

综述

双能CT在骨骼肌肉系统成像中的应用

丹雅璐¹ 张进^{2,*}山西医科大学医学影像学院
(山西 太原 030001)

【摘要】近年来,随着双能CT(DECT)的不断发展,逐渐实现了CT多参数成像,包括虚拟单能量图像、虚拟平扫图像、碘密度图像、有效原子序数图像及钙抑制图像等,这些多参数成像相较于传统CT为疾病诊断提供了更多信息,本文主要介绍DECT在骨骼肌肉系统成像中的临床应用,主要体现在关节疾病、骨髓疾病、技术应用及软组织病变等方面。

【关键词】X射线计算机断层扫描; 双能CT; 骨骼肌肉系统

【中图分类号】R445.3; R445.4

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.07.060

Application of Dual-energy CT in Skeletal Muscle System Imaging

DAN Ya-lu¹, ZHANG jin^{2,*}.

1.Department of Medical Imaging, Shanxi Medical University, Taiyuan030001, Shanxi Province, China

2.Department of Radiology, The Second Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan030001, Shanxi Province, China

ABSTRACT

In recent years, with the development of dual-energy CT (DECT), single CT imaging has gradually evolved into multi-parameter imaging, including virtual monoenergetic images, virtual unenhanced images, iodine density images, effective atomic number images and virtual noncalcium images, etc. These multi-parameter images provide more information for disease diagnosis than traditional CT. This paper mainly introduces the clinical application of DECT in skeletal muscle system imaging. It is mainly reflected in joint disease, bone marrow disease, soft tissue disease and technical application and so on.

Keywords: X-ray Computed Tomography; Dual-energy CT; Skeletal Muscle System

X射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography, CT)自半个世纪前作为一种新兴非侵入性的诊断工具被引入以来,一直在不断发展,传统CT主要根据物质的CT值差异进行诊断,但对于CT值差异小的病变通常难以鉴别,且CT值会受到硬化效应、金属伪影等诸多问题的影响。双能CT(dual-energy CT, DECT)使用多参数成像原理,获得虚拟单能量图像、虚拟平扫图像、碘密度图像、有效原子序数图像及钙抑制图像等,这些多参数成像相较于传统CT可以在疾病影像诊断过程中提供更多有价值的信息^[1]。

目前所有能够进行双能采集的临床CT扫描仪可以分为两大类:基于源的和基于探测器的,主要包括双源CT、快速kVp切换CT、序列扫描CT以及双层探测器光谱CT(detector-based spectral CT, SDCT)^[2]。双源CT拥有两套完整的X线系统,在机架内以约90°的角度偏移,两套X线系统的扫描参数可以单独调整;快速kVp切换CT通过使用单一球管高低双能的瞬时切换,在机架旋转过程中采集两套信息,该技术可以实现投影数据域解析;序列扫描CT通过一套球管-探测器,采用不同电压连续扫描两次,两次成像数据在图像数据空间匹配,进行双能减影^[3];SDCT具有上下两层探测器,且由于基于探测器的技术,无需提前设定在双能模式下操作扫描仪,即可获得双能或光谱数据^[4],实现“同源、同时、同向、同步”。

DECT在骨骼肌肉系统成像中的应用主要体现在关节疾病、骨髓疾病、技术应用及软组织病变等方面,本文将详细介绍DECT在各方面的应用。

1 关节疾病

1.1 痛风 痛风是由于单钠尿酸盐(monosodium urate, MSU)晶体在关节内、外的软骨及周围软组织沉积而引起的一系列关节炎症反应。目前临床常用的诊断痛风的影像学检查方法主要有传统CT、X线、MRI与超声,然而传统CT及X线检查对检出痛风患者早期的非特异性软组织肿胀敏感度较低,只能在痛风患者晚期评估骨质破坏情况;MRI检查扫描时间长,检查禁忌症相对较多;超声检查对于痛风的诊断主观性较强,对诊断医师要求较高,因此这些检查方法在临床应用中有较大的局限性,近年来DECT已成为痛风诊治过程中一项十分有价值的技术^[5],其主要原因是低原子序数的MSU晶体与高原子序数的钙在不同能量级的衰减不同,DECT可以准确区分并显示尿酸、钙、软组织这三种物质,且通过彩色编码技术可以有效显示MSU沉积的解剖和定位^[6]。

李文娟等^[7]对24例痛风患者进行DECT扫描,分别获得140、80kVp单能量图像和混合能量图,并经过后处理得到伪彩色编码图,结果显示相对于常规混合能量图,DECT彩色编码图显示了更多数目的痛风石,表明后者具有更强的显示MSU的能力。李兆勇等^[8]对不同临床分期的高尿酸血症患者进行DECT检查,结果表明不同临床分期的患者MSU结晶的检出率不同,并且提示在痛风发作之前就可以出现MSU沉积。此外,DECT扫描中的关节或关节周围MSU晶体阳性现已成为2015年美国放射学会和欧洲抗风湿病联盟痛风分类标准的一部分^[9]。DECT可以将痛风与其他关节病和肿块区分开来,例如化脓性关节炎、类风湿性关节炎、骨关节炎、假痛风或肿瘤^[10-12],特别是在难以进行关节液抽吸的部位,如耻骨联合、寰枢关节、指间关节、腕关节等。DECT相较于传统CT可以提高对MSU晶体检出敏感度,并进行解剖定位,从而评估疾病的严重程度^[13]、进行预后判断及监测靶向治疗反应^[14]。

1.2 假性痛风 假性痛风是一种代谢性疾病,是由于磷酸钙双水化合物晶体(calcium pyrophosphate dihydrate, CPPD)沉着于关节软骨所致,其临床表现与痛风相似。膝关节周围的CPPD晶体可以在关节和关节周围组织中观察到,如软骨、滑膜和韧带,但

【第一作者】丹雅璐,女,住院医师,主要研究方向:骨骼肌肉系统的影像诊断。E-mail: 51666199@qq.com

【通讯作者】张进,男,主任医师,主要研究方向:骨骼肌肉系统的影像诊断。E-mail: zhangjin7007@aliyun.com

最常见的是关节透明软骨和半月板纤维软骨^[15]。由于DECT揭示了钙的存在和MSU晶体的缺失,因此可用于诊断假性痛风^[16-17]。Tanikawa等^[18]研究表明DECT对半月板内CPPD晶体的检测具有良好的敏感性(77.8%)和特异性(93.8%),此外,DECT还为CPPD沉积提供了空间信息。

2 骨髓疾病

2.1 骨髓水肿 骨髓水肿是以骨基质水肿、纤维组织增生及炎性细胞浸润为主要病理表现的一种征象,其主要是由病变组织血管过多、灌注过度及水的外渗作用等造成,它是一个基本的、共同的病理现象,多种疾病如感染、外伤或肿瘤等均可合并骨髓水肿^[19]。MRI是评估骨髓水肿的首选成像方式,然而在某些情况如急性创伤环境中,其使用受到限制;而CT在这种情况下成为首选的检查方式,其检查速度快,并且可以识别细微的骨折。常规CT由于骨小梁掩盖了正常骨髓和骨髓水肿之间的轻微差异,因此无法识别及评估骨髓水肿^[20],近年来研究表明DECT可以通过基于三物质分离算法(矿物质、黄骨髓和软组织)的虚拟去钙(virtual non-calcium,VNCA)技术,生成水、钙物质分解图像,去除骨骼中高度衰减的钙信号,突出骨髓水肿的显示,从而更好的评估骨髓水肿^[21]。

DECT检测骨髓水肿可用于股骨头坏死评估、急性慢性椎体压缩骨折鉴别、隐匿性骨折的诊断及四肢关节创伤后骨挫伤的评估。左天姿等^[22]对20例非创伤性股骨头坏死患者行DECT检查,结果显示,VNCA图对非创伤性股骨头坏死骨髓水肿具有较高诊断效能,并且可以显示小的软骨下骨折和细微的股骨头外形的改变,从而为临床治疗提供更多的信息。赵承勇^[23]等对34例椎体压缩骨折患者进行DECT检查,分别采用主观评估及客观分析的方法以鉴别急性慢性压缩骨折,结果表明两名医师通过VNCA图像诊断骨髓水肿主观评分一致性较高,并且急性压缩骨折患者骨髓水肿区域的CT值、其与相邻椎体正常区域骨质的CT值差值均较慢性压缩骨折患者高,因此,VNCA图像可用于鉴别急性、慢性椎体压缩骨折。蒲学佳等^[24]研究表明VNCA对膝关节骨髓损伤主观评价及CT差值客观评价分别与MRI成像的一致性较高,DECT对于膝关节隐匿性骨折具有良好的诊断效能。

2.2 骨髓肿瘤 DECT在骨髓肿瘤中主要用于评估骨转移瘤及多发性骨髓瘤,传统CT对骨质破坏显示较好,但对骨髓浸润性病变的敏感性不高,对一些隐匿性病变漏诊率较高,而DECT通过VNCA技术可以优化骨髓肿瘤的显示,提高诊断效能;虚拟单能量成像可以通过不同能级下病变CT值及能量曲线特征,对良、恶性骨肿瘤及其他骨病变进行鉴别^[25]。

DECT可以提高骨转移瘤的检出率。Issa等^[26]回顾分析18例患者共227个骨转移瘤,对其进行DECT骨髓水肿成像,结果表明,与传统CT相比,骨髓水肿成像提高了CT检测骨转移瘤的敏感性、特异性、准确性和置信度,从而减少了对额外成像的需求。Abdullayev等^[27]对21例接受SDCT和MRI检查的患者进行回顾性研究,胸腰椎MRI将357个椎体分为正常骨和转移骨,利用多水平VNCA算法计算低、中、高钙抑制指数图像,并与常规图像进行比较,结果显示SDCT重建的多水平VNCA可提高正常骨和转移骨的定量分离,并在使用低至中等钙抑制指数时可主观判断骨转移。

DECT可以帮助区分溶骨性脊柱转移瘤和Schmorl结节,当恶性肿瘤转移至骨时,首先侵入骨髓(主要由水和脂肪组成),正常椎体骨被肿瘤组织替代,其血管通透性显著高于正常组织中的血管通透性,从而增加细胞外的水密度^[28],因此,与正常椎体相比,溶骨性骨转移瘤的含水量较高,骨含量较低;而Schmorl结节长期压缩周围的骨质,因此不会显著降低骨含量;Zheng等^[29]回顾性研究102例接受DECT的癌症患者,有110个低密度椎体病变,分别测量其40-140 keV虚拟单能量CT值、能谱曲线斜率(k)、骨(水)和水(骨)密度的平均值,结果显示DECT区分溶骨性脊柱转移瘤和Schmorl结节具有较高的诊断价值。DECT还可用于区分肺癌患者的成骨性骨转移和骨岛。骨岛作为一种成熟皮质骨组织,其骨质含量比成骨性转移的骨组织高,而成骨性转移瘤病灶内还含有肿瘤细胞,含水量更高^[30]。Dong等^[31]研究表明,与骨岛相比,成骨性转移瘤在虚拟单能图像(virtual monoenergetic

image,VMI)的CT值和标准差显著低于骨岛,能谱曲线斜率较低,平均骨衰减较低,水衰减更高,区分成骨细胞转移与骨岛的最佳临界值是 68.6 HU,此时诊断效能最佳,敏感度为93.0%、特异度为93.3%。

在多发骨髓瘤中,可以用常规CT评估溶骨性病变,但其对弥漫浸润性病变的检出并不敏感,因此,弥漫浸润性病变通常使用MRI或PET-CT进行评估。Thomas等^[32]对32例多发骨髓瘤患者分别进行全身DECT及MRI扫描,以MRI为诊断标准,通过VNCA技术评估多发骨髓瘤患者骨髓浸润性病变,结果表明DECT区分正常骨髓和病理性骨髓的灵敏度为89%、特异性为85%,并且DECT检测中、高度骨髓浸润病例的灵敏度较传统CT相比分别提高到40%、75%。但需要注意的是,VNCA图像由于无法区分水肿、浆细胞浸润或重新激活的红骨髓,可能导致假阳性^[33]。

3 技术应用

3.1 减少金属伪影 CT是观察金属内固定术后的常用成像方式,主要用以评估内固定的状态、骨折愈合情况及术后并发症等。然而,传统CT易受到金属伪影的影响,这些伪影限制了骨、骨-金属界面和邻近软组织结构的观察和评估。造成金属伪影的因素有光束硬化、散射、噪声、光子饥饿和边缘效应^[34]。减轻金属伪影的常规技术包括高管电压或管电流、缩小准直宽度、平滑滤波器、迭代重建算法、金属伪影减少软件、自适应滤波等^[35],然而,这些技术可能造成辐射剂量增高、空间分辨率降低以及重建误差^[36]。

近年来,DECT VMI成为减少金属伪影的新手段。来自不同DECT的高能VMI(> 70 keV)已被证明可以在不增加辐射剂量的同时,改善几种金属伪影及其周围组织的可视化^[37]。Dangelmaier等^[38]对20例胸腰椎后路融合患者进行DECT扫描,将常规扫描的图像质量与40-200keV(20keV增量)的VMI进行比较,结果显示更高能量的VMI可显著减少脊柱后路融合产生的金属伪影,并进一步提出了180keV时整体图像质量最好。Kosmas等^[39]使用SDCT对12例有金属植入的患者进行扫描,并将金属植入物分为大型和小型,结果表明在VMI中,随着能量水平的增加,伪影逐渐减小,并且与大型植入物相比,小型植入物的伪影减少效果更好。

3.2 骨密度测定 双能X线吸收测定法(dual-energy X-ray absorptiometry, DXA)是目前临床最常用于骨密度(bone mineral density,BMD)测量的技术,但由于它是一种2D技术,可以测量椎体的面积骨密度,无法测量体积骨密度,并且受覆盖的肠道、主动脉钙化和退化性改变的影响而存在一定的局限性^[40];van Hamersvelt等^[41]应用SDCT对标准化欧洲脊柱体模进行扫描,研究结果表明SDCT测量的BMD与DXA测量的BMD呈强线性相关,提示SDCT可以精确量化骨密度,并为接受SDCT扫描的患者进行骨质疏松的机会性筛查提供可能性。由此可见,DECT为骨密度测定提供了新的测量方法和思路。

4 软组织应用

韧带和肌腱通常是用MRI或超声来评估的,但在急性创伤环境中,CT可能更有优势。然而,常规CT受到肌腱和邻近结构之间衰减差异不足以及射束硬化伪影的限制,对韧带和肌腱评估不足^[35]。由于胶原分子中密集堆积的羟赖氨酸和羟脯氨酸在不同能级水平的衰减不同,DECT可以清晰显示肌腱、韧带,同时对其进行颜色编码,从而评估肌腱和韧带的连续性及完整性^[42,43]。Deng等^[44]对20例手足部疼痛患者进行DECT扫描,所有病例均与手术或随访研究的结果对比,结果表明DECT既能清晰显示手足肌腱的解剖结构,又能显示其病理变化,为手足肌腱的可视化提供了一种新的方法。孙丛等^[45]对12例志愿者行膝关节DECT扫描,经图像后处理,膝关节前、后交叉韧带、腓侧副韧带和髌韧带可清晰显示,较薄的韧带、横行的韧带及后方的韧带显示欠佳。Peltola等^[46]对18例膝关节急性损伤患者分别行DECT和MRI检查,以MRI结果为标准,得出DECT诊断前交叉韧带断裂的敏感性为79%,特异性为100%,且40-140keV获得的VMI比DECT VNCA

技术能更好地评估前交叉韧带断裂。

MRI是评估椎间盘和神经根病变的参考成像技术,但DECT为具有MRI检查禁忌症的患者提供了另一种选择。Booz等^[47]对41例腰椎间盘突出症患者行DECT及MRI检查,以MRI为参考标准,结果显示VNCA图像诊断腰椎间盘突出症的敏感性为91%、特异性为92%,其诊断效能高于常规CT。

综上所述,随着CT技术的发展,DECT在骨骼肌肉系统成像中有着越来越广泛的临床应用,在关节疾病、骨髓疾病、技术应用及软组织病变等方面的诊断价值也逐渐得到了验证,为骨骼肌肉系统常见疾病的影像学诊断提供了更多信息。总之,DECT具有广泛的临床应用前景,其潜在价值有待于进一步深入研究。

参考文献

- [1]刘珮君,王怡宁,金征宇.光谱CT在心血管病诊断中的临床应用[J].中华放射学杂志,2020,54(6):613-616.
- [2]So A,Nicolaou S.Spectral Computed Tomography:Fundamental Principles and Recent Developments[J].Korean J Radiol,2021,22(1):86-96.
- [3]Garnett R.A comprehensive review of dual-energy and multi-spectral computed tomography[J].Clin Imaging,2020,67:160-169.
- [4]Fulton N,Rajiah P.Abdominal Applications of a Novel Detector-Based Spectral CT [J].Curr Probl Diagn Radiol,2018,47(2):110-118
- [5]罗浩,覃俏俊,韦广萍,等.痛风的发病机制及诊治研究进展[J].内科,2019,14(01):47-50.
- [6]Carotti M,Salaffi F,Filippucci E,et al.Clinical utility of Dual Energy Computed Tomography in gout:current concepts and applications[J].Acta bio-medica :Atenei Parmensis,2020,91(8-S):116-124.
- [7]李文娟,洪国斌,方义杰,等.双能CT彩色编码图对尿酸盐沉积的诊断价值[J].中国CT和MRI杂志,2015,13(7):97-100.
- [8]李兆勇,梁俊生,陈腾云,等.双能CT在高尿酸血症患者临床分期诊断中的应用[J].中国CT和MRI杂志,2021,19(7):170-173.
- [9]Neogi T,Jansen TL,Dalbeth N,et al.2015 Gout classification criteria:an American College of Rheumatology/European League Against Rheumatism collaborative initiative[J].Annals of the Rheumatic Diseases,2015,74(10):1789-1798.
- [10]Omoumi P,Verdun FR,Guggenberger R,et al.Dual-Energy CT: Basic Principles, Technical Approaches, and Applications in Musculoskeletal Imaging (Part 2) [J].Seminars in musculoskeletal radiology,2015,19(5):438-445.
- [11]Mallinson PI,Reagan AC,Coupal T,et al.The distribution of urate deposition within the extremities in gout:a review of 148 dual-energy CT cases[J].Skeletal radiology,2014,43(3):277-281.
- [12]Glazebrook KN,Guimarães LS,Murthy NS,et al.Identification of intraarticular and periarticular uric acid crystals with dual-energy CT: initial evaluation[J].Radiology,2011,261(2):516-524.
- [13]Dalbeth N,House ME,Aati O,et al.Urate crystal deposition in asymptomatic hyperuricaemia and symptomatic gout:a dual energy CT study [J].Annals of the Rheumatic Diseases,2015,74(5):908-911.
- [14]Choi HK,Al-Arfaj AM,Eftekhari A,et al.Dual energy computed tomography in tophaceous gout[J].Annals of the rheumatic diseases,2009,68(10):1609-1612.
- [15]Fuerst M,Bertrand J,Lammers L,et al.Calcification of articular cartilage in human osteoarthritis[J].Arthritis & Rheumatism,2009,60(9):2694-2703.
- [16]Kim HR,Lee JH,Kim NR,et al.Detection of calcium pyrophosphate dihydrate crystal deposition disease by dual-energy computed tomography [J].The Korean journal of internal medicine,2014,29(3):404-405.
- [17]Ward IM,Scott JN,Mansfield LTT,et al.Dual-Energy Computed Tomography Demonstrating Destructive Calcium Pyrophosphate Deposition Disease of the Distal Radioulnar Joint Mimicking Tophaceous Gout[J].Journal of clinical rheumatology,2015,21(6):314-317.
- [18]Tanikawa H,Ogawa R,Okuma K,et al.Detection of calcium pyrophosphate dihydrate crystals in knee meniscus by dual-energy computed tomography [J].Journal of orthopaedic surgery and research,2018,13(1):73.
- [19]陈军,瞿玉兴.骨髓水肿的现代研究[J].长春中医药大学学报,2010,26(2):255-6.
- [20]Wong WD,Shah S,Murray N,et al.Advanced Musculoskeletal Applications of Dual-Energy Computed Tomography[J].The Radiologic Clinics of North America,2018,56(4):587-600.
- [21]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.

- [22]左天姿,陈英敏,贾秀川,等.双能CT虚拟去钙技术显示非创伤性股骨头坏死骨髓水肿的研究[J].实用放射学杂志,2021,37(4):624-627,632.
- [23]赵承勇,罗松,邓小毅,等.双能量CT虚拟去钙成像在鉴别急性慢性椎体压缩性骨折中的研究[J].医学影像学杂志,2018,28(9):1535-1539.
- [24]蒲学佳,胡元明,吕涵青,等.双能量CT虚拟去钙技术对膝关节隐匿性骨折的诊断价值[J].影像诊断与介入放射学,2020,29(1):22-26.
- [25]徐驰杰,邓小毅,崔磊.双能量CT成像在脊柱转移瘤中的研究进展[J].国际医学放射学杂志,2020,43(1):83-86.
- [26]Issa G,Davis D,Mulligan ME.The Ability of Dual-Energy Computed Tomography to Distinguish Normal Bone Marrow From Metastases Using Bone Marrow Color Maps[J].J Comput Assist Tomogr,2018,42(4):552-558.
- [27]Abdullayev N,Große Hokamp N,Lennartz S,et al.Improvements of diagnostic accuracy and visualization of vertebral metastasis using multi-level virtual non-calcium reconstructions from dual-layer spectral detector computed tomography[J].Eur Radiol,2019,29(11):5941-5949.
- [28]Jain RK.Determinants of tumor blood flow:a review[J].Cancer research,1988,48(10):2641-2658.
- [29]Zheng S,Dong Y,Miao Y,et al.Differentiation of osteolytic metastases and Schmorl's nodes in cancer patients using dual-energy CT:advantage of spectral CT imaging[J].Eur J Radiol,2014,83(7):1216-1221.
- [30]王兵,董越,郑邵微,等.CT能谱成像鉴别诊断肺癌成骨性转移瘤与骨岛的价值[J].中国医学影像技术,2014,30(10):1552-1556.
- [31]Dong Y,Zheng S,Machida H,et al.Differential diagnosis of osteoblastic metastases from bone islands in patients with lung cancer by single-source dual-energy CT:advantages of spectral CT imaging[J].Eur J Radiol,2015,84(5):901-907.
- [32]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):W324-331.
- [33]Palmer W E,Simeone F J.Can Dual-Energy CT Challenge MR Imaging in the Diagnosis of Focal Infiltrative Bone Marrow Lesions?[J].Radiology,2018,286(1):214-216.
- [34]Boas FE,Fleischmann D.CT artifacts:causes and reduction techniques[J].Imaging in Medicine,2012,4(2).
- [35]Mallinson PI,Coupal TM,McLaughlin PD,et al.Dual-Energy CT for the Musculoskeletal System[J].Radiology,2016,281(3):690-707.
- [36]Barrett JF,Keat N.Artifacts in CT:recognition and avoidance [J].Radiographics :a review publication of the Radiological Society of North America, Inc,2004,24(6):1679-1691.
- [37]Lee YH,Park KK,Song HT,et al.Metal artefact reduction in gemstone spectral imaging dual-energy CT with and without metal artefact reduction software[J].European Radiology,2012,22(6):1331-1340.
- [38]Dangelmaier J,Schwaiger BJ,Gersing AS,et al. Dual layer computed tomography:Reduction of metal artefacts from posterior spinal fusion using virtual monoenergetic imaging[J].Eur J Radiol,2018,105:195-203.
- [39]Kosmas C,Hojjati M,Young PC,et al.Dual-layer spectral computerized tomography for metal artifact reduction:small versus large orthopedic devices[J].Skeletal Radiol,2019,48(12):1981-1990.
- [40]夏维波,章振林,林华,等.原发性骨质疏松症诊疗指南(2017) [J].中国骨质疏松杂志,2019,25(3):281-309.
- [41]van Hamersvelt RW,Schilham AMR,Engelke K,et al.Accuracy of bone mineral density quantification using dual-layer spectral detector CT:a phantom study[J].European Radiology,2017,27(10):4351-4359.
- [42]Stevens CJ,Murphy DT,Korzan JR,et al.Plantar plate tear diagnosis using dual-energy computed tomography collagen material decomposition application[J].Journal of computer assisted tomography,2013,37(3):478-480.
- [43]Khanduri S,Goyal A,Singh B,et al.The Utility of Dual Energy Computed Tomography in Musculoskeletal Imaging[J].Journal of clinical imaging science,2017,7(1):34.
- [44]Deng K,Sun C,Liu C,et al.Initial experience with visualizing hand and foot tendons by dual-energy computed tomography[J].Clinical Imaging,2008,33(5):384-389.
- [45]孙丛,柳澄,王锡明,等.双能CT成像在显示膝关节韧带中的价值[J].中国医学影像技术,2008,184(9):1323-1325.
- [46]Peltola EK,Koskinen SK.Dual-energy computed tomography of cruciate ligament injuries in acute knee trauma[J].Skeletal radiology,2015,44(9):1295-1301.
- [47]Booz C,Nöske J,Martin SS,et al.Virtual Noncalcium Dual-Energy CT: Detection of Lumbar Disk Herniation in Comparison with Standard Gray-scale CT[J].Radiology,2019,290(2):446-455.

(收稿日期:2021-12-25)

(校对编辑:谢诗婷)