神经病学 DOI:10.13406/j.cnki.cyxb.000898

颅内动脉瘤夹闭术后瘤夹对 CTA 图像质量的影响研究

盛 波[1],陈 松[2],吕发金[1],肖智博[1],吕富荣[1]
(重庆医科大学附属第一医院 1. 放射科;2. 神经外科,重庆 400016)

【摘 要】**目的**:探讨颅内动脉瘤夹闭术后动脉瘤夹对计算机断层血管造影(computed tomography angiography,CTA)图像的影响。**方法**:对 62 例颅内动脉瘤夹闭术后病人行同步 CTA 检查,运用容积再现(volume rendering,VR)及多平面重组(multiplanar reconstruction,MPR)方法,观察动脉瘤夹对 CTA 图像的影响,比较 VR、MPR 对动脉瘤夹闭术后载瘤动脉是否狭窄及狭窄程度。**结果**:CTA 可清楚体现瘤夹与载瘤动脉的关系。使用Kappa 系数分析,常规 VR 与 MPR 对比 K=0.452,*P*=0.000;常规 MPR 与减影 VR 对比 K=0.132,*P*=0.019,*P*<0.05。即常规 VR 与 MPR 评价血管狭窄有一定一致性,而常规 MPR 与减影 VR 一致性差。瘤夹伪影分为 3 个等级:Ⅰ级 49 例(79.0%),Ⅱ级 11 例(17.7%),③Ⅲ级 2 例(3.2%)。瘤夹数量与瘤夹伪影等级秩和检验 *P*>0.05。**结论**:CTA 图像质量受金属伪影及瘤夹减影不全的影响,减影 CTA 需要结合的多种图像重组方法提高对动脉瘤夹闭术后疗效评价的可靠性。

【关键词】颅内动脉瘤;计算机体层摄影;血管造影术;伪影;瘤夹
【中图分类号】R61;R814.42 【文献标志码】A 【收稿日期】2015-10-07

作者介绍:盛 波,Email:shengbok@qq.com,
研究方向:颅内血管影像解剖及临床运用。
通信作者:吕富荣,Email:lfr918@sina.com。

基金项目:国家临床重点专科建设经费资助项目(编号:国卫办医函[2013]544 号)。
优先出版:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1046.r.20160322.1135.002.html (2016-03-22)

hemorrhage patients[J]. Cerebrovasc Dis,2011,32(2):133-140.

[4] Dankbaar JW,de Rooij NK,Rijsdijk M,et al. Diagnostic threshold values of cerebral perfusion measured with computed tomography for delayed cerebral ischemia after aneurysmal subarachnoid hemorrhage [J]. Stroke,2010,41(9):1927-1932.

[5] Macdonald RL,Higashida RT,Keller E,et al. Clazosentan,an endothelin receptor antagonist,in patients with aneurysmal subarachnoid haemorrhage undergoing surgical clipping:a randomised,double-blind,placebo-controlled phase 3 trial(CONSCIOUS-2)[J]. Lancet Neurol,2011,10(7):618-625.

[6] Pennings FA,Bouma GJ,Ince C. Direct observation of the human cerebral microcirculation during aneurysm surgery reveals increased arteriolar contractility[J]. Stroke,2004,35(6):1284-1288.

[7] Dankbaar JW,de Rooij NK,Velthuis BK,et al. Diagnosing delayed cerebral ischemia with different CT modalities in patients with subarachnoid hemorrhage with clinical deterioration[J]. Stroke,2009,40(11):3493-3498.

[8] 张忠胜,崔志宏,孙 昊,等. 多层螺旋 CT 灌注成像技术的临床应用和进展[J]. 医学影像学杂志,2010,20(7):1067-1069.

[9] Honda M,Sase S,Yokota K,et al. Early cerebral circulatory disturbance in patients suffering subarachnoid hemorrhage prior to the delayed cerebral vasospasm stage:xenon computed tomography and perfusion computed tomography study[J]. Neurol Med Chir(Tokyo),2012,52(7):488-494.

[10] Etminan N,Beseoglu K,Heiroth HJ,et al. Early perfusion computerized tomography imaging as a radiographic surrogate for delayed cerebral ischemia and functional outcome after subarachnoid hemorrhage[J]. Stroke,2013,44(5):1260-1266.

[11] Sanelli PC,Nicola G,Johnson R,et al. Effect of training and experience on qualitative and quantitative CT perfusion data[J]. AJNR Am J Neuroradiol,2007,28(3):428-432.

[12] Pham M,Johnson A,Bartsch AJ,et al. CT perfusion predicts secondary cerebral infarction after aneurysmal subarachnoid hemorrhage[J]. Neurology,2007,69(8):762-765.

[13] Huenges Wajer IM,Cremers CH,van Zandvoort MJ,et al. CT perfusion on admission and cognitive functioning 3 months after aneurysmal subarachnoid haemorrhage[J]. J Neurol,2015,262(3):623-628.

[14] Mathys C,Martens D,Reichelt DC,et al. Long-term impact of perfusion CT data after subarachnoid hemorrhage[J]. Neuroradiology,2013,55(11):1323-1331.

[15] Aralasmak A,Akyuz M,Ozkaynak C,et al. CT angiography and perfusion imaging in patients with subarachnoid hemorrhage:correlation of vasospasm to perfusion abnormality[J]. Neuroradiology,2009,51(2):85-93.

(责任编辑:张辉洁)

Effect of aneurysm clip on CTA of intracranial aneurysms after clipping

Sheng Bo[1], Chen Song[2], Lü Fajin[1], Xiao Zhibo[1], Lü Furong[1]

(1. Department of Radiology; 2. Department of Neurosurgery, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University)

【Abstract】***Objective***: To investigate the effect of the aneurysm clip on the CTA image after clipping of intracranial aneurysm. ***Methods***: Arteries of ruptured aneurysms and aneurysm clips imaging from 62 patients undergoing head subtraction CTA examination were retrospectively reconstructed, and the volume rendering(VR) and multiplanar reconstruction(MPR) were used to evaluate the effect of aneurysm clips and the accuracy of VR and MPR in the patients with aneurysm clipped, as well as to observe the residual aneurysms after clip. ***Results***: CTA can clearly show the relationship between the aneurysm clip and the carrying vessel. Kappa index of agreement: K=0.452 was used for the conventional VR and the MPR(P=0.000) and K=0.132 for the MPR and the subtraction VR(P=0.019). Consistency was observed between conventional VR, MPR and vascular stenosis evaluation while poor consistency was observed between MPR and the subtraction VR. Aneurysm clip artifact was divided into 3 grades: type a 49 cases(79.0%), type b 11 cases(17.7%), type c 2 cases(3.2%). The rank sum test of the number of clips and clip artifact contrast show that the results were not statistically different(P>0.05). ***Conclusion***: CTA image quality is affected by the metal artifact and the shadow of the clip. We should combine subtraction CTA with multi type image reconstruction methods to improve the accuracy of the treatment for patients after aneurysm clipping.

【Key words】intracranial aneurysm; computed tomography; angiography; artifacts; aneurysm clip

随着多层螺旋 CT 设备在临床上的广泛应用及技术发展，计算机断层血管造影(computed tomography angiography，CTA)检查不光应用于颅内动脉瘤术前评价[1-5]，同时也广泛用于动脉瘤夹闭术后效果评价[6-10]，并且减影 CTA 可代替 DSA 作为动脉瘤夹闭术后随访的主要方法。临床实践中发现动脉瘤金属夹可影响 CTA 图像质量，本研究对 62 例动脉瘤夹闭术后患者行减影 CTA 检查，通过常规 CTA 与减影 CTA 对比分析，探讨动脉瘤夹对 CTA 图像的影响，对比多平面重组(multiplanar reconstruction，MPR)与容积再现(volume rendering，VR)评价载瘤动脉狭窄的一致性。

1 资料与方法

1.1 研究对象

连续收集我院 2015 年 7 至 9 月颅内动脉瘤夹闭术后病例，术后 7~10 d 行减影 CTA 复查；排除 CT 扫描失败、减影失败病例后，共收集病例 62 例，男性 36 例、女性 26 例，年龄(51.6 ± 11.4)(17~73)岁。动脉瘤夹为钛合金(德国 AESCULAP 公司生产)。动脉瘤分布：颈内动脉后交通起始部 26 例，前交通动脉 25 例，大脑中动脉分叉处 9 例，大脑中动脉 M1 段 1 例，大脑前动脉 A2 段 1 例。

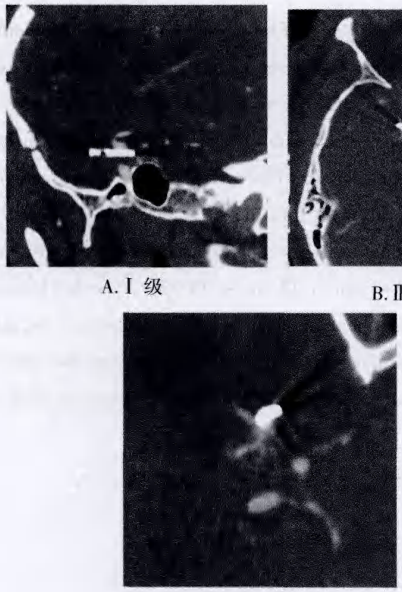
1.2 成像设备及方法

采用宝石 CT(Discovery CT750 HD)使用同步扫描 CTA 技术[1-5]，先行平扫、再行 CTA 容积扫描显示全脑血管造影。扫描参数：管电压 100~120 kV，管电流 250~300 mA；球管转速 0.4 s/r，螺距 0.531/0.969，矩阵 512×512，视野 18~24 cm，扫描层厚 5 mm，重建层厚 0.625 mm，重建间隔 0.625 mm。双筒高压注射器，经肘静脉团注非离子型碘对比剂优维显 370 mgI/ml，造影剂用量 60~80 ml，生理盐水 20~30 ml，注射速度 4 ml/s。用 20 ml 造影剂、15 ml 生理盐水做 Test-bolus，在鞍上池层面同层动态扫描，得到血管强化的时间-密度曲线来确定个体化的扫描延迟时间。扫描范围从颈 1 椎体水平到颅顶，两次扫描范围完全一致。扫描方向自颅底向颅顶扫描。两次扫描时需要患者头部制动。

1.3 图像处理及数据记录

将重建图像传至 GE AW 4.6 后处理工作站。图像处理及数据记录：① 直接利用增强数据显示血管影像为常规CTA，运用最大密度投影(maximum intensity projection，MIP)、MPR 以及 VR 观察载瘤动脉管腔有无狭窄及狭窄程度、瘤夹伪影以及伪影干扰观察载瘤动脉的情况，在 MPR 图像上测量瘤夹长轴方向与轴面的夹角。②应用 Add/Sub 软件将增强数据逐层减去平扫数据，获得只剩下血管图像的数据，此方法显示血管影像为减影 CTA，使用 VR 观察载瘤动脉有无狭窄及程度。按管径大小把血管狭窄程度分为轻度(狭窄<30%)、中度(狭窄 30%~50%)、重度(狭窄>50%、以及血管闭塞)。在常规 MRP 图像上，结合瘤夹主要伪影位于长轴、载瘤动脉位于瘤夹短轴，把瘤夹伪影分为 3 个等级(图 1)：① Ⅰ级，动脉瘤夹产生伪影主要位于瘤夹长轴方向，不影响对载瘤动脉的观察。② Ⅱ级，瘤夹短轴方向出现伪影，轻度影响对载瘤的动脉观

察。③Ⅲ级，瘤夹产生大量伪影，严重影响对载瘤的动脉观察，不能明确有无动脉瘤残留或不能看清载瘤动脉。图像观察及记录由 2 个经验丰富医生完成，当意见分歧时通过商量后达成一致意见。



A. Ⅰ级　B. Ⅱ级　C. Ⅲ级

图 1　伪影分级

Fig.1　Artifact classification

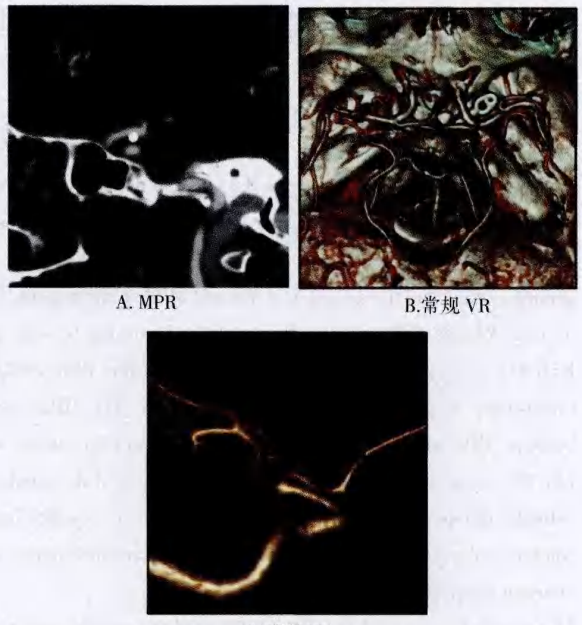
1.4　统计分析

使用 SPSS 22.0 统计软件，采用 Kendall 相关分析常规VR、MPR、减影 VR 观察血管狭窄的相关性，使用 kappa 系数分别评价常规 VR 与 MPR、常规 VR 与减影 VR 观察血管狭窄的一致性，运用两个独立样本的秩和检验分析瘤夹数量与瘤夹伪影等级的关系，检验水准 α=0.05。

2　结　果

2.1　CTA 对载瘤动脉狭窄的观察

62 病例中载瘤动脉痉挛 6 例，主要表现为较长范围血管均匀性狭窄。动脉瘤残留 4 例，表现为位于瘤夹与载瘤动脉夹角区、靠近瘤夹的局限管腔突起。1 例后交通动脉瘤夹伪影致同侧大脑前动脉 A1 段显示不连续。在常规 MPR、CTA 图像上可见载瘤动脉位于瘤夹短轴方向，所有病例 MPR 能清楚显示载瘤动脉狭窄程度（图 2）。常规 CTA VR 及 MPR、减影 CTA VR 血管狭窄结果见表 1。常规 VR、MPR、减影 VR 血管狭窄及狭窄程度的 Kendall 相关系数 W=0.379、P=0.000，结果有统计意义，即 3 种方法评价血管狭窄程度呈低度相关。使用 Kappa 系数分析，常规 VR 与 MPR 对比 K=0.452、P=0.000；常规 MPR 与减影 VR 对比 K=0.132、P=0.019。Kappa 系数分析结果有统计学意义，常规 VR 与 MPR 评价血管狭窄有一定一致性，而常规 MPR 与减影 VR 一致性差。



A. MPR　B.常规 VR　C.减影 VR

图 2　CTA 观察左侧颈内动脉后交通起始部动脉瘤夹闭术后载瘤动脉与瘤夹关系

Fig.2　Relationship between the artery and the aneurysm clip on CTA

表 1　CTA 不同重组技术显示载瘤动脉狭窄情况

Tab.1　Different reconstruction techniques of CTA show the stenosis of the aneurysm artery

CTA 不同重组技术	无狭窄	轻度狭窄	中度狭窄	重度狭窄	不能评价
常规 CTA MPR	56	4	2		
常规 CTA VR	49	8	1		4
减影 CTA VR	30	22	2	8	

注：4 例常规 CTA VR 不能评价血管狭窄情况；其中 2 例瘤夹位于大脑前动脉，管腔非常纤细、显示不清；另外 2 例由于瘤夹金属伪影图像显示不清

2.2　动脉瘤夹伪影对载瘤动脉观察的影响

动脉瘤夹长轴与图像横断面的夹角为（17.0 ± 12.8）（0~45）度，瘤夹伪影主要位于瘤夹长轴方向。瘤夹伪影Ⅰ级 49 例（79.0%），Ⅱ级 11 例（17.7%），Ⅲ级 2 例（3.2%）。

62 例患者中使用 1 个动脉瘤夹 53 例，2 个瘤夹 8 例，3 瘤夹 1 例。按瘤夹数量分为两个组，分别为 1 个瘤夹组 53 例和多个瘤夹组 9 例，运用两个独立样本的秩和检验分析瘤夹数量与瘤夹伪影等级的关系，结果无统计学差异（Z=1.736，P=0.082）。

2.3　瘤夹减影不全对 VR 图像的影响

由于检查时患者头部运动使得减影 CTA 图像不匹配，动脉瘤夹减影不全。减影图像上可见残留瘤夹影共 19 例（30.6%）。其中残留瘤夹靠近载瘤动脉 10 例（16.1%），对应减影 VR 图像血管轻度狭窄 3 例，其中只有 1 例常规 MPR 显示

血管轻度狭窄。残留瘤夹与载瘤动脉不连 9 例（14.5%）(图 3、图 4)，其所有病例对应减影 VR 血管不同程度狭窄、不连续，但其中也只有 1 例常规 MPR 显示血管轻度狭窄。



A. MPR 示载瘤动脉无狭窄



B. 常规 VR 示载瘤动脉无狭窄



C. 减影 VR 显示瘤夹不与血管相连，载瘤动脉狭窄、毛糙

图 3　瘤夹所致减影 VR 假性血管狭窄

Fig.3　Clip induced false blood vessel stenosis of the subtraction VR



A. 显示瘤夹周围伪影明显，但载瘤动脉通畅

B. 显示载瘤动脉不连续

图 4　前交通动脉瘤夹闭术后瘤夹所致减影 VR 血管不连续

Fig.4　Clip induced vessel discontinuity of the subtraction VR

3　讨　论

3.1　各种图像重组技术在颅内动脉瘤夹闭术后的运用价值

在常规 CTA 图像中，VR 可多角度观察瘤夹与载瘤动脉的关系，判断动脉夹处载瘤动通畅情况[11]。但对小的动脉瘤残留观察欠佳，瘤夹靠近颅底时也影响图像观察。本组数据发现当血管纤细或瘤夹伪影明显时，VR 不能准确评价血管通畅情况。MIP 可观察载瘤动脉有无狭窄、评价远端分支血管痉挛，但对动脉瘤夹旁血管显示差[12]，因此本研究未使用 MIP 来评价血管狭窄程度。

减影 CTA 图像中，已去除了动脉瘤夹影像，VR 可以直接观察载瘤动脉通畅情况、动脉瘤是否有残留[6]。但因受金属伪影、检查时患者运动的影响，减影后 VR 示部分载瘤动脉显示不清、管腔粗糙(图3)，甚至显示血管假性狭窄(图 4)。本研究结果显示减影 CTA 显示载瘤动脉狭窄与常规 MPR 的一致性差。

MPR 能减少金属伪影，增加了信噪比，其增强了金属夹周围结构的显像能力。工作站调节到更大窗宽可减少金属伪影的表现[13]。本组病例观察也发现，在 MPR 上增大宽窗可使邻近动脉瘤夹的结构更易显像，减少金属伪影影响，相对常规 VR 不受血管大小、金属瘤夹伪影的干扰，显示载瘤动脉狭窄、动脉瘤残留清楚、可靠。本组研究三种方法评价血管狭窄低度相关，而 MPR 与减影 VR 评价血管狭窄的一致性差，虽常规 VR 与 MPR 评价血管狭窄有一定一致性，但常规 VR 有 4 例图像不能评价载瘤动脉狭窄情况。所以，颅内动脉瘤夹闭术后 CTA 复查时，应多种重组方法结合评价载瘤血管狭窄、动脉瘤残留情况，同时注意 VR 可能导致的假阳性血管狭窄。

3.2　动脉瘤夹伪影对图像质量的影响

CT 扫描图像的伪影是与被扫描器官结构无关的异常影像，高密度金属夹可产物金属伪影，这些异常影像降低了图像质量，可影响到对图像分析与诊断。动脉瘤夹可产生的放射状伪影，表现为近瘤夹处放射状高低密度影。伪影严重时明显影响对载瘤动脉的观察以及对动脉瘤夹闭情况的评价[6,14]。该伪影受瘤夹密度、厚度及形状等影响。X 射线束的衰减与金属厚度成正比，瘤夹长轴与横轴图像夹角平均 17.0 度，所以瘤夹伪影主要产生在金属夹长轴方向，本研究发现 1 例后交通动脉瘤夹长轴方向伪影致同侧大脑前动脉 A1 段显示不连续。而瘤夹短轴方向伪影较少，载瘤动脉一般在瘤夹短轴方向，所以瘤夹伪影一般较少影响对载瘤动脉的观察。关于瘤夹伪影未见系统性报道，结合瘤夹伪影方向特点，所以本研究把瘤夹伪影分为 3 个等级。Ⅰ级和Ⅱ级伪影占大部分(96.8%)，对载瘤的动脉观察无明显影响，可准确评价载瘤动脉狭窄、动脉瘤残留。Ⅲ级伪影 2 例，瘤夹产生大量伪影，可清楚显示载瘤动脉狭窄情况，但不能明确有无动脉瘤残留。

理论上瘤夹越多，伪影就越明显，对载瘤动脉观察影响就越大，本研究发现 3 个瘤夹者图像伪影明显，不能清楚显示瘤夹旁血管。本组研究 62 例患者中使用 1 个动脉瘤夹 53 例，2 个及 3 个瘤夹 9 例。秩和检验分析瘤夹数量与瘤夹伪影等级的关系，结果显示无统计学意义。可能的原因有：病例数量不够，2 个瘤夹还不足以引起伪影的明显变化。这还需要进一步研究。

因植入多个动脉瘤夹和钴合金瘤夹引起较多的金属伪影，从而影响对术后的评价[14]，本组研究所用瘤夹为钛合金，其中 2 例明显伪影，不能明确有无动脉瘤残留，此时可行 3D-DSA 检查。优化扫描参数也可减少钛夹伪影对周围组织的影响[8]。随着 CT 技术的发展，越来越多去除金属伪影的方法运用于临床[8,15-17]，特别是双能 CT 可以明显减少动脉瘤夹的金属伪影[8,18]，但在 CTA 上减少颅内动脉瘤夹、栓塞物伪影的方法还需要进一步探索。

3.3 运动所致的减影伪影对图像质量的影响

虽扫描时对患者头部进行制动，但部分患者仍因为运动产生减影伪影，由于两次扫描动脉瘤夹位置不匹配，从而使减影 CTA 有瘤夹残留。研究中发现残留瘤夹与载瘤动脉相连时，其对 VR 图像评价载瘤动脉狭窄影响不大。当残留瘤夹与载瘤动脉不连时，其严重影响对血管狭窄的评价。

由于运动所致瘤夹位置不匹配、瘤夹产生的金属伪影，减影时减掉了血管图像，在减影 CTA 图像上表现为动脉夹减影不全，邻近载瘤动脉边缘毛糙、管腔局部缺损、管腔狭窄、血管不连续（图 3、图 4）。特别是当残留瘤夹与载瘤动脉不连时，更容易出现血管狭窄、血管不连续。为了减少运动所致的减影不全，需要两次扫描时减少患者头部运动非常重要。虽然减影 CTA 可去除瘤夹影像，更能方便观察载瘤动脉狭窄、动脉瘤残留情况，但是其伪影非常明显。所以，当瘤夹短轴方向出现伪影或瘤夹减影不全时，特别是当减影后残留瘤夹与载瘤动脉不相连，减影图像不能作为评价载瘤动脉狭窄、动脉瘤残留以及动脉瘤复发的参考依据，需要结合常规 CTA 进行观察。

总之，减影 CTA 可以快速、有效为动脉瘤夹闭术后提供重要信息，可作为其术后随访的首选检查方法，而常规 CTA 与减影 CTA 各具优点。动脉瘤夹伪影及运动所致的瘤夹减影不全对图像质量有明显影响，在对动脉瘤夹闭术后评价时需 VR、MPR 各图像重组技术结合运用，从而提高准确性。

参 考 文 献

[1] Lv F,Li Q,Liao J,et al. Detection and Characterization of intracranial aneurysms with dual-energy subtraction CTA:comparison with DSA [J]. Acta Neurochir Suppl, 2011, 110(Pt 2):239-245.

[2] 蔡烨琰，孙晓川. CTA 成像技术在颅内动脉瘤中的应用及最新研究进展[J]. 中国医学创新, 2015(11):150-152.

[3] 刘善平. 64 层 CTA-MIP、CTA-VR 与 3D-DSA 对颅内动脉瘤诊断价值的对比研究[J]. 临床放射学杂志，2012，31(1)：21-23.

[4] 郑 超，孙晓川. 3D-CTA 在颅内动脉瘤诊治中的价值[J]. 重庆医科大学学报，2009，34(6)：756-759.

[5] 吕发金，张丽娟，房文皓，等. 减影 CTA 和 64 层 VCTDSA 对颅内动脉瘤诊断价值的比较[J]. 重庆医科大学学报，2008，33(10)：1222-1226.

[6] 张宗军，朱宗明，贾传海，等. 去骨减影 3D-CTA 在脑动脉瘤夹闭术后评估中的应用价值[J]. 临床放射学杂志，2009，28(5)：704-707.

[7] 夏湘平，孙晓川，何朝晖，等. CT 血管成像在动脉瘤夹闭术后随访中的应用及进展[J]. 中国脑血管病杂志，2012，9(2)：103-107.

[8] 付雨菲，王 弘，邱晓明，等. 双能量 CT 单能谱成像技术在颅内动脉瘤夹闭术后的应用[J]. 临床放射学杂志，2015，34(5)：813-817.

[9] Thaker NG,Turner JD,Cobb WS,et al. Computed tomographic angiography versus digital subtraction angiography for the postoperative detection of residual aneurysms:a single-institution series and meta-analysis[J]. J Neurointerv Surg,2012,4(3):219-225.

[10] Kunert P,Prokopienko M,Gola M,et al. Assessment of long-term results of intracranial aneurysm clipping by means of computed tomography angiography[J]. Neurol Neurochir Pol,2013,47(1):18-26.

[11] 孙志强，陈信坚，陈友三，等. 320 排动态容积 CT 在颅内动脉瘤术后评价中的应用[J]. 放射学实践，2012，27(11)：1183-1186.

[12] 陈洪亮，曹跃勇，裴礼模，等. 64 层螺旋 CT 减影与未减影技术对颅内动脉瘤术后评价[J]. 海南医学，2010，21(11)：88-90.

[13] Saremi F,Pourzand L,Krishnan S,et al. Right atrial cavotricuspid isthmus:anatomic characterization with multi-detector row CT[J]. Radiology,2008,247(3):658-668.

[14] Psychogios MN,Wachter D,Mohr A,et al. Feasibility of flat panel angiographic CT after intravenous contrast agent application in the postoperative evaluation of patients with clipped aneurysms[J]. AJNR Am J Neuroradiol,2011,32(10):1956-1962.

[15] 李庆亮，闫 镔，孙红胜，等. X-CT 金属伪影校正方法综述[J]. CT 理论与应用研究，2011，20(1)：131-140.

[16] 刘思伟，董 硕，白 玫，等. CT 图像金属伪影的处理方法[J]. 中国医学装备，2014，11：77-82.

[17] 李昊翔，朱 凯，孙重阳，等. 宝石能谱 CT 在减少金属伪影方面的应用进展[J]. 中国医药导报，2015(11)：42-45.

[18] Fahrendorf DM,Goericke SL,Oezkan N,et al. The value of dual-energy CTA for control of surgically clipped aneurysms[J]. Eur Radiol, 2011,21(10):2193-2201.

（责任编辑：张辉洁）