

· 骨骼肌肉影像学 ·

双源双能量 CT 视觉评估和定量分析对椎体骨髓水肿的诊断价值

张发平, 束玲玲, 戴春宏, 邢斌, 宋方, 朱通

【摘要】 目的:探讨双源双能量 CT(DECT)虚拟去钙(VNCA)技术中视觉评估(VE)和定量分析对椎体骨髓水肿(BME)的诊断价值。**方法:**回顾性分析 2020 年 8 月至 2022 年 4 月 60 例胸腰椎新鲜骨折(观察组)及 60 例陈旧性骨折(对照组)患者的临床及影像资料。以 MRI 结果为参考,将 DECT 的 VE 结果与之对比,分析 1.75 和 1.45 斜率对 BME 的诊断效能;比较新鲜与陈旧性骨折的定量参数(vCT、rCT、CaD、FF、 Δ vCT)差异并绘制 ROC 曲线,采用 Z 检验比较曲线下面积(AUC)差异;进一步评估 VE 与定量参数联合的诊断效能。**结果:**1.75 与 1.45 斜率 VE 诊断新鲜与陈旧性骨折的敏感度分别为 88.0%、69.3%,特异度分别为 93.8%、87.5%,1.75 斜率的诊断符合率为 90.3%,高于 1.45 斜率的 78.7%,差异有统计学意义($\chi^2=7.987, P<0.05$)。椎体新鲜与陈旧性骨折的 vCT、rCT、FF、 Δ vCT 值差异均有统计学意义(P 均 <0.05),其中 Δ vCT 值的 AUC 值最高(0.96),诊断阈值为 28.5 HU 时,敏感度、特异度分别为 89.3%、96.2%,与其他定量参数差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。VE 的 Youden 指数(0.82)高于 vCT(0.62)而略低于 Δ vCT(0.86);VE 与定量参数联合的 AUC 值(0.95)低于 Δ vCT。**结论:**VNCA 技术 VE 和定量分析对椎体骨髓水肿均具有较高的诊断效能,两者联合的诊断价值不高。

【关键词】 椎体; 骨髓水肿; 双能量 CT; 虚拟去钙技术; 骨折, 压缩性; 视觉评估

【中图分类号】 R683.2; R814.42 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)01-0115-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.01.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of diagnostic efficacy of dual-source dual-energy CT in visual evaluation and quantitative analysis of vertebral bone marrow edema ZHANG Fa-ping, SHU Ling-ling, DAI Chun-hong, et al. Department of Radiology, Wannan Rehabilitation Hospital, Anhui 241000, China

【Abstract】 Objective: The purpose of this study was to explore the value of the virtual noncalcium (VNCA) technique of dual-source dual-energy CT (DECT) in visual evaluation (VE) and quantitative analysis of vertebral bone marrow edema (BME). **Methods:** The data of 60 cases with fresh thoracolumbar fractures (observation group) and 60 cases with old fractures (control group) in our hospital from August 2020 to April 2022 were retrospectively analyzed. Using MRI results as a reference, the diagnostic efficacy of 1.75 and 1.45 slope to identify BME was analyzed by comparing the VE results of DECT with those of MRI; quantitative parameters (vCT, rCT, CaD, FF, Δ vCT) of fresh and old fractures were compared, and ROC curves were drawn, and AUC values were compared by Z test. The effect of VE combined with quantification was further evaluated. **Results:** The sensitivity and specificity of 1.75 and 1.45 slope VE were 88.0%, 93.8%, 69.3%, and 87.5%, respectively. The diagnostic accuracy of 1.75 slope was 90.3%, which was higher than that of 1.45 slope at 78.7%, and the difference was statistically significant ($\chi^2=7.987, P<0.05$); the values of vCT, rCT, FF and Δ vCT of fresh vertebral and old vertebral fractures were statistically significant, among which the AUC of Δ vCT was the highest (0.96), the diagnostic value was 28.5HU, the sensitivity and specificity were 89.3% and 96.2% respectively, and the differences were statistically significant ($P<0.05$); the Youden index of VE was higher than vCT but slightly lower than Δ vCT (0.82 vs 0.62, 0.86); the AUC value of VE combined with quantitative parameters (0.95) was lower than Δ vCT. **Conclusion:** VE and quantitative analysis of the VNCA technique have high diagnostic efficacy, but the combined diagnostic value of the VNCA technique is not high.

作者单位: 241000 安徽, 安徽省皖南康复医院放射科(张发平、束玲玲、宋方、朱通), 骨一科(戴春宏、邢斌)

作者简介: 张发平(1982-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 副主任医师, 主要从事中枢及骨肌影像诊断工作。

基金项目: 皖南医学院教学医院科研专项基金(JXY202030); 芜湖市科技计划项目(2021cg39)

【Key words】 Vertebral; Bone marrow edema; Dual-energy CT; Virtual noncalcium technology; Fracture, compressibility; Visual evaluation

椎体压缩性骨折是一种临床常见的骨折类型,发病率逐年增高,该病可导致患者生活质量下降,死亡率增加。识别新鲜和陈旧性骨折对临床有重要意义,骨髓水肿(bonemarrow edema, BME)是新鲜椎体骨折的标志。传统常规 CT 无法识别 BME, MRI 显示效果良好,目前是影像诊断的金标准,但是其检查时间长及禁忌症多等限制了急诊应用^[1]。双能量 CT(dual-energy CT, DECT)虚拟去钙技术(virtual noncalcium, VNCa)通过物质分离去除钙的干扰,能够识别 BME,有临床应用价值和科研潜力^[2]。然而该技术视觉评估(visual evaluation, VE)和定量分析的优劣存在争议, BME 定量研究的诊断取值又各不相同,给临床应用带来困扰^[3]。本研究通过使用 VNCa 技术识别 BME,旨在分析 VE 和定量分析的诊断效能。

材料与方法

1. 病例资料

前瞻性搜集 2020 年 8 月至 2022 年 4 月安徽省皖南康复医院骨一科连续收治的 60 例确诊为胸腰椎新鲜骨折的患者(观察组),其中男 23 例,女 37 例,年龄 24~91 岁,平均(59.30 ± 16.5)岁。病例纳入标准:①临床及影像学确诊为新鲜椎体骨折;②发病时间 ≤ 14 天;③MRI-CT 检查间隔时间 ≤ 48 小时;④年满 18 周岁。病例排除标准:①CT 或 MRI 图像质量差;②骨肿瘤、影响骨代谢疾病及椎体手术史的患者;③椎体高度 < 4 mm。同时搜集与观察组性别、年龄相匹配的 60 例陈旧性胸腰椎骨折患者作为对照组,其中男 27 例,女 33 例,年龄 20~90 岁,平均(61.4 ± 17.3)岁,排除标准同观察组。本研究经医院研究伦理委员会批准,所有患者签署知情或泛知情同意书。

2. 检查方法

CT 检查采用 Siemens Definition Flash 双源 CT 行胸腰椎扫描。患者取仰卧头足位,根据需求确定扫描范围, A/B 管电压为 80 kV/Sn 140 kV, 自动毫安(CAREDose 4D), 转速 0.5 s/r, 螺距 0.6, 准直 32×0.6 , 重建卷积核 D34f 和 D50f。

MRI 检查采用 Siemens Essenza 1.5T 磁共振扫描仪。行常规胸腰椎 MRI 扫描,其中矢状面 FS-T₂WI 采用 TSE 序列, 翻转恢复(IR)脂肪抑制技术, TR 4300 ms, TE 81 ms, TI 160 ms; 层厚 3.5 mm, 层间距 0.35 mm, 矩阵 256×256 , 平均采集次数 2。

3. 图像后处理

采用 Siemens 工作站(Syngo.via, VB10B)进行后

处理。VNCa 彩色编码图:采用 DECT 程序装载后选择骨髓(Bone Marrow)软件,默认彩色编码、阈值和分辨率;VNCa 灰度图:选择 Liver VNC(Liver Virtual Non-Contrast, Liver VNC)软件分析,分辨率 3, 碘斜率修改为 1.45 和 1.75 作为钙斜率, 阈值 1000 HU; 常规 CT 图:使用混合比例 0.5(Mixed 0.5)线性融合平均加权图像替代。采用横轴面、矢状面和冠状面多平面图像分析,层厚 1 mm。

4. 图像分析

MRI 图像分析:由 2 位放射科医师评估胸腰椎 MRI 图像,根据 MRI 的信号特点将目标椎体分为 BME 和非 BME,即新鲜和陈旧骨折,意见不一致时通过协商取得一致。

CT 图像视觉定性分析:由 2 位不知研究内容的放射科医师(放射诊断经验分别为 8 年和 7 年)对两组 DECT 图像进行独立分析。VNCa 彩色编码图上 BME 表现为绿色, VNCa 灰度图上 BME 为高密度,可自由在图像左右侧分别调整窗宽窗位和彩色编码阈值,并综合多平面重组图像判断,两者共同协商一致为最终结果。

CT 图像多参数定量分析:最后由 2 位医师在 VNCa 灰度图上进行测量,在目标椎体 BME 明显处放置感兴趣区(ROI), ROI 大小为 $2 \sim 10 \text{ mm}^2$, 记录 VNCa CT 值(vCT)、常规 CT 值(regular CT, rCT)、钙浓度(calcium density, CaD)、脂肪分数(fat fraction, FF)。移动 ROI 至邻近上下椎体相同区域,取均值,并计算其与目标椎体的差值(ΔvCT)。若邻近椎体不利于测量,则跳过该椎体。取两者均值作为最终结果。

分析方法:以 MRI 分析结果为金标准,将 DECT 图像 VE 结果与之进行对比,比较 1.75 与 1.45 斜率 VE 的诊断效能。比较新鲜与陈旧骨折的定量参数差异,绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线,比较不同参数的诊断效能。分析 VE 和定量参数联合的诊断效能,同时评估观察者间的一致性。

5. 统计学分析

采用 SPSS 20.0 和 MedCalc 20.1 软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,计数资料以例或百分比表示。采用卡方(χ^2)检验比较计数资料的组间差异,采用 t 检验比较两样本计量资料的组间差异。绘制 ROC 曲线,以 Youden 值作为截断值,并使用 Z 检验比较曲线下

积(area under curve, AUC)的差异,多参数联合使用二元 Logistic 回归分析;两组连续变量间和分类变量样本间的一致性比较,使用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)和 Kappa 一致性检验。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1.一般资料情况

观察组与对照组的男女比(分别为 23/37、27/33)差异无统计学意义($\chi^2=0.549, P>0.05$);两组年龄[分别为(59.30±16.5)和(61.4±17.3)岁]差异无统计学意义($t=-0.669, P>0.05$)。从发病至影像学检查间隔时间≤14 d,平均(3.85±3.70) d。CT 与 MRI 检查间隔时间≤24 h,平均(9.23±6.43) h。观察组 60 例患者共计新鲜椎体骨折 75 个,其中胸椎 31 个,腰椎 44 个。对照组 60 例患者共计陈旧性椎体骨折 80 个,其中胸椎 35 个,腰椎 45 个。

2.1.75 和 1.45 斜率主观视觉评估

2 位医师 1.75 与 1.45 斜率的主观 VE 结果不同,以 1.75 斜率为佳。1.75 斜率的诊断符合率为 90.3%,高于 1.45 的 78.7%,差异有统计学意义($\chi^2=7.987, P<0.05$,表 1、图 1、2)。2 位医师间 1.75 斜率诊断结果的一致性较高(Kappa=0.844, $P<0.05$)。

表 1 DECT 不同斜率诊断新鲜椎体骨折的效能比较 (%)

指标	1.75 斜率	1.45 斜率	χ^2 值	P 值
敏感度	88.0(65/75)	69.3(52/75)	4.92	0.027
特异度	93.8(75/80)	87.5(70/80)	1.84	0.175
阳性预测值	92.9(65/70)	83.9(52/62)	2.64	0.104
阴性预测值	88.2(75/85)	75.3(70/93)	4.94	0.026
诊断符合率	90.3(140/155)	78.7(122/155)	7.99	0.005
Youden 指数	0.82	0.57		

注: $P<0.05$,差异有统计学意义

3.DECT 客观定量参数分析

胸腰椎体新鲜与陈旧性骨折的 DECT 定量参数 vCT、rCT、FF、 Δ vCT 差异均有统计学意义(P 均 <0.05 ,表 2)。2 位医师间 1.75 斜率的 vCT 值一致性良好(ICC=0.85, $P<0.05$)。DECT 定量参数 Δ vCT 值鉴别新鲜与陈旧性骨折的 AUC 值最大(0.96);当 Δ vCT 值 >28.5 HU 时,诊断敏感度、特异度及 Youden 指数分别为 89.33%、96.25%、0.86(表 3)。

表 3 DECT 定量参数对新鲜与陈旧性椎体骨折的鉴别诊断效能

参数	截断值	AUC	敏感度(%)	特异度(%)	Youden 指数	Z 值	P 值
Δ vCT(HU)	>28.5	0.96	89.3	96.2	0.86	29.67	<0.05
vCT(HU)	>39.2	0.88	70.7	91.3	0.62	14.00	<0.05
FF(%)	≤ 7.1	0.84	77.3	86.3	0.64	10.52	<0.05
rCT(HU)	>172.4	0.77	73.3	72.5	0.46	7.22	<0.05
CaD(mg/cm ³)	>6.7	0.55	44.0	72.5	0.17	1.15	>0.05

注:vCT: VNCA CT 值;rCT:常规 CT 值;FF:脂肪分数;CaD:钙浓度; Δ vCT:目标椎体与相邻椎体 VNCA CT 值的差值。

表 2 胸腰椎体新鲜与陈旧性骨折的 DECT 定量参数比较

指标	观察组	对照组	t 值	P 值
n	75	80		
Δ vCT(HU)	64.51±3.83	3.80±1.75	10.46	0.000
vCT(HU)	55.88±35.43	2.99±3.04	14.72	0.000
rCT(HU)	224.46±86.56	139.44±90.33	5.98	0.000
FF(%)	-5.54±2.84	33.68±30.98	-8.69	0.000
CaD(mg/cm ³)	6.15±3.58	7.45±16.62	-0.66	0.509

注:vCT: VNCA CT 值;rCT:常规 CT 值;FF:脂肪分数;CaD:钙浓度; Δ vCT:目标椎体与相邻椎体 VNCA CT 值的差值。 $P<0.05$,差异有统计学意义

4.主观视觉与客观定量 ROC 分析

Δ vCT 的 AUC 值(0.96)高于 vCT、FF 和 rCT (0.88、0.84、0.77),差异均有统计学意义($Z=3.18$ 、3.54、4.812, P 均 <0.05);VE 的 Youden 指数为 0.82,高于 VNC 的 0.62,略低于 Δ vCT 的 0.86(图 3);多参数联合 Logistic 回归分析中,仅 VE 和 vCT 纳入模型,预测概率 ROC 的 AUC 值为 0.95,低于单独 Δ vCT 的 AUC 值。

讨 论

1.BME 影像表现的病理基础

识别 BME 是诊断椎体新鲜骨折的关键。BME 被认为是以骨基质水肿及炎症浸润影响黄骨髓,导致血管通透性增加,水分增多的一种征象^[4]。椎体骨折可导致血管破裂出血,周围组织间质液渗出过多,致使 MRI 的 T1 及 T2 弛豫时间延长,在 CT 上表现为高衰减即高密度。由于椎体出血水肿的密度远低于周围骨质,易受其遮盖,此外椎体压缩及骨痂形成亦可高于周围骨质,rCT 难以评估 BME 并高度依赖于观察者的经验,VNCA 技术能有效消除不同经验医生的诊断效能差距^[5]。VNCA 三物质分离技术可以分离钙,因为钙 CT 值显著高于黄骨髓和红骨髓,纯钙到黄骨髓及红骨髓近似平行线,该线斜率被认为就是钙的特征斜率,将钙质去除可直接观察骨髓的密度变化^[6]。

2.不同斜率对 VE 的影响

关于 BME 的 VE 有两种方法实现,一是自带彩色编码的骨髓软件,此外将 Liver VNC 软件的碘斜率修改为钙特征斜率使用,前者快捷但是无斜率参数,而后者最佳钙斜率值尚未统一,给临床实践带来一定困扰,目前二代双源使用较多的为 1.45 和 1.75^[7-8]。

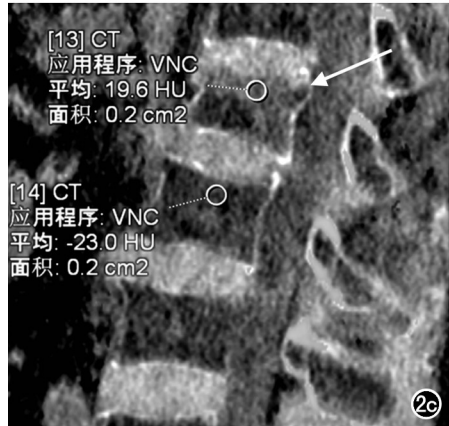


图1 患者,女,69岁,车祸伤致腰部疼痛1天。a)常规CT示腰2和腰3椎体压缩变扁,腰2椎体(上箭)密度不均并骨皮质不连续,考虑为新鲜骨折,腰3椎体(下箭)是否为新鲜骨折有争议;b)VNCA彩色编码图显示腰2椎体BME(绿色伪彩,箭),腰3椎体无BME;c)VNCA灰度图(1.75斜率)示腰2椎体BME(高密度影,箭),腰3椎体无BME;d)FS-T₂WI示腰2椎体可见稍高信号BME区,为新鲜骨折,腰3椎体为陈旧性骨折。

图2 患者,女,61岁,外伤致腰部疼痛1天。a)常规CT示腰1椎体压缩变扁(箭);b)VNCA彩色编码图显示腰1椎体上缘少许BME(绿色伪彩,箭);c)VNCA灰度图(1.75斜率)示腰1椎体BME(高密度影,箭),ROI的vCT值为19.6HU,根据vCT的截断值>39.2,纳入阴性,而ΔvCT值为42.6HU,根据截断值>28.5,纳入阳性;d)VNCA灰度图(1.45斜率)未见BME;e)FS-T₂WI示腰1椎体新鲜骨折,BME范围与1.75斜率图一致。

的诊断效能优于 1.45 斜率,敏感度、特异度、诊断符合率分别达 88.0%、93.8%、90.3%,敏感度较其他研究结果略高,而特异度和诊断符合率较低,可能是既往研究缺少标准的对照组,而采用患者无 BME 的椎体作

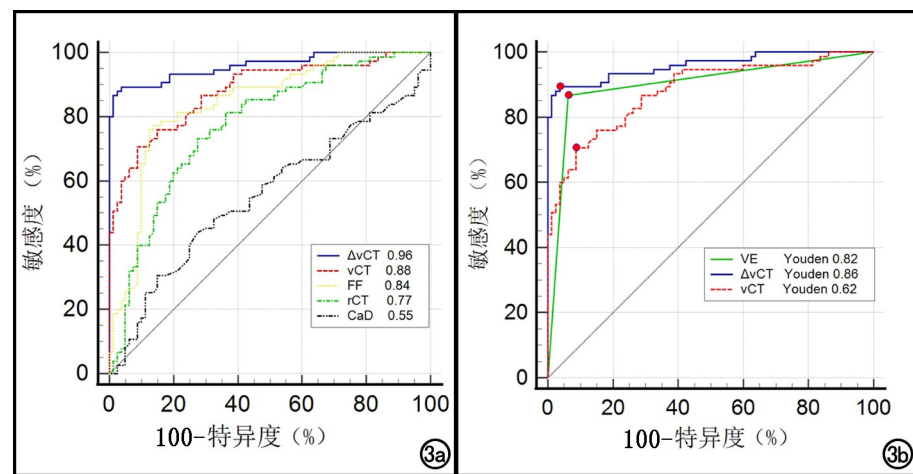


图3 a) VNCA 技术多定量参数诊断椎体新鲜骨折的 ROC 曲线; b) VE、 ΔvCT 和 vCT 的 ROC 曲线, VE 的 Youden 指数为 0.82。

为对照,造成阴性样本量占比大(167/193、206/253),导致特异度和诊断符合率的升高^[11]。本研究使用陈旧性椎体骨折作为对照组,不包括其他非目标椎体的阴性椎体,结果更具有临床意义。1.45 较 1.75 斜率图像钙质去除得更彻底,但诊断效能反而更低,推测该斜率率和出血水肿物质重叠较多,在去除钙质的同时去掉了有诊断价值的物质。此外不同设备光谱分离能力有差异,一项荟萃研究显示三物质分离算法优于两物质分离算法^[12],数据的采集、后处理和可视化的方法不同,可能对结果均有影响,需要进一步研究。

3. DECT 客观定量参数对 BME 的诊断效能

BME 的客观定量研究较多,均认为椎体 BME 与非 BME 的 CT 值差异有统计学意义,本研究结论与既往研究一致,在成人的正常椎体中黄骨髓比例较高,使用 VNCA 技术去除钙质后,受脂肪的 X 光的低衰减,而 BME 区出血水肿的高衰减,造成 CT 值的差异^[13]。定量研究有较好的诊断效能,然而各研究者的诊断取值差异较大, Koch 等^[14]的研究取值 46 HU、王林等^[15]的研究取值 30.2 HU、Bierry 等^[9]的研究取值 6.5 HU,本研究取值 39.2 HU 与既往研究亦不同,考虑为不同设备、扫描协议及后处理参数的影响,此外还受患者椎体骨髓成分、水肿强度和骨密度等个体差异的影响^[16]。 ΔvCT 值是患者本身 BME 与非 BME 的差值,目的是测量出血水肿净升高的 CT 值,能有效消除个体差异的影响,取值 28.5 HU 诊断 BME 的敏感度、特异度及 AUC 值分别为 89.3%、96.2、0.96,优于 vCT 的诊断效能。椎体 BME 与非 BME 的 CaD 差异无统计学意义,可能由于骨质损伤区域内钙含量无明显变化, CaD 在损伤修复期是否有变化,需要进一步研究。意外的是 FF 具有较高诊断效能,可能是黄骨髓被出血水肿替代,比例下降所致。综上,定量分析提

供了丰富的客观数据及更多的诊断信息^[17]。

4. 主观视觉评估与客观定量参数比较

值得注意的是,本研究结果显示 VE 的诊断效能高于基于 ROI 测量的 vCT 。VE 与定量分析在诊断 BME 中的优劣尚存在争议,然而目前多数研究者认为 VE 更具优势^[18]。VE 的彩色编码图及灰度图是由软件生成的,视觉的差异取决于病变椎体与相邻椎体的 CT 值差异,而不是绝对的 CT 值改变,手动优化 VE 图的窗宽窗位,能检测相对细微的 BME 区

域,这是定量 ROI 分析无法实现的; ΔvCT 也是基于此,诊断效能较 vCT 有所提高。由于定量测量取 ROI 区域平均值,可能包括 BME 和非 BME 的组织,会低估 CT 值,而年轻患者的椎体红骨髓含量高,可能又会高估 CT 值,易造成假阴性和假阳性的结果,但定量测量相对客观,不依赖医生的经验。考虑到定量分析较为繁琐,在实际工作中优先使用 VE 评估 BME,诊断信心不足时,添加 ΔvCT 协助诊断,以取得更高的诊断效能。

本研究存在以下局限性:①尽管一致性检验结果较好,然而单中心研究,设备、扫描协议和后处理的不同,可能会影响可重复性;②研究对象存在一定选择性偏倚,临床症状较轻和危及生命的患者纳入较少;③虽然辐射剂量较低,也是不可回避的问题。

综上所述, VNCA 技术检测椎体 BME 有较高的临床应用价值, VE 中 1.75 斜率的诊断效能较高,定量分析中 ΔvCT 截断值 28.5 HU 有较高的诊断效能,临床应用中首选便捷的 VE 分析。

参考文献:

- [1] Gosangi B, Mandell JC, Weaver MJ, et al. Bone marrow edema at dual-energy CT: a game changer in the emergency department[J]. Radiographics, 2020, 40(3): 859-874.
- [2] 沈瑞, 赵昱月, 曹国平, 等. 双能量 CT 虚拟去钙化成像诊断下肢关节外伤性骨髓水肿[J]. 放射学实践, 2021, 36(2): 227-231.
- [3] Petritsch B, Kosmala A, Weng AM, et al. Vertebral compression fractures: third-generation dual-energy CT for detection of bone marrow edema at visual and quantitative analyses[J]. Radiology, 2017, 284(1): 161-168.
- [4] Guggenberger R. Dual-energy CT in the detection of bone marrow edema in the sacroiliac joints: is there a case for axial spondyloarthritis? [J]. Radiology, 2019, 290(1): 165-166.
- [5] 束玲玲, 张发平, 戴春宏, 等. 双能量 CT 虚拟去钙技术对不同经验医师诊断椎体新鲜骨折的价值[J]. 实用放射学杂志, 2022, 38(3):

- 454-458.
- [6] Liu Z, Zhang Y, Liu Z, et al. Dual-energy computed tomography virtual noncalcium technique in diagnosing osteoporosis: correlation with quantitative computed tomography[J]. J Comput Assist Tomogr, 2021, 45(3): 452-457.
- [7] Parakh A, An C, Lennartz S, et al. Recognizing and minimizing artifacts at dual-energy CT[J]. Radiographics, 2021, 41(2): 509-523.
- [8] Cao JX, Wang YM, Kong XQ, et al. Good interrater reliability of a new grading system in detecting traumatic bone marrow lesions in the knee by dual energy CT virtual non-calcium images[J]. Eur J Radiol, 2015, 84(6): 1109-1115.
- [9] 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.
- [10] 章辉庆, 刘海燕, 邱晓晖, 等. 双能量 CT 虚拟去钙图诊断椎体骨髓水肿[J]. 中国医学影像技术, 2019, 35(2): 260-263.
- [11] Mueller FC, Gosvig KK, Brgesen H, et al. Dual-energy CT for suspected radiographically negative wrist fractures: a prospective diagnostic test accuracy study[J]. Radiology, 2020, 296(3): 596-602.
- [12] Bcker HC, Wu CH, Perka C, et al. Dual-energy computed tomography in spine fractures: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Spine Surg, 2021, 15(3): 525-535.
- [13] Booz C, Nske 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.
- [14] Koch V, Mueller FC, Gosvig K, et al. Incremental diagnostic value of color-coded virtual non-calcium dual-energy CT for the assessment of traumatic bone marrow edema of the scaphoid[J]. Eur Radiol, 2021, 31(7): 4428-4437.
- [15] 王林, 陈佳佳, 龚沈初, 等. 第 3 代双源双能量 CT 虚拟去钙技术检测胸腰椎骨髓水肿的临床研究[J]. 东南大学学报(医学版), 2018, 168(2): 34-38.
- [16] De Bakker CMJ, Peedikayil T, Walker REA, et al. Diagnostic accuracy of a dual-energy computed tomography-based post-processing method for imaging bone marrow edema following an acute ligamentous knee injury[J]. Skeletal Radiol, 2022, 51(9): 1817-1827.
- [17] 李能, 邓小毅. 双能量 CT 在脊柱病变中的临床应用[J]. 放射学实践, 2022, 37(6): 690-697.
- [18] 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.

(收稿日期: 2022-11-07 修回日期: 2023-02-15)