



## 颅内动脉瘤栓塞术后能谱CTA联合MAR的临床研究

颜钦文, 王宇翔, 张俊, 贺兰, 胡岗, 熊敏超, 秦君翔, 袁学刚

### Clinical Value of Spectral Imaging Combined with MAR for CTA after Embolization of Intracranial Aneurysms

YAN Qinwen, WANG Yuxiang, ZHANG Jun, HE Lan, HU Gang, XIONG Minchao, QIN Junxiang, and YUAN Xuegang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.035>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 能谱CT最佳单能量技术优化头颈部CTA图像质量的研究

Spectral CT with Optimal Monochromatic Energy to Improve CTA Image Quality of Head and Neck

CT理论与应用研究. 2018, 27(6): 719–726

#### 颅内动脉瘤破裂风险评估研究进展

Research Progress in Risk Assessment of Ruptured Intracranial Aneurysms

CT理论与应用研究. 2017, 26(1): 121–128

#### 能谱CT单能量成像结合MAR技术降低金属植入物伪影的体模研究

Utility of Spectral CT Monochromatic Imaging with Metal Artifacts Reduction (MAR) for the Reduction of Metal Artifacts of Embolization Coil Implants

CT理论与应用研究. 2019, 28(5): 529–539

#### 能谱CT在肝脏富血供病变中的应用和研究进展

Application and Research Progress of Spectral CT in Hypervascular Hepatic Lesions

CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 253–262

#### 基于能谱CT的脾脏相关参数与食管静脉曲张程度的研究

Study of the Association between Spleen-related Parameters and the Degree of Esophageal Varices Using Dual Energy CT

CT理论与应用研究. 2019, 28(5): 593–600

#### 能谱CT最佳单能量成像在胃底静脉曲张出血内镜术前的应用价值

The Value of Optimal Monochromatic Spectral CT Imaging in Gastric Variceal Bleeding before Endoscopic Treatment

CT理论与应用研究. 2021, 30(5): 603–609



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

颜钦文, 王宇翔, 张俊, 等. 颅内动脉瘤栓塞术后能谱 CTA 联合 MAR 的临床研究[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2024, 33(2): 182-188. DOI:10.15953/j.ctta.2023.035.

YAN Q W, WANG Y X, ZHANG J, et al. Clinical Value of Spectral Imaging Combined with MAR for CTA after Embolization of Intracranial Aneurysms[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(2): 182-188. DOI:10.15953/j.ctta.2023.035. (in Chinese).

# 颅内动脉瘤栓塞术后能谱 CTA 联合 MAR 的临床研究

颜钦文<sup>a</sup>, 王宇翔<sup>a</sup>, 张俊<sup>a</sup>, 贺兰<sup>a</sup>, 胡岗<sup>a</sup>, 熊敏超<sup>a</sup>, 秦君翔<sup>b</sup>, 袁学刚<sup>b</sup>

鄂州市中心医院 a) 医学影像科; b) 神经外科, 湖北 鄂州 436000

**摘要:** 目的: 评价颅内动脉瘤栓塞术后能谱 CTA 联合去金属伪影技术 (MAR) 的应用价值。方法: 收集 37 例颅内动脉瘤栓塞术后需行能谱头颈 CTA 检查患者的 CT 原始数据, 分别重建出 70~140keV 单能级图像、120kVp-like 混合能量图像及 70~140keV MAR 处理图像和 120kVp-like MAR 图像; 感兴趣区 (ROI) 放置在伪影最严重层面的线圈附近, 测量 CT 值及标准差 (SD), 计算伪影指数 (AI) 及信噪比 (SNR); 在主观分析方面, 由两名诊断医生采用 Likert 5 分量表法对所有图像的伪影程度和血管显示能力进行评估; 比较 MAR 组和非 MAR 组图像的主观评分和客观参数。采用 Wilcoxon 秩和检验、配对样本 *t* 检验及独立样本 *t* 检验比较各组图像之间的差异。结果: 8 组单能级图像上, MAR 图像的 AI 明显低于非 MAR 图像; 在 80~110keV 条件下, MAR 图像 SNR 高于非 MAR 组, 差异具有统计学意义; 相同 keV 下, 与非 MAR 组相比, MAR 组图像的伪影评分及周围血管显示主观评分得分均更高。对于非 MAR 处理图像, AI 值与周围血管显示评分在植入不同直径弹簧圈的患者图像上没有统计学差; 对于 MAR 图像, 较大直径弹簧圈组 (>8.79mm) 患者图像的 AI 值明显高于常规直径组, 而周围血管显示主观评分明显低于常规直径组。结论: 能谱 CTA 成像联合 MAR 可有效减少颅内动脉瘤栓塞植入物伪影, 改善周围血管显示, 对于小直径的弹簧圈 MAR 减少伪影效果最为显著。

**关键词:** 体层摄影术; X 线计算机; 能谱成像; 颅内动脉瘤栓塞术; 金属伪影

DOI:10.15953/j.ctta.2023.035 中图分类号: R814 文献标识码: A

血管内弹簧圈栓塞术逐渐成为治疗颅内动脉瘤的主流治疗策略<sup>[1]</sup>, 头颈 CT 血管成像 (computed tomography angiography, CTA) 因其无创性常被用于颅内动脉瘤栓塞术后复查<sup>[2]</sup>, 但弹簧圈造成的严重金属伪影会降低图像质量, 影响载瘤血管及周围血管情况的评估。既往研究表明能谱 CT 在不同 keV 条件下联合金属伪影校正 (metal artifact reduction, MAR) 技术可有效地减少脊柱金属物伪影<sup>[3-4]</sup>。尽管有研究表明单能图像和 MAR 的单独使用对于头颈 CTA 的图像质量有较大提升, 但少有研究探讨能谱 CTA 成像联合 MAR 在颅内动脉瘤栓塞术后的应用价值, 尤其是对于植入不同直径弹簧圈的情况甚少涉及。

本研究旨在探讨能谱 CTA 联合 MAR 技术对颅内动脉瘤栓塞术后植入有不同直径弹簧圈患者复查的应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

本研究收集 2020 年 7 月至 2022 年 8 月行头颈能谱 CTA 成像者 37 例。所有患者均经数字减影血管造影 (digital subtraction angiography, DSA) 证实为颅内动脉瘤者且已接受弹簧圈栓塞术, 男性 15 例, 女性 22 例, 平均年龄为 (61.0 ± 5.2) 岁。37 例患者植入弹簧圈平均直径为 (8.79 ± 3.63) mm, 其中最大者为 14.00 mm, 最小者为 5.20 mm。

根据中位数原则, 以 8.79 mm 为界, 将患者分为常规直径组 (≤8.79 mm, *n* = 19) A 组及直径较大组 (>8.79 mm, *n* = 18) B 组。

本研究均取得患者同意并签署知情同意书。

## 1.2 扫描方案

采用 GE Revolution 256 排 CT 扫描仪 GSI 模式完成头颈能谱 CTA 检查。扫描范围自主动脉弓至颅顶。扫描参数：管电压 80/140 kVp 瞬时切换，管电流 375 mA，准直器宽度 80 mm，螺距 0.992 : 1，转速 0.6 s/r，扫描层厚 5 mm，使用 ASiR-V 60% 进行图像重建。

使用自动触发扫描技术，将监测 ROI 置于颈总动脉分叉部或颈内动脉颈段，触发阈值设置为 100 HU，当 ROI 达到阈值后，延迟 3 s 开始扫描。造影剂注射方案：经肘静脉以 4.5 mL/s 流率注入 60 mL 碘帕醇 (370 mgI/mL)，随后以相同流速注入 20 mL 生理盐水。

## 1.3 图像分析

将原始数据导入 GE AW4.7 后处理工作站。对于单个病例，分别生成 8 组 70~140 keV 联合 MAR 图像 (间隔 10 keV) 和单能非 MAR 图像，120 kVp-like 混合能量图像和 MAR 处理的 120 kVp-like 图像。对图像进行容积再现、多平面重建、最大密度投影、曲面重建等后处理。

### 1.3.1 客观测量

于 120 kVp-like 轴位图像上测量获得弹簧圈的最大直径，记录作为植入弹簧圈直径。分别于弹簧圈附近伪影最严重区域 (区域 a) 及同层未受伪影影响的脑实质区域 (区域 b) 放置 ROI，并将 ROI 复制到各能级图像及 120 kVp-like 图像相同位置，记录各 ROI 的衰减值 (CT 值) 及其标准差 (standard deviation, SD)，计算出伪影指数 (artifact index, AI) 及信噪比 (signal to noise ratio, SNR)，其中  $AI = (SD_a^2 - SD_b^2)^{1/2}$ ， $SD_a$  为区域 a 内 ROI 的标准差值， $SD_b$  为区域 b 内 ROI 的标准差值； $SNR = CT_{ROI}/SD_{ROI}$ ， $CT_{ROI}$ 、 $SD_{ROI}$  分别为感兴趣区域的 CT 值和 SD 值。

### 1.3.2 主观评价

所有主观评价均设定窗宽、窗位分别为 800 HU 和 240 HU。由两名具有 3 年以上神经影像学诊断经验的主治医师在对图像重建信息未知的情况下以 Likert 5 分量表法独立评估伪影严重程度及周围血管显示情况，评分标准如下。

伪影去除评分标准：5 分，伪影极少或无伪影；4 分，轻度伪影；3 分，中度伪影；2 分，较多伪影；1 分，严重伪影。血管显示能力：5 分，周围血管显示清晰，可明确诊断；4 分，周围血管显示较清晰，不影响诊断信心；3 分，周围血管显示受到较重影响，尚可诊断；2 分，周围血管受到严重影响，难以诊断；1 分，周围血管显示不清，无法诊断。评分  $\geq 3$  分为满足临床诊断需求。对于有分歧的图像通过协商讨论达成一致。

## 1.4 统计学分析

采用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析。采用科尔莫戈洛夫-斯米诺夫检验对连续变量进行正态性检验；对同一能量下或 120 kVp-like 经/无 MAR 处理的图像比较采用配对  $t$  检验或 Wilcoxon 秩和检验。

采用独立样本  $t$  检验比较不同弹簧圈直径分组图像的客观参数和主观评分；采用 Kappa 分析评估观察者之间的一致性， $\kappa \geq 0.8$  为一致性良好。 $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 客观参数

8 组单能级及 120 kVp-like 的 MAR 处理或非 MAR 图像的 AI 及 SNR 结果见表 1。随着 keV 增加，单能级 MAR 图像 AI 明显减低。在相同 keV 条件下，MAR 图像 AI 明显低于非 MAR 图像。在相同 keV 条件下，MAR 组图像 SNR 均高于非 MAR 组，但仅在 80~110 keV 条件下两组差异有统计学意义。

表 1 MAR 图像与非 MAR 图像的伪影指数与信噪比比较  
Table 1 Comparison of artifact index and signal to noise ratio between MAR and non-MAR images

电压	AI		P	SNR		P
	MAR 组	非 MAR 组		MAR 组	非 MAR 组	
70 keV	49.67 ± 67.19	112.04 ± 53.18	0.014	-2.74 ± 2.27	-4.20 ± 3.13	0.164
80 keV	45.91 ± 67.05	100.32 ± 52.39	0.012	-2.91 ± 2.64	-4.82 ± 3.90	0.009
90 keV	41.91 ± 61.17	96.48 ± 47.02	0.009	-3.08 ± 2.85	-4.57 ± 2.93	0.011
100 keV	36.97 ± 51.77	93.45 ± 44.13	0.014	-3.21 ± 3.04	-4.70 ± 3.10	0.034
110 keV	36.45 ± 52.85	94.59 ± 47.65	0.016	-3.26 ± 3.16	-4.56 ± 3.06	0.044
120 keV	36.22 ± 53.74	93.46 ± 48.67	0.017	-3.24 ± 3.20	-4.61 ± 3.25	0.050
130 keV	36.01 ± 54.51	92.14 ± 49.39	0.017	-3.26 ± 3.27	-4.69 ± 3.44	0.050
140 keV	35.96 ± 55.17	91.30 ± 50.16	0.018	-3.25 ± 3.28	-4.76 ± 3.63	0.055
120 kVp-like	47.20 ± 70.50	110.10 ± 55.9	0.015	-3.19 ± 2.40	-4.51 ± 3.63	0.059

注: MAR 为去金属伪影; AI 为伪影指数; SNR 为信噪比。

对于不同直径线圈植入患者图像, 无论是否进行 MAR 处理, B 组患者 AI 值均高于 A 组, SNR 均低于 A 组, 且两组差异在 MAR 图像的 AI 值上有统计学意义, 结果见表 2。

表 2 植入不同直径弹簧圈的患者 CT 图像质量比较  
Table 2 Image quality comparison among CT images of patients implanted with coils of different diameters

参数	组别		P
	A 组 (≤ 8.79 mm)	B 组 (> 8.79 mm)	
AI (MAR)	22.72 ± 16.02	79.91 ± 108.18	0.011
AI (非 MAR)	108.88 ± 43.15	111.84 ± 81.17	0.195
SNR (MAR)	-2.00 ± 2.32	-4.79 ± 1.57	0.124
SNR (非 MAR)	-2.62 ± 1.25	-7.04 ± 4.54	0.068
伪影评分 (MAR)	4.40 ± 0.23	3.70 ± 0.53	0.093
伪影评分 (非 MAR)	3.28 ± 0.10	3.10 ± 0.10	0.830
周围血管显示 (MAR)	4.55 ± 0.17	3.43 ± 0.58	0.032
周围血管显示 (非 MAR)	3.25 ± 0.37	3.10 ± 0.10	0.131

注: MAR 为去金属伪影; AI 为伪影指数; SNR 为信噪比。

## 2.2 主观评价结果

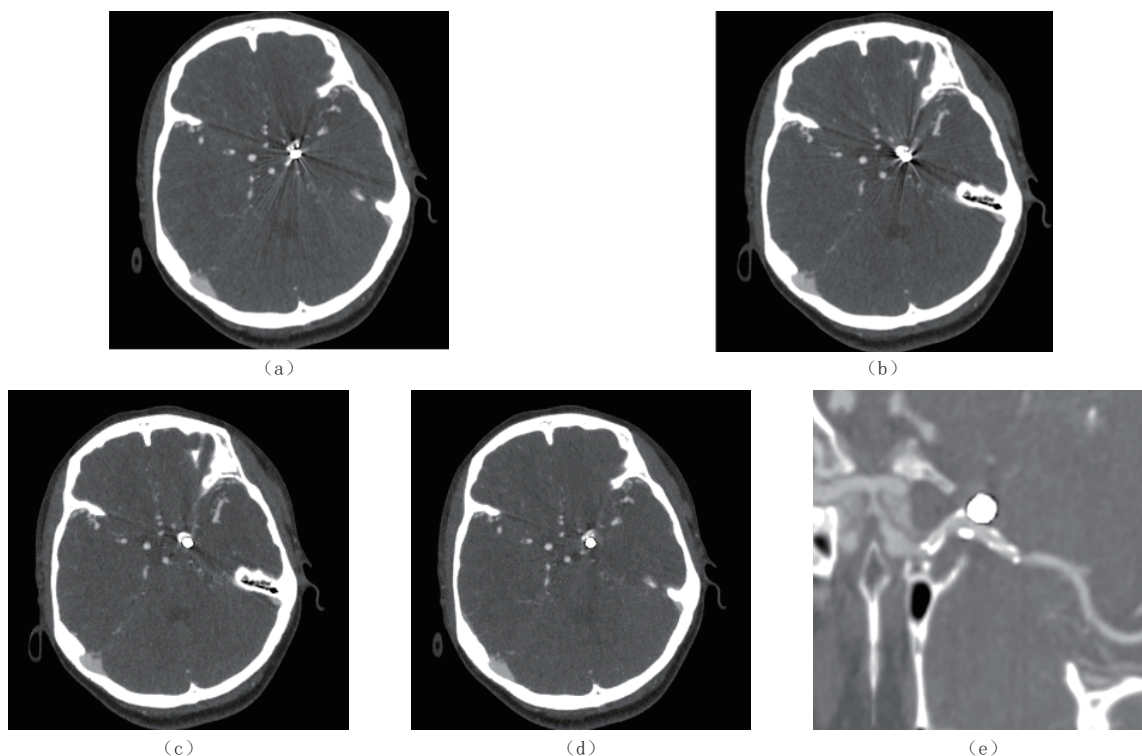
8 组单能级及 120 kVp-like 的 MAR 处理或非 MAR 图像的主观评分结果见表 3。两名观察者一致性良好 ( $\kappa = 0.82$ )。相同 keV 条件下, MAR 组图像伪影评分与血管显示能力得分均高于非 MAR 组, 差异具有统计学意义。随着 keV 的增加, MAR 及非 MAR 图像伪影减轻, 评分增加, 而对于周围血管显示, 评分呈先升高再下降的趋势。

如图 1 所示, 120 kVp-like 非 MAR 图像上, 金属伪影明显影响周围血管的显示 (图 1(a) 和图 1(b))。在 120 kVp-like 的 MAR 处理轴位及曲面重建图像 (图 1(c) ~ 图 1(e)) 上, 金属植入物伪影明显减轻, 周围血管显示情况明显改善。此外, 对于不同直径线圈植入患者图像, 无论是否进行 MAR 处理, B 组患者伪影评分和血管显示能力评分均低于 A 组, 其中周围血管显示主观评分在两组之间具有统计学差异 (表 2)。

## 3 讨论

颅内动脉瘤栓塞术是治疗颅内动脉瘤的重要方法, 预后较差时极易引起死亡, 因此及时进行术后复查对颅内动脉瘤患者意义重大。CT 具有快速、非侵入性、三维显示空间解剖结构等优势, 但图

像质量容易受到植入的弹簧圈、动脉瘤夹等产生的金属伪影的影响，而阻碍影像医生的正确判断。



注：(a)和(b)为120kVp-like非MAR图像(血管窗)，显示弹簧圈周围伪影较重，无法准确判定弹簧圈与邻近血管的关系；(c)和(d)为120kVp-like MAR图像(血管窗)，弹簧圈周围伪影明显减轻，可清晰显示弹簧圈及周围血管；(e)为120kVp-like联合MAR血管曲面重组图像，清晰显示后交通动脉起始部的弹簧圈，邻近血管未见明显狭窄及瘤样扩张。

图 1 典型病例。女，49岁，左侧颈内动脉瘤术后

Fig.1 Scheme diagram of a representative case. Female, 49 years old, after surgery for left internal carotid aneurysm

表 3 MAR 图像与非 MAR 图像的主观图像质量评分比较

Table 3 Comparison of subjective image quality scores between MAR and non-MAR images

电压	伪影评分		P	周围血管显示评分		P
	MAR 组	非 MAR 组		MAR 组	非 MAR 组	
70 keV	3.76 ± 0.53	3.01 ± 0.34	0.009	3.87 ± 0.64	3.03 ± 0.76	0.009
80 keV	3.90 ± 0.53	3.13 ± 0.10	0.005	3.93 ± 0.60	3.11 ± 0.22	0.007
90 keV	4.07 ± 0.48	3.24 ± 0.15	0.001	4.04 ± 0.67	3.19 ± 0.28	0.009
100 keV	4.20 ± 0.51	3.32 ± 0.18	0.001	4.10 ± 0.71	3.24 ± 0.31	0.011
110 keV	4.33 ± 0.46	3.43 ± 0.15	<0.001	4.06 ± 0.66	3.23 ± 0.31	0.010
120 keV	4.43 ± 0.46	3.50 ± 0.16	<0.001	3.97 ± 0.62	3.19 ± 0.24	0.014
130 keV	4.47 ± 0.41	3.61 ± 0.16	<0.001	3.88 ± 0.56	3.17 ± 0.21	0.010
140 keV	4.54 ± 0.42	3.67 ± 0.14	<0.001	3.77 ± 0.51	3.10 ± 0.15	0.008
120kVp-like	4.10 ± 0.51	3.20 ± 0.13	0.001	4.10 ± 0.70	3.19 ± 0.28	0.011

注：MAR 为去金属伪影。

金属伪影是由多种原因共同导致的，包括光子饥饿、射线硬化、散射、部分容积效应、欠采样和患者运动<sup>[5]</sup>。Mamourian 等<sup>[6]</sup>发现常规 CT 薄层扫描联合迭代重建技术可明显降低金属伪影的影响。针对原始投影数据或图像信息提出的去金属伪影算法 (MAR, O-MAR 或 SEMAR)，已被研究证实其是减少金属伪影通用且有效的技术<sup>[7-8]</sup>。能谱 CT 获取的上百个单能级图像，不仅优化图像质量还可选择最佳单能级图像，从而减少金属伪影，研究表明 50~70 keV VMI 图像对于颅内动脉瘤栓塞术后 CT 平



扫中减轻金属伪影有较好效果<sup>[9-10]</sup>。既往研究报道能谱 CT 单能量成像联合 MAR 或 O-MAR 技术不仅可以有效减少金属伪影,还可提高金属植入物及周围组织结构的清晰度<sup>[11-13]</sup>。

然而,现有研究对于能谱 CTA 成像联合 MAR 在颅内动脉瘤栓塞术后的应用价值,尤其是对于植入不同直径弹簧圈后对血管的显示情况甚少涉及。

本研究将能谱单能量成像与 MAR 技术结合,探究其对植入不同直径弹簧圈的颅内动脉瘤术后患者 CTA 复查的价值。结果显示,所有单能 MAR 图像质量均优于同能级非 MAR 图像,且适当能级的单能 MAR 图像具有比单能非 MAR 或混能 MAR 图像更好的图像质量;此外,对于直径小于 8.79 mm 的弹簧圈, MAR 处理效果最好。研究结果证明能谱与 MAR 结合对于颅内动脉瘤术后复查的临床价值,也有助于进一步探索 MAR 技术的适用范围。

本文研究发现 100 keV 是进行颅内动脉瘤栓塞术后 CTA 观察弹簧圈附近血管的最佳单能量,这与付雨菲等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。无论是否经过 MAR 处理,随着能级升高,金属伪影逐渐减轻,而血管显示能力则呈现先升高后降低的趋势,在 100 keV 处达到峰值。对于金属伪影,低能 X 射线穿透能力较差,硬化伪影较重,而随着能级提升,高能 X 射线穿透能力较强,图像金属伪影能得到明显改善。而对于血管显示能力,金属伪影和血管的对比度是需要共同考虑的因素<sup>[15-16]</sup>,低能图像 CT 值高,血管对比度高,但伪影严重,高能图像金属伪影轻,但血管对比度低,在 100 keV 处伪影和对比度之间达到了平衡,综合显示效果最佳。也有研究显示 50~80 keV 是颅内动脉瘤栓塞术后最佳的成像单能量<sup>[17-18]</sup>,这可能与扫描方式(平扫或造影剂增强扫描)、图像评估方法(关注脑实质或血管显示能力)以及弹簧圈直径、材料有关。

使用 MAR 技术后,无论单能量还是混合能量图像,金属伪影都得到了明显改善,SNR 和血管显示能力提高,图像质量提升,这与既往体模和临床研究结果一致<sup>[19]</sup>。本文使用的 MAR 技术使用相邻投影数据或使用修正后的先验图像将金属物体产生的含金属伪影的投影数据替换为合成投影数据。其原理:首先识别投影中的损坏样本,使用高阶插值生成合成投影,然后反向投影生成第一阶段 MAR 图像;随后利用复杂的信号处理技术在分割之前处理第 1 阶段 MAR 图像,生成先验图像并进行正投影以生成合成数据替换损坏的投影样本;最后使用原始投影数据和修复投影的组合生成最终校正投影。这种 MAR 技术可有效揭示隐藏在金属附近伪影下方的解剖细节<sup>[20]</sup>。因此,也有研究表明 MAR 技术在脊柱、关节手术后可有效消除金属植入物产生的伪影,提高周围组织显示能力<sup>[3]</sup>。

然而, MAR 技术的适用范围仍然值得进一步探究。正如本文研究所示,对于动脉瘤栓塞术后复查, MAR 对于不同直径的弹簧圈,其金属伪影去除效果不同。与本文相似,研究发现对于直径更小的金属植入物,去金属伪影算法(O-MAR)效果更好,但该植入物的直径分组为 5 mm<sup>[21]</sup>。也有研究表明, MAR 技术对于金属的形状要求较高,对于形状较为规则的金属去伪影效果较好,但对于结构复杂、形状不规则的金属则效果不大理想,这是插值校正的局限性<sup>[22-23]</sup>。此外,对于联合 MAR 技术与单能量图像协同去金属伪影的应用,也应谨慎选择能级,对于不同植入部位和不同材质的植入物,其最佳单能量可能不一致,如对于髋关节植入物 CoCrMo 合金最佳单能量在 110~120 keV,而对于金属的牙科植入物最佳单能量在 70~110 keV<sup>[24]</sup>,因此推断对于临近颅骨或脑深部可能会有不同的最佳单能量与 MAR 的结合,但现有研究对于颅内动脉瘤栓塞术后弹簧圈植入部位对去金属伪影效果的影响极少涉及。

本研究不足:研究对象样本量不大;本研究仅关注弹簧圈周围血管显示情况,未评价其诊断效能; MAR 技术降低金属植入物伪影的效果可能受金属材质、植入部位影响,本研究尚未进行深入探讨。

综上所述,能谱 CTA 成像联合 MAR 技术可有效减少颅内动脉瘤栓塞术后弹簧圈植入物伪影,改善周围血管显示情况,尤其是对于直径小于 8.79 mm 的弹簧圈,去除金属伪影效果较好。

## 参考文献

- [1] GOERTZ L, LIEBIG T, PENNIG L, et al. Propensity score-adjusted analysis on stent-assisted coiling

- versus coiling alone for ruptured intracranial aneurysms[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 21742.
- [2] YU A Y, ZERNA C, ASSIS Z, et al. Multiphase CT angiography increases detection of anterior circulation intracranial occlusion[J]. *Neurology*, 2016, 87(6): 609-616.
- [3] 李杰, 袁源, 陈永明, 等. MAR 技术去除脊柱金属物伪影的临床应用研究[J]. *临床放射学杂志*, 2020, 39(6): 1180-1184.
- LI J, YUAN Y, CHEN Y M, et al. Clinical application of MAR technique in removing metal artifacts in the spine[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2020, 39(6): 1180-1184. (in Chinese).
- [4] YU L, PRIMAK A N, LIU X, et al. Image quality optimization and evaluation of linearly mixed images in dual-source, dual-energy CT[J]. *Medical Physics*, 2009, 36(3): 1019-1024.
- [5] de MAN B, NUYTS J, DUPONT P, et al. Metal streak artifacts in X-ray computed tomography: A simulation study[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1999, 46(3): 691-696.
- [6] MAMOURIAN A C, PLUTA D J, ESKEY C J, et al. Optimizing computed tomography to reduce artifacts from titanium aneurysm clips: An in vitro study[J]. *Journal of Neurosurgery*, 2007, 107(6): 1238-1243.
- [7] HOSOI R, YASAKA K, MIZUKI M, et al. Deep learning reconstruction with single-energy metal artifact reduction in pelvic computed tomography for patients with metal hip prostheses[J]. *Japanese Journal of Radiology*, 2023, 41: 863-871.
- [8] YAZDI M, GINGRAS L, BEAULIEU L. An adaptive approach to metal artifact reduction in helical computed tomography for radiation therapy treatment planning: Experimental and clinical studies[J]. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2005, 62(4): 1224-1231.
- [9] ANDERSSON K M, NOWIK P, PERSLIDEN J, et al. Metal artefact reduction in CT imaging of hip prostheses: An evaluation of commercial techniques provided by four vendors[J]. *British Journal of Radiology*, 2015, 88(1052): 20140473.
- [10] MELLANDER H, FRANSSON V, YDSTROM K, et al. Metal artifact reduction by virtual monoenergetic reconstructions from spectral brain CT[J]. *European Journal of Radiology Open*, 2023, 10: 100479.
- [11] ZOPFS D, LENNARTZ S, PENNIG L, et al. Virtual monoenergetic images and post-processing algorithms effectively reduce CT artifacts from intracranial aneurysm treatment[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-10.
- [12] 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.
- [13] 李杰, 袁源, 王春杰, 等. 能谱 CT 去金属伪影 (MAR) 技术用于减低单髁关节置换物伪影[J]. *中国医学影像技术*, 2021, 37(1): 131-135.
- LI J, YUAN Y, WANG C J, et al. Energy spectrum CT metal artifacts reduction (MAR) for reducing artifacts of unilateral hip arthroplasty[J]. *Chinese Medical Imaging Technology*, 2021, 37(1): 131-135. (in Chinese).
- [14] 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, 5(34): 813-817.
- FU Y F, WANG H, QIU X M, et al. Application of dual energy monoenergetic CT technique in the evaluation of clipped intracranial aneurysms[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2015, 5(34): 813-817. (in Chinese).
- [15] PESSIS E, CAMPAGNA R, SVERZUT J M, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: Reduction of metal artifacts at CT[J]. *Radiographics*, 2013, 33(2): 573-583.
- [16] FERNANDEZ D M, ARMENTIA E S, FIORE A B, et al. The utility of dual-energy CT for metal artifact reduction from intracranial clipping and coiling[J]. *Radiologia*, 2018, 60(4): 312-319.
- [17] 赵艳娥, 宁辉, 郑玲, 等. 双能量 CT 虚拟单能谱成像技术在脑动脉瘤夹闭术后评估中的应用[J]. *放射学实践*, 2014, (9): 988-992.
- ZHAO Y E, NING H, ZHENG L, et al. The application of monoenergetic imaging in postoperative evaluation of the patients with intracranial aneurysm clipping using dual energy CT angiography[J]. *Radiology Practice*, 2014, (9): 988-992. (in Chinese).
- [18] 潘雪琳, 李真林, 程巍, 等. 双源 CT 单能谱成像技术减低颅内动脉瘤夹伪影的研究[J]. *放射学实践*, 2013, 28(12): 1212-1215.
- PAN X L, LI Z L, CHENG W, et al. Optimal monoenergetic imaging for reducing titanium clip metal artifacts in dual-energy computed tomography angiography[J]. *Radiology Practice*, 2013, 28(12): 1212-1215. (in Chinese).
- [19] 宁志光, 马国峰, 于远, 等. 宽体探测器 CT 多物质伪影降低技术对 CT 扫描图像质量的影响[J]. *中华放射学*

杂志, 2017, 51(10): 790-793.

NING Z G, MA G F, YU Y, et al. The effect of a multi-material artifact reduction algorithm in a wide-detector CT system to reduce the beam hardening artifacts in CT imaging[J], Chinese Journal of Radiology, 2017, 51(10): 790-793. (in Chinese).

- [20] DEBASHISH P, SHUQIN D, KAREN P, et al. Smart metal artifact reduction[J]. White Paper, GE Healthcare, 2016.
- [21] ZHENG H, YANG M, JIA Y, et al. A novel subtraction method to reduce metal artifacts of cerebral aneurysm embolism coils[J]. Clinical Neuroradiology, 2022, 32(3): 687-694.
- [22] ZHANG X, WANG J, XING L. Metal artifact reduction in X-ray computed tomography (CT) by constrained optimization[J]. Medical Physics, 2011, 38(2): 701-711.
- [23] BAL M, SPIES L. Metal artifact reduction in CT using tissue-class modeling and adaptive prefiltering[J]. Medical Physics, 2006, 33(8): 2852-2859.
- [24] WELLENBERG R, HAKVOORT E, SLUMP C, et al. Metal artifact reduction techniques in musculoskeletal CT-imaging[J]. European Journal of Radiology, 2018, 107: 60-69.

## Clinical Value of Spectral Imaging Combined with MAR for CTA after Embolization of Intracranial Aneurysms

YAN Qinwen<sup>a</sup>, WANG Yuxiang<sup>a</sup>, ZHANG Jun<sup>a</sup>, HE Lan<sup>a</sup>, HU Gang<sup>a</sup>,  
XIONG Minchao<sup>a✉</sup>, QIN Junxiang<sup>b</sup>, YUAN Xuegang<sup>b</sup>

a). Department of Medical Imaging; b). Neurosurgery department,  
Ezhou Central Hospital, Ezhou 436000, China

**Abstract:** Objective: To evaluate the application value of combining spectral imaging and metal artifact reduction (MAR) in head and neck CTA after the embolization of intracranial aneurysms. Methods: We collected 37 patients who experienced embolization of intracranial aneurysms then received spectral imaging of head and neck CTA. Monochromatic images with energy ranging from 70~140 keV, 120 kVp-like mixed energetic images, 70~140 keV MAR images, and 120 kVp-like MAR images were generated. The region of interest was placed on the area near the coil and with the most serious metal artifact. CT attenuation and standard deviation were measured, and artifact index (AI) and signal-noise ratio (SNR) were calculated. Two radiologists independently subjectively evaluated the metal artifact and the display of surrounding vessels using Likert 5 scales. The subjective scores and objective parameters between MAR and non-MAR images were compared. The Wilcoxon ranking test, paired sample t test, and independent sample t test were utilized to compare parameters between the groups. Results: MAR images had significantly lower AI than did non-MAR images for all eight monochromatic energies. When energies ranged from 80~110 keV, SNR was higher for MAR images than for non-MAR images, and the difference was statistically significant. With same energies, MAR images had higher artifact and vessel display scores than did non-MAR images. For non-MAR images, the different coil diameters did not make a statistical difference in AI and vessel display scores. For MAR images, a larger coil diameter (> 8.79 mm) led to higher AI and lower vessel display scores than did normal diameters ( $\leq 8.79$  mm). Conclusion: The combination of spectral imaging and MAR could effectively reduce the metal artifact of implants for the embolization of intracranial aneurysms and improve the surrounding vessel display. Moreover, the metal artifact reduction effect was more significant for the coils with smaller diameters.

**Keywords:** tomography; X-ray computed; spectral imaging; embolization of intracranial aneurysms; metal artifact



**作者简介:** 颜钦文, 男, 鄂州市中心医院医学影像科副主任医师, 主要从事 CT 技术及影像诊断研究, E-mail: 2156250173@qq.com; 熊敏超<sup>✉</sup>, 男, 鄂州市中心医院医学影像科主任医师, 湖北中医药大学兼职教授, 主要从事 CT、MR 影像诊断及比较影像学研究, E-mail: xmc3380@126.com。