CTTA CT理论与应用研究（中英文）
Computerized Tomography Theory and Applications

低管电压联合深度学习图像重建算法在降低胸腹部联合增强CT辐射剂量的价值

綦维维，程 瑾，陈楚韩，安 备，刘晓怡，付 玲，王 屹

Value of Low Tube Voltage Combined with Deep Learning Image Reconstruction Algorithm to Reduce Radiation Dose in Combined Thoracoabdominal Enhanced CT

QI Weiwei, CHENG Jin, CHEN Chu Han, AN Bei, LIU Xiaoyi, FU Ling, and WANG Yi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.15953/j.ctta.2025.001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

关注微信公众号，获得更多资讯信息

綦维维, 程瑾, 陈楚韩, 等. 低管电压联合深度学习图像重建算法在降低胸腹部联合增强 CT 辐射剂量的价值[J]. CT 理论与应用研究（中英文）, xxxx, x(x): 1-9. DOI:10.15953/j.ctta.2025.001.
QI W W, CHENG J, CHEN C H, et al. Value of Low Tube Voltage Combined with Deep Learning Image Reconstruction Algorithm to Reduce Radiation Dose in Combined Thoracoabdominal Enhanced CT[J]. CT Theory and Applications, xxxx, x(x): 1-9. DOI:10.15953/j.ctta.2025.001. (in Chinese).

低管电压联合深度学习图像重建算法在降低胸腹部联合增强 CT 辐射剂量的价值

綦维维， 程瑾， 陈楚韩， 安备， 刘晓怡， 付玲， 王屹✉
北京大学人民医院放射科，北京 100044

摘要： 目的：探讨在胸腹部联合增强 CT 扫描中，应用低管电压联合深度学习图像重建算法（DLIR）对降低辐射剂量及图像质量的影响。方法：① 模体实验。确定低管电压结合深度学习算法对低对比度分辨力鉴别的可行性。按照不同图像质量参数噪声指数（NI）扫描 Catphan 500 模体，使用两种扫描条件，优化组扫描参数选择低管电压 80kV 结合 DLIR 重建进行扫描和图像重建；常规组扫描参数和图像重建算法选择管电压 120kV 结合自适应统计迭代重建（ASiR-V），确定优化组条件使用低剂量（NI > 9）时低对比度分辨力相对于常规组使用常规剂量（NI = 9）的 NI 值和有效性。② 前瞻性实验。前瞻性收集常规进行胸腹部联合增强 CT 扫描的患者 160 例，随机分为低剂量优化组和常规剂量常规组，最终入组 149 例，低剂量优化组 61 例，常规剂量常规组 88 例。根据模体实验的结果确定的低剂量优化组 $NI_{优}$，扫描参数选择优化组条件；常规剂量常规组 NI 为 9，扫描参数和图像重建算法选择常规组条件。记录并计算两组间的辐射剂量并对两组的图像质量进行主、客观评价。结果：低剂量优化组使用 $NI_{优} = 12$ 可以获得常规剂量组 NI = 9 等效的低对比分辨能力。低剂量优化组的有效剂量 9.56 ± 2.34mSv 低于常规剂量常规组 17.82 ± 5.22mSv。低剂量优化组的肝脏衰减值、主动脉衰减值显著高于常规剂量常规组，肝脏及主动脉 CNR 和 SNR 值显著高于常规剂量常规组，主动脉空间分辨力、肝总动脉空间分辨力、门静脉空间分辨力及小血管/支气管显示情况也均优于常规剂量常规组。 结论：低管电压联合深度学习图像重建算法能够在降低辐射剂量的条件下，仍保证同等甚至更高的图像质量，为大范围 CT 扫描辐射剂量的优化提供一个可行方案。

关键词： 计算机体层摄影；深度学习图像重建算法；低管电压；辐射剂量；胸腹部联合 CT 扫描

DOI:10.15953/j.ctta.2025.001　　**中图分类号：** R 814.42　　**文献标识码：** A

Value of Low Tube Voltage Combined with Deep Learning Image Reconstruction Algorithm to Reduce Radiation Dose in Combined Thoracoabdominal Enhanced CT

QI Weiwei, CHENG Jin, CHEN Chu Han, AN Bei, LIU Xiaoyi, FU Ling, WANG Yi✉
Radiation Department of Peking University Peoples' Hospital, Beijing 100044, China

Abstract: Objective: To investigate the effect of low tube voltage combined with Deep Learning Image Reconstruction (DLIR) on radiation dose reduction and maintaining image quality in combined chest and abdominal enhanced CT scans. Methods: (1) Phantom study. To determine the feasibility of combining low tube voltage with deep learning algorithms for low-contrast resolution, Catphan 500 phantoms were scanned under two different conditions. The optimization group used a low tube voltage (80 kV) combined with DLIR for scanning and image reconstruction, while the routine group used a 120 kV tube voltage combined with Adaptive Statistical Iterative Reconstruction V (ASiR-V). This study aimed to determine the effectiveness of the optimization group using a low dose (noise index, NI > 9) compared with the routine group using a routine dose (NI = 9). (2) Prospective study. A total of 160 patients who underwent routine chest and abdominal enhanced CT scans were prospectively collected and randomly divided into a low-dose

收稿日期： 2025-01-01。
基金项目： 北京大学人民医院发展基金专项（RD-2022-25）。
第一作者： 綦维维，男，医学硕士，副主任技师，从事 CT 检查规范化，图像质量控制以及图像后处理方向，E-maiL：cyanage8@sina.com。
通信作者： 王屹✉，女，医学博士、主任医师，北京大学人民医院放射科主任、教授、硕士博士生导师，研究领域涉及乳腺癌、肺癌、胃肠间质瘤，胃及结直肠癌、肝癌以及妇科肿瘤等方向，E-maiL：Jennifer_wy@me.com。

optimization group and routine-dose group, with 149 patients ultimately enrolled (61 in the low-dose optimization group and 88 in the routine-dose group). Based on the results of the phantom study, the low-dose optimization group used the optimized condition with NI set to the optimal value, whereas the routine-dose group used the routine condition with NI = 9. Radiation doses were recorded and calculated for both groups, and image quality was subjectively and objectively evaluated. Results: The low-dose optimization group using NI = 12 achieved an equivalent low-contrast resolution capability to the routine-dose group with NI = 9. The effective dose in the low-dose optimization group (9.56 ± 2.34 mSv) was significantly lower than that in the routine-dose group (17.82 ± 5.22 mSv). The liver and aorta attenuation values in the low-dose optimization group were significantly higher than those in the routine-dose group, and the CNR and SNR values in the liver and aorta were also significantly higher. The spatial resolution of the aorta, common hepatic artery, and portal vein and the display of small vessels/bronchi were all superior in the low-dose optimization group compared with the routine-dose group. Conclusion: The combination of a low tube voltage and deep learning image reconstruction algorithm can ensure equivalent or even higher image quality while reducing radiation dose, providing a feasible solution for optimizing radiation dose in large-scale CT scans.

Keywords: computed tomography (CT); deep learning image reconstruction algorithm; low tube voltage; radiation dose; combined chest and abdomen CT scan

胸腹部联合 CT 扫描在临床的应用逐渐广泛。在严重创伤或恶性肿瘤诊疗过程中已成为常规检查手段[1-2]，该方法可以快速准确地探查胸、腹中的大范围病变情况，为疾病的诊治提供有效帮助[1]。然而由于扫描范围大，患者接受辐射剂量的随之提高引起了业界对大范围 CT 扫描引起的潜在辐射危害的担忧[3]。但通常腹部增强检查需要扫描多个期相才能明确病变性质。这就大大增加胸腹部 CT 检查辐射剂量，特别是在年轻和接受重复成像的患者，增加了辐射暴露的风险。有报道称个别联合扫描多期相的辐射剂量已经接近发生确定性效应的限值 100 mSv[4]。同时由于腹部多为密度差相近的软组织，CT 对于图像的密度分辨力要求高，这也限制了辐射剂量优化的程度，低管电压技术虽然可以增加组织对比度，但会带来噪声增加[3]。

近年来，随着 CT 硬件设备与图像重建方法的改进，深度学习图像重建算法（deep learning image reconstruction，DLIR）通过深度卷积神经网络对传统图像进行学习建模，有效降低辐射剂量的同时提高图像质量[5]。多项研究关于 DLIR 为我们使用低剂量方法扫描腹部降低辐射剂量的同时可以获得满足诊断的图像质量[6-9]，但对于大范围扫描的 DLIR 应用开展不多[10]。

因此，本研究尝试通过联合低管电压与深度学习图像重建算法，尝试在保证同等图像质量的前提下降低胸腹部大范围增强 CT 扫描的辐射剂量，为大范围 CT 扫描辐射剂量优化的发展提供一个可能的方向。

1 材料与方法

本实验为了保证辐射剂量降低后的图像质量，设计了模体实验用来验证使用优化算法的低剂量水平的低对比分辨力能够不低于常规剂量常规算法的分辨能力，然后再根据模体实验的结果设计前瞻实验，实验方法和路径见图 1。

1.1 临床资料

本研究为单中心前瞻性研究，已经过北京大学人民医院伦理委员会批准并签署知情同意（批文编号：2022Z031）。前瞻性收集 2023 年 6 月至 2024 年 4 月于本院进行胸腹部增强 CT 扫描的患者入组。

纳入标准：① 签署知情同意书并完成胸腹部联合增强 CT 扫描；② 无体内外金属伪影干扰的病例。排除标准包括：① 碘造影剂过敏史、肾功能不全等增强 CT 扫描禁忌征；② 妊娠期女性；③ BMI < 20 kg/m^2 或 > 30 kg/m^2；④ 年龄 < 18 岁。

1.2 模体实验

采用 Revolution Apex CT（GE HealthCare，Milwaukee）进行模体扫描，确定低管电压结合深度学习算法对低对比度分辨力鉴别的可行性和低剂量水平。参考关于低管电压对腹部成像的模体实验[11]，按照不同图像质量参数噪声指数（noise index，NI）扫描 Catphan500 模体的低对比度模组 CTP515，使用两种扫描条件，low voltage-DLIR（LV-DLIR）组扫描参数选择低管电压 80 kV 结合 DLIR-H 重建进行扫描和图像重建；high voltage-自适应统计迭代重建（adaptive statistical iterative reconstruction V，ASiRV）（HV-ASiRV）组扫描参数和图像重建算法选择常规扫描的管电压 120 kV 结合 ASiRV 权重 50%，standard 重建算法。余相同的扫描参数为：探测器宽度 80 cm，螺距 0.992∶1，机架转速 0.5 s，扫描层厚 5 mm。图像均重建成 1.25 cm 层厚层间隔，

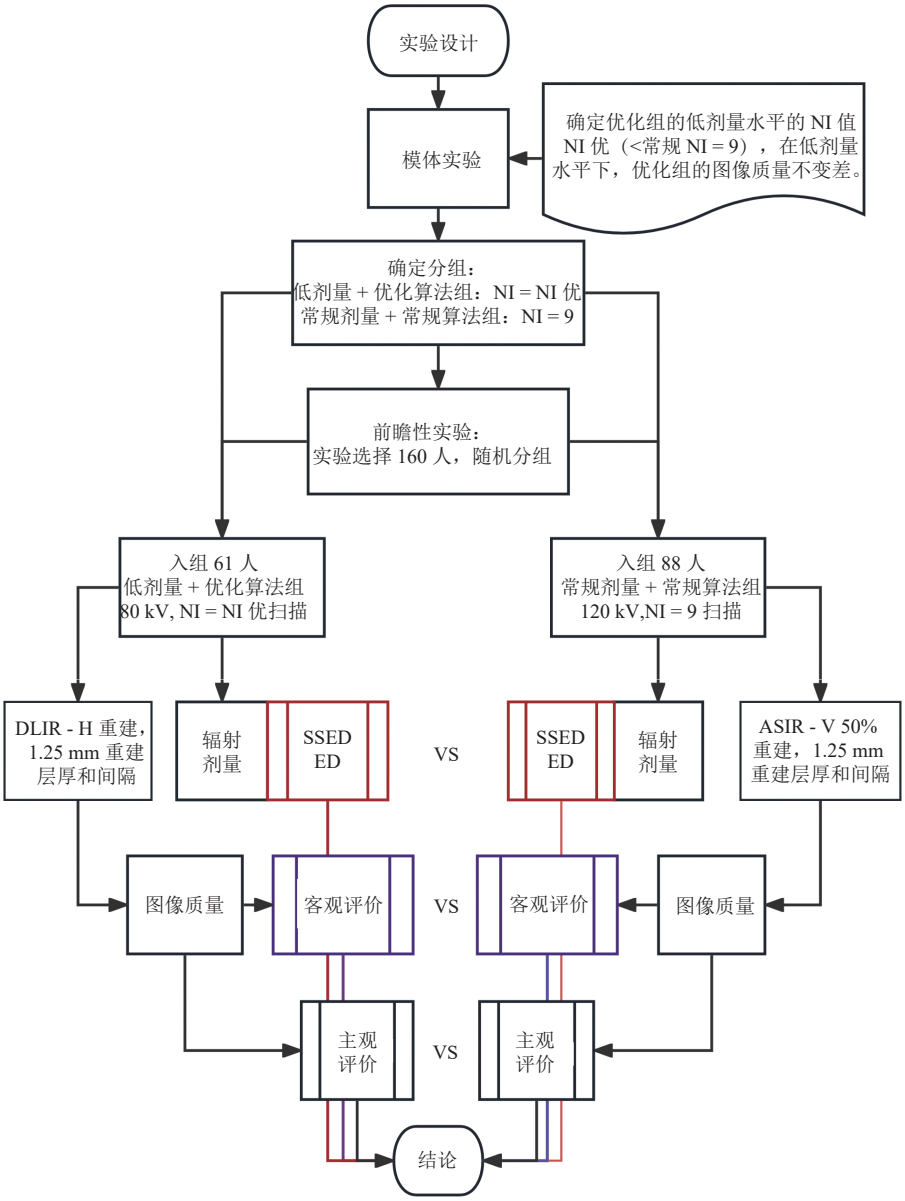

图 1　实验设计流程图，图中给出了病例分组，评价和比较的内容以及结论依据

Fig.1　Flowchart of the experimental design. The chart shows the grouping of cases, content of evaluation and comparison, and the basis for the conclusions

测量密度差为 1% 模块和背景的标准差（standard deviation，SD）值以及 CT 值，确定两组条件中优化剂量组使用低剂量 NI > 9 时相对于常规剂量 NI = 9 对于低对比度分辨力的 $NI_{优}$和有效性。

1.3　前瞻实验的 CT 检查方法

采用 Revolution Apex CT（GE HealthCare，Milwaukee）进行检查。本研究基于常规胸腹部增强 CT 扫描流程：患者禁食 4～6h，检查时饮水 600mL 充盈胃腔，扫描范围自胸腔至髋关节上缘水平，包全小肠。平扫序列包括胸部腹部范围，动脉晚期（约注射对比剂开始 30s）序列包括腹部；门静脉期（动脉晚期后 30s）包括胸腹部范围。通过 CT motion XD8000 高压注射器（Ulrich）经肘正中静脉注射非离子型碘普罗胺造影剂（优维显，370mg/mL）80mL，外加 30mL 生理盐水推注，流速 2.5mL/s。

1.4　前瞻实验的扫描条件分组

根据辐射剂量和扫描条件随机分为低剂量加优化条件组（LD-LV-DLIR）和常规剂量加常规条件组（RD-HV-ASiRV）两组。低剂量加优化条件组的扫描参数为：管电压 80kV，采用自动曝光控制技术，三期扫描 NI = 12；图像重建采用 DLIR-H 重建。常规剂量常规条件组的扫描参数为：管电压 120kV，三期扫描 NI = 9，图像重建算法采用

ASiRV 权重 50%，standard 重建算法。其余相同的扫描参数为：探测器宽度 80cm，螺距 0.992∶1，机架转速 0.5s，扫描层厚 5mm。所有患者的图像重建层厚为 1.25mm，层间距 1.25mm。

1.5 扫描辐射剂量

记录各组患者 CT 扫描的容积 CT 剂量指数（CT dose index volume，$CTDI_{vol}$）并计算特定体型的剂量评估（the size-specific dose estimate，SSDE），SSDE 通过正位像测量髂脊水平身体左右径宽度 Lat 然后对应 SSDE 的 32cm 直径的 PMMA 模体的校正因子 f 计算[12-13]。并根据 SSDE 计算校正的有效辐射剂量（effective dose，ED）有效剂量的计算公式为校正 ED = DLP*0.014*f。

1.6 图像质量评价

图像后处理应用 AW 4.6 工作站（GE 医疗）；图像调取及阅片应用 Centricity PACS 4.0（GE 医疗）。在 1.25mm 层厚的三期图像序列中，固定窗宽（400HU）窗位（40HU）逐层观察胸、腹特征部位的图像并进行主客观指标评分。

1. 客观评价

由一名放射科医生对两组图像进行测量和分析。分别测量动脉期和静脉期的图像，将感兴趣区（region of interest，ROI）分别置于椎旁肌肉（参考组织）、肝脏实质、主动脉（肝总动脉层面）、降主动脉（气管分叉层面）管腔内，记录其 CT 值和 SD，以 SD 值作为噪声值。对于不同组 ROI 的大小、形状，位置尽可能保证一致，且避开明显钙化处及病灶。按照以下公式分别计算肝脏、主动脉的信噪比（signal to noise ratio，SNR）和对比噪声比（contrast to noise ratio，CNR）。

$$SNR = CT值/噪声， \quad (1)$$

$$CNR = （目标组织CT值 - 参考组织CT值）/噪声。 \quad (2)$$

2. 主观评价

由另外两名具有 5 年以上诊断经验的放射科医生采用盲法对两组图像进行独立评价，评价内容包括主动脉及肝总动脉的边缘空间分辨力和对比度、三期图像整体噪声（通过肝实质显示情况进行评估）、细微结构空间分辨力（通过肾上腺显示情况进行评价）以及胸部肺裂、小血管/支气管的显示情况。采用 5 分制，评分标准如表 1 所示[14-15]。当 2 位放射科医师评分出现差异，则由第 3 位专家医师进行最终判断。

1.7 统计学方法

采用 SPSS 25.0 统计软件进行统计分析，采用 Kolmogorov-Smirnov 检验资料是否符合正态分布，符合正态分布的计量资料用平均值标准差表示，不符合正态分布的定量资料及等级资料用中位数（上、下四分位数）M（Q1，Q3）来表示。采用曼惠特尼检验和非参数检验比较两组间各指标客观指标包括噪声、肝脏及主动脉的 CNR 及 SNR；主观指标包括：噪声、主动脉及肝总动脉的边缘分辨力和对比度、胸部肺裂及小血管/支气管显示情况。各组图像医师间主观一致性采用组内相关系数（intra-class coefficient，ICC）分析，＞0.75 为一致性高，0.4～0.75 为一致性一般，＜0.4 为一致性差。

2 结果

2.1 模体实验

如图 2 所示，不同图像参考水平 NI 对于低分辨率模体的衰减值在不同算法下的响应。

图 2 模体研究表明，由于 NI 的选择与剂量为指数关系，同时 ASiR-V 算法跟 DLIR 算法在剂量低的时候均表现对于噪声控制不在增加，如图所示 SD 在超过 13 后走平。在 NI = 13 时（蓝线），迭代重建算法的 ASiR-V1 和 ASiR-V2 已经无法区分了，在 NI = 15 时（红线），DL1 和 DL2 已经开始无法区分。可以认为在 1.25mm 层厚，NI 为 13 是

表 1 主观评分标准
Table 1 Subjective Scoring Criteria

评分	图像噪声	细微结构空间分辨率（肾上腺）	肝总动脉及主动脉空间分辨力	主动脉及肝总动脉对比度	肺裂、小血管/支气管显示率
1 分	噪声极明显，图像完全不能诊断	模糊不清	边缘非常模糊	模糊不清	完全不可见
2 分	噪声明显，解剖细节重度模糊	隐约可见	低于可接受水平	劣于可接受水平	＜25% 可见
3 分	噪声明显，但可接受	可接受	可接受水平	可接受	25%～75% 可见
4 分	能观察到噪声	清晰	高于可接受水平	优于可接受水平	＞75% 可见
5 分	几乎无噪声	非常清晰	边缘非常锐利	非常清晰	完全可见

ASiR-V 分辨此模体 1% 密度差的极限以及 NI 为 15 为 DLIR 分辨 1% 密度差的极限，考虑到实际扫描是需要一定的波动储备，不能使用极限值，根据之前的研究腹部 CT 扫描 NI = 10 可以获得满意图像质量[16]。所以如果用 $NI_{优}$ = 12 扫描可以在 DLIR 重建后保证低对比分辨力能达到 ASiR-V 重建时 NI 为 9 ~ 10 的低对比分辨力。根据之前的研究腹部 CT 扫描时 NI = 10 可以获得满意图像质量[16]。

2.2　患者一般资料与辐射剂量指标比较

最终入组 149 名患者，其中男 75 例，女 74 例，年龄平均（53.5 ± 15.8）岁，年龄范围 18 岁 ~ 98 岁，体质量指数（body mass index，BMI）平均（23.9 ± 3.4）kg/m^2。低剂量优化组与常规剂量常规组间，年龄、BMI 均无显著性差异（$P > 0.05$）（表 2）。低剂量优化组的 $CTDI_{vol}$、SSDE 以及校正 ED 的值均小于常规剂量常规组，相比较剂量减少了约 46.3%。两组计算的 SSDE 平均值均高于 $CTDI_{vol}$ 值，但标准差却低于 $CTDI_{vol}$ 值。

2.3　客观评价指标比较

低剂量优化组与常规剂量常规组的腹部指标间，动脉期肝脏衰减值、主动脉衰减值存在统计学差异（肝脏 71.5 HU vs. 67.1 HU，P = 0.001；主动脉 358.9 HU vs. 245.4 HU，$P < 0.001$），静脉期肝脏衰减值、主动脉衰减值存在统计学差异（肝脏 146.6 HU vs. 126.5 HU，$P < 0.001$；主动脉 216.8 HU vs. 148.3 HU，$P < 0.001$）。两组间动、静脉期图像噪声、肝脏及主动脉的 CNR 和 SNR 值见表 3 和表 4，均存在显著性差异（$P < 0.001$）。两组胸部指标间，平扫期降主动脉衰减值无显著性差异（44.1 HU vs. 43.7 HU，$P = 0.49$），平扫期脂肪衰减值、静脉期脂肪和降主动脉衰减值存在显著差异（平扫脂肪−129.1 HU vs. −114.2 HU，$P = 0.002$；静脉脂肪−119.6 HU vs. −111.5 HU，$P = 0.017$；静脉降主动脉 227.9 HU vs. 148.9 HU，$P < 0.001$）。

2.4　主观评价指标比较

图像整体噪声、主动脉空间分辨力、主动脉对

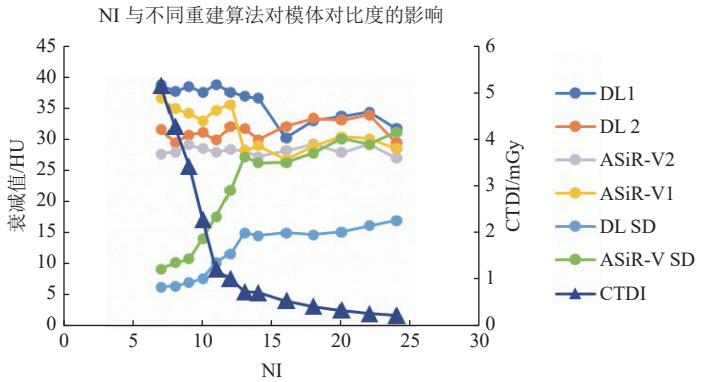

图 2　图中 1 为 CTP515 模块中 supra-slice 1% 密度差的模块，2 为 CTP515 模块中的本底，DL 为 DLIR 重建，ASiR-V 为自适应统计迭代重建重建

Fig.2　1 represents the module with a 1% density difference in the supra-slice of the CTP515 module, and 2 represents the background of the CTP515 module. DL denotes DLIR reconstruction, and ASiR-V denotes Adaptive Statistical Iterative Reconstruction

表 2　两组一般资料与辐射剂量指标比较

Table 2　Comparison of General Information and Radiation Dose Indicators between the Two Groups

项目	组别		统计检验	
	LD-LV-DLIR	RD-HV-ASiRV	Z	P 值
例数	61	88		
男/女	28/36	47/38	−0.71	0.48
BMI/（kg/m^2）	23.46 ± 2.81	23.95 ± 4.00	−1.838	0.07
年龄/岁	54.77 ± 16.79	52.82 ± 15.12	−0.71	0.48
$CTDI_{vol}$/mGy	3.67 ± 1.56	7.39 ± 2.40	3.46	< 0.001
SSDE/mGy	3.72 ± 1.33	7.47 ± 2.02	3.23	< 0.001
ED 校正/mSv	9.56 ± 2.34	17.82 ± 5.22	2.79	< 0.001

注：BMI 为体重指数；CTDIvol 为容积 CT 剂量指数；SSDE 为特定体型的剂量评估；ED 校正为校正后的有效剂量。

表 3　两组间动脉期客观指标比较
Table 3　Comparison of Objective Indicators in the Arterial Phase between the Two Groups

项目		组别		统计检验	
		LD-LV-DLIR	RD-HV-ASiRV	*z*	*P*
例数		61	88		
噪声		8.01 ± 2.57	11.84 ± 2.29	−7.69	< 0.01
肝脏	CNR	25.32（19.72，31.15）	14.37（12.58，16.74）	−8.27	< 0.01
肝脏	SNR	9.63（7.38，11.10）	5.87 ± 1.45	−7.59	< 0.01
主动脉	CNR	65.30 ± 21.33	30.76 ± 7.33	−9.67	< 0.01
主动脉	SNR	48.79 ± 15.99	21.57 ± 5.55	−9.85	< 0.01

注：CNR 为对比噪声比；SNR 为信噪比。

表 4　两组间静脉期客观指标比较
Table 4　Comparison of Objective Indicators in the Venous Phase between the Two Groups

项目		组别		统计检验	
		LD-LV-DLIR	RD-HV-ASiRV	*z*	*P*
例数		61	88		
噪声		7.60（6.40，7.60）	12.51 ± 2.62	−7.93	< 0.01
肝脏	CNR	34.44 ± 10.34	19.45 ± 11.61	−8.71	< 0.01
肝脏	SNR	19.31 ± 6.09	9.43（8.16,10.54）	−9.00	< 0.01
主动脉	CNR	43.58 ± 13.39	21.05 ± 5.89	−9.14	< 0.01
主动脉	SNR	28.46 ± 9.55	12.41 ± 3.47	−9.39	< 0.01

注：CNR 为对比噪声比；SNR 为信噪比。

比度、肝总动脉空间分辨力、肝总动脉对比度、细微结构空间分辨力、门静脉空间分辨力、门静脉对比度等各主观指标不同部位的一致性较好。

低剂量优化组与常规剂量常规组间腹部动、静脉期主观指标、胸部主观指标比较结果见表 5～表 7。主观评价的不同体型的胸部以及胸腹的图像如图 3 所示。两组间动脉期主动脉对比度、静脉期噪声、细微结构分辨力、门静脉对比度、肺裂显示情况均无统计学差异（$P > 0.05$），但主动脉空间分辨力、肝总动脉空间分辨力及对比度、门静脉空间分辨力、小血管/支气管显示情况存在统计学差异（$P < 0.05$）。

3　讨论

3.1　辐射剂量的评价与优化

相比于常规剂量组，低剂量优化组成功降低了约 46% 的辐射剂量，显著减少了患者接受的辐射剂量水平。自动曝光控制参数 NI 值的设定是控制辐射剂量的关键[17]。对于个体检查而言，NI 值的设定可以通过管电流调制的方法保证同一检查不同层面的图像质量一致，同时确保不同体型的人都能获得一致的图像质量，其中大体型的辐射剂量较高，小体型的辐射剂量较低[18]（图 3），不同体型的受检者，以及同一个受检者在冠状位保持一致的图像质量。由于体部 $CTDI_{vol}$ 是基于 32 cm 的体模在实验室

表 5　两组间腹部动脉期主观指标比较表
Table 5　Comparison of Subjective Indicators in the Abdominal Arterial Phase between the Two Groups

项目	组别		统计检验	
	LD-LV-DLIR	RD-HV-ASiRV	z	P
例数	61	88		
噪声	3（3，3）	2.5（2，3）	−3.71	< 0.001
主动脉空间分辨力	5（5，5）	2（2，3.75）	−8.30	< 0.01
主动脉对比度	5（5，5）	5（5，5）	−1.90	0.58
肝总动脉空间分辨力	5（5，5）	4（3，4）	−8.08	< 0.001
肝总动脉对比度	5（5，5）	5（4，5）	−3.45	0.01

表 6　两组间腹部静脉期主观指标比较表
Table 6　Comparison of Subjective Indicators in the Abdominal Venous Phase between the Two Groups

项目	组别		统计检验	
	LD-LV-DLIR	RD-HV-ASiRV	z	P
例数	61	88		
噪声	3（3，3）	3（3，4）	−1.99	0.47
细微结构分辨力	3（3，4）	3（3，4）	0.82	0.41
门静脉空间分辨力	4（3，4）	3（3，4）	−3.88	< 0.01
门静脉对比度	4（4，5）	4（3，5）	−0.38	0.71

表 7　两组间胸部主观指标比较表
Table 7　Comparison of Subjective Indicators in the Chest between the Two Groups

项目	组别		统计检验	
	LD-LV-DLIR	RD-HV-ASiRV	*z*	*P*
例数	61	88		
肺裂	4（3，5）	4（3，5）	−0.249	0.81
小血管/支气管	5（5，5）	4（4，5）	−2.455	0.03

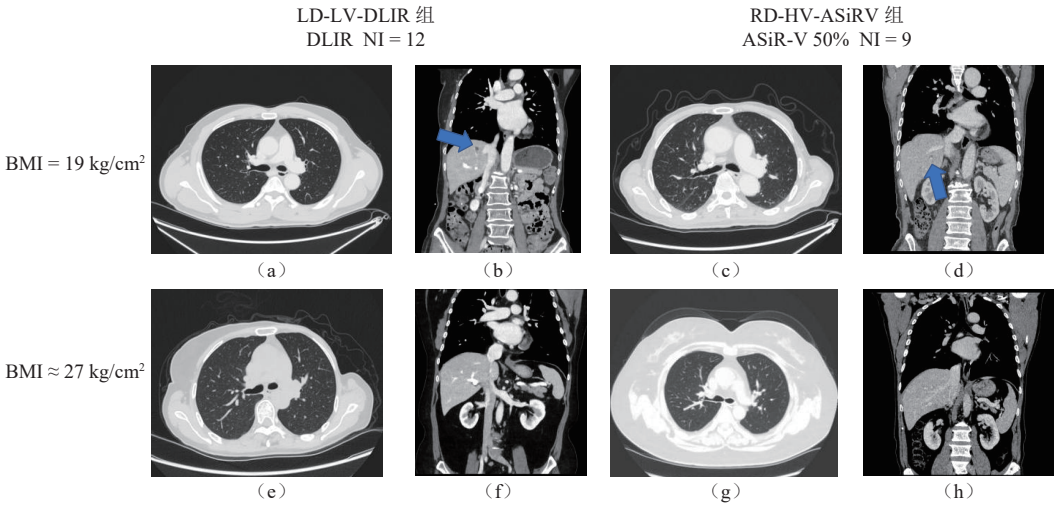

图 3　不同体型的胸部以及胸腹的两组分别扫描的对比
Fig.3　Comparison of two groups of separate scans of the chest and chest–abdominal area for different body types

测量出来辐射剂量，对于大体型和小体型的需要通过 SSDE 可以校正不同体型带来的辐射剂量测量使用 $CTDI_{vol}$ 参数的不准确性[13]。根据表 2 的数据，使用 SSDE 进行辐射剂量评价发现，虽然大体型的 $CTDI_{vol}$ 值较大，但经过校正后实际有效剂量是减少的；相反，小体型的校正有效剂量实际也没有 $CTDI_{vol}$ 降低的程度大[13]。但平均值变化不大，SSDE 稍高于 $CTDI_{vol}$ 整体的最大辐射剂量与最小辐射剂量的差值变小了，更有利于评价辐射剂量水平的变化。

3.2　深度学习算法结合低管电压是提高图像质量的保证

尽管辐射剂量降低了近一半，但通过低管电压提高增强的对比度，以及深度学习算法减少噪声提高信噪比，用来补偿剂量降低带来的噪声增加。就客观评价而言，低剂量优化组在腹部的图像质量显著优于常规剂量常规组，具体表现为在动脉期或静脉期，低剂量优化组都具有更低的图像噪声，更高的肝脏 CNR、SNR 以及更高的主动脉 CNR、SNR。其肝脏、主动脉的 CT 值也比常规剂量常规组更高，这与 Cao 的研究一致[10]，深度学习算法可以提高肝脏小病变检出的图像质量（图 3（b）和图 3（d）），同时可见箭头所示，在相同的体型下，低剂量优化组的肝内小病灶的可分辨性比常规剂量组更好一些。相比之下，两组图像在胸部客观指标上的区别不如

腹部那么大，但低剂量优化组在脂肪、主动脉的 CT 值方面仍具有一定优势[8]。

既往研究发现，低管电压技术能够有效提高血管对比度[19-20]。在本研究中，即使降低了辐射剂量，低剂量优化组在主动脉对比度、门静脉对比度上与常规剂量常规组并无统计学差异，肝总动脉对比度显著高于常规剂量常规组。在客观指标上，低剂量优化组动、静脉期肝脏、主动脉的衰减值均显著高于常规剂量常规组。总之低管电压联合低剂量扫描不仅不会降低血管对比度，在一定程度上仍然能够提高腹部血管对比度[21]。

除了对增强血管对比度的提高，低剂量优化组在腹部大小血管的空间分辨力、肝脏及主动脉的 CNR 和 SNR 上均显著高于常规剂量常规组，图像整体噪声显著低于常规剂量常规组，说明低剂量优化组的整体图像质量高于常规剂量常规组，更有利于细小病灶的发现、疾病的诊断筛查。这就为未来腹部大范围扫描标准化的发展提供了一个方向。这同时也为管电压调制提供了参考，对于管电流和重建算法能够补偿腹部图像质量的 CT，自动管电压可以选择较低管电压作为参考管电压。

3.3 胸腹部联合 CT 扫描图像质量的评价标准

临床上对单独胸部 CT 和腹部 CT 扫描而言，胸部的扫描参数与腹部存在差异。在临床上，胸部 CT 由于肺组织存在天然对比，其要求的标准 NI 在 12～14，因此辐射剂量也相对较低。而腹部的标准 NI 在 9～11，要求图像有较高的低对比度分辨力，整体图像质量也较高。从本研究的研究结果中也不难看出，低剂量与常规剂量常规组间的图像质量在胸部指标上并没有太大区别（表 7 所示），但在腹部指标上存在显著差异，这与胸部扫描图像本身的天然对比度较高，削弱了深度学习图像重建算法对图像质量的提升的效果有关[22]。在主观评价方面，低剂量优化组在腹部的图像质量仍优于常规剂量常规组，尤其在动脉期整体图像噪声、主动脉空间分辨力、门静脉空间分辨力、肝总动脉空间分辨力和对比度方面显著优于常规剂量常规组。但胸部图像主观指标上的区别则更为不明显，仅在小血管/支气管显示情况方面存在一定差异。因此，在评价胸腹部联合扫描图像的质量方面，用腹部指标去评价胸腹部整体质量是一个更优的选择。

3.4 本研究的局限性

本研究的局限性在于：① 样本量较小；② 由于伦理要求，两个剂量组的图像来自两组不同的患者，难以做到同一个患者不同剂量图像的对比；③ 用于评价图像质量的主、客观指标较少，不够全面。④ DLIR 与 ASIRV 重建方式均只使用了一种权重比例，未进行多种权重之间的比较。

4 结论

综上所述，即使在降低辐射剂量后，低管电压联合深度学习图像重建算法仍然能够保证同等甚至更高的图像质量，满足常规临床诊疗需求，为大范围 CT 扫描辐射剂量的优化方案提供一个可能的方向。

参考文献

[1] FURTADO C D, AGUIRRE D A, SIRLIN C B, et al. Whole-body CT screening: Spectrum of findings and recommendations in 1192 patients[J]. Radiology, 2005, 237(2): 385-394. DOI:10.1148/radiol.2372041741.

[2] BRANT-ZAWADZKI M. CT screening: why I do it[J]. AJR. American Journal of Roentgenology, 2002, 179(2): 319-326. DOI:10.2214/ajr.179.2.1790319.

[3] SCHAUER D A, LINTON O W. National council on radiation protection and measurements report shows substantial medical exposure increase[J]. Radiology, 2009, 253(2): 293-296. DOI:10.1148/radiol.2532090494.

[4] REHANI M M, HEIL J, BALIYAN V. Multicentric study of patients receiving 50 or 100mSv in a single day through CT imaging-frequency determination and imaging protocols involved[J]. European Radiology, 2021, 31(9): 6612-6620. DOI:10.1007/s00330-021-07734-y.

[5] JENSEN C T, GUPTA S, SALEH M M, et al. Reduced-dose deep learning reconstruction for abdominal CT of liver metastases[J]. Radiology, 2022, 303(1): 90-98. DOI:10.1148/radiol.211838.

[6] NAM J G, HONG J H, KIM D S, et al. Deep learning reconstruction for contrast-enhanced CT of the upper abdomen: similar image quality with lower radiation dose in direct comparison with iterative reconstruction[J]. European Radiology, 2021, 31(8): 5533-5543. DOI:10.1007/s00330-021-07712-4.

[7] LEE S, CHOI Y H, CHO Y J, et al. Noise reduction approach in pediatric abdominal CT combining deep learning and dual-energy technique[J]. European Radiology, 2021, 31(4): 2218-2226. DOI:10.1007/s00330-020-07349-9.

[8] KAWASHIMA H, ICHIKAWA K, TAKATA T, et al. Performance of clinically available deep learning image reconstruction in computed tomography: A phantom study[J]. Journal of Medical Imaging (Bellingham, Wash.), 2020, 7(6): 63503.

[9] LI L, WANG H, SONG J, et al. A feasibility study of realizing low-dose abdominal CT using deep learning image reconstruction algorithm[J]. Journal of X-ray Science and Technology, 2021, 29(2): 361-372.

[10] CAO L, LIU X, LI J, et al. A study of using a deep learning image reconstruction to improve the image quality of extremely low-dose contrast-enhanced abdominal CT for patients with hepatic lesions[J]. British Journal of Radiology, 2021, 94(1118): 20201086. DOI:10.1259/bjr.20201086.

[11] 唐坤, 曹国全, 李瑞, 等. 低管电压腹部 CT 扫描对图像质量及辐射剂量影响的体模实验[J]. 中国医学影像技术, 2012, 28(4): 800-804.
TANG K, CAO G Q, LI R, et al. Phantom experiment on the influence of low tube voltage abdominal CT scan on image quality and radiation dose[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2012, 28(4): 800-804. (in Chinese).

[12] AAPM Report No. 204-size-specific dose estimates (SSDE) in pediatric and adult body CT examinations[R]. 2011.

[13] LI B, BEHRMAN R H. Comment on the "report of AAPM TG 204: Size-specific dose estimates (SSDE) in pediatric and adult body CT examinations" [report of AAPM TG 204, 2011][J]. Medical Physics, 2012, 39(7): 4613-4614.

[14] 佘成龙, 苏彤, 沈云, 等. 多模态迭代重建算法对腹部能谱增强 CT 扫描图像质量及辐射剂量影响[J]. 宁夏医学杂志, 2023, 45(1): 42-44.
SHE C L, SU T, SHEN Y, et al. Influence of multimodal iterative reconstruction algorithm on image quality and radiation dose of abdominal spectral enhanced CT scan[J]. Ningxia Medical Journal, 2023, 45(1): 42-44. (in Chinese).

[15] DELABIE A, BOUZERAR R, PICHOIS R, et al. Diagnostic performance and image quality of deep learning image reconstruction (DLIR) on unenhanced low-dose abdominal CT for urolithiasis[J]. Acta radiologica (1987), 2022, 63(9): 1283-1292. DOI:10.1177/02841851211035896.

[16] 王倩, 綦维维, 冯世超, 等. 个体化因素与成人腹部 CT 客观图像质量的相关性分析[J]. 医学影像学杂志, 2013, 23(3): 437-441.
WANG Q, QI W W, FENG S C, et al. Correlation analysis of individual factors and objective image quality of adult abdominal CT[J]. Journal of Medical Imaging, 2013, 23(3): 437-441. (in Chinese).

[17] 綦维维, 安备, 刘卓, 等. 64 层螺旋 CT 的自动管电流调制技术 (ATCM) 的控制参数和辐射剂量的胸部模体实验研究[J]. 医学影像学杂志, 2014, 24(12): 2169-2174.
QI W W, AN B, LIU Z, et al. Experimental study on the control parameters of the automatic tube current modulation technique (ATCM) of 64-slice spiral CT and the radiation dose using a chest phantom[J]. Journal of Medical Imaging, 2014, 24(12): 2169-2174. (in Chinese).

[18] PAPADAKIS A E, DAMILAKIS J. Automatic tube current modulation and tube voltage selection in pediatric computed tomography: A phantom study on radiation dose and image quality[J]. Invest Radiol, 2019, 54(5): 265-272. DOI:10.1097/RLI.0000000000000537.

[19] MIYOSHI K, ONODA H, TANABE M, et al. Image quality in dual-source multiphasic dynamic computed tomography of the abdomen: Eevaluating the effects of a low tube voltage (70kVp) in combination with contrast dose reduction[J]. Abdominal Radiology (NY), 2020, 45(11): 3755-3762. DOI:10.1007/s00261-020-02565-9.

[20] SUN J, LI H, GAO J, et al. Performance evaluation of a deep learning image reconstruction (DLIR) algorithm in “double low” chest CTA in children: A feasibility study[J]. Radiologia Medica, 2021, 126(9): 1181-1188. DOI:10.1007/s11547-021-01384-2.

[21] 刘建强, 刘晶哲, 綦维维. 100kV 管电压联合全模型迭代重组算法在腹盆联合 CT 增强扫描成像中的价值[J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(8): 1575-1580.
LIU J Q, LIU J Z, QI W W. Value of 100kV tube voltage combined with full model iterative reconstruction algorithm in enhanced CT imaging of the abdomen and pelvis[J]. Journal of Clinical Radiology, 2022, 41(8): 1575-1580. (in Chinese).

[22] 颜利辉, 陈飞, 姚立正, 等. 前置自适应统计迭代重建技术对胸部 CT 辐射剂量和图像质量的影响: 体模与临床研究[J]. 中国医学影像技术, 2017, 33(3): 468-472.
YAN L H CHEN F YAO L Z, et al. Influence of pre-adaptive statistical iterative reconstruction technique on radiation dose and image quality of chest CT: Phantom and clinical study[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2017, 33(3): 468-472. (in Chinese).