# •腹部影像学•

# 双层探测器光谱 CT 肠系膜上动脉成像:虚拟单能级图像与常规 图像质量对比

陈晨,魏晓磊,朱小倩,刘松,吕品,张冰

【摘要】目的:对比双层探测器光谱 CT 不同 keV 单能级图像(VMIs)及常规扫描图像上肠系膜上 动脉(SMA)的图像质量,旨在优化 SMA 的 CT 图像质量。方法:回顾性分析我院腹部 CT 增强图像 105 例。利用专用工作站在 40~200 keV 水平生成 17 个单能级 VMIs(间隔 10 keV),比较常规图像和 VMIs 图像上 SMA 的信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)、图像噪声、图像质量评分(信号强度、边缘锐 利度)和 SMA 分支数。采用 Pearson 相关分析以及 Wilcoxon 符号秩检验进行统计分析。结果:随着能 级水平的提高,SNR 和 CNR 均显著降低(r 值分别为-0.891 和-0.810, P 值均<0.001);40 keV 单能 级图像上 SMA 的 SNR 和 CNR 最高,且均显著高于常规图像(分别为 20.00±12.08 vs. 10.61±3.39、  $65.65\pm17.34$  vs. 18.14±4.88, P 值均<0.001)。40 keV 单能级图像上 SMA 的图像质量评分和分支数 也显著高于常规图像(4.99±0.10 vs. 4.69±0.67,14.39±5.70 vs. 6.35±3.05, P 值均<0.001)。结论: 双层探测器光谱 CT 腹部增强检查中,40 keV 单能级图像上肠系膜上动脉的成像质量显著高于常规图 像。

【关键词】 体层摄影术,X线计算机;光谱CT;单能级图像;肠系膜上动脉;图像质量

【中图分类号】R814.42;R543.5 【文献标志码】A 【文章编号】1000-0313(2020)12-1572-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2020.12.014 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



(Abstract) **Objective:** To investigate the value of different keV virtual mono-energetic images (VMIs) of dual-layer spectral detector CT and conventional CT images in optimizing the imaging quality of superior mesenteric artery (SMA). Methods: The abdominal enhancement CT images of 105 patients were analyzed retrospectively. VMIs at 17 different levels with interval of 10keV in range of  $40 \sim 200$  keV were generated by a dedicated workstation, the signal to noise ratio (SNR), contrast to noise ratio (CNR), noise and image quality subjective score (based on the signal intensity and vessel edge of SMA on VR images) and the branch numbers of SMA on conventional CT images and VMIs were calculated and compared. Pearson correlation analysis and Wilcoxon signed rank test were used for statistical analysis. Results: With the increase of energy level, SNR and CNR decreased significantly (the r values were -0.891 and -0.810, respectively; both  $P \le 0.001$ ). The SNR and CNR of the SMAs on 40keV mono-energetic images were the highest and significantly higher than those on conventional images  $(20.00\pm12.08 \text{ vs. } 10.61\pm3.39,65.65\pm17.34 \text{ vs. } 18.14\pm4.88, \text{respectively; all } P < 0.001$ ). The subjective quality score of SMA and the number of SMA branches on 40keV VMIs was also significantly higher than those on conventional images  $(4.99\pm0.10 \text{ vs}, 4.69\pm0.67, 14.39\pm5.70 \text{ vs}, 6.35\pm$ 3.05, respectively; both P < 0.001). Conclusion: The image quality of SMA on 40 keV mono-energetic images were significantly higher than those on conventional images in abdominal enhancement examinations, which may be helpful for the clinical evaluation of SMA.

**[Key words]** Tomography, X-ray computed; Spectral CT; Virtual mono-energetic image; Superior mesenteric artery; Image quality

肠系膜上动脉(superior mesenteric artery,SMA) 由腹主动脉发出,其分支供应范围广泛,包括胰腺、十 二指肠、空回肠及右半结肠等脏器。肠系膜上动脉病 变,如夹层、栓塞等,可导致肠道相应供血节段发生急 性缺血坏死,是临床常见的急腹症之一<sup>[1]</sup>。目前评价 肠系膜上动脉病变主要依赖于 CT 增强检查,CTA 可 清晰地显示肠系膜上动脉的解剖结构及管腔内病变。 既往通过增加对比剂用量或降低管电压来提高血管与 周围组织的对比度,提高血管成像质量,但会增加对比 剂肾病的风险以及患者接受的辐射剂量。

近年来,随着 CT 技术的发展,能谱 CT 在血管成 像中得到了广泛应用<sup>[2-3]</sup>,能谱 CT 虚拟单能级图像 (virtual mono-energetic images,VMIs)可减少对比剂 的用量,降低辐射剂量,而不影响血管成像质量。双层 探测器光谱 CT 在能谱 CT 技术上基础上进一步提 高,扫描时间更短,后处理速度更快,辐射剂量更低,能 够应用于常规扫描中,提供能谱数据"回顾性分析"功 能。但是目前对此项技术在肠系膜上动脉成像中的应 用价值的相关研究较少<sup>[4]</sup>,且样本量较小。因此,本研 究通过分析双层探测器光谱 CT 不同 keV 条件下肠 系膜上动脉的图像质量,旨在评估双层探测器光谱 CT 在肠系膜上动脉中的应用价值。

# 材料与方法

# 1. 一般资料

回顾性分析 2019 年 4 月-2019 年 10 月在本院 行腹部 CT 增强扫描的连续病例的临床和 CT 图像。 纳入标准:①有完整的腹部 CT 平扫及动脉期、静脉期 增强扫描图像;②动脉期和静脉期均采用能谱扫描模 式。排除标准:①腹部手术史;②有腹部疾病,且可能 影响到肠系膜上动脉;③图像有明显伪影(呼吸运动不 佳或腰椎内固定伪影)。最终纳入 105 例患者,男 59 例,女 46 例,年龄 16~86 岁,平均(50.3±13.7)岁。

2. 检查参数

使用 Philips IQon 双层探测器光谱 CT,扫描范围 自膈肌顶部至耻骨联合下缘,扫描参数:自动 mAs 技 术,120 kVp,层厚 5.0 mm,螺距 1.020,0.5 s/r。动脉 期和静脉期扫描分别在注射对比剂后 30 和 70 s 完 成。使用高压注射器经肘静脉注射对比剂碘佛醇 (320 mg I/mL),总量 80 ~ 100 mL,注射流率 3.0 mL/s,之后再以 1.5 mL/s 的流率注射生理盐水 15 mL。扫描完成后,获得常规 CT 图像和能谱 CT 图 像。常规 CT 图像采用混合迭代重建算法;能谱 CT 图像采用投影空间光谱重建,得到全息光谱图像 (spectral based image,SBI)。在 Philips Intellispace Portal 工作站上利用 SBI 生成 40~200 keV 不同能级水 平(间隔 10 keV)的 VMIs,重建层厚均为 1.0 mm。

# 3. 图像分析

客观评价:由一位放射科医师在 Philips SpDS (Spectral Diagnostic Suite 9.0)图像工作站上对常规 CT 图像和 VMIs 进行定量评估。分别在肠系膜上动 脉及同层面图像上的竖脊肌和皮下脂肪内勾画 ROI (面积约 15 mm<sup>2</sup>),测量 CT 值及其标准差(standard deviation,SD)。将所勾画的 ROI 采用复制粘贴的方 式,用于其它组图像和不同部位的测量,保证每例患者 每组图像的每个部位所对应 ROI 的形态、位置以及大 小保持一致。SMA 内的 ROI 放置于血管中心,避开 血管周围的钙化斑块;竖脊肌内的 ROI,则应该避开 周围脂肪组织。每个部位采用同样的方法测量 3 次, 取平均值。按照公式(1)和(2)计算图像的信噪比 (signal to noise ratio,SNR)和对比噪声比(contrast to noise ratio,CNR)<sup>[5]</sup>:

$$SNR = \frac{CT_{SMA}}{SD_{SMA}}$$
(1)  
$$CNR = \frac{CT_{SMA} - CT_{\mathfrak{E} \# \mathfrak{m}}}{CT}$$
(2)

$$NR = \frac{SI_{SMA} SI_{R}}{SD_{BK}}$$
(2)

其中,CT<sub>SMA</sub>和 CT<sub>竖脊肌</sub>分别为肠系膜上动脉和竖脊肌的平均 CT 值,SD<sub>SMA</sub>和 SD<sub>脂肪</sub>分别为肠系膜上动脉和皮下脂肪的 CT 值标准差的平均值,SD<sub>脂肪</sub>代表图像噪声。

主观评价:由两位分别具有 2 年及 10 年以上工作 经验的放射科医师对常规 CT 图像和 VMIs 进行主观 质量评估,最终得分由两位协商得出。在容积重建 (volume rendering, VR)图像中,采用相同的重建角 度,应用 5 级评分法<sup>[6]</sup>对肠系膜上动脉的成像质量进 行评价。5 分:血管信号强度非常好,血管边缘非常锐 利;4 分:血管信号强度好,血管边缘比较锐利;3 分:血 管信号强度适中,血管边缘基本锐利;2 分:血管信号 强度差,血管边缘欠清晰;1 分:血管信号强度很差,血 管边缘模糊。同时,在 VR 图像中,对可观察到的肠系 膜上动脉的分支数进行评估:每增加一个分支或属支 水平,得分增加 1 分。

4. 统计分析

使用 SPSS 22.0 软件包进行统计学分析。数据以 平均值±标准差的形式表示。采用 Pearson 相关分析 进行不同单能级水平与图像 SNR、CNR 的相关性分 析;根据正态分布检验结果,组间差异性分析采用 Wilcoxon 符号秩检验。以 P < 0.05 为差异具有统计 学意义。

### 结果

# 1. 图像质量的客观评价

常规图像与不同单能级水平肠系膜上动脉的 CT 值、图像的 SNR、CNR 和噪声见表 1。随着能级水平的提高,图像的 SNR 和 CNR 显著降低(r 值分别为 -0.891和-0.810,P 值均<0.001),其中 40keV 组图像的 SNR 和 CNR 最高。

本研究中进一步比较了 40 keV 单能级图像与常规图像的 SNR、CNR 及图像噪声(表 2),结果显示 40 keV组图像的 SNR 和 CNR 显著高于常规图像,而 图像噪声低于常规图像,差异均具有统计学意义(*P* 值均<0.001)。

表 2 两种图像客观图像质量参数的比较

参数	常规图像	40keV 图像	Z 值	P 值
SNR	$10.61 \pm 3.39$	$20.00 \pm 12.08$	-8.590	< 0.001
CNR	$18.14 \pm 4.88$	$65.65 \pm 17.34$	-8.895	<0.001
$SD_{link}$	$12.43 \pm 3.94$	$11.44 \pm 2.07$	-6.517	< 0.001

2. 图像质量的主观评价

对常规图像和 40 keV 图像的 VR 图像上 SMA 的图像质量主观评估结果见表 3。两组图像在信号强 度、边缘锐利度与肠系膜上动脉分支显示方面,均具有 显著差异(P 值均<0.001),40 keV 单能级图像显著 优于常规图像(图 1)。

表 3 常规和 40keV 图像上 SMA 成像质量的主观评估

指标	常规图像	40keV 图像	P 值	Z 值
质量评分	$4.69 \pm 0.67$	$4.99 \pm 0.10$	<0.001	-4.355
SMA 分支数	$6.35 \pm 3.05$	$14.39 \pm 5.70$	< 0.001	-8.904

### 讨论

CT 血管成像(CTA)可以清晰地显示肠系膜上动脉的起源和解剖变异,并可进一步评估管腔内病变,能够直观、快速和无创地显示病变部位、程度及相应的受 累肠段。目前,CTA 已经取代血管造影,成为 SMA 病变的临床诊断和外科手术前最重要的检查方法<sup>[1]</sup>。 双层探测器光谱 CT 通过产生 40~200 keV 范围内不 同 keV 水平的单能级图像,可以进一步地提高 CTA 的图像质量<sup>[7]</sup>。

本研究结果表明,在不同能级的 VMIs 中,40 keV 图像的 SNR 和 CNR 最高,肠系膜上动脉显示最佳; 随着能级水平的提高,SNR 和 CNR 逐渐降低,呈显著 负相关,相关系数 r 分别为-0.891 和-0.810(P< 0.001)。低 keV 水平单能级图像受光电效应的影响最 大,碘的衰减值最大,血管对比度高,因此,图像的 SNR 和 CNR 也越高<sup>[8]</sup>。

进一步对常规混合能级图像与 40 keV 单能级图像的图像质量进行了比较,结果显示 40 keV 单能级图像的 SNR 和 CNR 均显著高于常规图像(P<0.001)。这与 Doerner 等<sup>[7]</sup>的研究结果相符,在对胸部肿瘤患者的胸部 CT 增强图像的研究中,亦发现单能级图像的 CT 值、SNR 和 CNR 均随着能级水平的增加而降低,低能级(40~70 keV)重建的单能级图像的 SNR 和 CNR 显著高于常规图像。

在对肠系膜血管能谱 CTA 图像质量的研究中, Yin 等<sup>[4]</sup>研究发现最佳单能级+40%自适应统计迭代 重建(adaptive statistical iterative reconstruction, ASIR)技术可以显著改善肠系膜上动脉和静脉的成像

表1 常规图像和不同能级图像上图像质量定量参数值

成像方法	$CT_{SMA}(HU)$	SNR	CNR	$SD_{\mbox{\tiny B}\mbox{\scriptsize B}\mbox{\scriptsize b}}(\mbox{\scriptsize HU})$	$SD_{\${R}}(HU)$			
常规图像	$270.07 \pm 47.23$	$10.61 \pm 3.39$	$18.14 \pm 4.88$	$12.43 \pm 3.94$	$16.68 \pm 2.59$			
VMIs								
$40 \mathrm{keV}$	$801.74 \pm 151.12$	$20.00 \pm 12.08$	$65.65 \pm 17.34$	$11.44 \pm 2.07$	$15.92 \pm 3.20$			
$50 \mathrm{keV}$	$528.92 \pm 97.06$	$16.70 \pm 8.38$	$44.66 \pm 11.46$	$10.70 \pm 1.86$	$14.83 \pm 2.62$			
60keV	$368.54 \pm 65.42$	$13.89 \pm 5.80$	$30.90 \pm 7.85$	$10.30 \pm 1.77$	$14.27 \pm 2.36$			
$70 \mathrm{keV}$	$272.24 \pm 46.71$	$11.66 \pm 4.16$	$22.06 \pm 5.62$	$10.08 \pm 1.73$	$13.96 \pm 2.25$			
80keV	$211.96 \pm 34.93$	$9.97 \pm 3.14$	$16.34 \pm 4.20$	$9.96 \pm 1.70$	$13.78 \pm 2.18$			
90keV	$172.58 \pm 27.49$	$8.68 \pm 2.50$	$12.52 \pm 3.27$	$9.87 \pm 1.70$	$13.67 \pm 2.14$			
$100 \mathrm{keV}$	$145.79 \pm 22.58$	$7.69 \pm 2.08$	$9.89 \pm 2.67$	$9.82 \pm 1.69$	$13.60 \pm 2.12$			
$110 \mathrm{keV}$	$126.94 \pm 19.25$	$6.94 \pm 1.81$	$8.01 \pm 2.25$	$9.79 \pm 1.68$	$13.55 \pm 2.10$			
$120 \mathrm{keV}$	$113.30 \pm 16.95$	$6.36 \pm 1.62$	$6.65 \pm 1.96$	$9.76 \pm 1.68$	$13.52 \pm 2.09$			
$130 \mathrm{keV}$	$103.11 \pm 15.32$	$5.90 \pm 1.49$	$5.62 \pm 1.76$	$9.74 \pm 1.69$	$13.49 \pm 2.08$			
$140 \mathrm{keV}$	$95.32 \pm 14.15$	$5.54 \pm 1.39$	$4.84 \pm 1.61$	$9.72 \pm 1.68$	$13.47 \pm 2.08$			
$150 \mathrm{keV}$	$89.24 \pm 13.29$	$5.24 \pm 1.31$	$4.22 \pm 1.51$	$9.70 \pm 1.68$	$13.46 \pm 2.08$			
$160 \mathrm{keV}$	$84.42 \pm 12.65$	$5.00 \pm 1.25$	$3.73 \pm 1.42$	$9.70 \pm 1.68$	$13.44 \pm 2.08$			
$170 \mathrm{keV}$	$80.54 \pm 12.16$	$4.81 \pm 1.21$	$3.34 \pm 1.36$	$9.70 \pm 1.67$	$13.43 \pm 2.07$			
$180 \mathrm{keV}$	$77.36 \pm 11.78$	$4.65 \pm 1.18$	$3.01 \pm 1.31$	$9.69 \pm 1.68$	$13.42 \pm 2.07$			
$190 \mathrm{keV}$	$74.75 \pm 11.48$	$4.51 \pm 1.15$	$2.75 \pm 1.28$	$9.68 \pm 1.67$	$13.41 \pm 2.07$			
200 keV	$72.56 \pm 11.24$	$4.40 \pm 1.12$	$2.52 \pm 1.25$	$9.69 \pm 1.67$	$13.41 \pm 2.07$			



图1 同一患者的常规图像和40 keV单能级图像。a)常规动脉期增强图像,分别在肠系膜上动脉、皮下脂肪及竖脊肌放置 ROI 进行参数的测量; b)与图 a 同一层面的40keV图像,在相同部位放置 ROI;c)常规动脉期增强图像经图像后处理获得 VR 图像,显示肠系膜上动脉的分支数较少;d) 40keV图像经图像后处理获得 VR 图像,显示肠系膜上动脉的分支数多。

质量,其次是最佳单能级重建图像。Wang 等<sup>[9]</sup>对下 肢动脉闭塞性疾病患者进行下肢动脉成像研究,结果 显示能谱 CT 最佳单能级图像的质量优于混合能级图 像。大量研究结果表明单能级重建图像的图像质量优 于常规图像,但研究多集中于最佳单能级水平的图像 质量,并没有比较不同 keV 单能级图像的图像质量。

本研究中对 SMA 成像质量的主观评估结果显示,40 keV 图像上 SMA 的信号强度、边缘锐利度以及分支血管显示情况均显著优于常规图像(P均< 0.001),对 SMA 分支血管的显示数较常规图像平均提高 8.04±4.03,这一结果也进一步佐证了客观评估的结论。此外,在图像噪声水平方面,与 Doerner 等<sup>[10]</sup>的另一项关于腹部血管成像的研究结果显示,40 keV 单能级图像的噪声要高于常规图像,尽管差异并无统计学意义(P > 0.99)。而本组研究结果显示 40 keV 单能级图像的噪声水平要低于常规图像,且差异具有统计学意义(P < 0.001)。

本研究存在一些不足之处:首先,由于本研究属于 回顾性分析,因此无法分析低对比剂浓度、低辐射剂量 时双层探测器光谱 CT 在 SMA 成像中的图像质量;其 次,由于本研究侧重于图像质量,无法在肠系膜上动脉 病变的诊断性能上提供有效证据;此外,本研究属于单 中心研究,研究结果还需要在多中心、更大样本量中得 到证实。 综上所述,在肠系膜上动脉 CTA检查中,双层探测器光谱CT 40 keV单能级图像较常规图像的 CNR和SNR显著提高,在血管信号 强度、边缘锐利度以及分支血管的显 示方面也较常规图像显著提高,在对 肠系膜上动脉病变的临床评估中可 提供帮助,有望进一步拓展其临床应 用范围。

# 参考文献:

- Karkkainen JM, Acosta S. Acute mesenteric ischemia (part I)-Incidence, etiologies, and how to improve early diagnosis [J].
  Best Pract Res Clin Gastroenterol, 2017, 31(1):15-25.
- [2] 殷小平,王佳宁,田笑,等.能谱 CT 最佳单能量成像优化肝脏血管图像质量的研究 [J].放射学实践,2017,32(9):942-946.
- [3] 闫淯淳,杨洋,袁新字,等.学龄儿童能谱 CT腹部血管成像中最佳单能量图像的选择[J].放射学实践,2016,31(10):984-987.
- [4] Yin XP,Zuo ZW,Xu YJ,et al. The optimal monochromatic spectral computed tomographic imaging plus adaptive statistical iterative reconstruction algorithm can improve the superior

mesenteric vessel image quality[J/OL].Eur J Radiol,2017,89: e47-e53.DOI:10.1016/j.ejrad.2017.01.022.

- [5] Hickethier T, Byrtus J, Hauger M, et al. Utilization of virtual mono-energetic images (MonoE) derived from a dual-layer spectral detector CT (SDCT) for the assessment of abdominal arteries in venous contrast phase scans[J].Eur J Radiol,2018,99:28-33.
- [6] Yin XP, Gao BL, Li CY, et al. Optimal monochromatic imaging of spectral computed tomography potentially improves the quality of hepatic vascular imaging [J]. Korean J Radiol, 2018, 19 (4): 578-584.
- [7] Doerner J. Hauger M, Hickethier T. et al. Image quality evaluation of dual-layer spectral detector CT of the chest and comparison with conventional CT imaging [J/OL]. Eur J Radiol, 2017, 93: e52-e58.DOI: 10.1016/j.ejrad.2017.05.016.
- [8] Rajiah P, Abbara S, Halliburton SS.Spectral detector CT for cardiovascular applications [J]. Diagn Interv Radiol, 2017, 23 (3): 187-193.
- [9] Wang G.Zhao D, Ling Z, et al. Evaluation of the best single-energy scanning in energy spectrum CT in lower extremity arteriography [J].Exp Ther Med, 2019, 18(2): 1433-1439.
- [10] Doerner J. Wybranski C. Byrtus J. et al. Intra-individual comparison between abdominal virtual mono-energetic spectral and conventional images using a novel spectral detector CT[J/OL]. PLoS One, 2017, 12(8):e0183759. DOI: 10.1371/journal.pone.0183759. (收稿日期:2020-01-20 修回日期:2020-04-26)