

论 著

深度学习图像重建算法(DLIR)对能谱CT多参数图像质量改善的体模研究*

赵艳红^{1,3} 马保龙¹ 张晓文¹
沈 云² 石骁萌² 苏治祥¹
陈大治^{1,*}

1.宁夏回族自治区人民医院医学影像中心
(宁夏 银川 750002)
2.GE中国CT研究中心(北京 100176)
3.北方民族大学(宁夏 银川 750002)

【摘要】目的 探讨深度学习重建算法对能谱CT多参数成像单能量图像、有效原子序数图、碘水图、水碘图图像质量的改善。方法 选择一个20cm直径的圆柱形聚丙烯体模，在内部放入九支试管，试管中分别装入(3.75、7.5、15、30mg/mL)不同浓度及(18mm、10mm、2mm)不同管径的碘对比剂及水和钙溶液，利用GE APEX CT进行能谱扫描，将扫描完成图像分别利用FBP、40% ASIR-V及深度学习(低DLIR-L、中DLIR-M、高DLIR-H)重建出五组图像。采用后处理软件分别重建出70keV单能量图像、基物质图(碘-水图、水-碘图)及有效原子序数图。对浓度为3.75 mg/mL、15 mg/mL及Water三支试管进行数据分析。在FBP、40% ASIR-V、DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H 五组图像测量70keV的CT值、碘-水图的碘浓度、水-碘图的水浓度、有效原子序数及图像噪声，计算各图像的信噪比(SNR)，对比5组图像质量的差异。结果 5种重建算法下的图像在低浓度造影剂(3.75mg/mL)、高浓度造影剂(15mg/mL)及水试管内70keV的CT值差异均无统计学意义(P值均>0.05)，有效原子序数、碘水图的碘浓度及水碘图的水浓度亦无明显统计学差异(P值均>0.05)。70keV、有效原子序数图、碘水图、水碘图的噪声及图像信噪比5组图像差异均有统计学意义(P值均<0.05)，DLIR下的噪声值均较FBP及40% ASIR-V降低，图像信噪比提高(P值均<0.05)，DLIR-H噪声最小，信噪比最高。结论 在能谱CT成像中，DLIR较FBP及40% ASIR-V在单能量图像、有效原子序数图、碘水图、水碘图的噪声降低，信噪比提高。

【关键词】体模；能谱；体层摄影术；
X线计算机；深度学习；图像质量
【中图分类号】R445.3
【文献标识码】A
【基金项目】北方民族大学校级科学研究项目
(2022XYZYX03)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.01.062

Phantom Study on the Improvement of Multiparameter Image Quality of Energy Spectrum CT with Depth Learning Image Reconstruction Algorithm (DLIR)*

ZHAO Yan-hong^{1,3}, MA Bao-long¹, ZHANG Xiao-wen¹, SHEN Yun², SHI Xiao-meng², SU Zhi-xiang¹, Chen Da-zhi^{1,*}.
1. Medical Imaging Center, People's Hospital of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, Ningxia Hui Autonomous Region, China
2. CT Imaging Research Center, GE Healthcare China, Beijing 100176, China
3. North Minzu University, Yinchuan 750002, Ningxia Hui Autonomous Region, China

ABSTRACT
Objective To explore the improvement of image quality of single-energy image, effective atomic number map, iodine water map and water iodine map in multi-parameter spectral CT imaging by deep learning reconstruction algorithm. **Methods** Nine polypropylene test tubes with different diameters(18mm、10mm、2mm) and concentrations of iodine contrast media (3.75, 7.5, 15, 30 mg/mL) and water and calcium solutions were placed in a cylindrical plastic phantom (QSP) with a diameter of 20 cm. Spectral CT imaging was performed on the phantom, and the 70keV monochromatic image, base substance map (iodine-water map, water-iodine map) and effective atomic number map were reconstructed using the energy spectrum analysis software. Three test tubes with concentrations of 3.75mg/mL、15mg/mL and water were selected for the data measurement. CT values of monochromatic images (70 keV), iodine concentration of iodine-water map, water concentration of water-iodine map, effective atomic number and image noise were measured in five groups of images, namely FBP, 40% ASIR-V and DLIR(low, medium and high level), the signal-to-noise ratio (SNR) of each image was calculated, and the differences in the quality of the five groups of images were compared. **Results** There was no significant difference in CT values of 70 keV in Low-concentration contrast agent (3.75mg/mL), high-concentration contrast agent (15 mg/mL) and water among five groups of images (all P>0.05), the effective atomic number, the iodine concentration of the iodine water map and the water concentration of the water iodine map were also not significantly different among five groups (all P>0.05). There was significant difference in image noise and SNR of single energy images (70 keV), effective atomic number map, water iodine map, water iodine map in low-concentration contrast agent (3.75mg/mL), high-concentration contrast agent (15 mg/mL) and water among five groups of images (all P<0.05). Compared with FBP and 40% ASIR-V, the image noise of DLIR is lower than that of FBP and 40% ASIR-V, and the image signal-to-noise ratio is improved (all P<0.05). DLIR-H has the lowest noise and the highest signal-to-noise ratio. **Conclusion** In spectral CT imaging, DLIR has lower noise and higher signal-to-noise ratio than FBP and 40% ASIR-V in single-energy image, effective atomic number map, iodine water map, and water iodine map.
Keywords: Phantom; Energy Spectroscopy; Tomography; X-ray Computer; Deep Learning; Image Quality

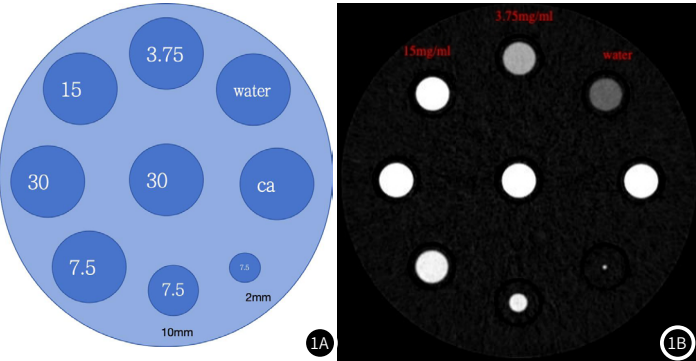
能谱CT与传统CT相比，具有多参数成像的特点^[1]，能谱CT进行一次成像，可以获得单能量图像、能谱曲线、有效原子序数图及基物质图，能够带来更多的诊断信息，对临床诊疗方案的选择提供参考。随着能谱CT广泛应用的同时，能谱CT成像的图像质量及辐射剂量也是人们关注的问题，能谱CT多参数成像的图像质量影响着诊断准确性。目前，迭代重建重建算法是临床上应用比较广泛的CT重建算法，在降低能谱CT辐射剂量及图像噪声(image noise, SD)方面发挥了重要的作用，但有相关研究表明，辐射剂量降低时迭代重建算法的降噪受到限制，迭代重建算法的权重升高到一定程度时，图像的空间分辨率就会减低，图像的纹理特征会改变，造成纹理失真^[2]，使图像变得过于平滑，对于细微病变结构的显示会受到影响，使医生诊断信心大打折扣。近几年来基于深度卷积神经网络的深度学习重建算法(deep learning image reconstruction, DLIR)在影像诊断中越来越多受到人们的关注，DLIR已经被证实不但在疾病诊断方面给放射科医师提供了巨大的帮助，而且可以改善CT成像的图像质量^[3-9]。但是深度学习图像重建算法对能谱CT图像质量影响的相关报道极少。本研究通过对比深度学习重建算法(DLIR)与滤波反投影重建算法(filteredback projection, FBP)及混合迭代重建算法(ASIR-V)在能谱CT扫描模式下图像质量的差异，探讨DLIR对能谱CT图像质量的影响。

1 资料与方法

1.1 实验模型 选择一个20cm直径的圆柱形聚丙烯体模，在内部放入九支试管，试管中分别装入(3.75、7.5、15、30mg/mL)不同浓度及(18mm、10mm、2mm)不同管径的碘对比剂及水和钙溶液，中心试管放置浓度为30mg/mL的对比剂，周边放置水、钙溶液和其它不同浓度对比剂试管，呈环形分布，排序见图1A及图1B。本次研究仅选择水、对比剂浓度为3.75mg/mL及15mg/mL的试管分析，这三种浓度更接近临床实质脏器的

【第一作者】赵艳红，女，副主任医师，主要研究方向：心脑血管疾病影像诊断。E-mail: 510680838@qq.com
【通讯作者】陈大治，男，主任医师，主要研究方向：腹部影像诊断。E-mail: hdazhi@sina.com

平扫期、动脉期及静脉期图像。



1.2 仪器与方法 扫描设备采用GE Revolution APEX CT, 选择能谱扫描模式对体模进行扫描, 管电压为80-140kV切换, 选择自动管电流调制技术, 螺距: 0.992: 1, 旋转时间选择0.5s, 选用前置40% ASiR-V迭代重建, 将扫描完成图像分别利用FBP、40% ASIR-V及深度学习(低DLIR-L、中DLIR-M、高DLIR-H)重建出五组图像。

1.3 图像分析 后处理工作站选择GE ADW4.7工作站, 将原始图像传送到工作站中, 利用工作站中的能谱专用软件进行图像分析处理, 分别重建出70keV单能量图像、基物质图(碘-水图、水-碘图)

及有效原子序数图, 本次研究仅对浓度为3.75 mg/mL、15 mg/mL及Water三支试管进行数据分析, 分别在FBP、40% ASIR-V及DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H各组图像中的11个层面(体模试管近段3个层面, 远段3个层面, 中间5个层面)测量数据, 感兴趣区的大小设置为100mm², 位置保持一致。测量70keV图像的CT值、碘-水图的碘浓度、水-碘图的水浓度、有效原子序数及各组图像SD, 计算信噪比(signal to noise ratio, CNR)。

1.4 统计学方法 利用SPSS 24.0统计软件进行数据统计分析, 分析比较FBP、40% ASIR-V及深度学习(低、中、高)5组图像中3.75 mg/mL、15 mg/mL及Water三支试管内70keV的CT值、碘-水图的碘浓度、水-碘图的水浓度、有效原子序数、各组图像SD及SNR的差异, 统计学方法选择方差分析。

2 结果

在(3.75mg/mL)、(15 mg/mL)及水三支试管内FBP、40% ASIR-V及深度学习(DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H)70keV的CT值差异无统计学意义($P>0.05$), 有效原子序数、碘水图的碘浓度及水碘图的水浓度亦无明显统计学差异($P>0.05$)。70keV、有效原子序数图、碘水图、水碘图的SD及SNR在各组中的差异均有统计学意义($P<0.05$)。深度学习图像重建算法(DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H)下的SD值均较FBP及40% ASIR-V降低, 图像SNR提高, DLIR-H噪声降低最明显, 信噪比最佳, 见下表1-3及图2。

表1 造影剂浓度为3.75mg/mL试管图像质量的对比

		单能量	有效原子序数	基物质对	
		70keV	Zeff	碘水图	水碘图
平均值	FBP	106.49±1.22	9.73±0.23	39.80±0.46	1003.05±1.28
	40%ASIR-V	106.50±1.04	9.73±0.22	39.80±0.43	1003.29±1.44
	DLIR-L	106.43±0.93	9.73±0.21	39.77±0.41	1003.04±1.13
	DLIR-M	106.46±0.86	9.73±0.20	39.76±0.40	1003.08±1.05
	DLIR-H	106.50±0.82	9.73±0.21	39.76±0.40	1003.12±1.16
	F值	0.011	0.014	0.022	0.083
	P值	1.000	1.000	0.999	0.987
SD	FBP	14.14±0.57	0.12±0.01	3.09±0.13	6.07±0.20
	40%ASIR-V	11.21±0.53	0.10±0.01	2.44±0.11	4.94±0.26
	DLIR-L	9.86±0.52	0.08±0.01	2.11±0.10	4.48±0.26
	DLIR-M	8.34±0.50	0.07±0.00	1.79±0.09	3.86±0.28
	DLIR-H	6.56±0.42	0.06±0.00	1.43±0.08	3.06±0.23
	F值	349.160	275.362	405.478	231.639
	P值	0.000	0.000	0.000	0.000
SNR	FBP	7.54±0.28	78.34±4.53	12.92±0.53	165.36±5.40
	40%ASIR-V	9.52±0.42	101.22±5.49	16.36±0.74	203.63±10.50
	DLIR-L	10.82±0.54	115.45±7.03	18.91±0.93	224.44±12.90
	DLIR-M	12.81±0.73	135.82±7.15	22.31±1.13	261.25±18.87
	DLIR-H	16.29±1.00	165.10±9.79	27.98±1.60	329.74±24.33
	F值	295.034	244.391	330.220	170.986
	P值	0.000	0.000	0.000	0.000

注: 平均值在单能量图像70 keV为CT值, 单位为(Hu), 有效原子序数图为有效原子序数值, 在碘水图为碘浓度, 在水碘图为水浓度, 单位为(mg/cm³)。

表2 造影剂浓度为15mg/mL试管图像质量的对比

		单能量	有效原子序数	基物质对	
		70keV	Zeff	碘水图	水碘图
平均值	FBP	409.48±1.68	13.11±0.03	157.42±0.98	999.99±2.47
	40%ASIR-V	409.48±1.57	13.11±0.02	157.42±0.92	999.97±2.36
	DLIR-L	409.51±1.53	13.10±0.02	157.43±0.88	999.99±2.34
	DLIR-M	409.51±1.48	13.11±0.02	157.44±0.86	999.97±2.28
	DLIR-H	409.55±1.40	13.11±0.02	157.45±0.84	999.99±2.25
	F值	0.004	0.020	0.002	0.000
	P值	1.000	0.999	1.000	1.000
SD	FBP	15.84±1.48	0.05±0.01	3.43±0.31	7.05±0.65
	40%ASIR-V	12.18±1.26	0.04±0.01	2.64±0.28	5.49±0.55
	DLIR-L	10.92±1.14	0.03±0.01	2.37±0.24	4.96±0.53
	DLIR-M	9.33±1.02	0.03±0.00	2.04±0.21	4.22±0.48
	DLIR-H	7.61±0.86	0.02±0.00	1.71±0.18	3.42±0.42
	F值	77.355	26.993	76.361	73.104
	P值	0.000	0.000	0.000	0.000
SNR	FBP	26.05±2.32	282.00±38.46	46.16±4.01	142.98±12.70
	40%ASIR-V	33.95±3.42	377.33±57.01	60.15±6.15	183.61±17.83
	DLIR-L	37.86±3.95	397.07±54.81	67.11±6.79	203.61±21.36
	DLIR-M	44.39±4.86	456.73±66.10	77.76±8.07	239.89±27.42
	DLIR-H	54.49±6.28	496.48±102.24	92.81±10.14	296.20±36.31
	F值	66.502	16.434	63.998	61.761
	P值	0.000	0.000	0.000	0.000

注: 平均值在单能量图像70 keV为CT值, 单位为(Hu), 有效原子序数图为有效原子序数值, 在碘水图为碘浓度, 在水碘图为水浓度, 单位为(mg/cm³)。

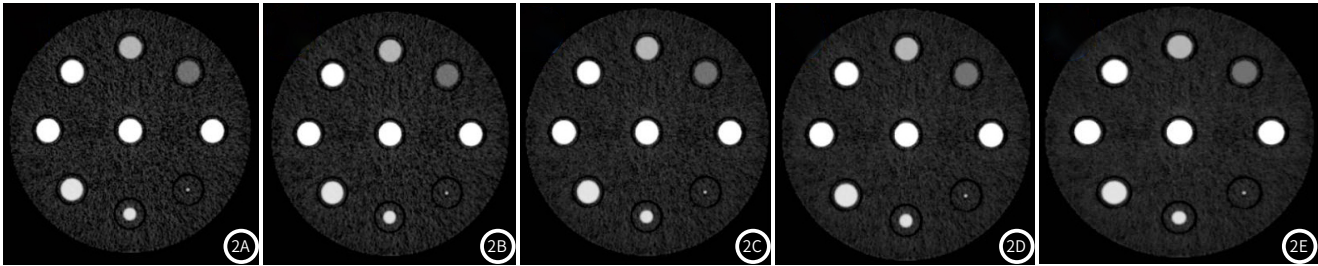


图2A-图2E为FBP (2A)、40% ASIR-V (2B)、DLIR-L (2C)、DLIR-M (2D)、DLIR-H (2E) 重建算法下有效原子序数轴位图像, 图像显示DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H图像噪声较FBP及40% ASIR-V降低, DLIR-H图像噪声降低最明显。

表3 水试管图像质量的对比

		单能量	有效原子序数	基物质对	
		70keV	Zeff	碘水图	水碘图
平均值	FBP	3.51±1.16	7.56±0.04	0.12±0.50	1003.27±1.47
	40%ASIR-V	3.46±1.18	7.56±0.04	0.08±0.47	1003.06±1.22
	DLIR-L	3.37±1.34	7.55±0.03	0.03±0.42	1003.32±1.42
	DLIR-M	3.40±1.15	7.56±0.03	0.10±0.43	1003.15±1.47
	DLIR-H	3.33±1.04	7.56±0.03	0.00±0.35	1003.23±1.32
	F值	0.039	0.045	0.135	0.081
	P值	0.997	0.996	0.969	0.988
SD	FBP	14.49±0.88	0.24±0.02	3.17±0.20	6.14±0.35
	40%ASIR-V	11.59±0.83	0.20±0.02	2.53±0.19	5.03±0.35
	DLIR-L	9.81±0.71	0.16±0.01	2.05±0.15	4.57±0.35
	DLIR-M	8.17±0.68	0.13±0.01	1.70±0.14	3.91±0.32
	DLIR-H	6.13±0.58	0.10±0.01	1.27±0.10	3.03±0.31
	F值	202.550	170.720	238.610	132.053
	P值	0.000	0.000	0.000	0.000

注：平均值在单能量图像70 keV为CT值，单位为(Hu)，有效原子序数图为有效原子序数值，在碘水图为碘浓度，在水碘图浓度为水浓度，单位为(mg/cm³)。

3 讨 论

图像噪声是评价CT图像质量的重要因素，低噪声、高信噪比有助于提高病变及细微结构的显示，提高诊断准确性。既往临床上常用的CT重建算法包括FBP及迭代重建算法，FBP作为传统图像重建算法，需要较高的辐射剂量才能保证图像质量，辐射剂量降低时，图像噪声增加，图像质量下降。迭代重建算法在近年来也得到了广泛的应用，它虽然解决了在低辐射剂量下图像噪声升高的问题，但是过高权重的迭代却影响了图像的纹理特征，导致图像空间分辨率降低，甚至产生“蜡像”样伪影。DLIR是新型的基于深度卷积神经网络的CT重建算法，它是基于FBP高质量图像作为训练，不仅具有快速的重建速度，而且可以在降低图像噪声的情况下并保持图像的真实纹理特征，得到满意的图像质量^[10]。DLIR实现了低辐射剂量与高图像质量的平衡，可以获得低辐射剂量、低噪声和真实纹理特征CT图像。

有相关研究表明，DLIR可以降低CT图像噪声并且保留图像纹理特征，减少迭代算法的模糊伪影对图像质量的影响，在降噪的同时可以降低辐射剂量^[11-12]。既往的体模研究中证实，在保持图像真实纹理特性的情况下，DLIR较迭代重建算法噪声能够降低40%-70%，辐射剂量降低25%-61%，诊断能力可以提升50-80%^[13]。

本研究对能谱CT成像中不同重建算法在不同浓度对比剂的图像质量进行分析。结果显示在不同浓度对比剂(3.75mg/mL)、(15 mg/mL)及水试管中，70keV图像的CT值、有效原子序数值、碘水图的碘浓度、水碘图的水浓度在FBP、40% ASIR-V、DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H 5组图像均无明显统计学差(P>0.05)，DLIR不会影响单能量的CT值、有效原子序数值、基物质图浓度测量的准确性。而70keV单能量图像、有效原子序数图、碘水图、水碘图的SD在DLIR下均较FBP及40% ASIR-V降低，图像的SNR明显提高(P<0.05)，DLIR-H下图像噪声下降最显著，信噪比提升最明显。在3.75mg/mL试管内，DLIR-H较40% ASIR-V在70keV图像噪声降低41.48%，在有效原子序数图噪声降低40%，在碘水图噪声降低41.39%，在水碘图噪声降低38.06%。在15mg/mL试管内，DLIR-H较40% ASIR-V在70keV图像噪声降低37.52%，在有效原子序数图噪声降低50%，在碘水图噪声降低35.23%，在水碘图噪声降低37.70%。无论是在低浓度造影剂还是高浓度造影剂下，DLIR在能谱CT成像中的多参数图像都具有一定的降噪效果，提高图像质量。

本研究的不足之处，首先本项研究是体模研究，不能完全代表临床数据，临床数据更复杂多样，影响因素也更多，体模研究

数据与临床数据可能会存在一些偏差，仍需进一步进行一些临床的研究验证。其次，本研究仅对图像噪声及信噪比进行了分析，而没有进行图像空间分辨率的研究，这将在后续的研究中进行补充。

总之，在能谱CT成像中，DLIR较FBP及40% ASIR-V在单能量图像、有效原子序数图、碘水图、水碘图的噪声降低，信噪比提高，在能谱CT成像中对图像质量的改善具有一定的应用前景。

参考文献

[1] 林光耀, 隋愿, 李依明, 等. 能谱CT联合MR高分辨率管壁成像对颈动脉斑块成分分析、病理对照及诊断效能[J]. 中国临床医学影像杂志, 2022, 33(1): 15-23.

[2] Mileto A, Guimaraes LS, McCollough CH, et al. State of the art in abdominal CT: the limits of iterative reconstruction algorithms[J]. Radiology, 2019, 293(3): 491 - 503.

[3] 王金华, 宋兰, 隋昕, 等. 深度学习重建改善胸部低剂量CT图像质量的价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(1): 74-80.

[4] 李浚利, 黄益龙, 韩丹, 等. 冠状动脉CT血管成像中人工智能诊断冠心病的准确性[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(1): 59-162.

[5] Gm A, Mc A, Mt B, et al. Performance of a deep learning algorithm for the evaluation of CAD-RADS classification with CCTA-ScienceDirect[J]. Atherosclerosis, 2020, 294(12): 25-32.

[6] 孙记航、杨利新、唐晓璐, 等. 应用深度学习图像重建算法提升多发性大动脉炎患儿增强CT血管壁测量精度的研究[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(12): 1308-1312.

[7] Benz DC, Bebetos G, Rampidis G, et al. Validation of deeplearning image reconstruction for coronary computed tomography angiography: impact on noise, image quality and diagnostic accuracy[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2020, 14(5): 444-451.

[8] 尹伟, 王敏杰, 徐瑞敏, 等. 基于人工智能的辅助运动校正算法对CCTA图像质量的影响[J]. 放射学实践, 2022, 37(8): 1035-1041.

[9] 田杜雪, 宋兰, 隋昕, 等. 深度学习重建在低辐射剂量CT肺动脉成像中的临床应用价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(5): 563-568.

[10] Yang S, Bie Y, Pang G, et al. Impact of novel deep learning image reconstruction algorithm on diagnosis of contrast-enhanced liver computed tomography imaging: comparing to adaptive statistical iterative reconstruction algorithm. [J] J Xray Sci Technol, 2021, 29(6): 1009-1018.

[11] Benz DC, Benetos G, Rampidis G, et al. Validation of deep-learning image reconstruction for coronary computed tomography angiography: impact on noise, image quality and diagnostic accuracy[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2020, 14(5): 444-451.

[12] Greffier J, Hamard A, Pereira F, et al. Image quality and dose reduction opportunity of deep learning image reconstruction algorithm for CT: a phantom study[J]. EurRadiol, 2020, 30(7): 3951-3959.

[13] GREFFIER J, HAMARD A, PEREIRA F, et al. Image quality and dose reduction opportunity of deep learning image reconstruction algorithm for CT: a phantom study[J]. Eur Radiol, 2020, 30(7): 3951-3959.