

论 著

能谱CT最佳单能量技术、多模型迭代重建算法及虚拟平扫联合应用在头颈CTA应用研究*

李文超 李 强 李晨光
户彦龙 梁长华*
新乡医学院第一附属医院放射科
(河南 卫辉 453100)

【摘要】目的 探讨能谱CT最佳单能量技术、多模型迭代重建算法(ASIR-V)重建及虚拟平扫联合应用在脑血管疾病(CVD)头颈部CT血管造影(CTA)的应用价值。方法 前瞻性选择2022年6月15日至2022年8月20日于新乡医学院第一附属医院接受头颈部CTA检查的113例CVD患者,按扫描方式及对比剂用量分为常规剂量组(49例)、能谱低剂量组(49例)、能谱超低剂量组(15例)。常规剂量组采用常规扫描,对比剂剂量0.9mL/kg,注射速率为5mL/s,能谱低剂量组应用能谱CT最佳单能量技术联合50% ASIR-V重建,对比剂剂量0.6mL/kg,注射速率为5mL/s,能谱超低剂量组应用能谱CT最佳单能量技术、50%ASIR-V重建和虚拟平扫成像技术,对比剂剂量0.55mL/kg,注射速率为5mL/s。比较三组图像质量、动脉CT均值、噪声比(CNR)、信噪比(SNR)、容积CT剂量指数(CTDIvol)、剂量长度乘积(DLP)、有效剂量(ED)、碘摄入量及对比剂用量。结果 能谱超低剂量组和能谱低剂量组主动脉弓CT值、颈总动脉CT值、颈内动脉CT值、大脑中动脉M1段CT值、颈部血管SNR、颈部CNR、脑部血管SNR、脑部血管CNR均低于常规剂量组($P<0.05$),且能谱超低剂量组主动脉弓CT值、颈总动脉CT值、颈内动脉CT值低于能谱低剂量组($P<0.05$)。能谱超低剂量组和能谱低剂量组图像质量优于常规剂量组($P<0.05$)。能谱超低剂量组和能谱低剂量组CTDIvol、DLP、ED、对比剂用量、碘摄入量均低于常规剂量组($P<0.05$),且能谱超低剂量组对比剂用量、碘摄入量低于能谱低剂量组($P<0.05$)。结论 能谱CT最佳单能量技术联合ASIR-V、虚拟平扫技术能改善图像质量,降低放射剂量和对比剂剂量,在头颈部CTA中具有更高的应用价值。

【关键词】脑血管疾病; CT血管造影; 能谱CT; 虚拟平扫; 多模型迭代重建技术; 辐射剂量; 对比剂剂量

【中图分类号】R743

【文献标识码】A

【基金项目】河南省医学科技攻关计划省部共建项目(SBGJ2018057)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.12.012

Application Study of the Combined Application of Spectral CT Optimal Single Energy Technique, Adaptive Statistical Iterative Reconstruction-V and Virtual Plain Scan in Head and Neck CTA*

Li Wen-chao, Li Qiang, Li Chen-guang, HU Yan-long, LIANG Chang-hua*.

Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Xinxiang Medical College, Weihui 453100, Henan Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the application value of spectral CT optimal single energy technique, Adaptive Statistical Iterative Reconstruction-V (ASIR-V) reconstruction and virtual plain scan in head and neck CT angiography (CTA) of cerebrovascular diseases (CVD). **Methods** 113 patients with CVD who received head and neck CTA examination in the First Affiliated Hospital of Xinxiang Medical College from June 15, 2022 to August 20, 2022 were prospectively selected, and they were divided into conventional dose group (49 cases), energy spectrum low-dose group (49 cases) and energy spectrum ultra-low-dose group (15 cases) according to scanning method and the dosage of contrast agent. In the conventional dose group, conventional scanning was performed, the contrast agent dosage was 0.9mL/kg, and the injection rate was 5mL/s, in the energy spectrum low-dose group, the spectral CT optimal single energy technique combined with 50% ASIR-V reconstruction was performed, the contrast agent dosage was 0.6mL/kg, and the injection rate was 5mL/s. In the energy spectrum ultra-low-dose group, the spectral CT optimal single energy technique, 50%ASIR-V reconstruction and virtual plain scan imaging technology were used, the contrast agent dosage was 0.55mL/kg, and the injection rate was 5mL/s. The image quality, mean arterial CT, contrast-to-noise ratio (CNR), signal-to-noise ratio (SNR), volume CT dose index (CTDIvol), dose-length product (DLP), effective dose (ED), iodine intake and contrast agent dosage of the three groups were compared. **Results** The aortic arch CT values, common carotid artery CT values, internal carotid artery CT values, M1 segment CT values of middle cerebral artery, neck vessel SNR, neck CNR, brain vessel SNR, and brain vessel CNR in the energy spectrum ultra-low-dose group and energy spectrum low-dose group were all lower than those in the conventional dose group ($P<0.05$). The aortic arch CT values, common carotid artery CT values and internal carotid artery CT values in the energy spectrum ultra-low-dose group were lower than those in the energy spectrum low-dose group ($P<0.05$). The image quality in the energy spectrum ultra-low-dose group and energy spectrum low-dose group was better than that in the conventional dose group ($P<0.05$). CTDIvol, DLP, ED, contrast agent dosage and iodine intake in the energy spectrum ultra-low-dose group and energy spectrum low-dose group were all lower than those in the conventional dose group ($P<0.05$), and contrast agent dosage and iodine intake in the energy spectrum ultra-low-dose group were lower than those in the energy spectrum low-dose group ($P<0.05$). **Conclusion** The spectral CT optimal single energy technique combined with ASIR-V and virtual plain scan technology can improve image quality, reduce radiation dose and contrast agent dosage, and which has higher application value in head and neck CTA.

Keywords: Cerebrovascular Diseases; CT Angiography; Energy Spectrum CT; Virtual Plain Scan; Adaptive Statistical Iterative Reconstruction-V Technique; Radiation Dose; Contrast Agent Dosage

脑血管疾病(CVD)的发病率及患病率逐年不断攀升,影响患者的工作及日常,严重威胁着人类的生存质量,是人类死亡和致残的主要原因^[1]。早期快速准确地诊断CVD、及时治疗是降低CVD发病率、致残率及死亡率的关键^[2]。计算机断层扫描(CT)血管造影(CTA)是一种非创伤性介入检查方式,头颈部CTA不但能清楚显示头颈部血管图像还可测定动脉血流量,对CVD做出准确的定性诊断,在CVD疾病中具有较高的应用价值,但传统CTA检查辐射大,需要注射的对比剂剂量高,对受检者伤害较大^[3]。如何在满足诊断、确保影像质量的前提下,降低对比剂剂量及辐射是当前CT影像研究的热点。宝石能谱CT是一种新的CT成像技术,该技术通过瞬时变能高压发生器和快速切换高低电压,实现了在更低辐射剂量下产生40keV~140keV共101个连续清晰的单能量图像,但是能谱CT最佳单能量技术在提高靶血管内的CT值的同时,图像噪声也相应增加^[4]。研究显示多模型迭代重建算法(ASIR-V)重建技术可减少单能量图像噪声以及辐射剂量,提高图像质量^[5],虚拟平扫技术采用碘物质分离技术在CT增强扫描图像中去除碘对比剂,获得无碘对比剂的虚拟图像,从而降低扫描次数,降低辐射剂量^[6]。目前能谱CT最佳单能量图像、虚拟平扫技术联合ASIR-V重建技术在降低对比剂用量的报道十分少见,本研究旨在探讨利用能谱CT最佳单能量技术、虚拟平扫成像技术联合ASIR-V重建技术在头颈CTA成像中最大程度降低对比剂用量和辐射剂量的可行性,以期临床头颈部CTA操作提供参考。

1 资料与方法

【第一作者】李文超,男,主管技师,主要研究方向:放射医学。E-mail: 15937327085@163.com

【通讯作者】梁长华,男,主任医师,主要研究方向:胸腹部肿瘤的综合影像诊断研究。E-mail: liangchanghua12345@163.com

1.1 临床资料 前瞻性选择2022年6月15日至2022年8月20日于新乡医学院第一附属医院接受头颈部CTA检查的113例CVD患者。

纳入标准：经头颅影像学检查证实为CVD，包括缺血性脑卒中(经CT检查确诊)、动脉血管痉挛(经数字减影血管造影检查确诊)、头颈部血管动脉粥样硬化(经CT检查确诊)等；行能谱CTA检查；符合CTA检查适应证；书面知情同意本研究。排除标准：碘对比剂过敏史；心肌梗死，心功能不全等心血管疾病者；肝、肾功能不全；孕期或哺乳期的妇女；意识障碍无法配合检查的患者。按扫描方式及对比剂用量分为常规剂量组(49例)、能谱低剂量组(49例)、能谱超低剂量组(15例)，常规剂量组患者资料：男26例，女23例，年龄48~89岁，平均(60.12±11.79)岁，体质指数(BMI)24~28 kg/m²，平均(24.82±3.73) kg/m²；疾病分类：缺血性脑卒中20例，动脉血管痉挛10例，颅内动脉瘤6例，头颈部血管动脉粥样硬化10例，其它3例。能谱低剂量组患者资料：男34例，女15例，年龄47~67岁，平均(60.12±9.52)岁，BMI 23~28 kg/m²，平均(24.35±3.52) kg/m²；疾病分类：缺血性脑卒中23例，动脉血管痉挛7例，颅内动脉瘤5例，头颈部血管动脉粥样硬化11例，其它3例。能谱超低剂量组患者资料：男11例，女4例，年龄48~80岁，平均(59.81±9.42)岁，BMI 23~27 kg/m²，平均(24.25±3.69) kg/m²；疾病分类：缺血性脑卒中7例，动脉血管痉挛2例，颅内动脉瘤2例，头颈部血管动脉粥样硬化3例，其它1例。三组性别、年龄、BMI、疾病分类比较无统计学差异($P>0.05$)，本研究已获得我院伦理委员会批准。

1.2 CTA检查 CT扫描：仪器为美国GE Revolution CT扫描仪，三组患者均取仰卧位，自主动脉弓下缘2~3 cm扫描至颅顶。扫描参数：自动管电流模式，固定噪声指数为10，探测器宽度0.625 mm，螺距1.375：1，球管旋转速度0.5 s/r，视野25 cm×25 cm，层厚5.0 mm。经肘静脉高压注射碘普罗胺(规格370 mgI/mL)，达到峰值后启动扫描，触发阈值100 HU，嘱患者在扫描时勿做吞咽动作。常规剂量组：采用常规CTA扫描，管电压100 kVp，对比剂剂量0.9 mL/kg，注射速率5 mL/s。能谱低剂量组：采用GSI模式，管电压80~140 kVp，瞬时(0.5 ms)切换能谱增强扫描，50%ASIR-V重建。对比剂剂量0.6 mL/kg，注射速率5 mL/s。能谱超低剂量组：GSI模式，管电压80~140 kVp，瞬时(0.5 ms)切换技术，50%ASIR-V重建联合虚拟平扫减影，对比剂剂量0.55 mL/kg，注射速率5 mL/s。虚拟平扫减影方法：先重建出增强期的虚拟平扫图像，利用Add/Sub软件对增强期及虚拟平扫期图像数据逐层相减，获得减影后数据。

图像后处理：将扫描图像和数据传输到GE AW4.7工作站，常规剂量组在混杂能量的基础上进行最大密度投影(MIP)、多平面重

建(MPR)、容积再现(VR)等数据测量及图像后处理。能谱低剂量组及能谱超低剂量组在最佳单能量基础上进行MIP、MPR、VR等数据测量及图像后处理。由同一名10年以上CT审核技术医师在不知情情况下独立审片，选取颈总动脉上段、颈内动脉下段，在大脑中动脉M1段选择感兴趣区(ROI)，注意避免部分容积效应，圆形工具测量ROI面积为5 mm²。测量同一平面颈内动脉、颈总动脉、主动脉弓、大脑中动脉M1段以及动脉周围肌肉组织CT值，以动脉周围肌肉组织CT值的标准差为背景噪声(BN)，计算最佳对比噪声比(CNR)=(血管CT值-肌肉CT值)/BN，信噪比(SNR)=血管CT值/BN。如果一侧无法测量，则取另一侧进行测量。

1.3 辐射剂量、对比剂剂量 记录容积CT剂量指数(CTDIvol)、剂量长度乘积(DLP)，计算有效剂量(ED)= $k \times DLP$ ， k 为换算因子，等于0.0023 mSv·mGy⁻¹·cm⁻¹，ED单位为mSv，DLP单位为mGy/cm。碘摄入量(g)=对比剂用量(mL)×体重(kg)×0.329 g/mL，对比剂用量为注射对比剂的总量。

1.4 图像成像质量评价 由两名10年以上CT医师应用盲法对图像质量进行评价：1分，仅显示目标血管主干及1级分支，对比剂充盈差，有严重伪影，管壁模糊，无法诊断；2分，仅显示目标血管主干及1级分支或少数2级分支，对比剂充盈断断续续，密度欠均匀，管壁欠光整，伪影较重，影响诊断；3分，目标血管主干及其1~2级分支显示清晰，对比剂充盈尚可，密度尚均匀，管壁尚光整，不影响诊断；4分，目标血管主干及其1~3级分支显示清晰，对比剂充盈，管壁光整，密度较为均匀；5分，目标血管主干及其1~4级分支显示清晰，强化良好，管壁光滑，密度均匀，无伪影^[7]。

1.5 统计学分析 SPSS 25.00录入和分析数据，CT值、BN、SNR、CNR等连续性变量符合正态分布以($\bar{x} \pm s$)表示，采用单因素方差分析+LSD-t检验(两两比较)。一致性检验采用Kappa检验。疾病分类等计数资料以例(%)表示采用 χ^2 检验，图像质量比较采用kruskal wallis H检验+Mann Whitney U检验(两两比较)。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 图像客观指标比较 三组BN比较差异无统计学意义($P>0.05$)，能谱超低剂量组主动脉弓CT值、颈总动脉CT值、颈内动脉CT值低于能谱低剂量组和常规剂量组($P<0.05$)，能谱低剂量组主动脉弓CT值、颈总动脉CT值、颈内动脉CT值低于常规剂量组($P<0.05$)。能谱超低剂量组和能谱低剂量组大脑中动脉M1段CT值、颈部血管SNR、颈部血管CNR、脑部血管SNR、脑部血管CNR均低于常规剂量组($P<0.05$)，见表1。

表1 三组CT值、BN、SNR、CNR差异

组别	例数	BN	主动脉弓CT值	颈总动脉CT值	颈内动脉CT值
常规剂量组	49	28.42±2.35	562.35±54.53	591.33±68.69	582.65±70.00
能谱低剂量组	49	28.35±2.11	476.47±56.69 ^a	494.40±65.90 ^a	492.32±68.73 ^a
能谱超低剂量组	15	28.21±2.03	433.52±49.66 ^{ab}	454.49±53.52 ^{ab}	450.13±53.57 ^{ab}
F值		0.053	45.900	37.885	32.771
P值		0.948	0.000	0.000	0.000

组别	例数	大脑中动脉M1段CT值	颈部血管SNR	颈部血管CNR	脑部血管SNR	脑部血管CNR
常规剂量组	49	509.61±48.81	62.30±5.06	57.60±6.99	55.83±4.13	51.96±4.04
能谱低剂量组	49	419.40±53.07 ^a	55.88±4.89 ^a	48.81±6.82 ^a	49.14±4.83 ^a	45.12±4.83 ^a
能谱超低剂量组	15	390.84±49.49 ^a	54.49±4.88 ^a	45.26±5.79 ^a	46.52±6.58 ^a	42.31±6.19 ^a
F值		52.314	26.079	29.576	33.705	37.224
P值		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注：与常规剂量组比较，^a $P<0.05$ ，与能谱低剂量组比较，^b $P<0.05$ 。

2.2 图像主观评价比较 三组图像质量评分均在3分以上，均可满足临床诊断。两名医师对图像主观评分一致性较好(Kappa值=0.904, $P<0.05$)。三组图像评分分布差异显著($P<0.05$)，能谱超低剂量组和能谱低剂量组优于常规剂量组($P<0.05$)，见表2。各组头颈部血管增强VR图像及CT值见图1A-图1D~图3A-图3D。

2.3 辐射剂量、对比剂剂量比较 能谱超低剂量组和能谱低剂量组CTDIvol、DLP、ED、对比剂用量、碘摄入量均低于常规剂量组($P<0.05$)，能谱超低剂量组对比剂用量、碘摄入量低于能谱低剂量组($P<0.05$)，但是CTDIvol、DLP、ED和能谱低剂量组之间比较无统计学差异($P>0.05$)，见表3。

表2 三组图像质量评分差异[例(%)]

组别	例数	3分	4分	5分
常规剂量组	49	12(24.49)	25(51.02)	12(24.49)
能谱低剂量组	49	5(10.20)	18(36.73)	26(53.06)
能谱超低剂量组	15	1(6.67)	5(33.33)	9(60.00)
Z值	11.806			
P值	0.000			

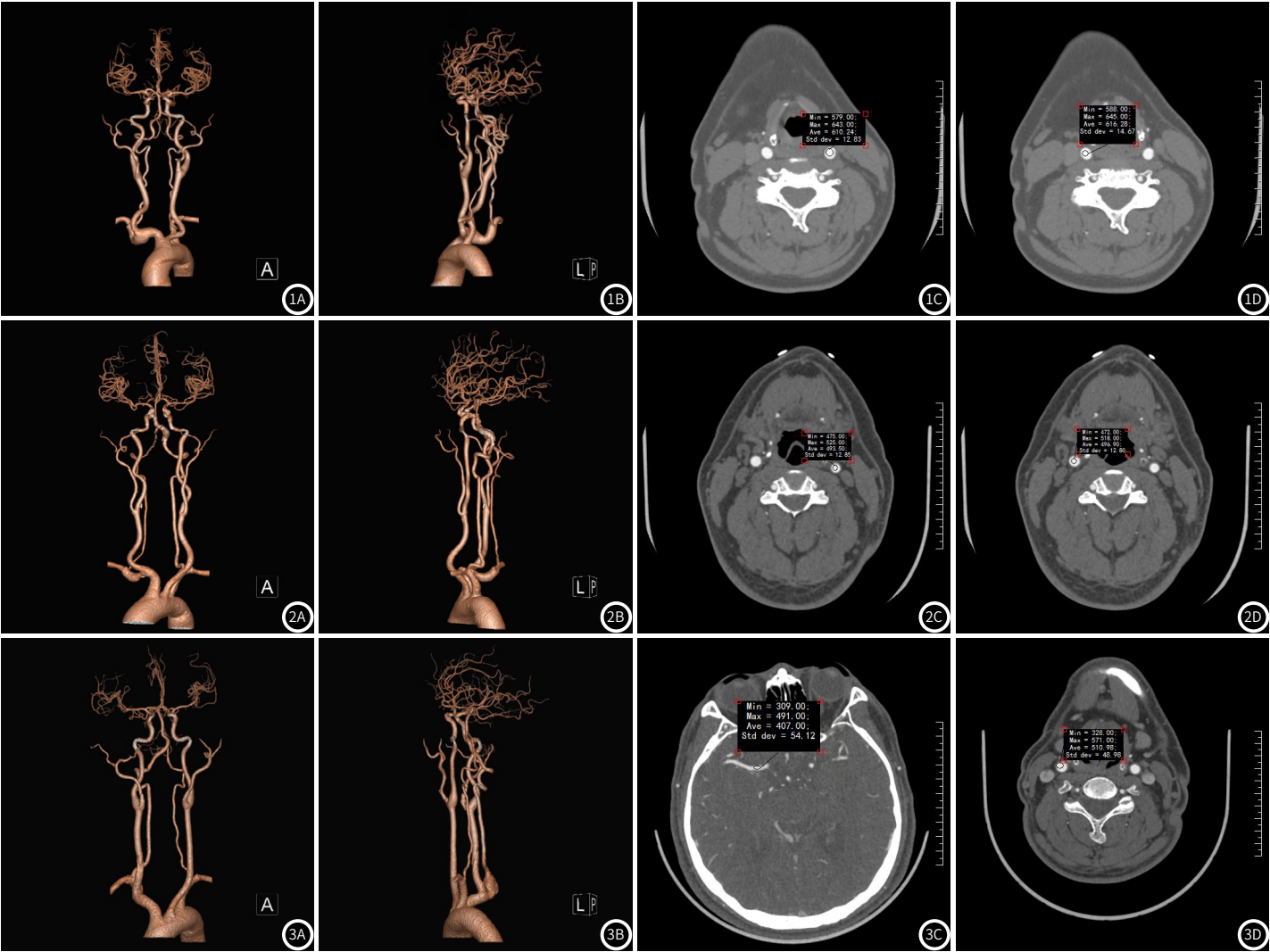


图1A-图1D 常规剂量组头颈部血管增强VR图像及CT值
图2A-图2D 能谱低剂量组头颈部血管增强VR图像及CT值
图3A-图3D 能谱超低剂量组头颈部血管增强VR图像及CT值

表3 三组辐射剂量、对比剂剂量差异

组别	例数	CTDIvol(mGy)	DLP(mGy.cm)	ED(mSv)	对比剂用量(mL)	碘摄入量(g)
常规剂量组	49	6.10±2.21	606.16±103.78	1.39±0.24	61.04±8.43	13.91±3.89
能谱低剂量组	49	4.65±1.35 ^a	247.09±47.89 ^a	0.57±0.11 ^a	48.65±8.64 ^a	11.42±4.38 ^a
能谱超低剂量组	15	4.31±1.18 ^a	249.35±37.21 ^a	0.57±0.09 ^a	42.33±4.30 ^{ab}	10.14±1.63 ^a
F值		10.675	303.54	296.714	33.069	8.819
P值		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注：与常规剂量组比较，^a $P<0.05$ ，与能谱低剂量组比较，^b $P<0.05$ 。

3 讨论

头颈部CTA是一种无创快速的血管成像技术,具有空间和空间分辨率较高等优点,对CVD诊断率高且实用性强^[8],但是头颈部CTA检查往往需要静脉内注入高浓度、大剂量的碘对比剂以增强血管成像质量,提高诊断效果,由于头颈部CTA检查辐射剂量大,若对比剂使用量过多、注射速率过大,可能增加肾毒性,促使肾管形细胞凋亡和坏死,增加对比剂肾病的风险,将急性肾炎和慢性肾炎、肾功能不全患者排除在外^[9]。有学者提出降低管电压或减少对比剂用量^[10],但随之即会产生图像噪声增加、浓度分布不均、影响图像质量等问题,在不降低成像质量的前提下,尽可能降低放射剂量,尽最大程度减少对比剂量成为放射影像学界迫切需要解决的问题。

能谱CT具有采集时间长、辐射过高、图像空间分辨率低等缺点^[11],随着能谱CT成像技术的不断改进,宝石能谱CT应用而生,其以宝石为探测器材料,通过利用球管高、低电压瞬间切换的曝光技术,减少外界干扰,提高成像质量^[12]。在能谱CT中,通过球管高、低电压瞬间切换的曝光技术可获得101个40 keV~140keV的单能量图像,有效地改善血管对比度^[13]。本研究能谱低剂量组主动脉弓CT值、颈总动脉CT值、颈内动脉CT值、颈部血管SNR、颈部血管CNR、脑部血管SNR、脑部血管CNR、CTDIvol、DLP、ED、对比剂用量、碘摄入量低于常规剂量组,成像质量高于常规剂量组,表明能谱CT最佳单能量技术联合ASIR-V技术可降低图像信噪比和噪声比,提高成像质量,并显著降低放射剂量和对比剂剂量。

分析能谱CT最佳单能量技术联合ASIR-V技术提高图像质量的原因:首先,最佳单能量技术可改善血管对比度,提高显示度^[14],而常规CT使用低管电压时会增加图像噪声从而降低图像质量。其次,能谱CT最佳单能量技术可利用金属伪影减少软件(美国GE公司MARs)克服金属、线圈和支架等致密金属物质造成的严重伪影,进而提高图像质量^[15]。第三,ASIR-V是一种CTA图像噪声的新技术,可降低低剂量扫描导致的图像噪声,提高空间分辨率及图像密度,保证重建图像可信性^[16]。能谱CT最佳单能量技术联合ASIR-V技术降低放射剂量的原因:能谱CT最佳单能量技术具有快速千伏峰值切换技术,且在低能量(80kVp)下高能量(140kVp)曝光时间长,因此能降低辐射剂量^[17]。ASIR-V较常规CT图像重建算法-传统滤波反投影法所需的投影数据少,ASIR-V运算时间短,因此能在较低的辐射剂量下重建出质量较高的图像^[18]。

本研究能谱超低剂量组对比剂用量、碘摄入量低于能谱低剂量组和常规剂量组,成像质量与能谱低剂量组相当,表明能谱CT最佳单能量技术联合ASIR-V、虚拟平扫技术可进一步降低对比剂剂量,并保障成像质量。田兆荣等人^[19]采用能谱CT虚拟平扫联合ASIR-V,较非能谱平扫降低47.9%辐射剂量,明显降低图像噪声,改善甲状腺图像质量,分析原因:能谱CT抑碘技术可将碘剂分离,通过增强扫描获得密度图,该图仅显示水成分,因此可用其代表平扫影像,避免平面扫描与增强功能相结合的双期扫描,优化扫描程序,降低扫描次数,缩短扫描时间,减少辐射剂量和不必要的潜在损伤,并获得与常规CT平扫相当的图像质量^[20]。虚拟平扫技术保证成像质量的原因在于动脉期影像上对比剂主要集中在动脉血管中,因此虚拟平扫影像上所得CT值接近于常规扫描影像^[21]。本研究能谱超低剂量组CTDIvol、DLP、ED和能谱低剂量组之间比较无差异,可能与能谱超低剂量组样本例数过少有关。

综上,与常规CTA、能谱CT最佳单能量技术联合ASIR-V比较,能谱CT最佳单能量技术联合ASIR-V、虚拟平扫技术能改善图像质量,降低放射剂量和对比剂剂量,在颈部CTA中具有更高的应用价值。本研究局限性在于能谱超低剂量组样本量偏少,且为前瞻性研究,ASIR-V仅选择50%迭代,需要增加不同迭代水平进一步研究。

参考文献

- [1] Goldstein LB. Introduction for focused updates in cerebrovascular disease[J]. Stroke, 2020, 51(3): 708-710.
- [2] 孟改, 张金焱. 缺血性脑血管疾病患者中联合应用TCD与颈动脉超声的价值分析[J]. 罕少疾病杂志, 2023, 30(1): 19-20.
- [3] 王坤, 杨尚文, 顾康康, 等. 头颅电子计算机断层扫描血管造影和头颅磁共振血管成像在颅内动脉瘤中诊断价值比较的回顾性研究[J]. 现代生物医学进展, 2021, 21(20): 3912-3916.
- [4] D'Angelo T, Lenga L, Arendt CT, et al. Carotid and cerebrovascular dual-energy computed tomography angiography: optimization of window settings for virtual monoenergetic imaging reconstruction[J]. Eur J Radiol, 2020, 130: 109166.
- [5] Zhao Y, Li D, Liu Z, et al. Comparison of image quality and radiation dose using different pre-ASiR-V and post-ASiR-V levels in coronary computed tomography angiography[J]. J Xray Sci Technol, 2021, 29(1): 125-134.
- [6] 胡镭, 罗德红, 李琳, 等. 能谱CT虚拟平扫替代常规平扫评估甲状腺结节的可行性研究[J]. 国际医学放射学杂志, 2017, 40(1): 10-13.
- [7] 周永霞, 周容. IDose4迭代重建技术应用于低剂量CT肾动脉血管造影的临床分析[J]. 影像科学与光化学, 2020, 38(2): 253-259.
- [8] 高大圣, 胡茂能, 王晶, 等. 头颈部CTA联合毛细血管指数评分对大脑中动脉闭塞急性脑梗死患者预后评估价值研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(9): 28-30.
- [9] Rowe AS, Hawkins B, Hamilton LA, et al. Contrast-induced nephropathy in ischemic stroke patients undergoing computed tomography angiography: CINISter study[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2019, 28(3): 649-654.
- [10] 郑小丹, 李蛟, 胡军武, 等. 低管电压、低对比剂用量和大螺距在双期减影头颈血管CTA中的运用[J]. 放射学实践, 2019, 34(11): 1260-1264.
- [11] 李长健, 朱广辉. 能谱CT多参数成像在胃癌癌分化程度中的应用价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19(8): 133-135, 162.
- [12] 古丽米拉·巴巴什, 周永, 文智, 等. 宝石能谱CT单能量成像对乏血供肝脏小转移瘤的应用价值[J]. 实用放射学杂志, 2020, 36(12): 1952-1956.
- [13] 杨创勃, 于楠, 马光明, 等. 能谱CT最佳单能量图像联合MPR在腰骶部周围神经检查中的应用[J]. 影像诊断与介入放射学, 2020, 29(5): 356-360.
- [14] 马光明, 于勇, 陈静, 等. 能谱CT单能量技术优化头颈CTA图像质量研究[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(8): 86-89.
- [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] De Marco P, Origgi D. New adaptive statistical iterative reconstruction ASiR-V: assessment of noise performance in comparison to ASiR[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(2): 275-286.
- [17] 朱正, 赵心明, 周纯武. 宝石能谱单能量成像及自适应统计迭代重建技术在腹部低剂量CT扫描中的可行性研究[J]. 放射学实践, 2017, 32(4): 418-422.
- [18] Tang H, Yu N, Jia Y, et al. Assessment of noise reduction potential and image quality improvement of a new generation adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR-V) in chest CT[J]. Br J Radiol, 2018, 91(1081): 20170521.
- [19] 田兆荣, 孙杰, 杨建平, 等. 能谱CT虚拟平扫联合多模型迭代重建算法在甲状腺图像质量及辐射剂量中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2022, 30(2): 129-133, 138.
- [20] 闫健男, 郑吟诗, 李玉丹, 等. 双能CT能谱成像增强定量参数在颈动脉粥样硬化斑块性质评估中的应用[J]. 罕少疾病杂志, 2022, 29(12): 36-37.
- [21] 郑星星, 冯峰, 丁勇生, 等. 双源能谱CT虚拟平扫替代常规平扫评估食管癌的可行性研究[J]. 国际医学放射学杂志, 2020, 43(2): 150-155.

(收稿日期: 2022-12-21)

(校对编辑: 谢诗婷)