

论 著

双源CT低剂量Turbo Flash扫描模式迭代重建在婴幼儿肺部感染中的应用价值*

孙升级 徐 媛 李海萍
屈 瑞 吴世杰 刘建莉*

兰州大学第二医院放射科(甘肃兰州 730030)

【摘要】目的 探讨双源CT低剂量Turbo Flash扫描模式高级模拟迭代重建(ADMIRE)在婴幼儿非镇静状态下胸部CT检查中的图像质量、辐射剂量及临床应用价值。**方法** 前瞻性分析本院2022年3月至8月因临床怀疑肺部感染需要胸部CT检查的婴幼儿患者90例。随机分为100kV实验组、70kV实验组和常规扫描对照组,每组各30例。实验组均采用西门子第3代双源CT、Turbo Flash扫描模式,ADMIRE重建;常规扫描对照组采用西门子64层CT常规儿童胸部CT平扫协议。比较三组患儿的扫描长度、扫描时间、辐射剂量和图像质量。**结果** 100kV实验组的扫描时间、辐射剂量(SSDE)分别较常规扫描对照组下降88.48%、84.74%,差异有统计学意义($P < 0.01$),较70kV实验组差异无统计学意义($P > 0.05$)。3组图像均满足临床诊断要求,常规扫描对照组图像可见不同程度的运动伪影,图像质量评分均低于100kV实验组和70kV实验组,差异有统计学意义($P < 0.01$)。**结论** 婴幼儿胸部CT低剂量Turbo Flash扫描模式联合ADMIRE(3级)重建可在满足临床诊断的前提下明显缩短扫描时间减少运动伪影、大幅度降低患儿的辐射剂量、提高图像质量,保障婴幼儿患者非镇静状态胸部CT检查质量。

【关键词】 婴幼儿; 胸部; 辐射剂量;
体层摄影术; X线计算机; 迭代重建

【中图分类号】 R563.1

【文献标识码】 A

【基金项目】 甘肃省基础研究创新群体
项目(21JR7RA432)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.07.021

The Value of Dual-source CT Low-dose Turbo Flash Scan Pattern Iterative Reconstruction in Infantile Lung Infections*

SUN Sheng-ji, XU Yuan, LI Hai-ping, QU Rui, WU Shi-jie, LIU Jian-li*

Department of Radiology, Lanzhou University Second Hospital, Lanzhou 730030, Gansu Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the image quality, radiation dose, and clinical value of dual-source CT low-dose Turbo Flash scanning mode Advanced modeled iterative reconstruction (ADMIRE) in chest CT examinations of infants and children under non-sedation. **Methods** Prospective analysis of 90 infants and children who required chest CT examination for clinical suspicion of lung infection from March to August 2022 in our hospital. They were randomly divided into 100kV experimental group, 70kV experimental group and conventional scanning control group, with 30 cases in each group. The experimental group all used Siemens 3rd generation dual-source CT, Turbo Flash scanning mode, and ADMIRE reconstruction; the routine scanning control group used Siemens 64-slice CT routine pediatric chest CT plain scanning protocol. The scan length, scan time, radiation dose and image quality of the children in the three groups were compared. **Results** The scanning time and radiation dose (SSDE) of the 100kV experimental group decreased by 88.48% and 84.74%, respectively, compared with that of the conventional scanning control group, with statistically significant differences ($P < 0.01$), and the difference was not statistically significant compared with that of the 70kV experimental group ($P > 0.05$). The images of the three groups met the requirements for clinical diagnosis, and the images of the conventional scanning control group showed different degrees of movement artifacts, and the image quality scores were lower than those of the 100kV experimental group and the 70kV experimental group. The quality scores of the three groups were lower than those of the 100kV experimental group and the 70kV experimental group, and the differences were statistically significant ($P < 0.01$). **Conclusion** The combination of low-dose Turbo Flash scanning mode and ADMIRE (level 3) reconstruction of chest CT in infants and children can significantly shorten the scanning time and reduce the motion artifacts, substantially reduce the radiation dose to the children, improve the image quality, and guarantee the quality of non-sedated chest CT examination in infants and children, under the premise of meeting the clinical diagnosis.

Keywords: Infant; Chest; Radiation Dose; Tomography; X-ray Computer; Iterative Reconstruction

婴幼儿肺部感染在儿科疾病中发病率最高,严重影响着患儿的发育和健康^[1]。计算机断层扫描技术(computed tomography, CT)作为婴幼儿胸部检查最常用的手段之一,对胸部病变的诊断具有重要价值。然而,婴幼儿不能自主屏住呼吸、静止不动配合检查,易导致躯体运动伪影和呼吸伪影,严重影响图像质量。临床常使用镇静剂以减少患儿的自主运动,但镇静剂有一定副作用,而且会延长候诊时间。此外,CT检查存在不同程度电离辐射,婴幼儿处于生长发育关键期,其组织器官对电离辐射比成年人更加敏感,如何降低婴幼儿CT检查的辐射剂量也是必须关注的重点之一^[2-3]。由于婴幼儿者体型较小,对X射线的衰减小,而且通过胸部CT诊断肺部感染的图像分辨率要求低于成年人,因此婴幼儿应该且适合低剂量的CT扫描。双源CT的Turbo Flash扫描模式(双球管、大螺距),具有时间分辨率高、辐射剂量低等特点,使婴幼儿非镇静状态下完成胸部CT检查成为可能^[4-5]。本研究通过对比婴幼儿非镇静状态下使用双源CT低剂量Flash扫描模式高级模拟迭代重建算法与常规模式成像的图像质量、辐射剂量差异,评估其临床应用价值。

1 资料与方法

1.1 临床资料 本研究为前瞻性研究,研究方案经兰州大学第二医院伦理委员会批准,批准号:2021A-579,均签署知情同意书。收集2022年3月至8月在兰州大学第二医院因临床怀疑肺部感染需要胸部CT检查的婴幼儿患者的影像资料。

纳入标准: 因怀疑肺部感染均接受胸部CT平扫检查;年龄 ≤ 5 岁。排除标准:体内或体外金属异物无法去除的患儿;患有心脏疾病;有严重外伤。共纳入病例90例,其中男53例、女37例,年龄 $0.08 \sim 5(2.50 \pm 1.53)$ 岁。按随机数表法分为3组,100kV实验组、70kV实验组和常规扫描对照组,每组各30例。

1.2 检查方法 100kV实验组和70kV实验组采用西门子第3代双源CT(SOMATOM Definition Force, 德国) Turbo Flash扫描模式,管电压分别为100 kV、70 kV,自动管电流调节技术(CARE Dose 4D),参考管电流分别为64、246mAs,探测器准直 $2 \times 192 \times 0.6$ mm,螺距1.9,球管转速0.25s/周,高级模拟迭代重建技术(advanced modeled iterative reconstruction, ADMIRE, 重建权重3)图像重建,卷积函数(肺窗

【第一作者】孙升级,男,主管技师,主要研究方向:影像技术。E-mail: 344626465@qq.com

【通讯作者】刘建莉,女,主任医师,主要研究方向:医学影像新技术应用及创新。E-mail: liujl_1219@163.com

BI57, 纵隔窗Br40), 重建层厚×层间距: 4 mm×4 mm和0.5 mm×0.5 mm。扫描过程中患儿保持自由呼吸, 无需药物镇静。常规扫描对照组采用西门子64层CT(SOMATOM sensation 64, 德国)常规胸部CT扫描模式, 管电压120kV, 自动管电流(CARE Dose 4D), 参考管电流45mAs, 探测器准直64×0.6 mm, 螺距1.0, 球管转速 0.5s/周, 滤波反投影法(filter back projection, FBP)图像重建, 卷积函数(肺窗B60f, 纵隔窗B30f), 重建层厚×层间距4mm×4mm和1mm×1mm。扫描过程中患儿自然熟睡或口服水合氯醛镇静(0.1mL/kg)。

患儿采取仰卧位, 双手上举, 非检查区使用铅罩保护。扫描范围肺尖至肺底水平。记录每例患儿扫描时间(time, T)、扫描范围(length, L)和辐射剂量表中的容积CT剂量指数(CT dose index volume, CTDIvol)及剂量-长度乘积(dose length product, DLP)。由于辐射剂量受患者体型和扫描机器输出剂量相关, 因此国际提出体型特异性剂量评估(size specific dose estimate, SSDE)值计算患儿接受的辐射剂量, $SSDE=CTDIvol \times f$ (体型转换系数), f 值与体型相关, 测量图像气管分叉层面胸廓前后径(anteroposterior, AP)和横径(lateral, LAT)并求和, 对照表格取相应值^[6-7]。

1.3 图像分析

1.3.1 客观评价: 选择层厚4mm的CT轴位图像, 分别在气管分叉上方10mm的气管内和主肺动脉内勾画圆形感兴趣区(region of interest, ROI), 获得相应的CT值和标准差(standard deviation, SD)。气管内ROI面积为10mm², 主肺动脉内ROI的面积为40mm², 测量三次取平均值。通过仪器自动生成主肺动脉内的噪声值, 即SD值, 并计算各组图像的信号噪声比(signal to noise ratio, SNR)和对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR): $SNR=CT_{主肺动脉}/SD_{主肺动脉}$; $CNR=(CT_{主肺动脉}-CT_{气管})/SD_{气管}$ 。

1.3.2 主观评价: 遵循双盲法由两位10年以上工作经验的放射科

医师进行阅片及评分。选择轴位图像进行独立阅片, 观察结构包括肺纹理、段支气管的开口和近端节段、心脏、主动脉和横膈膜附近的肺实质, 根据结构分辨率、身体运动引起的伪影、呼吸运动引起的伪影以及心脏大血管搏动引起的伪影来评估图像, 影像的评分标准分为3级(表1), 评分分数进行相加, 最大总分为12分, 大于等于8分即可满足临床诊断要求^[8]。最后以2名医师评分的均值作为图像的主观评分值。

1.4 统计学分析 采用SPSS 25.0软件进行统计学分析。对计量资料进行正态性检验, 符合正态分布的以($\bar{x} \pm s$)表示, 不符合正态分布的计量资料以M(Q1, Q3)表示, 计数资料以频数表示。采用 χ^2 检验比较3组患儿性别及年龄组构成; 采用单因素方差分析(正态分布)或Kruskal-Wallis H(非正态分布)比较各组年龄、BMI、AP+LAT、T、L、有效mAs、辐射剂量(DLP、CTDIvol、SSDE)、SD、SNR、CNR及主观质量评分等参数的差异, 两两比较采用LSD法(正态分布)和Bonferroni法(非正态分布)。主观图像质量评分结果的一致性采用Kappa检验: k 值 ≤ 0.20 , 一致性差; k 值0.21~0.40, 一致性低; k 值0.41~0.60, 一致性中度; k 值0.61~0.80, 一致性好; 0.81~1, 一致性高。双侧检验, 检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 一般资料 3组患儿的性别、年龄、体质量指数(BMI)、胸廓前后径与横径之和(AP+LAT)、扫描范围(L)差异均无统计学意义(P 均 >0.05 , 表2), 3组患儿的扫描时间(T)差异有统计学意义($P<0.01$, 表2)。组间两两比较显示: 100kV实验组和常规扫描对照组的扫描时间差异有统计学意义、70kV实验组和常规扫描对照组的扫描时间差异有统计学意义(P 均 <0.01), 100kV实验组和70kV实验组的扫描时间较常规扫描对照组分别下降88.48%、88.10%。

表1 图像主观质量评估的分级量表

得分	结构分辨率	躯体运动伪影	呼吸运动伪影	心脏大血管搏动伪影
3	优秀, 显示清晰	轻微或无	轻微或无	轻微或无
2	中等, 轻微模糊	微小	微小	微小
1	差, 显示不清	明显	明显	明显

表2 比较3组患儿的一般资料

评价参数	组别			统计值	P值
	100kV实验组 (n=30)	70kV实验组 (n=30)	常规扫描对照组 (n=30)		
性别(例, 男/女)	18/12	16/14	19/11	0.64 ^a	0.73
年龄(岁)	2.57±1.59	2.36±1.34	2.58±1.67	0.21 ^b	0.81
<2岁	14	12	14	0.36 ^a	0.84
2~5岁	16	18	16		
BMI(kg/m ²)	15.00±2.29	15.31±2.64	15.72±3.03	0.55 ^b	0.58
AP+LAT(mm)	286.90±32.89	289.50±27.82	282.27±29.45	0.44 ^b	0.64
L(mm)	156.20±30.73	164.90±29.00	163.19±35.69	0.63 ^b	0.54
T(s)	0.60±0.13	0.62±0.13	5.21±1.23	408.96 ^b	<0.01

注: BMI为体质量指数; AP+LAT为胸廓前后径与横径之和; L为扫描长度; T为扫描时间; ^a表示 χ^2 值; ^b表示F值。

2.2 辐射剂量 3组患儿的有效mAs及辐射剂量(DLP、CTDIvol、SSDE)的差异有统计学意义(P 均 <0.01 , 表3)。(1)组间两两比较显示: 100kV实验组和常规扫描对照组的DLP、CTDIvol、SSDE差异有统计学意义($H=-7.73$ 、 -7.54 、 -7.61 , P 均 <0.01); 70kV实验组和常规扫描对照组的DLP、CTDIvol、SSDE差异有统计学意义($H=-5.61$ 、 -6.87 、 -5.73 , P 均 <0.01); 100kV实验组和70kV实验组、100kV实验组和常规扫描对照组、70kV实验组和常规扫描对照组的DLP、CTDIvol、SSDE分别较常规扫描对照组下降86.33%、84.43%、84.74%; 70kV实验组的DLP、CTDIvol、SSDE分别较常规扫描对照组下降了82.29%、

76.40%、81.54%; 100KV实验组和常规扫描对照组的DLP、CTDIvol、SSDE分别较70kV实验组分别降低了82.83%、87.12%, 常规扫描对照组的DLP、CTDIvol、SSDE分别较100KV实验组降低了25.00%。

2.3 图像质量

2.3.1 图像客观质量评价: (1)<2岁患儿3组图像的SD、SNR和CNR差异有统计学意义(P 均 <0.01 , 表4、5)。组间两两比较显示: 100kV实验组和常规扫描对照组的SD、SNR、CNR差异有统计学意义($H=-4.63$ 、 3.53 、 4.72 , P 均 <0.01); 70kV实验组和常规扫描对照组的SD、SNR、CNR差异有统计学意义($H=-3.99$ 、 3.62 、 3.95 , P 均 <0.01)。 (2)2~5岁3组图像的SD、SNR和CNR差异有统计学意义(P 均 <0.01 , 表4、5)。组间两两比较显示:

100kV实验组和常规扫描对照组的SD、SNR、CNR差异有统计学意义($H = -5.00$ 、 2.60 、 4.83 , P 均 <0.01); 70kV实验组和常规扫描对照组的SD、SNR、CNR差异有统计学意义($H = -3.96$ 、 3.01 、 4.25 , P 均 <0.01)。

2.3.2 图像主观质量评价: <2 岁和2~5岁患儿3组患儿图像质量均满足临床诊断要求(得分均 >8 分), 3组的主观质量评分之间差异有统计学意义(P 均 <0.01 , 表4、5)。(1) <2 岁患儿组间两两比较显示: 100kV实验组和常规扫描对照组的主观质量评分差异有统

计学意义($H = 3.25$, $P < 0.01$); 70kV实验组和常规扫描对照组的主观质量评分差异有统计学意义($H = 2.88$, $P < 0.01$)。(2)2~5岁患儿组间两两比较显示: 100kV实验组和常规扫描对照组的主观质量评分差异有统计学意义($H = 3.22$, $P < 0.01$); 70kV实验组和常规扫描对照组的主观质量评分差异有统计学意义($H = 2.92$, $P < 0.01$)。(3)100kV实验组和70kV实验组图像的结构分辨率明显高于常规扫描对照组、运动伪影明显低于常规扫描对照组(图1-3)。(4)位医师评分的一致性检验显示一致性高(Kappa值: 0.83 , $P < 0.01$)。

表3 比较3组患儿的有效mAs及辐射剂量[M(Q1, Q3)]

评价参数	组别			H值	P值
	100kV实验组 (n=30)	70kV实验组 (n=30)	常规扫描对照组 (n=30)		
有效mAs	20.00(16.00, 30.50)	116.50(84.00, 153.25)	15.00(11.00, 16.00)	65.57	<0.01
DLP (mGy.cm)	12.35(9.28, 17.63)	16.00(12.08, 19.25)	90.36(74.72, 104.28)	63.86	<0.01
CTDIvol (mGy)	0.64(0.55, 1.01)	0.97(0.76, 1.11)	4.11(4.01, 4.40)	62.74	<0.01
SSDE (mSv)	1.43(1.26, 2.23)	1.73(1.31, 2.02)	9.37(8.88, 10.29)	62.88	<0.01

注: DLP为剂量-长度乘积; CTDIvol为容积CT剂量指数; SSDE为体型特异性剂量评估。

表4 比较<2岁患儿3组图像质量评分[M(Q1, Q3)]

评价参数	组别			H值	P值
	100kV实验组(n=14)	70kV实验组 (n=12)	常规扫描对照组 (n=14)		
SD	17.75(13.38, 22.00)	19.30(13.00, 26.00)	37.25(33.50, 45.00)	25.64	<0.01
SNR	5.42 (4.70, 6.38)	5.14(4.36, 5.83)	3.94(3.01, 4.60)	13.66	<0.01
CNR	58.30 (46.60, 78.62)	54.67(50.10, 63.18)	26.69(22.40, 30.01)	26.18	<0.01
主观质量评分	11.37(10.88, 12.00)	11.00(10.50, 11.50)	10.25(9.50, 10.63)	12.94	<0.01

注: SD为噪声值; SNR为信噪比; CNR为对比噪声比。

表5 比较2~5岁患儿3组图像质量评分[M(Q1, Q3)]

评价参数	组别			H值	P值
	100kV实验组(n=16)	70kV实验组 (n=18)	常规扫描对照组 (n=16)		
SD	13.95(12.25, 19.25)	18.60(13.23, 22.68)	31.35(26.85, 36.00)	27.59	<0.01
SNR	5.53(4.57, 6.50)	5.34(4.75, 6.62)	4.09(3.49, 4.86)	12.14	<0.01
CNR	65.85(54.45, 76.27)	56.61(46.21, 79.88)	32.16(27.50, 37.39)	27.55	<0.01
主观质量评分	11.50(11.00, 12.00)	11.00(11.00, 12.00)	10.50(9.50, 11.38)	12.52	<0.01

注: SD为噪声值; SNR为信噪比; CNR为对比噪声比。

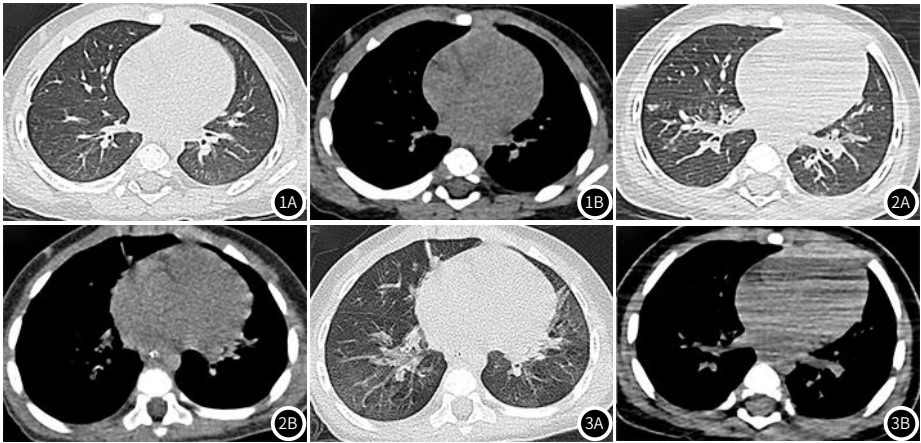


图1A-图1B 同一患儿的100kV低剂量胸部CT平扫图像, 男、10月、支气管炎;
图2A-图2B 同一患儿的70kV低剂量胸部CT平扫图像, 女、10月、支气管炎;
图3A-图3B 同一患儿的常规扫描对照组胸部CT平扫图像, 女、11月、支气管炎。
图1-图2图像结构分辨率高, 可清晰显示双肺炎症, 没有运动伪影, 但图2B射线硬化束伪影略明显, 均满足临床诊断要求。图3图像结构分辨率中等, 可显示双肺炎症, 可见微小呼吸运动伪影和心脏大血管搏动伪影, 满足临床诊断要求。

3 讨论

婴幼儿处于生长发育的高峰期,对放射线的敏感性达成人10倍以上。研究表明CT检查导致的辐射暴露使得儿童患脑肿瘤、白血病等疾病的风险增高,对婴幼儿进行CT扫描时尤其需要遵循最优化原则^[9-10]。近年来各种低剂量技术在婴幼儿CT检查的研究不断增加并取得一定成果,针对婴幼儿的低剂量胸部CT检查研究和应用也在不断发展^[8]。目前常用的降低辐射剂量的方法有:改善扫描参数(降低管电压、增加螺距、自动管电流调节技术等)和优化重建算法等,都能在保证图像质量的前提下不同程度降低患儿的辐射剂量^[11-13]。第3代双源CT通过联合多种技术(大螺距、双球管及ADMIRE重建算法),可大幅度提高时间分辨率、降低图像噪声,达到有效降低辐射剂量、改善图像质量的目的^[14]。

近年来大量研究聚焦于通过降低管电压降低射线剂量,因为管电压与辐射剂量呈指数关系^[15]。但是单纯强调降低kV,却没有关注mAs、患儿体型等差异导致的辐射剂量变化,使得人们常常认为降低kV就降低了射线剂量。因此,本研究特别对比100kV实验组和70kV实验组的辐射剂量和图像质量的差异,两组均使用CARE Dose 4D技术保障其图像信噪比,该技术可根据患儿的体型、Z轴调制和XY轴调制实现以最低辐射剂量水平保证身体各部位恒定的图像质量。研究结果显示不同年龄患儿100kV实验组和70kV实验组的SD、SNR、CNR和图像主观质量评分差异均无统计学意义,但是70kV实验组辐射剂量SSDE略高于100kV实验组,差异无统计学意义,因为当管电压降低时,设备自动毫安调节技术会依据透过人体组织的光子数及对比噪声自动增加管电流(70kV实验组自动调节的mAs较100kV实验组增加了82.83%),从而达到相似的图像信噪比保障图像质量,与既往文献相符^[16]。但是2~5岁组患儿的图像质量略高于<2岁组,可能原因是体型较小的患儿,设备自动mAs给的剂量不够,导致低龄组患儿图像噪声较大,但图像质量均满足临床诊断要求。

近年来逐步应用于临床的迭代重建算法具有强大的降噪作用,相比传统的FBP算法,可明显降低噪声、提高图像质量^[17]。最新的ADMIRE迭代算法结合数据域、图像域和模型域的优势,可对原始图像进行校正(降低图像噪声、去除伪影),并在不影响空间分辨率的情况下对原始图像进行多次迭代,最后重建组合成的更高质量的图像^[18]。本研究中100kV实验组和70kV实验组联合ADMIRE算法(3级),最后得到的图像质量评分均高于常规扫描对照组。实现了在满足临床诊断需求的基础上,不仅有效地降低了辐射剂量,还提高了图像质量,与既往研究结果一致^[4,19]。

此外,5岁以下的患儿进行胸部CT检查时,常常因为呼吸运动、心脏搏动、恐惧哭闹等产生明显运动伪影导致图像质量差而影响诊断,甚至可能导致检查失败。目前婴幼儿进行胸部CT检查通常需要在患儿熟睡之后进行,部分患儿需要服用镇静剂提高检查依从性。陈哲^[20]等人系统性分析儿科常用镇静催眠药物(水合氯醛口服溶液)的安全性,发现水合氯醛口服溶液在呼吸系统不良事件(呼吸抑制、咳嗽、憋气)发生率为10.49%。因此对于因呼吸道疾病就诊的患儿使用水合氯醛镇静很可能加重患儿病情、影响临床病情评估,导致治疗复杂化。另外,即使使用镇静剂或者患儿处于熟睡状态下,呼吸运动伪影、心脏及血管搏动产生的伪影仍不可避免。宽体探测器的使用能明显缩短患儿准备时间及扫描时间,并有效降低图像的呼吸和心脏大血管搏动伪影,即使在非镇静情况下也能完成检查并达到临床诊断要求^[17]。因此,本研究实验组采用Turbo Flash大螺距快速扫描模式,可在短时间内(0.6s左右)覆盖婴幼儿整个胸部,几乎冻结了呼吸和心脏大血管的运动,所得图像运动伪影明显低于常规扫描对照组,甚至可在不需要患儿自然熟睡或镇静剂镇静情况下完成检查并且得到适合临床诊断的影像。

本研究的局限性:(1)本研究样本量较少,尚有待进一步多中心大样本量的临床应用研究深入探讨;(2)对照组是采用的64层CT设备,在辐射剂量比较时,除了大螺距、双球管、ADMIRE的影响之外,无法完全排除设备本身差异(探测器、球管等)。

综上所述,低剂量Turbo Flash扫描模式联合ADMIRE重建能实现非镇静状态下婴幼儿胸部CT检查,相比常规胸部CT扫描,可

在满足临床诊断的前提下缩短曝光时间、明显降低患儿的辐射剂量、提高图像质量,因此建议临床工作中尽可能采用高时间分辨率CT设备快速扫描模式和降噪的重建算法,进一步保障患儿图像质量、减少辐射。

参考文献

- [1] LAPIDOT R, VIETRI J, SHAFF M, et al. Community-acquired pneumonia in infants: not simply an acute event with complete recovery[J]. *Respir Med*, 2022, 191: 106671.
- [2] SUN J, ZHANG Q, HU D, et al. Feasibility study of using one-tenth mSv radiation dose in young children chest CT with 80 kVp and model-based iterative reconstruction[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 12481.
- [3] J á n o š í k o v á L, J u r i č e k o v á M, H o r v á t h o v á M, et al. Risk evaluation in the low-dose range CT for radiation-exposed children, based on DNA damage[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2019, 186(2-3): 163-167.
- [4] 罗昆, 雷子乔, 董仟, 等. 第三代双源CT低剂量扫描在新型冠状病毒肺炎筛查中的应用[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2020, (10): 783-788.
- [5] SECINARO A, CURIONE D, MORTENSEN K H, et al. Dual-source computed tomography coronary artery imaging in children[J]. *Pediatr Radiol*, 2019, 49(13): 1823-1839.
- [6] FUJII K, INOUE Y, ITOH H, et al. Size-specific dose estimates in pediatric brain CT in relation to age and weight[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2023, 199(10): 1075-81.
- [7] HONORIO DA SILVA E, BAFFA O, ELIAS J, JR., et al. Conversion factor for size specific dose estimation of head CT scans based on age, for individuals from 0 up to 18 years old[J]. *Phys Med Biol*, 2021, 66(8).
- [8] PADOLE A M, SAGAR P, WESTRA S J, et al. Development and validation of image quality scoring criteria (IQSC) for pediatric CT: a preliminary study[J]. *Insights Imaging*, 2019, 10(1): 95.
- [9] HAUPTMANN M, BYRNES G, CARDIS E, et al. Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study[J]. *Lancet Oncol*, 2023, 24(1): 45-53.
- [10] GOTTUMUKKALA R V, KALRA M K, TABARI A, et al. Advanced CT techniques for decreasing radiation dose, reducing sedation requirements, and optimizing image quality in children[J]. *Radiographics*, 2019, 39(3): 709-726.
- [11] 许权, 周文珍, 王薇, 等. 大螺距, 低电压双源CT下肢动脉成像与DSA的对照研究[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(9): 164-166.
- [12] WU J, BRACKEN J, LAM A, et al. Refining diagnostic criteria for paediatric bronchiectasis using low-dose CT scan[J]. *Respir Med*, 2021, 187: 106547.
- [13] PAPADAKIS A E, DAMILAKIS J. Evaluation of an organ-based tube current modulation tool in pediatric CT examinations[J]. *Eur-Radiol*, 2020, 30(10): 5728-5737.
- [14] AGOSTINI A, MARI A, LANZA C, et al. Trends in radiation dose and image quality for pediatric patients with a multidetector CT and a third-generation dual-source dual-energy CT[J]. *Radiol Med*, 2019, 124(8): 745-752.
- [15] NAGAYAMA Y, ODA S, NAKAURA T, et al. Radiation dose reduction at pediatric CT: use of low tube voltage and iterative reconstruction-erratum[J]. *Radiographics*, 2019, 39(3): 912.
- [16] TABARI A, GEE M S, SINGH R, et al. Reducing radiation dose and contrast medium volume with application of dual-energy CT in children and young adults[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2020, 214(6): 1199-1205.
- [17] 张雪, 郭焕利, 程光清, 等. 应用双源低剂量CT扫描技术在新生儿气胸临床诊疗中的价值研究[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 20(12): 66-67.
- [18] 徐俊峰, 张亚楠, 尹剑兵, 等. ADMIRE对不同体重指数人群支气管动脉CT成像的影响[J]. *江苏大学学报(医学版)*, 2023, 33(02): 162-166, 173.
- [19] WETZEL M, MAY M S, WEINMANN D, et al. Dual-source computed tomography of the lung with spectral shaping and advanced iterative reconstruction: potential for maximum radiation dose reduction[J]. *Pediatr Radiol*, 2020, 50(9): 1240-1248.
- [20] 陈哲, 林茂, 曾力楠, 等. 水合氯醛口服溶液用于儿童镇静催眠安全性的系统评价[J]. *中国药房*, 2020, 31(9): 1124-1131.

(收稿日期: 2023-10-20)

(校对编辑: 韩敏求)