

综 述

双层探测器光谱CT在胸部疾病的应用进展

郑 岩¹ 张 进^{2,*} 郑 洁²

1.山西医科大学医学影像学院

(山西 太原 030001)

2.山西医科大学第二医院影像科

(山西 太原 030001)

【摘要】 双层探测器光谱CT(Detector-based spectral CT, SDCT)是一种新型CT扫描设备,在不需预选扫描协议的基础上能同时完成常规扫描和光谱扫描并获得相关数据,开创了能谱CT进行回顾性分析的先河;并且具备多种能谱分析工具:碘密度图、虚拟单能量图、钙抑制图、电子云密度图等,可以为临床提供多种有助于诊断的技术,在胸部多种疾病,如肺部的良恶性肿瘤、肺动脉血栓栓塞、心脏和冠状动脉、乳腺的良恶性肿瘤以及影像技术等方面均有实际应用和文献报道。本文主要对SDCT的技术原理及其在胸部疾病中的临床应用进展作一综述。

【关键词】 层摄影术; X线计算机; 光谱; 胸部

【中图分类号】 R826.23

【文献标识码】 A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.05.061

Progress in the Application of Two-Layer Detector Spectral CT in Chest Diseases

ZHENG Yan¹, ZHANG Jin^{2,*}, ZHENG Jie².

1.Department of Medical Imaging, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

2.Department of Radiology, The Second Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

ABSTRACT

Detector-based spectral CT (SDCT) is a new type of CT scanning equipment, which can perform routine scanning and spectral scanning at the same time and obtain related data on the basis of no preselection scanning protocol, setting a precedent for the retrospective analysis of energy spectrum CT; And has a variety of energy spectrum analysis tools: The iodine density image, virtual Monoenergy image, calcium inhibition image, and electron cloud density image were able to provide clinical diagnostic techniques for a variety of chest diseases, such as benign and malignant tumors of lung, pulmonary thromboembolism, heart and coronary artery, benign and malignant tumors of breast, as well as imaging techniques have been applied and reported in literature. This essay reviews the technical principle of SDCT and its application in chest diseases.

Keywords: Tomography; X-ray Computer; Spectrum; Chest

电子计算机断层扫描(CT)技术自20世纪中晚期发明并应用到医学领域以来,经历近几十年不断的发展、进步与技术更新,逐渐成为疾病诊断、治疗中高度依赖的设备。常规CT的成像原理是X线穿透人体不同密度的器官及组织,其衰减信息被探测器所接收并由计算机进行处理,最终转换形成灰阶图像,但是这种灰阶图像在进行精确的物质组成成分鉴别和定量分析等方面有一定的短板^[1-2]。能谱技术成为克服这一缺点的有效方法,已在临床实现的有两种,一是双源双能量成像技术,二是单源快速管电压转换技术,这两种技术各有其优势,但也有不足之处,比如需要预选专门的扫描方案、不能完全做到同时同源导致的图像质量下降和伪影产生、以及辐射剂量增加的可能性等。而SDCT由于其特殊的硬件结构和扫描技术,能够一次扫描中获得常规图像和能谱数据,并且在此过程中不需要增加额外的操作流程,也不增加对患者的辐射剂量,其配套的后处理工作站具备多种全面、精准的数据分析软件,这就为SDCT的广泛应用提供了充分的现实可行性^[3-5]。本文就SDCT的基本原理及其在肺部、乳腺、心脏大血管等疾病中的研究现状作一系统介绍。

1 SDCT的成像原理及分析工具

SDCT采用立体式结构,上下两层由不同材料构成的闪烁晶体可以收集不同能级的X射线^[6],通过二极管和数据处理元件最终转换成数字信号,可以进行进一步的图像处理^[4]。SDCT能够实现物质鉴别与分析的原理是X射线穿过人体组织时被吸收程度不同,也就是衰减情况不同,根据其衰减情况可以判断出相应的组织成分,以上提到的双源双能和单源快速管电压转换技术均是通过改变管电压来输出不同能级的X射线,而SDCT是利用探测器对X射线吸收和转化程度的差别,实现高低能谱的区分^[3,7-8]。

SDCT的优势有以下几点:(1)探测器可以“同空间”、“同时间”内接收不同能级X射线,利于保持图像数据的完整和准确,同时有效缩短检查时间;(2)SDCT能在一次扫描中获得常规数据和光谱数据,不需要在扫描前选择专门的序列,可以进行回顾性分析;(3)可以有效降低图像噪声及伪影,保证图像质量^[9-10]。

2 SDCT在胸部疾病诊断中的应用现状

2.1 肺部结节及肿瘤 肺良恶性病变的鉴别、转移性肺肿瘤原发病灶的定位等均是目前研究的热点问题。传统上鉴别良恶性肺结节主要通过观察病灶特点,比如病灶的大小及生长速度、密度高低及是否均匀、形态是否规则、边缘是否清晰光整、有无分叶毛刺征、病灶与邻近结构的毗邻和侵犯情况、增强后强化方式及程度等^[11],但仍有一些患者表现不具备特征性,诊断较困难^[12],光谱CT的碘密度图可以通过伪彩图及定量参数等为其鉴别提供帮助^[13,14]。

Nils等^[15]的研究显示,一名患者的常规胸部CT上发现的两枚肺结节均有如分叶征等倾向于恶性的表现,但在碘密度图上二者碘含量差异较大(分别为2.1mg/mL、0.6mg/mL),而这两枚结节在经氟代脱氧葡萄糖注入体内并经正电子断层扫描仪扫描后,显示摄取率分别为7.1和1.7,二者代谢活性差异与碘图所显示的差异一致,考虑二者应为不同性质的病灶,最终证实碘含量高者病理结果是腺癌,低者为良性病变。

Bae等^[5]的研究显示,一名胸片检查而被怀疑肺多发转移瘤的患者在常规CT图像上其中一枚结节呈现渐进性的延迟强化,而其他结节始终无强化,表现出不同的强化方式和特点,难以诊断。但在碘密度图中所有结节为明显、持续强化,其碘浓度为动脉期

【第一作者】 郑 岩,男,在读专业型硕士学位研究生,主要研究方向:骨骼肌肉系统的影像诊断、能谱CT的临床应用。E-mail: 869660243@qq.com

【通讯作者】 张 进,男,主任医师(教授)。主要研究方向:骨骼肌肉系统的影像诊断,能谱CT的临床应用。E-mail: zhangjin7007@aliyun.com

1.9~5.3mg/mL、延迟期2.5~6.1mg/mL,初步诊断肺海绵状血管瘤,最终经活检证实。肺海绵状血管瘤属于一种罕见的良性肿瘤,在影像诊断中与恶性肿瘤鉴别困难,SDCT的应用可以最大限度的减少误诊。

傅奕铨等^[16]对92名患有肺部结节(包括肺癌和炎性结节)的患者进行鉴别诊断,通过比较常规CT征象(分叶征、毛刺征、胸膜牵拉征、血管束征)以及光谱参数(静脉期的碘密度值和有效原子序数值),结果表明仅通过常规CT征象诊断时,其鉴别诊断的曲线下面积(AUC)为0.827,仅采用光谱参数时AUC为0.899,联合以上两者进行鉴别诊断时,AUC达到0.925,由此可见,鉴别诊断时纳入光谱参数可以有效提高诊断准确率,减少误诊。

郑小霞等^[17]的研究纳入187例肺癌患者、101例肺部慢性炎症患者以及57例肺结核患者,通过经验丰富的放射科医师观察常规CT征象(病灶的形态、密度、边界、晕征、周围卫星病灶、胸腔积液、淋巴结肿大等)并测量光谱参数(增强扫描动脉期的有效原子序数、碘浓度值、光谱曲线斜率等),最终得出在观察常规CT征象的基础上,叠加使用光谱参数可以提高对以上三类疾病的鉴别诊断效能。

中央型肺癌患者由于支气管阻塞,往往伴随着相应部位的阻塞性肺不张,但在常规CT上难以准确区分肿瘤病灶和肺不张的区域。戚元刚等^[18]纳入51例中央型肺癌合并肺不张的患者,通过比较常规CT图像和光谱图像,并对多组光谱参数进行统计学分析,结果显示静脉期的40 keV单能量图像、碘密度图及二者的融合图像对肺癌和肺不张区域的识别能力均比常规CT图像高,表明其在实际应用中具有较高的诊断价值,但要注意,平扫和动脉期的相应光谱参数诊断价值有限,提示在患者SDCT扫描时应至少进行增强后的两期即动脉期和静脉期扫描,方可获取有价值的光谱数据。

除鉴别肺部肿瘤的良恶性外,准确定性肺部恶性肿瘤的病理类型对后期治疗方案的选择起着关键作用。张东升等^[19]纳入87例肺癌患者,通过分析不同病理类型所对应的光谱参数的差异,结果显示在鳞癌、腺癌及小细胞肺癌三种病理类型之间,其相对应的静脉期光谱参数(碘密度值、标准化碘密度值及有效原子序数)均有明显差异,可用来辅助诊断病理类型,尤其在患者难以完成手术及穿刺的情况下尤为有用。

肺部除原发肿瘤外,转移瘤也不少见。肺转移瘤在影像上的表现和特点与其原发灶有一定关系^[20],并且相应的治疗措施也不同,如卵巢癌、绒毛膜上皮癌、睾丸癌以及一些间叶来源的肉瘤常用化疗;甲状腺癌合并肺转移的可采取同位素治疗;乳腺癌、肾癌的肺转移则可进行内分泌治疗等。故对于以肺转移瘤为首发症状患者,其诊断和治疗的第一步也是关键一步就是准确地确定其来源和病理类型。由于临床上很多肺转移瘤患者不适合手术及穿刺活检,所以可以尝试通过新的影像技术来帮助寻找其来源。Dominik等^[21]分析了130例原发于全身多个部位和系统的肺转移瘤患者的碘密度图,探索了碘密度值与相应原发灶之间的关系,对判断肺转移瘤来源具有一定意义。

2.2 肺动脉血栓栓塞 肺动脉血栓栓塞症是常见的急危重症,主要检查方法就是CT肺动脉造影(CTPA),表现为肺动脉主干及分支内的造影剂充盈缺损,但实际工作中常因患者自身原因(如呼吸伪影、血流动力学不稳定等)和设备原因(如较老旧的设备扫描速度慢,难以捕捉到肺动脉充盈最佳的时间)会影响图像质量,更不好评估肺灌注情况^[22]。SDCT技术可为以上问题提供新的解决思路。Sueta等^[23]报道了一例肺栓塞患者,CTPA显示右上肺动脉栓塞,灌注图像显示相应肺组织碘分布明显较左肺降低,分别为右上肺0.9 mg/mL、左上肺2.5 mg/mL,抗凝治疗后右上肺碘密度回升至与左上肺相等(2.6mg/mL),表明因栓塞导致的缺血肺组织的血流灌注恢复正常。Iuga等^[24]对50名肺动脉栓塞患者进行CTPA检查,两名影像科医师通过反复调整窗宽窗位至图像显示最清晰,最终根据主观印象推荐了最优的窗宽窗位——混合能量时1020/170HU、40keV单能量时2070/480HU,这为影像医师提供了可借鉴的参考范围,有助于提高工作效率。

慢性血栓栓塞性肺动脉高压(CTEPH)是临床常见疾病^[25]。Kröger等^[26]研究发现,两位主观评估者在SDCT碘图中对CTEPH诊断的特异性和敏感性高于采用传统CTPA,特异性分别为95.1% vs 90.2%和87.8% vs 85.3%、敏感性为100% vs 78.9%。

3 心脏血管疾病

我国心血管疾病患者越来越多,心血管疾病成为城乡居民中高居首位的死亡原因^[27-28]。最常用影像检查是冠脉CT造影(CCTA)。SDCT的应用为心脏及大血管疾病提供了更多有价值的诊断信息^[29],然而,在常规CCTA检查中,不可避免地会出现辐射剂量、对比剂肾毒性等问题,为解决这一问题,有学者提出可以在检查时通过调整扫描参数如mAs来降低辐射剂量,注射造影剂时减少注射量。

Huang等^[30]采取常用对比剂的一半剂量进行CCTA检查时,评估图像质量参数,如CT值、信噪比等客观指标以及对比度、锐利度等主观指标,结果显示单能级图像质量并无降低,不影响完成诊断,并且最终对患者的辐射剂量并无增加。

Yi等^[31]的研究将受试者分组行CCTA检查,两组采用不同管电压,并且其中一组采用40-80keV单能量图观察,同时减少对对比剂剂量,研究结果表明采用单能量图的图像质量好于混合能量的图像质量,并且光谱图像的噪声也有所降低。

随着冠脉支架手术的增多,其术后的评估也逐渐成为临床的一个热点问题。Hickethier等^[32]通过对比传统CT与多个级别的单能keV的图像质量,结果显示单能级的图像质量均较高,并且在较高能级的单能量图像中,对支架内通畅情况观察的效果最好。

心力衰竭患者的一个重要病理学改变是心肌纤维化,目前主要依赖心脏MRI来评估心肌纤维化的程度,刘珮君等^[33]将27名心衰患者进行MRI扫描和SDCT扫描,依据MRI结果划分出432个心脏节段,对相应心肌节段的细胞外容积进行定量评估,结果表明SDCT的细胞外容积随着心肌延迟强化占比的增加逐渐趋于与MRI结果一致,这表明SDCT在评估心衰患者的心肌病理学特征方面可作为MRI的替代方法。

4 乳腺癌

乳腺癌是我国最为常见的成年女性的恶性肿瘤,即使在世界范围内,乳腺癌相关疾病导致的死亡也居各种类型的恶性肿瘤之首^[34]。乳腺占位或结节的传统诊断方法有软X线摄影和乳腺超声,传统CT对乳腺本身的检查意义不大,主要用于诊断其他部位有无转移,如肺部、腋窝淋巴结以及骨头^[35]。

Inoue等^[36]对28名乳腺癌患者行SDCT扫描后,对比传统CT与40-200keV范围内多个单能级的图像质量,结果是低keV的图像质量均高于传统图像,而且低keV时乳腺肿块与乳腺腺体间的对比更加突出,容易发现病灶,减少漏诊。

Moon等^[37]的研究共纳入79例乳腺良性肿瘤(14例)和乳腺癌(65例)患者,进行SDCT增强扫描,采用各期的40keV图像,并与相关的实验室检查指标如雌激素受体(ER)、孕激素受体(PR)、和Ki67等进行相关性分析,结果表明采用40keV单能量图时,对乳腺癌诊断效能明显较高。ER(-)、PR(-)、Ki67(+)的患者的预后往往较差,而这类患者的肿瘤病灶在增强扫描动脉期40keV单能量图的评分及CT值明显升高,表明对不同类型乳腺癌患者的预后判断有一定帮助。

5 其他

(1) 新型冠状病毒肺炎(以下简称“新冠肺炎”)。新冠肺炎疫情2019年年底以来在世界范围内的大流行对人们的日常生活和生命健康以及社会发展造成了重大影响。肺部CT检查是重要的诊断环节和步骤,是确立诊断、评估疗效的常规方法^[38]。新冠肺炎的CT表现在病程早期多呈小斑片状的磨玻璃密度影以及肺间质性的改变,继而可出现肺部浸润影,甚至肺组织实变^[39]。

Beatrice等^[40]对4例新冠肺炎患者进行多次SDCT扫描,采用电子密度图进行分析诊断,研究表明4名患者在首次扫描的电子密度图上,显示了一些肺部的磨玻璃影,而这些异常表现在同次的常规CT上却未显示,直至2-4天后复查的常规CT图上才得以显示,并且病灶的位置、形态、范围均一致,这表明电子密度图能比常规CT更早、更清晰地显示肺部感染病灶。(2) 转移性肺钙化(Metastatic pulmonary calcification, MPC) MPC是指由于钙质代谢异常,使得钙质在某些部位如肾脏、肺部等处沉积。MPC患者的临床症状及影像学表现均不典型^[41],而SDCT的钙抑制技术可以针对钙质进行特异性识别,并显著降低其在图像上显示的密

度,达到物质分离与鉴别的目的^[42-43]。

Ana等^[44]报道了一例慢性肾功能衰竭患者,常规CT图像显示肺部多发磨玻璃影和高密度钙化结节影,在使用钙抑制技术处理后,以上病变均未显示,从而得出结论常规CT显示的病变均为钙质成分,临床诊断为MPC。MPC属少见疾病,常易误诊或漏诊,故对有相关病史的患者,应将MPC纳入诊断的考虑范围之内,此时钙抑制技术就是一种可靠的检查手段。

(3)抑制金属伪影能谱技术(高keV图像)可以有效抑制体内外金属产生的放射状伪影^[45-46]。Laukamp等^[47]研究了30例有胸骨金属物植入史的患者,对比常规CT图与单能级图的主观印象与定量参数,结果显示原常规图像中的低密度伪影在较高能级keV图中(170-180keV)基本被完全消除了,而常规图像中的高密度伪影在单能级130keV时也显著减少。主观评估结果是200keV单能量时,抑制伪影的效果最佳,但是keV过高的话会影响软组织显影,所以作者综合评判后认为在130-200keV时可有效抑制伪影、同时保证软组织结构清晰显示。SDCT的另一个优势是比其他能谱成像系统的keV范围更大(40-200keV),有更多选择^[48]。

(4)常规体检中的低剂量扫描。随着CT设备的普及和人们健康观念的改变,在常规健康体检中,胸部CT扫描逐渐代替了传统的胸部平片摄影,提高了肺部疾病的检出率,但随之而来的问题——辐射剂量的增加,引发了新的关注和担忧。欧阳佳裕^[49]等对30例常规体检者采用SDCT的智能剂量调控技术进行扫描,另30例体检者进行固定mAs的扫描,通过对比部分不同层面的图像质量相关参数:标准差、信噪比、容积CT剂量指数等,结果表明对于个体差异(如胖瘦不同)和扫描部位不同(如肺尖、肺底等),该技术可以在扫描过程中进行智能调控,在保证图像质量的前提下最大限度地减少X线产生的电离辐射,对健康体检者实现有效的保护。

综上所述,SDCT具有更多新的、有实用价值的技术,比如单能量图和碘密度图在血管成像、抑制伪影、提高图像质量以及定量分析方面具有较高的实用意义;而钙抑制图和电子密度图在现有的文献报道中也初步显示了其独特的诊断价值,尤其是电子密度图可谓是首创技术,应用前景非常广泛。总之,SDCT的普及可以更好地提高影像诊断水平、造福患者^[50-52]。

参考文献

- [1] 秦霞. CT的工作原理及维护保养[J]. 医疗装备, 2014, 27(7): 74-75.
- [2] 骆磊. CT能谱成像的基本原理及临床应用探讨[J]. 影像研究与医学应用, 2018, 2(05): 72-74.
- [3] Simsir B D, Danse E, Coche E. Benefit of dual-layer spectral CT in emergency imaging of different organ systems[J]. Clinical radiology, 2020, 75(12): 886-902.
- [4] Prabhakar R, Anushri P, Fernando K, et al. Update on multienergy CT: physics, principles, and applications[J]. Radiographics: a review publication of the Radiological Society of North America, Inc, 2020, 40(5): 1284-1308.
- [5] Bae K, An H J, Jung J J, et al. Diagnosis of multiple pulmonary cavernous hemangiomas via dual-layer spectral CT: A case report[J]. Medicine, 2020, 99(39): e22495.
- [6] Sauter A P, Kössinger A, Beck S, et al. Dual-energy CT parameters in correlation to MRI-based apparent diffusion coefficient: evaluation in rectal cancer after radiochemotherapy[J]. Acta Radiologica Open, 2020, 9(9): 2058460120945316.
- [7] Rassouli N, Etesami M, Dhanantwari A, et al. Detector-based spectral CT with a novel dual-layer technology: principles and applications[J]. Insights into Imaging, 2017, 8(6): 589-598.
- [8] Fulton N, Rajiah P. Abdominal applications of a novel detector-based spectral CT[J]. Current Problems in Diagnostic Radiology, 2018, 47(2): 110-118.
- [9] 杨琰昭, 严福华, 韩群, 等. 双能光谱探测器CT腹部虚拟平扫代替常规平扫的可行性研究[J]. 中华放射学杂志, 2019(1): 33-39.
- [10] 双能探测器光谱CT临床应用中国专家共识(第一版)[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(7): 635-643.
- [11] 杨德盛. 肺部单发磨玻璃结节MSCT征象对良恶性结节的鉴别诊断价值[J]. 影像研究与医学应用, 2018, 2(23): 190-192.
- [12] 王汉. CT灌注成像结合动态增强扫描鉴别孤立性肺结节的临床价值分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(12): 68-70.
- [13] 王素雅, 高剑波, 张芮, 等. CT能谱成像对孤立性肺结节的诊断价值[J]. 中华医学杂志, 2016, 96(13): 1040-1043.
- [14] 温青云. 双能探测器能谱CT多参数成像在孤立性肺结节定性诊断中的应用价值[J]. 中国医科大学, 2020.
- [15] Nils GHokamp, Amit G, Robert C G. Stratification of pulmonary nodules using quantitative iodine maps from dual-energy computed tomography[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2019, 199(2): e3-e4.
- [16] 傅奕斌, 余焯, 陈杏彪, 等. 双能探测器光谱CT鉴别诊断肺癌与炎性结节的价值[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(12): 1264-1269.

- [17] 郑小霞, 马亚琼, 熊晟原, 等. 双能探测器光谱CT在肺原发恶性肿瘤、肺慢性炎症及肺结核鉴别诊断中的应用价值[J]. 解放军医学杂志, 2022, 47(11): 1133-1143.
- [18] 戴元刚, 范明新, 殷月慧, 等. 双能探测器光谱CT区分中心型肺癌与肺不张区域的价值[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(11): 1167-1171.
- [19] 张东升, 盛茂, 程庆红, 等. 双能探测器光谱CT定量参数与肺癌及其病理特征的关系[J]. 分子影像学杂志, 2022, 45(5): 759-762.
- [20] 黄继升, 吴嘉瑞, 倪志文, 等. 肺转移瘤高分辨率CT表现[J]. 实用医学影像杂志, 2018, 19(6): 495-497.
- [21] Dominik D, Andreas S, Julia D, et al. Differentiating intrapulmonary metastases from different primary tumors via quantitative dual-energy CT based iodine concentration and conventional CT attenuation[J]. European journal of radiology, 2019, 111: 6-13.
- [22] 岑人丽, 倪志文, 黄继升, 等. 能谱CT在急性肺动脉栓塞诊断及随访中的应用价值[J]. 临床放射学杂志, 2020, 39(9): 1749-1753.
- [23] Sueta D, Utsunomiya D, Izumiya Y, et al. Novel assessment of retrospective on-demand analysis of venous thromboembolism by dual-layer spectral-detector CT[J]. Journal of Cardiology Cases, 2018: 88-91.
- [24] Iuga A I, Doerner J, Siedek F, et al. Computed tomography pulmonary angiograms using a novel dual-layer spectral detector: Adjusted window settings are essential for diagnostic image quality[J]. Medicine, 2019, 98(33): e16606.
- [25] 董星琪, 赵久良, 李梦涛, 等. 肺动脉高压的分类及血流动力学定义[J]. 中国医刊, 2019, 54(12): 1281-1284.
- [26] Kröger J R, Gerhardt F, Dumitrescu D, et al. Diagnosis of pulmonary hypertension using spectral-detector CT[J]. International Journal of Cardiology, 2019, 285: 80-85.
- [27] 韩清梅, 邓江莹, 杜晗, 等. 我国心脏康复发展现状[J]. 实用心脑血管病杂志, 2020, 28(11): 130-135+140.
- [28] 胡盛寿, 高润霖, 刘力生, 等. 《中国心血管病报告2018》概要[J]. 中国循环杂志, 2019, 34(3): 209-220.
- [29] 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.
- [30] Huang X, Gao S Z, Ma Y, et al. The optimal monoenergetic spectral image level of coronary computed tomography (CT) angiography on a dual-layer spectral detector CT with half-dose contrast media[J]. Quantitative imaging in medicine and surgery, 2020, 10(3): 592-603.
- [31] Yi Y, Zhao X M, Wu R Z, et al. Low dose and low contrast medium coronary CT angiography using dual-layer spectral detector CT[J]. International heart journal, 2019: 608-617.
- [32] Hickethier Tilman, Baeßler Bettina, Kroeger Jan Robert, et al. Monoenergetic reconstructions for imaging of coronary artery stents using spectral detector CT: In-vitro experience and comparison to conventional images[J]. Journal of cardiovascular computed tomography, 2017, 11(1).
- [33] 刘珮君, 王怡宁, 林路, 等. 双能探测器光谱CT定量评估心力衰竭患者细胞外容积的可行性研究[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(12): 1247-1252.
- [34] 商木岩, 郭帅, 张强, 等. 中国乳腺癌筛查现状[J]. 实用癌症杂志, 2020, 35(11): 1911-1914.
- [35] 苗娜, 齐旭红, 杜常月, 等. 胸部MSCT与乳腺X线摄影诊断乳腺肿块的影像学研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(10): 58-61+69.
- [36] Inoue T, Nakaura T, Iyama A, et al. Usefulness of virtual monochromatic dual-layer computed tomographic imaging for breast carcinoma[J]. Journal of Computer Assisted Tomography, 2020, 44(1): 78-82.
- [37] Moon JI, Choi BH, Baek HJ, et al. Comprehensive analyses with radiological and biological markers of breast cancer on contrast-enhanced chest CT: a single center experience using dual-layer spectral detector CT[J]. European Radiology, 2020, 30(5): 2782-2790.
- [38] 张庆, 熊浩, 彭婕, 等. 胸部CT对新型冠状病毒肺炎的诊断价值[J]. 中国医学影像学杂志, 2020, 28(12): 896-898.
- [39] 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版)[J]. 中国病毒病杂志, 2020, 10(05): 321-328.
- [40] Beatrice D, Julien C, Sebastian T, et al. Could spectral CT have a potential benefit in coronavirus disease (COVID-19)?[J]. AJR. American journal of roentgenology, 2020: 1-6.
- [41] 吴红芬, 李志, 江雪梅. 维持性血液透析患者左肺巨大转移性钙化一例[J]. 中华临床医师杂志(电子版), 2018, 12(7): 421-422.
- [42] 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]. European Journal of Radiology, 2018, 105: 216-220.
- [43] Schwaiger B J, Gersing A S, Hammel J, et al. Three-material decomposition with dual-layer spectral CT compared to MRI for the detection of bone marrow edema in patients with acute vertebral fractures[J]. Skeletal Radiology, 2018, 47(11): 1533-1540.
- [44] Ana F, Jorge G B, Jasmin H, et al. Metastatic pulmonary calcification: First report of pulmonary calcium suppression using dual-energy CT[J]. Radiology Case Reports, 2020, 15(7): 900-903.
- [45] 李杰, 李楠, 袁源, 等. MAR技术去除钨钼钨钨伪影适宜keV重组参数研究[J]. 临床放射学杂志, 2020, 39(6): 1144-1148.
- [46] 刘勇玲, 范红燕, 卢强, 等. 双源CT双能量成像在去骨关节金属内固定物伪影中的应用价值[J]. 内蒙古医学杂志, 2019, 51(4): 411-413+514.
- [47] Laukamp K R, Hokamp N G, Alabar O, et al. Metal artifacts from sternal wires: evaluation of virtual monoenergetic images from spectral-detector CT for artifact reduction[J]. Clinical Imaging, 2020, 60(2): 249-256.
- [48] 任海燕, 甄艳华, 杨智慧, 等. 双能探测器光谱CT 70 keV单能量成像提升腹部增强扫描图像质量的应用研究[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(7): 660-664.
- [49] 欧阳佳裕, 罗娜, 李刚, 等. 双能探测器光谱CT智能剂量调控技术在低剂量胸部体检中的应用价值[J]. 中国医疗器械信息, 2022, 28(11): 69-72.
- [50] 徐翠莲, 印宏坤, 侯立荣, 等. 深度学习结合影像组学的胸部CT新冠肺炎智能诊断模型研究[J]. 罕少疾病杂志, 2021, 28(05): 16-20.
- [51] 葛晓莉. 宝石能谱CT低剂量扫描肺癌诊断中应用价值探讨[J]. 罕少疾病杂志, 2022, 29(9): 28-29.
- [52] 郑岩. 双能探测器光谱CT钙抑制技术在急性胸腰椎压缩骨折中的诊断价值[D]. 山西医科大学, 2021.

(收稿日期: 2021-02-04)

(校对编辑: 朱丹丹)