

论 著

联合双层探测器光谱CT单能量图及碘图诊断肾脏实性肿瘤

林 禹¹ 张潇潇¹ 吕绍茂¹
王金岸^{1,*} 曹代荣² 陈杏彪³

1.厦门大学附属中山医院影像科

(福建 福州 361004)

2.福建医科大学附属第一医院影像科

(福建 福州 350004)

3.飞利浦医疗临床科学部 (上海 200233)

【摘要】目的 评价双层探测器光谱CT(DL-SDCT)虚拟单能量图(VMI)和碘图在肾脏实性肿瘤诊断中的应用价值。方法 回顾性分析77例肾脏实性肿瘤增强CT影像资料,获得皮髓质交界期常规CT图像、VMI、碘图和VMI-碘图融合图,测量各组图像中肿瘤、肌肉和肾皮质的CT值、碘密度值(ID)和图像噪声值,计算对比噪声比(CNR)、相对强化值(REV)和标准化碘密度(NID)。采用5分法分别评价图像质量。结果 相比于常规图像,VMI图像噪声值更低,且CNR值更高($P < 0.001$)。VMI-碘图融合图的主观评分最高。DL-SDCT定量参数REV及NID均可用于透明细胞癌的诊断。结论 DL-SDCT的VMI、碘图及其融合图的图像质量优于常规CT,有助于肾脏实性肿瘤的细节显示和定性诊断。

【关键词】肾脏肿瘤;单能量成像;体层摄影术;X线计算机

【中图分类号】R445.3

【文献标识码】A

【基金项目】福建省自然科学基金(2022J011343)

厦门市科技计划项目(3502Z20174081)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.02.041

Combined Application of Monoenergetic Images and Iodine Maps Derived from Dual-layer Spectral Detector CT for the Diagnosis of Solid Renal Tumors

LIN Yu¹,ZHANG Xiao-xiao¹,LV Shao-mao¹,WANG Jin-an^{1,*},CAO dai-rong²,CHEN Xing-biao³.

1.Department of Radiology,Zhongshan Hospital Affiliated to Xiamen University,Xiamen 361004,Fujian Province,China

2.Department of Radiology,the First Affiliated Hospital of Fujian Medical University,Fuzhou 350004,Fujian Province,China

3.Department of Clinical Science,Philips Healthcare,Shanghai 200233,China

ABSTRACT

Objective To evaluate the value of dual detector spectral CT (DL-SDCT) virtual monoenergetic images (VMIs) and iodine maps in the diagnosis of solid renal tumors. **Methods** The enhanced CT images of 77 cases with solid renal tumors were retrospectively analyzed. The conventional CT images,VMIs,iodine maps and VMI-iodine maps fused images were obtained. The CT value,iodine density (ID) and image noise value of tumor,muscle and renal cortex in each group were measured,and the contrast-to-noise ratio (CNR),relative enhancement value (REV) and normalized iodine density (NID) were calculated. The image quality was evaluated by 5-point method. **Results** Compared with conventional images,VMI images had lower noise and higher CNR (all $P < 0.001$). The subjective score of VMI-iodine maps fused images was the highest. Both DL-SDCT quantitative parameters REV and NID could be used in the diagnosis of clear cell carcinoma. **Conclusion** Compared with conventional CT images,the image quality of VMI,iodine maps and their fusion images derived from DL-SDCT are superior,which is helpful for the detailed display and qualitative diagnosis of solid renal tumors.

Keywords: Renal Tumor; Monoenergetic Image; Tomography; X-ray Computed

与常规混合能量图像相比,能谱CT虚拟单能量图(virtual monoenergetic image, VMI)和碘图可以更准确地反映不同组织的X线吸收特性及碘对比剂摄取率,更容易发现微小组织学差异,有助于肿瘤的检出与鉴别^[1-5]。新一代双层光谱探测器CT(dual-layer spectral detector CT, DL-SDCT)可在常规混合能量X线中分离出能谱数据,获取更高质量的VMI及碘图,并可实现VMI和碘图的精确配准与融合^[3-6]。

肾脏实性肿瘤的诊断有赖于对强化特征和肿瘤血供的准确评价。然而,基于DL-SDCT多参数成像的肾脏肿瘤研究却鲜有报道。本研究旨在对比分析DL-SDCT增强扫描多参数图像,初步探讨VMI及碘图在肾脏实性肿瘤术前评估中的应用价值,为患者准确诊断和个体化治疗提供可靠的CT定量参数。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性分析2019年2月至2020年11月在我院行肾脏增强扫描的患者。

纳入标准:均在DL-SDCT上完成肾脏多期增强检查,并签署知情同意书;手术前2周内完成影像学检查;明确的术后病理结果(包括诊断必需的免疫组织化学信息)。排除标准:年龄<18周岁;图像质量不佳,或肿瘤囊变、坏死、出血或脂肪成分明显,以致无法分析;皮髓质交界期光谱基图像(spectral based image, SBI)数据包不完整。

1.2 CT检查方案 采用DL-SDCT(IQon, Philips Healthcare, 荷兰)完成患者扫描。管电压:120kVp,管电流:自动调制;螺距:0.969;准直器宽度:64×0.625mm;转速:0.5s/圈;矩阵:512×512;重建层厚/层间距:2mm/2mm。静脉注射对比剂碘普罗胺(优维显,300mg/mL,流率3.5~4.5mL/s)。其中,皮髓质交界期扫描采用对比剂智能追踪技术,设定140HU为触发阈值。自动完成常规图像的迭代重建(iDose⁴, level 3)及SBI数据的光谱重建。

1.3 CT图像定量分析 在后处理工作站(ISP V10.0, Philips Healthcare, 荷兰)上获取平扫及皮髓质交界期50keV的VMI、无水碘图和VMI-碘图融合图。在肾脏肿瘤、同层面竖脊肌、邻近肾皮质上分别勾画类圆形感兴趣区(region of interest, ROI),选取病灶中央实性成分,避开明显的出血、坏死、囊变、钙化、脂肪及血管区,通过自动复制及手动校准,保证ROI大小及层面在各组图像中一致,记录平均CT值和平均碘密度值(iodine density, ID)。

以肌肉测值的标准差(standard deviation, SD)作为图像背景噪声值,计算对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR), $CNR_{CT} = (CT_{\text{肿瘤}} - CT_{\text{肾皮质}}) / SD_{\text{肌肉}}$, $CNR_{ID} = (ID_{\text{肿瘤}} - ID_{\text{肾皮质}}) / SD_{\text{肌肉}}$,计算结果取绝对值。基于相应平扫图像的CT值,计算肿瘤常规图像和VMI的绝对强化值和相对强化值(relative enhancement value, REV),绝对强化值=增强CT值-平扫CT值,REV=绝对强化值/肾皮质CT值。基于肾皮质

【第一作者】林 禹,男,主治医师,主要研究方向:肿瘤多参数影像诊断。E-mail: 420867402@qq.com

【通讯作者】王金岸,男,主任医师,主要研究方向:胸腹部CT及MRI影像诊断。E-mail: xzmshwja@163.com

ID, 计算肿瘤的标准化ID(normalized ID, NID), $NID=ID\text{肿瘤}/ID\text{肾皮质}$ 。

1.4 CT图像主观评分 由两位具备6年和30年腹部肿瘤影像经验的医师对各组图像进行盲法阅片, 保证窗宽和窗位在VMI和常规图像间一致。采用5分法评价图像质量, 取二者平均分为最终得分, 评分标准如下: 1分: 细小结构完全不能辨识, 伪影及噪声极明显; 2分: 细小结构显示不清, 伪影、噪声较明显; 3分: 细节基本清晰, 略有伪影及噪声, 但基本可以诊断; 4分: 细节较清晰, 图像基本无伪影和噪声; 5分: 细节非常清晰, 图像无明显伪影及噪声(大于3分即可满足临床诊断要求)。分别从以下几个维度完成图像质量主观评分: (1)形态学(基于肿瘤形态、边缘、囊变、坏死和强化特征等); (2)血管显示(基于肿瘤及肾脏血管特征); (3)图像整体质量。

1.5 统计学分析 采用SPSS 22.0统计软件包进行分析, 定量资料以($\bar{x} \pm s$)表示。常规CT图像和VMI定量参数的组间比较采用配对t检验; DL-SDCT多参数图像主观评分的组间比较采用Friedman秩和检验, P值通过Bonferroni校正。通过独立样本t检验比较透明细胞癌(clear cell renal cell carcinoma, ccRCC)和血管平滑肌脂肪瘤(angiomyolipoma, AML)组间各DL-SDCT参数差异。通过受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析不同CT参数诊断透明细胞癌的曲线下面积(area under the curve, AUC)、最佳截断值、Youden指数、敏感性和特异性。不同参数AUC的组间比较采用Z检验。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 临床资料 共77例患者纳入本研究, 男55例, 女25例; 年龄19~87岁, 平均(54.85 ± 12.51)岁; 肿瘤最长径为(5.18 ± 2.98)cm。共80枚(3例患者为双原发病灶)肾脏肿瘤经病理学确诊, 其中, ccRCC共计42枚, AML共计10枚, 乳头状细胞癌7枚, 肾盂浸润性尿路上皮癌7枚, MiT家族易位性肾细胞癌7枚, 嗜酸细胞腺瘤4枚, 嫌色细胞癌2枚, 转移瘤(脂肪肉瘤来源)1枚。

2.2 图像质量评价 常规图像、VMI及碘图的SD值分别为(13.80 ± 2.88)HU、(11.52 ± 2.73)HU和(0.31 ± 0.04)mg/mL, 对应的CNR分别为 6.40 ± 3.59 、 16.43 ± 9.68 和 6.18 ± 4.09 。相比于常规图像, VMI的SD值(P<0.001)更低, CNR(P<0.001)和REV(P<0.001)更高(表1, 图1~图8)。常规图像、VMI、碘图及其融合图均可满足肿瘤诊断要求(主观评分均>3分)。各组图像不同维度的主观评分均存在统计学差异(P均<0.001)。其中, VMI优化了病灶对比及病灶细节的显示, 更有助于展现肿瘤形态学特征;

而碘图则有助于清晰显示血管细节, 但对强化不明显的解剖学结构显示欠佳; VMI-碘图融合图提供了更全面的诊断信息, 总体评分最高(表2, 图1~图8)。

表1 肿瘤皮髓质交界期常规CT图像及VMI定量参数比较(n=80)

分组	常规CT	50keV VMI	P值
CT值(Hu)	101.84±40.29	181.14±81.69	<0.001
SD值(Hu)	13.80±2.88	11.52±2.73	<0.001
REV	0.35±0.22	0.40±0.23	<0.001
CNR	6.40±3.59	16.43±9.68	<0.001

注: VMI: 虚拟单能量50keV图像; SD: 标准差; REV: 相对强化值; CNR: 对比噪声比。

表2 肿瘤皮髓质交界期CT多参数图像质量的主观评分比较(n=80)

分组	常规CT	50keV VMI	碘图	VMI-碘图融合图	P值
形态学	3.76±0.49	4.61±0.49	3.92±0.54	4.73±0.35	<0.001
血管显示	3.67±0.51	4.23±0.43	4.61±0.43	4.73±0.36	<0.001
整体质量	3.83±0.46	4.71±0.38	4.61±0.41	4.88±0.23	<0.001

注: VMI: 虚拟单能量50keV图像。

2.3 诊断效能评价 皮髓质交界期常规CT图像、VMI图以及碘图的各定量参数(CT值、REV值和NID值)均可用于ccRCC与AML的鉴别诊断, 见表3。ROC曲线分析揭示, VMI的AUC(0.802)最大, NID的Youden指数最大(0.63), 见表4, 但各组参数AUC的组间两两比较无统计学差异(Z均>0.05)。

表3 肾脏透明细胞癌(ccRCC)和血管平滑肌脂肪瘤(AML)的CT多参数组间比较(n=52)

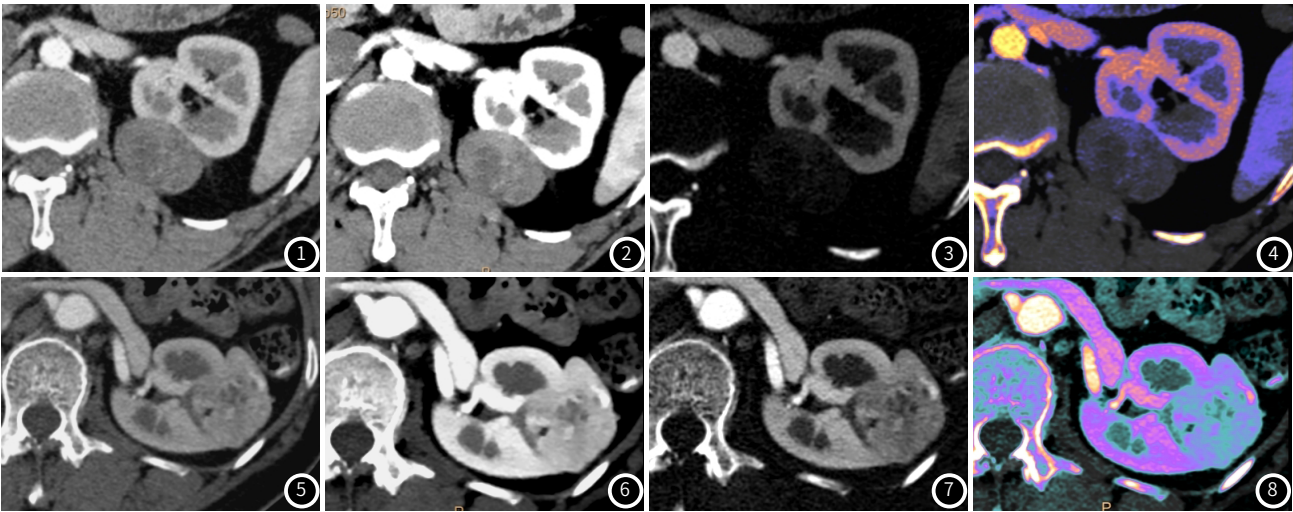
CT参数		ccRCC(n=42)	AML(n=10)	P值
CT值(HU)	常规CT	124.90±33.55	93.97±31.15	0.014
	VMI	230.03±68.94	162.81±48.60	0.002
REV	常规CT	0.48±0.19	0.31±0.19	0.023
	VMI	0.54±0.20	0.35±0.14	0.002
ID(mg/mL)		3.07±0.90	1.94±1.05	0.008
NID		0.74±0.20	0.50±0.29	0.032

注: VMI: 虚拟单能量50keV图像; REV: 相对强化值; ID: 碘密度; NID: 标准化碘密度。

表4 常规CT、VMI及碘图定量参数诊断肾脏透明细胞癌的ROC曲线分析

参数	AUC(95%CI)	截断值	Youden指数	敏感性(%)	特异性(%)
REV 常规CT	0.764(0.626-0.871)	0.30	0.61	80.95	80.00
VMI	0.802(0.669-0.900)	0.33	0.56	85.71	70.00
NID	0.748(0.608-0.858)	0.47	0.63	92.86	70.00

注: VMI: 虚拟单能量50keV图像; REV: 相对强化值; NID: 标准化碘密度; 95% CI: 95%可信区间。



51岁, 男性, (左肾)乳头状肾细胞癌。常规CT增强图像(图1)中, 左肾占位性病变疑似轻度强化; 图2为50keV虚拟单能量图像(VMI), 其清晰显示了锯齿状的瘤肾界面, 明确了病灶强化范围; 碘图(图3)进一步提示病灶存在碘对比剂摄取, 但对病灶形态显示欠佳; 图4为VMI-碘图融合图, 其更加直观显示了肿瘤形态及强化特征。51岁, 女性, (左肾)血管平滑肌脂肪瘤。常规CT增强图像(图5)提示不均匀强化的左肾实性肿瘤; 图6为50keV虚拟单能量图像(VMI), 其清晰显示了肿瘤边缘及强化特征, 但部分肿瘤血管的显示存在“开花状伪影”; 碘图(图7)可准确清晰显示肿瘤及肾脏血管; 图8为VMI-碘图融合图, 其通过不同伪彩形象显示了肿瘤的血管(箭)、脂肪(箭头)和平滑肌成分(星号)。

3 讨论

常规能谱CT通常在70~80keV获得CNR较高的“最佳单能量图”，其更低能级图像(40~50keV，接近碘的K边缘33keV)虽然理论上可增加病灶对比度，但存在较为严重的背景噪声^[4]。DL-SDCT实现“探测器端”能量分离和投影空间内数据重建，大幅减少光谱混杂，避免像素移位^[7]。因此，DL-SDCT可提供更高质量的低能级VMI和碘图，更精确反映组织强化特征和摄碘率，并可生成“时空配准”的融合图^[8-9]。

我国肾脏肿瘤的发病率较高，不同类型肾脏实性肿瘤的生物学特征、治疗方案和临床预后不尽相同，因此，术前准确诊断尤为重要。此外，对肾脏血管走行和肿瘤血供的明确评估，有助于腹腔镜下肾部分切除术的开展，最大限度保留患者肾功能，提高术后生活质量^[10]。

增强扫描皮髓质交界期的CT图像诊断肾脏肿瘤的效能最高，故本研究均纳入该期相分析。根据预实验结果及文献报道^[1,8-9]，本研究选取50keV的VMI，以保证最佳病灶对比和图像质量。与常规增强CT图像相比，本研究DL-SDCT生成的VMI和碘图可提供更高对比、更高质量的影像学信息，优化了多种类型肾脏实性肿瘤的显示。Lennartz等学者^[1]则认为，相比于常规增强CT，联合应用DL-SDCT的低能级VMI和碘图有助于提高骨骼肌肉转移瘤的检出率和诊断准确性。本研究进一步证实，VMI和碘图不同程度优化了肿瘤细节特征(如病灶边缘、肿瘤血管和特殊征象等)显示，有助于肿瘤早期检出、良恶性肿瘤鉴别以及手术方案规划。

本研究中，对于乏血供实性肿瘤(如乳头状肾细胞癌)，VMI相对于常规CT可显著改善肿瘤边缘(尤其是瘤肾界面)等形态学特征显示，并清晰显示在常规图像难以明确的轻度强化范围，见图2。碘图及VMI-碘图融合图则更直观显示了肿瘤摄碘区域的具体范围，见图3~图4，并可通过NID实现准确量化，以期鉴别乏血供肿瘤和高密度囊肿(不摄取碘对比剂)，并有助于肾脏肿瘤术前分型。Kessner等学者^[11]基于DL-SDCT的多参数成像研究发现，不同能级VMI(40keV和100keV)病灶CT值的光谱曲线斜率有助于良性复杂囊肿和肿瘤性病变的鉴别，进一步佐证了本研究结果。

对于富血供实性肿瘤(如ccRCC)，由于肿瘤本身强化十分明显，常规图像、VMI均可获取良好的病灶对比和充分的形态学信息。然而，更高对比的VMI和碘图对优化肿瘤血管和囊变坏死区的显示仍有额外的帮助，有助于精准评估肿瘤血供和生物学行为，为外科医师规划手术方案提供重要参考。此外，对于组织成分复杂的富血供肿瘤(如AML等)，碘图及VMI-碘图融合图尤其有助于不同组织学成分(尤其是血管和强化组织)的识别，增加肿瘤诊断信心，见图7~图8。

Nagayama等学者指出^[5,9]，DL-SDCT增强扫描低能级VMI不仅可获得比常规图像更佳的图像质量，还有助于胰腺肿瘤及周边血管评价，这与本研究上述结果相似。然而，本研究中部分强化明显的血管在VMI图像上存在“开花状伪影”，一定程度上影响肿瘤血管观察(表2，图6)。因此，联合应用碘图及VMI-碘图融合图，可实现多参数DL-SDCT图像的优势互补，有助于肾脏肿瘤全面评价。

本研究初步证实，VMI和碘图各定量参数还有助于ccRCC和AML的术前鉴别，并获得相当于或略优于常规CT的诊断效能。由于本研究中AML样本量较小，组织学成分复杂，AML瘤内存在的微小脂肪和出血成分容易干扰定量分析，VMI和碘图的诊断价值尚有待大样本研究进一步验证。

由于DL-SDCT成像的独特技术优势，本研究VMI及碘图均来自对SBI数据的回顾性重建，不产生额外的扫描序列或电离辐射。多项研究指出^[2,4-5]，腹部肿瘤单期增强扫描CT低能级VMI及碘图即可达到相当于常规多期CT增强扫描的诊断效能，在降低患者辐射剂量和简化扫描流程的同时，还可有效提高病灶的“可视性”和“可量化性”，有助于肿瘤准确定性与分期。

本研究尚存在以下不足：(1)总样本量较小，不同类型肾脏肿瘤的多参数CT研究还有待进一步细化；(2)未对不同期相和不同能级的VMI参数开展对比研究；(3)未进一步联合肾肿瘤DL-SDCT参数和Ki-67指数或Fuhrman核分级开展研究。

综上所述，DL-SDCT皮髓质交界期VMI、碘图及VMI-碘图融合图提供了优于常规CT的图像质量，有助于肾脏实性肿瘤的细节显示；定量参数REV和NID在ccRCC的诊断中具有一定价值，应用前景可观。

参考文献

- [1] Lennartz S, Grosse Hokamp N, Abdullayev N, et al. Diagnostic value of spectral reconstructions in detecting incidental skeletal muscle metastases in CT staging examinations [J]. *Cancer Imaging*, 2019, 19 (1): 1-8.
- [2] Nagayama Y, Nakaura T, Oda S, et al. Dual-layer detector CT of chest, abdomen, and pelvis with a one-third iodine dose: Image quality, radiation dose, and optimal monoenergetic settings [J/OL]. *Clinical Radiology*, 2018, 73 (12): 1058.e21-1058.e29.
- [3] Grosse Hokamp N, Hööink A J, Doerner J, et al. Assessment of arterially hyper-enhancing liver lesions using virtual monoenergetic images from spectral detector CT: Phantom and patient experience [J]. *Abdominal Radiology*, 2018, 43 (8): 2066-2074.
- [4] Nagayama Y, Iyama A, Oda S, et al. Dual-layer dual-energy computed tomography for the assessment of hypovascular hepatic metastases: Impact of closing k-edge on image quality and lesion detectability [J]. *European Radiology*, 2019, 29 (6): 2837-2847.
- [5] Nagayama Y, Tanoue S, Inoue T, et al. Dual-layer spectral CT improves image quality of multiphasic pancreas CT in patients with pancreatic ductal adenocarcinoma [J]. *European Radiology*, 2020, 30 (1): 394-403.
- [6] Ren H, Zhen Y, Chang Z, et al. The application value of 70 keV monoenergetic imaging on dual-layer spectral detector CT in improving contrast-enhanced abdominal image quality [J]. *Chinese Journal of Radiology (China)*, 2020, 54 (7): 660-664.
- [7] Kalisz K, Rassouli N, Dhanantwari A, et al. Noise characteristics of virtual monoenergetic images from a novel detector-based spectral CT scanner [J/OL]. *European Journal of Radiology*, 2018, 98 (November 2017): 118-125.
- [8] Yang Y, Xu J, Li R, et al. Clinical usefulness of spectral images derived from dual-layer spectral detector CT for the detection of pancreatic neuroendocrine tumor lesions [J]. *Chinese Journal of Radiology (China)*, 2020, 54 (6): 534-538.
- [9] Xu J, Yan F, Han Q, et al. Optimal window setting for 40 keV virtual monoenergetic images derived from dual-layer spectral detector CT pancreas dynamic enhanced scanning [J]. *Chinese Journal of Radiology (China)*, 2020, 54 (7): 665-670.
- [10] Blum K A, Paulucci D J, Abaza R, et al. Main renal artery clamping with or without renal vein clamping during robotic partial nephrectomy for clinical T1 renal masses: perioperative and long-term functional outcomes [J/OL]. *Urology*, 2016, 97: 118-123.
- [11] Kessner R, Hokamp N G, Ciancibello L, et al. Renal cystic lesions characterization using spectral detector CT (SDCT): Added value of spectral results [J]. *British Journal of Radiology*, 2019, 92 (1100).

(收稿日期: 2021-08-12)

(校对编辑: 何镇喜)