

·临床研究 Clinical research·

能谱 CT 最佳单能量图提高下肢动脉造影成像质量研究

李英豪, 彭新桂, 金 晖, 赵国峰, 丁蓉蓉, 魏恒乐, 陆照璇, 邓 钢

【摘要】 目的 探讨能谱 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。**方法** 前瞻性连续选取符合纳入标准的 34 例下肢动脉硬化闭塞症(LEAOD)患者,其中 17 例为研究组,接受宝石 CT 能谱模式扫描检查;另 17 例为对照组,接受 64 排螺旋 CT 扫描检查。通过计算获得研究组扫描图像中最佳单能量图,分别测量两组图像中髂总动脉、股浅动脉、腘动脉及胫前动脉中段平面 CT 值及背景噪声(BN)值,计算出相应对比噪声比(CNR),以此对图像质量进行客观评价;同时 2 名资深影像诊断医师采用双盲法对两组图像质量作 5 分制主观评分。**结果** 客观评价显示,研究组最佳单能量图能量水平集中在 58~67 KeV,图像中髂总动脉、股浅动脉、腘动脉及胫前动脉 CT 值及 CNR 均明显高于对照组,其中 CT 值分别提高 17.6%、12.2%、12.3%、35.2%,差异有统计学意义($t=2.818, 1.636, 1.119, 2.907, P<0.01$);CNR 分别提高 44.3%、40.8%、59.5%、105.8%,差异有统计学意义($t=3.729, 4.686, 4.294, 5.213, P<0.01$)。主观评价显示,研究组、对照组图像质量评分在医师 1 分别为 82 分、69 分,医师 2 分别为 81 分、68 分,两组差异均有统计学意义($P<0.01$);2 名医师对图像质量评估一致性较好($K=0.85$)。**结论** 下肢动脉 CTA 检查中,宝石能谱 CT 最佳单能量图显示狭窄段血管、远端小血管及去除硬化伪影能力较 64 排螺旋 CT 有明显提高,对下肢动脉腔内成形术术前和术后评估具有重要临床意义。

【关键词】 能谱 CT; 最佳单能量图; 下肢动脉造影; 下肢动脉硬化闭塞症; 对比剂

中图分类号:R642.6 文献标志码:B 文章编号:1008-794X(2016)-11-0997-05

The improvement of imaging quality of lower extremity angiography with optimal single energy image of spectral CT LI Ying-hao, PENG Xin-gui, JIN Hui, ZHAO Guo-feng, DING Rong-rong, WEI Heng-le, LU Zhao-xuan, 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 application of spectral CT optimal single energy image in improving the imaging quality of lower extremity angiography. **Methods** Thirty-four patients with lower extremity atherosclerotic occlusive disease, which met the inclusion criteria, were enrolled in this prospective study, and the patients were randomly divided into the study group ($n=17$) and the control group ($n=17$). Gemstone spectral CT scan was employed for the patients of the study group, while 64-slice spiral CT scan was adopted for the patients of the control group. Through calculation, the optimal single energy images in the study group were obtained. The CT values, background noise (BN) values at the middle planes of the iliac artery, femoral artery, popliteal artery and anterior tibial artery in the two groups were separately measured, and the corresponding contrast noise ratios (CNR) were calculated, based on which the image quality was objectively evaluated. Using double-blind method the image quality was subjectively evaluated by two senior imaging diagnostic radiologists with 5-point grading method. **Results** Objective evaluation showed that in the study group the optimal single energy was 58-67 KeV. The CT values and CNR of iliac artery, femoral artery, popliteal artery and anterior tibial artery of the study group were obviously higher than those of the

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2016.11.017

基金项目: 国家自然科学基金(81171433)、国家自然科学基金青年项目(81501523)、江苏省科技厅面上项目(BK20151423)

作者单位: 210009 南京 东南大学附属中大医院介入与血管外科(李英豪、赵国峰、魏恒乐、陆照璇、邓 钢)、放射科(彭新桂、丁蓉蓉)、内分泌科(金 晖)

通信作者: 邓 钢 E-mail: dmm1996@163.com

control group. Among them, the CT values were increased by 17.6%, 12.2%, 12.3% and 35.2% respectively, the differences were statistically significant ($t=2.818$, $t=1.636$, $t=1.119$ and $t=2.907$ respectively, $P<0.01$). The CNRs were increased by 44.3%, 40.8%, 59.5% and 105.8% respectively, the differences were statistically significant ($t=3.729$, $t=4.686$, $t=4.294$ and $t=5.213$, $P<0.01$). The subjective evaluation results indicated that the image scores of the study group and the control group were 82 points and 69 points respectively measured by one radiologist, which were 81 points and 68 points respectively measured by another radiologist; the differences between the two groups were statistically significant ($P<0.01$). The consistency of assessment between the two radiologists was good ($K=0.85$). **Conclusion** For lower extremity CT angiography, spectral CT optimal single energy image is superior to 64-slice spiral CT in displaying narrowed blood vessels, distal small blood vessels as well as in eliminating hardening artifacts, which is of great clinical significance for preoperative and postoperative assessment of lower extremity endovascular angioplasty. (J Intervent Radiol, 2016, 25: 997-1001)

【Key words】 spectral CT; optimal single energy image; lower extremity angiography; lower extremity atherosclerotic occlusive disease; contrast media

下肢动脉硬化闭塞症(LEAOD)是动脉粥样硬化病变累及下肢动脉并引起慢性动脉闭塞的一种疾病。多排螺旋 CT 作下肢动脉造影是诊断 LEAOD 的一种简便、快捷方法^[1]。然而 LEAOD 患者下肢血管往往伴有严重钙化和狭窄,导致血管结构及远端分支难以清晰显示;此外 CT 射束硬化伪影(BHA)使得多排螺旋 CT 成像诊断准确性受到限制^[2]。与常规多排螺旋 CT 下肢动脉造影相比,宝石能谱 CT 成像(GSI)是在高、低电压瞬时切换扫描条件下实现的功能成像技术,可实现单一 X 线能量成像并减弱 BHA,且可获得 40~140 keV 共 101 组单能量图,调节图像对比噪声比(CNR)可进一步提高成像质量^[3]。本研究分别采用 64 排螺旋 CT 混合能量模式与宝石 CT 能谱模式对 LEAOD 患者作下肢动脉造影检查,比较两种模式下成像质量,探讨能谱 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及对下肢动脉腔内成形术的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究为前瞻性随机对照研究。纳入标准:①年龄 ≥ 18 岁,临床诊断或拟诊断为 LEAOD;②肝功能 Child-Pugh 分级 $\leq B$ 级、慢性肾脏病(CKD)分期 ≤ 3 期;③无含碘对比剂过敏病史。排除标准:① BMI ≥ 25 kg/m²;②不能配合 CT 检查^[4]。连续性选择 2015 年 1 月至 12 月已诊断或拟诊断为 LEAOD 患者共 34 例,随机分为研究组和对照组。研究组中男 11 例,女 6 例;年龄 49~79 岁,平均(61 \pm 10)岁;身高 158~176 cm,平均(165.0 \pm 5.4) cm;体重 55~72 kg,平均(65.0 \pm 8.6) kg。对照组中男 12 例,女 5 例;年龄

47~68 岁,平均(59 \pm 10)岁;身高 154~175 cm,平均(163.0 \pm 5.6) cm;体重 59~69 kg,平均(61.0 \pm 8.1) kg。所有患者 CT 扫描前均签署知情同意书。

1.2 检查方法

研究组患者接受美国通用公司 Discovery CT 750 HD 型宝石能谱 CT 检查,扫描管电压及管电流为自动模式;对照组患者接受德国 Siemens 公司 64 排螺旋 CT 检查,扫描管电压 120 kVp,管电流 350 mA。两组其它扫描参数相同——螺距 1.375:1,球管旋转速度 0.8 s/转,层厚 5 mm;以腹主动脉层面为监测点,设定 150 HU 为监测阈值,进行追踪触发扫描,设置后延时间为 6 s;扫描方向自头侧向足侧扫描;对比剂用碘克沙醇(320 mg I/ml),根据患者体重确定对比剂总量,根据扫描计划确定扫描时间及对比剂注射速度,对比剂总量(ml)=体重(kg) \times 2(ml/kg)。

1.3 图像后处理与分析

将层厚 0.625 mm 原始数据传输至 GE AW461 后处理工作站,研究组图像先由后处理软件根据血管-肌肉最大 CNR 计算最佳单能量图,然后在最佳单能量图上作最大密度投影、多平面重建及三维容积再现等图像后处理及数据测量;对照组直接在原始数据上作最大密度投影、多平面重建及三维容积再现等图像后处理及数据测量。

分别选取髂总动脉、股浅动脉、腘动脉及胫前动脉的中段共 4 个层面图像作客观评价和主观评价。客观评价由 1 名医师设置 1 mm 感兴趣区(ROI),分别位于同一层面血管(ROI_v)和肌肉(ROI_m)中,并避开所有肉眼所能观察到的不均匀密度区域,由软件自动算出两组图像中髂总动脉、股浅动脉、腘

动脉、胫前动脉及其对应平面肌肉的平均 CT 值及背景噪声 (BN), 然后分别计算两组图像 4 个平面 CNR, $CNR = (ROI_v - ROI_m) / BN$ 。主观评价由 2 名资深影像诊断医师采用双盲法对图像质量作 5 分制评分^[5], 两组图像均设置固定且相同窗宽、窗位, 观察内容包括: ①图像清晰度; ②血管远端分支级别; ③显示狭窄段血管能力; ④血管周围伪影程度; ⑤血管信噪比。5 分制评分标准: 5 分为优秀, 4 分为较好, 3 分为一般, 2 分为较差, 1 分为差。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 22.0 软件作统计学分析。两组患者性别比较用卡方检验, 年龄、身高、体重及图像中 CT 值、CNR 比较用独立样本 t 检验, 图像质量主观评分用 Mann-Whitney U 检验, $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。2 名评分医师评估图像质量一致性比较用 Kappa 检验, K 值 > 0.61 为一致性较好, $0.40 \sim 0.61$ 为一致性一般, < 0.40 为一致性较差。

2 结果

两组患者性别、年龄、身高及体重差异均无统计学意义 (表 1)。

表 1 患者基线资料比较

参数	研究组 (n=17)	对照组 (n=17)	t 值	P 值
男 (女) / 例	11 / 6	12 / 5	—	1.00
年龄 / 岁	61 ± 10	59 ± 10	1.47	0.27
身高 / cm	165.0 ± 5.4	163.0 ± 5.6	1.36	0.76
体重 / kg	65.0 ± 8.6	61.0 ± 8.1	0.96	0.85

图像客观评价显示, 研究组最佳单能量图能量水平集中在 58~67 KeV, 4 个层面血管 CT 值和 CNR 均高于对照组——CT 值较对照组分别提高 17.6%、12.2%、12.3%、35.2%, 差异有统计学意义 ($t = 2.818, 1.636, 1.119, 2.907, P < 0.01$); CNR 较对照组分别提高 44.3%、40.8%、59.5%、105.8%, 差异有统计学意义 ($t = 3.729, 4.686, 4.294, 5.213, P < 0.01$)。两组 4 个层面肌肉 CT 值、BN 差异均无统计学意义 ($P > 0.05$) (表 2~5)。

表 2 髂总动脉平面图像客观评价

组别	血管 CT 值/HU	肌肉 CT 值/HU	BN	CNR	最佳 KeV
研究组 (n=17)	442.5 ± 83.1	65.8 ± 12.9	6.3 ± 1.3	60.3 ± 10.5	61~65
对照组 (n=17)	376.2 ± 50.1	66.2 ± 6.3	7.7 ± 2.1	41.8 ± 17.6	
t 值	2.818	-0.108	-2.278	3.729	
P 值	0.008	0.951	0.312	0.001	

表 3 股浅动脉平面图像客观评价

组别	血管 CT 值/HU	肌肉 CT 值/HU	BN	CNR	最佳 KeV
研究组 (n=17)	419.7 ± 102.0	66.8 ± 12.7	6.1 ± 1.6	58.7 ± 11.1	58~65
对照组 (n=17)	374.2 ± 52.3	68.1 ± 8.5	7.2 ± 1.5	41.7 ± 9.9	
t 值	1.636	-0.345	-1.901	4.686	
P 值	0.009	0.732	0.095	<0.001	

表 4 腘动脉平面图像客观评价

组别	血管 CT 值/HU	肌肉 CT 值/HU	BN	CNR	最佳 KeV
研究组 (n=17)	391.6 ± 124.9	66.6 ± 14.6	6.1 ± 1.9	55.2 ± 16.5	59~67
对照组 (n=17)	348.6 ± 97.6	66.7 ± 7.0	7.5 ± 1.6	34.6 ± 10.9	
t 值	1.119	-0.036	-2.236	4.294	
P 值	0.008	0.985	0.135	<0.001	

表 5 胫前动脉平面图像客观评价

组别	血管 CT 值/HU	肌肉 CT 值/HU	BN	CNR	最佳 KeV
研究组 (n=17)	340.6 ± 91.2	69.7 ± 15.6	6.1 ± 1.9	46.5 ± 15.9	59~67
对照组 (n=17)	252.0 ± 86.3	66.1 ± 4.6	7.9 ± 1.7	22.6 ± 10.2	
t 值	2.907	0.992	-2.976	5.213	
P 值	<0.001	0.972	0.088	<0.001	

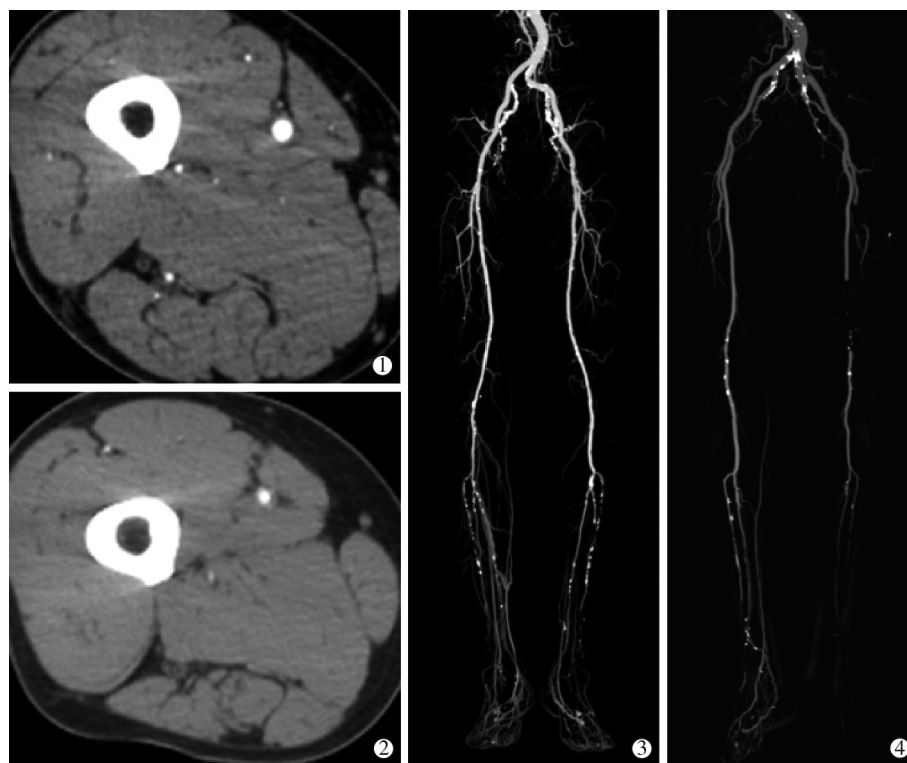
图像主观评价显示, 研究组、对照组图像质量评分在医师 1 分别为 82 分、69 分, 医师 2 分别为 81 分、68 分 (表 6), 研究组图像质量明显优于对照组 (图 1)。Mann-Whitney U 检验结果显示, 两组评分差异均有统计学意义 ($Z = -3.45, -3.22, P < 0.01$)。2 名医师对图像质量评估一致性较好 ($K = 0.85$)。

表 6 两组图像主观评分

组别	医师 1	总分	医师 2	总分
评分	5 4 3 2 1		5 4 3 2 1	
研究组 (n=17)	14 3 0 0 0	82	13 4 0 0 0	81
对照组 (n=17)	4 10 3 0 0	69	4 9 4 0 0	68

3 讨论

LEAOD 是引起下肢远端缺血发冷、营养障碍及溃烂坏死等的一类疾病^[6]。下肢动脉 CTA 诊断 LEAOD 具有较高的准确度和灵敏度^[7], 已成为下肢动脉腔内成形术术前、术后评价常规检查手段。目前临床上采用的多排螺旋 CT, 其球管产生的 X 射线系有一定频谱宽度的多色谱射线, 这种含有不同能量光子的 X 射线穿过人体后, 其低能射线易被吸收, 高能射线易穿过, 射线传播过程中平均能量增高, 射线逐渐变硬^[8], 这种射束硬化效应有时会产生严重 BHA, 影响图像观察及疾病诊断。混合能量 X 线不仅会产生 BHA, 还会对图像重建产生不利影响: ①投影数据与 X 线转换不一致; ②X 线能量衰



研究组 LEAOD 患者男, 62 岁 ①宝石能谱 CT 下肢动脉造影(股浅动脉 CT 值为 476.3 HU)示血管边缘光滑锐利, 血管周围硬化伪影较轻; ②最大密度投影图像示动脉清晰度高, 细小分支显示良好
对照组 LEAOD 患者女, 58 岁: ③64 排螺旋 CT 下肢动脉造影(股浅动脉 CT 值为 398.3 HU)示血管边缘稍模糊, 血管周围硬化伪影较重; ④最大密度投影图像示动脉清晰度欠佳, 细小分支显示一般

图 1 研究组与对照组图像质量对比

减吸收时能量平均致使信息缺失^[9]。仅含有单一能量水平的 X 线穿过物体后产生衰减图像即为单能量图, 它可有效地减轻 BHA 和衰减效应, 获得更加准确的 CT 值, 从而改善图像质量^[10]。能谱 CT 几乎可以在同时、同角度获得高(140 kVp)、低(80 kVp)两种能量 X 线采样数据, 扫描后获得混合能量图像, 经后处理分析可重建出 40~140 keV 共 101 组单能量图^[11]。因此, 能谱 CT 有望将下肢动脉造影图像质量提升到一个新高度。

本研究旨在探讨能谱 CT 单能量图在显示下肢动脉解剖细节、血管与周围组织对比度及对血管病变诊断能力等方面是否优于 64 排螺旋 CT。首先从能谱 CT 101 组单能量图中选出最佳单能量图, 即具有最大血管-肌肉 CNR 图像, 此时血管与周围肌肉组织有较大 CT 差值, BN 也较低, 最符合诊断血管疾病要求^[12]。从表 1 可见, 研究组最佳单能量图能量值多位于 58~67 KeV 范围, 此时血管-肌肉具有最大 CNR, 超出这个范围后能量过高或过低均会使 CNR 下降, 这是因为 X 线能量水平越低, 对比剂 CT 值越高, 血管与周围组织 CT 差值也越大, 但 BN 随之增大, CNR 反而会下降; X 线能量水平越高, BN

就越小, 但对比剂 CT 值也会急剧下降, CNR 随之下降。因此, 最佳单能量图即是在 CT 差值和 BN 之间寻找一个平衡点, 使得 CNR 最优化, 而这个点就是最佳 KeV^[13]。

本研究中研究组 4 个层面血管 CT 值和 CNR 均高于对照组, 分别提高 17.6% 和 44.3%, 12.2% 和 40.8%, 12.3% 和 59.5%, 35.2% 和 105.8%, 但 4 个层面肌肉 CT 值和 BN 均无显著差异, 提示能谱 CT 单能量图主要通过增强对比剂 CT 值方式提高血管-肌肉 CNR, 但肌肉 CT 值和 BN 并未较大改变; 随着血管分支变细, 出现钙化、狭窄和闭塞可能性越来越大, 对图像质量的干扰也更加重, 因此能否获得优质下肢动脉远端造影图像显得尤为重要; 事实上自头侧向足侧扫描时, 血管 CT 值会逐渐降低, BHA 也会越来越重, 下肢远端血管通常显示不清。研究组在胫前动脉层面 CNR 较对照组提高 105.8%, 差异在 4 个层面中最为显著, 提示能谱 CT 最佳单能量图提高小血管成像质量能力更为突出, 有助于更加直观地了解下肢远端血流灌注情况, 对于拟行下肢动脉腔内成形术患者目标手术区域选择及观察术后血流改善情况具有重要意义。另外从图 1 可见

研究组血管边缘光滑、分界清楚,细小血管显示清晰、伪影较少,血管周围肌肉颗粒均匀、层次感强,提示能谱 CT 单能量图像质量明显优于 64 排螺旋 CT,与主观评价结果一致。

临床上 LEAOD 患者往往伴有高血压、糖尿病等基础疾病,需要严格控制对比剂用量^[14]。能谱 CT 单能量图可改变对比剂 CT 值和血管-肌肉 CNR,并可在对比剂不足情况下起到一定程度的“弥补”作用。因此在不影响诊断标准条件下,可通过调整单能量图能量值达到降低对比剂用量目的。这对于减少对比剂引起的并发症具有重要临床意义^[15]。另外,能谱 CT 单能量图还具有减轻金属伪影及 BHA 能力^[16],利于更清晰显示下肢动脉支架植入术患者支架周围情况,为评估支架植入术后支架再狭窄奠定理论基础。

本研究存在以下不足:①患者样本量偏少,故研究所得数据可能存在一定偏差;②未能根据不同患者去脂肪体重及 BMI 相应调整对比剂用量及注射速率,可能会对血管强化程度产生一定影响;③血管与肌肉 ROI 位置选取存在主观性,血管、肌肉 CT 值、BN 及 CNR 可能存在一定的选择偏倚。

总之,本研究显示宝石能谱 CT 下肢动脉造影检查在临床上可行,其最佳单能量图质量明显优于 64 排螺旋 CT,对下肢动脉腔内成形术术前、术后评估具有重要临床意义,在降低对比剂用量和去除支架伪影方面有着令人期待的价值。

[参考文献]

- [1] 畅智慧,刘兆玉,郑加贺,等. CT 血管成像诊断下肢动脉硬化闭塞症的 Meta 分析[J]. 中华放射学杂志, 2010, 44: 841-846.
- [2] Kang MJ, Park CM, Lee CH, et al. Focal iodine defects on color-coded iodine perfusion maps of dual-energy pulmonary CT angiography images: a potential diagnostic pitfall[J]. AJR Am J Roentgenol, 2010, 195: W325-W330.
- [3] Lin XZ, Miao F, Li JY, et al. High-definition CT gemstone spectral imaging of the brain: initial results of selecting optimal monochromatic image for beam-hardening artifacts and image noise reduction[J]. J Comput Assist Tomogr, 2011, 35: 294-297.
- [4] 王庆国,王 政,周志国,等. 低毫安结合自适应统计迭代重建(ASiR)在降低腹部血管能谱 CT 成像辐射剂量中的可行性研究[J]. 放射学实践, 2015, 30: 1023-1025.
- [5] Pache G, Krauss B, Strohm P, et al. Dual-energy CT virtual noncalcium technique: detecting posttraumatic bone marrow lesions-feasibility study[J]. Radiology, 2010, 256: 617-624.
- [6] Winer-Muram HT. The solitary pulmonary nodule[J]. Radiology, 2006, 239: 34-49.
- [7] 张宏伟,陈家祥,王书智,等. 螺旋 CT 血管成像在下肢动脉支架植入术后复查中的应用价值[J]. 介入放射学杂志, 2014, 23: 878-882.
- [8] Barrett JF, Keat N. Artifacts in CT: recognition and avoidance[J]. Radiographics, 2004, 24: 1679-1691.
- [9] 王万勤,刘 斌,周 勇,等. 能谱 CT 最佳单能量成像去除体模对比剂硬化伪影及图像噪声[J]. 中国医学影像技术, 2011, 27: 2349-2352.
- [10] 罗传斌,欧光乾,斯光晏,等. 髂静脉压迫综合征的多层螺旋 CT 血管成像、数字减影血管造影诊断与介入治疗[J]. 中国医学影像学杂志, 2013, 21: 576-578.
- [11] 黄仁军. 能谱 CT 的临床应用与研究进展[J]. 放射学实践, 2015, 30: 81-83.
- [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] He JZ, Ma XX, Wang Q, et al. Spectral CT demonstration of the superior mesenteric artery: comparison of monochromatic and polychromatic imaging[J]. Acad Radiol, 2014, 21: 364-368.
- [14] Bowden RG. Contrast nephropathy: risk factors and the role of beta blockers[J]. Anatol J Cardiol, 2015, 15: 241.
- [15] 廖 海,邓德茂,陈文福,等. 能谱 CT 最佳单能量技术提高头颅 CTA 成像质量及潜在优化对比剂应用初探[J]. 影像诊断与介入放射学, 2015, 24: 394-398.
- [16] 宣伟玲,赵凯宇,刘 森. 宝石能谱 CT 在去除常见 CT 图像伪影中的应用[J]. 中国医疗设备, 2013, 28: 157-158.

(收稿日期:2016-03-14)

(本文编辑:边 岱)