而导致测量中 CT 值增加^[21]。钙-水的 AUC 为 0.913,HAP-水的 AUC 为 0.871,但差异没有统计学意义($P=0.128$),这也说明了与钙相比,HAP 同样接近骨矿物质的真实成分。本研究对压缩程度进行分级,得出在不同压缩程度下两种基物质对值在急、慢性压缩骨折组间差异均有统计学意义,说明压缩骨折的程度并不会影响其在鉴别急、慢性压缩骨折的方面的效能。此外,轻、中度压缩骨折及轻、重度压缩骨折组间 HAP-水、钙-水值差异均有统计学意义,但中度压缩骨折组与重度压缩骨折组之间差异无统计学意义($P>0.05$),这可能与本研究样本量少有关。

本研究有几个局限性。第一,本研究是一项单中心小样本回顾性研究,下一步需要进行多中心大样本研究来验证。第二,本研究是从能谱 CT 图像的正中矢状位层面来获取 ROI 进行分析的,这可能并不能充分代表整个椎体,需要进一步多方位、多层面来验证结果的可靠性。第三,本研究没有结合两者的颜色编码图像进行定性评估,下一步需要进一步补充研究来全面评估。

综上所述,双能 CT 重建的虚拟无钙及虚拟无羟图像在定量评估骨质疏松性骨折椎体骨髓水肿方面具有较高的特异性和诊断准确性。对于有 MRI 禁忌症的患者,双能 CT 可以作为一种替代检查方式。

参考文献:

[1] Donnally III CJ, DiPompeo CM, Varacallo M. Vertebral compression fractures[M]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023. (2022-11-14).

[2] Kazawa N. T₂WI MRI and MRI-MDCT correlations of the osteoporotic vertebral compressive fractures[J]. Eur J Radiol, 2012, 81(7): 1630-1636.

[3] Szaro P, Geijer M, Solidakis N. Traumatic and non-traumatic bone marrow edema in ankle MRI: a pictorial essay[J]. Insights Imaging, 2020, 11(1): 97.

[4] Memarsadeghi M, Breitenseher MJ, Schaefer-Prokop C, et al. Occult scaphoid fractures: comparison of multidetector CT and MR imaging——initial experience [J]. Radiology, 2006, 240(1): 169-176.

[5] Agostini A, Borgheresi A, Mari A, et al. Dual-energy CT: theoretic-

- cal principles and clinical applications[J]. Radiol Med, 2019, 124(12):1281-1295.
- [6] 范芮,孙美玉. 双能 CT 在直肠癌的应用进展[J]. 放射学实践, 2019, 34(3):346-349.
- [7] 赵晓薇,潘自来,吴华伟. 能谱 CT 在中晚期肺癌疗效评估中的应用[J]. 放射学实践, 2020, 35(6):813-815.
- [8] Bierry G, Venkatasamy A, Kremer S, et al. Dual-energy CT in vertebral compression fractures: performance of visual and quantitative analysis for bone marrow edema demonstration with comparison to MRI[J]. Skeletal Radiol, 2014, 43(4):485-492.
- [9] Wang Y, Chen Y, Zheng H, et al. Detection of different degree traumatic vertebral bone marrow oedema by virtual non-calcium technique of dual-source dual-energy CT[J]. Clin Radiol, 2020, 75(2):156. e11-156. e19.
- [10] Cavallaro M, D'Angelo T, Albrecht MH, et al. Comprehensive comparison of dual-energy computed tomography and magnetic resonance imaging for the assessment of bone marrow edema and fracture lines in acute vertebral fractures[J]. Eur Radiol, 2022, 32(1):561-571.
- [11] Liao EY, Wu XP, Luo XH, et al. Establishment and evaluation of bone mineral density reference databases appropriate for diagnosis and evaluation of osteoporosis in Chinese women[J]. J Bone Miner Metab, 2003, 21:184-192.
- [12] Genant HK, Wu CY, van Kuijk C, et al. Vertebral fracture assessment using a semiquantitative technique[J]. J Bone Miner Res, 1993, 8(9):1137-1148.
- [13] 贾龙,付丽明,范锦勤. 骨质疏松症与骨关节病[J]. 韶关学院学报(自然科学版), 2005, (3):112-115.
- [14] Akhavan S, Martinkovich SC, Kasik C, et al. Bone marrow edema, clinical significance, and treatment options: a review[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2020, 28(20):e888-e899.
- [15] Cicero G, Ascenti G, Albrecht MH, et al. Extra-abdominal dual-energy CT applications: a comprehensive overview[J]. Radiol Med, 2020, 125(4):384-397.
- [16] Ali IT, Wong WD, Liang T, et al. Clinical utility of dual-energy CT analysis of bone marrow edema in acute wrist fractures[J]. Am J Roentgenol, 2018, 210(4):842-847.
- [17] Booz C, Noske J, Albrecht MH, et al. Traumatic bone marrow edema of the calcaneus: evaluation of color-coded virtual non-calcium dual-energy CT in a multi-reader diagnostic accuracy study[J]. Eur J Radiol, 2019, 118:207-214.
- [18] Booz C, Nöske J, Lenga L, et al. Color-coded virtual non-calcium dual-energy CT for the depiction of bone marrow edema in patients with acute knee trauma: a multireader diagnostic accuracy study[J]. Eur Radiol, 2020, 30(1):141-150.
- [19] Chen M, Herregods N, Jaremko JL, et al. Bone marrow edema in sacroiliitis: detection with dual-energy CT[J]. Eur Radiol, 2020, 30(6):3393-3400.
- [20] Pan J, Yan L, Gao H, et al. Fast kilovoltage (KV)-switching dual-energy computed tomography hydroxyapatite (HAP)-water decomposition technique for identifying bone marrow edema in vertebral compression fractures[J]. Quant Imaging Med Surg, 2020, 10(3):604-611.
- [21] Mandalia V, Henson JH. Traumatic bone bruising——a review article[J]. Eur J Radiol, 2008, 67(1):54-61.

(收稿日期:2022-07-21 修回日期:2022-10-21)