❖实验研究

Spectral CT in evaluation on hepatic vessels imaging of experimental mini-pig

YUE Zheng, JIANG Yi, WANG Jing, WANG Jiang, ZHAO Jianqing, HE Yibiao, LIU Wenya*
(Imaging Center, the First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, China)

[**Abstract**] **Objective** To evaluate the hepatic vessels image quality of experimental mini-pig with different energy of spectral CT scanning, in order to determine the optimal delay time and monochromatic image. **Methods** All of 9 pigs underwent conventional gemstone spectral imaging (GSI) mode scan. Smart Prep was used to monitor the hepatic arterial phase scan after the initiation of injection, while spectral CT enhanced images were collected at 35, 50 and 70 s after the start of the arterial phase scan. CT values of hepatic artery, portal vein, and hepatic vein and liver parenchyma were measured at each delay time point. The difference between the CT value of portal vein and liver parenchyma, hepatic vein and liver parenchyma were calculated, and the peak values of the difference were calculated. CT values of hepatic vein, portal vein and liver parenchyma in different delay time were compared, and the optimal delay time of the portal venous phase and venous phase of mini-pig were determined. SNR, CNR and noise of the three phases images were compared among the 21 monochromatic energy images from 40 keV to 140 keV in an interval of 5 keV, and the optimal energy image of the three phases were determined. The subjective image quality scores of the reconstructed images were performed by 2 physicians blindly. Inter-observer agreement for evaluating image quality grading were assessed by *Kappa* statistics. **Results** There were significant differences of CT values of hepatic vein, portal vein, hepatic vein and liver parenchyma CT value, portal vein and liver parenchyma CT values among different delay time (all $P<0.05$). There was no significant difference of CT values of liver parenchyma among different delay time ($P>0.05$). The peak time of the difference between portal veins and liver parenchyma CT values was delay 50 s. The peak time of the difference between hepatic veins and liver parenchyma CT values was delay 70 s. On mono-energetic level of 65 keV, the higher SNR, CNR and lower noise were found in all of three delay phases. All of the three phases images scores by 2 physicians were ≥3 points, and had medium consistency (*Kappa*=0.769, 0.609, 0.727). **Conclusion** After starting the arterial phase scan, delay 50 s is considered to be the optimal time for the spectral CT to observe vein phase of the experimental mini-pig, delay 70 s is the optimal time to observe the venous phase; 65 keV image is the best mono-energetic image of observing hepatic arterial phase, portal venous phase and venous phase of the experimental mini-pig.

[**Key words**] Tomography, X-ray computed; Hepatic vessels; Animal experimentation
DOI:10.13929/j.1003-3289.2016.08.001

能谱 CT 评价实验小型猪肝血管影像

岳 征,蒋 奕,王 静,王 健,赵建卿,何翼彪,刘文亚*
(新疆医科大学第一附属医院影像中心,新疆 乌鲁木齐 830054)

[**摘 要**] **目的** 评价能谱 CT 不同能量成像条件下实验小型猪肝血管影像图像质量,以确定最佳延迟扫描时间和单能图像。**方法** 对 9 头小型猪均行常规宝石能谱成像(GSI)扫描,而后注入对比剂,应用智能追踪(Smart Prep)技术对肝脏

[**基金项目**] 国家自然科学基金(81460280)。
[**第一作者**] 岳征(1990—),男,河南安阳人,在读硕士。研究方向:影像医学与核医学。E-mail: yuezheng2009@163.com
[**通信作者**] 刘文亚,新疆医科大学第一附属医院影像中心,830054。E-mail: 13999202977@163.com
[**收稿日期**] 2016-01-13 [**修回日期**] 2016-04-25

行动脉期扫描，延迟 35、50、70 s 分别采集能谱 CT 增强图像。测量各延迟时间肝动脉、门静脉、肝静脉、肝实质 CT 值，计算门静脉与肝实质 CT 值的差值、肝静脉与肝实质 CT 值的差值，获得上述差值的峰值，比较不同延迟时间门静脉、肝静脉、肝实质 CT 值及其差值，确定小型猪门静脉期及静脉期最佳延迟时间。以 5 keV 为间距，选取 40～140 keV 的 21 个单能图像，测量三期图像的 SNR、CNR 和噪声，确定三期实验小型猪的最佳单能量图像。2 名医师在盲法下对重建图像进行主观图像质量评分，一致性评估采用 *Kappa* 检验。**结果** 不同延迟时间门静脉 CT 值、肝静脉 CT 值、门静脉与肝实质 CT 值的差值、肝静脉与肝实质 CT 值的差值差异均有统计学意义（P 均＜0.05），不同延迟时间肝实质 CT 值差异无统计学意义（P＞0.05）。门静脉与肝实质 CT 值差值的峰值出现时间为延迟 50 s，肝静脉与肝实质 CT 值差值的峰值出现时间为延迟 70 s。在 65 keV 水平，三期图像 SNR 和 CNR 均较高，噪声较低。2 名医师对三期重建图像的各项评分均≥3 分，且均具有中等以上的一致性（*Kappa*=0.769、0.609、0.727）。**结论** 动脉期扫描后延迟 50 s 是能谱 CT 观察实验小型猪门静脉期的最佳延迟时间，延迟 70 s 是观察静脉期的最佳延迟时间；65 keV 图像是观察实验小型猪肝动脉期、门静脉期及静脉期的最佳单能图像。

［**关键词**］ 体层摄影术，X 线计算机；肝血管；动物实验
［**中图分类号**］ R575；R814.42 ［**文献标识码**］ A ［**文章编号**］ 1003-3289(2016)08-1155-05

随着肝脏外科技术的进步，精准肝切除及肝移植对肝血管图像质量提出更高的要求[1]。目前 16 排及 64 排 CT 虽然已广泛应用于肝胆外科术前血管的评估，但其在显示三级血管及细小血管变异方面仍难以满足临床手术需求[2]。能谱 CT 的问世为此提供了可能，与常规 CT 相比，能谱 CT 是在双能量扫描条件下实现的 CT 功能成像技术，其不但可精确评估肝脏病变范围、恶性肿瘤分期和良性病变分型，还可显示肝内血管系统的分布、走行、变异及其与病灶的毗邻关系，通过最佳单能图像技术优化图像质量及 CNR，可提供更加直观清晰的图像[3-4]，为肝脏病灶可切除性的判断、手术适应证的选择和手术方案的设计提供重要依据。本研究旨在应用能谱 CT 评价实验小型猪肝血管影像，以探讨其最佳延迟扫描时间和单能图像。

1 材料与方法

1.1 实验动物 选用我国贵州小型猪 9 头，雌雄不限，猪龄 120～180 天，体质量 15.0～20.0 kg，肝功能均正常且无肝脏病变。本研究通过医院动物伦理委员会批准。

1.2 仪器与方法 采用 GE Discovery CT750 HD CT 扫描仪。实验前对实验动物肌肉注射氯胺酮（15 mg/kg体质量）、地西泮（0.5 mg/kg 体质量）进行基础麻醉，然后通过耳缘静脉留置针（22G）注入丙泊酚（1 mg/kg 体质量）维持麻醉。以心电监护仪监测实验过程中小型猪的心率和呼吸频率。将其仰卧位保定于检查床上，先行常规腹部平扫，采用宝石能谱成像（gemstone spectral imaging，GSI）模式，电压为高低能量（140、80 kVp）瞬时高速切换，管电流为 600 mA，球管旋转速度 0.6～0.8 s/rot，螺距 0.984，探测器宽度 0.625 mm×64，CT 剂量指数为 18.28 mGy。行多期动态增强扫描，对比剂为碘克沙醇（300 mgI/ml）30～50 ml（1.5 ml/kg 体质量），注射流率为 3 ml/s，动脉期开始时间采用肝顶部水平腹主动脉内 CT 值监测（Smart Prep 技术）触发扫描（达 120 HU 的阈值后延迟 10 s 开始扫描）；动脉期扫描后延迟 35、50、70 s 时分别采集能谱 CT 增强图像，获得常规混合能量及单能量（70 keV，1.25 mm）图像。

1.3 图像分析

1.3.1 客观评价 测量实验小型猪常规混合能量各延迟时间肝实质、门静脉和肝静脉的 CT 值，测量血管时 ROI 尽可能包绕肝脏血管，测量正常肝组织时 ROI 尽可能避开大血管和硬化伪影明显的区域，分别计算各延迟时间门静脉与肝实质 CT 值的差值、肝静脉与肝实质 CT 值的差值，最后确定门静脉与肝静脉 CTA 的最佳延迟时间。

通过 GE AW 4.6 工作站，将三期单能量图像载入 GSI viewer 软件进行分析。肝血管及肝实质的 ROI 放置方法同上，测量其平均 CT 值和标准差，以 5 keV为间距，选取 40～140 keV 的 21 个单能图像，分别测量噪声并计算 SNR、CNR 值，绘制 21 个图像噪声、SNR 和 CNR 的散点图。筛选出三期最佳 keV 图像，自动获得 CNR 曲线。CNR 和 SNR 计算公式为：$CNR=(CT_{血管}-CT_{肝实质})/SD_{噪声}$，$SNR=CT_{肝实质}/SD_{噪声}$，$CT_{血管}$ 为三期相应肝血管平均 CT 值，$CT_{肝实质}$ 为三期相应正常肝实质平均 CT 值；$SD_{噪声}$ 为三期相应正常肝实质 CT 值的标准差。所有数据均测量 3 次，取平均值。

1.3.2 主观评价 确定最佳延迟时间及单能图像后，采用 GSI volume viewer 软件对三期单能图像进行肝血管（肝动脉、门静脉、肝静脉）重建，在此操作过程中，将图像调至最佳单能图像。2 名资深影像医师（医师

1、医师 2)采用双盲法对肝血管图像进行阅片评分。图像质量评价参照 Saba 等[5-7]评分标准,并根据本研究情况进行调整:4 分,优秀,肝血管边缘锐利,可清晰显示肝血管的第 3 级或更进一步分支;3 分,良好,肝血管边缘清晰,可清晰显示肝血管的第 2 级分支;2 分,较差,肝血管边缘毛糙,可显示肝血管的第 2 级分支,但不清晰;1 分,不合格,肝血管显示不清楚,未显示肝血管的第 2 级分支。

1.4　统计学分析　采用 SPSS 17.0 统计分析软件,计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,以单因素方差分析比较不同延迟时间肝静脉、门静脉、肝实质 CT 值及其差值,两两比较采用 *LSD* 法。以 *Kappa* 检验评价 2 名医师评分的一致性,*Kappa* 值<0.40 为一致性差,*Kappa* 值为 0.40～0.75 为一致性中等,*Kappa* 值>0.75 为一致性好。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　客观评价　常规混合能量不同延迟时间门静脉 CT 值、肝静脉 CT 值、门静脉与肝实质 CT 值差、肝静脉与肝实质 CT 值差的差异均有统计学意义(P 均<0.05),两两比较差异均有统计学意义(P 均<0.05);不同延迟时间肝实质 CT 值差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。门静脉与肝实质 CT 值差的峰值出现时间为延迟 50 s($P<0.05$),肝静脉与肝实质 CT 值差的峰值出现时间为延迟 70 s($P<0.05$)。三期单能量图像最佳 CNR 曲线均为 65 keV(图 1),此时期 SNR 和 CNR 均较高,噪声较低(图 2)。

2.2　主观评价　三期肝血管成像图像见图 3。2 名医师对三期图像的各项评分均≥3 分(表 2),2 名医师评

表 1　不同肝血管图像各延迟时间的 CT 值(HU,$\bar{x}\pm s$)

肝血管图像	35 s	50 s	70 s	*F* 值	*P* 值
门静脉	171.28±33.28	219.34±33.06	188.82±31.69	4.98	0.015
肝静脉	130.72±28.77	161.50±31.52	192.46±45.42	6.62	0.005
肝实质	99.69±22.33	120.55±25.66	123.86±20.54	2.93	0.072
门静脉-肝实质	72.18±18.98	98.80±18.70	64.96±20.26	7.65	0.003
肝静脉-肝实质	33.28±16.32	41.12±13.64	68.60±31.45	6.29	0.006

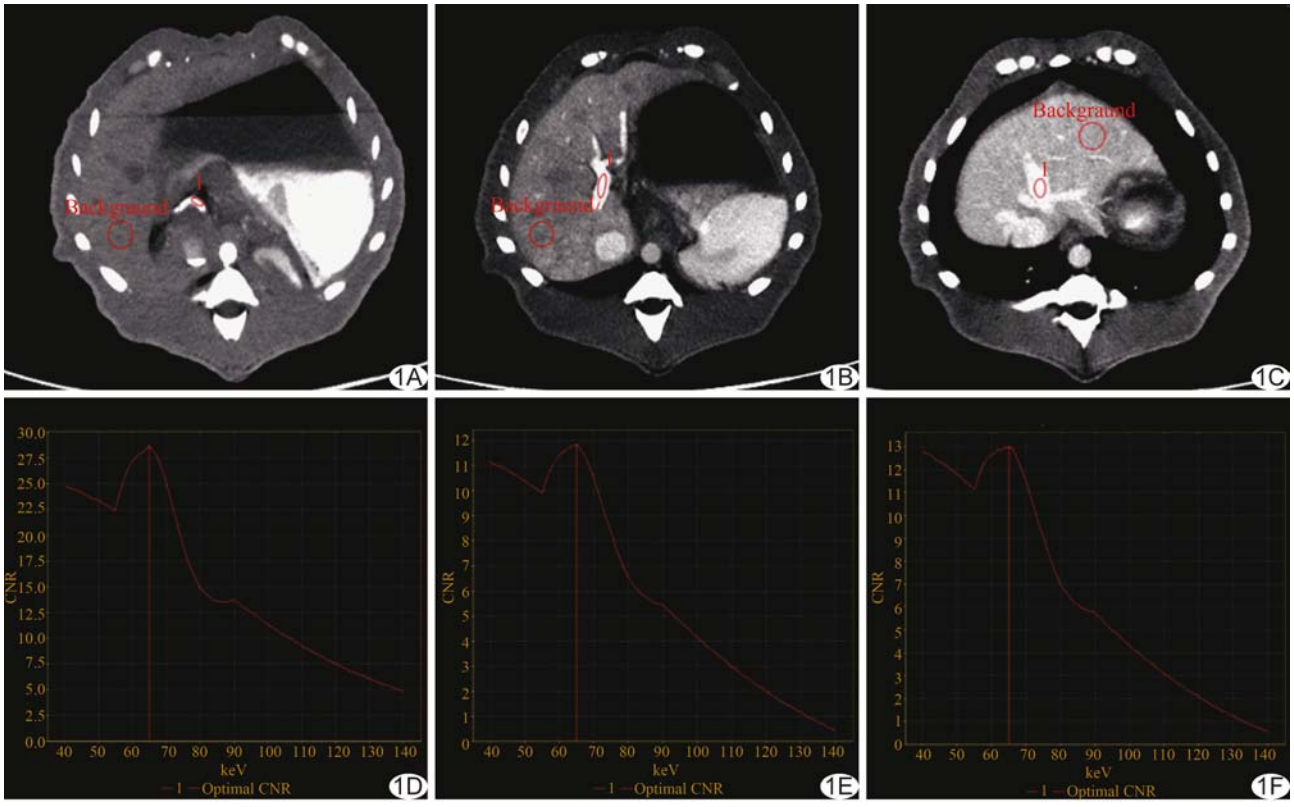

图 1　肝血管 ROI 位于肝动脉(A)、门静脉左支(B)及肝中静脉(C),背景(Background)选择同层面内无肝脏血管解剖或病变的肝实质区域,ROI 面积为肝血管 ROI 的 2～3 倍,软件自动获得三期肝血管成像的最佳 keV 值为 65 keV(D～F)

表 2　肝动脉、门静脉、肝静脉期 CTA 肝血管图像质量评分（只，n=9）

肝血管图像	医师 1				医师 2			
	4 分	3 分	2 分	1 分	4 分	3 分	2 分	1 分
肝动脉	6	3	—	—	5	4	—	—
门静脉	8	1	—	—	7	2	—	—
肝静脉	7	2	—	—	6	3	—	—

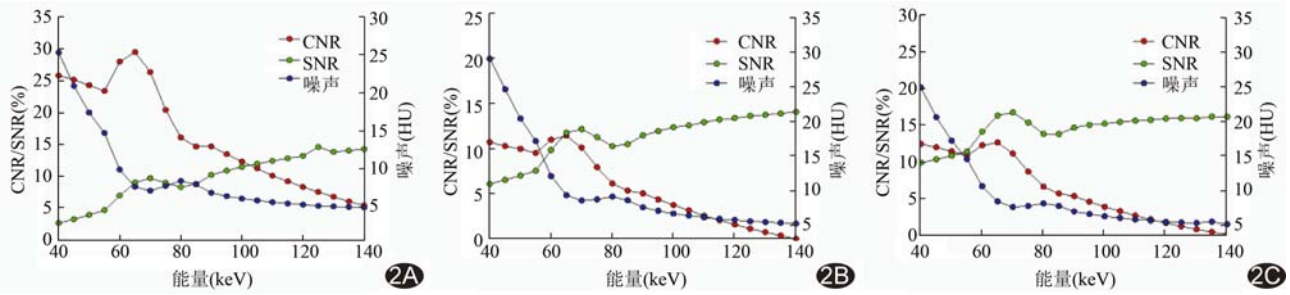

图 2　三期噪声、SNR 和 CNR 的散点图示在 65 keV 以上水平，三期 SNR 和 CNR 均较高，而噪声较低　A. 40～140 keV 肝动脉 CNR、SNR 和噪声的散点图；B. 40～140 keV 门静脉 CNR、SNR 和噪声的散点图；C. 40～140 keV 肝静脉 CNR、SNR 和噪声的散点图

图 3　三期血管最佳单能 VR 重建图像肝动脉（A）、门静脉（B）及肝静脉（C）边缘锐利清晰，与肝实质对比良好，可显示肝血管第 3 级及其以上分支或属支，主观评分为 4 分

价肝动脉、门静脉、肝动脉图像的 *Kappa* 值分别为 0.769、0.609、0.727。

3　讨论

实施精准肝胆外科手术的前提是影像科需要提供更加清晰直观的肝脏血管图像。本研究采用能谱 CT 最佳单能量技术，以肝血管为目标、血管周围组织为背景来确定肝血管最佳的单能量图像，以获得更加满意的 CTA 图像[8]。

肝脏 CTA 主要受 CT 扫描方法、对比剂注射方案、个体条件等因素影响，其中延迟时间是最难控制的因素[9]。本研究对比剂均采用 300 mgI/ml（1.5 mg/kg体质量）碘克沙醇，考虑到小猪体型小、耳缘静脉纤细、管壁薄的特点，注射流率采用临床较易耐受的3 ml/s；在动脉期扫描方式中，肝脏 CTA 的关键是捕捉对比剂在血管内浓度达峰值的时间。本研究采用的 Smart Prep 技术监控扫描方法不受研究对象血液循环差异影响，可以有效避免个体差异，并能够迅速捕捉血管内造影剂峰值的时间，结果显示采用 Smart Prep 行肝动脉期扫描可获得较好的肝动脉图像质量。门静脉及肝静脉 CTA 的最佳成像时间为门静脉及肝静脉血管与背景的肝实质密度差达峰值的时间[10]，本研究通过对不同扫描延迟时间血管与肝实质 CT 值的差异进行比较，确定显示门静脉和肝静脉系统的最佳时间：门静脉与肝实质 CT 值差值的峰值时间为 50 s，门静脉图像质量良好；肝静脉与肝实质 CT 值差值的峰值时间为 70 s，肝静脉图像质量较好。

图像噪声、SNR 及 CNR 是评价肝血管图像质量的主要客观指标[11]。能谱 CT 的单能图像能够大幅减少硬化伪影、避免平均衰减效应，可获得较好的 CNR 及 SNR。本研究不但利用能谱软件自动生成的

CNR 曲线,同时绘制 CNR、SNR 和噪声散点图进行综合分析,发现在 65 keV 水平上,三期 SNR 和 CNR 均较高,噪声相对较低(图 2),此时单能量图像质量良好。2 名医师对三期图像的各项评分≥3 分,且一致性均在中等以上(*Kappa*=0.769、0.609、0.727),提示在最佳延迟时间的基础上,最佳单能重建图像质量高,图像客观可靠,观察者间存在的偏倚较小。

基于动物模型采用能谱 CT 评价肝血管成像的优势:①可获取病理标本及结果,为评价肝血管图像质量提供金标准;②小型猪肝脏外形结构、韧带分布、肝叶划分及管道系统解剖特点均与人类近似,在一定生长发育期肝脏重量及各叶大小比例较恒定,肝内血管及胆管走行变异较少,有利于建立肝脏外科、肝移植和部分肝移植研究动物模型;③实验小型猪肝脏体积较小鼠及兔等实验动物大,易于影像检查及临床操作;④实验小型猪可被用于多期肝脏扫描,可收集不同延迟时间参数进行优选。本研究的不足在于观察样本量偏少,可能会对实验结果造成一定的偏差。

综上所述,动脉期扫描后延迟 50 s 被认为是能谱 CT 观察实验小型猪门静脉期的最佳延迟时间,70 s 是观察静脉期的最佳延迟时间。40～140 keV 的范围中,65 keV 图像是观察实验小型猪肝动脉期、门静脉期及静脉期的最佳单能图像。

[参考文献]

[1] 董家鸿,黄志强.精准肝切除——21 世纪肝脏外科新理念.中华外科杂志,2009,47(21):1601-1605.

[2] 许伟雄,黄旭璇,林顺发,等.腹部动脉能谱 CT 混合能量与单能量图像的比较研究.中国 CT 和 MRI 杂志,2014,12(8):91-94.

[3] 雷立昌,陈建宇. 能谱 CT 的临床应用与研究进展. 中国医学影像技术,2013,29(1):146-149.

[4] Graser A, Johnson TR, Chandarana H, et al. Dual energy CT: Preliminary observations and potential clinical applications in the abdomen. Eur Radiol, 2009,19(1):13-23.

[5] Saba L, Sanfilippo R, Anzidei M, et al. Comparison between postprocessing techniques in the analysis of hepatic arteries using multi-detector-row computed tomography angiography. J Comput Assist Tomogr, 2011,35(2):174-180.

[6] Ichikawa T, Motosugi U, Morisaka H, et al. Optimal Iodine dose for 3-dimensional multidetector-row CT angiography of the liver. Eur J Radiol, 2012,81(9):2450-2455.

[7] Nakaura T, Nakamura S, Maruyama NA, et al. Low contrast agent and radiation dose protocol for hepatic dynamic CT of thin adults at 256-detector row CT: Effect of low tube voltage and hybrid iterative Reconstruction algorithm on image quality. Radiology, 2012,264(2):445-454.

[8] Yuan R, Shuman WP, Earls JP, et al. Reduced Iodine load at CT pulmonary angiography with dual-energy monochromatic imaging: Comparison with standard CT pulmonary angiography—a prospective randomized trial. Radiology, 2012,262(1):290-297.

[9] Schima W, Kulinna C, Ba-Ssalamah A, et al. Multidetector computed tomography of theliver. Radiology, 2005,45(1):15-23.

[10] 尹建忠,沈文,边铁城,等.肝脏多层螺旋 CT 血管成像的期相设置与优化.中华放射学杂志,2003,37(6):551-555.

[11] 于红,李惠民,袁正.上腹部 CT 血管造影三维图像质量影响因素研究.中国医学计算机成像杂志,2009,15(4):358-361.

文章题名要求

▲题名应以简明、确切的词语反映文章中最重要的特定内容,要符合编制题录、索引和检索的有关原则,并有助于选定主题词。

▲中文题名一般不宜超过 20 个字,必要时可加副题名。

▲英文题名应与中文题名含义一致。

▲题名应避免使用非公知公用的缩写词、字符、代号,尽量不出现数学公式和化学式。