

## ·血管介入 Vascular intervention·

能谱 CT 最佳单能量成像技术降低下肢动脉  
成像对比剂用量的可行性

魏恒乐, 彭新桂, 陆照璇, 赵国峰, 邓 钢

**【摘要】 目的** 探讨能谱 CT 最佳单能量成像技术在下肢动脉成像中个体化降低对比剂用量的可行性。**方法** 前瞻性连续收集下肢 CTA 检查患者 75 例,按扫描方式及对比剂用量随机分为传统 CT 常规剂量组、能谱 CT 常规剂量组及能谱 CT 低剂量组。传统 CT 组、能谱常规剂量组对比剂用量为 2 ml/kg,注射速率为 3.5 ml/s,扫描方式、重建方法前者采用 120 kVp、滤波反投影(FBP)技术,后者采用能谱模式、50%自适应统计迭代重建(ASiR)技术;能谱低剂量组对比剂用量、注射速率均降低 20%,采用能谱模式、50%ASiR 技术。检测 3 组图像靶血管 CT 值,并记录对比噪声比(CNR)、背景噪声(BN)、剂量长度乘积(DLP)、有效辐射剂量(ED)、摄碘量及注射速率,采用单因素方差分析结合 Bonferroni 法进行差异性检验。采用 Kruskal-Wallis 检验对 3 组图像质量主观评分进行对比分析。**结果** 本研究纳入 60 例患者,每组 20 例。能谱常规剂量组图像有着最佳 CT 值、CNR、BN( $P<0.01$ ),但 BN 与能谱低剂量组间差异无统计学意义( $P>0.05$ );能谱低剂量组 CT 值、CNR 除胫前动脉( $P=0.162$ ,  $P=0.376$ )外,均高于传统 CT 组( $P<0.05$ )。两能谱组 ED 均显著低于传统 CT 组( $P<0.01$ ),但两能谱组间差异无统计学意义( $P>0.05$ )。能谱低剂量组摄碘量、注射速率均显著低于能谱常规剂量组、传统 CT 组( $P<0.01$ )。医师 1、2 对 3 组图像主观评分分别为 82 分、95 分、90 分和 80 分、96 分、89 分,差异有统计学意义( $H=14.954$ ,  $P<0.01$ ;  $H=17.726$ ,  $P<0.01$ ),能谱常规剂量组有最佳图像质量,能谱低剂量组图像质量优于传统 CT 组( $P<0.05$ )。**结论** 能谱 CT 最佳单能量成像与传统螺旋 CT 相比,可提供更好的 CNR 及图像质量,在保证下肢动脉成像临床诊断的基础上明显降低辐射剂量,同时个性化减少对比剂摄入量。

**【关键词】** 下肢动脉硬化闭塞症; 对比剂; 宝石能谱成像

中图分类号:R543.5 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2017)-11-0983-05

**Application of gemstone optimal monochromatic imaging technique in reducing the amount of contrast agent for lower extremity angiography: a clinical feasibility study** WEI Hengle, PENG Xingui, LU Zhaoxuan, ZHAO Guofeng, DENG Gang. Department of Interventional Radiology and Vascular Surgery, Affiliated Zhongda Hospital of Southeast University, Nanjing, Jiangsu Province 210009, China

Corresponding author: DENG Gang, E-mail: dmm1996@163.com

**【Abstract】 Objective** To investigate the clinical feasibility of using gemstone spectral image (GSI) technique to reduce the individual dose of contrast agent in performing lower extremity angiography. **Methods** Among the consecutive 75 patients receiving lower extremity CTA examination, 60 patients were enrolled in this study. According to the scanning method and contrast dosage, the 60 patients were prospectively and randomly divided into the conventional CT routine-dose group ( $n=20$ ), GSI routine-dose group ( $n=20$ ) and GSI low-dose group ( $n=20$ ). In the conventional CT routine-dose group and GSI routine-dose group, the dosage of contrast medium was 2 ml/kg and the injection rate was 3.5 ml/s. Scanning with 120 kVp and reconstruction with filter back projection (FBP) technology were used in the conventional CT routine-dose group, while scanning with spectrum mode and reconstruction with 50% adaptive statistical iterative reconstruction (ASiR) technology were used in the GSI routine-dose group. In the GSI low-dose group, the

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2017.11.005

作者单位: 210009 南京 东南大学(魏恒乐);东南大学附属中大医院介入与血管外科(魏恒乐、陆照璇、赵国峰、邓 钢)、放射科(彭新桂)

通信作者: 邓 钢 E-mail: dmm1996@163.com

dosage of contrast medium and the injection rate were 1.6 ml/kg and 2.8 ml/s respectively, and scanning with spectrum mode and reconstruction with 50% ASiR technology were adopted. The target vessel CT values of three sets of images were determined, the contrast-to-noise ratio (CNR), the background noise (BN), the dose length product (DLP), the effective dose (ED), the iodine intake dose and the injection rate were calculated and compared between each other among the three groups. Single factor variance analysis and Bonferroni correction method were used to statistically analyze the results. By using Kruskal-Wallis test, the subjective scores of three sets of images were compared between each other among the three groups. **Results** According to exclusion criteria, 60 patients were finally enrolled in this study. The images of GSI routine-dose group had the best CT value, CNR and BN ( $P<0.01$ ), but there was no statistically significant difference in BN between GSI routine-dose group and GSI low-dose group ( $P>0.05$ ). Both the CT value and CNR, except anterior tibial artery ( $P=0.162$  and  $P=0.376$  respectively), in the GSI low-dose group were higher than those in the conventional CT routine-dose group ( $P<0.05$ ). The ED values of both GSI groups were lower than that of the conventional CT routine-dose group ( $P<0.01$ ), although no statistically significant difference in ED value existed between the two GSI groups ( $P>0.05$ ). The iodine intake dose and injection rate of the GSI low-dose group were strikingly lower than those of the conventional CT routine-dose group and the GSI low-dose group (both  $P<0.01$ ). The subjective scores of three sets of images evaluated by two physicians were 82, 95, 90 points and 80, 96, 89 points respectively, the differences were statistically significant ( $H=14.954$ ,  $P<0.01$ ;  $H=17.726$ ,  $P<0.01$ ). GSI routine-dose group had the best image quality, and the image quality of GSI low-dose group was superior to that of conventional CT routine-dose group ( $P<0.05$ ). **Conclusion** Compared with conventional spiral CT scanning, gemstone optimal monochromatic imaging technique can obtain more optimal CNR and image quality, meanwhile, the radiation dose can be remarkably reduced while the imaging quality of lower extremity angiography can meet the requirements of making clinical diagnosis, moreover, individual intake of iodine can be reduced. (J Intervent Radiol, 2017, 26: 983-987)

【Key words】 lower limb arteriosclerosis obliterans; contrast agent; gemstone spectral imaging

下肢动脉硬化闭塞症(peripheral arterial occlusive disease, PAOD)是动脉粥样硬化引起动脉管腔狭窄/闭塞,导致下肢发凉麻木、间歇性跛行、静息痛、坏疽等缺血症状的慢性血管疾病,其危险因素有吸烟、糖尿病、高血压病及高龄等<sup>[1]</sup>。CTA作为一种无创、便捷、精准的检查方法,广泛用于PAOD检查<sup>[2]</sup>,但应用范围涉及多节段,常累及末梢血管,对比剂用量、注射速率大,有致癌辐射、对比剂肾病等潜在风险<sup>[3-4]</sup>。能谱CT不仅能获得101组单能量图像,同时降低辐射剂量,实现低对比剂、低辐射量、多参数成像。本研究探讨在不影响图像质量及临床诊断前提下,能谱CT最佳单能量成像技术用于个性化减少下肢动脉成像中对比剂用量的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

前瞻性连续收集东南大学附属中大医院2016年3月至11月收治的下肢CTA检查患者。按扫描方式及对比剂用量,随机分为传统CT常规剂量组、能谱CT常规剂量组及能谱CT低剂量组。排除标准:①对比剂过敏;②肾小球滤过率 $<45$  ml/min<sup>[5]</sup>;

③下肢动脉长段闭塞或支架植入术后;④对比剂最大用量(MRCD) $>5$  ml $\times$ 体重/血清肌酐<sup>[6]</sup>;⑤靶血管处瘤样扩张;⑥不能配合检查。所有受检者均签署知情同意书。

### 1.2 仪器与方法

采用Discovery 750 HD型宝石能谱CT(美国通用公司)进行检查,能谱常规剂量组、能谱低剂量组均用GSI模式,管电压为140 kVp和80 kVp瞬时(0.5 ms)切换,管电流自动模式,采用50%自适应统计迭代重建(ASiR)技术重建<sup>[7]</sup>。传统CT组管电压为120 kVp,管电流350 mA,采用滤波反投影(FBP)技术重建,其它扫描参数相同。采用对比剂智能追踪技术,选择肾动脉横断面水平作监测点,延迟扫描为5 s,手动触发阈值为150 HU。传统CT组、能谱常规剂量组对比剂碘克沙醇(320 mg I/ml)用量为2 ml/kg,以3.5 ml/s速率注入右肘前静脉,并相同速率注入0.9%氯化钠溶液40 ml;能谱低剂量组对比剂用量、注射速率均降低20%,分别为1.6 ml/kg、2.8 ml/s。有研究证实,能谱CT最佳单能量图像与等量对比剂传统CT图像相比,CT值及最佳对比噪声比(CNR)显著升高<sup>[8]</sup>。

### 1.3 图像后处理

将相关数据传输至 AW461 工作站(美国通用公司),在混杂能量和最佳单能量基础上,对 3 组数据分别进行最大密度投影(MIP)、多平面重建(MPR)、容积再现(VR)等后处理。统计发现最佳 keV 范围为 54~65。

### 1.4 图像客观分析

由同 1 名医师分别在髂总动脉、股浅动脉、腘动脉、胫前动脉及其同层肌肉组织设置感兴趣区域(ROI),记录其 CT 值及最佳 CNR。肌肉组织 CT 值标准差作为背景噪声(BN), $CNR = (CT_{\text{血管}} - CT_{\text{肌肉}}) / BN$ 。记录 3 组患者摄碘量及有效辐射剂量(ED),摄碘量=体重(kg)×对比剂用量(kg/ml)×0.32 g/ml,ED=k(有效转换因子)×剂量长度乘积(DLP),本研究取  $k = 0.0059 \text{ mSv} \cdot \text{mGy}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

### 1.5 图像主观分析

由 2 名高年资影像医师通过盲法对图像质量以 5 分法评分。分析图像质量:①动脉边缘光滑、锐利程度;②显示管腔狭窄及细小分支能力;③动脉内 CT 值高低;④血管周围伪影。评分标准:5 分优秀,4 分良好,3 分一般,2 分较差,1 分差。对各靶血管狭窄程度是否 >50% 或闭塞进行主观分析,多节段狭窄病变按最高级别分类。

### 1.6 统计学方法

采用 SPSS 19.0 软件作数据分析,性别、年龄、身高、体重及体质指数(BMI)比较用单因素方差分析,CT 值、CNR、BN、摄碘量及 ED 用单因素方差分析结合 Bonferroni 法比较, $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。图像质量评分用 Kruskal-wallis 检验比较,Kappa 检验评价 2 名医师评分一致性。

## 2 结果

### 2.1 一般资料分析

最终纳入 60 例患者,每组 20 例。2 例心功能 III 级,余心功能分级均 ≤ II 级;糖尿病足 51 例,下肢血管畸形 5 例,血管闭塞性脉管炎 4 例。3 组患者年龄、性别、身高、体重及 BMI 差异均无统计学意义( $P > 0.05$ )(表 1)。

### 2.2 图像客观分析

3 组图像中能谱常规剂量组具有最优 CT 值、CNR、BN( $P < 0.01$ ),但 BN 与能谱低剂量组间差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。能谱低剂量组髂总动脉、股浅动脉、腘动脉 CT 值、CNR 均显著优于传统 CT 组( $P < 0.05$ ),但胫前动脉 CT 值、CNR 与传统 CT 组间差异无统计学意义( $P = 0.162, P = 0.376$ )(表 2)。

表 1 患者一般资料、摄碘量、辐射剂量比较

参数	传统 CT 组	能谱常规剂量组	能谱低剂量组	F 值	P 值
男:女/n	12:8	13:7	12:8	—	0.93
年龄/岁	66.4±9.9	66.6±8.1	66.9±9.1	0.08	0.92
身高/cm	165.4±6.0	169.5±7.6	167.0±7.8	1.43	0.25
体重/kg	62.2±5.7	64.1±8.0	62.8±8.8	0.44	0.67
BMI/(kg/m <sup>2</sup> )	22.7±1.8	22.3±2.2	22.4±1.9	0.33	0.72
摄碘量/g	39.8±3.7	41.0±5.1	32.1±4.5	25.64	<0.01
DLP/(mGy/cm)	5 904.0±153.5	3 603.6±187.6	3 587.7±290.7	733.42	<0.01
ED/mSv	34.8±0.9	21.2±1.1	21.2±1.7	733.42	<0.01

表 2 3 组患者图像客观分析比较

检测参数	传统 CT 组	能谱常规剂量组	能谱低剂量组	F 值	P 值
髂总动脉					
CT 值/HU	375.0±50.0	484.0±55.0	441.0±56.0	23.687	<0.01
CNR	30.1±7.1	61.5±10.3	42.5±14.4	39.309	<0.01
BN	10.1±1.2	6.9±1.5	7.4±1.3	30.092	<0.01
股浅动脉					
CT 值/HU	342.0±55.0	443.0±50.0	408.0±53.0	21.162	<0.01
CNR	36.0±5.5	60.4±11.5	41.6±9.9	41.337	<0.01
BN	9.0±1.1	6.8±1.8	7.2±1.6	12.538	<0.01
腘动脉					
CT 值/HU	321.0±26.0	437.0±44.0	362.0±57.0	38.906	<0.01
CNR	32.8±7.3	59.1±12.7	48.9±13.2	25.153	<0.01
BN	9.2±1.3	7.1±1.5	7.5±1.2	13.800	<0.01
胫前动脉					
CT 值/HU	241.0±79.0	315.0±30.0	267.0±28.0	12.156	<0.01
CNR	26.7±7.2	50.1±10.3	31.5±7.5	31.767	<0.01
BN	9.4±1.4	7.0±1.7	7.5±1.1	23.014	<0.01



### 2.3 摄碘量及辐射剂量分析

能谱低剂量组摄碘量最低,与传统 CT 组、能谱常规剂量组相比差异均有显著统计学意义( $P<0.01$ )。能谱常规剂量组、能谱低剂量组 ED 分别与传统 CT 组相比差异均有显著统计学意义( $P<0.01$ ),但两能谱组间差异无统计学意义( $P>0.05$ )(表 1)。

### 2.4 图像主观评价

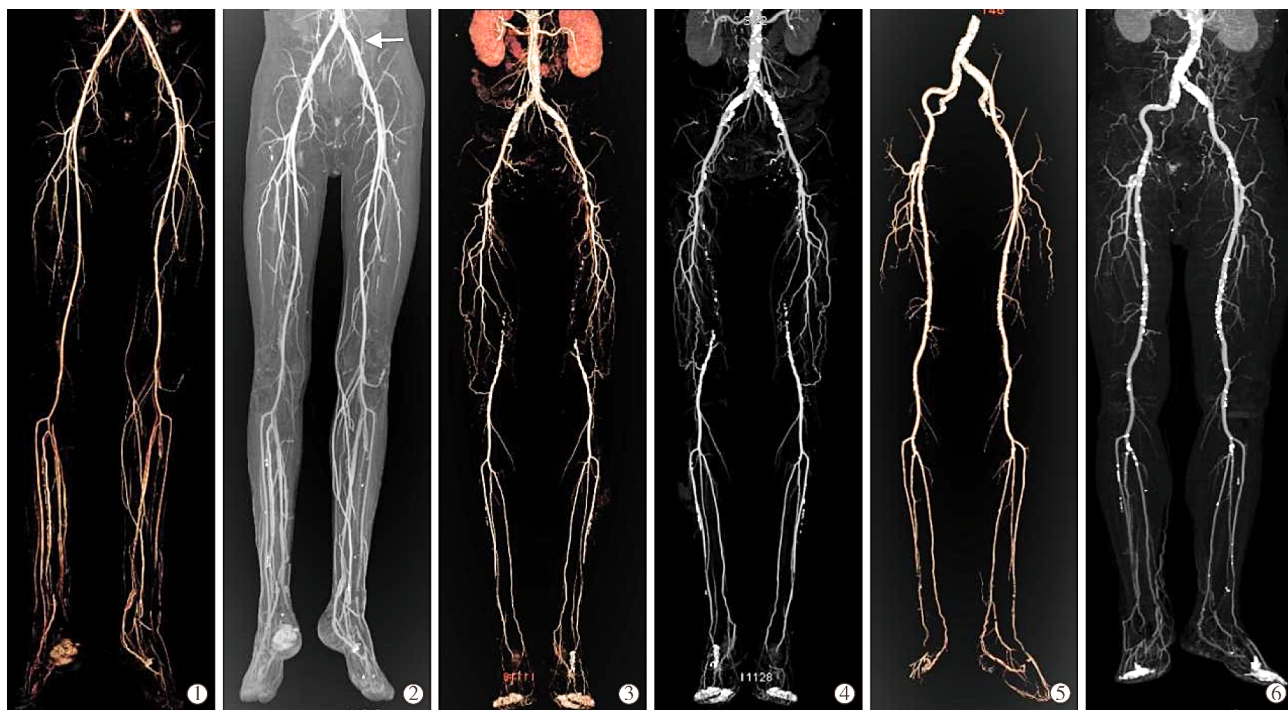
医师 1、2 分别对 60 例共 720 段靶血管是否狭窄或闭塞作主观评价,差异无统计学意义( $P>0.05$ )(表 3),3 组图像质量评分结果经 Kruskal-Wallis 检验,差异有统计学意义( $H=14.954, P<0.01; H=17.726, P<0.01$ )(表 4);Nemenyi 法检验传统 CT 组与能谱低剂量组图像质量<sup>[9]</sup>,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。Kappa 检验显示 2 名医师对 3 组图像质量评估一致性较好( $K=0.872, P<0.01$ )。能谱常规剂量组有最佳图像质量,能谱低剂量组图像质量优于传统 CT 组,且完全满足临床诊断需要(图 1)。

表 3 2 名医师对各靶血管狭窄程度的主观评价 支

分组	靶血管数	医师 1		医师 2	
		狭窄 (≥50%)闭塞		狭窄 (≥50%)闭塞	
传统 CT 常规剂量组 (n=20)					
髂总动脉	40	12	3	13	3
股浅动脉	40	21	4	21	4
腘动脉	40	9	2	9	2
膝下动脉	120	59	12	60	12
能谱 CT 常规剂量组 (n=20)					
髂总动脉	40	9	2	8	2
股浅动脉	40	25	5	25	5
腘动脉	40	7	1	6	1
膝下动脉	120	76	15	77	15
能谱 CT 低剂量组 (n=20)					
髂总动脉	40	7	1	7	1
股浅动脉	40	12	3	12	3
腘动脉	40	8	2	8	2
膝下动脉	120	57	10	58	10

表 4 2 名医师对图像质量的主观评分

分组	医师 1					总分	医师 2					总分
	5 分	4 分	3 分	2 分	1 分		5 分	4 分	3 分	2 分	1 分	
传统 CT 常规剂量组( $n=20$ )	3	16	1	0	0	82	2	16	2	0	0	80
能谱 CT 常规剂量组( $n=20$ )	15	5	0	0	0	95	16	4	0	0	0	96
能谱 CT 低剂量组( $n=20$ )	10	10	0	0	0	90	9	11	0	0	0	89



①②传统 CT 组 VR、MIP 图像示下肢动脉管腔清晰,膝关节以下小血管分层欠清晰、管壁稍毛糙,背景噪声较大,左髂总动脉钙化灶与血管壁分界欠清;③④能谱常规剂量组 VR、MIP 图像,双侧股浅动脉闭塞,周围侧支循环及细小分支显影清晰、层次明显,边缘光滑锐利,主动脉及下肢各动脉钙化灶与血管壁分界清晰;⑤⑥能谱低剂量组 VR、MIP 图像,血管边缘光滑、管腔显影良好,细小血管分层清晰,与周围组织有良好对比度,钙化灶边界清晰

图 1 3 组图像质量主观评价

### 3 讨论

能谱 CT 瞬时变能高压发射器可在 0.5 ms 内高速完成高低能量切换,扫描后得到的混合能量通过基物质密度数据可重建出 40~140 keV 范围内 101 个单能量图像。单能量图像在不同能量水平具有不同特征,低能量水平时 X 线穿透力低,图像上组织对比增强,但噪声增高,高能量水平时则相反。最佳单能量图像是 ROI 和背景区域 CNR 最大而噪声值最低图像,重建出最佳 CNR 图像可有效减少对比剂用量、改善图像质量<sup>[10-11]</sup>。

CTA 图像质量主要与扫描条件、对比剂用量、注射速率及触发扫描时机等因素有关。本研究采用较低的对比剂用量及注射速率,旨在既不缩减对比剂注射时间,又能降低注射压力过大所致对比剂外渗发生率。监测肾动脉平面 CT 值并手动触发扫描,可减少对比剂使用,同时使个体化扫描时间更加准确。此外,注入 0.9%氯化钠溶液主要是维持血管内压力,延长对比剂浓度达峰后平台期时间。本研究结果显示能谱常规剂量组 CT 值、CNR 明显高于传统 CT 组,且 BN 也明显低于混合能量模式,与部分研究结果相符<sup>[12-13]</sup>;能谱低剂量组在减少对比剂用量 20%基础上,CT 值、CNR、BN 均优于传统 CT 组,胫前动脉 CT 值、CNR 差异虽无统计学意义,但均值明显高于传统 CT 组,且满足影像诊断要求,与主观评价结果一致。

临床上 PAOD 患者常伴有糖尿病、高血压等慢性疾病,尤其是对肾功能不全患者,须严格控制对比剂使用。本研究采用低剂量能谱扫描方案,一方面降低对比剂用量、辐射剂量及注射速率,减少对比剂肾病等并发症发生率,另一方面提高下肢动脉显影能力,为术前血管评估及术后复查提供更准确的影像学资料,尤其是对按照血管灌注区段(angiosome)概念评估、旨在保肢及促进创面愈合的足部破损区域靶血管进行开通,更具临床意义<sup>[14]</sup>。

本研究局限性:①仅采用 50%ASiR 重建(不同百分比 ASiR 重建的图像效果不一),未对其它权重系数进行研究;②未对能谱 CT 低剂量组结合 FBP 技术重建的下肢动脉图像质量进行对照分析;③未采用能谱 CT 金属伪影消除(MAR)技术,该技术可有效抑制常见金属伪影及其它射线硬化伪影,对支架植入患者评估下肢动脉管腔通畅情况有巨大应用前景。

综上,能谱 CT 最佳单能量成像技术在保证图像质量前提下,可明显降低对比剂用量、注射速率,

同时辐射剂量也有所减低,实现了“低对比剂”、“低辐射剂量”影像学检查。

### [参考文献]

- [1] Aronow WS. Peripheral arterial disease of the lower extremities [J]. Arch Med Sci, 2012, 8: 375-388.
- [2] 尤国庆,耿云平,任悠悠. 双源 64 排螺旋 CT 血管成像对下肢动脉狭窄及闭塞性病变的诊断价值[J]. 实用医学影像杂志, 2014, 15: 276-279.
- [3] Berrington de Gonzalez A, Darby S. Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries [J]. Lancet, 2004, 363: 345-351.
- [4] 汤志奇,龚 婷. 对比剂肾病的早期诊断新进展[J]. 临床肾脏病杂志, 2016, 16: 317-319.
- [5] Utsunomiya D, Yanaga Y, Awai K, et al. Baseline incidence and severity of renal insufficiency evaluated by estimated glomerular filtration rates in patients scheduled for contrast-enhanced CT[J]. Acta Radiol, 2011, 52: 581-586.
- [6] Freeman RV, O'donnell M, Share D, et al. Nephropathy requiring dialysis after percutaneous coronary intervention and the critical role of an adjusted contrast dose[J]. Am J Cardiol, 2002, 90: 1068-1073.
- [7] Singh S, Kalra MK, Hsieh J, et al. Abdominal CT: comparison of adaptive statistical iterative and filtered back projection reconstruction techniques[J]. Radiology, 2010, 257: 373-383.
- [8] Sudarski S, Apfaltrer P, Nance JW Jr, et al. Optimization of keV-settings in abdominal and lower extremity dual-source dual-energy CT angiography determined with virtual monoenergetic imaging[J]. Eur J Radiol, 2013, 82: E574-E581.
- [9] 于长春. 秩和检验-Kruskal-Wallis 法和 Nemenyi 法在科室医疗质量动态监测中的应用[J]. 中国医院统计, 2009, 16: 51-53.
- [10] Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT[J]. Radiology, 2011, 259: 257-262.
- [11] Zhang D, Li X, Liu B. Objective characterization of GE discovery CT750 HD scanner: gemstone spectral imaging mode[J]. Med Phys, 2011, 38: 1178-1188.
- [12] 夏 巍,宋旭升,尹肖睿,等. 宝石 CT 能谱最佳单能量图像在下肢动脉造影中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2014, 22: 842-845.
- [13] 孙奕波,李 铭,毛定彪,等. 下肢动脉病变能谱 CT 血管成像图像后处理中最佳单能量图像的选择[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47: 269-272.
- [14] 纪东华,张 涛,李 城,等. Angiosome 指导下膝下动脉成形术治疗合并糖尿病的 Fontaine IV 级下肢动脉缺血[J]. 中国微外科杂志, 2013, 13: 789-792.

(收稿日期:2017-03-05)

(本文编辑:边 佑)