#### 论 著

# 双能CT虚拟去钙技术 在踝关节处骨髓水肿中 的诊断价值

何绪成 叶 菊 周闪闪 韩文娟 陈晓霞 王贵生\* 中国人民解放军总医院第三医学中心 放射诊断科 (北京 100039)

【摘要】目的 探讨双能CT(DECT)虚拟去钙(VNCa) 技术在急性创伤患者踝关节处骨髓水肿(BME)中的 诊断价值。**方法** 63例患者在踝关节急性外伤后24h 内接受双源DECT(80kVP和Sn140kVP)和MRI成像。 DECT使用Liver VNC软件三材料分解法生成踝关节 处的VNCa图像,由两名放射科医师使用二元系统 对图像进行分级(1=存在BME, 0=不存在BME),对 VNCa图像的CT值进行受试者操作特性曲线(ROC) 分析,以MRI结果作为"金标准"。结果 MRI显示 51/63例患者存在BME,DECT显示49/51例患者存 在BME(96.08%),两名医师通过DECT的VNCa图像 显示BME的敏感性、特异性、阴性预测值、阳性预 测值和准确性分别为96.08%、91.67%、84.62%、 98.00%、95.24%和96.00%、92.31%、85.71%、 97.96%、95.24%, 阅片医师间对DECT图像定性分 级的一致性较高(Kappa=0.84)。定量分析DECT的 阳性区域平均CT值为(-11.84±35.09)HU,阴性区 域平均CT值为(-61.82±39.52)HU,两区域CT值对 比有显著差异(P<0.001)。VNCa图像CT值曲线下面 积(AUC)为0.83(95%置信区间0.73~0.93),诊断阈值 为-24.14HU,定量分析DECT的敏感性、特异性、 阴性预测值、阳性预测值和准确性分别为98.00%、 92.31%、92.31%、98.00%、96.83%。 结论 DECT 可以诊断踝关节处急性创伤背景下的BME,与MRI 相比无明显差别。

【关键词】骨髓水肿;磁共振成像;踝关节;体层 摄影术;X线计算机 【中图分类号】R551.3; R445.2 【文献标识码】A DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2022.04.055

# Diagnostic Value of Dual-Energy CT Virtual Noncalcium Technique in Bone Marrow **Edema of Ankle Joint**

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

#### ABSTRACT

**Objective** To explore the diagnostic value of dual-energy CT virtual noncalcium technology in bone marrow edema at the ankle of patients with acute trauma. Methods Sixty-three patients underwent DECT scan and MRI imaging within 24 hours after acute ankle trauma. VNCa images at the ankles were generated with Liver VNC software by three-factor analysis using DECT scan. These images were graded by two radiologists using a binary system (1=presence of BME, 0=absence of BME); CT values of the VNCa images were analyzed by receiver operating characteristic curve (ROC), and MRI results were used as "golden standard". Results The results of MRI imaging showed that BME was present in 51/63 patients (80.95%), and the results of DECT scan showed that BME was present in 49/51 patients (96.08%). The DECT-VNCa images analyzed by the two radiologists showed that the sensitivity, specificity, negative predictive value, positive predictive value and accuracy of BME were 96.08%, 91.67%, 84.62%, 98.00%, 95.24% and 96.00%, 92.31%, 85.71%, 97.96%, 95.24%, respectively. The consistency of qualitative grading of DECT images by them was higher (Kappa = 0.84). Quantitative analysis of these images showed that the average CT value of the positive area was (-11.84  $\pm$  35.09) HU, and the average CT value of the negative area was (-61.82 ± 39.52)HU; There was a significant difference between the CT values of the two areas (P<0.001), and the difference was statistically significant. The area under the curve (AUC) for the CT values of the VNCa images was 0.83 (95% confidence interval is from 0.73 to 0.93), and the diagnostic threshold was -24.14HU. The sensitivity, specificity, negative predictive value, positive predictive value, and accuracy of the quantitative analysis of DECT were 98.00%, 92.31%, 92.31%, 98.00%, 96.83%. Conclusion DECT can be used to diagnose BME in the context of acute trauma at the ankle, and it has no significant difference compared with MRI.

Keywords: Bone Marrow Edema; Magnetic Resonance Imaging; Ankle Joint; Tomography; X-Ray Computes

踝关节是人体重要的负重关节,其结构复杂,在急性创伤背景下往往会发生骨 髓水肿(bone marrow edema,BME),目前MRI是公认的诊断BME的"金标准"<sup>[1-4]</sup>. 然而踝关节处创伤患者在急性环境下往往接受CT而非MRI成像,对于幽闭恐惧症等 MRI禁忌证患者,也只能选择CT检查。相对于MRI,传统CT对骨骼,尤其骨髓及软 组织病变的诊断价值有限,随着双能CT技术的进步,提高了CT根据材料分解来定 性和区分各种身体物质的能力,迎来了骨髓可视化的新方法<sup>[5]</sup>,目前国外一些学者 采用双能量计算机断层成像(dual energy computed tomographic, DECT)检测脊 柱和髋关节等处的BME并取得了不错的效果,但对踝关节处急性创伤背景下的BME 鲜有报道<sup>[6-7]</sup>。因此,本研究利用DECT的Liver VNC软件三材料分解法生成虚拟去钙 (virtual noncalcium, VNCa)图像,并与MRI结果进行对比分析,探讨DECT在踝关 节处急性创伤背景下诊断BME的价值。

### 1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究获得本院伦理委员会批准。收集我院2018年1月至2019 年10月来诊的踝关节急性创伤患者63例,其中男性48例,女性15例,平均年龄 (28.5±3.2)岁。纳入标准:年龄18~60周岁;外伤后24h内来诊;一年内无既往踝 关节外伤或手术史;全部病例先后接受DECT和MRI检查;签订知情同意书愿意成为 本研究的受试者。

**1.2 DECT参数** 使用西门子公司第二代双源CT(Somatom Definition Flash;

Siemens Healthcare, Forchheim, Germany)。 扫描参 数: 头足向扫描,双能模式(collimation=32×0.6mm; pitch=0.7; rotation time=0.5s),球管A=80kVp,球管 B=Sn140kVp(Sn为锡过滤器),预定义的管电流一时间乘积按 照大约2:1的比率设置(球管A=360mAs;球管B=180mAs), 自动管电流调整方式(Care Dose 4D; Siemens)。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。扫描后得80kVp图像、Sn140kVp图像和混合加权 图像(80kVp和140kVp以0.4:0.6比例混合相当于120kVp单 能图像),重建算法分别使用骨卷积核(B70s)和软组织卷积核 (D30s)。

使用三物质分解法生成VNCa图像,VNCa图像以灰度和彩 色编码图显示以供进一步分析。Liver VNCa参数值设定: 伪彩 着色选甲状旁腺模式,根据以往研究的经验,通过将Rel.CM 设置为1.75,该算法适用于踝关节成像(图1~图3)。



图1 DECT后处理软件Liver VNC参数值设定







图3 骨髓水肿和正常区域CT值对比图

**1.3 MRI参数** 使用西门子1.5T扫描仪(Magnetom Avanto Fit; Siemens Healthcare, Erlangen, Germany)。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轴向短反转时 间反转恢复STIR序列(表1)。

表1 MRI成像参数

序列	TE/TI(ms)	FOV(cm)	矩阵	层厚(mm)	层间距(mm)
$T_1WI$	500/12	16×16	320×192	3	1
$T_2WI$	4000/102	16×16	256×192	3	1
STIR	5000/34	16×16	320×224	3	1

1.4 图像分析 使用二元分类系统评估踝关节处是否存在 BME(1=存在BME, 0=不存在BME),两位具有10年以上工作 经验的放射科医师在双盲条件下进行图像评估,包括灰度和彩 色编码图像,将感兴趣区(ROI≥0.3cm<sup>2</sup>)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,以排除因射线 束硬化、骨皮质去除和VNCa图像上的过滤效应造成的该区域 内对BME分析的影响<sup>[8]</sup>。作为参考标准,由第三位放射科高级 医师使用如前所述的相同解剖区域和分类系统,按随机顺序评 估所有MRI图像是否存在BME。

**1.5 统计学分析** 连续变量平均值表示为( $\bar{x} \pm s$ ),用t检验分析,分类变量用 x<sup>2</sup>或Fisher精确检验分析,统计软件使用 SPSS 22.0进行。MRI图像作为对照分析的"金标准",采用 ROC曲线和(area under curve, AUC)评估DECT图像的CT值 变化,依据定性分析和定量分析的处理结果,分别计算DECT 的敏感性、特异性、阴性预测值、阳性预测值和准确性, P<0.05表明差异存在统计学意义。

### 2 结 果

MRI显示51/63例患者存在BME,DECT显示49/51例患者存在BME(96.08%)。两位医师通过评估DECT图像显示BME的敏感性、特异性、阴性预测值、阳性预测值和准确性分别为96.08%、91.67%、84.62%、98.00%、95.24%和96.00%、92.31%、85.71%、97.96%、95.24%,阅片医师间对DECT图像定性分级的一致性较高(Kappa=0.84)。

客 观 定 量 分 析 D E C T 的 C T 值 阳 性 区 域 平 均 值 为 (-11.84±35.09)HU,阴性区域平均值为(-61.82±39.52)HU, 阳性区域和阴性区域对比,差异有统计学意义(P<0.001)。 VNCa图像CT值的AUC为0.83(95%置信区间0.73~0.93),诊断阈值为-24.14HU,定量分析DECT的敏感性、特异性、阴性预测值、阳性预测值和准确性分别为98.00%、92.31%、92.31%、98.00%、96.83%(表2)。典型病例影像分析结果见图4~图5。

表2 基于患者DECT图像分析和CT值分析的诊断性能对比[n(%)]

参数	医师一图像	医师二图像	医师三CT值
敏感性	49/51(96.08)	48/50(96.00)	49/50(98.00)
特异性	11/12(91.67)	12/13(92.31)	12/13(92.31)
阴性预测值	11/13(84.62)	12/14(85.71)	12/13(92.31)
阳性预测值	49/50(98.00)	48/49(97.96)	49/50(98.00)
准确性	60/63(95.24)	60/63(95.24)	61/63(96.83)



图4 男性,22岁,外伤后来诊(真阳性)。图4A: 矢状位常规灰阶CT图正常; 图4B: 矢状位VNCa蓝色伪彩图显示内踝创伤性骨髓水肿(显示为绿色区域,箭头); 图4C: STIR序列证实了内踝创伤性骨髓水肿的诊断。图5 男性,22岁, 外伤后来诊(假阴性)。图5A: 轴位常规灰阶CT图正常; 图5B: 轴位VNCa蓝色 伪彩图显示无异常,造成漏诊; 图5C: STIR序列显示创伤性骨髓水肿的诊断 (箭头)。

# 3 讨 论

创伤性BME描述了一种由生理性骨髓成分改变引起的异常,其成因是液体含量增加,或者是脂肪组织减少<sup>[9-12]</sup>。MRI 技术可使BME的可视化达到最佳状态,其表现为T<sub>1</sub>WI呈边缘 欠清晰的片状模糊信号影,T<sub>2</sub>WI呈边界不清晰的稍高或者明显的高信号影,T<sub>2</sub>WI脂肪抑制序列呈相对明显的高信号影。 相对于MRI,传统CT对骨髓及软组织病变的诊断价值有限,当 踝关节受到创伤后,伤处骨髓从脂肪到水样物质的转变导致局 部骨髓密度发生变化<sup>[13]</sup>,这种变化引起骨髓CT值相对于正常骨 髓呈高密度,有的严重损伤还可能表现为软组织密度影<sup>[14]</sup>,而 由于骨髓中钙质的存在,在传统CT上掩盖了这种变化,无法 观察到BME的情况。研究表明,与传统的单能量检查相比, 第二代DECT可以实现相似的图像质量和辐射量<sup>[15-16]</sup>,第二代 DECT可使用VNCa技术评估骨髓变化,该技术采用基于脂肪、 水和钙三种物质的三物质分解算法,重建出含有脂肪和水但不 含钙的虚拟图像,使用这些图像可通过以HU单位测量的骨髓 密度变化来确定含水量增加<sup>[17-18]</sup>。

本研究利用DECT的VNCa技术从定性和定量两个方面分别 检测急性创伤环境下踝关节处的BME,与MRI检查结果进行对 比,均取得了非常理想的结果。在DECT重建的VNCa图像上测 量BME的CT值的衰减变化,发现骨髓异常区域的密度明显高 于MRI成像阴性的区域,这与创伤性BME表现为液体增加和脂 肪减少的病理生理学基础是一致的<sup>[9,12]</sup>。本研究发现急性BME 在DECT图像上均表现为黑色背景下的稍高密度影,与T<sub>2</sub>WI脂 肪抑制序列对应的高信号区域一致,当骨髓CT值升高越明显 时,越容易在VNCa图像上显示; DECT的诊断效果与MRI上骨 髓异常的程度也呈正相关,在较明显的病例中,DECT在敏感 性、阳性预测值和准确性方面表现优异,而在MRI图像上信号 强度变化较细微的病例中,DECT的表现较差;阅片人经验对 VNCa图像检测BME也有重要影响,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成像所见信号强度的改 变明显。因此,阅片人的灰度调节技术和色彩操作经验对准确 诊断至关重要,调整覆盖使正常骨髓呈现蓝色有助于与BME相 关的骨髓衰减信号的对比更加明显。

定量分析DECT阳性区域平均CT值与阴性区域平均CT值对 比有显著差异,这说明DECT定量分析BME的结果极其理想, 根据以往经验,在某些情况下CT值分析可能有助于在视觉评 估中表征微妙或模棱两可的影像学发现;创伤性BME导致继 发于出血和骨髓腔内间质融合增加的CT值小幅但可测量的增 加,ROC分析以不同的截断CT值区分不同解剖区域的正常和 异常骨髓,对DECT数据的定量分析具有较高的敏感性和较好 的特异性,与定性分析结果相似。本研究与之前学者的研究 相比,CT值和诊断阈值存在一定的差异<sup>[19-20]</sup>,可能与使用了 不同机型和所使用的软件不同有关,也可能是用于ROI放置的 方法不同。在Guggenberger等<sup>[20]</sup>的研究中,ROI位于MRI图 像上信号强度最高的位置,而本研究是在参照MRI图像的基 础上,根据操作医师的选择将ROI放置于邻近骨皮质距离大 于2mm的图像处密度变化最大的位置内,以排除因射线束硬 化、骨皮质去除和VNCa图像上的过滤效应造成的该区域内对 BME分析的影响。由此可见,DECT定量分析显示和分辨距离 皮质骨2mm范围内的BME能力有限,与古凌静等<sup>[21]</sup>指出的通 过测量CT值等定量指标显示和分辨邻近骨皮质区域(≤3mm的 范围内)骨髓的能力尚有待改进的结论相似,标准的高分辨率 CT图像是评估皮质骨受累的一种实用工具<sup>[22-23]</sup>,可作为对该 诊断盲区的一种补充诊断方法,但诊断价值有限。

研究发现,DECT对踝关节处较大骨骼处的敏感性大于足 中部区域骨骼,这可能与足中部骨骼的尺寸相对较小,而皮质 骨的患病率较高有关,因此推测CT值定量分析在足踝部远端 的准确度可能会降低。在人体生长和发育的过程中,红骨髓到 黄骨髓的转变始于远端指骨,从周围骨骼向中心区域骨骼逐步 发展,据此推断,相同程度的BME在人体远端骨骼中CT值变 化会更加明显,通过定量分析CT值变化,也能间接反映红、 黄骨髓的分布情况,亦可从侧面佐证骨骼的发育过程。

本研究有几个局限性。首先,纳入的患者数量相对有限, 需要更大规模的研究来证实结论。其次,患者的年龄选取范围 较小,大部分为青壮年患者,然而随着年龄的增大,骨小梁和 骨密度降低导致X线衰减水平降低可能导致CT值测量困难,如 果MRI图像的变化比较细微,DECT的准确性可能会较差<sup>[20]</sup>。最 后,定量分析可以代表一种额外的工具,帮助放射科医生区分细 微的影像表现,但本文没有进行定性和定量分析的对照研究。

综上所述,DECT是显示急性创伤患者踝关节处BME的一种准确成像工具,通过DECT早期诊断BME可以帮助选择符合条件的患者进行早期治疗,如限制或停止活动,以预防进一步的并发症。同时DECT对踝关节处隐匿性骨折的检测也可能会有所改善,所有这些潜在的临床适应证都需要在接下来的研究进一步证实。

## 参考文献

- [1]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.
- [2]Li M, Qu Y L, Song B. Meta-analysis of dual-energy computed tomography virtual non-calcium imaging to detect bone marrow edema [J]. Eur J Radiol, 2017, 95 (1): 124-129.
- [3]Yang P, Wu G, Chang X. Diagnostic accuracy of dual-energy computed tomography in bone marrow edema with vertebral compression fractures: A meta-analysis[J]. Eur J Radiol, 2018, 99 (1): 124-129.
- [4] 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.
- [5] Pache G, Bulla S, Baumann T, et al. Dose reduction does not affect detection of bone marrow lesions with dualenergy CT virtual noncalcium technique[J]. Acad Radiol, 2012, 19 (12): 1539-1545.
- [6] Reddy T, McLaughlin P D, Mallinson P I, et al. Detection of occult, undisplaced hip fractures with a dual-energy CT algorithm targeted to detection of bone marrow edema [J]. Emerg Radiol, 2015, 22 (1): 25-29.
- [7]Khanduri S, Goyal A, Singh B, et al. The utility of dual energy computed tomography in musculoskeletal imaging [J]. J Clin Imaging Sci, 2017, 7: 34.
- [8] 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.
- [9] Mandalia V, Henson J H L. Traumatic bone bruising: a review article[J]. Eur J Radiol, 2008, 67 (1): 54-61.
- [10] 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.

- [11] Rangger C, Kathrein A, Freund M C, et al. Bone bruise of the knee: Histology and cryosections in 5 cases [J]. Acta Orthop Scand, 1998, 69 (3): 291-294.
- [12] Zanetti M, Bruder E, Romero J, et al. Bone marrow edema pattern in osteoarthritic knees: Correlation between MRI imaging and histologic findings[J]. Radiology, 2000, 215 (3): 835-840.
- [13] 杨献峰,朱斌,蒋青. 膝关节周围骨挫伤的临床与影像学研究进展[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47 (2): 190-192.
- [14] 曹建新, 王一民, 孔祥泉, 等. 双能量CT VNCa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.
- [15] Foley W D, Shuman W P, Siegel M J, et al. White paper of the society of computed body tomography and magnetic resonance on Dual-energy CT, Part 2: Radiation dose and iodine sensitivity[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40 (6): 827-850
- [16] Tao S M, Li X, Schoepf U J, et al. Comparison of the effect of radiation exposure from dual-energy CT versus single-energy CT on double-strand breaks at CT pulmonary angiography[J]. Eur J Radiol, 2018, 101 (4): 92-96
- [17] Nicolaou S, Liang T, Murphy D T, et al. Dual-energy CT: A promising new technique for assessment of the musculoskeletal system[J]. AJR Am J Roentgenol, 2012, 199 (11): S78-S86
- [18] De Cecco C N, Schoepf U J, Steinbach L, et al. White paper of the society of computed body tomography and magnetic resonance on dual-energy CT, part 3: Vascular, cardiac, pulmonary, and musculoskeletal applications [J]. J Comput Assist Tomogr, 2017, 41 (1): 1-7.
- [19] Neuhaus V, Lennartz S, Abdullayev N, et al. Bone marrow edema in traumatic vertebral compression fractures: Diagnostic accuracy of dual-layer detector CT using calcium suppressed images [J]. Eur J Radiol, 2018, 105 (8): 216-220
- [20] 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 MRI imaging [J]. Radiology, 2012, 264 (1): 164-173.
- [21] 古凌静, 洪国斌, 徐启兰. 双源CT在骨骼肌肉系统中的应用. 中国 医学影像技术 [J], 2013, 29 (9): 1544-1546.
- [22] Nakasa T, Ikuta Y, Sawa M, et al. Relationship between bone marrow lesions on MRI and cartilage degeneration in osteochondral lesions of the talar dome[J]. Foot Ankle Int, 2018, 39 (8): 908-9015.
- [23] Seo S G, Kim J S, Seo D K, et al. Osteochondral lesions of the talus [J]. Acta Orthop, 2018, 89 (4): 462-467.

(收稿日期: 2020-03-05)