

## 论 著

## 双源双能量CT单能谱技术在肺动脉及下肢静脉联合成像中的应用价值

## 1. 山西医科大学医学影像学系

(山西 太原 030001)

## 2. 山西医科大学第一医院CT影像科

(山西 太原 030001)

周笑莹<sup>1</sup> 张 华<sup>2,\*</sup>

【摘要】目的 研究双源双能量噪声优化的虚拟单能谱成像技术(VMI+)对下肢CT静脉成像(CTV)和肺动脉成像(CTPA)联合扫描中下肢静脉图像质量的影响,且以超声为参考标准评估CTV对下肢静脉血栓的诊断性能。方法 回顾性分析53例临床怀疑肺栓塞(PE)进行CTPA-CTV联合检查的患者的图像,利用双源双能量单能谱成像技术分别重建下肢静脉在40、50、60keV的三组虚拟单能谱图像(VMI+40 keV、VMI+50keV、VMI+60keV),以及线性融合图像(融合系数0.5)。记录线性融合图像和三组单能谱图像的衰减值(CT值)、对比噪声比(CNR)及信号噪声比(SNR),以三分制对图像进行主观评分。以超声(US)对血栓的诊断结果为参考标准,计算下肢CTV诊断下肢深静脉血栓(DVT)的特异性、敏感性、阳性预测值及阴性预测值;使用Kappa检验分析两种方法对DVT显示的一致性。结果 单能谱图像和线性融合图像的CT值及CNR值存在统计学差异( $H=116.455$ ,  $P=0.000$ 及 $H=22.362$ ,  $P=0.000$ ),其中VMI+40 keV的CT值( $204.63\pm56.40$  HU)及CNR值( $7.72\pm4.72$ )最高。四组图像的主观评分存在统计学差异( $H=14.097$ ,  $P=0.003$ ),其中VMI+40 keV的评分( $2.62\pm0.49$ )最高。在37位同时进行CTV及US检查的患者中,CTV对DVT的诊断敏感性、特异性、阳性预测值及阴性预测值分别为84.2%(16/19)、77.8%(14/18)、80.0%(16/20)及82.4%(14/17)。结论 双源双能量单能谱成像技术显著提高肺动脉及下肢静脉联合成像中下肢静脉的图像质量,且具有较高的血栓诊断性能。

【关键词】深静脉血栓;肺栓塞;虚拟单能谱成像

【中图分类号】R445.3; R543.2; R543.6

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2021.01.023

## Impact of Dual Energy Virtual Monochromatic Imaging on Image Quality and Diagnostic Accuracy at the Combined Computed Tomography Angiography of Pulmonary and Lower Extremity Vein

ZHOU Xiao-ying<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>2,\*</sup>.

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

2.Department of CT Imaging, First Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

## ABSTRACT

**Objective** To investigate the impact of dual-energy noise-optimized virtual monoenergetic imaging algorithm(VMI+)on image quality and diagnostic performance of lower-extremity indirect computed tomography venography(CTV)combined with pulmonary angiography(CTPA)for venous thromboembolism,compared with Ultrasound. Methods 53 patients who were clinically suspected pulmonary embolism(PE)and underwent CTPA-CTV examination on a third-generation dual-source CT system were retrospectively enrolled and analyzed in the study. Images were reconstructed with standard linear blending( $F_{0.5}$ ), VMI+ at 40 keV(VMI+40 keV),50 keV(VMI+50 keV)and 60 keV(VMI+60 keV). Vascular attenuation values and image noise were measured; contrast to noise ratio(CNR) and signal to noise ratio(SNR)of VMI+ images and linear blending images were calculated. Three-point scales were used to evaluate the subjective image quality. In a subgroup of 37 patients who additionally underwent US check, the specificity, sensitivity, positive predictive value, and negative predictive value of CTV for the detection of deep venous thrombosis (DVT) were calculated. Kappa test was used to analyze the consistency of the two methods for DVT. Results The value of attenuation and CNR were highest in the VMI+40keV group ( $204.63\pm56.40$  HU and  $7.72\pm4.72$ , respectively). The subjective assessment was highest in the VMI+40keV ( $2.62\pm0.49$ ), superior to  $F_{0.5}$  ( $2.30\pm0.46$ ,  $P<0.05$ ). Of the 37 patients who underwent CT and US examination, the sensitivity, specificity, positive predictive value and negative predictive value of CTV in the diagnosis of deep venous thrombosis were 84.2% (16/19), 77.8% (14/18), 80.0% (16/20), and 82.4% (14/17) respectively. Conclusion Compared with the linear blending image, low-kiloelectron volt VMI+ can improve the image quality of CTV and diagnostic accuracy for deep venous thrombosis.

**Keywords:** Deep Venous Thrombosis; Pulmonary Embolism; Virtual Monoenergetic Images

下肢深静脉血栓(deep venous thrombosis, DVT)是常见的周围血管疾病,其主要并发症为继发肺栓塞(pulmonary embolism, PE),严重时可导致患者死亡。因此,及时准确地诊断DVT对患者至关重要。间接法下肢CT静脉成像(computed tomography venography, CTV)联合肺动脉成像(computed tomography pulmonary angiography, CTPA)为微创检查,可以同时诊断DVT及PE,并可弥补下肢静脉超声(ultrasound, US)对盆腔静脉血栓显示较差的缺点。但是传统的间接法下肢CTV,静脉充盈较差,血管浓度不均,可能会影响疾病的诊断<sup>[1-2]</sup>,而双能扫描中低能量虚拟单能谱成像可以提高组织对比度,提高血栓的诊断准确性<sup>[3-4]</sup>。所以,本研究分析评价了第三代双源双能CT中的噪声优化的虚拟单能谱成像(virtual monoenergetic images, VMI+)技术在CTPA-CTV联合扫描中对下肢CTV图像质量的影响,以及对血栓的诊断价值。

## 1 资料与方法

**1.1一般资料** 回顾性分析2017年9月至2018年11月期间,临床怀疑PE在本院行间接法下肢CTV联合CTPA检查的患者53例影像资料。BMI在18~27.8之间,其中37位患者于CTV检查前或后48h内进行下肢静脉US检查。孕妇、儿童、心肺肾功能不全、对比剂过敏患者不纳入本研究。

【第一作者】周笑莹,女,执业医师,主要研究方向:心脑血管疾病的CT成像及诊断。E-mail: 1248331730@qq.com

【通讯作者】张 华,女,主任医师,主要研究方向:头颈部及体部影像诊断。E-mail: 13623665879@163.com

**1.2 检查方法** 使用第三代双源CT机(SOMATOM Force; Siemens Healthcare, Germany)扫描。患者仰卧位, 双上肢伸向头侧。以4.0mL/s的注射速率经肘静脉注射非离子型碘对比剂(优维显, 370mgI/mL), 对比剂总量为80~120mL, 注射完成后相同速率注射生理盐水20~30mL。CTPA扫描使用团注示踪法, 在肺动脉主干上放置监测点, 当监测点CT值达到60HU时自动触发扫描。扫描范围为主动脉弓上水平到膈肌水平, 在患者一次屏气期间完成扫描。扫描参数: 管电压70kV, 管电流自动调控, 层厚2.0mm, 层间隔2.0mm, 重建层厚0.75mm, 延迟时间4s, 扫描时间0.6s。下肢静脉扫描使用双能量模式, 扫描范围为膈下至足水平, 扫描方向为足至头方向, 开始扫描时间为注射对比剂180s后。扫描参数: 管电压(70, Sn150)kV, 参考管电流(140, 47)mAs, 层厚1.5mm, 层间隔1.5mm, 螺距0.7, 重建层厚0.75mm, 准直器192×0.6 mm, Kernal值Qr40, 融合系数0.5。

**1.3 图像处理及分析** 所有数据传输至工作站(syngo.via VB10B, Siemens), 在应用程序“单能+(monoenergetic plus)”中重建出VMI+40keV, VMI+50keV及VMI+60keV三组单能谱图像。由2名有10年以上工作经验的放射科医师对线性融合图像及单能谱图像进行独立分析, 其中下肢静脉血栓的分析在单能谱图像上进行。

在线性融合图像及三组单能谱图像上的腓静脉及其同层面的肌肉组织分别画同样大小的感兴趣区(region of interest, ROI), 记录其CT值, ROI大小为大于等于三分之二的管腔面积; 在同层面皮下脂肪放置ROI, 记录其标准差(standard deviation, SD), ROI尽量放置在无血管区, 所有测量均进行3次, 取平均值。计算每组图像腓静脉的对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR)及信号噪声比(signal to noise ratio, SNR)。CNR=(CT静脉-CT对比组织)/SD, SNR=CT静脉/SD, 其中CT静脉表示腓静脉的CT值, CT对比组织表示腓静脉同层面肌肉的CT值, SD为图像的噪声值, 既同一层面皮下脂肪组织标准差。

由2名医师单独对线性融合及单能谱图像质量进行主观评价, 评价采用3分制: 3分: 优秀, 强化程度大于等于伴行动脉, 诊断可靠; 2分: 良好, 强化程度低于伴行动脉但高于同水平肌肉, 满足诊断要求; 1分: 较差, 强化低于同水平肌肉, 不满足诊断要求。取2名医师的平均值作为最终评分。

**1.4 统计学方法** 使用SPSS 22.0软件进行统计学分析, CTV图像质量评价使用秩和检验; 两种检查方法对血栓显示一致

性的比较使用Kappa检验, Kappa值 $\geq 0.75$ 认为一致性较好,  $0.75 > \text{Kappa值} \geq 0.4$ 一致性一般, Kappa值 $< 0.4$ 一致性较差,  $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

## 2 结果

在37位同时行下肢US的患者中, US单独发现DVT的有19例, CTV单独发现DVT的有20例, CTV及US均发现DVT的有16例(表1)。以US结果为参考标准, CTV对DVT的诊断阳性预测值为80.0%(16/20)、阴性预测值为82.4%(14/17)、敏感性为84.2%(16/19)及特异性为77.8%(14/18)。CTV及US对下肢静脉血栓显示的一致性一般(Kappa值=0.621,  $P < 0.05$ )。CTV及US结果中血栓的具体分布见表2。在所有行CTV检查的53例患者中, 检出血栓的患者有25例, 单独诊断PE的有5例, 单独诊断DVT的有10例, 同时诊断PE和DVT的有10例(图1), 因此相对于单独行下肢CTV, CTPA-CTV联合检查对于血栓的增量诊断价值为9%(5/53)。

表1 下肢CTV及US血栓结果(例)

CTV	US		合计
	阳性	阴性	
阳性	16	4	20
阴性	3	14	17
总计	19	18	37

注: 采用Kappa检验, Kappa值=0.621。

表2 血栓分布的部位及数量(处)

部位	CTV	US
下腔静脉	0	0
髂静脉	2	0
股静脉	10	7
腓静脉	10	8
小腿深静脉	17	11
肌间静脉	14	13
合计	53	39

客观评价中, 四组图像间的SNR不存在统计学差异( $H=3.372$ ,  $P=0.338$ ), CT值及CNR值存在统计学差异(表3), 其中VMI+40keV的CT值( $204.63 \pm 56.40$ HU)及CNR值( $7.72 \pm 4.72$ )最高。除VMI+60keV与线性融合之间的CT值无统计学差异外, 其余任意两组间的CT值均存在统计学差异。

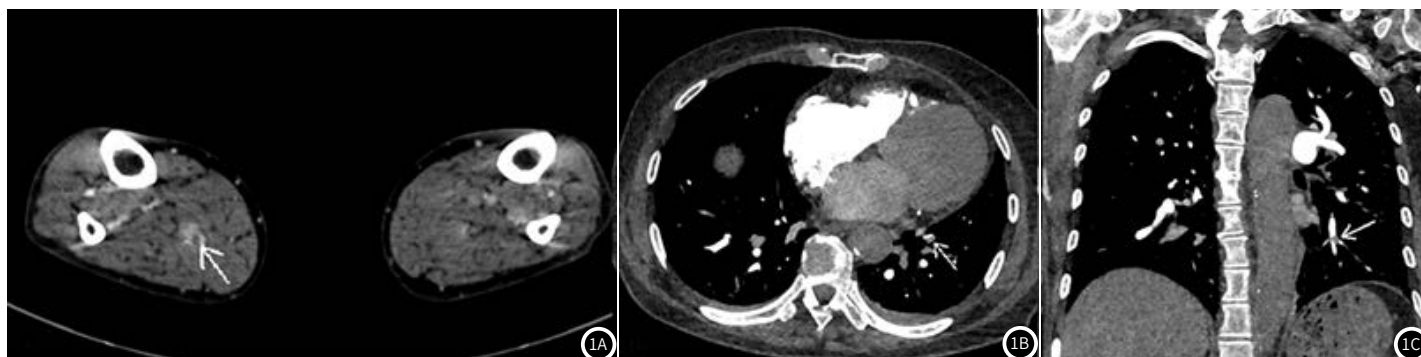


图1 女, 67岁, 咳嗽、咳痰伴气短一周。A为下肢CTV的轴位图像, 提示右侧小腿肌间静脉增粗, 内伴血栓(白色箭头)。B、C分别为肺动脉成像的轴位及MPR图像, 提示左肺下叶内前基底段肺动脉内血栓(白色箭头)。

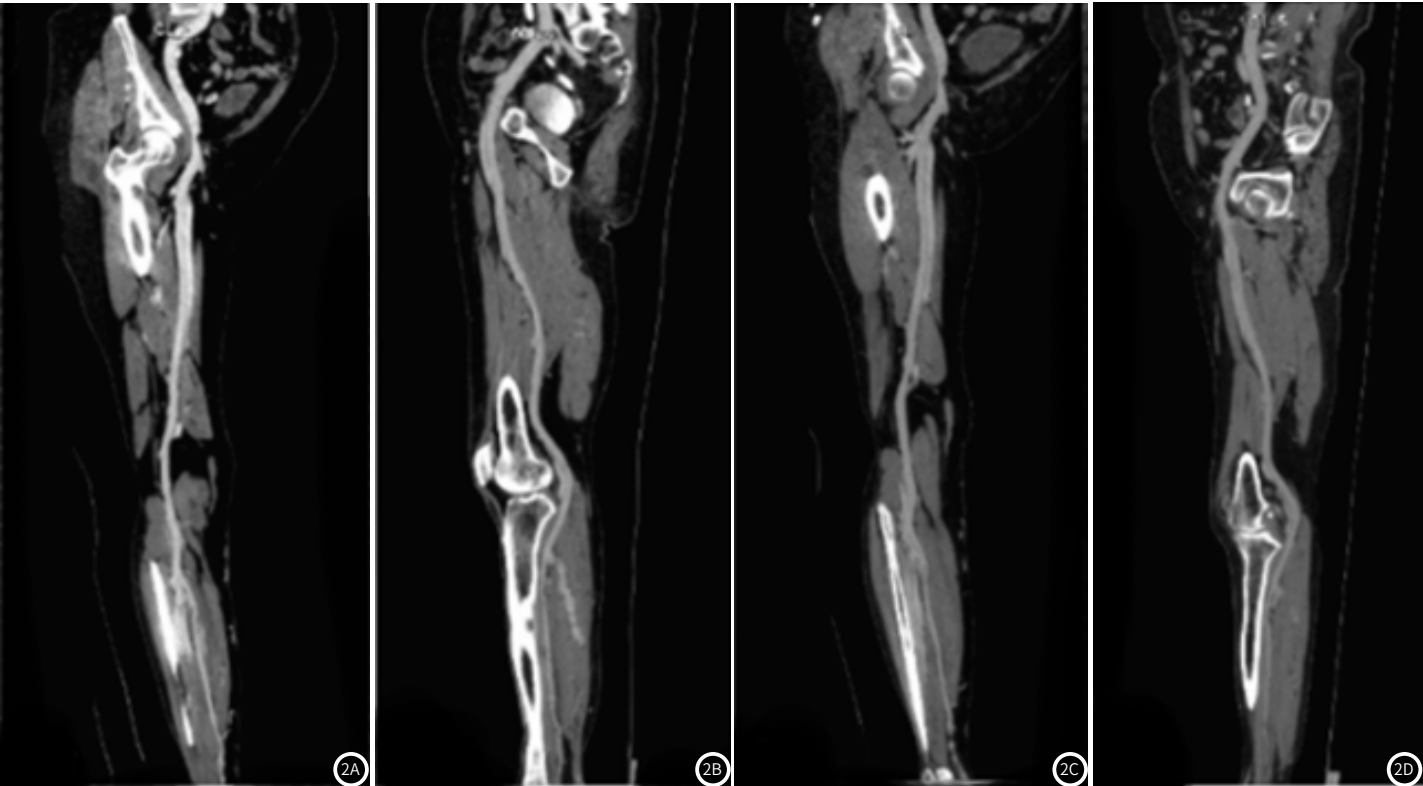


图2 女，69岁，既往肺栓塞。图2A~2D分别为下肢静脉VMI+40keV、VMI+50keV、VMI+60keV及线性融合图像的MPR图像，示下肢静脉对比度依次降低，内未见血栓形成。

CNR值在线性融合与VMI+40keV及线性融合与VMI+50keV间存在统计学差异，其余任意两组间的CNR均不存在统计学差异。

四组图像的主观质量评价(表4)存在统计学差异( $H=14.097$ ,  $P=0.003$ ), 其中单能谱图像的评分均高于线性融合图像的评分, VMI+40 keV的主观评分( $2.62\pm0.49$ )最高。线性融合图像及单能谱图像见图2。

表3 腘静脉水平图像质量客观评价指标

组别	CT值(HU)	CNR	SNR
40keV	204.63±56.40	7.72±4.72	12.96±6.62
50keV	151.07±37.10	7.26±4.93	13.70±7.85
60keV	114.79±24.62	7.12±8.47	15.27±15.81
线性融合	97.41±20.20	4.33±2.92	11.28±4.81
H	116.455	22.362	3.372
P	0.000	0.000	0.338

表4 下肢CTV图像质量主观评分

组别	40 keV	50 keV	60 keV	线性融合	H	P
主观评分	2.62±0.49	2.53±0.50	2.36±0.48	2.30±0.46	14.097	0.003

3 讨论

间接法CTV是通过肘静脉注射对比剂，操作简单且不受患者下肢肿胀的影响，还可以同时观察双侧静脉，不过其会受患者自身血液循环情况影响较大，且对比剂到达静脉时已被稀释，因此静脉对比度较差，可能会造成血栓的误诊及漏诊。而虚拟单能谱图像是从双能量扫描中生成的，描述的是物质在单光子能量下的CT图像，可以消除线束硬化伪影，获得更加准确的物质信息。Bongers等<sup>[4]</sup>在使用第二代双能CT对血管模型进行扫描时发现，与单能谱CT相比，虚拟单能谱图像和碘

图上的血栓有着更高的对比度和CNR，更有助于DVT的诊断。传统的虚拟单能谱成像选择低能量成像时，在图像对比度提高的同时，图像噪声也会明显增加，使得图像的CNR降低<sup>[5]</sup>，而第三代双源CT的VMI+技术，采用了新的算法，结合了传统虚拟单能谱成像中低光子能量图像的高对比度和高光子能量图像的低噪声，最终可以提高CNR值，明显改善了图像的质量<sup>[6-8]</sup>。研究发现，40~70keV之间的单能谱图像对比度最高<sup>[9-10]</sup>，因此，本研究只重建了40、50、60keV的三组较低能量的单能谱图像，结果显示，VMI+40keV图像上腘静脉的CT值及CNR值均明显高于线性融合图像上的CT值及CNR值，这也证实了低能量的VMI+图像可以明显提高图像质量。

本研究结果显示，下肢CTV对诊断DVT有较高的敏感性，CTV与US对诊断血栓的一致性一般，这同之前的研究结果基本一致<sup>[11-12]</sup>，而在盆腔静脉及小腿深静脉血栓的显示上，CTV比超声更具优势，在之前的研究中也具有相似的结果<sup>[13]</sup>。小腿深静脉由于管径较细，且与邻近骨骼肌肉关系紧密，使得US对其检出率降低，而CTV远心端静脉对比度相对较低，也会影响到血栓诊断的准确性；股静脉及腘静脉由于管腔较粗，且相对受临近肌肉挤压较轻，因此CTV及US对其内的血栓显示都较好。此外，由于受盆腔肠道气体的影响，US对盆腔静脉的显示较差。

CTPA-CTV联合扫描在一次检查可以同时获取CTPA及下肢CTV图像，避免了患者多次搬动及静脉穿刺，为患者提供了方便。PE及DVT关系密切，联合扫描可以同时发现这两种病变，为临床做出及时有效的治疗方案提供了重要参考<sup>[14]</sup>。同时，联合扫描还可以显示胸腹部的静脉血栓及其他病变，帮助分析血栓形成的原因，提高了诊断价值<sup>[15-17]</sup>。

但本研究仍存在一些不足，首先，病例数量较少，尤其



是有超声对照的病例数,因此结果可能存在一定的偏倚;第二,CTV和超声检查非同时完成,因此血栓可能会随着时间的进展发生变化,对结果产生一定的影响;第三,由于联合扫描使用的对比剂较单独CTPA检查明显增多,且注射速率加快,因此上腔静脉对比度较单独CTPA检查时的明显增高,存在一定的伪影。严由伦等<sup>[18]</sup>使用不同的速率分期注射对比剂,既保证了肺动脉及下肢静脉良好的对比度,又减少了上腔静脉的伪影,在接下来的研究中将进一步改进扫描方案,以获得最优的图像质量。

综上所述,双源双能量虚拟单能谱成像技术能够提高下肢CTV的图像质量,并且对深静脉血栓有较高的诊断价值,可以作为血栓检查的优选方法。

## 参考文献

- [1] 彭碧荣,周萍丽,徐佳.直接法及间接法在下肢CT静脉成像中的应用比较[J].武汉大学学报(医学版),2017,38(1):65-69.
- [2] Kelly A M, Patel S, Carlos R C, et al. Multidetector row CT pulmonary angiography and indirect venography for the diagnosis of venous thromboembolic disease in intensive care unit patients[J]. Acad Radiol, 2006, 13(4): 486-495.
- [3] 周笑莹.双源CT在肺动脉联合下肢静脉成像中的应用研究[D].太原:山西医科大学,2019.
- [4] Bongers M N, Schabel C, Krauss B, et al. Noise-optimized virtual monoenergetic images and iodine maps for the detection of venous thrombosis in second-generation dual-energy CT (DECT): an ex vivo phantom study[J]. Eur Radiol, 2015, 25(6): 1655-1664.
- [5] Apfaltrer P, Sudarski S, Scheider D, et al. Value of monoenergetic low-kV dual energy CT datasets for improved image quality of CT pulmonary angiography[J]. Eur J Radiol, 2014, 83(2): 322-328.
- [6] Wichmann J L, Gillott M R, De Cecco C N, et al. Dual-energy computed tomography angiography of the lower extremity runoff: Impact of noise-optimized virtual monochromatic imaging on image quality and diagnostic accuracy[J]. Invest Radiol, 2016, 51(2): 139-146.
- [7] Beeres M, Trommer J, Frellesen C, et al. Evaluation of different keV-settings in dual-energy CT angiography of the aorta using advanced image-based virtual monoenergetic imaging[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2016, 32(1): 137-144.
- [8] De Cecco C N, Caruso D, Schoepf U J, et al. A noise-optimized virtual monoenergetic reconstruction algorithm improves the diagnostic accuracy of late hepatic arterial phase dual-energy CT for the detection of hypervascular liver lesions[J]. Eur Radiol, 2018, 28(8): 3393-3404.
- [9] Machida H, Tanaka I, Fukui R, et al. Dual-energy spectral CT: Various clinical vascular applications[J]. Radiographics, 2016, 36(4): 1215-1232.
- [10] Reynoso E, Rodriguez-Granillo G A, Capunay C, et al. Spectral signal density of carotid plaque using dual-energy computed tomography[J]. J Neuroimaging, 2017, 27(5): 511-516.
- [11] 李文智, 罗林, 杨昆良, 等. 间接CTV与超声在下腔静脉、髂静脉及下肢深静脉血栓中的对照研究[J]. 实用放射学杂志, 2015, 31(12): 2003-2006.
- [12] 赵娅莉, 刘正华, 袁会军, 等. 多层螺旋CT静脉成像技术在下肢静脉血栓性疾病中的临床应用[J]. 实用放射学杂志, 2014, 30(8): 1380-1382, 1391.
- [13] 王军委, 成新玲, 高剑波, 等. 320排CT血管造影和超声诊断下肢深静脉血栓价值比较[J]. 实用放射学杂志, 2016, 32(10): 1578-1581.
- [14] 李文智, 罗林, 杨昆良, 等. CT肺动脉成像联合下肢静脉成像评估肺动脉栓塞与下肢深静脉血栓的相关性[J]. 中国医学影像技术, 2016, 32(4): 521-525.
- [15] 杨春霞, 王书智, 吴刚, 等. CT血管成像在诊断下肢深静脉血栓形成机械性阻塞原因中的作用[J]. 中华放射学杂志, 2015, 49(8): 610-614.
- [16] Kalva S P, Jagannathan J P, Hahn P F, et al. Venous thromboembolism: indirect CT venography during CT pulmonary angiography—should the pelvis be imaged[J]. Radiology, 2008, 246(2): 605-611.
- [17] Kulkarni N M, Sahani D V, Desai G S, et al. Indirect computed tomography venography of the lower extremities using single-source dual-energy computed tomography: advantage of low-kiloelectron volt monochromatic images[J]. J Vasc Interv Radiol, 2012, 23(7): 879-886.
- [18] 严由伦, 李荣, 姜永宏, 等. 螺旋CT在肺动脉及下肢静脉联合检查中的成像方法[J]. 实用放射学杂志, 2012, 28(5): 775-779.

(收稿日期: 2019-01-01)