

论 著

双低剂量技术在双能量头颈部CT血管成像中的应用*

刘 利 计一丁* 张亦弛
迟 婧 尹胜男 丁 宁
苏州大学附属苏州九院影像科
(江苏 苏州 215000)

【摘要】目的 探讨双低剂量扫描技术在双能量头颈部CTA扫描中的可行性。**方法** 前瞻性收集2021年1月~2021年5月间本院102名因头颈部血管疾病行头颈部CTA的患者纳入研究,随机分为CD、DLD两组,CD组行常规剂量扫描,DLD组行双低剂量扫描;分别对两组图像行MIP、VR、MPR、CPR、双能量去骨去钙化等后处理,用5分法对两组图像质量进行主观评价,选取颈总动脉起始部、颈内动脉起始部和大脑中动脉M1段测量血管的噪声、SNR、CNR,记录2组患者的x线剂量参数,包括CTDIvol(mGy)和DLP(mGy·cm),计算其有效剂量ED(mSv),计算2组患者的碘摄入量(I)(mg),对结果进行统计学分析。**结果** CD组与DLD组的主观图像质量评分均 ≥ 3 分,均能满足诊断的要求。2名医师对2组图像质量评价的一致性良好(Kappa值分别为0.817、0.825)。2名医师对2组图像的主观质量评分的差异无统计学意义($Z=-0.572$ 、 -0.283 ,均 $P>0.05$)。CD组与DLD组图像各层面血管CT值的差异均无统计学意义($t=-0.705$ 、 0.689 、 0.906 ,均 $P>0.05$);颈内动脉起始部、大脑中动脉M1段层面血管噪声、SNR、CNR的差异均无统计学意义($t=-0.830$ ~ 1.842 ,均 $P>0.05$);颈总动脉起始部层面CD组噪声大于DLD组($t=2.855$, $P<0.05$),SNR、CNR小于DLD组($t=-4.959$ 、 -5.041 ,均 $P<0.05$)。DLD组患者CTDIvol、DLP及ED较CD组分别降低36.9%、35.3%、35.2%($t=186.138$ 、 37.753 、 37.753 ,均 $P<0.05$)。DLD组患者碘摄入量较CD组降低57.1%(10.5g VS. 24.5g)。**结论** 双低剂量双能量头颈部CTA扫描技术在不影响图像质量的前提下,降低了患者接受的辐射剂量和对对比剂碘摄入量。

【关键词】 低剂量; 双能量成像; 头颈部CTA; 虚拟单能谱

【中图分类号】 R323.1

【文献标识码】 A

【基金项目】 江苏省医学会儿科影像科研专项基金
项目SYH-3201150-0018(2021013);
苏州市临床重点病种诊疗专项项目
LCZX202025

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.06.015

Application of Dual Low-dose Technique in Dual-energy Head and Neck CT Angiography*

LIU Li, JI Yi-ding*, ZHANG Yi-chi, CHI Jing, YIN Sheng-nan, DING Ning.

Department of Radiology, Suzhou Ninth Hospital Affiliated to Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu Province, China

ABSTRACT

Objective To study the feasibility of dual-source CT double low-dose scanning technology in dual-energy head and neck CTA. **Methods** A total of 102 patients with CTA due to vascular diseases of the head and neck in our hospital from January 2021 to May 2021 were prospectively collected and included into the study, and randomly divided into CD and DLD groups. The CD group underwent conventional dose scanning (tube voltage 100/Sn140kV, pitch 0.9, 70mL contrast agent), and the DLD group underwent double low dose scanning (tube voltage 80/Sn140kV, pitch 1.2, $P<0.05$). The CD group underwent FBP reconstruction, linear fusion ($M=0.6$) to obtain the equivalent 120kV image, the DLD group underwent SAFIRE iterative reconstruction (iterative intensity level 3), and the 65keV energy spectrum was obtained by virtual monoenergetic technology. The two groups of images were processed with dual energy bone removal and calcification, MIP, VR, MPR, CPR and other post-processing technique. The X-ray dose parameters of the two groups were recorded, including CTDIvol(mGy) and DLP(mGy·cm), and the effective dose ED(mSv) was calculated. The iodine ingestion of the two groups was calculated, and the image quality of the two groups was evaluated subjectively and objectively, and the results were statistically analyzed. **Results** The image quality scores of CD group and DLD group were both ≥ 3 , which could meet the requirements of diagnosis. The two radiologists had good consistency in image quality evaluation of the two groups (Kappa values were 0.817 and 0.825). There was no significant difference in subjective image quality scores between the two groups ($Z=-0.572$, -0.283 , both $P>0.05$). There was no significant difference in the CT value of blood vessels at each level between the CD group and the DLD group ($t=-0.705$, 0.689 , 0.906 , all $P>0.05$). There was no significant difference in vessel noise, SNR and CNR between the initial part of internal carotid artery and the M1 segment of middle cerebral artery ($t=-0.830$ ~ 1.842 , all $P>0.05$). However, the noise of the initial part of the common carotid artery in the CD group was higher than that in the DLD group ($t=2.855$, $P<0.05$), SNR and CNR were lower than those in the DLD group ($t=-4.959$, -5.041 , all $P<0.05$). CTDIvol, DLP and ED in the DLD group were 36.9%, 35.3% and 35.2% lower than those in the CD group, respectively ($t=186.138$, 37.753 , 37.753 , all $P<0.05$). Iodine intake in the DLD group was 57.1% lower than that in the CD group (10.5g VS. 24.5g). **Conclusion** The dual-low dose dual-energy head and neck CTA scanning technology can reduce the radiation dose and iodine intake of contrast medium without affecting the image quality.

Keywords: Low Dose; Dual Energy Imaging; Head and Neck CTA; Virtual Monoenergetic Spectrum

近年来,头颈部CT血管成像(CT angiography, CTA)在头颈部血管疾病诊疗中的应用越来越普遍,其诊断效能与金标准数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)相当^[1],双能量头颈部CTA较传统单能量CTA优势明显,能谱去骨去钙化技术能精准的分离血管与毗邻骨骼结构,更好地显示颅内动脉^[2],钙化斑块的去除可以改善血管狭窄检测、软斑块形态评估的准确性^[3],尤其是对于颈内动脉广泛钙化的病例。CT检查带来的辐射剂量、含碘对比剂使用的安全性问题备受关注,尤其是需短期内多次重复检查以评估疗效的患者^[4-5]。因而在减少辐射剂量、对比剂用量(碘摄入量)的同时,获得满足诊断要求的图像,一直以来是放射医学研究的热点。

目前低辐射剂量联合低对比剂用量的“双低”扫描技术研究主要集中在传统单能量CTA(即使使用双源CT进行扫描)^[6-8],双能量头颈部CTA的低剂量研究主要集中在降低含碘对比剂用量的“单低”扫描技术之上^[9-10],而缺乏“双低”双能量头颈部CTA扫描技术的探讨。本团队既往研究中^[11],采用低管电压、大螺距扫描联合自动管电流调制(CARE-DOSE 4D)及迭代重建技术(sinogram affirmed iterative reconstruction, SAFIRE),明显减低了肺动脉CTA辐射剂量;双能量CT扫描虚拟单能谱技术(virtual monoenergetic imaging, VMI)的低能级重建能有效提高碘的衰减,降低头颈部CTA含碘对比剂用量^[9-10]。本研究尝试将“80kV/Sn140kV管电压组合、大螺距联合CARE-DOSE 4D及SAFIRE技术”和“30mL含碘对比剂联合VMI-65KeV重建技术”的“双低剂量”扫描技术应用双能量头颈部CTA,通过评价并比较常规剂量(conventional dose, CD)与双低剂量(dual-low dose, DLD)扫描条件下的客观与主观图像质量、辐射剂量及碘摄入量,探讨双源CT双低剂量技术在双能量头颈部CTA中的应用的可行性,现报告如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 前瞻性连续收集2021年1月至2021年5月间本院因临床怀疑头颈部血管病变,且要求行头颈部CTA检查的患者并纳入研究。

【第一作者】 刘 利,女,主管技师,主要研究方向:低剂量扫描技术。E-mail: liuli2023sub@163.com

【通讯作者】 计一丁,男,主任医师,主要研究方向:双源CT的临床应用。E-mail: jiyiding1010@163.com

排除标准如下：严重心功能、肝功能、肾功能不全的患者；孕妇或哺乳期妇女；既往碘造影剂过敏或限制碘摄入量的患者；患者行血管内支架植入术、动脉瘤夹闭术或栓塞术后。本研究经由苏州市第九人民医院伦理委员会批准，批号：(2020)伦研批第(76)号，所有患者已告知研究内容及方案，并签署知情同意书。共计有102例患者纳入研究，并随机分为CD、DLD两组，每组51例。

1.2 扫描方法与参数 采用Siemens第二代双源CT(Somatom Definition Flash, Siemens Healthcare, Germany)扫描仪进行检查。CD组采用双能量扫描模式，A球管100kV，B球管Sn140 kV，螺距0.9，采用传统滤波反投影(filtered back projection, FBP)重建算法；DLD组采用双能量扫描模式，A球管80 kV，B球管Sn140 kV，螺距1.2^[12]，采用SAFIRE重建算法，迭代强度3级；采用高压双筒注射器推注对比剂，采用非离子对比剂碘佛醇(350 mg/mL)，CD组先推注生理盐水10mL，再推入含碘对比剂70 mL，随后推注生理盐水20mL，流率均为5.0 mL/s；DLD组先推注生理盐水30 mL，再推入含碘对比剂30mL，随后推注生理盐水40 mL，流率均为3.0 mL/s。两组其他扫描参数均一致：两组均采用CARE Dose-4D(实时调整管电流)技术。嘱患者头先进，取仰卧位，平静呼吸，注意避免吞咽动作，方向由足向头，范围自主动脉弓以下至颅顶，使用对比剂自动跟踪触发技术，触发点位放置于主动脉弓，阈值设定为100 HU，触发后扫描延迟时间设定为3s。准直器宽度准直2×128×0.6mm，旋转时间0.28s，重建层厚0.6mm，层间距0.6mm，视野25cm×25cm，重建卷积核Q33f。

1.3 图像后处理 扫描完成后数据自动传输至后处理工作站(Syngo Via)，CD组由行线性融合(linearly-blended, LB)，M=0.6(生成等效120KV图像)，DLD组进入DE+Vascular行65KeV能级虚拟单能谱重建，两组均采用双能量去骨去钙化、多平面重建(MPR)、曲面重建(CPR)、最大密度投影(MIP)、容积成像(VR)等后处理方法重建图像，以进行后续评价和分析。

1.4 图像质量评价

1.4.1 图像客观评价^[13]：遮蔽患者基本信息以及机器扫描条件，由1名副高级职称以上影像诊断医师记录2组患者的扫描长度；每例患者均在融合图的横断位图像上选取3个层面：颈总动脉起始部、颈内动脉起始部和大脑中动脉M1段，进行以下测量和计算：(1)在上述三个层面设置圆形ROI，ROI应尽可能大，且避免触及血管壁及钙化斑块，测量上述层面上3支血管两侧的CT值(CT血管)，将其CT值的标准差(SD血管)作为图像噪声。所有测量均进行3次，所得值取平均值。(2)分别于上述3个层面两侧血管旁密度均匀的胸锁乳突肌、椎旁肌肉、脑实质设置圆形ROI，ROI应尽可能大，测量其CT值(CT背景)。所有测量均进行3次，所得值取平均值。(3)利用公式计算信噪比(signal noise ratio, SNR)、对比噪声比(contrast noise ratio, CNR)SNR=CT_{血管}/SD_{血管}，CNR=(CT_{血管}-CT_{背景})/SD_{血管}。

表1 两组患者一般资料比较

组别	例数	男/女	年龄(岁)	体质指数(kg/m ²)	扫描长度(cm)
CD组	51	35/16	63±14	23.9±2.7	42.9±2.0
DLD组	51	29/22	67±12	23.7±2.8	43.0±2.6
t值		1.510	-1.400	0.400	-0.208
P值		0.219	0.165	0.691	0.836

1.4.2 图像主观评价^[1] 由2名高年资主治医师以上影像诊断医师采用盲法，并使用5分法对图像质量(包括轴位图、双能量去骨去钙化图及三维重建图)进行主观评价。主观评价的标准：5分，图像质量优秀，影像对比度好，图像颗粒均匀，头颈部血管边缘平滑锐利、分支及远端显示好，无伪影，易于诊断；4分，图像质量好，影像对比度较好，图像颗粒较均匀，头颈部血管显示好，分支显示好，远端显示较好，有少许伪影，可以诊断；3分，图像质量可，影像对比度一般，图像颗粒欠均匀，头颈部血管主干显示好，主要分支显示较好，分支及远端显示欠佳，有伪影，但不影响诊断；2分，图像质量不佳，影像对比度较差，图像颗粒粗，头颈部血管边缘毛糙，分支及远端显示差，有明显伪影，影响诊断；1分，图像质量差，影像对比度差，图像颗粒粗，头颈部血管边缘毛糙，主干、分支显示差，有严重伪影，不能诊断。≥3分的图像被认为可以用于临床诊断。

1.5 辐射剂量及对比剂碘摄入量 详细记录并比较2组CT扫描自动生成的患者x线剂量参数，包括CTDIvol(mGy)和剂量长度乘积(doselength product, DLP(mGy·cm))，并计算有效剂量[effective dosage, ED(mSv)]=DLP×k，其中k为转换系数，在头颈部CTA扫描时k的取值为0.003 1mSv/(mGy·cm)^[6]。同时计算并比较2组对比剂碘摄入量I(mg)=对比剂浓度(含碘量mg/mL)×对比剂剂量(mL)。

1.6 统计学分析 采用R version 3.5.3软件分析。采用χ²检验对2组患者的性别构成进行比较；BMI、年龄、扫描长度、CT值、噪声、SNR、CNR、CTDIvol、DLP、ED等计数资料的差异性比较则先行正态性及方差齐性检验，若满足正态分布且方差齐，采用两独立样本t检验，若样本数据不满足正态分布，则采用Mann-Whitney U检验，若仅方差不齐，则采用矫正P值。图像质量评分的比较采用Mann-Whitney U检验。分析观察者间评分的一致性采用Kappa检验，Kappa值<0.40，一致性差；0.40≤Kappa值<0.75，一致性一般；Kappa值≥0.75，一致性好。以P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料的比较 常规剂量组与双低剂量组的性别构成、年龄、BMI的差异均无统计学意义(χ²=1.510, t=-1.400、0.400、-0.208, 均P>0.05, 表1)。

2.2 图像客观质量评价 CD组与DLD组图像各层面血管CT值的差异均无统计学意义(t=-0.705、0.689、0.906, 均P>0.05, 表2)。颈内动脉中段、大脑中动脉M1段层面，两组图像噪声、SNR、CNR的差异均无统计学意义；但颈总动脉层面，两组图像噪声、SNR、CNR的差异有统计学意义(t=2.855、-4.959、-5.041, 均P<0.05, 表2)，DLD组噪声小于CD组，而SNR、CNR大于CD组。

表2 两组图像各层面血管的客观评价指标比较

组别	例数	CT值(HU)			噪声(HU)		
		CCA	ICA	MCA	CCA	ICA	MCA
CD组	51	304±61	300±55	273±49	31±10	31±8	28±6
DLD组	51	311±46	293±45	264±41	25±8	30±6	27±5
t值		-0.705	0.689	0.906	2.855	1.246	1.342
P值		0.482	0.492	0.367	0.005	0.216	0.183
组别	例数	信噪比			对比噪声比		
		CCA	ICA	MCA	CCA	ICA	MCA
CD组	51	10.4±2.3	9.9±1.6	9.8±1.5	8.2±1.9	8.0±1.4	8.5±1.4
DLD组	51	12.8±2.6	10.1±1.9	10.0±1.8	10.2±2.2	8.2±1.7	8.5±1.7
t值		-4.959	-0.830	-0.763	-5.041	-0.825	-0.176
P值		0.000	0.408	0.447	0.000	0.412	0.861

2.3 图像主观质量评价 CD组与DLD组的图像质量评分均 ≥ 3 分，均能满足诊断的要求。2名医师对2组图像质量评价的一致性良好(Kappa值分别为0.817、0.825，均 $P<0.05$ ，表3)。2名医师对2组图像的主观质量评分的差异无统计学意义($Z=-0.572$ 、 -0.283 ，均 $P>0.05$ ，表3、图1、2)。

2.4 辐射剂量及对比剂碘摄入量比较 CD组、DLD组的CTDIvol分别为 $11.95\pm 0.14\text{mGy}$ 、 $7.54\pm 0.10\text{mGy}$ ，DLP分别

为 $512.56\pm 26.76\text{mGy}\cdot\text{cm}$ 、 $331.67\pm 21.32\text{mGy}\cdot\text{cm}$ ，ED分别为 $1.59\pm 0.08\text{mSv}$ 、 $1.03\pm 0.07\text{mSv}$ ，其差异均有统计学意义($t=186.138$ 、 37.753 、 37.753 ，均 $P<0.001$ ，图3)。DLD组较CD组CTDIvol降低36.9%，DLP降低35.3%，ED降低35.2%。CD组、DLD组对比剂碘摄入量分别为24.5g、10.5g，DLD组较CD组对比剂碘摄入量降低57.1%。

表3 2名医师对2组图像的主观质量评分比较

医师	CD组	DLD组	Z值	P值
医师甲			-0.572	0.567
5分	24	22		
4分	25	25		
3分	2	4		
医师乙			-0.283	0.777
5分	25	24		
4分	24	24		
3分	2	3		
Kappa值	0.817	0.825		

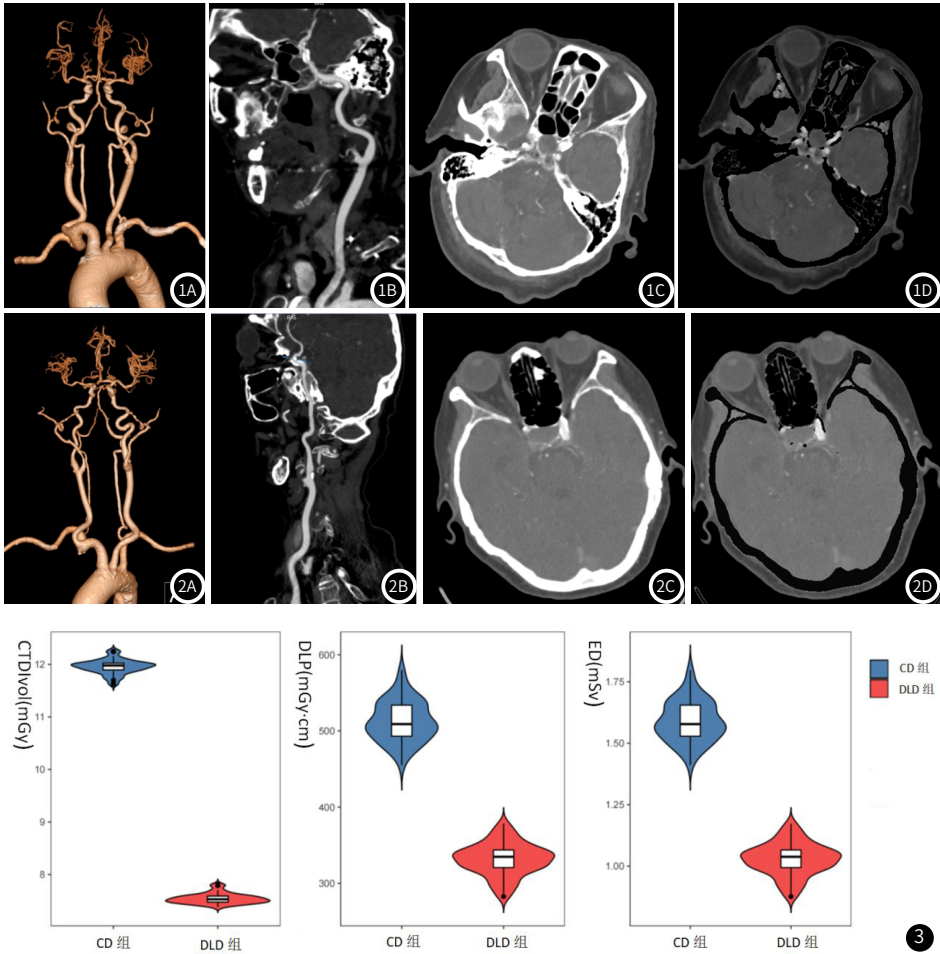


图1A-图1D 女，75岁，行常规剂量(CD)双能量头颈部CTA检查，VR (1A)、CPR (1B)、等效120kV轴位图(1C)，双能量去骨去钙化轴位图(1D)。
图2A-图2D 女，79岁，行双低剂量(DLD)双能量头颈部CTA检查，VR (2A)、CPR (2B)、VMI-65keV轴位图(2C)，双能量去骨去钙化轴位图(2D)。两组图像血管均具有良好的对比度，周围解剖结构清晰，均可清楚显示左侧颈内动脉颅内段钙化斑，双能量去除钙化斑后血管狭窄程度易于诊断；两名医师对两组图像的主观评分均为5分。
图3 两组图像辐射剂量参数比较。

3 讨 论

本研究将“双低”扫描技术应用与双能量扫描模式下的头颈部CTA,成像效果与常规剂量双能量头颈部CTA相当,实现了其辐射剂量及含碘对比剂用量的“双降”,降低了患者所受辐射损伤及诱发造影剂肾病的风险。双能量头颈部CTA临床应用丰富^[14-15]:虚拟平扫与碘图能够鉴别缺血性脑卒中患者介入治疗后的继发出血或碘对比剂残留^[16]、能在出血性脑卒中患者高密度血肿中检测出活动性造影剂漏出^[17],这与脑出血的进展及预后密切相关。线性融合及虚拟单能谱技术能有效减少因致密骨及金属植入物造成的硬化线束伪影^[18-19],有利于CTA图像中血管及斑块的显示。

本研究两组图像主观图像质量评分均大于等于3分,均能满足诊断需求。客观图像质量指标颈总动脉、颈内动脉、大脑中动脉层面血管CT值均值大于250Hu。CTA检查中血管的CT值过低不利于血管细节及软斑块的显示,CT值过高会使得血管腔与钙化斑块难以区分。研究^[20]显示,血管腔平均X线能量的衰减达到250HU(最低200HU)以上,观察者即能分辨血管壁的钙化与粥样斑块,达到评价血管的对比度需求。在颈内动脉、大脑中动脉层面的血管噪声、SNR及CNR在低剂量条件下保持与常规剂量相当,这是由于SAFIRE迭代重建算法能有效降低因低剂量扫描造成的过多噪声,保持图像质量。值得注意的是,低剂量扫描方案下颈总动脉中段水平具有更低的噪声,更高的SNR及CNR,这可能与低剂量组对比剂用量明显减少,对比剂滞留造成的静脉污染减少有关^[21]。

基于双球管双探测器的双能量扫描技术(西门子双源CT)在高千伏球管上安装了锡滤过滤器,使得高千伏球管电子束的平均能量上移(如第二代双源CT 140KV光谱经0.4mm锡滤过滤器平均能量从86keV移动到97KeV),该技术使得高低光子束的能谱分离增加,剂量效率增加^[22],从而使得双能量扫描在相同噪声条件下不增加甚至减少辐射剂量^[23-24]。第2代双源CT提供了80kV/Sn140kV或100kV/Sn140kV两种管电压组合方式,本研究低剂量组采用80kV/Sn140kV管电压组合模式,一方面,辐射剂量与管电压的平方成反比,低千伏球管采用80kV而不是100kV有助于整体辐射剂量的降低,另一方面,该管电压组合模式具有更高的能谱分离度,能提高剂量效率。本研究DLD组采用增大螺距联合实时动态曝光剂量调节的CARE Dose 4D自动管电流调制技术,增加螺距能够减少扫描时间以减少辐射剂量、CARE Dose 4D技术能根据组织结构的厚薄自动的调整管电流从而减少辐射剂量^[6]。本研究DLD组有效剂量CD组降低了35.2%(1.03 ± 0.07 mSv VS 1.59 ± 0.08 mSv),较Lenga等^[25]报告的第2代双源CT双能量头颈部CTA有效剂量下降37.5%(1.03 ± 0.07 mSv VS 1.6 ± 0.3 mSv);较马光明等^[26]报告的低剂量头颈部双能量(基于快速高低千伏转换技术)剪影CTA有效剂量降低64.6%(1.03 ± 0.07 mSv VS 2.91 ± 0.57 mSv);较黄涛^[7]等报告的低剂量单能量头颈部CTA有效剂量仅高出6.2%(1.03 ± 0.07 mSv VS 0.97 ± 0.30 mSv)。

双源CT双能量虚拟单能谱技术(VMI)能够实现40-190KeV任意单能谱条件下的图像重建,低能级条件下光子的能量更接近碘离子光电吸收的K边缘(33.2Kev),增强了光电效应,提高了X线经过含碘对比剂的衰减,即使血管内的含碘造影剂浓度下降,任然能够保持CT值以满足诊断需求。本研究采用30mL对比剂联合虚拟单能谱重建技术(65KeV能级),使得碘摄入量减少了57.1%(10.5 g VS. 24.5 g)。本DLD组较马光明等^[26]基于快速高低千伏转换技术的双低剂量头颈部双能量剪影CTA碘摄入量低22.2%(10.5 g VS. 13.5 g)。牛朋影等^[27]利用虚拟单能谱技术(40KeV)将双源CT常规辐射剂量双能量头颈部CTA对比剂用量降低到20mL,然而极低能级(40KeV)的单能谱重建将导致噪声增加^[9],本研究作采用低辐射剂量、低对比剂用量的“双低”扫描方案,对比剂用量不适宜过低。

本研究的不足:(1)未将DSA作为金标准,比较2组图像在诊断效能上的差别。(2)仅采取虚拟单能谱一种后处理方式重建图像,未比较其与其他后处理方式(如非线性融合)的优劣。(3)未对2组患者检查前后的肾功能指标进行统计分析。笔者将在后续工作中完善研究。

综上所述,“80kV/Sn140kV管电压组合、大螺距联合CARE-DOSE 4D及SAFIRE技术”和“30mL含碘对比剂联合VMI-65KeV

重建技术”的“双低剂量”双能量头颈部CTA扫描技术不降低图像质量,而可以降低患者接受的辐射剂量和碘摄入量,临床应用价值较高。

参考文献

- [1] 蔡武,胡春洪,王希明,等.“四低”联合自动管电流调节和全模型迭代重建技术在头颈部CT血管成像中的应用[J].中华医学杂志,2018,98(1):30-35.
- [2] Leil M M,Kramer M,Klotz E,et al.Carotid computed tomography angiography with automated bone suppression:a comparative study between dual energy and bone subtraction techniques[J].Invest Radiol,2009,44(6):322-328.
- [3] Qu H,Gao Y,Li M,et al.Dual energy computed tomography of internal carotid artery:a modified dual-energy algorithm for calcified plaque removal,compared with digital subtraction angiography[J].Frontiers in Neurology,2021,11.
- [4] 苗晓翔,苏垠平,徐辉,等.浅议放射卫生在医用辐射防护领域的几个问题[J].中华放射医学与防护杂志,2021,41(4):276-281.
- [5] 陈韵岱,陈纪言,傅国胜,等.碘对比剂血管造影应用相关不良反应中国专家共识[J].中国介入心脏病学杂志,2014,22(6):341-348.
- [6] 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.
- [7] 黄涛,马隆佰,毛一朴,等.低电压与个体化对比剂用量结合迭代算法头颈部CTA应用[J].放射学实践,2020,35(6):790-795.
- [8] Kayan M, Demirtas H, Türker Y, et al. Carotid and cerebral CT angiography using low volume of iodinated contrast material and low tube voltage[J]. Diagnostic and Interventional Imaging, 2016, 97(11): 1173-1179.
- [9] Zhao L, Li F, Zhang Z, et al. Assessment of an advanced virtual monoenergetic reconstruction technique in cerebral and cervical angiography with third-generation dual-source CT: feasibility of using low-concentration contrast medium[J]. European Radiology, 2018, 28(10): 4379-4388.
- [10] 付永春,江滨,张磊,等.双层探测器能谱CT 60 keV单能图像在头颈部CTA中的应用[J].中国医学影像学杂志,2021,29(5):449-453.
- [11] 邱慎满,徐东风,计一丁,等.70kVp管电压及25mL对比剂在大螺距肺动脉成像中的应用[J].实用放射学杂志,2019,35(2):294-298.
- [12] 王国树,吕发金,周旻,等.非线性融合技术在头颈部CTA中的价值:体模实验[J].中国医学影像技术,2018,34(7):1085-1089.
- [13] Leithner D, Mahmoudi S, Wichmann J L, et al. Evaluation of virtual monoenergetic imaging algorithms for dual-energy carotid and intracerebral CT angiography: Effects on image quality, artefacts and diagnostic performance for the detection of stenosis[J]. European Journal of Radiology, 2018, 99: 111-117.
- [14] 柏瑞,黄俊成,何小华,等.低剂量双能量CT诊断膝关节前交叉韧带损伤的临床对照分析[J].中国CT和MRI杂志,2022,20(10):157-159.
- [15] 李绍新.头颅双能量CTA成像在活动性脑出血诊治中应用研究[J].中国CT和MRI杂志,2017,15(8):52-55.
- [16] Phan C M, Yoo A J, Hirsch J A, et al. Differentiation of hemorrhage from iodinated contrast in different intracranial compartments using dual-energy head CT[J]. American Journal of Neuroradiology, 2012, 33(6): 1088-1094.
- [17] Watanabe Y, Tsukabe A, Kunitomi Y, et al. Dual-energy CT for detection of contrast enhancement or leakage within high-density haematomas in patients with intracranial haemorrhage[J]. Neuroradiology, 2014, 56(4): 291-295.
- [18] Abdulazim A, Rubbert C, Reichelt D, et al. Dual- versus single-energy CT-angiography imaging for patients undergoing intracranial aneurysm repair[J]. Cerebrovascular Diseases, 2017, 43(5-6): 272-282.
- [19] Winkhofer 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.
- [20] Mohan S, Agarwal M, Pukenas B. Computed tomography angiography of the neurovascular circulation[J]. Radiol Clin North Am, 2016, 54(1): 147-162.
- [21] 梁永超,莫夏萍,邓德茂,等.头颈部CTA中预测试的剂量优化研究——“三低”联合窄准直器宽度的应用效果[J].临床放射学杂志,2018,37(1):5.
- [22] Primak A N, Giraldo J C, Eusemann C D, et al. Dual-source dual-energy CT with additional tin filtration: dose and image quality evaluation in phantoms and in vivo[J]. AJR Am J Roentgenol, 2010, 195(5): 1164-1174.
- [23] Henzler T, Fink C, Schoenberg S O, et al. Dual-energy CT: radiation dose aspects[J]. American Journal of Roentgenology, 2012, 199(5. supplement): S16-S25.
- [24] 罗显丽,孙铅,陈晓曦,等.SAFIRE重建联合双能量非线性融合技术在低剂量CTPA中的应用[J].临床放射学杂志,2020,39(10):2098-2102.
- [25] Lenga L, Lange M, Martin S S, et al. Head and neck single- and dual-energy CT: differences in radiation dose and image quality of 2nd and 3rd generation dual-source CT[J]. The British Journal of Radiology, 2021, 94(1122).
- [26] 马光明,陈静,韩冬,等.能谱CT双低减影法在头颈CTA成像中的应用[J].临床放射学杂志,2020,39(5):1009-1013.
- [27] 牛朋影,蒋磊,刘渊,等.双能量CT不同技术在低剂量对比剂头颈CTA图像优化中的对比[J].中国医学影像技术,2017,33(2):285-289.

(收稿日期:2023-06-04)

(校对编辑:翁佳鸿)