

基于PSNR和SSIM方法评估双能量CT肝脏虚拟平扫图像质量研究

李亚光, 李洁, 薛廷玉, 母建奎, 王强, 郑立冬, 王勇, 雷立存

Assessment of the Image Quality of Virtual Non-Contrast Dual-energy CT Liver Scans Using Both PSNR and SSIM Methods

LI Yaguang, LI Jie, XUE Tingyu, MU Jiankui, WANG Qiang, ZHENG Lidong, WANG Yong, and LEI Licun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.151>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双源CT双能量虚拟平扫对直肠癌壁外血管侵犯的诊断价值

Diagnostic Value of Dual-source CT Dual-energy Virtual Non-contrast Extramural Vascular Invasions of Rectal Cancer

CT理论与应用研究. 2024, 33(1): 42-48

亚实性肺腺癌能谱CT虚拟平扫效果的研究

Study of Energy Spectrum CT Virtual Non-contrast in Subsolid Lung Adenocarcinoma

CT理论与应用研究. 2019, 28(1): 81-90

双能量CT虚拟单能量成像在鉴别脊柱急性慢性压缩骨折中的应用价值

The Application Value of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging in the Differential Diagnosis of acute and Chronic Spinal Compression Fractures

CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 209-216

虚拟单能图像与常规CT图像的图像质量对比

Comparison of Image Quality between Virtual Monochromatic Images and Conventional CT Images

CT理论与应用研究. 2022, 31(2): 219-226

不同噪声指数对PCP患者胸部CT图像质量的影响分析

The Influence of Different Noise Indexes on Chest CT Image Quality for Patients with PCP

CT理论与应用研究. 2019, 28(2): 221-228

辐射剂量和管电压对CT图像质量的影响：基于任务的图像质量评价

The Effect of Radiation Dose and Tube Potential on Image Quality of CT: A Task-based Image Quality Assessment

CT理论与应用研究. 2022, 31(2): 211-217



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李亚光, 李洁, 薛廷玉, 等. 基于 PSNR 和 SSIM 方法评估双能量 CT 肝脏虚拟平扫图像质量研究[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 51-57. DOI:10.15953/j.ctta.2024.151.
LI Y G, LI J, XUE T Y, et al. Assessment of the Image Quality of Virtual Non-Contrast Dual-energy CT Liver Scans Using Both PSNR and SSIM Methods[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 51-57. DOI:10.15953/j.ctta.2024.151. (in Chinese).

基于 PSNR 和 SSIM 方法评估双能量 CT 肝脏虚拟平扫图像质量研究

李亚光^{1a}, 李洁², 薛廷玉^{1a}, 母建奎^{1b}, 王强^{1b}, 郑立冬^{1a}, 王勇^{1a}, 雷立存^{1a,2}

1.河北医科大学第一医院 a) 放射与核医学科; b) 胸外科, 石家庄 050000
2.河北医科大学医学影像学院, 石家庄 050000

摘要: 目的: 采用峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性指数 (SSIM) 联合图像评价方法, 探讨双能量 CT 的肝脏虚拟平扫 (VNC) 图像替代真实平扫 (TNC) 图像的可行性。方法: 前瞻性分析 33 例肝脏 CT 平扫及三期双能量增强扫描的影像学资料。经后处理获得动脉期 VNC 图像 (VNCa)、静脉期 VNC 图像 (VNCv) 及延迟期 VNC 图像 (VNCd)。将肝脏三期 VNC 图像与 TNC 图像应用 PSNR 和 SSIM 方法进行整体及局部比对分析。测量肝脏及竖脊肌的 CT 值与噪声值 (SD), 计算信噪比 (SNR) 和对比噪声比 (CNR), 记录肝脏真实 CT 平扫及增强扫描的剂量长度乘积, 比较三期 VNC 与 TNC 图像质量的客观评价指标及辐射剂量, 并绘制肝脏 CT 值、SNR 和 CNR 的 Bland-Altman 散点图进行一致性分析。结果: 整体图像评价三期 VNC 与 TNC 图像比对的 PSNR 分别为 (18.01 ± 1.06)、(18.33 ± 0.99)、(18.20 ± 1.04), SSIM 分别为 (0.76 ± 0.04)、(0.77 ± 0.03)、(0.78 ± 0.04); 局部图像评价三期 VNC 与 TNC 图像比对的 PSNR 为 (29.90 ± 2.50)、(30.97 ± 2.34)、(30.61 ± 2.76), SSIM 为 (0.75 ± 0.04)、(0.77 ± 0.03)、(0.77 ± 0.04); 三期 VNC 与 TNC 图像整体及局部比对的 PSNR、SSIM 的差异没有统计学意义。三期 VNC 的肝脏 CT 值高于 TNC; 三期 VNC 的 CNR 及 VNCv 的 SNR 与 TNC 图像相比无统计学差异; 肝脏 CT 值、SNR 及 CNR 在三期 VNC 与 TNC 图像之间均具有良好的一致性。去除真实平扫环节, 采用 VNC + 三期增强方案可降低约 29.63% 的辐射剂量。结论: 双能量 CT 的肝脏 VNC 图像具有良好的图像质量, 可以较真实地还原 TNC 图像, 满足临床的诊断需求。

关键词: 双能量 CT; 虚拟平扫; 结构相似性指数; 峰值信噪比

DOI:10.15953/j.ctta.2024.151 中图分类号: R 814; TP 391.41 文献标识码: A

Assessment of the Image Quality of Virtual Non-Contrast Dual-energy CT Liver Scans Using Both PSNR and SSIM Methods

LI Yaguang^{1a}, LI Jie², XUE Tingyu^{1a}, MU Jiankui^{1b},
WANG Qiang^{1b}, ZHENG Lidong^{1a}, WANG Yong^{1a}, LEI Licun^{1a,2}

1. a).Department of Radiology and Nuclear Medicine; b).Department of Thoracic Surgery, The First Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China
2. College of Medical Imaging, Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China

Abstract: The purpose of this study was to investigate the feasibility of replacing true non-contrast (TNC) dual-energy computed tomography (DECT) images with virtual non-contrast (VNC) DECT images by comparing their quality on the basis of both the peak signal-to-noise ratio (PSNR) and structural similarity index (SSIM). Methods: A prospective analysis was conducted on TNC and enhanced three-phase DECT images of the livers of 33 patients. Post-processing was used to obtain the arterial-phase (VNCa), venous-phase VNC (VNCv), and delayed-phase VNC (VNCd) images. Both the PSNR and SSIM methods were used to compare the overall and local TNC and three-phase VNC images. The CT numbers and noise values (standard deviation) of the liver and erector spinae muscle were measured, and the SNR and contrast-to-noise ratio (CNR) were calculated. The dose length product values of the TNC

收稿日期: 2024-07-26。

基金项目: 河北省医学科学研究课题计划 (基于深度学习的多模态影像技术对腹部实质脏器脂肪定量评估的应用研究 (20231013))。

第一作者: 李亚光, 男, 医学硕士, 主治医师, 主要研究方向为腹部及中枢系统影像, E-mail: darren_116@163.com。

通信作者: 雷立存[✉], 男, 医学硕士, 主任技师、副教授, 主要研究方向为腹部系统影像, E-mail: 57900264@hebm.edu.cn。

and enhanced three-phase VNC scans were recorded, and the objective evaluation indicators and radiation doses of the three-phase VNC and TNC images were compared. Bland-Altman scatter plots were drawn to analyze the consistency of the liver CT numbers, SNRs, and CNRs. Results: The overall comparison of the three-phase VNC and TNC images showed PSNR values of (18.01 ± 1.06) , (18.33 ± 0.99) , and (18.20 ± 1.04) and SSIM values of (0.76 ± 0.04) , (0.77 ± 0.03) , and (0.78 ± 0.04) , with the differences being not statistically significant. The local comparison of these images showed PSNR values of (29.90 ± 2.50) , (30.97 ± 2.34) , and (30.61 ± 2.76) and SSIM values of (0.75 ± 0.04) , (0.77 ± 0.03) , and (0.77 ± 0.04) , and the differences were also not statistically significant. The CT number of the liver in the three-phase VNC image was higher than that in the TNC image. The CNR of the three-phase VNC image and the SNR of the VNCv image were not statistically different from those of the TNC image, and the liver CT numbers, SNRs, and CNRs in the three-phase VNC and TNC images were highly consistent. Using the VNC + three-phase enhancement scheme can reduce the radiation dose by approximately 29.63% by removing the TNC part. Conclusion: The VNC DECT image of the liver is of good quality and can accurately reproduce the TNC image, meeting clinical diagnostic needs.

Keywords: dual energy computed tomography; virtual non-contrast scan; structural similarity index; peak signal to noise ratio

双能量计算机断层扫描 (dual energy computed tomography scan, DECT) 已成为传统 CT 的一种有前景的替代方案, 在材料成分分析、碘浓度测量以及改善增强的图像对比度等方面实现了广泛的临床应用^[1-4]。DECT 可以通过从增强扫描图像中减去碘信号来生成虚拟平扫 (virtual non-contrast scan, VNC) 图像^[5-7], 代替传统的真实平扫 (true non-contrast scan, TNC) 图像, 从而减少患者平扫 + 增强扫描中的辐射剂量。目前采用的第 3 代双源 DECT 扫描仪的能谱分离度提高了 30%, 特别是将管电压从 140kV 切换到 150kV, 同时采用了更厚的滤波器, 可以从较高能量 X 射线管的光谱中滤除低能量光子, 进一步降低了辐射剂量^[8-9]。

对 TNC 和 VNC 的图像质量的主观评价多采用李斯特五分法^[10], 但是主观评价容易受人为等因素的影响。峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 是一种常用的衡量信号失真的指标; 结构相似性指数 (structural similarity index, SSIM) 是一种基于结构信息衡量原始信号与处理后信号之间相似程度的方法, 并且与主观质量评价关联性较强^[11]。两参数联合法评估被广泛应用于图像相似度评价中^[12-13]。

本研究拟采用 PSNR 和 SSIM 联合评价方法, 对肝脏 VNC 图像和 TNC 图像进行比对分析, 并测量图像的 CT 值、SNR 及 CNR 比较二者图像的客观参数差异, 探讨肝脏 VNC 图像代替 TNC 图像的可行性。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究为前瞻性研究, 遵守《赫尔辛基宣言》, 并经河北医科大学第一医院伦理委员会批准 (批准文号: 20220658), 所有受试者均知情并签署知情同意书。

前瞻性收集 45 例河北医科大学第一医院 2024 年 1 月至 2024 年 6 月期间进行肝脏平扫及双能量增强 CT 扫描的患者的影像学资料。排除标准: ① 肝切除史; ② 既往有肝脏治疗史导致肝脏部分严重萎缩; ③ 存在多个或较大的肝脏病变。

应用排除标准后, 12 名患者被排除 (6 名患者接受了肝切除术; 3 名患者有多个或较大的肝脏病变; 3 名患者既往接受过肝脏射频消融治疗导致肝脏严重萎缩)。33 名患者 (16 名女性, 17 名男性) 年龄范围为 37 ~ 81 岁, 被纳入最终的图像分析。

1.2 图像采集

所有患者的检查均包含肝脏平扫及 III 期双能量增强扫描 (其中上腹部 10 例、腹盆部 7 例、胸腹盆 16 例)。肝脏 CT 平扫采用单能量常规 CT 技术, 管电压 120kVp, 使用自动管电流技术, 参考管电流为 300mAs。增强扫描时采用 Missouri XD2001 高压注射器 (欧利奇公司) 经肘前静脉注射非离子型对比剂 (碘克沙醇, 浓度 320mgI/mL), 剂量为 1.2mL/kg, 注射速率 2.5 ~ 3.0mL/s, 并以相同速率注射 0.9% 氯化钠溶液 30mL。

采用对比剂团注示踪技术, 监测腹主动脉腔内 CT 值, 当阈值达到 100HU 后 14s 自动触发动脉期扫描, 随后分别延迟 25s 和 110s 采集静脉期和延迟期图像。

双能 CT 采集参数: 球管 A 管电压 100kVp、球管 B 管电压 150kVp, 并开启自动管电流调制, 参考管电流分别为 180mAs 和 90mAs, 旋转时间为 0.5s, 螺距 0.6, 准直 $128 \times 0.6\text{mm}$ 。

1.3 图像处理

将肝脏 CT 真实平扫图像 (TNC) 和 III 期 DECT 图像上传至 Syngo.via 后处理工作站 (西门子, VB40B), TNC 采用卷积核 Br40、ADMIRE (强度 3) 重建

图像, III期 DECT 采用卷积核 Qr40、ADMIRE (强度 3) 重建图像, 重建层厚和层间距均为 1.0mm。通过从对比增强图像中虚拟减去与碘相关的衰减来重建肝脏动脉期虚拟平扫 (VNCa)、肝脏静脉期虚拟平扫 (VNCv)、肝脏延迟期虚拟平扫 (VNCd) 的图像。

PSNR 和 SSIM 图像质量评价: 选取 III 期 VNC 中相同层面的单幅图像与 TNC 进行比对, 分别应用 PSNR 和 SSIM 方法进行比对分析, 图像比对采用图像整体分析和图像局部分析两种方式进行; 图像整体分析依据肝静脉走行选取肝脏形态相近的层面, 局部图像分析选取肝右叶内大小、位置相同的矩形感兴趣区域 (region of interest, ROI) (图 1)。

图像质量评价参考标准: PSNR 值越大代表图像失真越小、图像的质量越好, 普遍基准为 30dB; SSIM 值的范围为 0 至 1, 越大代表图像越相似^[14]。

肝脏 TNC 图像和 III 期增强 VNC 的图像定量评估由一名具有 5 年腹部影像经验的放射科医生在 Syngo.via 工作站上进行。每个组织的圆形 ROI 在 TNC 图像中定义, 然后复制到其他序列。由于患者的呼吸时相的影响, TNC 和 VNC 图像可能存在配准误差, ROI 的位置根据解剖标志进行调整, 利用 Syngo.via 工作站复制粘贴 ROI 的功能, 使 ROI 大小、位置在 VNC 与 TNC 尽量上保持一致。ROI 大小约 150~200mm²。

测量肝脏实质 CT 值、竖脊肌 CT 值, 并测量前腹壁皮下脂肪 CT 值的标准差值 (standard deviation, SD) 作为图像噪声。计算肝脏的信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 和肝脏——竖脊肌对比噪声比 (contrast to noise ratio, CNR): 肝脏 SNR = 肝脏 CT 值/SD 脂肪; 肝脏——竖脊肌 CNR = (肝

脏 CT 值-竖脊肌 CT 值)/SD 脂肪。记录真实平扫及 III 期增强 CT 扫描时生成的剂量报告中的剂量长度乘积 (dose length product, DLP)。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 26.0 以及 Origin 2023 软件进行数据统计学分析及可视化处理。服从正态分布的计量资料以 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 不服从正态分布的计量资料用中位数 (四分位数) 表示。计数资料 (如性别) 用例表示。采用 Kruskal-Wallis 检验比较 III 期 VNC 与 TNC 图像比对的 PSNR、SSIM 的差异。采用配对 *t* 检验分别比较 III 期 VNC 图像与 TNC 图像的 CT 值、SNR 及 CNR 的差异; 绘制 Bland-Altman 散点图分析 VNC 图像与 TNC 图像的 CT 值、SNR 及 CNR 的一致性, 一致性界限 (limits of agreement, LOA) 表示为差值均值 $\text{Mean} \pm 1.96\text{SD}$, 界外占比 $\leq 5\%$ 说明两种测量方法一致性较好。

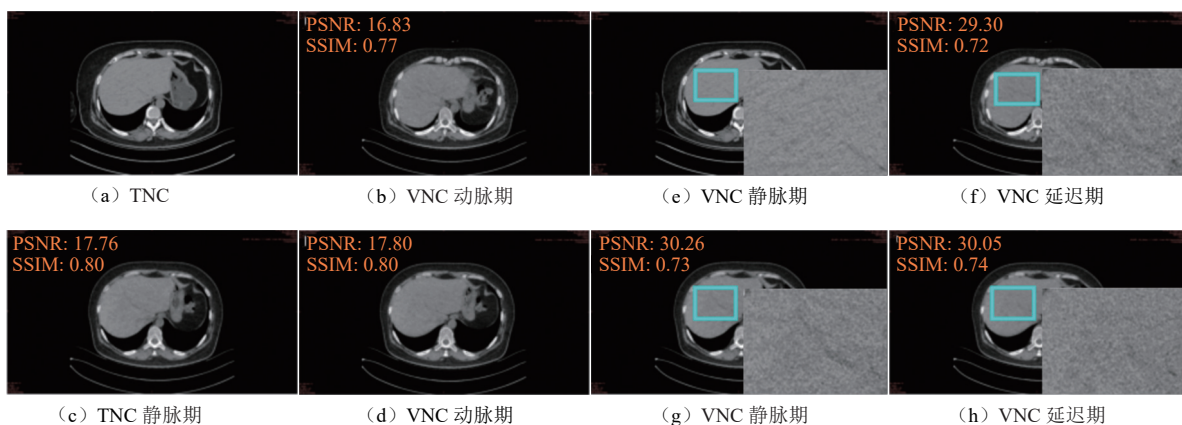
$P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 采用 PSNR 和 SSIM 方法对 III 期 VNC 图像质量评价分析

采用整体图像评价, VNCa 与 TNC 图像比对的 PSNR 为 (18.01 ± 1.06)、SSIM 为 (0.76 ± 0.04), VNCv 与 TNC 图像比对的 PSNR 为 (18.33 ± 0.99)、SSIM 为 (0.77 ± 0.03), VNCd 与 TNC 图像比对的 PSNR 为 (18.20 ± 1.04)、SSIM 为 (0.78 ± 0.04)。III 期 VNC 与 TNC 图像整体比对的 PSNR、SSIM 的差异没有统计学意义 (表 1)。

采用局部图像评价, VNCa 与 TNC 图像比对的 PSNR 为 (29.90 ± 2.50)、SSIM 为 (0.75 ± 0.04),



注: PSNR 值大于 30 dB 代表图像质量良好; SSIM 值的范围为 0 至 1, 越大代表图像越相似。

图 1 采用 PSNR 和 SSIM 方法评价 TNC 和 VNC 图像质量示意图

Fig.1 Schematic representation of the evaluation of TNC and VNC image quality using PSNR and SSIM methods

表 1 III期 VNC 与 TNC 图像 PSNR 与 SSIM 的比较 ($\bar{x} \pm s$)
Table 1 Comparison of PSNR and SSIM values between three-phase VNC and TNC images ($\bar{x} \pm s$)

| 项目 | 整体评价 | | 局部评价 | |
|------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | PSNR/dB | SSIM | PSNR/dB | SSIM |
| VNCa | 18.01 ± 1.06 | 0.76 ± 0.04 | 29.90 ± 2.50 | 0.75 ± 0.04 |
| VNCv | 18.33 ± 0.99 | 0.77 ± 0.03 | 30.97 ± 2.34 | 0.77 ± 0.03 |
| VNCd | 18.20 ± 1.04 | 0.78 ± 0.04 | 30.61 ± 2.76 | 0.77 ± 0.04 |
| H | 1.464 | 3.837 | 3.204 | 4.868 |
| P | 0.481 | 0.147 | 0.201 | 0.088 |

VNCv 与 TNC 图像比对的 PSNR 为 (30.97 ± 2.34)、SSIM 为 (0.77 ± 0.03), VNCd 与 TNC 图像比对的 PSNR 为 (30.61 ± 2.76)、SSIM 为 (0.77 ± 0.04)。III期 VNC 与 TNC 图像局部比对的 PSNR、SSIM 的差异没有统计学意义 (表 1)。

2.2 III期 VNC 与 TNC 图像 CT 值、SNR 及 CNR 的比较

III期 VNC 图像的 CT 值均显著高于 TNC 图像的 CT 值; VNCa、VNCd 图像的 SNR 小于 TNC 图像的 SNR, 差异具有统计学意义; 而 VNCv 图像 SNR 与 TNC 图像的 SNR 差异无统计学意义; III期 VNC 图像 CNR 和 TNC 图像的 CNR 差异无统计学意义 (表 2)。

Bland-Altman 散点图 (图 2) 显示, III期 VNC 图像和 TNC 图像的 CT 值、SNR、CNR 均具有良好一致性, 无明显偏差。

2.3 VNC+III期增强与 TNC+III期增强辐射剂量比较

本研究中常规真实平扫及III期增强扫描的总 DLP 为 (1209.65 ± 654.08) mGy·cm, 其中真实平扫的 DLP 为 (359.56 ± 207.92) mGy·cm。若检查中去除常规真实平扫环节, 辐射剂量降低幅度约为 29.63% (图 3)。

3 讨论

肝脏疾病是全球范围内的重大健康问题, CT 扫描因其良好的空间分辨率和组织对比度被广泛应

用于肝脏疾病的诊断中。其中, 肝脏 CT 增强多期检查是肝脏疾病早期诊断、预后评估及随访的重要影像学检查方案, 而平扫是增强期相必需的参考期相。肝脏虚拟平扫技术作为一种新兴的成像方法, 能够提供与传统平扫相替代的诊断图像, 同时避免了额外的辐射暴露。

本研究探讨了肝脏双能量 CT 中 VNC 替代 TNC 的可行性, 联合 PSNR 和 SSIM 的图像质量评价方法显示 VNC 图像与 TNC 图像具有较好的相似度, VNCa、VNCv 及 VNCd 图像的 PSNR 和 SSIM 无统计学差异; III期 VNC 与 TNC 图像的 CT 值、SNR 及 CNR 具有良好的一致性。运用 VNC 技术可以降低肝脏多期增强扫描方案的辐射剂量, 辐射剂量降低约 29.63%。

PSNR 和 SSIM 是衡量图像质量的客观评价指标, 比传统采用主观质量评价更具有可信度。Fan 等^[15]开发了一种基于生成对抗性网络的方法, 在不使用钆造影剂的情况下从无对比剂的图像合成动态增强 MRI 图像, 并使用 PSNR 和 SSIM 来评估合成图像的质量取得了良好的效果。Eidex 等^[16]利用视觉 CNN 转换器 (VCT) 从多模态 3T MRI 合成高分辨率 7T ADC 图的模型, 使用 PSNR 和 SSIM 参数评估合成图像。

本研究结果显示, III期 VNC 图像与 TNC 图像整体比对的 PSNR((18.01 ± 1.06)、(18.33 ± 0.99)、(18.20 ± 1.04))偏低, 局部比对的 PSNR((29.90 ± 2.50)、(30.97 ± 2.34)、(30.61 ± 2.76))在可接受范围内。本研究根据肝静脉走行人工匹配图像比对的层

表 2 III期 VNC 与 TNC 图像 CT 值、SNR 及 CNR 的比较 ($\bar{x} \pm s$)
Table 2 Comparison of CT numbers, SNRs, and CNRs between three-phase VNC and TNC images ($\bar{x} \pm s$)

| 项目 | TNC | VNCa | VNCv | VNCd | ^a t | ^b t | ^c t | ^a P | ^b P | ^c P |
|---------|--------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| CT 值/HU | 59.79 ± 7.56 | 61.96 ± 7.85 ^a | 63.24 ± 8.89 ^b | 61.38 ± 9.06 ^c | -4.119 | -4.852 | -2.315 | < 0.010 | < 0.010 | 0.027 |
| SNR | 5.31 ± 1.07 | 4.95 ± 0.80 ^a | 5.14 ± 0.94 ^b | 4.92 ± 1.04 ^c | 3.163 | 1.464 | 3.247 | 0.003 | 0.153 | 0.003 |
| CNR | 0.74 ± 0.92 | 0.71 ± 0.83 ^a | 0.82 ± 0.87 ^b | 0.64 ± 0.92 ^c | 0.391 | -1.314 | 1.434 | 0.698 | 0.198 | 0.161 |

注: a 表示 VNCa 与 TNC 比较; b 表示 VNCv 与 TNC 比较; c 表示 VNCd 与 TNC 比较。

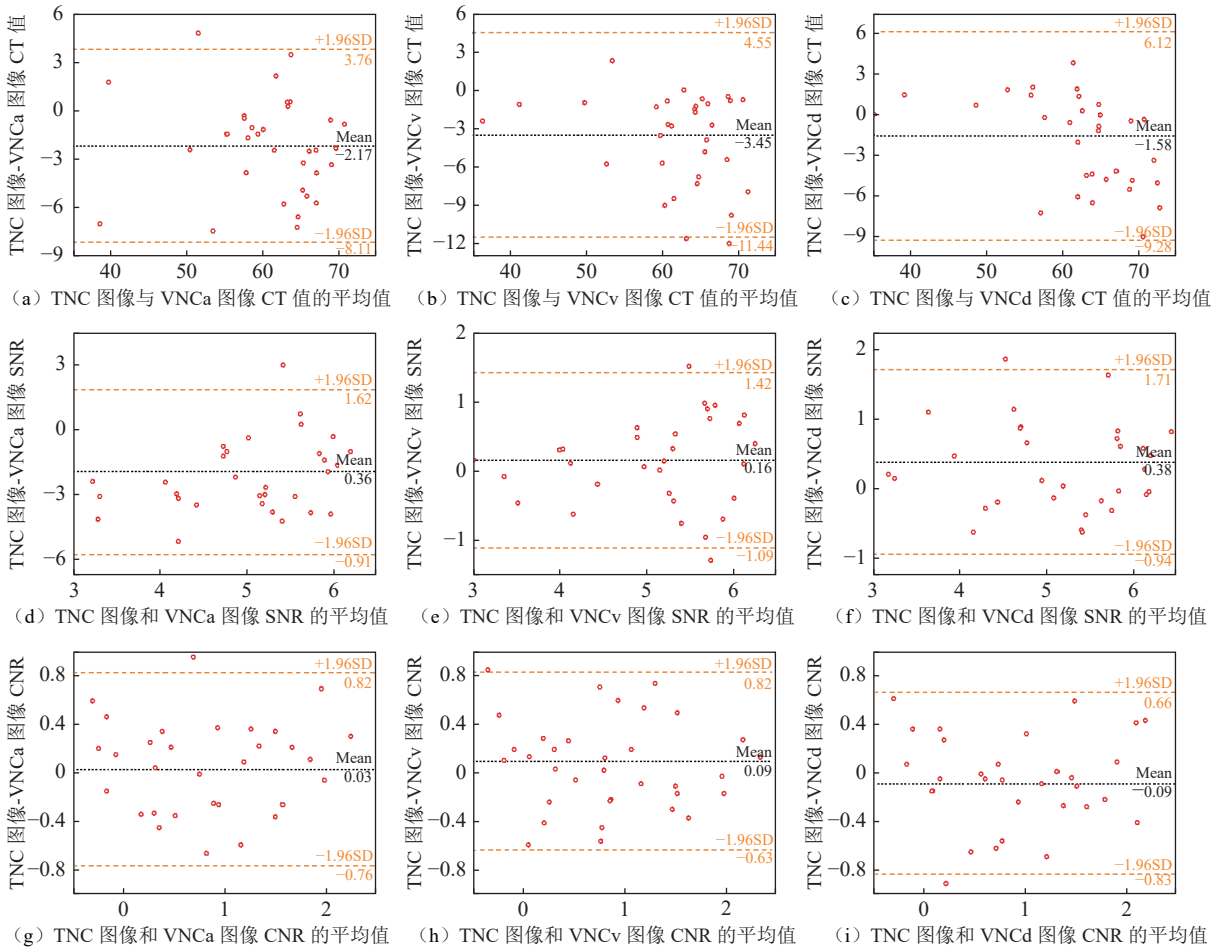


图 2 Bland-Altman 散点图评估 III 期 VNC 与 TNC 图像的 CT 值、SNR 及 CNR 一致性

Fig.2 Bland-Altman scatter plots of the consistency of CT numbers, SNRs, and CNRs between three-phase VNC and TNC images

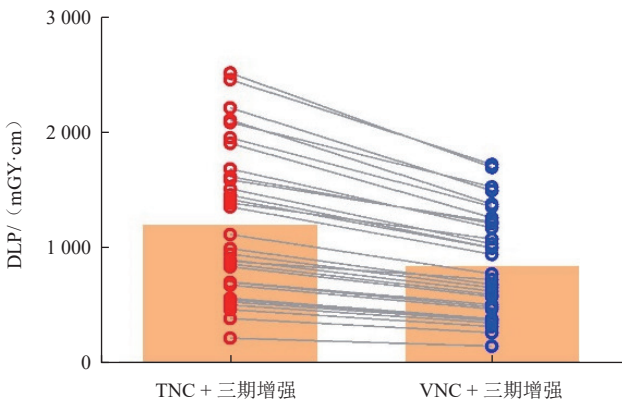


图 3 TNC + III 期增强扫描与 VNC + III 期增强扫描的 DLP 配对连线图

Fig.3 Paired-line plots of DLP values between the TNC + three-phase enhanced scan and VNC + three-phase enhanced scan

面，可能由于呼吸运动及空腔脏器蠕动的影 响，III 期 VNC 图像与 TNC 图像存在不可避免的配准误差，无法保证整体比对的两组图像的层面一致性。PSNR 是基于对应像素点间的误差，即基于误差敏感的图像质量评价^[17]，由于图像整体比 对时配准误

差较大，因此图像的 PSNR 较低。图像局部比 对时截取肝实质内的感兴趣区，减少了呼吸运 动及周围空腔脏器蠕动形变的影响后，降低 了两组图像的配准误差，因此图像局部比对的 PSNR 显著提高，也更能代表肝脏 VNC 图像与 TNC 图像的相似度。而 SSIM 是分别从亮度、对比度、结构三方面度量 图像相似性，其在图像去噪、图像相似度评价 上是优于 PSNR 的。本研究中 III 期 VNC 图像 与 TNC 图像整体比对及局部比对的 SSIM 均在 0.75 以上。因此本研究认为基于 PSNR 和 SSIM 的图像质量评价方法显示 VNC 图像与 TNC 图像具有较好的相似度。

本研究验证了 VNC 技术在肝脏具有较好的抑 碘能力。本研究结果显示 III 期 VNC 图像的肝 脏 CT 值均高于 TNC 图像，差异有统计学意义，但肝脏 CT 值在 III 期 VNC 与 TNC 图像之间均具有良好 的一致性，且差值在临床可接受范围内，这与 Haji-Momenian 等^[18]的研究一致。在既往研究中，关于 肝脏 VNC 图像的抑碘能力存在不同的报道^[9, 19-20]，这可能与扫描设备、扫描方案及不同材料分解算法

有关, 从而导致抑碘程度不同。

SNR 及 CNR 是常用的评价图像质量的客观参数。本研究结果显示, 在重建算法一致的前提下, VNCa 与 VNCd 图像的 SNR 低于 TNC 图像, 且具有统计学差异。原因可能是本研究的双能量 CT 技术为双源模式, 辐射剂量显著低于常规平扫, 在相同迭代重建技术条件下 VNC 的背景噪声更大、图像 SNR 降低, 这与 Zhou 等^[21]的研究结果相仿。而 VNCv 图像的 SNR 与 TNC 图像相比无统计学差异, 可能是由于 VNC 的抑碘技术主要针对图像灰度的显示, 而肝脏静脉期良好的图像对比仍被保留^[22]。VNCv 图像的 CNR 略高于其他两期 VNC, 但 III 期 VNC 图像的 CNR 与 TNC 图像相比无统计学差异, 均表现出良好的一致性, 这与既往研究^[23-24]结果基本一致, 这可能与肝脏和竖脊肌的 CT 值相近, 对比不明显有关^[24]。

综上, 本研究认为 VNC 图像具有良好的图像质量, 其中 VNCv 图像更具优势, 可以满足临床诊断的需求。

本研究的局限性。首先, 本研究肝脏 CT 扫描为单中心研究且样本量较小, 在后续研究中可扩充不同中心的样本量; 其次, 采用 PSNR 和 SSIM 方法对 VNC 图像质量进行评价时, 对两组图像之间的配准误差控制不佳, 可能会低估 VNC 的图像质量。未来的研究着重于提高 PSNR 和 SSIM 图像质量评价方法的鲁棒性, 进一步验证其在临床实践中的广泛应用价值。

总之, 第 3 代双源 DECT 为临床提供了图像质量良好、还原度较高的肝脏 VNC 图像, 利用 VNC 代替传统的 TNC 图像是可行的, 并且可以大幅减少辐射剂量。

参考文献

- [1] 杨志安, 闵小红, 徐俏宇, 等. 能谱 CT 虚拟平扫及水基图定量参数在诊断颅脑血管内治疗术后颅内出血的研究[J]. *临床放射学杂志*, 2024, 43(6): 872-877. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2024.06.004.
- [2] YANG Z A, MIN X H, XU Q Y, et al. The value of quantitative parameters on virtual non-contrast and water-based images of brain spectral CT in early diagnosing intracranial hemorrhage after endovascular treatment[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2024, 43(6): 872-877. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2024.06.004. (in Chinese).
- [3] 尹娇, 魏茜, 彭超, 等. 双层探测器光谱 CT 虚拟平扫联合 40keV 虚拟单能量成像用于降低小肠 CT 造影辐射剂量[J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(12): 1883-1887. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2023.12.032.
- [4] YIN J, WEI Q, PENG C, et al. Virtual non-contrast images combined with 40 keV virtual monoenergetic images for reducing radiation dose of CT enterography based on dual-layer spectral detector CT[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2023, 39(12): 1883-1887. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2023.12.032. (in Chinese).
- [5] CHEN M, DING L, DENG S, et al. Differentiating the invasiveness of lung adenocarcinoma manifesting as ground glass nodules: Combination of dual-energy CT parameters and quantitative-semantic features[J]. *Academic Radiology*, 2024, 31(7): 2962-2972. DOI:10.1016/j.acra.2024.02.011.
- [6] CATANIA R, JIA L, HAGHSOMAR M, et al. Detection of moderate hepatic steatosis on contrast-enhanced dual-source dual-energy CT: Role and accuracy of virtual non-contrast CT[J]. *European Journal of Radiology*, 2024, 172: 111328. DOI:10.1016/j.ejrad.2024.111328.
- [7] RAJIAH P, PARAKH A, KAY F, et al. Update on multi-energy CT: Physics, principles, and applications[J]. *Radiographics*, 2020, 40(5): 1284-1308. DOI:10.1148/rg.2020200038.
- [8] BORHANI A A, KULZER M, IRANPOUR N, et al. Comparison of true unenhanced and virtual unenhanced (VUE) attenuation values in abdominopelvic single-source rapid kilovoltage-switching spectral CT[J]. *Abdominal Radiology (NY)*, 2017, 42(3): 710-717. DOI:10.1007/s00261-016-0991-5.
- [9] 孙嘉晨, 景梦园, 刘宏, 等. 能谱 CT 虚拟平扫技术在化疗相关性脂肪肝中的应用[J]. *中国医学影像学杂志*, 2023, 31(5): 509-514. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2023.05.015.
- [10] SUN J C, JING M Y, LIU H, et al. Application of energy spectrum CT virtual non-contrast technology in chemotherapy-related fatty liver[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging*, 2023, 31(5): 509-514. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2023.05.015. (in Chinese).
- [11] SCHMIDT B, FLOHR T. Principles and applications of dual source CT[J]. *Physica Medica*, 2020, 79: 36-46. DOI:10.1016/j.ejmp.2020.10.014.
- [12] KRAUSS B, GRANT K L, SCHMIDT B T, et al. The importance of spectral separation: An assessment of dual-energy spectral separation for quantitative ability and dose efficiency[J]. *Investigative Radiology*, 2015, 50(2): 114-118. DOI:10.1097/RLI.000000000000109.
- [13] LIANG H, DU S, YAN G, et al. Dual-energy CT of the pancreas: comparison between virtual non-contrast images and true non-contrast images in the detection of pancreatic lesion[J]. *Abdominal Radiology*, 2023, 48(8): 2596-2603. DOI:10.1007/s00261-023-03914-0.
- [14] VOO K H B, BONG D B L. Quality assessment of stereoscopic image by 3D structural similarity[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(2): 1-20.

- DOI:10.1007/s11042-017-4361-2.
- [12] SHI B, LIU K. Regularization by multiple dual frames for compressed sensing magnetic resonance imaging with convergence analysis[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(11): 2136-2153. DOI:10.1109/JAS.2023.123543.
- [13] ZHAO B, LIU Z, DING S, et al. Motion artifact correction for MR images based on convolutional neural network[J]. *Optoelectronics Letters*, 2022, 18(1): 54-58. DOI:10.1007/s11801-022-1084-z.
- [14] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2004, 13(4): 600-612. DOI:10.1109/TIP.2003.819861.
- [15] FAN M, CAO X, LÜ F, et al. Generative adversarial network-based synthesis of contrast-enhanced MR images from precontrast images for predicting histological characteristics in breast cancer[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2024, 69(9). DOI:10.1088/1361-6560/ad3889.
- [16] EIDEX Z, WANG J, SAFARI M, et al. High-resolution 3T to 7T ADC map synthesis with a hybrid CNN-transformer model[J]. *Medical Physics*, 2024, 51(6): 4380-4388. DOI:10.1002/mp.17079.
- [17] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(11): 3440-3451. DOI:10.1109/tip.2006.881959.
- [18] HAJI-MOMENIAN S, PARKINSON W, KHATI N, et al. Singleenergy non-contrast hepatic steatosis criteria applied to virtual non-contrast images: Is it still highly specific and positively predictive?[J]. *Clinical Radiology*, 2018, 73(6): 594. e7-594. e15. DOI: 10.1016/j.crad.2018.01.018.
- [19] de CECCO C N, DARNELL A, MACÍAS N, et al. Virtual unenhanced images of the abdomen with second-generation dual-source dual-energy computed tomography: Image quality and liver lesion detection[J]. *Investigative Radiology*, 2013, 48(1): 1-9. DOI:10.1097/RLI.0b013e31826e7902.
- [20] ZHANG L J, PENG J, WU S Y, et al. Liver virtual non-enhanced CT with dual-source, dual-energy CT: A preliminary study[J]. *European Radiology*, 2010, 20(9): 2257-2264. DOI:10.1007/s00330-010-1778-7.
- [21] ZHOU J, ZHOU Y, HU H, et al. Feasibility study of using virtual non-contrast images derived from dual-energy CT to replace true non-contrast images in patients diagnosed with papillary thyroid carcinoma[J]. *Journal of X-ray Science and Technology*, 2021, 29(4): 711-720. DOI:10.3233/XST-210884.
- [22] 顾芳燕, 朱晓梅, 聂芳, 等. 肝脏占位病变能谱 CT 成像中不同期相虚拟平扫替代真实平扫的效能及方案选择[J]. *中国医学影像学杂志*, 2024, 32(8): 809-815. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2024.08.010.
- GU F Y, ZHU X Y, NIE F, et al. Feasibility and protocol selection of virtual non-contrast technology replacing true non-contrast scanning in tri-phase of liver lesions with spectral CT[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging*, 2024, 32(8): 809-815. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2024.08.010. (in Chinese).
- [23] LACROIX M, MULÉ S, HERIN E, et al. Virtual unenhanced imaging of the liver derived from 160-mm rapid-switching dual-energy CT (rsDECT): Comparison of the accuracy of attenuation values and solid liver lesion conspicuity with native unenhanced images[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging*, 2020, 133: 109387. DOI:10.1016/j.ejrad.2020.109387.
- [24] 林禹, 张潇潇, 张有彬, 等. 双层探测器光谱 CT 虚拟平扫应用于肝脏III期增强扫描[J]. *中国医学影像技术*, 2020, 36(S1): 29-33. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2020.z1.007.
- LIN Y, ZHANG X X, ZHANG Y B, et al. Application of dual-layer spectral detector CT virtual non-contrast images in hepatic triple-phase enhanced scan[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2020, 36(S1): 29-33. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2020.z1.007. (in Chinese).