

双低扫描方案结合迭代重建CT血管成像在婴幼儿先天性心脏病诊断的应用

樊敏, 邹萌, 陈庭宇, 李娟, 程巍
四川大学华西医院放射科, 四川 成都 610041

【摘要】目的:探讨双源炫速CT-flash低剂量扫描技术及低对比剂注射方案结合迭代重建CT血管成像在婴幼儿先天性心脏病诊断中的价值。**方法:**收集拟诊断为先天性心脏病行心脏血管扫描的患者86例,随机分为实验组(44例)与对照组(42例),分别采用双低扫描方案与常规扫描方案,记录两组患者的对比剂用量,容积CT剂量指数和剂量长度乘积,计算有效辐射剂量(ED);由两位经验丰富的放射医师独立诊断并采用4分法对图像质量进行评估,对结果一致性评价采用Kappa检验;测量两组图像的信噪比和对比度噪声比(CNR);以数字减影血管造影或手术结果作为金标准,比较两种扫描方法的诊断价值。**结果:**实验组患儿的ED为 (0.30 ± 0.16) mSv,对照组患儿ED为 (0.97 ± 0.34) mSv,差异有统计学意义($P<0.01$);对比剂注射剂量分别为 (10.01 ± 1.87) 和 (16.04 ± 3.17) mL,差异有统计学意义($P<0.05$);实验组图像质量评分 (3.40 ± 0.57) 分,优于对照组 (2.90 ± 0.89) 分,两组图像均符合诊断要求,差异有统计学意义($P<0.05$);两组图像CNR差异有统计学意义;实验组与对照组的诊断敏感度分别为97.4%和97.9%,特异度分别为98.7%和97.7%,诊断准确率分别为98.3%和97.8%,差异无统计学意义。**结论:**双低扫描方案结合迭代重建技术可大大降低婴幼儿患者的CT辐射剂量与对比剂注射剂量,图像质量优于常规扫描方案,且诊断准确率高,适合在临床扫描中推广运用。

【关键词】婴幼儿;先天性心脏病;体层摄影术;X线计算机;对比剂;迭代重建

【中图分类号】R814.42;R725.4

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)02-0185-05

Application of low radiation dose and low contrast agent scanning protocol combined with iterative reconstruction CT angiography in the diagnosis of congenital heart diseases in infants

FAN Min, ZOU Meng, CHEN Tingyu, LI Juan, CHENG Wei

Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Abstract: Objective To explore the diagnostic value of Somatom Definition Flash of low radiation dose and low contrast agent combined with iterative reconstruction CT angiography in congenital heart diseases (CHD) in infants. **Methods** Eighty-six patients with suspected CHD for angiography were randomly divided into experimental group (44 cases) and control group (42 cases) for low radiation dose and low contrast agent scanning protocol and conventional scanning protocol, separately. The contrast agent, volumetric CT dose index (CTDIvol) and dose-length product in two groups were recorded, and the effective radiation dose was calculated. The image quality was independently diagnosed by 2 experienced radiologists and assessed by 4 scores, and Kappa test was used for the consistency evaluation. The signal-to-noise ratios and contrast-to-noise ratios in two groups were measured. The diagnostic values of the two scanning protocols were compared with the surgical results or digital subtraction angiography as the gold standard. **Results** The effective radiation doses of infants in experimental group and control group were (0.30 ± 0.16) mSv and (0.97 ± 0.34) mSv, respectively, with statistical differences ($P<0.01$), and the injection of contrast agents were (10.01 ± 1.87) mL and (16.04 ± 3.17) mL, respectively, with statistical differences ($P<0.05$). Although the image quality score of experimental group was higher than that of control group, with statistical differences (3.40 ± 0.57 vs 2.9 ± 0.89 , $P<0.05$), both the image quality of the two groups met the diagnostic requirements. There were significant differences in contrast-to-noise ratio between two groups. The diagnostic sensitivities of experimental group and control group were 97.4% and 97.9%; the specificities were 98.7% and 97.7%; and the diagnostic accuracies were 98.3% and 97.8%, respectively. **Conclusion** The low

【收稿日期】2019-09-21

【基金项目】国家自然科学基金(81571638)

【作者简介】樊敏,初级技师,研究方向:CT和MR技术,E-mail: cw569282997@163.com

【通信作者】程巍,研究方向:胸部CT和MR技术,E-mail: 420496843@qq.com

radiation dose and low contrast agent scanning protocol combined with iterative reconstruction technique which can greatly reduce CT radiation dose and contrast agent injection for infant patients, obtain image quality which is better than that obtained by conventional scanning protocol and achieve a higher diagnostic accuracy is suitable for clinical application.

Keywords: infant; congenital heart disease; computed tomography; X-ray computer; contrast agent; iterative reconstruction

前言

先天性心脏病是临床常见疾病,而CT心脏血管成像(Computed Tomography Angiography, CTA)是重要的检查手段,相比于超声心动图,CTA对心外大血管结构畸形的细节显示更有优势,但由于电离辐射、对比剂不良反应等因素,在实际应用中受到限制^[1-2]。而且常规的对比剂注射方案产生的上腔静脉硬化束伪影也严重影响图像质量,给诊断带来一定困难。因此如何降低婴幼儿CT检查中的辐射剂量和对比剂用量一直是热点问题。关于使用超低剂量对比剂的先天性心脏病CTA成像的研究尚未见报道。本研究基于西门子双源炫速CT-flash低辐射剂量扫描方案,尝试采用超低对比剂用量,结合迭代重建技术,探讨其在婴幼儿先天性心脏病诊断中的应用价值。

1 对象与方法

1.1 临床资料

收集2017年3月~2019年1月在四川大学华西医院拟诊断为先天性心脏病行心脏血管扫描的患者86例,随机分为两组,44例为双低实验组,行flash扫描方式,采用低对比剂量(常规剂量减半)及迭代重建技术,其中男30例,女14例,年龄3月~6岁,平均2.72岁;42例使用常规螺旋CT扫描,其中男27例,女15例,年龄5月~6岁,平均2.16岁。

1.2 检查前准备

记录患者的身高、体质量、BMI以及留置血管是否通畅等情况,所有患者排除碘过敏、心肾功能不全等病史。两组对象年龄、体质量等一般资料差异无统计学意义($P>0.05$)。检查需在患儿安静时进行,若患儿无法处于自然睡眠状态,检查前适量给予水合氯醛,待患儿熟睡后扫描,扫描时应由家属陪同,并给予婴幼儿非检查部位及家属铅衣防护。检查前已告知患儿家属可能产生的风险(如对比剂渗漏、过敏等),并签署知情同意书。

1.3 扫描技术及参数

所有患儿均接受西门子二代双源CT(Somatom Definition Flash, Siemens Healthcare, Germany)扫描,扫描范围为胸廓入口至膈下1~2 cm,包括整个心脏及相关大血管。采用阈值触发扫描技术,兴趣区置于气管

分叉下1~2 cm水平的降主动脉内。阈值设置为100,自动触发后3 s开始扫描,也可将兴趣区置于空气中,目测主动脉显影后手动触发。双低实验组参数设置:采用flash扫描模式,同时使用双球管,参考管电压70 kV,参考管电流100 mA;以心动周期的55%为采集起始点,准直器2.0 mm×128.0 mm×0.6 mm,螺距3.4,旋转时间0.28 s,扫描时间0.2~0.3 s,采用非离子型对比剂碘比乐370 mgI/mL,对比剂注射量按患儿体质量0.75 mL/kg计算,采用先对比剂-生理盐水混合给药方式,混合比例7:3,高压注射器(Medrad Stellant CT)推注,给药速度0.8~1.2 mL/s,然后追加纯盐水5~10 mL,注射速度0.8~1.2 mL/s,扫描完成后图像重建采用迭代重建方式,迭代系数设为3。对照组患儿扫描方式使用回顾性心电门控螺旋扫描方法,参考管电压70 kV,参考管电流100 mA,准直器128.0 mm×0.6 mm,旋转时间0.28 s,螺距0.20~0.36(根据心率自动调节);采用碘比乐370 mgI/mL,对比剂注射量按患儿体质量1.5 mL/kg计算(常用标准剂量),采用对比剂-生理盐水混合给药方式,混合比例7:3,给药速度0.8~1.2 mL/s,图像重建采用常规滤波反投影方式。

1.4 辐射剂量及对比剂摄入量分析

记录检查患儿的容积剂量指数(CTDIvol)及剂量长度乘积(DLP),计算其有效辐射剂量(ED): $ED=k \times DLP$,其中 k 为转换因子,采用欧洲CT剂量标准指南:年龄小于4个月者,0.039 mSv/(mGy·cm);4个月~1岁者,0.026 mSv/(mGy·cm);1~6岁者,0.018 mSv/(mGy·cm)。根据每位患儿的对比剂用量计算碘摄入量。

1.5 图像质量评价

两组图像重建时均采用心动周期的55%时相重建,重建层厚0.75 mm,重建间隔0.7 mm。图像传送至Philips后处理工作站(EBW4.0),运用容积再现(Volume Rendering, VR)、最大密度投影、多平面重组等方法进行图像重组,多角度显示先心病各种病变。

1.5.1 主观评价 所有图像由两位经验丰富的放射医师对图像质量进行盲法评价,质量评价采用4分法:4分,无伪影干扰,病变显示清晰;3分,有少许伪影干扰,病变显示较清晰,不影响诊断;2分,有伪影干扰,病变显示欠清晰,但可做出倾向性诊断;1分,伪影较明显,病变显示不清晰,无法诊断。2~4分表示符合诊断需求,图像质量合格;1分表示不符合诊断需求,图像不合格。

1.5.2 客观评价 测定两组图像最大心腔平面内的左心室、降主动脉、竖脊肌的信噪比(SNR),获得该平面内图像对比度噪声比(CNR): $CNR_{左心室} = SNR_{左心室} - SNR_{竖脊肌}$, $CNR_{降主动脉} = SNR_{降主动脉} - SNR_{竖脊肌}$ 。

1.6 统计学方法

以数字减影血管造影(DSA)或手术结果作为金标准,计算双低实验组和对照组诊断异常病变的诊断符合率,采用 χ^2 检验;两位医师的图像主观评价结果一致性使用Kappa检验。两组患儿的一般资料及辐射剂量和两组图像CNR、主观评分均使用独立样本t检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 辐射剂量与对比剂用量

双低实验组的ED值为(0.30±0.16) mSv,均小于0.5 mSv,远低于对照组的ED值为(0.97±0.34) mSv(表1),两组之间差异有统计学意义($P<0.01$);对比剂注射剂量,双低实验组为(10.01±1.87) mL,对照组为(16.04±3.17) mL,差异有统计学意义($P<0.05$),双低实验组的对比剂量比常规剂量减少约38%。

表1 两组患者的辐射剂量比较

Tab.1 Comparison of the radiation dose in two groups of patients

组别	n	CTDIvol/mGy	DLP/mGy·cm	ED/mSv
实验组	44	0.78±0.34	16.8±8.7	0.30±0.16
对照组	42	3.38±1.47	53.8±18.7	0.97±0.34
P值	-	0.000	0.000	0.000

CTDIvol:CT容积剂量指数;DLP:剂量长度乘积;ED:有效辐射剂量

2.2 图像质量评价

两组图像质量评分均符合诊断要求,两位医师对两组图像质量的主观评价差异均无统计学意义,Kappa值分别为0.65、0.70;图像质量主观评价的一致性良好,显示双低实验组的降主动脉和左室CNR较对照组高,而且主观评分高于对照组,两组之间CNR差异无统计学意义(表2)。在低对比剂剂量下,两组不同扫描方案下得到重建图像见图1;常规滤波反投影重建与迭代重建结果见图2。

2.3 诊断结果分析

以DSA或手术结果为金标准,双低实验组与对照组的诊断敏感度分别为97.4%和97.9%,特异度分别为98.7%和97.7%,诊断准确率分别为98.3%和97.8%,两组差异无统计学意义(表3)。

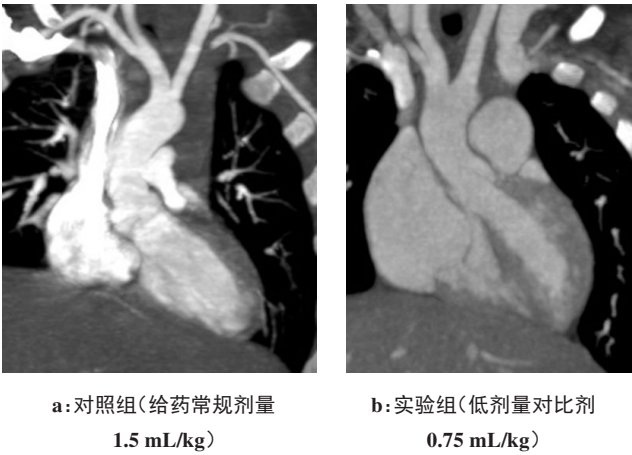
3 讨论

表2 两组图像的客观及主观评价结果

Tab.2 Objective and subjective evaluation results of two groups

组别	n	CNR1	CNR2	主观评分
实验组	44	11.52±6.28	12.57±5.12	3.40±0.57
对照组	42	9.92±4.26	11.13±4.88	2.90±0.89
P值	-	0.65	0.70	P<0.05

CNR1:降主动脉CNR;CNR2:左室CNR

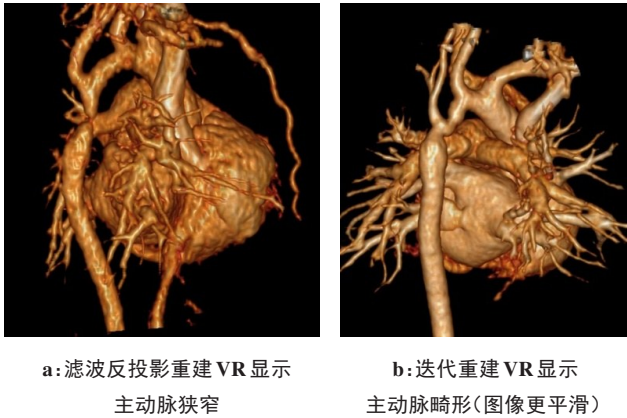


a:对照组(给药常规剂量1.5 mL/kg)
b:实验组(低剂量对比剂0.75 mL/kg)

图1 实验组与对照组二维MPR图像对比

Fig.1 Comparison of two-dimensional MPR images between experimental group and control group

图1a上腔静脉高浓度对比剂,射线硬化束伪影明显;图1b各腔室对比剂浓度均匀,无明显伪影



a:滤波反投影重建VR显示主动脉狭窄
b:迭代重建VR显示主动脉畸形(图像更平滑)

图2 实验组与对照组三维VR图像对比

Fig.2 Comparison of three-dimensional VR images between experimental group and control group

婴幼儿先天性心脏病多采用CTA成像帮助诊断,其电离辐射是重要的限制因素,婴幼儿接受X线照射后的潜在致癌率是成人的10倍^[3],因而在满足诊断的前提下,对婴幼儿更要严格遵循合理实现更低剂量的原则。Saad等^[4]采用128层双源CT 80 kV对先天性心脏病患儿行低剂量成像,ED最低为(0.5±0.2)mSv。本研究平均剂量0.3 mSv,低于上述研究的辐射剂量。

表3 诊断结果分析(单位:例)
Tab.3 Analysis of diagnostic results (cases)

畸形变异	实验组					对照组				
	手术或DSA	TP	TN	FP	FN	手术或DSA	TP	TN	FP	FN
房间隔缺损	9	8	35	0	1	10	9	30	2	1
室间隔缺损	28	27	15	1	1	27	26	13	2	1
肺动脉狭窄	30	30	14	0	0	30	30	12	0	0
右心室增大	28	28	16	0	0	30	30	12	0	0
主动脉骑跨	28	28	15	1	0	25	24	16	1	1
主动脉缩窄	10	10	34	0	0	8	8	34	0	0
大动脉转位	7	7	37	0	0	7	7	35	0	0
冠脉起源异常	2	1	42	0	1	1	1	41	0	0
动脉导管未闭	5	5	36	2	1	4	4	36	2	0
单心室	3	3	41	0	0	3	3	39	0	0
残存左上腔	5	5	39	0	0	3	3	39	0	0
合计	155	152	324	4	4	148	145	307	7	3

TP:真阳性;TN:真阴性;FP:假阳性;FN:假阴性

3.1 西门子 flash 扫描方案

本研究采用的 flash 技术是大螺距扫描方式,螺距3.4,采用前瞻性心电门控,采集时间约为0.2~0.3 s,由于采集速度远大于常规扫描方式,更利于冻结婴幼儿患者的呼吸运动和心脏运动,同时采集时间的缩短也大大降低了辐射剂量^[5]。另外 70 kV 及 4D care dose 的引入也是降低辐射的重要因素。Nievelstein 等^[6]建议儿童体部 CT 扫描方案以体质量为依据,使用不同的管电压,并建议对胸部使用 80~100 kV 的低电压扫描。而本研究中的 4D care dose 技术可先根据定位图像自动选择 70 或 80 kV,在实时扫描时自动调整毫安秒,在保证图像质量的前提下,最大限度地降低扫描剂量。Machida 等^[7]和 Seibert 等^[8]研究证实,当电子能量较低时,碘对比剂的 CT 值增高。因此低电压更利于增强 CT 的对比,低于常规的 70 kV 管电压也已应用于临床^[9]。值得注意的是,flash 大螺距扫描与宽体探测器技术(例如 256 或 320 排探测器)均可实现超快速与低剂量扫描,心脏冠脉扫描均可在一个心动周期内完成,相对而言宽体探测器扫描的辐射剂量稍高^[10]。另有研究结果显示,GE 宽体探测器针对先天性心脏病的 CT 辐射剂量约为 0.57 mSv,但由于病例的选择和参数不具有统一性,因此各技术之间优劣势尚待多中心研究的比较^[11]。

3.2 对比剂注射方案

根据血流动力学中注射对比剂后的时间密度曲线,在常规条件下注射对比剂量越多,采集时目标区域的 CT 值更能保持恒定水平^[12]。但本研究中由于 flash 快速扫描技术的引入(扫描时间小于 0.3 s),CT 峰值平台持续时间的要求大大降低,使降低对比剂用量成为可能,而且低电压成像可提高碘离子吸收率,但也大大降低电子的穿透能力,导致图像硬化伪影增高,故降低对比剂用量也能减少上腔静脉的硬化束伪影干扰。文献[13-14]采用 270 mgI/mL 对比剂,1.5 mL/kg×体质量(kg),使用效果显著,但此类对比剂价格昂贵,且低浓度对比剂的使用范围并不广泛;Knipp 等^[15]研究在腹盆腔 CTA 时将对比剂用量减半,通过低电压(80 kV)联合迭代重建技术成像效果显著。本研究采用 370 mgI/mL 对比剂与生理盐水 7:3 混合给药方式,总量 0.75 mL/kg(用量减半),对比剂注射完成后再注入一定剂量的盐水,可减少上腔静脉的硬化束伪影干扰(图 1),右房显示更佳;而且混合给药使得对比剂浓度与用量降低(本研究中对比剂用量减少 38%),也减少对比剂渗漏风险以及过敏反应的发生率。此外,研究表明低剂量的等渗对比剂所致对比剂肾病危险性明显低于大剂量高渗对比剂,因此降低对比剂用量也可降低 CIN 发生的风险^[16-18]。

3.3 迭代重建技术

CT 常用的滤过反投影重建算法(FBP)对噪声和伪

影较敏感,如果大幅降低kV和mAs等扫描条件,将会导致图像质量迅速下降。迭代重建技术自2009年开始广泛应用于临床,它通过在投影空间和图像空间进行基于噪声模型系统和解剖系统进行迭代运算,可消除低光子伪影,降低图像噪声,提高图像信噪比^[19-21]。迭代重建技术可降低图像噪声,大幅减低“低电压-高管电流”组合的辐射剂量,拓宽低电压扫描的应用范围,使“低电压-低管电流”方案应用于临床,对婴幼儿检查意义较大。研究表明,在管电压100和80 kV下,采用平均辐射剂量1.2 mGy的迭代重建技术可达到2.6 mGy的FBP的噪声水平^[22]。Nakagawa等^[23]研究采用70 kV来减少辐射剂量,但图像噪声增高,结合迭代重建算法可消除增高的噪声,以提高图像质量。本研究结果也证实,在对比剂与射线剂量降低的情况下,使用迭代重建可以明显改善图像信噪比(图2b),提高诊断的准确率。

综上所述,在婴幼儿先天性心脏病的CTA血管成像中,采用双低技术结合迭代重建,可以有效降低辐射剂量和对比剂浓度及总量,迭代重建可提高图像信噪比降低噪声,在保证图像质量的前提下,减少不良事件发生的概率,值得在临床工作中推广应用,而且随着技术的发展,辐射剂量和对比剂的用量也可能再进一步降低。

【参考文献】

- [1] PAUL J F, ROHNEAN A, ELFASSY E, et al. Radiation dose for thoracic and coronary step-and-shoot CT using a 128-slice dual-source machine in infants and small children with congenital heart disease[J]. *Pediatr Radiol*, 2011, 41(2): 244-249.
- [2] 王茸,徐香玖,周星,等. 双源CT与超声心动图对先天性心脏病术前诊断价值的对比研究[J]. *实用放射学杂志*, 2016, 32(9): 1467-1469. WANG R, XU X J, ZHOU X, et al. Comparison of diagnostic accuracy of dual-source CT and ultrasonocardiogram in detecting congenital heart diseases[J]. *Journal of Practical Radiology*, 2016, 32(9): 1467-1469.
- [3] 纪晓鹏,陈立光,王锡明,等. 双源CT前瞻性心电触发大螺距扫描在先天性心脏病诊断中的初步应用[J]. *中华放射学杂志*, 2012, 46(10): 925-928. JI X P, CHEN L G, WANG X M, et al. Initial application of prospective electrocardiography-triggering high-pitch spiral acquisition by dual-source CT in children with congenital heart diseases[J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2012, 46(10): 925-928.
- [4] SAAD M B, ROHNEAN A, SIGAL-CINQUALALBRE A, et al. Evaluation of image quality and radiation dose of thoracic and coronary dual source CT in 110 infants with congenital heart disease[J]. *Pediatr Radiol*, 2009, 39(7): 668-676.
- [5] 程巍,兰斌,李真林,等. 双源CT大螺距扫描技术在小儿先天性心脏病诊断的临床应用[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2015, 46(2): 307-310. CHENG W, LAN B, LI Z L, et al. Clinical application of dual-source CT high-pitch scanning technique in diagnosis of congenital heart disease in children[J]. *Journal of Sichuan University (Medical Science Edition)*, 2015, 46(2): 307-310.
- [6] NIEVELSTEIN R A, VAN DAM I M, VAN DER MOLEN A J. Multidetector CT in children: current concepts and dose reduction strategies[J]. *Pediatr Radiol*, 2010, 40(8): 1324-1344.
- [7] MACHIDA H, FUKUI R, TANAKA I, et al. A method for selecting a protocol for routine body CT scan using gemstone spectral imaging with or without adaptive statistical iterative reconstruction: phantom experiments[J]. *Jpn J Radiol*, 2014, 32(4): 217-223.
- [8] SEIBERT J A, BOONE J M. X-ray imaging physics for nuclear medicine technologists. Part 2: X-ray interactions and image formation[J]. *J Nucl Med Technol*, 2005, 33(1): 3-18.
- [9] ROMPEL O, GLICKLER M, JANKA R, et al. Third-generation dual-source 70-kVp chest CT angiography with advanced iterative reconstruction in young children: image quality and radiation dose reduction[J]. *Pediatr Radiol*, 2016, 46(4): 462-472.
- [10] HEDGIRE S S, BALIYAN V, GHOSHHAJRA B B, et al. Recent advances in cardiac computed tomography dose reduction strategies: a review of scientific evidence and technical developments[J]. *J Med Imaging*, 2017, 4(3): 031211.
- [11] 闫昆,张彩衍,陈国平,等. 中低流速肘静脉注射对比剂肺动脉时间密度曲线分析[J]. *实用医学杂志*, 2012, 28(3): 426-428. YAN K, ZHANG C Y, CHENG G P, et al. Analysis of pulmonary artery time density curve of middle and low velocity cubital vein injection contrast agent[J]. *The Journal of Practical Medicine*, 2012, 28(3): 426-428.
- [12] 范丽娟,徐冬生,张计旺,等. 宽体探测器低剂量CT在婴幼儿先天性心脏病中的应用价值[J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2018, 33(13): 1004-1007. FAN L J, XU D S, ZHANG J W, et al. Application value of a whole-heart CT scanner in infants with congenital heart disease[J]. *Chinese Journal of Applied Clinical Pediatrics*, 2018, 33(13): 1004-1007.
- [13] 陈博,戴婷婷,程建敏,等. 双低技术联合迭代重建技术在小儿复杂性先天性心脏病CT血管成像中的应用[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2018, 38(7): 547-551. CHEN B, DAI T T, CHENG J M, et al. Application research of double low scanning technology combined with iterative reconstruction technique in CT angiography of pediatric complex congenital heart disease[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2018, 38(7): 547-551.
- [14] HWANG J Y, CHOO K S, CHOI Y Y, et al. Subjective and objective image differences in pediatric computed tomography cardiac angiography using lower iodine concentration[J]. *Pediatr Radiol*, 2017, 47(6): 701-709.
- [15] KNIPP D, LANE B F, MITCHELL J W, et al. Computed tomographic angiography of the abdomen and pelvis in azotemic patients utilizing 80-kV (p) technique and reduced dose iodinated contrast: comparison with routine 120-kV(p) technique[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2017, 41(1): 141-147.
- [16] ENG J, WILSON R F, SUBRAMANIAM R M, et al. Comparative effect of contrast media type on the incidence of contrast-induced nephropathy: a systematic review and meta analysis[J]. *Ann Intern Med*, 2016, 164(6): 417-424.
- [17] PAVLIDIS A N, JONES D A, SIRKER A, et al. Prevention of contrast-induced acute kidney injury after percutaneous coronary intervention for chronic total coronary occlusions[J]. *Am J Cardiol*, 2015, 115(6): 844-851.
- [18] AJAMI G, DERAKHSHAN A, AMOOZGAR H, et al. Risk of nephropathy after consumption of nonionic contrast media by children undergoing cardiac angiography: a prospective study[J]. *Pediatr Cardiol*, 2010, 31(5): 668-673.
- [19] WILLEMINK M J, DE JONG P A, LEINER T, et al. Iterative reconstruction techniques for computed tomography. Part 1: technical principles[J]. *Eur Radiol*, 2013, 23(6): 1623-1631.
- [20] LAQMANI A, KURFUEST M, BUTSCHEIDT S A, et al. CT pulmonary angiography at reduced radiation exposure and contrast material volume using iterative model reconstruction and iDose(4) technique in comparison to FBP[J]. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0162429.
- [21] LANBERT J, MACKENZIE J D, CODY D D, et al. Techniques and tactics for potimazing CT dose in adults and children: atate of the art and future advances[J]. *J Am Coll Radiol*, 2014, 11(3): 262-266.
- [22] PONTANA F, PAGNIEZ J, DUHAMEL A, et al. Reduced dose low-voltage chest CT angiography with sinogram-affirmed iterative reconstruction *versus* standard-dose filtered back projection[J]. *Radiology*, 2013, 267(2): 609-618.
- [23] NAKAGAWA M, OZAWA Y, SAKURAI K, et al. Image quality at low tube voltage (70 kV) and sinogram-affirmed iterative reconstruction for computed tomography in infants with congenital heart disease[J]. *Pediatr Radiol*, 2015, 45(10): 1472-1479.

(编辑:陈丽霞)