

论 著

能谱纯化超低剂量胸部CT扫描在儿童检查中的辐射剂量与图像质量研究*

杨景勇 邓小飞 郝 艳*

舒 政

上海中医药大学附属上海市中西医结合医院放射科(上海虹口200082)

【摘要】目的 评估能谱纯化(Sn)超低剂量胸部CT在儿童检查中的辐射剂量与图像质量。方法 收集2023年9月至2024年2月期间因怀疑肺炎而进行胸部CT扫描的儿童患者,第1组管电压70kV共9例,第2组Sn100kV共21例,第3组100kV共19例,第4组110kV共13例,第5组120kV共7例。客观评估包括噪声($SD_{脂肪}$)、信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR),主观评价使用Likert评分,计算并比较有效辐射剂量(ED)。结果 5组的ED分别为 0.18 ± 0.01 、 0.15 ± 0.04 、 1.73 ± 0.60 、 2.68 ± 0.66 和 4.46 ± 0.81 mSv。Sn100kV组的 $SD_{脂肪}$ 和SNR较70kV改善,较100、110和120kV差异不具有统计学意义($P > 0.05$),CNR较120kV组低($P < 0.05$),Likert评分大于70kV但小于120kV组($P < 0.05$),较100和110kV差异不显著($P > 0.05$)。结论 Sn超低剂量儿童胸部CT检查的图像质量良好,并显著降低辐射剂量。

【关键词】儿童;胸部;计算机断层成像;低剂量;能谱纯化

【中图分类号】R445

【文献标识码】A

【基金项目】上海市虹口区卫生健康委员会医学科研课题计划(虹卫1801-04)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.04.032

Image Quality and Radiation Dose of Spectral Shaping Ultra-low Dose Chest CT Scanning in Pediatric Patients*

YANG Jing-yong, DENG Xiao-fei, XI Yan*, SHU Zheng.

Department of Radiology, Shanghai University of TCM, Shanghai TCM-Integrated Hospital, Shanghai 200082, China

ABSTRACT

Objective To evaluate the radiation dose and image quality of spectral shaping (Sn) ultra-low dose chest CT in pediatric examinations. **Methods** Chest CT examinations were performed on pediatric patients suspected of pneumonia between September 2023 and February 2024. There were 9 patients with a tube voltage of 70 kV in Group 1, 21 patients with Sn100 kV in Group 2, 19 cases with 100 kV in Group 3, 13 cases with 110 kV in Group 4, and 7 cases with 120 kV in Group 5. CT noise (SD_{fat}), signal-to-noise ratio (SNR), and contrast-to-noise ratio (CNR) were parameters used for objective assessment. A Likert visual score was utilized for subjective evaluation. The radiation effective dose (ED) was measured and compared between groups. **Results** The ED values of the 5 groups were 0.18 ± 0.01 , 0.15 ± 0.04 , 1.73 ± 0.60 , 2.68 ± 0.66 , and 4.46 ± 0.81 mSv, respectively. The SD_{fat} and SNR of the Sn100kV group showed improvement when compared to the 70kV group, with no statistically significant difference observed when compared to the 100, 110, and 120kV groups ($P > 0.05$). The CNR in the Sn100kV group was significantly lower than in the 120kV group ($P < 0.05$), and the Likert score was higher than in the 70kV group but lower than in the 120kV group ($P < 0.05$). There was no statistically significant difference among the Sn100kV group, the 100kV group, and the 110kV group ($P > 0.05$). **Conclusion** The image quality of Sn ultra-low dose chest CT examination for pediatric patients is excellent, and the radiation dosage is significantly reduced.

Keywords: Pediatric; Chest; Computed Tomography; Low-dose; Spectral Shaping

自2023年9月起,中国医疗机构因儿童呼吸道感染而就诊的患者大幅度增长^[1],在儿童肺炎流行季节,胸部CT扫描是仅次于胸部X线的重要影像学检查方法,为儿童肺炎的定性和定量评估提供重要的参考依据。国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)认为CT扫描的X线辐射剂量每增加1mSv,恶性肿瘤的发生率将增加5/10万^[2]。近20年,低剂量胸部CT扫描在体检、筛查和辐射敏感的特殊人群逐渐推广和使用,大大降低了受检者进行CT检查时所承担的辐射剂量^[3-5]。儿童肺炎流行期间通过选择最佳CT扫描方案可以解决CT检查中的辐射剂量问题,但鉴于国内有关能谱纯化(Sn)超低剂量胸部CT扫描在儿童检查中的应用研究尚不充足,所以本研究旨在对比研究不同剂量的胸部CT扫描在儿童检查中的图像质量与辐射剂量的差异,探讨能谱纯化超低剂量CT在儿童胸部检查和诊断中的优势。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集2023年9月至2024年2月期间临床因怀疑肺炎而进行胸部CT扫描的儿童患者(<16岁),根据扫描参数分成5组。第1组为低剂量CT扫描,管电压为70kV,第2组为能谱Sn低剂量组,管电压为Sn100kV,第3组的管电压为100kV,第4组的管电压为110kV,第5组的管电压为120kV。所有组的排除标准:(1)胸部CT运动伪影或金属伪影,(2)贫血患者。最终入组人数:1组为9例,2组为21例,3组为19例,4组为13例,5组为7例,记录每个研究对象的性别、年龄、身高、体重,并计算BMI值。

1.2 方法

1.2.1 胸部CT扫描仪器与参数 CT扫描仪器为第三代双源西门子扫描仪(Siemens Definition Force),受检者采取仰卧位,头先进。主要性能参数:扫描层厚:5mm,扫描层间距5mm,重建层厚1mm,重建间隔0.7mm,图像采用ADMIRE迭代重建算法,强度为3。管电压分别为70kV、Sn100kV、100 kV、110kV和120kV,5组的管电流mAs均采用CARE Dose 4D自动调节技术,170cm/70Kg人体的参考值为81 mAs,旋转时间为0.5s,准直器宽度为 192×0.6 mm。Sn100kV为超低剂量的CT图像扫描技术,即0.6mm准直器上采用锡过滤器的加持扫描。

1.2.2 辐射剂量 记录5组胸部CT扫描的辐射剂量参数,包括电压(kV)、容积CT剂量指数(CT dose index volume, CTDIvol)和剂量长度乘积(dose length product, DLP)。根据美国医学物理师协会(American Association of Physicists in Medicine, AAPM)推荐有效剂量计算方法^[6-7],有效辐射剂量(effective dose, ED)=DLP $\times$ K,公式中K为组织权重因子,胸部为 $0.014 \text{ mSv} \times \text{mGy}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ 。

1.2.3 图像质量客观评估 选取胸部CT的纵隔窗的气管隆突下层面为评估层面,两名具有5年以上放射诊断医师独立测量胸前皮下脂肪的CT脂肪值和标准差(standard deviation $SD_{脂肪}$),肺动脉主干区的CT血管值,感兴趣区大小约 0.8 cm^2 – 1 cm^2 。皮下脂肪的 $SD_{脂肪}$

【第一作者】杨景勇,女,主治医师,主要研究方向:心胸影像学。E-mail: 54196177@qq.com

【通讯作者】郝 艳,女,主治医师,主要研究方向:心胸影像学。E-mail: xiyanwe99@163.com

肪为图像噪声值,此外,计算信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)和对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR),计算公式如下:

$$SNR = \text{CT}_{\text{血管}} / \text{SD}_{\text{脂肪}}; \text{CNR} = (\text{CT}_{\text{血管}} - \text{CT}_{\text{脂肪}}) / \text{SD}_{\text{脂肪}}$$

1.2.4 图像质量主观评估 两名具有5年以上放射诊断医师独立评估薄层CT肺窗图像,窗宽和窗位分别为1400HU和-400 HU。对每例图像进行Likert视觉质量评分^[8](范围为1-5分,1分最差,5分最佳),1分(差):噪声大,肺组织结构不清晰,肺炎显示不清;2分(差):噪声大,肺组织结构不清晰,肺炎显示模糊;3分(一般):噪声较大,肺组织结构欠清晰,肺炎显示欠清楚;4分(良好):图像噪声小,肺组织结构基本清晰,肺炎显示基本清楚;5分(良好):图像噪声小,肺组织结构显示清晰,肺炎完全清楚。对两名医师的评分结果进行一致性分析,满足一致性分析的基础上,参

数值取两者的平均值。

1.3 统计学分析 使用SPSS 27.0和GraphPad Prism10软件对数据进行统计学分析和统计图制作,定量资料的表达采用均值±标准差($\bar{x} \pm s$),组间均值比较采用单因素ANOVA分析,等级资料的比较采用Pearson卡方检验或非参数Kruskal-Wallis检验,当等级资料的单元格的频数<5的单元格个数超过20%时,使用Fisher确切概率检验,当 $P < 0.05$ 时组间差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 五组研究对象临床资料组间比较 如表1所示,1组年龄最小,其次为2和3组,最大的为4和5组,BMI与年龄的变化具有相同的趋势。5组间的性别比例差异不具有统计学意义。

表1 五组研究对象的一般临床资料与组间比较

分组	管电压kV	人数	年龄 (均值±标准差)	性别		BMI(Kg/m ²) (均值±标准差)
				女	男	
1	70	9	10.56±3.81	5	4	14.29±4.19
2	Sn100	21	13.81±2.06	11	10	18.71±2.56
3	100	19	12.84±2.19	10	9	18.44±3.19
4	110	13	15.00±1.29	7	6	21.23±3.95
5	120	7	15.57±0.54	4	3	20.88±2.16
统计值	-	-	7.62	0.02		7.29
P值	-	-	<0.01	0.99		<0.01

注:以上五组的参数比较,只有性别采用非参数Kruskal-Wallis检验,其他都采用单因素ANOVA分析。

2.2 辐射剂量及胸部CT质量评估 两名诊断医师的CT测量值和Likert评分具有较好的一致性(表2)。1组至5组的ED分别为0.18±0.01mSv、0.15±0.04 mSv、1.73±0.60 mSv、2.68±0.66 mSv和4.46±0.81mSv,除了1组(70kV)和2组(Sn100kV)间差异不具有统计学意义,其它组间差异均具有统计学意义,图1A-1C显示了CTDIvol、DLP和ED的组间比较。Sn100kV组的辐射剂量是常规100kV组的8.6%。Sn100kV的SD脂肪、SNR较100、110和120kV差异不具有统计学意义,但较70kV组噪声和信噪比有所改善,Sn100kV的CNR较100-110kV差异不具有统计学意义,但较120kV低且差异具有统计学意义(图1D-

1E)。Likert评分结果显示,Sn100kV组3分为8例(38.1%),4分为12例(57.1%),5分为1例(4.8%),较100和110kV组差异不具有统计学意义,但较70kV组高,较120kV组低(图2、图3)。

表2 评估变量的一致性分析

检验参数	CT _{脂肪} [#]	SD _{脂肪} [#]	CT _{血管} [#]	Likert评分 ^{##}
相关系数	0.59	0.69	0.63	0.74

注:“#”为定量资料,采用ICC系数分析(<0.40较差,0.40-0.74一般,≥0.75较高),“##”等级资料,采用Kappa系数分析(<0.2较差,0.21-0.40一般,0.41-0.60中等,0.61-0.80较强,0.81-1.00强)。

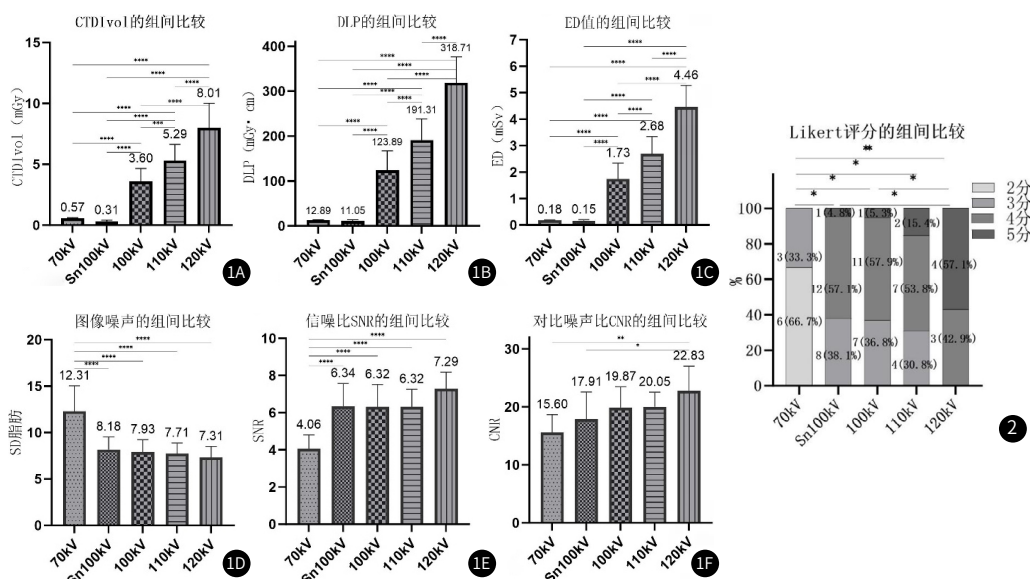


图1A-图1F 显示Sn100kV的胸部CT扫描接受了最低的辐射剂量的同时,图像质量与100、110 和120kV扫描相仿。1A-1C显示辐射剂量CTDIvol、DLP和ED, Sn100kV组的辐射剂量最低,与70kV组差异不具有统计学意义,但100、110和120kV辐射剂量逐渐增高,1D-1E显示Sn100kV组的SD_{脂肪}和SNR与100、110 和120kV组差异不具有统计学意义,但SD_{脂肪}较70kV低,SNR较70kV高,图F显示CNR与70、100和110kV差异不具有统计学意义,较120kV低。图中*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$, ****表示 $P < 0.0001$ 。

图2 显示Likert评分的组间比较,70kV组获得了最低的评分,120kV获得了最高的评分并且差异具有统计学意义,Sn100kV组的Likert评分大于70kV组,较100和110kV差异不显著,但小于120kV组,图中*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

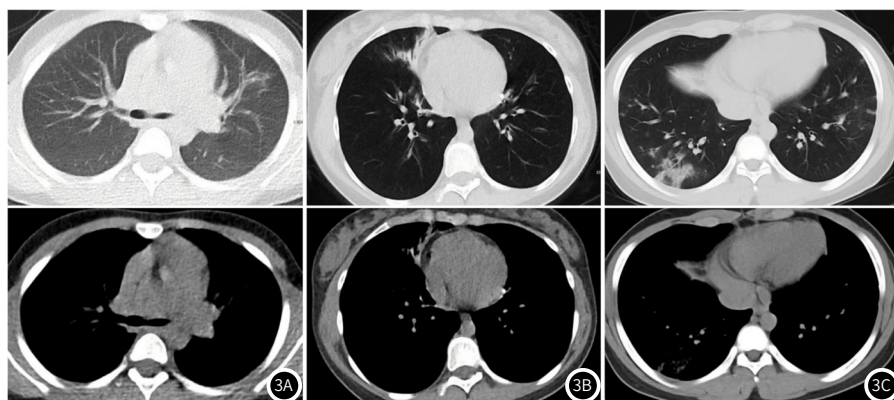


图3A-图3C 显示不同管电压扫描条件下的胸部CT的肺和纵隔窗，3A为70kV扫描条件下的CT图像，图中显示噪声较大，左肺上叶舌段的炎症病灶显示模糊，综合Likert评分为3分，3B为Sn100kV的CT图像，图中显示噪声较小，右肺中叶炎症和内部的支气管充气征显示基本清晰，综合Likert评分为4分，3C为100kV的CT图像，图中显示噪声小，两肺下叶肺炎显示基本清晰，综合Likert评分为4分。这些图像对比说明，Sn100kV图像质量较70kV更好，较100kV质量和诊断效能相当。

3 讨论

据报道，全球每年约90万患者因影像学检查而接受了ED $\geq$ 100 mSv的辐射剂量^[9]，CT扫描带来的电离辐射会导致暴露者的DNA损伤、突变和致癌，这已经成为一个日益关注的问题^[6]。Pears等人进行了一项包括178604名儿童和年轻人的队列研究，他们在CT扫描前未诊断癌症或肿瘤，在CT检查中，活性骨髓剂量 $\geq$ 30 mGy的儿童患白血病的可能性增加3.2%，而大脑剂量 $\geq$ 50 mGy儿童患脑肿瘤的可能性增加2.8%^[7]。另一项研究指出，0.6-3.2%的癌症累积风险可能与放射诊断程序有关^[10]。然而医院X线或CT检查所暴露的致癌性研究结果并不一致，与以上研究相反的是，部分研究表明暴露于100 mSv(10次CT扫描)和200 mSv的累积剂量不会增加癌症风险^[11]。尽管关于辐射剂量<100 mSv时癌症风险估计的报告相互矛盾，但因为反复CT扫描的显著累积辐射剂量使得研究者呼吁采取相应的减少医疗辐射措施^[9]。

胸部CT扫描在儿童肺炎流行季节发挥着重要作用，可以快速筛查感染者的肺部炎症^[12]。婴儿和儿童的胸部CT扫描方案推荐使用低剂量或超低剂量技术^[13-14]，最常见的低剂量技术参数是管电压，最重要的是管电流，而不同CT扫描仪的ED值则取决于供应商、探测器行数、CT安装年份和使用的图像重建技术^[15]。在本研究中，所有患者的管电流均使用根据身高和体重自动调节的CareDose4D技术，避免了除管电压外的混杂因素。我们发现Sn100kV图像质量较100、110kV相仿，部分参数较120kV差，但其在肺炎的清晰度及边界的细节观察方面仍具有较高的诊断性能(图1-图3)。本研究中的Sn100kV CT扫描的平均辐射剂量ED为0.15mSv，已有报道的低剂量胸部CT扫描的ED为0.20-1.8mSv，常规剂量为2.20-8.70mSv^[16-17]。

胸部CT使乳腺和甲状腺等放射敏感性组织同样暴露于辐射中，增加了这些组织中诱发癌症的风险，儿童是临床实践中的“超放射敏感性”人群之一^[18-19]。因此，CT技师和诊断医师需要了解减少CT中辐射暴露而不影响图像诊断质量的各种技术^[20]。双源CT的能谱纯化Sn扫描，采用了光谱整形技术将对成像帮助不大的低能X射线50keV以下滤过，主要通过准直器上的锡过滤板实现，参与扫描的X线能谱更窄，并更接近均匀一致性，可显著减少CT辐射剂量。本研究中，Sn100kV的辐射剂量仅占常规100kV组的8.6%，Agostini等^[21]结合能谱纯化超低剂量Sn100kV和双球管快速采集(旋转时间2.5s)技术，使ED接近胸部X光检查的基础上，大大减少受检者的呼吸、心跳和运动伪影，大幅度增加了胸部CT图像上肺实质内的清晰度，以及减少了纵隔结构模糊程度。

值得指出的是，与医学成像相关的辐射风险可能被媒体夸大，尤其是CT扫描，这在人群中传播了对CT成像的恐惧和误解。全世界受到所有辐射源的人均年平均辐射剂量约为3mSv，其中2.4mSv(80%)来自自然背景辐射，0.59mSv(19.7%)来自医疗辐射，0.01mSv(0.3%)来自其他人造辐射源，在中国的一些地区，自然背景的年辐射剂量显著超过2.4mSv，然而，当地居民癌症风险没有增加。因此我们有效的控制医学CT检查的辐射剂量累积，但无需对临床诊疗必须的规范的CT检查产生过度恐惧和误解^[16]，而超低剂量CT扫描技术的应用也帮助患者降低辐射过度的风险。

综上所述，能谱纯化超低剂量CT在儿童胸部检查应被推广和

应用。它具有良好的诊断可靠性和明显减少辐射剂量的优点，它的临床益处超过了与之相关的少量的辐射风险。

参考文献

- [1]李洪德,李芳,王宏,等.流行季节儿童肺炎支原体感染CT分型[J].中国医学影像技术,2023,39(7):1010-1013.
- [2]刘士远,于红.积极推进胸部低剂量CT扫描的临床应用[J].中华放射学杂志,2010,44(1):6-7.
- [3]National Lung Screening Trial Research Team,Aberle DR,Adams AM,et al.Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening[J].N Engl J Med,2011,365(5):395-409.
- [4]Jiang B,Li N,Shi X,et al.Deep learning reconstruction shows better lung nodule detection for ultra-low-dose chest CT[J].Radiology,2022,303(1):202-212.
- [5]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.
- [6]Devic C,Bodgi L,Sonzogni L,et al.Influence of cellular models and individual factor in the biological response to chest CT scan exams[J].Eur Radiol Exp,2022,6:14.
- [7]Pearce MS,Salotti JA,Little MP,et al.Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours:a retrospective cohort study[J].Lancet,2012,380:499-505.
- [8]Phelps AS,Naeger DM,Courtier JL,et al.Pairwise comparison versus Likert scale for biomedical image assessment[J].AJR Am J Roentgenol,2015,204(1):8-14.
- [9]Brambilla M,Vassileva J,Kuchcinska A,et al.Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures:Call for action[J].Eur Radiol,2020,30:2493-2501.
- [10]Berrington de González A,Darby S.Risk of cancer from diagnostic X-rays:estimates for the UK and 14 other countries[J].Lancet,2004,363:345-351.
- [11]Schultz CH,Fairley R,Murphy LS,et al.The risk of cancer from CT scans and other sources of low-dose radiation:a critical appraisal of methodologic quality[J].Prehosp Disaster Med,2020,35:3-16.
- [12]张颖,尚伟,宋喜明,等.儿童肺炎支原体肺炎与肺炎支原体合并链球菌感染肺炎的胸部CT鉴别诊断研究[J].中华医院感染学杂志,2017,27(6):1391-1397.
- [13]张静,闫锐,郭银霞,等.超低剂量CT在婴儿胸部检查中的临床应用[J].实用放射学杂志,2020,36(6):969-972.
- [14]Bahreyni Toossi MT,Malekzadeh M.Radiation dose to newborns in neonatal intensive care units[J].Iran J Radiol,2012,9(3):145-149.
- [15]Homayounieh F,Holmberg O,Umairi R A,et al.Variations in CT utilization,protocols,and radiation doses in COVID-19 pneumonia:results from 28 countries in the IAEA study[J].Radiology,2021,298:141-151.
- [16]Garg M,Karami V,Moazen J,et al.Radiation exposure and lifetime attributable risk of cancer incidence and mortality from low- and standard-dose ct chest:implications for COVID-19 pneumonia subjects[J].Diagnostics (Basel),2022,12(12):3043.
- [17]Razavi E,Zare MH,Zamani H,et al.Estimation of effective doses and lifetime risk of exposure-induced cancer death in pediatric CT scans[J].Int J Pediatr,2022,10:15755-15771.
- [18]Bahreyni Toossi MT,Malekzadeh M.Radiation dose to newborns in neonatal intensive care units[J].Iran J Radiol,2012,9(3):145-149.
- [19]Bourguignon M,Gisone P,Perez M,et al.Genetic and epigenetic features in radiation sensitivity.Part II:Implications for clinical practice and radiation protection[J].Eur J Nucl Med Mol Imaging,2005,32:351-368.
- [20]Moser J,Sheard S,Edyvean S,et al.Radiation dose-reduction strategies in thoracic CT[J].Clin Radiol,2017,72:407-420.
- [21]Agostini A,Floridi C,Borgheresi A,et al.Proposal of a low-dose, long-pitch, dual-source chest CT protocol on third-generation dual-source CT using a tin filter for spectral shaping at 100 kVp for CoronaVirus Disease 2019 (COVID-19) patients:a feasibility study[J].La Radiol Med,2020,125:365-373.

(收稿日期:2024-03-14)

(校对编辑:赵望淇)