

## 综 述

## 双层探测器光谱CT在腹部的应用进展

赵晓悦 张 进\*

山西医科大学医学影像学院

(山西 太原 030001)

【摘要】双层探测器光谱CT(SDCT)是一种利用双层探测器同时采集高、低能数据的能谱CT技术。光谱CT所形成的常规图像与能谱图像可广泛用于腹部各疾病的影像诊断,提高病变的检出率、推动了CT技术及放射诊断工作的进展。现对SDCT技术原理及在腹部疾病的应用进展进行综述。

【关键词】体层摄影术;光谱CT;腹部;肝

【中图分类号】R323.3; R322.4+7

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.09.057

## Application Progress of Dual-detector Spectral CT in Abdomen

ZHAO Xiao-yue, ZHANG Jin\*.

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

## ABSTRACT

Dual layer detector spectral CT (SDCT) is an energy spectrum that uses a dual-layer detector to simultaneously acquire high- and low-energy data CT technology. The virtual single-level image, iodine density map, virtual scan and effective atomic number map in spectral imaging can be widely used. For the imaging diagnosis of abdominal diseases, it can improve the imaging quality, improve the detection rate of lesions, improve the ability of differential diagnosis and reduce the radiation dose and other aspects have played a significant role. This article reviews the technical principles of SDCT and its application progress in abdominal diseases.

**Keywords:** Tomography; Spectral CT; Abdomen; Liver

CT技术广泛用于临床工作中疾病的发现及诊断,随着临床需求的不断增加,同时推动着CT技术的不断发展,实现了从常规CT到双能量CT的跨越,而双能量CT优于常规CT的关键点在于不仅能够显示组织形态学上的差别,更能进一步通过多种参数对不同组织进行量化描述,在一定程度上推动了CT技术功能成像的实现。临床工作中广泛使用的双能CT技术主要有:序列扫描,双源双能,单源管电压瞬时切换,光谱CT(SDCT)<sup>[1]</sup>。而SDCT是基于双层探测器的能谱成像系统,其优势在于进行一次扫描可以同时获得常规图像与能谱图像,较其他双能CT扫描技术可以减少辐射剂量<sup>[2-3]</sup>。因此本文就其基本原理及在腹部疾病诊断中的应用进展作一综述。

## 1 SDCT的技术原理及技术特点

探测器主要由闪烁体、薄层前照式光电二极管和专用数据处理软件构成,闪烁体由钆基石榴石的顶层和硫氧化镱的底层所构成,顶层选择性地吸收低能光子,而高能光子则穿透顶层到达底层,在该层中被吸收并转化为光信号,每一层上的光电二极管完成光信号到模拟电信号的转换,最后由专用数据处理软件转换为数字信号,完成图像重建<sup>[4]</sup>。

光谱CT生成的图像包括常规图像和能谱图像。据研究显示单能量扫描所形成的图像与光谱CT获得的常规图像质量对比无明显优劣差异<sup>[5]</sup>,与此同时产生的能谱图像包括碘图、虚拟平扫图(VNC)、尿酸图、虚拟单能量图像(VIM),有效原子序数图等<sup>[6]</sup>。Rong<sup>[7]</sup>等人的研究结果显示临床工作中有81%的患者可能会因为常规图像所获取信息的有限而影响到诊断的准确性,而往往这些病人都需要进行更深入更全面的检查进行综合诊断,而光谱CT的出现可以实现常规图像与能谱图像的同时获得,这也就意味着可以根据不同的病人情况进行回顾性光谱图像的分析,而研究结果表明光谱图像可以为患者额外提供78%有价值的信息,进而减少30%的漏诊几率,提高临床工作的效率。

## 2 SDCT在腹部的临床应用进展

**2.1 肝脏、胆囊、胰腺相关应用** 肝脏是肿瘤疾病高发脏器,可依据肿瘤发生部位及病理表现大致分为局灶性结节增生、原发性肝癌、转移癌及血管瘤四类,其中良性病变一般无显著的症状,对患者身体健康无严重影响,但恶性病变则存在着显著症状及扩散转移等危害性极大的影响<sup>[8]</sup>。原发性肝癌是目前常见的恶性肿瘤之一<sup>[9]</sup>,但由于原发性肝癌早期并无显著症状较难检出,因此大多数患者检出即扩散转移,治愈机会渺茫<sup>[10]</sup>。小肝癌又称为亚临床肝癌或早期肝癌,临床上无明显的肝癌症状和体征,较易漏诊。目前CT检查仍是临床检出肝脏恶性肿瘤的常用辅助手段<sup>[11]</sup>,但常规CT对于小肝癌的检出局限性较大。骆秋霞<sup>[12]</sup>等人对行光谱CT扫描的28例小肝癌患者进行研究后,得出结论低keV虚拟单能量成像可以提高图像的CT值、SNR、CNR及病灶的显著性,这表明低keV VIM较常规CT更易于发现小肝癌,从而提高小肝癌的检出率。据报道,40keV时的病变检出率最高<sup>[13]</sup>。同时Qi Wang<sup>[14]</sup>等人研究认为肝血管瘤、转移瘤和囊肿在门静脉期的能谱曲线斜率和特征存在显著差异,因此,能谱曲线定量分析可用于提高肝肿瘤鉴别诊断的敏感性。此外,碘浓度测量已被证明可以提高鉴别坏死性肝细胞癌与肝脓肿的准确性<sup>[15]</sup>,也可能有助于肝细胞癌患者术前区域淋巴结评估<sup>[16]</sup>。碘密度图在评估经动脉化疗栓塞(TACE)治疗后的肝癌方面也优于传统CT,提高了检测残留或复发肝癌的敏感性, TACE治疗前病灶内碘浓度的量化也可能有助于预测TACE的治疗效果<sup>[17]</sup>。

慢性肝病是世界范围内的主要公共卫生问题,而肝纤维化是慢性肝病的病理过程。诊断肝纤维化的标准是肝活检,但由于并发症的风险和成本,重复肝活检是不可取的,因此,对肝纤维化进行无创评估尤为重要。Koichiro Morita<sup>[18]</sup>等人通过对不同程度肝纤维化的患者行光谱CT扫描,研究得出随着肝纤维化程度的增大,肝实质碘浓度和基于碘浓度的细胞外容积(ECV)都显著增加,肝纤维化程度和CT-ECV之间存在中度正相关,因

【第一作者】赵晓悦,女,研究生,主要研究方向:骨骼肌肉系统影像诊断。E-mail: 963002438@qq.com

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

此肝实质碘浓度和基于碘浓度CT-ECV可用于预测高阶肝纤维化,或诊断形态变化不显著的高阶肝纤维化。

胆囊结石是放射工作中较常见的病变,一般胆囊肿阳性结石常规CT或B超即可确诊,但研究表明阳性结石在全部胆囊结石中仅占10%-20%左右<sup>[19]</sup>,当病灶中胆固醇含量80%时,病灶密度与胆汁相近,常规图像较难分辨,此即为阴性结石。祁冬<sup>[20]</sup>等人对30例疑似胆囊阴性结石进行能谱成像分析,得出结论,随着keV值的增加,阴性结石密度逐渐增大,而胆汁密度逐渐减小;阴性结石的能谱曲线呈反弓缓慢上升型,斜率为负值,而胆汁能谱曲线呈水平直线型或轻微下降型,通过曲线斜率的差异可以更准确得分辨阴性结石与胆汁;阴性结石与胆汁的有效原子序数差异较大,因此有效原子序数图可见检出阴性结石,因此能谱成像的多参数分析可以在临床中提高胆囊阴性结石的检出率。

胰腺神经内分泌肿瘤(pNETs)是一种异质性肿瘤,起源于胰腺的内分泌细胞,在所有胰腺肿瘤中占比不足5%,而占有神经内分泌肿瘤的7%<sup>[21]</sup>。杨琰昭<sup>[22]</sup>等人认为对于部分病灶体积小且强化欠佳的胰腺内分泌肿瘤常规CT扫描常常不容易检出,而其通过能谱成像分析研究结果显示40、50keV能级中pNETs的检出率均提高至92.3%,在碘图中pNETs呈高碘密度值表现,因此SDCT可通过低keV能级提高胰腺内分泌肿瘤增强CT中病灶的CT值和CNR,同时结合碘图可以提高pNETs的检出率。急性胰腺炎是一种常见的急腹症,急性出血性胰腺炎严重时危及生命,因此早期对急性胰腺炎的病理改变及严重程度做出更为准确的判断极为重要<sup>[23]</sup>。X.Hu<sup>[24]</sup>等人通过对70例不同程度的急性胰腺炎患者进行碘密度图分析,得出结论随着急性胰腺炎的严重程度增加,胰腺碘浓度显著降低,三组病例之间存在显著差异,尤其是中度与重度组之间,动脉期碘浓度与急性胰腺炎严重程度高度相关,获得更多的关键信息可以更有效地指导临床治疗。

**2.2 肾脏、肾上腺等相关应用** 偶发性肾脏病变在腹部常规CT检查中很常见,其中大多数为单纯性囊肿,在大约10%的患者中可见<sup>[25]</sup>,当肾脏病变的衰减高于单纯的液性物质(>20HU)时,可能是由于复杂性(出血性或蛋白性)囊肿或囊实性病变所致,可以使用SDCT的VNC、碘密度图及有效原子序数图来更为精确地描述这些病变。复杂性囊肿在VNC中具有高衰减,在碘密度图中碘浓度较低,而肿瘤病变在VNC中没有高衰减,但在碘密度图中碘浓度较高,复杂性囊肿在高keV VIM中也显示高衰减,而肿瘤并不会出现高衰减,因此可以通过这些特殊的能谱图像进一步对复杂性囊肿与肿瘤病变进行鉴别<sup>[26]</sup>。

鉴别尿路结石成分是光谱CT在腹部最常见的应用之一。这与临床相关,只有尿酸结石可以通过碱化的手段进行无创治疗,而其他成分的结石则需要介入治疗<sup>[27]</sup>。常规CT鉴别不同成分结石的能力有限,而SDCT由于不同能量水平下的衰减值不同,因此可以将尿酸结石更可靠地与钙化、胱氨酸和混合尿酸结石区分开来。尿路结石还可以通过有效原子序数图来显示,尿酸结石比钙结石显示更浅的色调,尿酸图只显示尿酸成分的影像,其它组织均显示为黑色<sup>[28]</sup>,因此尿酸结石和非尿酸结石可以通过有效原子序数图及尿酸图进一步鉴别,具有较高的临床应用价值。

随着CT技术的广泛应用,约5%-8%接受CT检查的患者<sup>[29]</sup>出现了肾上腺病变,尽管大多数偶发的肾上腺病变是良性腺瘤,但最常见的临床难题是腺瘤和转移瘤之间的鉴别,尤其是在有肾上腺外恶性肿瘤病史的患者中。Nagayama<sup>[30]</sup>等人通过对肾上腺腺瘤及转移瘤患者进行能谱成像分析,得出结论门静脉期SDCT的VNC衰减和碘密度值可以作为鉴别肾上腺腺瘤和转移瘤的有用参数,尽管VNC倾向于高估腺瘤的衰减(平均偏差,+11HU),而碘密度值相对于VNC衰减的可靠性较差,将碘密度-VNC衰减比作为SDCT的组合参数,可以成功鉴别大多数肾上腺病变,并具有较高的敏感性和特异性。

**2.3 胃肠道相关应用** 急性肠缺血(ABI)是一种腹部急症,由于其临床表现可能是非特异性的,与急腹症的其他病因有相当大的重叠,通常会导致诊断延误,早期诊断,及时干预与改善患者预后相关,一项研究报告显示,如果在症状出现后12小时内进行干预,死亡率可降低58%<sup>[31]</sup>。Lourenco<sup>[32]</sup>等人研究得出结论SDCT

所提供的碘密度图可以量化疑似肠缺血肠壁的碘浓度,肠壁碘浓度减低可以为肠缺血的诊断提供证据,从而可能有助于早期手术的决策。Lee<sup>[33]</sup>等人研究得出结论40keV能级能增加炎症性肠病与正常肠壁组织之间的对比度,结合碘密度值及有效原子序数等,进而提高诊断炎症性肠病的准确率。因此通过SDCT的低keV VIM或碘密度图,可以更可靠地确定病变与正常组织之间的对比度是否增大,这有助于显示强化病变,如感染、炎症和肿瘤,以及非强化病变,如缺血。此外有研究结果显示,转移性淋巴结在动脉期的碘浓度、能谱曲线斜率、有效原子序数均显著低于非转移性淋巴结,因此SDCT中动脉期的碘浓度及光谱曲线斜率对术前结直肠癌淋巴结转移的预测评估具有一定的价值<sup>[34]</sup>。

在需要进行结肠镜检查的患者中,由于个体差异有些患者可能难以达到最佳肠道状态,我们可以通过虚拟结肠镜对患者进行检查,SDCT可以通过碘图来对增强病变和粪便的对比度。SDCT还可以通过识别标记的粪便,从CT结肠造影中去除,从而完成通过虚拟结肠镜对肠道进行电子清洗的过程<sup>[35]</sup>。

**2.4 腹部血管相关应用** 最近的研究显示SDCT在血管病变中的应用主要尚集中在虚拟能级图像对血管成像图像质量的影响,并提高血管病变的检出率。既往研究表明,低keV VIM成像可以提高CT血管造影的图像质量<sup>[36]</sup>。Tilman<sup>[37]</sup>等人认为与常规CT增强扫描相比,SDCT在动脉期及静脉期在40keV VIM可以显示出更好的图像质量,因此能够很大程度上改善腹部血管病变的检出,如提高主动脉夹层的检出率等。同时使用NASCET系统对动脉狭窄进行分级时,40keV VIM可以显示出明显更高的狭窄程度,在这种情况下,与传统血管造影相比,血管管腔周围环境(如血管壁)的显示可以明显改善,测量管径更接近真实管腔,而不是测量血管总直径。此外,李远辉<sup>[38]</sup>等人研究认为随着keV的降低,门静脉与其背景组织的差别变大,从而提高了低能级图像质量,克服了门静脉对比剂浓度低对比度差的缺点,有利于提高门静脉病变的检出率。因此低能级图像可用于减少对比剂用量及提高血管强化欠佳的图像质量。另有一项研究显示,低keV VIM可用于术前准确描绘潜在肝供体的肝血管解剖结构和变异,这对于肝脏移植术后的疗效评估非常重要<sup>[39]</sup>。

**2.5 伪影复位及辐射剂量减少** 常规CT扫描中存在的伪影(如束硬化、钙晕和金属条纹)可能会限制图像质量和诊断可信度<sup>[40]</sup>。而SDCT的高keV VIM可用于减少或者消除偶然遇到的金属伪影,特别是低原子序数的金属,如不锈钢和铝,而钙晕作为血管成像中一种常见的伪影,亦可以通过使用高keV VMI来消除伪影<sup>[41]</sup>。SDCT能够最大限度地减少关键区域的伪影,尤其是回顾性伪影,对提高诊断的准确性有重要意义。

研究显示SDCT的虚拟平扫图像的CT值与除皮下脂肪外的所有组织的真实平扫图像的CT值相似<sup>[41]</sup>,使用虚拟平扫代替真正平扫,从而减少辐射剂量,辐射剂量节省可以高达40%<sup>[42-43]</sup>。Nagayama<sup>[30]</sup>等人研究结果表明虚拟平扫与真实平扫存在强正相关性(相关系数 $r=0.92$ ),但与真实平扫相比会略高估腺瘤的CT值(平均偏差,+11 HU)。SDCT与常规CT相比,进行一次常规扫描可以获得能谱信息亦无需增加射线剂量。

综上所述,SDCT作为一种新的双能量成像技术,与传统CT相比,可以提供常规图像和特殊能谱图像。通过使用能谱图像中的虚拟单能量成像、碘图、虚拟平扫及有效原子序数图等可以推动CT技术的发展、提高影像诊断工作的效率,在临床腹部疾病的检出与诊断得到了广泛的应用。总之,SDCT拥有很好的前景,值得我们做更深入的研究,为放射工作的发展提供更多的可能性。

## 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]B D S.Benefit of dual-layer spectral CT in emergency imaging of different organ systems[J].Clinical Radiology,2020,75(12):886-902.
- [3]KYUNGSOO B.Diagnosis of multiple pulmonary cavernous hemangiomas via dual-layer spectral CT:A case report[J].Medicine,2020,99(39):e22495.
- [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,1

- nc, 2020, 40 (5): 1284-1308.
- [5] MOJGAN H, STEVEN V H, NEGIN R, et al. Quality of routine diagnostic abdominal images generated from a novel detector-based spectral CT scanner: a technical report on a phantom and clinical study [J]. *Abdominal Radiology (New York)*, 2017, 42 (11): 2752-2759.
- [6] NILS G H. Technical background of a novel detector-based approach to dual-energy computed tomography [J]. *Diagnostic and Interventional Radiology (Ankara, Turkey)*, 2020, 26 (1): 68-71.
- [7] RONG R. Benefit and clinical significance of retrospectively obtained spectral data with a novel detector-based spectral computed tomography - Initial experiences and results [J]. *Clinical Imaging*, 2018, 49: 65-72.
- [8] 王帅, 刘海燕. 多层螺旋CT及MRI在肝脏肿瘤诊断鉴别中的临床应用 [J]. *影像研究与医学应用*, 2021, 5 (21): 5-7.
- [9] HEE Y J, MIN L J, JIN L Y, et al. Added Value of sequentially performed gadoxetic acid-enhanced liver MRI for the diagnosis of small (10-19 mm) or atypical hepatic observations at contrast-enhanced CT: A prospective comparison [J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging : JMIR*, 2019, 49 (2): 274-587.
- [10] 苏泳诗, 于新发. 小肝癌临床治疗研究进展 [J]. *实用肿瘤杂志*, 2019, 34 (2): 175-179.
- [11] 丁岗强, 文泽军, 曾艳丽, 等. 肝脏局灶性结节增生、小肝癌MSCT相关参数比较及其临床应用价值分析 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 147 (1): 113-115.
- [12] 骆秋霞, 李远辉, 张建生, 等. 双层探测器光谱CT低keV虚拟单能级图像在小肝癌评估中的应用 [J]. *中华肝脏外科手术学电子杂志*, 2021, 10 (5): 489-492.
- [13] HOKAMP N G, OBMANN V C, KESSNER R, et al. Improved visualization of hypodense liver lesions in virtual monoenergetic images from spectral detector CT: Proof of concept in a 3D-printed phantom and evaluation in 74 patients [J]. *European Journal of Radiology*, 2018, 109 (1): 114-123.
- [14] QI W. Quantitative analysis of the dual-energy CT virtual spectral curve for focal liver lesions characterization [J]. *European Journal of Radiology*, 2014, 83 (10): 1759-1764.
- [15] Y Y. Spectral CT imaging in the differential diagnosis of necrotic hepatocellular carcinoma and hepatic abscess [J]. *Clinical Radiology*, 2014, 69 (12): e517-e524.
- [16] YU-RONG Z. Dual energy computed tomography for detection of metastatic lymph nodes in patients with hepatocellular carcinoma [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2019, 25 (16): 1986-1996.
- [17] JUN W, LIN S J. Spectral CT in evaluating the therapeutic effect of transarterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma: A retrospective study [J]. *Medicine*, 2017, 96 (52): e9236.
- [18] KOICHIRO M, AKIHIRO N, YASUHIRO U, et al. Noninvasive assessment of liver fibrosis by dual-layer spectral detector CT [J]. *European Journal of Radiology*, 2021, 136: 109575.
- [19] ARTUR P. Metabolism of bile with respect to etiology of gallstone disease - systematic review [J]. *Folia Medica Cracoviensia*, 2014, 54 (2): 5-16.
- [20] 祁冬, 马静, 姜研, 等. 256排Revolution CT多参数能谱成像在胆囊阴性结石诊断中的应用价值 [J]. *中国医疗设备*, 2021, 36 (10): 165-168.
- [21] LAWRENCE B, GUSTAFSSON B I, CHAN A, et al. The Epidemiology of Gastroenteropancreatic Neuroendocrine Tumors [J]. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*, 2010, 40 (1): 1-18.
- [22] 杨琰昭, 徐嘉旭, 李若坤, 等. 双层探测器光谱CT能谱图像在胰腺神经内分泌肿瘤检出中的应用价值 [J]. *中华放射学杂志*, 2020, 54 (6): 534-538.
- [23] 蒲海龙, 何智林, 李蒙新, 等. 采用CT影像学征象评估急性重症胰腺炎病情分级的可靠性研究 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 148 (2): 108-110.
- [24] X H. The value of a dual-energy spectral CT quantitative analysis technique in acute pancreatitis [J]. *Clinical Radiology*, 2021, 76 (7): 551.e11-e15.
- [25] GARABED E. A clinical view of simple and complex renal cysts [J]. *Journal of the American Society of Nephrology : JASN*, 2009, 20 (9): 1874-1876.
- [26] DANIELE M, T B D, ACHILLE M, et al. State of the art: dual-energy CT of the abdomen [J]. *Radiology*, 2014, 271 (2): 327-342.
- [27] MD M J S, MD B R M, MPH. Medical evaluation and management of urolithiasis [J]. *Therapeutic Advances in Urology*, 2010, 2 (1): 3-9.
- [28] 罗春材, 李涛, 杨立. 双层探测器能谱CT的特点及临床应用 [J]. *中国医疗设备*, 2021, 36 (7): 170-173.
- [29] MAYO-SMITH W W, SONG J H, BOLAND G L, et al. Management of Incidental Adrenal Masses: A White Paper of the ACR Incidental Findings Committee [J]. *Journal of the American College of Radiology*, 2017, 14 (8): 1038-1044.
- [30] YASUNORI N, TAIHEI I, SEITARO O, et al. Adrenal Adenomas versus Metastases: Diagnostic Performance of Dual-Energy Spectral CT Virtual Noncontrast Imaging and Iodine Maps [J]. *Radiology*, 2020, 296 (2): 324-332.
- [31] PANAGIOTIS K. Determinants of mortality and treatment outcome following surgical interventions for acute mesenteric ischemia [J]. *Journal of Vascular Surgery*, 2007, 46 (3): 467-474.
- [32] RAWSKI R. Dual-Energy CT Iodine Mapping and 40-keV Monoenergetic Applications in the Diagnosis of Acute Bowel Ischemia [J]. *AJR: American Journal of Roentgenology : Including Diagnostic Radiology, Radiation Oncology, Nuclear Medicine, Ultrasonography and Related Basic Sciences*, 2018, 211 (3): 564-570.
- [33] MIN L S, HYUNG K S, JOA A S, et al. Virtual monoenergetic dual-layer, dual-energy CT enterography: optimization of keV settings and its added value for Crohn's disease [J]. *European Radiology*, 2018, 28 (6): 2525-2534.
- [34] 万丰, 赵心竹, 罗敏, 等. 结直肠癌双层探测器光谱CT成像: 转移性与非转移性淋巴结的对照研究 [J]. *放射学实践*, 2021, 36 (12): 1543-1547.
- [35] BOELLAARD T N, HENNEMAN O D F, STREEKSTRA G J, et al. The feasibility of colorectal cancer detection using dual-energy computed tomography with iodine mapping [J]. *Clinical Radiology*, 2013, 68 (8): 779-806.
- [36] NAVEEN M K. Indirect computed tomography venography of the lower extremities using single-source dual-energy computed tomography: advantage of low-kiloelectron volt monochromatic images [J]. *Journal of Vascular and Interventional Radiology : JVIR*, 2012, 23 (7): 879-886.
- [37] HICKETHIER T, BYRTUS J, HAUGER M, et al. Utilization of virtual monoenergetic images (MonoE) derived from a dual-layer spectral detector CT (SDCT) for the assessment of abdominal arteries in venous contrast phase scans [J]. *European Journal of Radiology*, 2018, 99: 28-33.
- [38] 李远辉, 骆秋霞. 双层探测器光谱CT单能级图像对门静脉图像质量的影响 [J]. *影像研究与医学应用*, 2021, 5 (11): 173-174.
- [39] NOOR FATIMA M. Virtual Monoenergetic Spectral Detector CT for Preoperative CT Angiography in Liver Donors [J]. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, 2021.
- [40] IOANNIS V, RAYMOND C, ARJUN N, et al. Dual-energy CT: vascular applications [J]. *AJR American Journal of Roentgenology*, 2012, 199 (5 Suppl): S87-S97.
- [41] LAKSHMI A, PRABHAKAR R, RICHARD A, et al. Spectral detector CT-derived virtual non-contrast images: comparison of attenuation values with unenhanced CT [J]. *Abdominal Radiology (New York)*, 2017, 42 (3): 702-709.
- [42] E M K, A K P, K K R, et al. Aortic endograft surveillance: use of fast-switch kVp dual-energy computed tomography with virtual noncontrast imaging [J]. *Journal of computer assisted tomography* [J]. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 2011, 35 (6): 742-746.
- [43] HERSH C. Abdominal aorta: evaluation with dual-source dual-energy multidetector CT after endovascular repair of aneurysms--initial observations [J]. *Radiology*, 2008, 249 (2): 692-700.

(收稿日期: 2022-01-14)  
(校对编辑: 韩敏求)