· 影像技术 ·

10 s 团注对比剂方案联合 80 kV 管电压在颈动脉 CT 血管成像的应用

陈晓宇　曹国全　邓青山　张明月　杨运俊　王镇章
温州医科大学附属第一医院放射科 325000
通信作者：王镇章，Email：357379282@ qq.com

【摘要】　**目的**　探讨 80 kV 管电压联合个体化对比剂低剂量注射方案行颈动脉 CT 血管成像的可行性。**方法**　前瞻性纳入需要行颈部 CT 血管成像（CTA）检查的 136 名患者，采用完全随机区段法分成 A、B、C、D 4 组，A 组为 100 kV 15 s 团注常规组，53 例；其他 3 组为 80 kV 10 s 团注对照组，根据≤50 kg、50~70 kg、70~90 kg 体重分为 B、C、D 组，分别给予 20、25 和 30 ml 对比剂，B 组 20 例，C 组 38 例，D 组 25 例。比较 4 组的有效剂量（E）、图像质量主观评价和客观指标。**结果**　B、C、D 3 组的 E 分别为（1.85±0.91）、（1.89±1.08）和（2.14±1.27）mSv，显著低于 A 组的（5.66±0.56）mSv，差异有统计意义（$F=169.34$，$P<0.05$），B、C、D 组间两两比较差异无统计学意义（$P>0.05$）。4 组图像的主观评价和诊断效果差异无统计学意义（$P>0.05$）。A 组的颈总动脉 CT 值、信噪比（SNR）、对比噪声比（CNR）明显低于其他 3 组，差异均有统计意义（$F=14.90$、12.94、14.43，$P<0.05$），但所有颈动脉靶血管内 CT 值均在 250 HU 以上，均符合临床诊断要求。**结论**　80 kV 管电压 10 s 团注方案，可有效降低颈部 CTA 检查的辐射剂量和对比剂用量，而并不影响诊断效果。因此，该扫描方案可行且具有很大的临床应用价值。

【关键词】　颈动脉；　CT 血管成像；　对比剂；　辐射剂量；　管电压
基金项目：浙江省卫生创新人才项目（20161107）
DOI：10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.04.011

Application of 10 s contrast agent injection protocol combined with 80 kV tube potential in carotid artery CTA procedure

Chen Xiaoyu, Cao Guoquan, Deng Qingshan, Zhang Mingyue, Yang Yunjun, Wang Zhenzhang
Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325000, China
Corresponding author: Wang Zhenzhang, Email: 357379282@qq.com

【**Abstract**】　**Objective**　To investigate the feasibility of tube potential of 80 kV combined with personalized contrast agent protocol in carotid artery CT angiography (CTA). **Methods**　A total of 136 consecutive patients undergoing neck CTA were prospectively enrolled in this study. The patients were randomly divided into Groups A, B, C and D. Tube potential of 100 kV and 15 s contrast agent injection protocol was used for Group A (53 cases) as conventional group, while tube voltage of 80 kV and 10 s contrast agent injection protocol was used for Groups B, C and D as experimental groups, with the contrast agent dosages of 20, 25 and 30 ml used according to the body weights of ≤50 kg (Group B, 20 cases), 50-70 kg (Group C, 38 cases), and 70-90 kg (Group D, 25 cases), respectively. The subjective and objective evaluation results of image quality and the effective doses were compared among the four groups. **Results**　The effective doses in Groups B, C and D were 1.54±0.91, 1.89±1.08 and 2.14±1.27 mSv, respectively, significantly lower than that in Group A [(5.66±0.56) mSv] ($F=169.34$, $P<0.05$). The image quality of four groups met the requirements of clinical diagnosis. No significant differences were found in subjective evaluation and diagnostic efficacy of the four groups ($P>0.05$). The CT number of carotid artery, signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio of the neck region were significantly lower in Groups B, C and D compared with Group A ($F=14.9$, 12.94, 14.43, $P<0.05$). The CT numbers of target carotid vessel were all higher than 250 HU. **Conclusions**　The scanning protocol of low tube potential (80 kV) combined with 10 s contrast agent injection protocol could not only reduce the doses of radiation and contrast agent, but also preserve the diagnosis effect. Thus, this scanning protocol was feasible and valuable in clinical application.

【Key words】 Carotid artery; CT angiography; Contrast medium; Radiation dose; Tube voltage

Fund programs: Zhejiang Health Innovation Talent Project (20161107)

DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098.2021.04.011

颈部 CT 血管成像（CTA）是诊断颈部血管病变的常规影像检查方法[1]。研究表明，CT 相关辐射暴露的增加与癌症风险的增加有关[2]，对比剂的使用存在诱发对比剂肾病（CIN）的风险[3]。根据可合理达到尽可能低（ALARA）的辐射防护最优化原则[4]，应在满足影像诊断的前提下，提倡尽量使用低 kV；减少对比剂用量可能也是降低肾功能不全患者对比剂肾病（CIN）风险的理想方法[3]。100 kV 15 s 团注是目前本院行颈部 CTA 的常规方案，血管的强化效果会随着体重改变而改变[5]，颈胸段对比剂滞留引起的射线束硬化伪影依然是颈部 CTA 的最大困扰。本研究的目的是通过缩短对比剂注射持续时间及降低管电压来改善上述缺陷，同时通过改变对比剂注射流速来适当补偿体重对血管强化效果的影响，探索一种符合诊断要求的低用量低辐射的颈部个性化 CTA 检查方案。

资料与方法

1. 一般资料：前瞻性纳入在温州医科大学附属第一医院 2020 年 3 月至 2020 年 5 月拟行颈动脉 CTA 受检者共 136 例，男 96 例，女 40 例，年龄 33～86 岁，平均 64 岁。按例数不等的完全随机区段分组法，分成 A、B、C、D 4 组，A 组为 100 kV 15 s 团注常规组，53 例；B、C、D 3 组为 80 kV 10 s 团注对照组，参考对比剂用量的指导意见[6]，根据≤50、50～70、70～90 kg 体重分别给予 2、2.5 和 3 ml/s 的注射流速，总量分别为 20、25 和 30 ml，B 组 20 例，C 组 38 例，D 组 25 例。4 组患者的性别、年龄、身高差异均无统计学意义（$P>0.05$，表 1）。有以下情况患者予以排除：已知碘对比剂过敏者；严重的肾功能不全；哺乳期；体重超过 90 kg；不配合 CT 检查的患者等。该试验经医院伦理委员会批准（临床研究伦审 2020 第 159 号），所有受检者均签署知情同意书。

2. 扫描方法及对比剂注射方案：颈动脉 CTA 设备采用日本东芝 Aquilion one 320 排 640 层螺旋 CT 机，所有患者扫描范围自胸骨角水平至颅底前床突水平，扫描方向由足侧向头侧。采用双筒高压注射器（Stellant，美国 Medred 公司），经右侧肘正中静脉以注射对比剂（碘海醇，350 mgI/ml）。常规对比剂剂量 A 组扫描参数：碘对比剂注射速度 4 ml/s，注射时间 15 s，对比剂剂量 60 ml。采用对比剂跟踪触发技术，感兴趣区设于主动脉弓水平，触发阈值为 200 HU。到达阈值后延迟时间 3 s 后开始扫描。对比剂注射完毕后以相同的速率注射生理盐水 30 ml。B～D 组扫描参数：参考最近相关课题扫描方法[7]，采用 Sure Start 技术，观察 C4 椎体水平颈总动脉浓度变化，刚刚轻微强化时，手动触发扫描，大约 3 s 后曝光执行扫描。对个体对比剂注射完毕后以 3.5 ml/s 的速率注射生理盐水 45 ml。扫描参数设置：A 组管电压为 100 kV，设定智能 mA 扫描条件，准直器宽度 0.5×64 mm，螺距因子 0.828/螺距 53.0；B～D 组管电压为 80 kV，设定智能 mA 扫描条件，准直器宽度 0.5×64 mm，螺距因子 1.484/螺距 95.0。重建层厚 0.5 mm，层间距 0.5 mm，矩阵 512×512，视野

表 1　颈部 CTA 检查患者的基线特征（$\bar{x}\pm s$）

Table 1　Baseline characteristics of the study cohort in carotid CTA procedure（$\bar{x}\pm s$）

组别	例数	性别（男/女）	年龄（岁）	BMI（kg/m^2）	身高（cm）	体重（kg）
A 组	53	41/12	64.21±11.07	24.41±3.99	163.04±7.58	64.84±10.58
B 组	20	10/10	70.45±8.18	18.81±1.83	160.75±6.47	48.35±2.15
C 组	38	26/12	62.74±12.74	24.06±1.78	163.37±6.20	64.17±5.35
D 组	25	19/6	63.64±11.14	26.47±2.36	166.44±7.01	73.04±4.25
F 值		5.692[a]	2.241	26.867	2.606	66.31[b]
P 值		0.128	0.087	<0.05	0.054	<0.05

注：A 组. 对比剂剂量 60 ml，碘对比剂注射速度 4 ml/s；B 组. 对比剂剂量 20 ml，碘对比剂注射速度 2 ml/s；C 组. 对比剂剂量 25 ml，碘对比剂注射速度 2.5 ml/s；D 组. 对比剂剂量 30 ml，碘对比剂注射速度 3 ml/s。[a]χ^2 值；[b]H 值；BMI. 体质量指数；CTA. CT 血管成像

(FOV) 200 mm，X 射线管旋转速度 0.5 s/圈。

3. 图像后处理方法及图像评价：将所得原始数据导入 Vitrea Core 工作站，采用最大密度投影法（MIP）、多平面重组（MPR）、容积再现三维成像技术（VR）等后重建技术，重建颈动脉三维图像，并将重组后的图像上传至 PACS 系统。

主观评价：主观评分标准采用 4 分制对颈动脉 CTA 的动脉显示情况进行评价，由两名从事放射诊断工作 5 年的医师进行双盲主观评分。1 分：动脉显示不清或未显示，受锁骨下静脉伪影干扰严重，无法满足影像诊断；2 分：动脉轮廓显影模糊，与背景图像分界不清，分支显示不佳，受锁骨下静脉伪影较重，无法达到诊断标准；3 分：动脉轮廓显影清晰，受锁骨下静脉伪影干扰小，诊断可靠度较高；4 分：动脉轮廓显影锐利，细节显示清晰，与背景图像分界清，无锁骨下静脉伪影或锁骨下静脉伪影干扰很小。1~2 分为不符合临床诊断要求；3~4 分为符合临床诊断要求。

客观评价：由两位主治医师分别独立对颈部动脉 CTA 图像进行测量，所有数据均测量 3 次取平均值。在主动脉弓、颈总动脉起始处、颈内动脉颅内段起始处和胸锁乳突肌中份层面测量血管 CT 值（$SI_{血管}$）及标准差值（SD），两侧 CT 值和 SD 值取平均值。颈部胸锁乳突肌中份 CT 值（$SI_{背景}$）和 SD，作为颈部动脉的背景值（$SI_{背景}$和 $SD_{背景}$），用于计算颈部 CTA 对比噪声比 contrast noise ratio，CNR）及信噪比（signal noise ratio，SNR）。测量靶血管测量标准为测量区域面积的约 1/2，测量时尽量避开软斑块和钙化斑块，颈部血管和肌肉噪声选择两侧数据并计算平均值。计算图像对比噪声比 $CNR=(SI_{血管}-SI_{背景})/SD_{背景}$，$SNR=SI_{血管}/SD_{背景}$。

4. 辐射剂量指标：记录并计算受试者的扫描辐射剂量，每组资料的剂量长度乘积（dose-length product，DLP）和容积 CT 剂量指数（volume CT dose index，$CTDI_{vol}$）由 CT 机自动生成，根据 DLP 计算有效剂量（effective dose，E）：$E=DLP\times k$，k 值为组织权重因子，本研究 k 取 0.005 9 $mSv\cdot mGy^{-1}\cdot cm^{-1}$。

5. 统计学处理：采用 SPSS 24.0 软件进行统计分析，计量资料符合正态分布的用 $\bar{x}\pm s$ 描述，计数资料用频数和百分比描述。两组性别构成比较采取 χ^2 检验。非正态分布的数据采用 Kruskal-Wallis H 检验；呈正态分布、方差齐比较采用单因素方差分析。组间两两比较采用 *LSD* 法。两名高年资影像科医师主观图像质量的一致性用 Kappa 检验；Kappa 值>0.75 为一致性较好；Kappa 值在 0.40~0.75 之间为一致性一般；Kappa 值<0.40 为一致性较差。$P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

结　果

1. 图像质量主观评价的比较：两名医师对图像评估各项指标 Kappa 值均>0.75，具有较高的一致性。锁骨下静脉及上腔静脉残留对比剂的影响：4 组病例中，11 例产生了静脉伪影，一定程度上影响了同侧锁骨下动脉及颈动脉根部的观察，其中，A 组 8 例，B 组 0 例，C 组 1 例，D 组 2 例。不同对比剂剂量组扫描后的颈动脉轴位及重建图像质量评价及满足诊断。常规扫描对比剂剂量 A 组和个体化扫描低剂量对比剂组 B~D 组的图像质量均较好，与常规对比剂剂量组对比，差异无统计学意义（$P>0.05$），均能清晰显示颈动脉及其分支全程。各组图像均达到诊断要求。

2. 患者辐射剂量的比较：B、C、D 3 组的辐射剂量分别为（1.85±0.91）、（1.89±1.08）、（2.14±1.27）mSv，显著低于 A 组的（5.66±0.56）mSv，差异均有统计意义（$F=169.34$，$P<0.05$，表 2），B、C、D 组间两两比较差异无统计学意义（$P>0.05$）。

3. 图像的 CT 值、SNR 和 CNR 指标差异：4 组图像每段血管所测量的颈动脉 CT 值均在 250 HU 以上，均能满足诊断需求。常规扫描对比剂剂量 A 组和个体化扫描低对比剂剂量组（B、C、D 组）图像间的 CT 值、SNR、CNR 差异均有统计学意义（$F=14.9$、12.94、14.43，$P<0.05$，表 3）。其中根据上腔脉残留对比剂对图像的影响不同，A 组的 CT 值明显高于 B、C、D 组（$F=7.84$，$P<0.05$，表 3）；常规扫描 A 组的靶血管 CT 值、SNR、CNR 值均高于个体化扫描低剂量对比剂各组。各组间 *LSD* 法两两比较后，除 A 组与 D 组血管内 CT 值差异无统计学意义之外（$P>0.05$），A 组值与 B、C 组的血管内 CT 值之间差异均有统计学意义（$P<0.05$）；A 组与 B、C、D 组的 CNR、SNR 之间差异均有统计学意义（$P<0.05$）。

表 2 颈动脉 CTA 检查中 4 组的辐射剂量和图像质量的比较（$\bar{x}±s$）

Table 2 Comparison of radiation dose and image quality among four groups in carotid CTA procedure（$\bar{x}±s$）

组别	例数	$CTDI_{vol}$（mGy）	DLP（mGy · cm）	E（mSv）	质量评分
A 组	53	31.2±4.81	959.6±96.1	5.66±0.56	3.49±0.5
B 组	20	10.68±5.00	314.3±34.7	1.85±0.91	3.2±0.41
C 组	38	10.76±5.86	321.1±29.9	1.89±1.08	3.3±0.47
D 组	25	12.18±7.83	362±43.2	2.14±1.27	3.44±0.5
F 值		129.4	169.3	169.34	6.385[a]
P 值		<0.05	<0.05	<0.05	0.94

注：A 组. 对比剂剂量 60 ml，碘对比剂注射速度 4 ml/s；B 组. 对比剂剂量 20 ml，碘对比剂注射速度 2 ml/s；C 组. 对比剂剂量 25 ml，碘对比剂注射速度 2.5 ml/s；D 组. 对比剂剂量 30 ml，碘对比剂注射速度 3 ml/s。$CTDI_{vol}$. 容积 CT 剂量指数；DLP. 剂量长度乘积；E. 有效剂量；CTA. CT 血管成像；[a]H 值

表 3 4 组颈动脉 CTA 检查中客观图像质量的比较（$\bar{x}±s$）

Table 3 Comparison of objective image quality obtained among the four groups in carotid CTA procedure（$\bar{x}±s$）

部位	指标	A 组	B 组	C 组	D 组	F 值	P 值
主动脉弓	CT 值	411.9±64.5	331.2±84.4	360.8±69.6	407.1±76.6	7.33	<0.05
	SNR	52.1±19.8	30.3±15.0	35.1±17.7	41.3±18.5	9.80	<0.05
	CNR	40.7±16.0	22.2±11.6	26.5±14.1	32.3±14.4	11.14	<0.05
颈总动脉起始处	CT 值	550.4±104.0	392.1±101.0	450.1±96.4	504.6±95.8	14.90	<0.05
	SNR	71.0±29.1	35.7±16.3	44.1±23.0	53.3±27.8	12.94	<0.05
	CNR	59.6±25.4	27.3±13.1	35.5±19.2	43.4±23.5	14.43	<0.05
颈内动脉颅内段起始处	CT 值	516.4±148.0	341.9±91.2	405.2±89.3	452.4±83.6	13.40	<0.05
	SNR	65.0±24.5	30.6±12.3	39.6±20.7	47.3±26.3	15.73	<0.05
	CNR	65.0±24.5	22.4±9.5	31.0±17.1	38.5±22.2	17.84	<0.05
上腔静脉	CT 值	405.0±257.1	213.1±121.0	241.0±169.0	271.3±84.7	7.84	<0.05

注：A 组. 对比剂剂量 60 ml，碘对比剂注射速度 4 ml/s；B 组. 对比剂剂量 20 ml，碘对比剂注射速度 2 ml/s；C 组. 对比剂剂量 25 ml，碘对比剂注射速度2.5 ml/s；D 组. 对比剂剂量 30 ml，碘对比剂注射速度 3 ml/s。CNR. 对比噪声比；SNR. 信噪比；CTA. CT 血管成像；A、B、C、D 组分别为 53、20、38、25 例

讨　论

随着 640 层 MDCT 应用普及和推广，颈部 CTA 逐渐成为一种方便可行的血管成像技术，但高电压及大剂量碘对比剂的运用给患者增加了高辐射剂量和对比剂肾病等潜在的风险。因此，近年来 CTA 检查中在保证图像质量的情况下减少对比剂剂量和降低辐射剂量已成为研究热点。

颈部 CTA 血管成像效果的影响因素很多，除了扫描参数及患者因素外，对比剂剂量、注射流速、注射持续时间、对比剂团注和生理盐水的冲刷等因素影响也至关重要[8]。对比剂用量的多少与对比剂肾病的发生风险存在一定的相关性，对比剂用量低剂量对比剂化已经逐步成为 CTA 检查的一种趋势[3-4]。通过缩短对比剂注射持续时间来减少用量是最直接有效的方式，但过窄的注射时间窗无疑会大大增加对靶血管充盈峰值把握的难度。B、C、D 3 组通过靶血管对比剂初始到达时间去推测其达峰时间，利用顺血流方向同步追踪扫描，从而实现短时（10 s）团注对比剂在靶血管内精准把握，获得充盈饱满的血管图像，同时使对比剂用量却显著降低。低管电压更有利于碘对 X 射线的吸收衰减，其强化效果更加显著[9]，可有效补偿总量减少带来的强化值的下降，且有效剂量更低。同时，采用大螺距扫描方式，结果显示平均辐射剂量较 A 组显著减少。

患者的体质量对血管强化程度有着显著影响[10]。大部分血管 CTA 推荐采用 450 mgI/kg 的碘流率，30 s 的注射持续时间[6]，据此得出注射流速公式：对比剂注射流速 =（450 mgI · kg^{-1}/对比剂浓度×体重）/30 s，以碘海醇注射液为例，50 kg 体重患者可推荐的注射速率为约为 2.1 ml/s，70 kg 患者所得推荐速率为 3.0 ml/s。本研究将体质量分为<50 kg、50~70 kg、70~90 kg 3 组，尝试采用 2.0、2.5、3.0 ml/s 3 种对比剂注射速率来适当补偿体重对血管强化值的影响。结合 10 s 注射持续时间，推出比既往文献报道更低的对比剂总量，并证实了可行性。

比较扫描所得的图像质量，4 组图像主观评价差异无统计学意义（P>0.05）。评价 CTA 血管成

像质量中，图像 CNR 和 SNR 值是图像质量客观评价中最有效的指标，CNR>8 认为是血管图像质量为优[11]。本研究中，所有患者颈部 CTA 检查 CNR 均>8，表明图像质量不影响诊断。另外，有研究者认为，血管内 CT 值>250 HU，均可以满足于临床诊断需求[12]。本研究中，4 组图像每段血管所测量的颈动脉 CT 值均在 250 HU 以上，均能满足诊断需求。靶血管的显影对比达到 300~350 HU 即可满足诊断，并非越高越好[13]，同理颈部动脉 CTA 的检查亦可遵循这一原则，做到满足诊断即可。

B、C、D 3 组采用更高速率、更大剂量的生理盐水冲洗，短的注射持续时间为冲洗滞留对比剂留下更多更足的时间，结果 B、C、D 3 组的上腔静脉的强化值分别为，明显低于常规组（$P<0.05$），同时腋静脉段射线束硬化伪影亦显著减少，这种对比剂与生理盐水注射参数倒置的方式具有切实的可行性。

本研究有一定局限性，如样本量数量较少，受检者的个体差异可能导致数据之间有较大的差异，可能对结果有一定影响；其次，采用低管电压、大螺距的扫描方式，图像的客观质量 SNR、CNR 均有所下降，但总体并不影响诊断；另外，缺乏 CTA 和 DSA 的诊断结果准确性的对比比较，以了解不同技术的诊断效能。综上所述，在颈部血管性疾病中，320 排 640 层螺旋 CT 机结合个体化对比剂注射方案可以降低对比剂用量，在不影响临床诊断的同时，也能适当减低患者辐射剂量和潜在的肾不良反应，具有一定的临床应用价值。

利益冲突　无

作者贡献说明　陈晓宇负责统计分析数据及论文撰写；曹国全、杨运俊负责论文修改、指导论文写作和修改；邓青山、张明月负责收集数据、整理数据；王镇章负责构思研究方案、论文选题

参 考 文 献

[1] Josephson SA, Bryant SO, Mak HK, et al. Evaluation of carotid stenosis using CT angiography in the initial evaluation of stroke and TIA [J]. Neurology, 2004, 63 (3): 457-460. DOI: 10.1212/01. wnl. 0000135154. 53953. 2c.

[2] Berrington de González A, Darby S. Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries [J]. Lancet, 2004, 363 (9406): 345-351. DOI: 10.1016/S0140-6736 (04) 15433-0.

[3] Gruberg L, Mintz GS, Mehran R, et al. The prognostic implications of further renal function deterioration within 48 h of interventional coronary procedures in patients with pre-existent chronic renal insufficiency [J]. J Am Coll Cardiol, 2000, 36 (5): 1542-1548. DOI: 10.1016/s0735-1097 (00) 00917-7.

[4] Slovis TL. The ALARA concept in pediatric CT: myth or reality? [J]. Radiology, 2002, 223 (1): 5-6. DOI: 10.1148/radiol. 2231012100.

[5] Bae KT. Intravenous contrast medium administration and scan timing at CT: considerations and approaches [J]. Radiology, 2010, 256 (1): 32-61. DOI: 10.1148/radiol. 10090908.

[6] 付海鸿, 王斌. CT 造影理论（翻译版）[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2019.
Fu HH, Wang B. Theory of CT radiography (Translated version) [M]. Beijing: People´s Health Press, 2019.

[7] 王镇章, 曹国全, 傅萍萍, 等. 320 排 CT 单心动周期动态容积扫描对高心率患者支气管动脉 CT 成像辐射剂量及图像质量的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2019, 39 (2): 155-160. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0254-5098. 2019. 02. 014.
Wang ZZ, Cao GQ, Fu PP, et al. Influence on radiation dose and image quality of bronchial artery CTA for high heart rate patients with single-cardiac dynamic volumetric scanning in 320-row CT [J]. Chin J Radiol Med Prot, 2019, 39 (2): 155-160. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098. 2019. 02. 014.

[8] 张龙江, 卢光明. CT 血管成像静脉注射碘对比剂的原则和策略[J]. 中华放射学杂志, 2011, 45 (6): 597-600. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1005-1201. 2011. 06. 024.
Zhang JL, Lu GM. Principles and strategies of intravenous iodinated contrast agent administration on CT angiography [J]. Chin J Radiol, 2011, 45 (6): 597-600. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1005-1201. 2011. 06. 024.

[9] McCollough CH, Bruesewitz MR, Vrtiska TJ, et al. Image quality and dose comparison among screen-film, computed, and CT scanned projection radiography: applications to CT urography [J]. Radiology, 2001, 221 (2): 395-403. DOI: 10.1148/radiol. 2212000784.

[10] 王一民, 曹建新, 杨诚, 等. 低管电压对头部减影 CTA 图像质量和辐射剂量的影响[J]. 临床放射学杂志, 2011, 30 (1): 102-105. DOI: 10.13437/j. cnki. jcr. 2011. 01. 048.
Wang YM, Cao JX, Yang C, et al. Low tube voltage effect on image quality and radiation exposure at cerebral subtraction CT angiography [J]. J Clin Radiol, 2011, 30 (1): 102-105. DOI: 10.13437/j. cnki. jcr. 2011. 01. 048.

[11] Fei X, Du X, Li P, et al. Effect of dose-reduced scan protocols on cardiac coronary image quality with 64-row MDCT: a cardiac phantom study [J]. Eur J Radiol, 2008, 67 (1): 85-91. DOI: 10.1016/j. ejrad. 2007. 07. 008.

[12] 陈黎丽, 潘为领, 王学廷, 等. 低剂量对比剂在 256 层 CT 头颈部血管成像中的应用[J]. 医学影像学杂志, 2013, 23 (5): 672-674. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-9011. 2013. 05. 006.
Chen LL, Pan WL, Wang XT, et al. Application of the low-dose contrast in 256-slice CTA for the head and neck [J]. J Med Imaging, 2013, 23 (5): 672-674. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-9011. 2013. 05. 006.

[13] Abbara S, Arbab-Zadeh A, Callister TQ, et al. SCCT guidelines for performance of coronary computed tomographic angiography: a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2009, 3 (3): 190-204. DOI: 10.1016/j. jcct. 2009. 03. 004.

（收稿日期：2020-07-17）