

论 著

能谱CT虚拟平扫在儿童腹部成像中的可行性研究*

王晓霞 钟玉敏* 薛淑滢
施美华 胡立伟 邱海嵘

上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心放射科(上海 200127)

【摘要】目的 通过定量分析儿童腹部虚拟平扫(VNE)与常规平扫(TNE)图像,探讨VNE在儿童腹部CT成像中应用的可行性。方法 自2017年1月至2018年6月,前瞻性连续纳入于上海儿童医学中心行腹部能谱CT扫描的患儿35例。应用64排CT(GE Discovery CT 750 HD)行腹部平扫和增强扫描,采用低管电流(260mA)宝石能谱CT技术行动脉期扫描,TNE和门静脉期采用常规多层螺旋CT扫描模式,利用虚拟平扫技术重建动脉期VNE。测量比较VNE和TNE中肝脏、肾脏、胰腺、脾脏和肌肉的CT值、图像噪声值(SD值)、对比噪声比(CNR)、图像质量主观评分、有效辐射剂量(ED)。结果 VNE与TNE的各脏器SD值、CNR比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。VNE各脏器与竖脊肌的平均CT值略低于TNE,但具有良好的相关性($r: 0.509-0.952$)。VNE主观图像质量评分与TNE比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。省略TNE的两期方案的有效辐射剂量(动脉期采用能谱CT扫描模式、门静脉期采用常规多层螺旋CT扫描模式)略低于常规三期方案,差异无统计学意义($P>0.05$)。结论 VNE图像CT值与TNE具有很好的相关性,图像质量较好,可满足临床诊断需求。VNE技术在儿童腹部CT成像中具有一定的可行性,并可能为儿童腹部CT成像提供了一种更简单的方案。

【关键词】能谱CT;虚拟平扫;常规平扫;有效辐射剂量

【中图分类号】R445

【文献标识码】A

【基金项目】上海市卫生与计划生育委员会青年项目(20184Y0356);
上海交通大学“交大之星”计划医工交叉研究基金(YG2021QN107)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.04.041

Study of Feasibility of Virtual Non-Enhanced CT in the Assessment of Pediatric Abdomen*

WANG Xiao-xia, ZHONG Yu-min*, XUE Lin-yan, SHI Mei-hua, HU Li-wei, QIU Hai-sheng.

Department of Radiology, Shanghai Children's Medical Center, Shanghai Jiaotong University, School of Medicine, Shanghai 200127, China

ABSTRACT

Objective To evaluate the feasibility of virtual non-enhanced (VNE) images generated from the contrast-enhanced spectral CT images in the evaluation of pediatric abdominal imaging. **Methods** Thirty-five pediatric patients who underwent abdominal spectral CT scan were prospectively and consecutively enrolled in Shanghai Children's Medical Center from January 2017 to June 2018. A 64-slice CT (GE Discovery CT 750 HD) was used for plain and enhanced abdominal scanning, and a low tube current (260 mA) gemstone spectroscopy CT technique was used for arterial phase scanning, and conventional multi-slice spiral CT scanning was used for TNE and portal venous phases. Based on the original data of the energy spectrum scan, the arterial phase VNE was reconstructed using the virtual unenhanced scan technique. The CT value, image noise value (SD value), contrast-to-noise ratio (CNR), subjective score of image quality and effective radiation dose (ED) of liver, kidney, pancreas, spleen and muscle in VNE and TNE were measured and compared. **Results** There was no difference in CNR between VNE and TNE for liver, spleen, kidney and pancreas (all $P>0.05$). Mean CT attenuation values from VNE (at 70keV) were systematically lower than those on TNE (at 65keV) for all tissue types due to photon energy difference, but with good one-to-one correlation ($r: 0.509-0.952$). Image noise was similar on VNE and TNE images. There was no difference in image quality score between VNE and TNE ($P>0.05$). Image quality score for VNE was lower than TNE, but was acceptable for diagnosis. Effective radiation doses of the two-phase protocol (arterial phase with spectral CT imaging mode and portal-venous phase performed by multi-slice spiral CT); omitting the TNE scan was similar to the conventional three phase protocol. **Conclusion** Image quality of VNE images is acceptable for diagnosis and CT numbers of VNE images correlate well with TNE images. VNE has certain feasibility in the assessment of pediatric abdomen, providing a simpler protocol.

Keywords: Spectral CT Imaging; Virtual Non-Enhanced Images; True Non-Enhanced Images, Effective Radiation Doses

多层螺旋CT(Multidetector Computed Tomography, MDCT)技术目前在儿童腹部CT成像中发挥着重要的作用,MDCT扫描时间较短、分辨率较高,能在一定程度上减少造影剂的用量,并且降低儿童的镇静率^[1]。目前常规的腹部CT扫描方案包括了平扫及多期相增强扫描。能谱CT的虚拟平扫(Virtual Non-enhanced, VNE)技术可通过物质减影方式将增强图像中的碘物质去除,从而生成虚拟的平扫图像,代替常规平扫(True Non-enhanced, TNE)^[2]。VNE的应用避免了重复扫描,从而减少扫描时间及辐射剂量。既往对于VNE替代TNE可行性研究并不少见,在肝脏、肾脏、胰腺、肾上腺疾病等领域中均有报道^[3-10]。然而,既往关于能谱VNE技术的研究基本上聚焦在成人,鲜少有应用于儿童的报道。儿童具有配合度低,对辐射敏感度高等特点,而能谱VNE技术在成人应用中能缩短扫描时间,并降低辐射剂量,鉴于此我们推测能谱VNE技术在儿童中可能具有一定应用价值。本研究首次选取儿童为研究对象,旨在探讨能谱VNE技术在儿童腹部CT成像中替代TNE的可行性,并假设在不影响临床诊断的情况下省略TNE扫描,降低采集时间和潜在的辐射剂量。

1 材料与方法

1.1 一般资料 本研究经上海儿童医学中心伦理委员会批准(伦审编号:SCMCIRB-W2016038),所有患者家属均签署知情同意书。在2017年1月至2018年6月期间,前瞻性连续纳入35例患者。

纳入标准:患儿年龄 <18 岁,体重 >20 kg;因患儿病情需要计划行腹部CT增强扫描。排除标准:患儿配合不佳所致图像运动伪影严重影响诊断;患儿既往手术后金属植入物伪影严重影响诊断;腹部和盆腔联合扫描;患儿存在心、肝、肾功能不全;(5)对碘对比剂过敏。入组病例中男孩26例、女孩9例,年龄5~15岁,平均年龄 (9.3 ± 3.2) 岁,平均体重 (31.1 ± 8.6) kg。

1.2 扫描方法及图像后处理 采用GE Healthcare公司的64排宝石能谱CT(GE Discovery CT 750 HD)进行腹部CT多期像扫描。扫描范围为膈顶至肾脏下缘。TNE和门静脉期使用常规多层螺旋CT扫描,扫描参数:管电压100 kVp,自动管电流(50-350mA),噪声指数11HU,螺距1.375,旋转速度0.4秒,层厚5mm。采用低管电流(260mA)宝石能谱CT技术(GSI)行动脉期扫描,应用单球管进行高电压(140kVp)和低

【第一作者】王晓霞,女,主治医师,主要研究方向:儿童影像诊断、肿瘤影像诊断。E-mail: wangxiaier@163.com

【通讯作者】钟玉敏,女,主任医师,主要研究方向:儿童影像诊断、儿童心血管与肿瘤影像诊断。E-mail: yuminmin2014@163.com

电压(80kVp)的快速瞬时切换(0.25ms),通过宝石探测器,获得“同源、同时、同向”的CT原始数据。应用非离子造影剂(碘帕醇 370mgI/mL; Bracco Imaging Italia SRL)进行增强扫描,造影剂注射剂量为2 mL/kg,利用自动高压注射器经肘静脉注入后以同样流速注射生理盐水。造影剂注射速度0.5 ~ 4mL/s。采用对比剂追踪触发技术确定动脉期扫描时间,动脉期延迟时间22s,静脉期延迟时间45s。所用造影剂总量为40.0-96.6ml,平均用量(60.6±3.3)mL。

所有图像传输至宝石能谱成像(GSI)后处理工作站(AW4.6, GE Healthcare, Waukesha WI)进行图像后处理及数据测量分析。VNE图像是由采用能谱CT扫描模式的动脉期图像经过减影方法将碘物质去除而自动生成的单能量图,相当于70keV光子能量水平。TNE图像是通过管电压100kVp的常规多层螺旋扫描来获得的,其对应于平均约65keV的光子能量水平。

1.3 观察指标

1.3.1 图像数据测量 在VNE和TNE图像上,通过放置圆形感兴趣区(Region of Interest, ROI),分别测量肝脏、肾脏、脾脏、胰腺和竖脊肌的CT值和图像噪声(Standard Deviation, SD),对每个脏器与竖脊肌的ROI进行三次测量,并计算平均值。VNE和TNE图像上的ROI位置、形状及大小保持一致,ROI大小0.2-1.0 cm²,所有ROI均置于组织密度较均匀的区域,避开明显的血管、伪影、病灶。通过各脏器和竖脊肌的CT值和SD值计算对比噪声比(Contrast to Noise Ratio, CNR),公式: CNR各脏器=(平均CT值各脏器-平均CT值竖脊肌)/(平均SD值竖脊肌)。

1.3.2 图像质量主观评分 由两名具有10年以上儿科腹部影像诊断经验的放射科医师对VNE和TNE图像进行盲法评分。评分采用五分制评分系统^[11]: 1分,严重的伪影及噪声,图像质量极差,无法诊断; 2分,明显的伪影和噪声,图像质量差,严重影响诊断; 3分,图像质量中等,有部分噪声和伪影,基本满足诊断; 4分,图像质量较好,存在少量伪影和噪声; 5分,图像质量优良,无明显伪影及噪声。3分以上可基本满足诊断要求。

1.4 有效辐射剂量计算 记录35例患者扫描完成后生成的各期相剂量长度乘积(Dose-length Product, DLP),利用公式计算各期的有效辐射剂量(Effective Dose, ED), ED = DLP×k, k值是根据国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)第103号出版物中的年龄和性别

转换因子^[12]。分别计算模拟常规扫描的三期方案(平扫、动脉期、门脉期)和混合扫描的两期方案(能谱CT扫描的动脉期、常规扫描的门脉期)的ED,并对两个方案进行比较。

1.5 统计学分析 本研究所有数据采用SPSS 22.0软件进行统计分析。计量数据以($\bar{x} \pm s$)表示。采用配对t检验比较TNE和VNE图像的CT值、SD值、CNR以及ED之间的差异,应用Pearson相关性分析验证TNE和VNE 图像CT值之间的相关性,对图像质量主观评分采用Mann-Whitney U检验。相关系数(r值)>0.8为极强相关,>0.6~0.8为强相关,>0.4~0.6为中度相关,0.2~0.4为弱相关,<0.2为基本不相关。本研究以P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 图像客观评估 VNE和TNE图像的CT值见表1。VNE图像的肝、脾、肾、胰腺和竖脊肌的平均CT值均低于TNE图像,但存在良好的相关性(r: 0.509-0.952, 见表1)。表1中还列出了VNE图像的校正平均CT值。VNE和TNE图像的噪声相似(13.21±1.87HU vs. 12.74±0.84HU, P=0.38)。肝脏、脾脏、肾脏和胰腺的VNE和TNE的CNR无明显统计学差异,见表2。

2.2 图像主观评价 VNE和TNE图像的主观评分分别为(4.17±0.09)分和(4.72±0.07)分。虽然VNE图像评分低于TNE图像(P<0.01),但所有VNE图像评分均达到3分或以上,表明所有VNE图像均可满足基本临床诊断需求,见图1。在所有35例病例中,有12例存在明显病灶,包括肾上腺肿瘤2例、肾上腺外的腹膜后肿瘤3例、胰腺肿瘤1例、肾脏肿瘤3例、肝脏肿瘤2例以及肠壁肿瘤1例,于VNE和TNE图像上的诊断准确性无明显差异。其余23例腹部CT图像未见明显病灶,其中12例为腹部恶性肿瘤手术和/或化疗后进行定期检查,8例因腹部以外的恶性肿瘤进行治疗前常规评估,2例为发热待查,1例为胰腺炎治疗后复查。

2.3 有效辐射剂量 TNE、能谱CT扫描的动脉期、常规门静脉期的平均ED分别为(1.43±0.53)mSv、(2.77±0.26)mSv和(1.43±0.55)mSv;省去TNE扫描后两期总剂量为4.20±0.75mSv。根据本研究结果,估算常规三期扫描(平扫、动脉期和门静脉期)的ED为(4.29±1.63)mSv。省去TNE扫描后两期方案的ED略低于常规三期方案,两者无统计学差异(P>0.05),见表3。

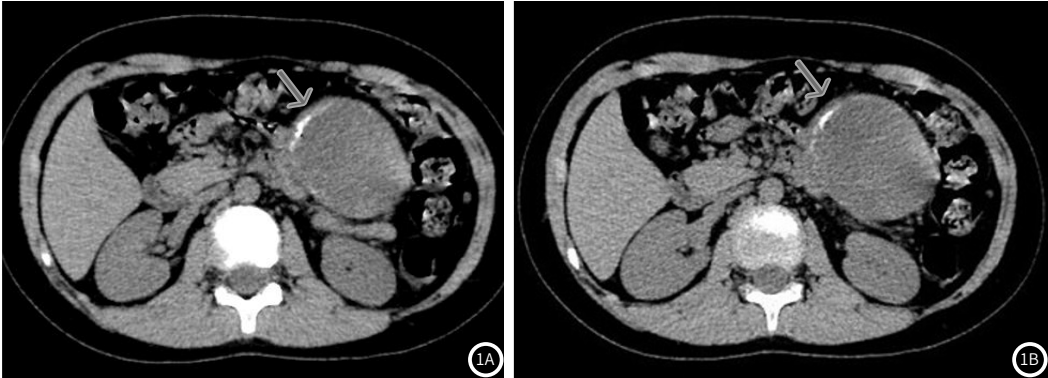


图1 14岁,男孩,胰腺尾部实性假乳头状肿瘤横断位CT图像(图1A,VNE图像、图1B,TNE图像)。(图1A~图1B)胰腺尾部见稍低密度肿块、伴边缘钙化灶(白色箭头)。

表1 VNE和TNE图中各脏器与肌肉的平均CT值

	CT 值(HU)		相关系数(r)	t值	P值	VNE校正CT值*(HU)
	TNE	VNE				
肝脏	70.89±9.94	64.05±6.88	0.952	18.808	0.000	70.28
脾脏	61.13±3.58	55.10±4.21	0.728	12.158	0.000	60.42
肾脏	45.15±3.78	38.49±3.70	0.624	12.172	0.000	45.31
胰腺	57.92±4.49	51.50±3.87	0.509	9.091	0.002	59.20
竖脊肌	61.59±3.42	55.05±3.19	0.731	15.894	0.000	61.89

注: *校正的CT值是利用TNE和VNE图像中各脏器的平均CT值比值,将VNE图像的测量CT值按比例放大获得。

表2 VNE和TNE图像的各脏器CNR

	CNR		t值	P值
	TNE	VNE		
肝脏	0.82±0.57	0.75±0.64	1.573	0.125
脾脏	0.33±0.26	0.30±0.21	0.912	0.368
肾脏	1.32±0.31	1.32±0.33	0.053	0.958
胰腺	0.45±0.25	0.40±0.33	0.942	0.353

表3 有效辐射剂量比较

	ED (mSv)
TNE ①	1.43±0.53
能谱CT动脉期 ②	2.77±0.26
常规门脉期 ③	1.43±0.55
常规三期 (TNE、动脉期、门脉期)	4.29±1.63
②+③	4.20±0.75

3 讨论

能谱CT的原理是采用高压发生器并配以动态变焦球管,能进行瞬时电压切换,将传统的X线的混合能量分解为40-140 keV连续不断的101个单能量,获得不同物质的单能量图像,通过减影技术去除碘物质即可得到VNE图像^[2]。虽然本研究应用的是宝石能谱CT,而非新一代GE能谱CT(Revolution CT),但是本研究结果仍证实:VNE图像CT值与TNE具有很好的相关性,两者的CNR无差异,VNE图像质量良好,可以满足基本临床诊断的需求。在儿童腹部CT成像中,VNE具有一定的可行性,这与既往很多成人的研究报告基本一致^[3-10]。

在本研究中,VNE图像的各脏器和竖脊肌的平均CT值均低于TNE图像,这与既往的报道的结果有差异^[13-14],因为VNE图像是在70keV光子能量水平由能谱CT动脉期图像自动生成的,而本研究中TNE图像是通过管电压100kVp的常规多层螺旋扫描来获得的,相当于65keV的光子能量水平,两者的光子能量水平存在差异(70keV vs. 65keV),低keV穿透力差,衰减明显,所以CT值反而增高。但是两组图像CT值偏差是可以通过校正来弥补的,我们利用各脏器平均CT值比值来修正CT值偏差,从而获得了两组非常匹配的CT值。本组所有35例VNE图像均具有较高的图像质量主观评分(4-5分),其诊断性能与TNE相当。虽然VNE的噪声相对较高、主观评分相对较低,但是对经验丰富的放射科医生来说仍在可接受范围之内,并且不影响病灶的诊断。对于VNE主观评分相对较低的原因有研究提出的解释是GE宝石能谱的虚拟平扫技术加了柔化图像质量软件,所以提高了CNR,但是肉眼观察图像存在一定的失真,所以评分会稍低。以上结果支持在儿童腹部成像中采用VNE技术的可行性。另外,除了腹部,VNE技术也被广泛应用于胸部和颈部等其他部位^[15-17]。

由于儿童的组织结构及体型与成人区别极大,生长发育期儿童的细胞分裂速度远高于成人,对射线的敏感性也远高于成人,且儿童年龄越小,患癌风险性越高,所以儿科CT检查需考虑辐射危害性,并尽可能降低儿童CT检查过程中的辐射剂量。本研究结果显示,在辐射剂量方面,虽然能谱扫描明显高于常规平扫(1.43±0.53mSv vs. 2.77±0.26mSv),但是我们发现若省略TNE扫描的两期(能谱CT动脉期、常规门静脉期)方案的ED略低于常规三期(常规平扫、动脉期及门脉期)方案(4.20±0.75 vs. 4.29±1.63mSv),两者差异在统计学上不显著,这与既往报道的成人VNE研究结果不一致^[3-9],既往研究证实使用VNE技术可以降低约25%或以上的辐射暴露。本次研究无法通过VNE技术降低辐射剂量的原因在于宝石能谱CT仪器最小管电流为260mA,这对于儿童患者仍然是偏高的。尽管如此,在本研究组的儿童腹部成像中,若采用两期的VNE方案(能谱CT动脉期、常规门静脉期)也达到与常规三期扫描等效的辐射剂量结果。根据此次研究数据,为了降低儿童腹部VNE辐射剂量,今后可从降低管电压、缩短扫描时间、增加螺距等方面进一步优化。另外,儿童CT检查配合度较成人低,所以需要在保证图像质量的前提下尽量减少扫描时间。本研究结果发现在等效辐射剂量条件下,通过VNE技术可省去

TNE扫描,简化了扫描方案,同时间接说明VNE可以减少扫描时间,有利于提高儿童CT检查的成功率。除此之外,由于能谱CT数据可将X线的混合能量分解为101个连续的单能量图像,使CT由原来依靠混合能量CT值的单参数成像变为多参数成像,其具备的能谱曲线、物质分离、定量分析等技术可以更加全面地反映组织特性及功能状态,从而在常规CT的基础上提供更加准确、全面地诊断信息^[18-20]。

本研究尚存在一定的局限性。首先,本次研究所用的宝石能谱CT扫描仪最小管电流为260mA,相对于儿童仍然偏高。第二是纳入患者人数相对较少,将来需要在更大的患者群体中进行进一步研究来证实本次的初步结果。第三,不同期相VNE图像质量存在一定的差异,本研究中仅采用动脉期的VNE图像,后续将做进一步研究。

综上所述,能谱CT扫描动脉期生成的VNE图像质量可满足基本临床诊断要求,VNE图像的CT值与TNE图像有良好的相关性。在儿童腹部成像中,在保证图像质量、不增加辐射剂量的同时,VNE技术具有一定的可行性,并且省略TNE的模式具有简化扫描方案、缩短扫描时间的优势。

参考文献

- [1] Yekeler E. Pediatric abdominal applications of multidetector-row CT [J]. Eur J Radiol, 2004, 52(1): 31-43.
- [2] Chai YR, Xing JJ, Gao JB, et al. Feasibility of virtual nonenhanced images derived from single-source fast kVp-switching dual-energy CT in evaluating gastric tumors [J]. Eur J Radiol, 2016, 85(2): 366-372.
- [3] Sugrue G, Walsh J P, Zhang Y, et al. Virtual monochromatic reconstructions of dual energy CT in abdominal trauma: optimization of energy level improves pancreas laceration conspicuity and diagnostic confidence [J]. Emerg Radiol, 2021, 28(1): 1-7.
- [4] 杨琰昭, 严福华, 韩群, 等. 双层光谱探测器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, 53(1): 33-39.
- [5] Laukamp KR, Ho V, Obmann VC, et al. Virtual non-contrast for evaluation of liver parenchyma and vessels: results from 25 patients using multi-phase spectral-detector CT [J]. Acta Radiol, 2020, 61(8): 1143-1152.
- [6] Xiao JM, Hippe DS, Zecevic M, et al. Virtual nonenhanced dual-Energy CT images obtained with a multiterminal decomposition algorithm: diagnostic value for renal mass and urinary stone evaluation [J]. Radiology, 2021, 298(3): 611-619.
- [7] 朱小倩, 陈晨, 魏晓磊, 等. 光谱CT虚拟平扫在肝脏及肾上腺CT衰减一致性研究 [J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(2): 354-358.
- [8] 贾秀川, 陈英敏, 暴云锋, 等. 双源CT小肠造影双能量虚拟平扫与常规平扫对比研究 [J]. 中国医疗设备, 2021, 36(1): 87-89, 93.
- [9] Popnoe D O, Ng C S, Zhou S, et al. Comparison of enhancement quantification from virtual nonenhanced images to true nonenhanced images in multiphase renal dual-Energy computed tomography: A phantom study [J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(8): 171-179.
- [10] Botsikas D, Triponez F, Boudabbous S, et al. Incidental adrenal lesions detected on enhanced abdominal dual-energy CT: can the diagnostic workup be shortened by the implementation of virtual nonenhanced images? [J]. Eur J Radiol, 2014, 83(10): 1746-1751.
- [11] Behrendt FF, Schmidt B, Plumhans C, et al. Image fusion in dual energy computed tomography: effect on contrast enhancement, signal-to-noise ratio and image quality in computed tomography angiography [J]. Invest Radiol, 2009, 44(1): 1-6.
- [12] Deak PD, Smal Y, Kalender WA. Multisection CT protocols: sex- and age-specific conversion factors used to determine effective dose from dose-length product [J]. Radiology, 2010, 257(1): 158-166.
- [13] Jamali S, Michoux N, Coche E, et al. Virtual nonenhanced phase with spectral dual-energy CT: Is it an alternative to conventional true nonenhanced phase for abdominal tissues? [J]. Diagn Interv Imaging, 2019, 100(9): 503-511.
- [14] Anzidei M, Di Martino M, Sacconi B, et al. Evaluation of image quality, radiation dose and diagnostic performance of dual-energy CT datasets in patients with hepatocellular carcinoma [J]. Clin Radiol, 2015, 70(9): 966-973.
- [15] Hering DA, Krger K, Bauer RW, et al. Comparison of virtual non-contrast dual-energy CT and a true non-contrast CT for contouring in radiotherapy of 3D printed lung tumour models in motion: a phantom study [J]. Br J Radiol, 2020, 93(1116): 20200152.
- [16] Kim C, Kim W, Park SJ, et al. Application of dual-energy spectral computed tomography to thoracic oncology imaging [J]. Korean J Radiol, 2020, 21(7): 838-850.
- [17] Yang Y, Jia X, Deng Y, et al. Can virtual non-enhanced CT be used to replace true non-enhanced CT for the detection of palpable cervical lymph nodes? A preliminary study [J]. Jpn J Radiol, 2014, 32(6): 324-330.
- [18] Fornaro J, Lescka S, Hibbeln D, et al. Dual- and multi-energy CT: approach to functional imaging [J]. Insights Imaging, 2011, 2(2): 149-159.
- [19] 符仲仲, 刘怀志, 傅晓彬, 等. 能谱CT最佳单能量图对提高下肢动脉造影成像质量的应用价值 [J]. 罕少疾病杂志, 2017, 24(06): 54-55, 62.
- [20] 胡玉明, 罗悦凡, 符仲仲, 等. 冠状动脉CT能谱成像最佳单能量的临床应用 [J]. 罕少疾病杂志, 2015, 22(02): 26-28.

(收稿日期: 2022-04-25) (校对编辑: 姚丽娜)