

• 骨骼肌肉影像学 •

双能量 CT 虚拟去钙化成像诊断下肢关节外伤性骨髓水肿

沈瑞, 赵旻月, 曹国平, 郭海滨, 吴胤赞, 徐驰杰, 邓小毅

【摘要】 目的:探讨双能量 CT 虚拟去钙化(VNCa)成像在急性创伤性下肢关节骨髓水肿的诊断价值。**方法:**连续纳入 2018 年 1 月至 2019 年 5 月张家港澳洋医院 30 例急性下肢关节创伤患者。由两名放射科医师对所有病例 VNCa 图像进行评估,确定是否存在骨髓水肿。以磁共振图像作为参考标准,评估 VNCa 图像诊断下肢关节骨髓水肿敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值及准确性。测量所有区域 VNCa 图像骨髓 CT 值并采用 Mann-Whitney U 检验比较真阳性区域和真阴性区域骨髓 CT 值。运用受试者工作特性曲线(ROC 曲线)检验 VNCa 成像对下肢骨髓水肿诊断效能。**结果:**MRI 显示 30 例患者共 49 处骨髓水肿。两名医师在 VNCa 图像上分别主观诊断 44 处和 45 处骨髓水肿,骨髓水肿主观诊断一致性较高(Kappa 值=0.834)。定性分析以 MRI 图像为参考标准,在 VNCa 图示 84/98 的骨髓水肿。VNCa 成像诊断下肢关节骨髓水肿敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、准确度分别为 85.7%(84/98)、98.1%(257/262)、94.4%(84/89)、94.8%(257/271)、94.7%(341/360)。基于骨髓 CT 值,VNCa 图像诊断下肢骨髓水肿曲线下面积(AUC)0.971,最佳诊断界值-43.6HU,敏感度和特异度分别为 97.5%和 91.0%。VNCa 图骨髓水肿真阳性区域骨髓 CT 值(-7.5 ± 20.3)HU,真阴性区域骨髓 CT 值(-76.7 ± 18.3)HU,差异有统计学意义($Z=9.013, P<0.0001$)。**结论:**与 MRI 图像相比,DECT 虚拟去钙化成像在创伤性下肢关节骨髓水肿诊断中具有较高准确性。

【关键词】 体层摄影术,X 线计算机;磁共振成像;下肢;关节;水肿;骨髓

【中图分类号】 R814.4;R445.2;R323.72; R322.72; R442.5;R322.2 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2021)02-0227-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dual-energy CT virtual non-calcium imaging in the diagnosis of traumatic bone marrow edema in lower limb joints SHEN Rui,ZHAO Min-yue,CAO Guo-ping,et al.Department of Radiology,the Affiliated Aoyang Hospital of Jiangsu University,Jiangsu 215600,China

【Abstract】 Objective: To investigate the diagnostic value of dual energy CT virtual non-calcium (VNCa) imaging in acute traumatic bone marrow edema of lower limb joint. **Methods:** From January 2018 to May 2019, 30 patients with acute lower limb joint trauma who were completed examination in Aoyang hospital of zhangjiagang were included. Two radiologists evaluated VNCa images of all cases to determine whether there was the presence of bone marrow edema. Magnetic resonance imaging was used as the reference standard to evaluate the sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value and accuracy of VNCa image in diagnosing bone marrow edema of lower limb joint. CT values of bone marrow in VNCa images of all regions were measured, and mann-whitney U test was used to compare CT values of bone marrow in the true positive region and the true negative region. Receiver operating characteristic curve (ROC) was used to test the diagnostic efficacy of VNCa imaging in lower extremity bone marrow edema. **Results:** MRI showed a total of 49 bone marrow edema in 30 patients. The two radiologist subjectively diagnosed 44 and 45 bone marrow edema on the VNCa image respectively, and the subjective diagnosis of bone marrow edema was excellent agreement (Kappa value=0.834). In qualitative analysis, VNCa images revealed 85.7% (84/98) bone marrow edema that MRI images were used as the reference standard. The sensitivity, specificity, positive predictive value,

作者单位: 215600 江苏, 苏州张家港澳洋医院影像科

作者简介: 沈瑞(1990—), 男, 安徽合肥人, 主治医师, 主要从事骨关节及中枢神经系统疾病影像诊断工作。

通信作者: 邓小毅, E-mail: 13921956545@139.com

基金项目: 张家港市科技支撑(社会发展)计划(ZKS1933)

negative predictive value and accuracy of VNCa imaging in diagnosing bone marrow edema in lower limb joints were 85.7% (84/98), 98.1% (257/262), 94.4% (84/89), 94.8% (257/271) and 94.7% (341/360), respectively. Based on the CT value of the bone marrow, the area under the curve (AUC) of VNCa image for the diagnosis of lower limb bone marrow edema was 0.971, the optimal diagnostic threshold was -43.6HU , and the sensitivity and specificity were 97.5% and 91.0%, respectively. On the VNCa image, the CT value of the bone marrow in the true positive region of bone marrow edema was $(-7.5 \pm 20.3)\text{HU}$, and that in the true negative region was $(-76.7 \pm 18.3)\text{HU}$, the difference was statistically significant ($Z = 9.013, P < 0.0001$). **Conclusion:** DECT virtual non-calcium imaging has higher accuracy in the diagnosis of traumatic lower limb bone marrow edema.

【Key words】 Tomography; X-ray computed; Magnetic resonance imaging; Lower extremity; Joints; Edema; Bone marrow

创伤性骨髓水肿是指出血、梗死和松质骨显微压缩性骨折等一系列骨损伤引起的骨髓水肿,可用磁共振成像(MRI)显示^[1]。骨髓水肿通常与不稳定关节损伤、软组织损伤(如肌腱和韧带损伤)以及肢体残疾有关,因而会带来一定的社会和经济负担^[2-3]。创伤性骨髓水肿可出现软骨溶解、骨关节炎和关节畸形等晚期并发症,进而导致其恢复时间的延长和不可逆的关节损伤^[1,4]。需要早期和准确诊断指导治疗以防患者创伤后预后不佳。

MRI 是诊断创伤性骨髓水肿首选成像方法^[5]。MRI 在临床常规检查中存在一定局限性,有绝对和相对禁忌症,包括耳蜗植入物、起搏器置入、幽闭恐惧症和患者在扫描过程中因疼痛而活动等。此外, MRI 相对来说是一种费时且昂贵的检查方法,另外,创伤性骨折患者往往急诊就诊,大部分医院急诊尚未常规开展 MRI 检查。

常规灰阶 CT 可示明显骨折,但难以显示创伤性骨髓水肿^[6]。报道^[7]单能 CT 通过 Bone marrow 成像算法几乎可以去除骨性结构,但无法直接显示骨髓异常。双能量 CT 通过利用两种不同管电压获取不同能量数据来区分不同物质,其能够对 3 种物质进行分解和计算得到彩色编码虚拟去钙化(virtual non-calcium, VNCa)图像^[8-9]。VNCa 图像可直接显示骨髓水肿,准确率高^[10-12]。本研究运用彩色编码的双能量 CT VNCa 成像来显示下肢关节创伤性骨髓水肿,以 MRI 为参考标准评估 VNCa 成像在外伤性骨髓水肿诊断价值。

材料和方法

1. 一般资料

连续选取张家港澳洋医院 2018 年 1 月—2019 年 5 月急性下肢关节外伤患者。纳入标准:①疑似下肢关节骨折,均行双能量 CT 及 MRI 检查;② CT 及 MRI 检查间隔时间 $< 7\text{d}$ 。排除标准为金属内固定术

后、严重关节退行性变以及恶性肿瘤患者。

2. 检查方法

采用德国西门子炫速双源 CT (Somatom Definition Flash dual-source CT)。扫描参数: A 球管管电压 140 kV,有效电流 55 mAs; B 球管管电压 100 kV,有效电流 135 mAs;准直器宽度 $40 \times 0.6\text{ mm}$,螺距 1.2,球管旋转时间 0.5 s/周。平均加权系数 0.4,自动重建层厚 0.75 mm,重建间隔 0.5 mm,卷积核值 B30f。得到 3 组数据(140 kV、100 kV、双能 0.5 比例融合图像)。

使用德国西门子 MAGNETOM Avanto 1.5T 磁共振,使用关节专业线圈,仰卧位扫描。扫描序列:快速自旋回波序列 $T_1\text{WI}$ 矢状面 (TR 550 ms、TE 13 ms),层厚 4 mm,层间距 0.4 mm,FOV $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$,矩阵 256×256 ,NEX 1;质子加权脂肪抑制序列横轴面、冠状面、矢状面 (TR 3630 ms、TE 13 ms),层厚 4 mm,层间距 0.4 mm,FOV $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$,矩阵 256×256 ,NEX 1。

3. 图像后处理及分析

将双能 CT 扫描后的两组双能量数据(140 kV 和 100 kV 数据)传送至 Siemens 图像后处理工作站 (Syngo Via, version VA 30A; Siemens Healthcare),选择 CT Dual Energy 后处理软件进行数据重建,选择 Bone Marrow 以颜色编码显示进行进一步分析。

本研究下肢关节患者主要包括膝关节和踝关节,膝关节分成 5 个区域^[13](股骨远端内侧、股骨远端外侧、胫骨近端内侧、胫骨近端外侧和髌骨),踝关节分成 8 个区域^[14](外踝、内踝、胫骨远端前缘、胫骨远端后缘、距骨穹隆、距骨后突、距骨外侧突及距骨头)。两名影像诊断医师(分别有 2 年、6 年工作经验)采用双盲法对所有 VNCa 图像进行评估。两名医师都可以自由调整窗宽窗位和缩放图像。由于射线硬化、皮质去除和 VNCa 图像的滤波效应可能产生伪影^[15],会妨碍邻近区域内骨髓的分析,所以分析与邻近皮质骨的距

离 $>3\text{ mm}$ 的外伤性骨髓损伤。另两名高年资影像诊断医师(分别有 10 年、15 年工作经验)评估 MRI 图像是否存在骨髓水肿。

由其中 1 名医师(6 年工作经验)在 VNCa 图像上测量所有区域 CT 值。当观察区域有疑似或明确骨髓损伤时,感兴趣圆形区域(ROI, 大小均约 5 mm^2)放置在 VNCa 图像上伪彩密度最高的区域。观察区域没有骨髓水肿时,ROI 放置在中央。

4. 统计学分析

采用 SPSS 23.0 和 MedCalc 软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差表示,不符合正态分布的计量资料以中位数 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示。分别计算两名医师利用 VNCa 成像对骨髓水肿诊断的敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值以及准确性,并对两名医师诊断结果的一致性进行 Kappa 检验, Kappa 值 ≤ 0.4 为一致性差, $0.4 < \text{Kappa 值} \leq$

0.6 为一致性中等, $0.6 < \text{Kappa 值} \leq 1.0$ 为一致性好。采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线检验 VNCa 诊断效能。采用 Mann-Whitney U 检验比较不同区域间骨髓的 CT 值。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

1. MRI 及 VNCa 显示情况

34 例疑似下肢关节骨折患者完成双能量 CT 和 MRI, 其中排除金属内固定 1 例, 严重退变 3 例, 研究最终纳入 30 例患者进行分析, 其中膝关节 20 例、踝关节 10 例; 男 21 例, 女 9 例; 年龄 $13 \sim 74$ 岁, 平均 (60.3 ± 10.4) 岁。MRI 图示 30 例患者共有 49 处骨髓水肿, 髌骨 2 处, 股骨远端外侧 5 处, 股骨远端内侧 5 处, 胫骨近端外侧 7 处, 胫骨近端内侧 10 处, 外踝 7 处, 内踝 3 处, 胫骨远端前缘 3 处, 胫骨远端后缘 2 处,



图 1 男, 30 岁, 急性左膝关节外伤。a) 左膝关节冠状面常规双能量 CT 骨窗图未见明显异常; b) 相应彩色编码虚拟非钙化(VNCa)图像冠状面重建示股骨远端外侧髌外伤性骨髓水肿(显示绿色伪彩, 箭); c) 冠状面质子密度加权脂肪抑制序列证实了股骨远端外侧髌外伤性骨髓水肿。图 2 男, 21 岁, 左踝关节外伤后疼痛、运动障碍 3d。a) 左踝关节矢状面常规双能量 CT 骨窗图未见明显异常; b) 相应彩色编码 VNCa 图矢状面重建示距骨外侧突、胫骨远端前缘有骨挫伤(绿色伪彩, 箭)。距骨穹隆绿色伪彩(黑箭); c) 矢状面脂肪抑制的质子加权 MRI 图像证实距骨外侧突、胫骨远端前缘骨挫伤(箭)。距骨穹隆(黑箭)见轻微骨挫伤, 较图 b 示的范围小, 提示距骨穹隆可能是骨硬化伪影。

距骨穹隆 1 处,距骨外侧突 2 处,距骨头 2 处。VNCa 重建图两名医师分别诊断 44 处、45 处骨髓水肿(图 1、2),两者诊断结果具有较高一致性,Kappa 值 0.834。

2. 诊断准确性评估

以 MRI 结果为参考标准,医师 1(2 年工作经验)使用 VNCa 重建诊断 44 处骨髓水肿中 41 处真阳性,3 处为假阳性。医师 2(6 年工作经验)使用 VNCa 重建诊断 45 处骨髓水肿中 43 处真阳性,2 处为假阳性;VNCa 图示 84/98 的骨髓损伤。两位医师用 VNCa 诊断下肢关节骨髓水肿敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、准确度分别为 83.7%(41/49)、97.7%(128/131)、93.2%(41/44)、94.1%(128/136)、93.9%(169/180)和 87.8%(43/49)、98.5%(129/131)、95.6%(43/45)、95.6%(129/135)、95.6%(172/180),如表 1。

3. 定量分析结果

基于骨髓 CT 值,VNCa 图像诊断下肢骨髓水肿 ROC 曲线下面积 0.971,利用约登指数计算诊断阈值为-43.6 HU,敏感度和特异度分别为 97.5%和91.0%(图 3)。VNCa 图像上骨髓水肿真阳性区域骨髓 CT 值(-7.5±20.3)HU,真阴性区域骨髓 CT 值(-76.7±18.3)HU,骨髓水肿区域 CT 值高于正常区域,差异有统计学意义($Z=9.013,P<0.0001$,图 4)。

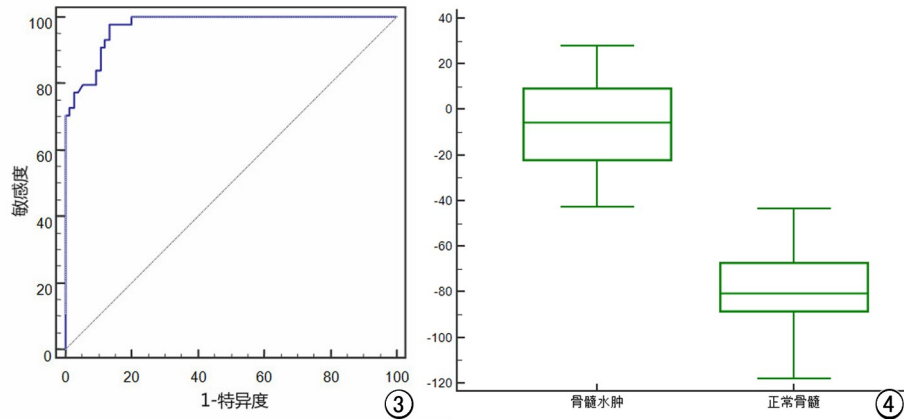


图 3 VNCa 定量值诊断下肢关节骨髓水肿 ROC 曲线,曲线下面积 0.971。
图 4 下肢关节骨髓水肿区域和正常区域平均 CT 值盒形图,差异有显著性意义($P<0.0001$)。

表 1 两名医师利用 VNCa 图像诊断下肢关节骨髓水肿准确度

项目	Sen(%)	Spe(%)	PPV(%)	NPV(%)	ACC(%)
医师 1	83.7(41/49)	97.7(128/131)	93.2(41/44)	94.1(128/136)	93.9(169/180)
膝关节	86.2(25/29)	98.9(70/71)	96.2(25/26)	94.5(70/74)	95.0(95/100)
踝关节	80.0(16/20)	96.7(58/60)	88.9(16/18)	93.5(58/62)	92.5(74/80)
医师 2	87.8(43/49)	98.5(129/131)	95.6(43/45)	95.6(129/135)	95.6(172/180)
膝关节	89.7(26/29)	98.6(70/71)	96.3(26/27)	95.9(70/73)	96.0(96/100)
踝关节	85.0(17/20)	98.3(59/60)	94.4(17/18)	95.2(59/62)	95.0(76/80)
平均值	85.7(84/98)	98.1(257/262)	94.4(84/89)	94.8(257/271)	94.7(341/360)

注:Sen(敏感度);Spe(特异度);PPV(阳性预测值);NPV(阴性预测值);ACC(准确度)

讨 论

本研究结果表明与 MRI 相比双能量 CT 彩色编码 VNCa 重建在显示下肢关节创伤性骨髓水肿方面具有较高诊断准确度(平均准确度约 94.7%)。此外,良好的观察者间的一致性表明该重建成像方法具有高可靠性。此外,定量图像分析显示骨髓 CT 值和 MRI 显示创伤性下肢关节骨髓水肿高度相关。

既往研究已证明双能量 CT 彩色编码 VNCa 重建图像对于分析骨髓水肿具有很高诊断准确性^[16-19]。Booz 等^[20]和 Wang 等^[13]使用 VNCa 技术对急性膝关节创伤患者骨髓水肿进行评估,显示该技术对创伤性膝关节骨髓水肿有极好诊断准确性;Booz 等^[21]应用 VNCa 技术对跟骨创伤性骨髓水肿进行评估也取得了很高诊断准确性,这些与本研究对下肢关节创伤性骨髓水肿诊断准确性相一致。急性下肢关节创伤患者在 MRI 禁忌症或在 MRI 不可用的情况下,彩色编码 VNCa 重建显示高诊断准确性,揭示了双能量 CT 作为替代成像方法的潜力。即使在 MRI 可用的条件下,VNCa 方法也有可能成为下肢外伤疑似骨髓水肿患者的一种快速、准确和广泛可用的替代方法。既往的研究表明骨髓水肿的位置和形状可以预测相关的软组织损伤^[20],以 MRI 为参考标准的 VNCa 重建对骨髓水肿具有高诊断准确性,与传统灰度 CT 相比,VNCa 重

建将提供更多的临床相关信息。初步研究已证实双能量 CT 能进行肌腱和韧带的成像^[22]并可用于诊断前交叉韧带损伤^[23]。因此,双能量 CT 有望可以通过 VNCa 重建和一系列软组织成像发展成急性下肢关节创伤患者一站式检查。

笔者在 VNCa 重建图像上测量了骨髓的密度值,发现骨髓水肿阳性区域密度明显高于 MRI 图像上对应阴性区域,这与创伤性骨髓水肿表现为液体增加和脂肪减少

的病理生理学基础是一致的^[24]。ROC 分析以不同的截断 CT 值区分不同区域的正常和异常骨髓,对 VNCa 的定量分析具有较好的敏感性和特异性,这与 Guggenberger 等^[14]研究结果相一致。但是,VNCa 重建图像也有假阳性,多见于生理性高密度的解剖区域,如距骨体/头部,提示 VNCa 的诊断效能不仅受异常骨髓密度增高的影响,而且还受正常骨髓密度差异的影响。

本研究局限性首先是样本量小,仅纳入 30 例急性下肢外伤患者。其次,由于射线硬化、皮质去除和 VNCa 图像的滤波效应可能产生伪影,我们必须排除距离皮质骨 3 mm 范围内的骨髓病变。再者本研究未考虑年龄相关因素。由于在生长发育过程中骨髓由红骨髓变黄骨髓,骨髓成分不同可能影响研究结果。今后应进一步开展按年龄分组的研究。

综上所述,本研究结果表明与 MRI 相比,双能 CT 彩色编码的 VNCa 图像具有较高敏感性、特异性和准确性,可以诊断下肢外伤性骨髓水肿。双能 CT 检查可作为 MRI 检查禁忌症患者的另一种选择。

参考文献:

- [1] Ai S, Qu M, Glazebrook KN, et al. Use of dual-energy CT and virtual non-calcium techniques to evaluate post-traumatic bone bruises in knees in the subacute setting [J]. Skeletal Radiol, 2014, 43(9):1289-1295.
- [2] Bretlau T, Tuxøe J, Larsen L, et al. Bone bruise in the acutely injured knee [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2002, 10(2):96-101.
- [3] Vincken PW, Ter Braak BP, van Erkel AR, et al. Clinical consequences of bone bruise around the knee [J]. Eur Radiol, 2006, 16(1):97-107.
- [4] Boks SS, Vroegindeweij D, Koes BW, et al. Follow-up of occult bone lesions detected at MR imaging: systematic review [J]. Radiology, 2006, 238(3):853-862.
- [5] Eustace S, Keogh C, Blake M, et al. MR imaging of bone oedema: mechanisms and interpretation [J]. Clin Radiol, 2001, 56(1):4-12.
- [6] Carotti M, Salaffi F, Beci G, et al. The application of dual-energy computed tomography in the diagnosis of musculoskeletal disorders: a review of current concepts and applications [J]. Radiol Med, 2019, 124(11):1175-1183.
- [7] Henes Fo, Groth M, Bley TA, et al. Quantitative assessment of bone marrow attenuation values at MDCT: an objective tool for the detection of bone bruise related to occult sacral insufficiency fractures [J]. Eur Radiol, 2012, 22(10):2229-2236.
- [8] Nicolaou S, Liang T, Murphy DT, et al. Dual-energy CT: a promising new technique for assessment of the musculoskeletal system [J]. AJR Am J Roentgenol, 2012, 199(5 Suppl):S78-86.
- [9] Mallinson PI, Coupal TM, McLaughlin PD, et al. Dual-energy CT

for the musculoskeletal system [J]. Radiology, 2016, 281(3):690-707.

- [10] 曹建新, 王一民, 孔祥泉, 等. 双能量 CT 虚拟去钙图像诊断膝关节外伤性骨髓损伤的应用研究 [J]. 中华放射学杂志, 2014, 48(12):1013-1018.
- [11] Li M, Qu Y, Song B. Meta-analysis of dual-energy computed tomography virtual non-calcium imaging to detect bone marrow edema [J]. Eur J Radiol, 2017, 95:124-129.
- [12] Wang CK, Tsai JM, Chuang MT, et al. Bone marrow edema in vertebral compression fractures: detection with dual-energy CT [J]. Radiology, 2013, 269(2):525-533.
- [13] Wang MY, Zhang XY, Xu L, et al. Detection of bone marrow oedema in knee joints using a dual-energy CT virtual non-calcium technique [J]. Clin Radiol, 2019, 74(10):815.
- [14] Guggenberger R, Gnannt R, Hodler J, et al. Diagnostic performance of dual-energy CT for the detection of traumatic bone marrow lesions in the ankle: comparison with MR imaging [J]. Radiology, 2012, 264(1):164-173.
- [15] Pache G, Krauss B, Strohm P, et al. Dual-energy CT virtual non-calcium technique: detecting posttraumatic bone marrow lesions: feasibility study [J]. Radiology, 2010, 256(2):617-624.
- [16] 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.
- [17] Kaup M, Wichmann JL, Scholtz JE, et al. Dual-energy CT-based display of bone marrow edema in osteoporotic vertebral compression fractures: impact on diagnostic accuracy of radiologists with varying levels of experience in correlation to MR imaging [J]. Radiology, 2016, 280(2):510-519.
- [18] 赵承勇, 罗松, 邓小毅. 双能量 CT 对椎体骨折骨髓水肿诊断准确性 Meta 分析 [J]. 浙江临床医学, 2018, 20(12):1999-2001.
- [19] 张玉婷, 姜永宏. 双能 CT 虚拟去钙技术对股骨头坏死的诊断价值 [J]. 放射学实践, 2020, 35(4):538-542.
- [20] 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.
- [21] Booz C, Nöske 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.
- [22] Fickert S, Niks M, Dinter DJ, et al. Assessment of the diagnostic value of dual-energy CT and MRI in the detection of iatrogenically induced injuries of anterior cruciate ligament in a porcine model [J]. Skeletal Radiol, 2013, 42(3):411-417.
- [23] 刘淑仪, 潘建科, 刘军, 等. 前交叉韧带损伤影像学研究进展 [J]. 放射学实践, 2016, 31(9):893-895.
- [24] Mandalia V, Henson JH. Traumatic bone bruising: a review article [J]. Eur J Radiol, 2008, 67(1):54-61.

(收稿日期:2020-03-11 修回日期:2020-05-30)