

论 著

# Application of Dual Energy CT Virtual Noncalcium Technique in Bone Marrow Edema of Talus\*

HE Xu-cheng, ZHOU Shan-shan, YE Ju, HAN Wen-juan, GUO Yi-zhi, WANG Gui-sheng, CHEN Xiao-xia\*.  
Department of Radiology, the Third Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100039, China

## 双能CT虚拟去钙在距骨骨髓水肿中的应用价值\*

何绪成 周闪闪 叶菊  
韩文娟 郭轶智 王贵生  
陈晓霞\*

中国人民解放军总医院第三医学中心放射科  
(北京 100039)

**【摘要】目的** 评价双能CT(DECT)虚拟去钙(VNCA)在创伤性距骨骨髓水肿中的应用价值。**方法** 选取2018年1月至2019年9月间进行DECT和MRI检查的距骨创伤患者65例,进行回顾性分析。根据Hawkin距骨骨折分类系统,将距骨分为六个解剖区域(距骨外侧、距骨中央、距骨内侧、距骨后突、距骨外侧突和距骨头),6位放射科医师在未知临床和MRI结果的前提下,独立评估距骨是否存在骨折,至少8周后,阅片医师利用DECT VNCA图像重新评估距骨骨髓水肿情况,由第7位放射科医师利用VNCA图像测量CT值进行定量分析。2位对临床和CT结果设盲的高年资医师共同评估MRI图像,作为本研究的参考标准,对图像质量、图像噪声和诊断置信度分别使用5点Likert评分系统进行单独评级。**结果** MRI共发现49例患者的247个区域存在骨髓水肿。定性分析显示,基于区域的VNCA图像描述距骨骨髓水肿的总体敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性分别为97.4%、86.9%、88.2%、97.1%和95.5%,医师间的一致性较好(K=0.83);基于患者的敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性分别为96.8%、91.9%、91.9%、96.8%和95.4%,医师间的一致性较好(K=0.88);采用-24.2HU的诊断阈值,定量分析DECT的敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性分别为98.00%、90.31%、91.00%、92.31%和96.83%,ROC曲线分析显示曲线下面积(AUC)为0.836;MRI和VNCA图像在诊断置信度(P=0.11)、图像噪声(P=0.62)和图像质量(P=0.28)方面没有显著差异,主观评价一致性较高。**结论** 通过定性和定量分析,与MRI相比,DECT VNCA在诊断距骨创伤性骨髓水肿方面具有较高的诊断准确性。

**【关键词】** 双能CT; 磁共振成像; 骨髓水肿; 距骨  
**【中图分类号】** R445.3; R551.3  
**【文献标识码】** A  
**【基金项目】** 国家自然科学基金(82001808)  
**DOI:**10.3969/j.issn.1672-5131.2022.02.052

### ABSTRACT

**Objective** To evaluate the application value of dual-energy CT virtual noncalcium in traumatic talar bone marrow edema. **Methods** A total of 60 patients with talus trauma undergoing from January 2018 to September 2019 were selected for retrospective analysis. According to Hawkin talus fracture classification system, the talus is divided into six anatomical regions (talus outside, talus center, talus inside, talus posterior process, talus lateral process and caput tali). Without knowing the clinical and MRI results, 6 radiologists independently evaluated the talus for fractures. At least 8 weeks later, the film-reading physician re-evaluated the talar bone marrow edema using the DECT-VNCA image, and the seventh radiologist carried out quantitative analysis using the measured CT value of VNCA image. Two senior physicians who were blinded to clinical and CT results jointly evaluated MRI images. As a reference standard for this study, image quality, image noise, and diagnostic confidence were separately rated using a 5-point Likert scoring system. **Results** MRI found that marrow edema existed in 247 areas of 49 patients. The qualitative analysis indicates that the overall sensitivity of talar bone marrow edema described by region-based VNCA images is 97.4%, 86.9%, 88.2%, 97.1%, and 95.5%, and the consistency among physicians is good (K=0.83); the patient-based sensitivity is 96.8%, 91.9%, 91.9%, 96.8% and 95.4%, and the consistency among physicians is good (K=0.88); when the testing threshold of -24.2HU is used, the sensitivity of quantitative analysis of DECT is 98.00%, 90.31%, 91.00%, 92.31%, and 96.83%, and ROC curve analysis shows that the area under the curve(AUC) is 0.836; there is no significant difference between MRI and VNCA images in diagnostic confidence (P=0.11), image noise (P=0.62) and image quality (P=0.28), and consistency of subjective evaluation is higher. **Conclusion** By the qualitative and quantitative analysis, compared with MRI, DECT VNCA demonstrated higher diagnostic accuracy in diagnosis of traumatic talus bone marrow edema.

**Keywords:** Dual Energy CT; Bone Marrow Edema; Magnetic Resonance Imaging; Talus

创伤性骨髓水肿的并发症,如脱位、软骨溶解和骨关节炎,可导致不可逆转的发病率和较长的恢复时间<sup>[1-3]</sup>。因此,创伤性骨髓水肿需要准确和早期的诊断,才能获得最佳的治疗方案,以防止患者预后不良;磁共振检查是当前公认的检测骨髓水肿的最合适方法,但是往往检查时间长,禁忌证较多,特别是患者在外伤条件下一般首选CT检查,利用DECT诊断骨髓水肿是当下研究的一个热点<sup>[4-7]</sup>。本研究选择人体外伤发生率较高的距骨作为研究对象,探讨DECT VNCA在距骨创伤性骨髓水肿中的诊断准确性,并对不同资历医师间的诊断一致性进行探讨。

### 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 本研究获得本院伦理委员会的批准。选取2018年1月至2019年9月间进行DECT和MRI检查的距骨创伤患者65例,进行回顾性研究,两项检查间隔时间均在3d内完成。65例患者中男性43例,女性22例,患者年龄18~60岁,平均年龄(32±12)岁。排除踝部恶性肿瘤,1年内踝部外伤和踝部有金属植入物者。

**1.2 检查方法** 西门子公司第二代双源CT(somatom definition flash),扫描参数:头足向扫描,扫描模式(collimation=32×0.6mm; pitch=0.7; rotation time=0.5s),球管1电压为80kVp,球管2电压为Sn140kVp,预定义的mAs乘积按照大约2:1的比率设置,自动管电流调整方式(Care Dose 4D),无需注射对比剂。本扫描方案的CT剂量指数为(14±1)mGy,平均剂量长度乘积为(198±2)mGy/cm。扫描后获得80kVp图像、Sn140kVp图像和混合加权图像(80kVp和140kVp以0.4:0.6

**【第一作者】** 何绪成,男,主管技师,主要研究方向:医学影像学骨骼肌肉方面。E-mail: hexuchengnihao@163.com

**【通讯作者】** 陈晓霞,女,副主任医师,主要研究方向:胸腹部诊断及介入影像学等。E-mail: xiaoxia0905@126.com

比例混合相当于120kVp单能图像)。对于常规骨折,重建算法使用骨卷积核(B70s),对于骨髓水肿的VNCa图像,通过应用三材料(钙、脂肪和水)分解法,将横断位、矢状位和冠状位VNCa重建图像以及常规灰阶CT图像发送至Hinacom PACS系统。

MRI使用西门子3.0T扫描仪(magnetom avanto fit; siemens healthcare, Germany),踝部专用线圈,主要序列包括标准T<sub>1</sub>加权自旋回波序列、T<sub>2</sub>加权快速自旋回波序列和STIR序列,采用常规扫描参数。

**1.3 图像分析** 所有图像均在PACS工作站进行分析和处理,根据Hawkin距骨骨折分类系统,将距骨分为六个解剖区域(距骨外侧、距骨中央、距骨内侧、距骨后突、距骨外侧突和距骨头,图1)。为了确定参考标准,两位在肌肉骨骼成像方面有10年以上工作经验的高级职称的放射医师使用二元系统(0=无骨髓水肿;1=存在骨髓水肿),对MRI图像是否存在创伤性骨髓水肿进行一致性分析,两位医师对临床和DECT结果设盲,被允许调整窗口设置和使用整个MRI序列,对图像质量、图像噪声和诊断置信度分别使用5点Likert评分系统(范围1~5;1=不可接受,5=优秀)进行单独评级。

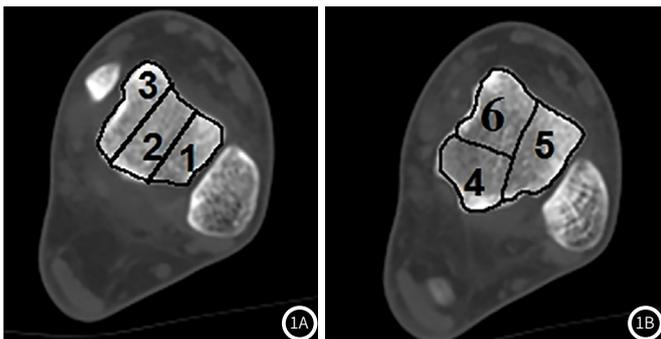


图1 利用CT断层图像横断位水平部分显示用于定性和定量图像分析的解剖区域:1=距骨外侧,2=距骨中间,3=距骨内侧,4=距骨后突,5=距骨外侧突,6=距骨头。

6位放射科医师(医师一,具有15年诊断经验的放射科主任医师;医师二,具有11年诊断经验的放射科主任医师;医师三,具有6年诊断经验的放射科主治医师;医师四,具有4年诊断经验的放射科主治医师;医师五,具有3年诊断经验的放射科住院医师;医师六,具有2年诊断经验的放射科住院医师)对临床和MRI信息设盲,独立分析横断位、冠状位和矢状位DECT图像,按随机顺序诊断常规灰度CT图像是否存在骨折,在诊断间隔8周以后,所有放射科医师再次采用随机顺序对所有VNCa图像是否存在创伤性骨髓水肿进行判断。

在定量分析中,利用横断面VNCa图像根据上述分区在每个区域使用感兴趣的圆形区域( $ROI \geq 0.3 \text{ cm}^2$ ),由第7位医师(医师七,具有3年工作经验的住院医师)测量CT值,每个区域的ROI放置于邻近骨皮质距离大于2mm的图像上密度变化最大的位置内(考虑到射线束硬化、滤波效应和骨皮质去除带来的伪影),在没有骨髓水肿迹象的区域,感兴趣区放置在中心位置,使用前面所述的二元系统评估,所有CT图像的诊断置信度、图像噪声和图像质量均使用上述5点Likert评分进行评估。按照区域和患者分别计算VNCa图像对创伤性距骨骨髓水肿的敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性。

**1.4 统计学方法** 使用专用软件SPSS 23.0进行统计分析。采用Kolmogorov-Smirnov检验评价数据的正态性。变量用( $\bar{x} \pm s$ )表示,用Wilcoxon配对检验进行分析,采用ROC曲线分析和曲线下面积(AUC)评价VNCa图像的CT值变化,确定创伤性距骨骨髓水肿的最佳CT阈值,计算总敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

## 2 结果

全部65例患者共390个区域,常规灰阶CT显示10例患者的13处存在距骨骨折,在骨折检出方面,CT和MRI的结果是一致的(图2)。MRI图像显示49例患者共247个骨髓水肿区域(距骨外侧51个,距骨中间38个,距骨内侧42个,距骨后突32个,距骨外侧突46个,距骨头38个)。

基于区域的定性图像显示(表1),VNCa对创伤性距骨骨髓水肿的总体敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性分别为97.4%、86.9%、88.2%、97.1%和95.5%,总体敏感性表现优异,医师间的一致性较好( $K=0.83$ )。基于患者的定性图像显示(表2),VNCa对创伤性距骨骨髓水肿的总体敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性分别为96.8%、91.9%、91.9%、96.8%和95.4%,医师间的一致性非常好( $K=0.88$ )。

基于患者的定量图像显示,阳性区域平均CT值为( $-11.84 \pm 35.09$ )HU,阴性区域平均CT值为( $-61.82 \pm 39.52$ )HU,有骨髓水肿区域和无骨髓水肿区域VNCa图像的CT值有显著差异( $P < 0.001$ )。采用-24.2HU的诊断阈值,定量分析DECT的敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性分别为98.00%、90.31%、91.00%、92.31%和96.83%,ROC曲线显示AUC值为0.836(95%置信区间0.733~0.935,图3)。

在检测创伤性骨髓水肿的图像分级方面,所有医师在MRI图像中对他们的诊断都高度自信(平均得分4.51),对VNCa图像距骨创伤性骨髓水肿的评估也有很高的诊断置信度(平均得分4.40),两者没有显著差异( $P=0.11$ ),医师间的一致性对VNCa( $K=0.84$ )和MRI( $K=0.81$ )都是非常好的。MRI序列的图像噪声(平均得分4.12)和VNCa图像噪声(平均得分4.19)的医师评分间无显著性差异( $P=0.62$ ),对VNCa( $K=0.82$ )和MRI( $K=0.89$ )医师间的一致性很好。图像质量评估MRI图像(平均得分4.67)和VNCa图像(平均得分4.19)显示两种成像方式之间无显著差异( $P=0.28$ ),医师间的一致性较好(图4)。

## 3 讨论

骨髓水肿可以是与创伤相关的骨髓出血的结果,也可以与非创伤环境中的感染、肿瘤或缺血性坏死有关<sup>[8]</sup>。骨髓水肿MRI表现为在T<sub>1</sub>WI图像上信号降低,在脂肪抑制的T<sub>2</sub>WI图像上由于水浓度的增加而信号增加,然而MRI成像对磁场均匀性的依赖可能会导致骨髓水肿的不完全脂肪饱和,而DECT不存在这个问题,其快速采集时间和描述精细皮质细节的能力,使其成为急诊创伤患者检查的第一选择,VNCa图像允许在CT图像上进行彩色调节,以便对骨髓水肿进行有针对性的评估,当患者存在MRI禁忌证或者不方便进行MRI检查时,DECT可以作为MRI成像的一种方便的替代方式。

表1 基于区域的VNCa图像描述距骨创伤性骨髓水肿的诊断特性的比较[n(%)]

	敏感性	特异性	PPV	NPV	准确性
总计	1184/1215(97.4)	232/267(86.9)	232/263(88.2)	1184/1219(97.1)	1416/1482(95.5)
医师一	205/208(98.6)	36/39(92.3)	36/39(92.3)	205/208(98.6)	241/247(97.6)
医师二	201/204(98.5)	40/43(93.0)	40/43(93.0)	201/204(98.5)	241/247(97.6)
医师三	198/202(98.0)	40/45(88.9)	40/44(90.9)	198/203(97.5)	238/247(96.4)
医师四	197/201(98.0)	40/46(87.0)	40/44(90.9)	197/203(97.0)	237/247(96.0)
医师五	192/200(96.0)	39/47(83.0)	39/47(83.0)	192/200(96.0)	231/247(93.5)
医师六	191/200(95.5)	37/47(78.7)	37/46(80.4)	191/201(95.0)	228/247(92.3)

表2 基于患者的VNCa图像描述距骨创伤性骨髓水肿的诊断特性的比较[n(%)]

	敏感性	特异性	PPV	NPV	准确性
总计	270/279(96.8)	102/111(91.9)	102/111(91.9)	270/279(96.8)	372/390(95.4)
医师一	49/50(98.0)	14/15(93.3)	14/15(93.3)	49/50(98.0)	63/65(96.9)
医师二	48/49(98.0)	15/16(93.8)	15/16(93.8)	48/49(98.0)	63/65(96.9)
医师三	44/46(95.7)	18/19(94.7)	18/20(90.0)	44/45(97.8)	62/65(95.4)
医师四	44/45(97.8)	18/20(90.0)	18/19(94.7)	44/46(95.7)	62/65(95.4)
医师五	43/45(95.6)	18/20(90.0)	18/20(90.0)	43/45(95.6)	61/65(93.8)
医师六	42/44(95.5)	19/21(90.5)	19/21(90.5)	42/44(95.5)	61/65(93.8)



图2 男性, 20岁, 踝关节扭伤后来诊。图2A: 矢状位常规灰阶CT图像未发现异常, 六位医师均认为骨性结构完好无损; 图2B: 矢状位彩色编码VNCa图像显示距骨后突(6/6医师诊断)有明显的创伤性骨髓水肿(绿色区域); 图2C: 矢状位STIR序列MRI成像证实了这一诊断(高信号区)。

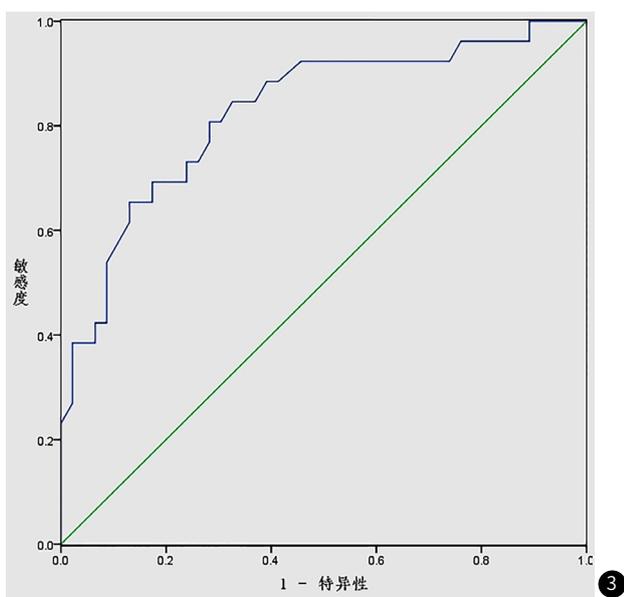


图3 VNCa图像基于骨髓密度CT值变化的ROC曲线, AUC为0.836。

本研究发现, 与MRI相比, DECT VNCa在诊断距骨创伤性骨髓水肿方面具有较高的诊断准确性; 在定性图像分析中, VNCa重建图像在描述创伤性骨髓水肿方面获得了较高的总体敏感性, 研究发现经验丰富的诊断医师(医师一和医师二)具有出色的诊断准确性(敏感性、特异性、PPV、NPV和准确性均 $\geq 92\%$ ), 其诊断结论与MRI相似; VNCa重建图像在诊断置信度、图像噪声和图像质量方面的评分与MRI相似, 没有显著差异, 良好的医师间一致性表明该方法具有很高的可靠性。此外, 基于图像定量分析显示CT值变化与MRI显示的创伤性距骨骨髓水肿有很高的相关性。

研究表明, DECT VNCa图像对于脊柱和腕关节等部位骨髓水肿的可视化具有很高的诊断准确性<sup>[9-12]</sup>, 通过VNCa技术的实施, DECT可以去除骨骼中高度衰减的钙信号, 从而提供更好的骨髓成像评估<sup>[13-14]</sup>, Booz等<sup>[15]</sup>通过第三代DECT彩色编码虚拟无钙技术对膝关节创伤患者骨髓水肿进行研究指出, 在定性分析中, VNCa图像对描述膝关节骨髓水肿具有较高的总体敏感性(94%)和特异性(95%), 在定量分析中, 鉴别膝关节骨髓水肿具有较高的敏感性(96%)和特异性(97%); Foti等<sup>[16]</sup>指出利用DECT图像定性分析在诊断踝关节处骨髓水

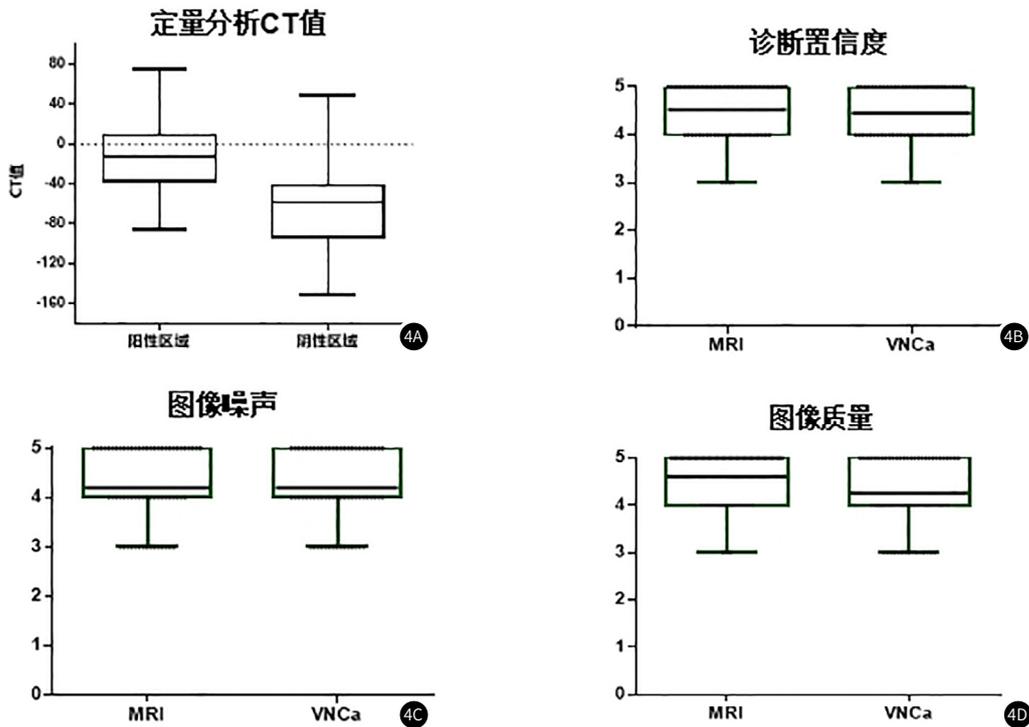


图4 定量图像分析显示(有或无)骨髓水肿区域的CT值有显著性差异( $P < 0.001$ )。MRI和VNCa图像在诊断置信度、噪声量和图像质量方面的主观图像评级, VNCa图像获得了与MRI图像相当的分数, 在诊断置信度( $P = 0.11$ )、图像噪声( $P = 0.62$ )和图像质量( $P = 0.28$ )方面没有显著差异。

肿中的敏感性、特异性、PPV和NPV分别为92.0%、86.6%、92.0%和90.0%，观察者间和观察者内的一致性接近完美(分别为 $k = 0.87$ 和 $k = 0.83$ )，以-20HU为阈值定量分析的灵敏度、特异度、PPV、NPV和准确度分别为88.0%、92.6%、95.7%、92.6%和87.5%。VNCa重建图像显示的高诊断准确性表明，DECT作为距骨骨髓创伤患者一种潜在的替代成像方法，不需要额外的MRI检查，包括患者的重复运送和定位，这在一定程度上优化了工作流程，降低了成本并提高患者舒适度。

研究发现阅片人经验似乎对DECT VNCa诊断骨髓水肿也存在重要影响，诊断医师的诊断经验与诊断准确性存在一致性，某些情况下骨髓衰减的改变可能是轻微的，尤其是在灰阶图像上，不如MRI所见信号强度的改变明显，此时经验欠缺的住院医师的漏诊率和误诊率便会增加，彩色图像的使用有助于突出和描绘骨髓内的微小衰减变化，从而增加VNCa图像的可见性和检测性<sup>[17]</sup>。参与本研究的6位医师分别进行独立诊断，对65例患者的诊断敏感性、特异性和PPV均较高(>90%)，诊断医师间具有良好的一致性；此外，VNCa重建在诊断置信度、图像噪声和图像质量方面的评分与MRI相似，没有显著差异，这些均表明DECT VNCa在诊断距骨骨髓水肿方面具有很高的可靠性。

本研究存在几个局限性：第一，纳入研究的病例均为成年人，没有对红骨髓较多的儿童和骨质疏松多发的老年患者进行研究。第二，我们仅讨论了创伤条件下的骨髓水肿，但骨髓改变可由多种原因引起，如原发性骨肿瘤、骨转移、骨梗死、创伤或骨关节炎<sup>[2,18]</sup>，因此不排除个别患者的骨髓水肿不是创伤引起的。第三，这项研究的结论只适用于特定供应商的CT仪

器和后处理软件，适用范围受到一定的限制。

研究表明，通过定性和定量分析，与MRI相比，DECT VNCa在诊断距骨创伤性骨髓水肿方面具有较高的诊断准确性，以及与MRI相当的诊断置信度、图像噪声和图像质量，利用DECT VNCa诊断距骨创伤性骨髓水肿具有较高的应用价值，值得临床推广。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] Mandalia V, Fogg A J, Chari R, et al. Bone bruising of the knee[J]. *Clin Radiol*, 2005, 60(6): 627-636.
- [3] Nakamae A, Engebretsen L, Bahr R, et al. Natural history of bone bruises after acute knee injury: Clinical outcome and histopathological findings[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14(12): 1252-1258.
- [4] Diekhoff T, Scheel M, Hermann S, et al. Osteitis: A retrospective feasibility study comparing single-source dual-energy CT to MRI in selected patients with suspected acute gout[J]. *Skeletal Radiol*, 2017, 46(2): 185-190.
- [5] Thiryayi W A, Thiryayi S A, Freemont A J. Histopathological perspective on bone marrow oedema, reactive bone change and haemorrhage[J]. *Eur J Radiol*, 2008, 67(1): 62-67.
- [6] Memarsadeghi M, Breitenseher M J, Schaefer-Prokop C, et al. Occult scaphoid fractures: Comparison of multidetector CT and MR imaging—initial experience[J]. *Radiology*, 2006, 240(1): 169-176.
- [7] Pache G, Krauss B, Strohm P, et al. Dual-energy CT

- virtual noncalcium technique: Detecting posttraumatic bone marrow lesions—feasibility study[J]. Radiology, 2010, 256(2): 617–624.
- [8] Wong W D, Shah S, Murray N, et al. Advanced musculoskeletal applications of dual-energy computed tomography[J]. Radiol Clin North Am, 2018, 56(4): 587–600.
- [9] Petritsch B, Kosmala A, Weng A M, 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.
- [10] Kaup M, Wichmann J L, Scholtz J E, 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.
- [11] Wang C K, Tsai J M, Chuang M T, et al. Bone marrow edema in vertebral compression fractures: detection with dual-energy CT[J]. Radiology, 2013, 269(2): 525–533.
- [12] Ai S, Qu M, Glazebrook K N, 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.
- [13] Pache G, Krauss B, Strohm P, et al. Dualenergy CT virtual noncalcium technique: Detecting posttraumatic bone marrow lesions—feasibility study[J]. Radiology, 2010, 256(2): 617–624.
- [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] 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.
- [16] Foti G, Catania M, Caia S, et al. Identification of bone marrow edema of the ankle: Diagnostic accuracy of dual-energy CT in comparison with MRI[J]. Radiol Med, 2019, 124(10): 1028–1036.
- [17] Pache G, Bulla S, Baumann T, et al. Dose reduction does not affect detection of bone marrow lesions with dual-energy CT virtual noncalcium technique[J]. Acad Radiol, 2012, 19(12): 1539–1545.
- [18] Barr M S, Anderson M W. The knee: Bone marrow abnormalities[J]. Radiol Clin North Am, 2002, 40(5): 1109–1120.