

## 专论——能量成像技术

**编者按：**CT自问世以来，经过近40年的发展，已成为医学影像检查中发展进步最快的技术之一。CT能量成像技术最早可追溯到20世纪70年代，但受当时软硬件条件的限制，仅在双能量减影临床研究等少量领域进行了探索，并未获得广泛临床应用。近年来，随着瞬时双kVp技术的发展，为能谱CT成像的广泛临床应用和研究创造了可能，能量成像技术再次成为研究的热点。能谱CT不同于常规CT的显著特征在于多参数成像，并且其中某些参数是能谱CT所特有的。不同的参数反映不同的组织特性，使得能谱CT成像从多个角度对图像进行更深层的剖析，开辟CT成像多参数分析和功能成像的新方向，在常规CT的基础上为临床诊断提供更多、更准确、更全面的信息。能谱CT利用其单能量图像、基物质图像、能谱曲线、有效原子序数等多种参数进行疾病的诊断和定量分析，极大地丰富了诊断信息。本期专论介绍CT能量成像的临床应用，包括双能量CT虚拟平扫代替传统平扫的可行性研究、腰椎皮质羟基磷灰石和钙含量分析、早期痛风诊断、颅内动脉瘤诊断、颅内出血与钙化灶鉴别诊断、类风湿性关节炎腕关节骨髓水肿诊断等。



栏目主编：雷子乔

雷子乔，医学博士，主任技师，三级教授，硕士生导师，哈佛大学医学院访问学者。华中科技大学同济医学院附属协和医院放射科技师，放射科党总支第三党支部书记，主要从事CT、MRI等各种医学成像技术的基础与临床应用研究，以及医学影像新技术与医工结合的研究。目前担任中华医学会影像技术分会副主任委员；中国医师协会医学技师专业委员会副主任委员；中华医学科技奖评审委员会委员；国家卫生健康委人才中心专家；国家药品监督管理局医疗器械技术审评中心外聘专家；湖北省医学会放射技术分会主任委员；湖北省放射医学质量控制中心专家兼秘书；湖北省大型医用设备管理专家库专家；湖北省卫生技术高级职务评审委员会评委；武汉医学会放射技术分会主任委员；武汉市高（中）级评审委员会专家库委员；武汉医学会医疗事故鉴定专家；全国高等学校放射诊断与治疗专业国家卫生和计划生育委员会研究生规划教材评审委员会委员；中国科学院教材建设专家委员会全国高等院校医学影像学医学影像技术专业案例版规划教材编审委员会委员；科学出版社“十四五”规划教材医学影像技术学研究生核心课程教材评审专家委员会副主任委员。在国内外权威期刊及核心期刊发表论文（第一作者或通信作者）30余篇，其中SCI收录论文多篇。主编“国家级”规划教材6部，主编专著1部，副主编及参与编写高校教材及专著10余部。参与编写国家级专家共识10余篇，国家标准2部。主持湖北省自然科学基金面上项目及其他省级课题8项，参与多项国家级、省部级课题研究，先后获得湖北省科学技术进步二等和武汉市科技进步奖。

# 双能CT虚拟去钙技术对类风湿性关节炎腕关节骨髓水肿诊断效能的研究

刘向<sup>1</sup>，陈英敏<sup>1</sup>，郑泓明<sup>2</sup>，王宇航<sup>1</sup>，李玲<sup>3</sup>，白文月<sup>1</sup>

1. 河北省人民医院 医学影像科，河北 石家庄 050001；2. 河北医科大学第二医院 核医学科，河北 石家庄 050061；

3. 陕西省人民医院 核磁共振室，陕西 西安 710068

**[摘要]** 目的 探讨双能CT（Dual-Energy CT，DECT）虚拟去钙（Virtual Non-Calcium，VNCa）技术对类风湿性关节炎（Rheumatoid Arthritis，RA）腕关节骨髓水肿（Bone Marrow Edema，BME）的诊断效能。方法 连续纳入我院2019年7至12月风湿免疫科收入的有腕关节肿胀及疼痛等临床症状的RA患者13例，研究共纳入122块骨。由2名医师通过使用二分类法在彩色编码图像独立对所有骨进行视觉评估有无BME（0=没有异常骨髓密度，1=BME）。以MRI作为参考标准，计算VNCa图像主观分析结果诊断BME的敏感性、特异性、准确性、阳性预测值（Positive Predictive Value，PPV）和阴性预测值（Negative Predictive Value，NPV）；比较水肿骨髓和正常骨髓CT值的是否有差异，并使用受试者操作特征曲线分析检验BME的最佳截断CT值。结果 MRI显示39块骨头有BME，83块无BME。2位医师对DECT显示RA患者BME的敏感性、特异性、准确性、PPV及NPV分别为87%、95%、93%、89%、94%和87%、89%、89%、79%、94%。定量测定VNCa图像BME的CT值高于无BME区（ $P<0.01$ ）。当图像诊断BME的截断值为-34 HU时，敏感性、特异性和准确性分别为92.3%、92.7%和92.6%。结论 第三代双源DECT VNCa技术可对RA患者腕关节BME具有良好的诊断效能。

**[关键词]** 双能CT；类风湿性关节炎；骨髓水肿；磁共振成像

# Study on Diagnostic Performance of Dual-Energy CT Virtual Non-Calcium Imaging for Displaying Bone Marrow Edema in Patients with Rheumatoid Arthritis of Wrist

LIU Xiang<sup>1</sup>, CHEN Yingmin<sup>1</sup>, ZHENG Hongming<sup>2</sup>, WANG Yuhang<sup>1</sup>, LI Ling<sup>3</sup>, BAI Wenyue<sup>1</sup>

1. Department of Medical Imaging, Hebei General Hospital, Shijiazhuang Hebei 050001, China;

2. Department of Nuclear Medicine, The Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang Hebei 050061, China;

3. MRI Room, Shaanxi Provincial People's Hospital, Xi'an Shaanxi 710068, China

**Abstract:** **Objective** To evaluate the diagnostic performance of dual-energy CT (DECT) virtual non-calcium (VNCa) images in displaying bone marrow edema (BME) in wrist joints in participants with rheumatoid arthritis (RA). **Methods** From July to December 2019, 13 RA patients with clinical symptoms such as wrist swelling and pain received by the department of rheumatology and immunology in our hospital were collected, and a total of 122 bones were included in the study. Two physicians independently visually assessed all bones for BME (0=no abnormal bone marrow density, 1=BME) on color-coded images by using binary classification. Using MRI as the reference standard, calculated the sensitivity, specificity, accuracy, positive predictive value (PPV) and negative predictive value (NPV) of the subjective analysis results of VNCa images in the diagnosis of BME; compared whether there were differences in CT values of bone marrow edema and normal bone marrow, and used receiver operating characteristic curve analysis to test the best cut-off CT value of BME. **Results** MRI showed 39 bones with BME and 83 bones without BME. The sensitivity, specificity, accuracy, PPV and NPV of DECT showed that the BME of RA patients was 87%, 95%, 93%, 89%, 94%, and 87%, 89%, 89%, 79%, 94%, respectively. The CT values of BME in the quantitative determination of VNCa image was higher than that of no BME area ( $P<0.01$ ). When the cut-off value of image diagnosis of BME was -34 HU, the sensitivity, specificity and accuracy were 92.3%, 92.7%, and 92.6%, respectively. **Conclusion** The third-generation DECT VNCa technology can be used to display the BME of the wrist of RA patients, and has a good diagnostic performance.

**Key words:** dual-energy computed tomography; rheumatoid arthritis; bone marrow edema; magnetic resonance imaging

[中图分类号] R681.5; R814.42

[文献标识码] A

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.10.020

[文章编号] 1674-1633(2021)10-0084-06

## 引言

类风湿关节炎 (Rheumatoid Arthritis, RA) 当前治疗目标主要是控制疾病的活动<sup>[1]</sup>。研究表明骨髓水肿 (Bone Marrow Edema, BME) 被认为是炎症的重要特征<sup>[2]</sup>, 且通常被用作判断 RA 活动的重要参考指标<sup>[3]</sup>; 另外, BME 与骨侵蚀有关, 是骨破坏的预测因素之一<sup>[4]</sup>。因此, 对于 RA 患者, 尽早发现 BME 至关重要。BME 是一种具有不同病因和结果的非特异性影像学表现<sup>[5]</sup>, RA 中的 BME 又叫骨炎<sup>[6]</sup>。虽然 MRI 可以作为诊断 RA 的 BME 的敏感工具, 但它存在一些局限性, 如操作复杂、禁忌症较多、时间长等, 由于 RA 患者累及关节多且疼痛等原因, 往往不能配合长时间检查, 而 DECT 具有无创性、依从性好、操作简单且密度分辨率高等特点。

先前的研究表明, DECT 在检测 BME 方面具有出色的诊断性能<sup>[7-9]</sup>。DECT 虚拟去钙 (Virtual Non-Calcium, VNCa) 的原理是可以同时获得两个低能量和高能量的 CT 数据集, 然后使用三种物质分离算法 (骨矿物质、红骨髓和黄骨髓) 量化并去除特定的化学元素钙<sup>[7]</sup>。在后处理软件中, 生成彩色编码的 VNCa 图像。然而, 据研究所知, 目前仅有一篇关于使用 VNCa 检测 RA 患者 BME 的报道<sup>[10]</sup>,

这表明 DECT 在 RA 中检测 BME 具有可行性, 但是, 该研究并没有进行诊断效能的评估。

所以, 本研究目的是以 MRI 图像作为参考标准, 评估使用 DECT VNCa 技术在视觉和定量方面对活动性 RA 患者的腕关节 BME 的诊断效能。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

本研究通过我院伦理委员会审核, 所有患者均签署知情同意书。前瞻性连续收集 2019 年 7 至 12 月河北省人民医院风湿免疫科收入的 18 例诊断为 RA 的病人, 男 5 例, 女 13 例, 年龄 35~70 岁。纳入标准: ① 25~70 岁; ② 诊断均符合 2010 年 ACR/EULAR 修订的关于 RA 的诊断标准<sup>[11-12]</sup>; ③ 腕关节、近端指间关节区肿胀及疼痛。将 3 例由于整个腕关节明显的骨质硬化、1 例由于 MRI 扫描图像不理想、1 例由于明显的骨质破坏排除在该研究之外, 另外 8 块骨头由于硬化影响被排除在外, 最终 13 例患者的 122 块骨头 (98 个腕骨和 24 个尺桡骨) 被纳入研究, 其中男性 3 例, 女性 10 例, 平均年龄为  $(53 \pm 11)$  岁。所有病人均进行了疼痛明显侧的腕关节 MRI 检查和第三代 DECT 检查, 间隔时间不超过 24 h。

### 1.2 双能 CT 扫描及重建参数

所有患者均行第三代双源双能 CT (Dual-Energy

收稿日期: 2021-08-20

通信作者: 陈英敏, 主任医师, 主要研究方向为双能 CT 在各系统的诊断及应用。

通信作者邮箱: hbghyngxiang@126.com

CT, DECT) (Somatom Force, Siemens Healthineers, Forchheim, Germany) 扫描, CT 双能扫描参数: A 球管: 管电压 Sn150 kV, 管电流 100 mAs; B 球管: 管电压 80 kV, 管电流 150 mAs, 使用自动管电流调制技术 (CARE Dose4D), 准直器  $64 \times 0.6$  mm, 螺距 0.7, 机架旋转时间为 0.5 s, 患者采取俯卧位, 扫描范围包括整个腕关节和尺桡骨远端。

一次 DECT 扫描完成后获得 80 kV、Sn150 kV 以及近似于单能 120 kV 的加权平均图像, 80 kV、Sn150 kV 的数据被重建为层厚 1.5 mm, 层间距 1.0 mm 的图像, 并发送至工作站 (Syngo Via Dual Energy; VB10) 进行处理。VNCa 图像利用 Dual Energy 软件“骨髓”功能重建, 获得 VNCa 彩色编码图像。

### 1.3 MRI扫描参数

所有患者的 MR 检查均使用 GE 1.5T (Signa EXCITE HDx; GE Healthcare, Waukesha, WI, USA) MRI, 采取俯卧位的膝关节表面线圈。使用的扫描序列和相应的参数设置分别为: 冠状脂肪饱和的质子密度加权成像 (Fat Saturation Proton Density Weighted Image, FS-PDWI) 序列 (TR 2700 ms, TE 30 ms, FOV  $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ ; 矩阵  $288 \times 224$ , 层厚 2.0 mm, 层间距 0.2 mm), 冠状位快速自旋回波 T1 加权序列 (TR 625 ms, TE 17.4 ms, FOV  $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ ; 矩阵  $256 \times 192$ , 层厚 2.0 mm, 层间距 0.2 mm), 轴位 T2 加权脂肪饱和 (Fat Saturation T2 Weighted Image, FS-T2WI) 序列 (TR 4000 ms, TE 85 ms, FOV  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ; 矩阵  $288 \times 192$ , 层厚 3.0 mm, 层间距 0.3 mm), 轴位快速自旋回波 T1 加权 (Fast Spin Echo T1 Weighted Imaging, FSE-T1WI) 序列 (TR 625 ms, TE 17.4 ms, FOV  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ; 矩阵  $256 \times 192$ , 层厚 3.0 mm, 层间距 0.3 mm)。

### 1.4 图像定性及定量分析

MRI 图像由 1 名有经验的放射科医师独立评价, 确定有无 BME。在 MRI 上, BME 在 T1WI 上多表现为边界模糊的低信号, FS-PDWI 序列呈相对明显的高信号 (图 1), 并以 MRI 结果作为参考标准。

所有原始的 CT 图像分析由另 2 名有骨关节系统经验的放射科医师在均不知 MRI 结果的情况下独立完成, 在虚拟去钙图像上采用二分类法在彩色编码图像独立对所有骨进行视觉评估有无 BME (0= 没有异常骨髓密度, 1=BME)。骨髓水肿在 VNCa 的颜色编码图像表现为边界不清的绿色 (图 1)。正常骨的 VNCa 图及 MRI 表现, 见图 2。每位医师可随意调节窗宽窗位, 并可随意缩放图像。为避免骨皮质干扰, 距骨皮质 2 mm 以内的区域不予评价<sup>[7]</sup>。

第 4 个放射科医师根据 MRI 的结果在 VNCa 图像上测量各腕骨骨髓腔减值 (CT 值), 其对主观图像分析的结果不知。病变骨在 MRI 所示 BME 区选择感兴趣区 (Region of Interest, ROI), ROI 放置在关节面下 2 mm 的区域, 正常骨同样在关节面下 2 mm 的区域选择 ROI, ROI 选取面

积约  $0.1 \text{ cm}^2$ , 每个病变区及正常区域均至少画两个圆形 ROI, 并记录其 CT 值。

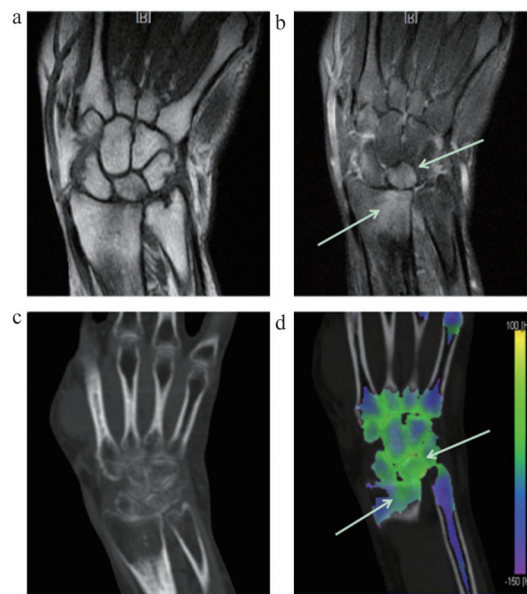


图1 某例患者扫描图像

注: 患者女, 68岁, 类风湿关节炎患者, a~b. MRI扫描的 FSE-T1WI及FS-PDWI序列, 尺骨远端、月骨可见斑片状T1WI低信号及PDWI高信号影; c. DECT平扫, 未见明显BME; d. DECT VNCa图, 松质骨显示为蓝色, 而在关节软骨上则清晰地显示了绿色边缘, 在尺骨远端、月骨的BME表现为边界不清的绿色。



图2 正常腕关节的VNCa图及MRI的影像表现

注: a. 正常骨髓腔的VNCa图表现为蓝紫色, 关节间隙表现为边界光滑的绿色; b. MRI T1WI序列表现为高信号; c. FS-PDWI序列呈低信号。

### 1.5 统计学分析

使用 SPSS 22.0 软件进行统计分析, 使用加权 Kappa 分析检验 2 位评价者间 BME 主观评分的一致性和第一位医师的 VNCa 图像与 MRI 图像结果的一致性。以 MR 作为参考标准, 计算 VNCa 图像主观分析结果诊断 BME 的敏感性、特异性、阳性预测值 (Positive Predictive Value, PPV)、阴



性预测值 (Negative Predictive Value, NPV) 和准确性。对 VNCa 图像上的水肿骨髓和正常骨髓 CT 值进行正态性检验, 如符合正态分布则采用独立样本  $t$  检验, 如不符合正态分布则采用 Mann-Whitney  $U$  检验。同样, 对 VNCa 图像 BME 的 CT 值采用受试者工作特征 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线计算曲线下面积 (Areas Under The Curve, AUC) 和区分正常骨髓与水肿骨髓的截断值, 并通过此截断值计算两者的敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值和准确性。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 主观图像分析

MRI 显示 13 例患者的 122 块骨有 39 块 BME 及 83 块正常骨。各腕骨 BME 的分布如表 1 所示。两名医师在 VNCa 图像分别发现 38 块、43 块骨有 BME, 两位医师分别有 4 个和 9 个假阳性, 二者均有 5 个假阴性。两名医师在 VNCa 图像上评估 RA 腕关节 BME 的诊断性能如表 2 所示。Kappa 分析显示二位评价者在 VNCa 图像主观评分的一致性及其第一位医师的 VNCa 图像与 MR 图像显示 BME 情况的一致性均较高 ( $k$  值分别为 0.871, 0.829)。

表1 各腕骨骨髓水肿的分布

腕骨名称	参与评价的骨头数	CT图像显示骨髓水肿数		MRI图像显示骨髓水肿数
		评价者1	评价者2	
舟骨	11	4	4	4
月骨	13	10	11	8
三角骨	13	5	7	6
豆骨	13	2	3	2
大多角骨	12	2	1	2
小多角骨	12	5	6	6
头状骨	12	3	3	4
钩骨	12	3	3	3
尺骨	12	1	2	1
桡骨	12	3	3	3
总计	122	38	43	39

表2 DECT 对类风湿关节炎患者骨髓水肿的主观评价结果 (%)

参数	评价者1		评价者2	
	评价结果/%	95%CI	评价结果/%	95%CI
敏感性	87 (34/39)	(71, 95)	87 (34/39)	(71, 95)
特异性	95 (79/83)	(87, 98)	89 (74/83)	(79, 94)
准确性	93 (113/122)	(86, 96)	89 (108/122)	(82, 93)
PPV	89 (34/38)	(74, 96)	79 (34/43)	(63, 89)
NPV	94 (79/84)	(86, 97)	94 (74/79)	(85, 97)

### 2.2 客观图像分析

以 MRI 作为参考标准, 在 VNCa 图像上, 39 个骨 BME 区的密度 CT 值 [平均  $(-8.8 \pm 21.7)$  HU] 明显高于 83 个无水肿的骨骨髓密度 CT 值 [平均  $(-62.9 \pm 21.2)$  HU], 两者间差异有统计学意义 ( $P < 0.01$ ) (图 3)。对所有骨髓密度 CT 值的 ROC 分析显示 AUC 为 0.95 (95%CI: 0.90~1.00) (图 4), 截断点为 -34 HU (敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值、准确性分别为 92.3%、92.7%、85.7%、96.2%、92.6%)。

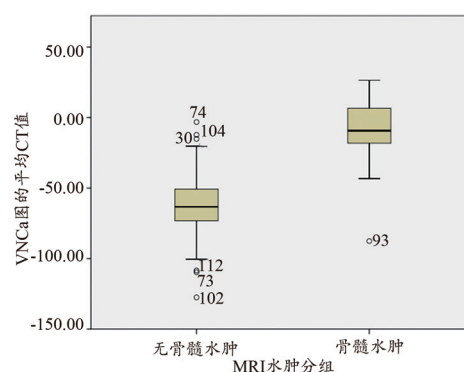


图3 BME区与无水肿的骨骨髓密度CT值箱式图

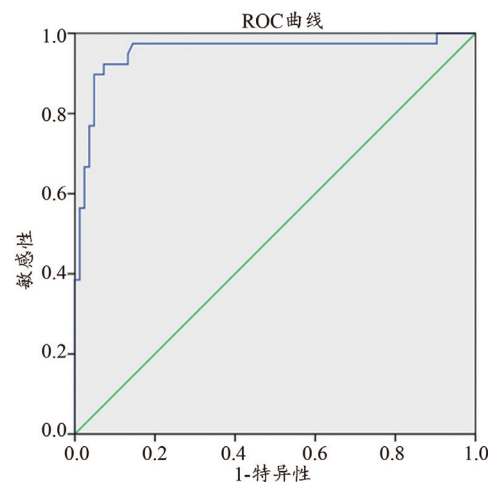


图4 VNCa图像骨髓密度CT值的ROC曲线

## 3 讨论

目前, MRI 是公认的 RA 诊断及活动性评估的最敏感的影像学方法。MRI 成像是唯一能够评估 BME 的方式, 但由于各种禁忌症和适应症, 并非所有可疑关节炎患者都可以对手或足进行 MRI 检查。DECT 使用不同 X 射线光谱的不同衰减特性来表示和识别各种物质<sup>[13]</sup>。DECT 可以通过使用三材料分解算法从松质骨中减去钙, 重建的彩色编码 VNCa 图像来显示骨髓的衰减。

迄今为止, 双能 VNCa 技术已被用于诊断创伤性脊柱<sup>[14]</sup>或四肢<sup>[15]</sup>的 BME, 多发性骨髓瘤的骨髓浸润<sup>[16]</sup>以及风湿性疾病相关的 BME<sup>[17-18]</sup>, 并且具有较高敏感性和特异性。但仅有少数研究报道了使用该技术直接描绘 RA 的方法<sup>[10]</sup>。本研究是第一个使用 DECT VNCa 技术检测 RA 的 BME 诊断效能的前瞻性研究。

本研究结果表明与 MRI 相比第三代 DECT VNCa 图像的主观和客观分析结果对 RA 患者腕关节的 BME 的显示均具有较高的敏感性和特异性。在视觉分析中, 当使用 VNCa 图像分析 RA 患者腕关节有无 BME 时, 研究发现敏感性为 87%, 特异性为 89%~95%, 准确性为 89%~93%。本研究结果与之前的几个研究<sup>[18-20]</sup>相似, 尤其是 Wu 等<sup>[18]</sup>的研究表明了 DECT 在髋膝关节炎中检测 BME 的可行性, 他们发现检测 BME 的敏感性

为 87%~93%，特异性为 91%~94%，准确性为 90%~92%。Koch 等<sup>[19]</sup>的 141 个急性腕关节创伤的回顾性研究中，表明 VNCa 图像对 BME 的评估的总体敏感性 94%、特异性 98%、准确性 97%。Petritsch 等<sup>[20]</sup>的研究表明，第三代双源扫描仪（90 kV 和 Sn150 kV）在分析鉴别椎体有无 BME 方面的总体敏感性为 64.0%、特异性为 99.3%、准确性为 93.9%。在本研究中，两个评估者分别有 4 例和 9 例假阳性，原因可能为：① 由于腕骨体积偏小，靠近关节面的关节软骨有时会表现为边缘光滑的彩色编码，这可能会影响水肿的观察，从而在 DECT 的 VNCa 图像上呈相对高密度，被误认为是 BME；② 骨质疏松症可能增加骨髓中的脂肪含量，骨髓脂肪浸润可能会降低定量检测 BME 的衰减阈值。骨髓随着年龄的增长，逐渐由红骨髓向黄骨髓转化<sup>[21]</sup>，虽然在骨髓成熟时红骨髓转化为黄骨髓的顺序为从周围骨到中心区域骨，但周围骨骼可能会部分幸免，特别是年轻人或在承受重复性压力时<sup>[22]</sup>。因此，本研究的一些年轻参与者导致假阳性。研究表明，当红骨髓完全被脂肪替代时，DECT 检测 BME 的效果最佳<sup>[23]</sup>。此外，对于彩色编码的 VNCa 图像的视觉分析结果显示，出色的观察者间一致性（ $k=0.871$ ）证明了临床上使用 DECT 的强大潜力。然而，在本研究中两个评估者均有 5 例假阴性，可能的原因有：① 放射科医师使用 VNCa 应用程序的经验水平不同；② VNCa 图像上的轻度水肿和无水肿的识别有时在不同的读者之间会有所不同；③ 由于部分腕骨水肿偏轻微，范围较小，异常骨髓与正常骨髓 CT 衰减值的差异太小，不足以使其在 DECT 图像上显示，而 MRI 由于可以对正常骨髓的信号抑制而对 BME 的显示相对较敏感，即便是轻微的 BME 也可清晰地显示，所以在 VNCa 上部分 BME 会显示不明确<sup>[24]</sup>。本研究的月骨 BME 占整个腕关节的 21%，这与余卫等<sup>[25]</sup>的研究相似，可能与月骨的血供来源丰富有关<sup>[26]</sup>。

在定量分析中，本研究证实了有 BME 和无 BME 之间的 VNCa 图的 CT 值之间存在显著差异，并且 BME 区域的 VNCa CT 值高于无水肿区的 CT 值。此外，本研究表明区分 BME 与无 BME 的 CT 最佳截断值为 -34 HU，并可产生 92.3% 的灵敏度、92.7% 的特异性 和 92.6% 的准确度。这与 Ali 等<sup>[27]</sup>所得的研究结果不相同（5.90 HU）；但此截断值与 Wu 等<sup>[18]</sup>研究 47 例髌髌关节炎 BME 的结果（评判者 1：-33 HU；评判者 2：-42 HU）及 Kosmala 等<sup>[28]</sup>在 24 例骨髓瘤患者中使用 -31.9 HU 的截断值来识别局灶性脊柱病变所得的结果相近。笔者认为该结果首先可能与 BME 的病理原因不同有关，前者是外伤所致的 BME，其特征为 BME 和出血，骨小梁的损伤和破坏以及间质的渗漏和出血向骨髓腔的破坏；后者是炎症所致的 BME，其特征为在炎性浸润物存在下促炎细胞因子的局部释放，使得其中富含脂肪的骨髓被淋巴细胞和血管的聚集物所替代；而且骨小梁或非骨小梁区域的病变细胞密度、大小和部位均可导致明显的 CT 值的差异。其次，扫描仪硬件，kV 设置，后处理算法，骨骼解剖部位和年龄的差异也可造成 CT 值的差异。

本研究的局限性：① 研究样本数偏小，后期还需增大样本数量进行统计；② 只选择了住院患者，由于门诊患者的临床资料不完整，所以没有选择门诊患者，这可能造成了潜在的选择偏倚；③ 双能 CT 的虚拟非钙算法的局限性之一是无法直接显示与皮质骨相邻的骨髓衰减的变化，这是由于皮质骨的不完全掩蔽和空间平均效应，衰减大于 800 HU 的区域被过滤，因此皮质骨附近的病灶可能会被遗漏；④ VNCa 重建算法目前仅与特定的后处理软件兼容。因此，本研究的结果和结论可能尚不适用于其他制造商的双能 CT 系统。

综上所述，本研究结果表明，与 MRI 相比，DECT 的 VNCa 技术对于活动性 RA 患者的 BME 在视觉评判和基于 ROI 的定量 CT 值测量两个方面均具有良好的诊断效能。

#### [参考文献]

- [1] Smolen JS, Landewé RBM, Bijlsma JWJ, et al. EULAR recommendations for the management of rheumatoid arthritis with synthetic and biological disease-modifying antirheumatic drugs: 2019 update[J]. *Ann Rheum Dis*, 2020, 79(6):685-699.
- [2] Bøyesen P, Haavardsholm EA, Ostergaard M, et al. MRI in early rheumatoid arthritis: synovitis and bone marrow oedema are independent predictors of subsequent radiographic progression[J]. *Ann Rheum Dis*, 2011, 70(3):428-433.
- [3] McQueen FM. Bone marrow edema and osteitis in rheumatoid arthritis: the imaging perspective[J]. *Arthritis Res Ther*, 2012, 14(5):224.
- [4] Nieuwenhuis WP, van Steenberg HW, Stomp W, et al. The course of bone marrow edema in early undifferentiated arthritis and rheumatoid arthritis: a longitudinal magnetic resonance imaging study at bone level[J]. *Arthritis Rheumatol*, 2016, 68(5):1080-1088.
- [5] Wong WD, Shah S, Murray N, et al. Advanced musculoskeletal applications of dual-energy computed tomography[J]. *Radiol Clin North Am*, 2018, 56(4):587-600.
- [6] McQueen FM, Gao A, Ostergaard M, et al. High-grade MRI bone oedema is common within the surgical field in rheumatoid arthritis patients undergoing joint replacement and is associated with osteitis in subchondral bone[J]. *Ann Rheum Dis*, 2007, 66(12):1581-1587.
- [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] 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.

- [9] Akisato K, Nishihara R, Okazaki H, et al. Dual-energy CT of material decomposition analysis for detection with bone marrow edema in patients with vertebral compression fractures[J]. *Acad Radiol*, 2020, 27(2): 227-232.
- [10] Jans L, De Kock I, Herregods N, et al. Dual-energy CT: a new imaging modality for bone marrow oedema in rheumatoid arthritis[J]. *Ann Rheum Dis*, 2018, 77(6): 958-960.
- [11] Aletaha D, Neogi T, Silman AJ, et al. 2010 rheumatoid arthritis classification criteria: an American College of Rheumatology/ European League Against Rheumatism collaborative initiative[J]. *Ann Rheum Dis*, 2010, 69(9): 1580-1588.
- [12] Aletaha D, Neogi T, Silman AJ, et al. 2010 Rheumatoid arthritis classification criteria: an American College of Rheumatology/ European League Against Rheumatism collaborative initiative[J]. *Arthritis Rheum*, 2010, 62(9): 2569-2581.
- [13] Mallinson PI, Coupal TM, McLaughlin PD, et al. Dual-energy CT for the musculoskeletal system[J]. *Radiology*, 2016, 281(3): 690-707.
- [14] 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.
- [15] Müller FC, Gosvig KK, Børgesen 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.
- [16] Thomas C, Schabel C, Krauss B, et al. Dual-energy CT: virtual calcium subtraction for assessment of bone marrow involvement of the spine in multiple myeloma[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2015, 204(3): W324-W331.
- [17] 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.
- [18] Wu H, Zhang G, Shi L, et al. Axial spondyloarthritis: dual-energy virtual noncalcium ct in the detection of bone marrow edema in the sacroiliac joints[J]. *Radiology*, 2019, 290(1): 157-164.
- [19] Koch V, Müller 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.
- [20] 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.
- [21] Małkiewicz A, Dziedzic M. Bone marrow reconversion - imaging of physiological changes in bone marrow[J]. *Pol J Radiol*, 2012, 77(4): 45-50.
- [22] Shabshin N, Schweitzer ME, Morrison WB, et al. High-signal T2 changes of the bone marrow of the foot and ankle in children: red marrow or traumatic changes? [J]. *Pediatr Radiol*, 2006, 36(7): 670-676.
- [23] Kellock TT, Nicolaou S, Kim SSY, et al. Detection of bone marrow edema in nondisplaced hip fractures: utility of a virtual noncalcium dual-energy CT application[J]. *Radiology*, 2017, 284(3): 798-805.
- [24] 李玉丹, 黄文起, 孔凡之, 等. 磁共振各序列在骨挫伤及骨转移诊断中的应用[J]. *医学影像学杂志*, 2010, 20(4): 554-556.
- [25] 余卫, 冯逢, 林强, 等. 类风湿性关节炎腕关节病变的影像学分析: X线、CT和MR影像对比观察[J]. *中华放射学杂志*, 2004, 38(4): 12-17.
- [26] 路来金, 宫旭, 刘志刚, 等. 腕月骨无菌性坏死的病因学研究[J]. *中华手外科杂志*, 2002, (4): 52-54.
- [27] Ali IT, Wong WD, Liang T, et al. Clinical utility of dual-energy CT analysis of bone marrow edema in acute wrist fractures[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2018, 210(4): 842-847.
- [28] Kosmala A, Weng AM, Krauss B, et al. Dual-energy CT of the bone marrow in multiple myeloma: diagnostic accuracy for quantitative differentiation of infiltration patterns[J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(12): 5083-5090.

本文编辑 王晨晨

上接第62页

- [21] Albakheet SS, Lee YH, Hahn S, et al. Accelerated metallic artifact reduction imaging using spectral bin modulation of multiacquisition variable-resonance image combination selective imaging[J]. *Magn Reson Imaging*, 2020, 72: 19-24.
- [22] Koff MF, Esposito C, Shah P, et al. MRI of THA correlates with implant wear and tissue reactions: a cross-sectional study[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2019, 477(1): 159-174.
- [23] Choi SJ, Koch KM, Hargreaves BA, et al. Metal artifact reduction with MAVRIC SL at 3-T MRI in patients with hip arthroplasty[J]. *AJR*, 2015, 204(1): 140-147.

本文编辑 皮志超