DOI:10.16016/j.1000-5404.202005207

应用能谱 CT 技术去除颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后金属伪影

余 娜,严 敏,傅浪舟,胡 桃,李治勇,钟丽娟,周新杰,周代全 401120 重庆,重庆医科大学附属第三医院放射科

[**摘要**] **目的** 通过 CT 单能量联合多伪影去除(multi-artifact reduction, MAR)技术的综合应用,以期有效去除颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后金属伪影并同时优化血管显示。**方法** 收集本院 2019 年 1-10 月 32 例经导管颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后复查的患者,采用能谱成像(gemstone spectral imaging, GSI)联合 MAR 技术扫描采集图像,应用能谱单能量成像技术进行后处理,两位高年资介入医师对 40~140 KeV 的头颅血管后处理图像进行主观评分,间隔 10 个 KeV 能级为 1 个评分点,其中 40 KeV 和≥100 KeV 图像质量较差被排除使用,在 50~90 KeV 区间,每间隔 5 KeV 重建 9 个能级的单能量图像,分别对图像的噪声值(standard deviation, SD)、信噪比(signal to noise ratio, SNR)、伪影指数(artifact index, AI)做客观统计学评价。**结果** 进行组间 SNR 比较,其中 65 KeV 与 70 KeV、75 KeV 与 80 KeV 单能量能级比较,差异有统计学意义($P<0.05$),其余组间比较差异无统计学意义;在 60~65 KeV 区间,AI 指数较低、图像质量客观评价得分最高,提示该范围单能量能级图像对弹簧圈栓塞术后血管显示较佳。**结论** 在 60~65 KeV 单能量区间,能谱 CT 加 MAR 扫描联合单能量技术对去除颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后金属伪影效果更好。

[**关键词**] 能谱 CT;颅内动脉瘤;弹簧圈;去金属伪影;MAR 技术;单能量技术

[**中图法分类号**] R743.9; R814.3; R814.42 [**文献标志码**] A

Application of spectral computed tomography for artifact removal after coil embolization of intracranial aneurysms

YU Na, YAN Min, FU Langzhou, HU Tao, LI Zhiyong, ZHONG Lijuan, ZHOU Xinjie, ZHOU Daiquan

Department of Radiology, the Third Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing, 401120, China

[**Abstract**] **Objective** To evaluate the effect of single-energy computed tomography (CT) combined with multi-artifact removal (MAR) for removing metal artifacts and optimizing blood vessel display in patients with coil embolization for intracranial aneurysms. **Methods** Thirty-two patients with intracranial aneurysms undergoing coil embolization under digital subtraction angiography (DSA) in our hospital between January and October in 2019 were enrolled in this study. After the surgery, the patients were scanned by gemstone spectral imaging (GSI) combined with MAR technique and post-processing with spectral monoenergy imaging technique. Two senior physicians scored the cranial vascular images acquired at a 10 KeV interval within 40 KeV to 140 KeV (the images acquired at 40 KeV and ≥100 KeV were excluded for poor quality). Nine single-energy images were reconstructed at 5 KeV intervals between 50 KeV and 90 KeV, and the noise level, signal-to-noise ratio (SNR) and artifact index (AI) of the images were evaluated. **Results** The SNR of the images tended to decrease with the increase of the energy level and showed significant differences between the energy levels 65 KeV and 70 KeV and between 75 KeV and 80 KeV ($P<0.05$), but not between the other energy levels. The images acquired at 60~65 KeV had low AI indexes and the highest objective score for

[**通信作者**] 周代全,E-mail: zhoudq77@sina.com

image quality with optimal display the blood vessels after coil embolization. **Conclusion** Energy spectral CT within the range of 60~65 KeV combined with MAR can effectively remove metal artifacts in patients after coil embolization for intracranial aneurysms.

[**Key words**] intracranial aneurysm; spring coil; energy spectral computed tomography; removing metal artifacts; multi-artifact removal technology; single energy technique

Corresponding author: ZHOU Daiquan, E-mail: zhoudq77@sina.com

外科夹闭和血管内弹簧圈栓塞术是目前公认治疗颅内动脉瘤的重要方法[1]。动脉瘤血管内弹簧圈栓塞治疗虽是一种微创治疗,但也存在一定的风险,如术中动脉瘤破裂、术中血管痉挛、弹簧圈发生移位和动脉瘤再通等,影像随访是术后动脉瘤复查的重要手段。数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)被认为是弹簧圈栓塞术后观察血管解剖结构的金标准,但 DSA 是一种侵入性、高辐射剂量、耗时的检查,且存在一定的血栓栓塞事件的风险[2]。计算机断层扫描(computed tomograhy, CT)和 CT 血管成像(CT angiography, CTA)作为一种无创技术,能够用于评估手术和血管内动脉瘤弹簧圈置入治疗后血管结构和周围脑实质情况[1]。然而,由动脉瘤夹和弹簧圈产生的金属伪影严重影响 CT 图像质量,并可能对影像学的解释能力产生负面影响,特别是对小动脉瘤残余、复发和再生长的评估影响[3]。随着 CT 技术的不断发展,能谱 CT 单能量成像技术以及金属伪影消除技术可有效去除体内金属置入物伪影对图像质量的影像[4]。本研究主要探讨联合应用多伪影去除(multi-artifact reduction, MAR)技术,找出去除颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后金属伪影的最佳单能量成像范围。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集本院 2019 年 1-10 月共 32 例经导管颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后患者,其中男性 12 例,女性 20 例,年龄 32~69 岁,均采用能谱 CT 复查,弹簧圈为美国 Guglielmi 弹簧圈(GDC),材料为铂-钨合金,患者一般状况良好,能配合检查并保持头颅不动、采集图像时不做吞咽动作,无碘对比剂过敏史及检查禁忌证(哮喘、心肾功能不全等)。

1.2 方法

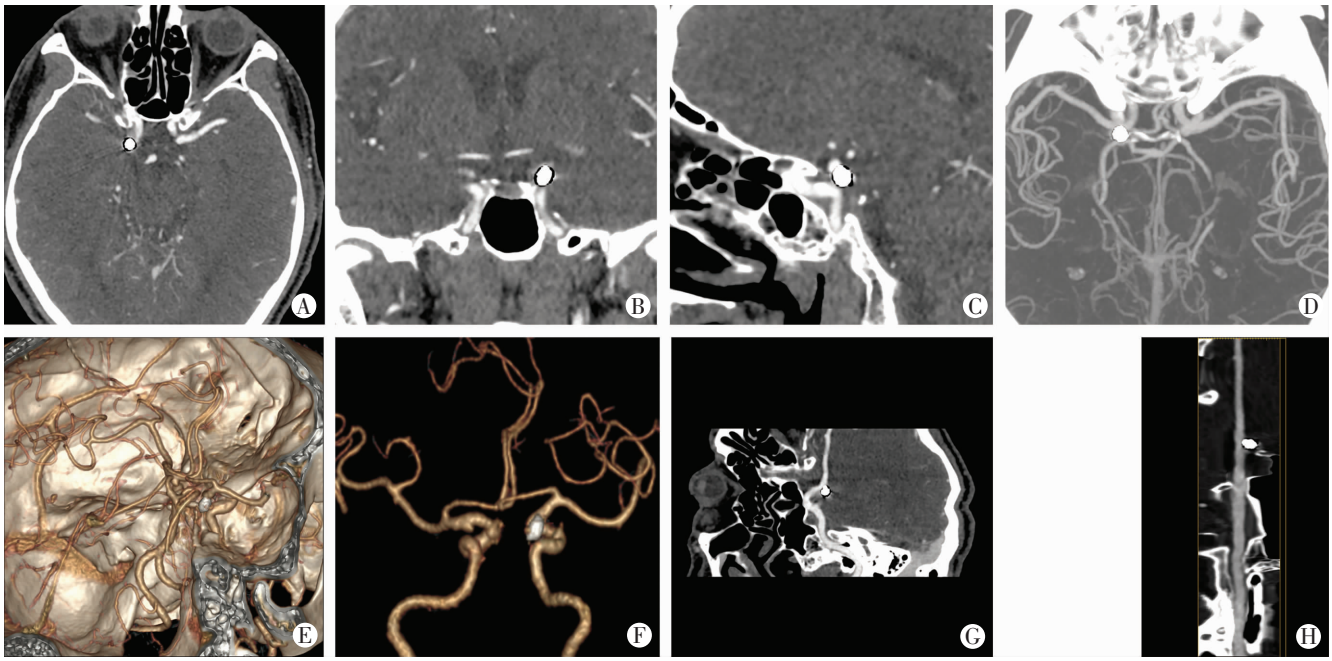
1.2.1 扫描参数 美国 GE 公司 Revolution CT,能谱模式(gemstone spectral imaging, GSI)80 kV/140 kV 快速自动切换,管电流 370 mA,螺旋扫描,迭代重建(adaptive statistical iterative reconstruction, ASIR) 50%,探测器宽度 80 mm,螺距(pitch)0.992:1,转速 0.5 s/360°,扫描层厚、间距 5 mm,扫描时间 0.5 s,扫描范围颅底至颅顶,在 Recon Setting 里面打开 MAR,重建 0.625 mm Data 薄层数据传至 AW4.7 工作站。

1.2.2 检查方法 选择右侧肘正中静脉为注射通道,用小剂量团注测试法确定扫描延迟时间:对比剂 15 mL(碘帕醇,370 mgI/mL),生理盐水 20 mL,注射流速 4.5 mL,监测线在颈 6 水平,在该平面选择一侧颈内动脉放置 1 个 ROI,分析时间-密度曲线,得出血管成像的最佳扫描时间。血管成像扫描:对比剂 60 mL(碘帕醇,370 mgI/mL),生理盐水 20 mL,注射流速 4.5 mL;用减影法,在对比剂注射前先进行颈 6 水平至颅顶的 1 次无对比剂平扫扫描,紧接着按照计算的阈值时间再完成颈 6 水平至颅顶的对比剂注射扫描,两次扫描要求起始位置完全一致,图像采集过程中患者头部保持静止不动。

1.2.3 图像后处理方法 包括容积再现(volume rendering, VR)、多平面重建(multi planar reformation, MPR)、最大密度投影(maximum intensity projection, MIP)、曲面重建(curved plannar reformation, CPR)及血管分析。将 0.625 mm 的能谱 Data 数据导入工作站,在 40~140 KeV,每间隔 10 KeV,共生成 10 个不同能级的单能量数据 VR 图像;由两位高年资医师依据血管显示情况对各能级图像进行初步筛选,40 KeV 和≥100 KeV 单能量数据因图像质量较差被排除使用,保留 50~90 KeV 区间;然后每间隔 5 KeV 为 1 个能级,即 50、55、60、65、70、75、80、85、90 KeV,再次重建共 9 个能级的单能量数据。分别对 32 例病例的每一级单能量数据进行 MPR、MIP、VR、CPR 重建以及血管拉直分析(图 1);VR 及 MIP 图像能够提供直观的三维血管图像,CPR 重建及血管拉直分析图像更有利于观察弹簧圈栓塞后动脉瘤有无再通和弹簧圈是否脱出瘤体及其与血管的关系。

1.2.4 图像评价方法 分别采用主观和客观方法进行评价。

1.2.4.1 主观评价 由两位高年资的介入医师对图像质量进行评价,根据血管显示情况及周围软组织对比度及去金属伪影效果,结合李克特量表评分法[5-6]



A:原始轴位图像;B、C:分别为冠状位及矢状位 MPR 重建图像;D:MIP 重建图像;E、F:分别为带骨 VR 及去骨 VR 重建图像;G、H:分别为 CPR 重建及血管拉直分析图

图 1 右侧颈内动脉 C7 段动脉瘤弹簧圈介入患者(男,70 岁)术后复查能谱 CT 单能量成像表现

按 5 分制评分,先对 40~140 KeV 10 个能量级的头颅血管后处理图像进行初步评价,每 1 个能量级(间隔 10 KeV)都有 1 个评分点,即 40、50、60、70、80、90、100、110、120、130、140 KeV。1 分:血管显示差,金属伪影重,周围软组织受金属干扰强,不能诊断;2 分:血管显示较差,金属伪影较重,有金属伪影干扰,诊断难度大;3 分:血管显示良好,软组织等受金属伪影影响小;4 分:血管显示清晰,且金属伪影小;5 分:血管及周围软组织清晰显示,基本无金属伪影。评分结果显示:40 KeV 和≥100 KeV 重建图像得分均在 2 分以下,图像质量较差没有临床诊断价值,故将这部分数据不纳入客观评价之内。

1.2.4.2 客观评价 通过主观评价大致筛选后,保留 50~90 KeV 区间,间隔 5 KeV 为 1 个能量级数据进行客观评价,即 50、55、60、65、70、75、80、85、90 KeV,共 9 个能量级图像数据,测量并记录同一患者 9 个不同的 KeV 能量级横断面图像的相同位置相同 ROI 的 CT 值、噪声值(standard deviation, SD)、信噪比(signal to noise ratio, SNR)、伪影指数(artifact index, AI)。其中目标分析兴趣区标记为 ROI1,为靠近弹簧圈处血管金属伪影较重区域的 ROI,测量并记录该处 ROI 的 CT 值、噪声值(SD1),以此计算 SNR(CT/SD1)。选取同层面远离弹簧圈的且无金属伪影干扰区域的血管处兴趣区,标记为 ROI2,测量并记录该处的 CT 值、噪声值(SD2)。计算 AI:$AI=(SD_1^2-SD_2^2)^{1/2}$[7-8],且同一患者不同单能量图像上选取的 ROI 的位置和面积必须一致,再进行统计学评价。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 21.0 统计软件,计数资料均不服从正态分布,故采用中位数 M(P25,P75)表示。组间 SNR 比较采用秩和检验,检验水准为 0.05。

2 结果

2.1 主观评价结果

两名医师评分均值结果显示:50~90 KeV 单能量区间图像质量具有诊断学意义,其中 60~70 KeV 单能量区间图像质量评分较高(表 1)。

2.2 客观评价结果

主观评价筛选后,保留 50~90 KeV 区间单能量图像并分析图像的 AI、SNR,曲线图分析显示:图像 AI 值随着单能量能级的增加而降低,表明图像质量受金属伪影干扰越来越小(表 1,图 2A);而图像血管 SNR 随着单能量能级的增加越来越低,表明血管图像质量越来越差(图 2B)。进行组间 SNR 比较,其中 65 KeV 与 70、75、80 KeV 单能量能级比较,差异有统计学意义

(P<0.05,表 2),其余组间比较差异均无统计学意义。高于 75 KeV 处 SNR 陡降,且医师评分图像质量较差,而低于 75 KeV 显示血管较好,结合在 60~65 KeV 范围内 AI 指数较低,客观评分最高,经综合比较确认:利用能谱加 MAR 技术后,该范围单能量图像对弹簧圈术后血管显示较佳(图 3)。

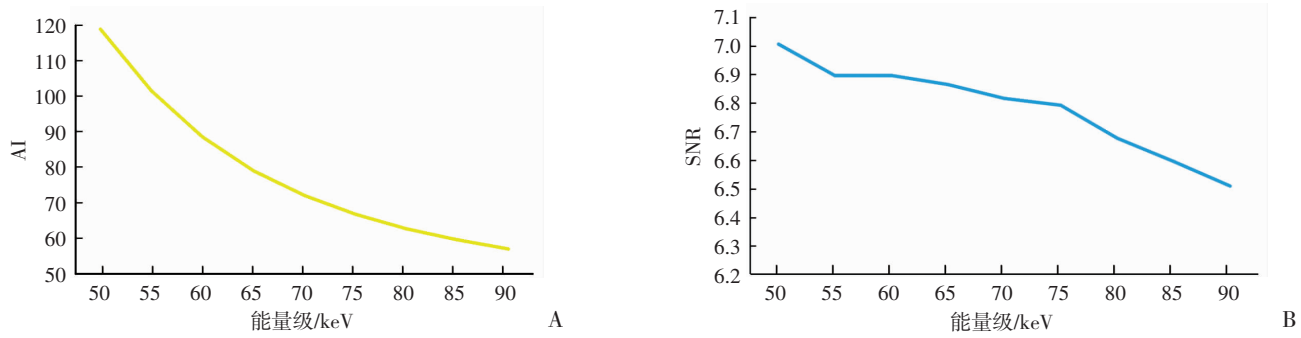
3 讨论

有研究报道能谱成像单能量 KeV 值越高去金属伪影效果越好,且 120 KeV 为最佳单能量成像点,70 KeV 为伪影减除的分界点[4,9],而对于单纯的无金属伪影影响的血管,单能量成像 KeV 值越低,血管优化

表 1 32 例患者不同 KeV 单能量图像主观评分及 SNR 比较[M(P25,P75)]

项目	40 KeV	50 KeV	60 KeV	70 KeV	80 KeV	90 KeV	100 KeV
主观评分	2.00(1.50,2.50)	3.50(3.50,4.00)	4.50(4.00,4.50)	4.50(4.00,4.50)	2.50(1.50,2.50)	1.50(1.25,2.00)	0.50(0,0.50)
项目	50 KeV	55 KeV	60 KeV	65 KeV	70 KeV	75 KeV	80 KeV
SNR	6.54(4.54,8.16)	6.31(4.57,8.10)	6.37(4.57,8.04)	6.38(4.55,8.02)	6.22(4.54,8.04)	6.35(4.50,8.06)	6.18(4.47,8.09)

40 KeV 和≥100 KeV 单能量图像质量评分很低,说明图像诊断价值较低,这部分数据没有纳入客观评价

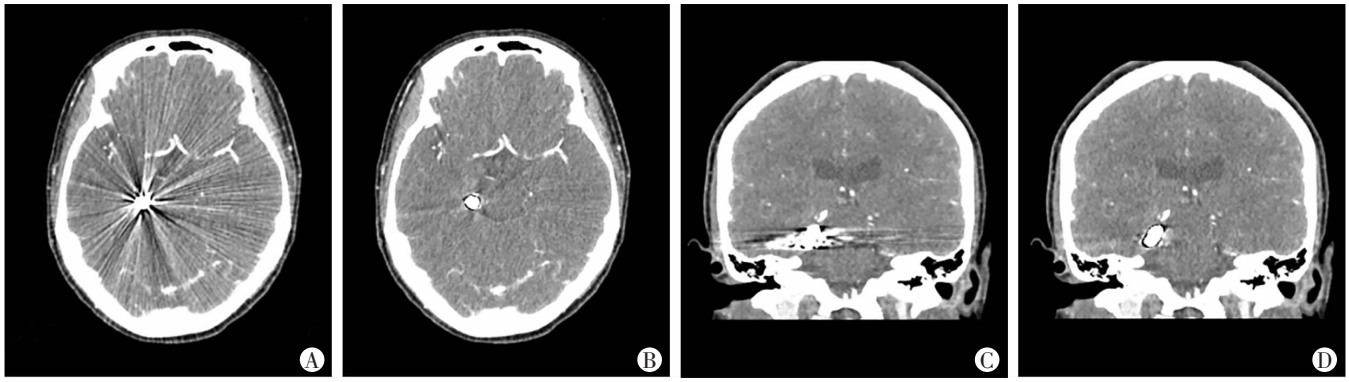


SNR 曲线 55 KeV 及 75 KeV 出现陡降趋势,在 55~75 KeV 区间走行平缓

图 2 50~90 KeV AI(A)及 SNR(B)曲线

表 2 不同能量级间 SNR 比较(n=32)

统计值	50 *vs* 55 KeV	55 *vs* 60 KeV	60 *vs* 65 KeV	65 *vs* 70 KeV	70 *vs* 75 KeV	75 *vs* 80 KeV
Z 值	−1.421	−0.879	−1.346	−2.001	−1.945	−2.580
P 值	0.155	0.379	0.178	0.045	0.052	0.010



A、C:为轴位及冠状位 65 KeV 图像,可见弹簧圈产生放射状金属伪影,周边组织及血管显示受到明显干扰;B、D:为轴位及冠状位 65 KeV 加 MAR 图像,弹簧圈金属伪影显著降低,周边组织及血管显影良好

图 3 右侧大脑后动脉 P2 段动脉瘤弹簧圈栓塞患者(女,30 岁)术后复查能谱 CT 单能量成像表现

显示越好,提示最佳血管显示的单能量图像 KeV 范围为 57~63 KeV[5]。而对于颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后患者,如果采用 CT 复查,既要有效去除金属伪影(高 KeV 值),又要最优化显示血管(低 KeV 值),两者是相互矛盾的。本研究通过对 SNR、AI 等的测量分析及高年资医师主观评价,寻找出既能有效去除金属伪影又能最优化显示血管的最佳 KeV 值范围。本研究结果显示:AI 指数为一平滑下降的曲线,55 KeV 处及 75 KeV 处出现陡降趋势,而 55~75 KeV 区间走行平缓,结合客观统计学评价及高年资医师评价,最后得出 60~65 KeV 单能量区间范围为颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后复查的理想范围,该范围与其他研究[4,10]单纯无金属伪影影响的血管最佳单能量范围比较接近,因此,加 MAR[11-12]技术在该单能量区间几乎完全达到了去金属伪影的效果。本研究得出的结论“60~65 KeV 单能量区间范围为颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后复查的理想范围”,与董鑫等[12]得出的结论“70~90 KeV 为颅内弹簧圈最佳血管显示范围,且 70 KeV 为最佳单能量值”有一定的差别,分析有以下几个原因:①该院采用的 CT 设备为美国 GE 公司的宝石 750CT,而我院 CT 设备为 GE 公司 Revolution 宽体 CT,不同设备的加 MAR 技术效果是否相当值得探讨;②我院弹簧圈为美国进口 Guglielmi 弹簧圈(GDC),材料为铂-钨合金,而该院未提及弹簧圈材料及厂家,不同金属含量的材质差异可能会对去伪影效果产生影响;③两篇文献采取了不同的实验设计及统计方法,且对比剂使用浓度及用量也有差别。

CT 金属伪影产生的原因有:①射线硬化效应,源于 X 线的固有特性,当 X 线穿过密度较高的金属时,低能部分被吸收,透过的 X 线平均能量增高,X 线即被硬化;②部分容积效应,由探测器测量尺寸误差产生,如某一区域出现一半低能量一半高能量,探测器会取平均值作为输出信号;③电子饥饿效应,指 X 线穿过金属物体后,衰减过大而导致到达探测器的光子量过少,噪声明显增大,导致图像产生明显的黑白条纹状伪影[13]。怎样有效去除金属伪影成为目前研究的热点。本研究联合应用加 MAR 技术及单能量技术,加 MAR 技术是一种基于迭代重建的去金属伪影的后处理技术[14-15],不改变扫描条件,也不增加辐射剂量,通过改进图像重建算法,对图像中的投影数据进行反复迭代运算,剔除有金属伪影的原始数据,直至图像不再受大量金属伪影的干扰,同时也不影响非金属区域图像。

本研究结果显示:有 31 例 SNR 及 AI 值均为曲线,1 例呈抛物线。分析原因可能跟该患者在介入手术中同时使用了弹簧圈和动脉瘤夹有关。本院动脉瘤夹采用的是德国贝朗公司的蛇牌动脉瘤夹,该动脉瘤夹分别有两种材料,钴合金动脉瘤夹和钛合金动脉瘤夹,根据不同的适应证选取材料,本例患者动脉瘤夹的材料为钛合金,而弹簧圈材料为铂-钨合金,两者为不同成分的金属材料,弹簧圈和动脉夹两种不同金属材质之间是否相互产生了影响,值得进一步探讨。因此,本方法适用于在介入手术中使用单一材料弹簧圈栓塞术后复查的患者。

参考文献:

[1] IHN Y K, SHIN S H, BAIK S K, *et al*. Complications of endovascular treatment for intracranial aneurysms: Management and prevention[J]. Interv Neuroradiol, 2018, 24(3): 237-245. DOI:10.1177/1591019918758493.

[2] ZHU C, WANG X, EISENMENGER L, *et al*. Surveillance of unruptured intracranial saccular aneurysms using noncontrast 3D-black-blood MRI: comparison of 3D-TOF and contrast-enhanced MRA with 3D-DSA[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2019, 40(6): 960-966. DOI: 10.3174/ajnr.A6080.

[3] DUNDAR T T, ARALASMAK A, KITIŞ S, *et al*. Comparison of subtracted computed tomography from computed tomography perfusion and digital subtraction angiography in residue evaluation of treated intracranial aneurysms[J]. World Neurosurg, 2019, 132: e746-e751. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.08.028.

[4] DUNET V, BERNASCONI M, HAJDU S D, *et al*. Impact of metal artifact reduction software on image quality of gemstone spectral imaging dual-energy cerebral CT angiography after intracranial aneurysm clipping[J]. Neuroradiology, 2017, 59(9): 845-852. DOI: 10.1007/s00234-017-1871-6.

[5] 邓小林, 谢惠, 屈亚林, 等. 能谱 CT 最佳单能量技术优化头颈部 CTA 图像质量的研究[J]. CT 理论与应用研究, 2018, 27(6): 719-726. DOI: 10.15953/j.1004-4140.2018.27.06.05.
DENG X L, XIE H, QU Y L, *et al*. Spectral CT with optimal monochromatic energy to improve CTA image quality of head and neck[J]. Comput Tomogr Theory Appl, 2018, 27(6): 719-726. DOI:10.15953/j.1004-4140.2018.27.06.05.

[6] 张志伟, 吕发金, 曾勇明, 等. 数字减影 CT 血管造影术在颅内动脉瘤中的临床应用[J]. 中国医学影像技术, 2007, 23(3): 450-452. DOI: 10.13929/j.1003-3289.2007.03.038.
ZHANG Z W, LYU F J, ZENG Y M, *et al*. Digital subtraction CT angiography for detection of intracranial aneurysms[J]. Chin J Med Imaging Technol, 2007, 23(3): 450-452. DOI: 10.13929/j.1003-3289.2007.03.038.

[7] SUN X, SHAO X D, CHEN H S. The value of energy spec-

tral CT in the differential diagnosis between benign and malignant soft tissue masses of the musculoskeletal system[J]. Eur J Radiol, 2015, 84(6): 1105-1108. DOI: 10.1016/j.ejrad.2015.02.028.

[8] KAMIYA K, KUNIMATSU A, MORI H, *et al*. Preliminary report on virtual monochromatic spectral imaging with fast kVp switching dual energy head CT: comparable image quality to that of 120-kVp CT without increasing the radiation dose[J]. Jpn J Radiol, 2013, 31(4): 293-298. DOI: 10.1007/s11604-013-0185-9.

[9] WINKLHOFER S, HINZPETER R, STOCKER D, *et al*. Combining monoenergetic extrapolations from dual-energy CT with iterative reconstructions: reduction of coil and clip artifacts from intracranial aneurysm therapy[J]. Neuroradiology, 2018, 60(3): 281-291. DOI:10.1007/s00234-018-1981-9.

[10] 周新杰, 周代全, 钟丽娟, 等. 能谱CT血管成像显示甲状腺供血动脉[J]. 中国医学影像技术, 2019, 35(10): 1565-1568. DOI:10.13929/j.1003-3289.201904078.
ZHOU X J, ZHOU D Q, ZHONG L J, *et al*. Dual-energy CT angiography in displaying thyroid feeding artery[J]. Chin J Med Imaging Technol, 2019, 35(10): 1565-1568. DOI: 10.13929/j.1003-3289.201904078.

[11] KUCHENBECKER S, FABY S, SAWALL S, *et al*. Dual energy CT: How well can pseudo-monochromatic imaging reduce metal artifacts? [J]. Med Phys, 2015, 42(2): 1023-1036. DOI: 10.1118/1.4905106.

[12] 董鑫, 吕国士, 刘伟, 等. 能谱CT的MONO成像联合MARs技术在颅内弹簧圈植入物伪影的应用研究[J]. 临床放射学杂志, 2016, 35(5): 794-798. DOI: 10.13437/j.cnki.jcr.2016.05.037.
DONG X, LYU G S, LIU W, *et al*. Application effects of energy spectral CT mono imaging technology united with MARs in removing artifacts of intracranial spring coil implant[J]. J Clin Radiol, 2016, 35(5): 794-798. DOI: 10.13437/j.cnki.jcr.2016.05.037.

[13] 张客松, 徐晓麟, 韩青, 等. 骨科去金属伪影技术在人工关节置换术CT检查中的应用[J]. 吉林大学学报(医学版), 2019, 45(1): 179-183, 220. DOI: 10.13481/j.1671-587x.20190134.
ZHANG K S, XU X L, HAN Q, *et al*. Application of orthopedic metal artifact reduction technology in CT examination of arthroplasty[J]. J Jilin Univ(Med Ed), 2019, 45(1): 179-183, 220. DOI: 10.13481/j.1671-587x.20190134.

[14] 高思喆, 丁长伟, 郭文力, 等. O-MAR技术在颅内动脉瘤栓塞术后CTA中的应用[J]. 中国临床医学影像杂志, 2017, 28(6): 391-393. DOI:10.3969/j.issn.1008-1062.2017.06.003.
GAO S Z, DING C W, GUO W L, *et al*. Application of O-MAR technique in postoperative cTA of intracranial aneurysms embolization[J]. J Chin Clin Med Imaging, 2017, 28(6): 391-393. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1062.2017.06.003.

[15] KIDOH M, NAKAURA T, NAKAMURA S, *et al*. Reduction of dental metallic artefacts in CT: Value of a newly developed algorithm for metal artefact reduction (O-MAR)[J]. Clin Radiol, 2014, 69(1): e11-e16. DOI:10.1016/j.crad.2013.08.008.

(**收稿**:2020-05-22;**修回**:2020-07-03)

(编辑 汪勤俭)