

◆ 生殖泌尿影像学

Quantitative analysis of spectral CT curve stretched-exponential model in kidney tumors

YANG Xiaotong¹, LIU Yi^{1*}, HUANG Desheng², ZHAO Yu¹, LI Jiao¹, REN Ke¹

(1. Department of Radiology, First Hospital of China Medical University, Shenyang 110001, China;

2. Department of Mathematics, College of Basic Medical Sciences, China Medical

University, Shenyang 110122, China)

[Abstract] **Objective** To explore the value of spectral CT in differential diagnosis of kidney tumors using the stretched-exponential model. **Methods** Totally 59 patients with kidney tumors proved by operation and pathology were retrospectively analyzed, all of them underwent spectral CT in plane and double-phasic enhanced scanning, i. e. 8 minimal fat renal angiomyolipoma (group A), 17 hypovascular renal carcinoma (group B) and 34 clear cell renal cell carcinoma (group C), and then 23 patients were randomly selected, whose the normal renal cortex (group D) and psoas major (group E) as the control. The normalized iodine concentrations (NIC) of the lesion, normal renal cortical and psoas major were measured and calculated. The data of spectral curve were extracted and used to calculate the stretched-exponential index (α) and b value with the stretched-exponential nonlinear regression analysis model. The α , b and NIC values were compared among 5 groups. The correlation between NIC and α , b value of the lesion were analyzed. **Results** The α value had no differences among all groups in plane scanning (all $P > 0.05$). In nephropgraphic phase (NP) there were significantly different of α value between group A and group B ($P < 0.05$), but in cortex phase (CP) and NP, there were no differences of NIC between the two groups (all $P > 0.05$). In NP there were significantly different of NIC and α value between group C and group D (all $P < 0.05$). In CP and NP, there were significantly different between group E and other groups in NIC and α value (all $P < 0.05$). For b value, there were significantly different between group E and other groups in plane and enhancement scanning (all $P < 0.05$), as well as group C and group D in plane and NP scanning (all $P < 0.05$). But no significant difference between other groups. The α values of lesions had positive correlation with NIC in CP and NP ($r = 0.771, 0.695$, both $P < 0.001$). **Conclusion** Quantitative spectral CT with the stretched-exponential nonlinear regression analysis model has some application value in differential diagnosis of renal tumor.

[Key words] Spectral imaging; Renal tumour; Stretched-exponential analysis model

DOI:10.13929/j.1003-3289.2016.07.028

肾脏肿瘤能谱 CT 曲线拉伸指数模型定量分析

杨晓彤¹, 刘屹^{1*}, 黄德生², 赵宇¹, 李娇¹, 任克¹

(1. 中国医科大学附属第一医院放射科, 辽宁 沈阳 110001; 2. 中国医科大学

公共基础学院数学教研室, 辽宁 沈阳 110122)

[摘要] **目的** 采用拉伸指数非线性回归模型对能谱曲线进行解析, 探讨其对不同病理类型肾肿瘤的鉴别诊断价值。

方法 回顾性分析经手术病理证实并行能谱 CT 检查的 59 例肾肿瘤患者影像资料, 其中, 脂肪错构瘤 8 例(A 组), 乏血

[基金项目] 辽宁省科学技术计划项目(2013225049)。

[第一作者] 杨晓彤(1991—), 女, 山东聊城人, 在读硕士。研究方向: CT、MRI 影像诊断。E-mail: yangxt1127@126.com

[通信作者] 刘屹, 中国医科大学附属第一医院放射科, 110001。E-mail: liuyicmu@sina.cn

[收稿日期] 2015-12-03 **[修回日期]** 2016-05-05

供肾癌 17 例(B 组),肾透明细胞癌(ccRCC)Ⅱ级 34 例(C 组)。随机抽取 23 例患者,以健侧肾皮质(D 组)、腰大肌(E 组)作为正常对照。测量并计算病灶实性部分及正常对照的标准化碘浓度(NIC),提取能谱曲线数据并利用拉伸指数非线性回归模型计算拉伸指数(α 值)及 b 值。比较平扫及增强后各组间 NIC、 α 、 b 值的差异,评估病灶 α 、 b 值与 NIC 的相关性。**结果** 平扫 5 组间 α 值的差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。动脉期 A 组与 B 组间 NIC 及 α 值差异均无统计学意义(P 均 >0.05),实质期两者 α 值差异有统计学意义($P < 0.05$),但 NIC 差异均无统计学意义($P > 0.05$)。动脉期 C 组与 D 组各参数差异均无统计学意义(P 均 >0.05),实质期两组间 NIC、 α 值差异有统计学意义(P 均 <0.05)。动脉和实质期 E 组与其他各组 NIC 及 α 值的差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。平扫、动脉期及实质期, E 组与其他各组间 b 值差异均有统计学意义(P 均 <0.05);平扫、实质期, C 组与 D 组间 b 值差异有统计学意义(P 均 <0.05),其余各组间 b 值差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。动脉期($r=0.771$)及实质期($r=0.695$)病变 α 值与 NIC 呈正相关(P 均 <0.001)。**结论** 采用拉伸指数非线性回归模型解析能谱曲线对肾脏肿瘤性病变的诊断有一定的临床应用价值。

[关键词] 能谱成像;肾肿瘤;拉伸指数模型

[中图分类号] R814.42; R737.11 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2016)07-1092-05

CT 检查可为实体肿瘤的早期诊断、治疗及预后提供有效的影像资料。常规 CT 是单参数、混合能量成像,而能谱 CT 为多参数、单能量成像,具有物质定量分析、能谱分析等功能^[1-4]。CT 能谱成像不仅能够提供结构和病变的最佳单能图像^[4],还能够提供 ROI 区内组织结构的能谱曲线^[5-6]、并可用曲线方程描述曲线特点。本研究参考既往研究^[7-8]中应用的数学模型,采用拉伸指数模型分析不同病理类型肾脏肿瘤的能谱曲线,探讨其各数学参数的生理及病理学意义,以期为临床患者个体治疗方案的选择和疗效评价提供可量化的影像学参考指标。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析 2014 年 3 月—2014 年 12 月接受能谱 CT 检查的肾肿瘤患者 59 例,男 38 例,女 21 例,年龄 32~80 岁,平均(56.5 ± 11.2)岁,均经病理证实。纳入标准:行能谱 CT 扫描前未接受任何治疗;无碘过敏史及其他相关检查禁忌证;病变均单发,并于 CT 检查结束后 1 周内行外科手术切除。排除标准:病变坏死囊变较多或图像局部有伪影干扰;有其他肾脏疾病;有静脉血栓或其他部位转移。59 例中,乏脂肪肾错构瘤(病理证实脂肪成分 $<25\%$)8 例(A 组);乏血供肾癌(排除肿瘤内血管,病灶内实性部分最高强化程度低于正常肾皮质者)17 例(B 组),包括乳头状肾细胞癌 7 例、嫌色细胞癌 3 例、浸润性尿路上皮癌 4 例、Xp11.2 易位、TFE3 基因融合相关性肾癌 3 例;肾透明细胞癌(clear cell renal cell carcinoma, ccRCC, Ⅱ级)34 例(C 组),随机抽取 23 例以健侧肾脏(D 组)和腰大肌(E 组)作为正常对照。本研究经伦理审查委员会批准。

1.2 仪器与方法 采用 GE Healthcare High-definition Discovery CT 750HD 能谱 CT 机。以能谱扫描

模式(gemstone spectral imaging, GSI)行平扫及增强扫描,扫描参数:管电压 80 kVp、140 kVp,每 0.5 ms 快速切换,自动电流,最大 600 mAs,转速为 0.6 s/rot, DFOV 36 cm,螺距 0.984:1,扫描层厚 5.0 mm,层间距 5.0 mm;重建层厚 1.25 mm、间距 1.25 mm 的单能量图像(范围 40~140 keV,间隔 10 keV),范围为自膈顶至髂前上棘,包括双侧肾脏。采用 Medrad Stellant 高压注射器,经手背静脉团注非离子型对比剂碘海醇(欧乃派克, 350 mgI/ml),剂量 1.2 ml/kg 体质量,总剂量 ≤ 90 ml, 25 s 内注射完毕计算注射速度。采用腹主动脉内 CT 值监测(Smart Prep 技术)触发动脉期扫描,设定肝门水平腹主动脉为 ROI,达到触发阈值 130~150 HU 后手动触发扫描。约于注药后 30 s 和 70 s 扫描获得动脉期及实质期增强图像。

1.3 图像分析 将重建薄层单能量图像传送至 AW 4.6 工作站,采用 GSI Viewer 软件进行图像观察和处理。在 70 keV 单能量图像中勾画 ROI,分别在动脉和实质期选取病灶实性部分(尽量选在密度均匀区域,避开坏死、钙化和血管影)、正常肾皮质和腰大肌,获得 ROI 内碘浓度,于连续 3 个层面上进行测量,取平均值。ROI 的大小、形状和位置尽可能在双期扫描的测定中保持一致。采用 GSI Viewer 软件得到各 ROI 内组织的衰减曲线,保存并导出 ROI 数据,计算各组织结构的标准碘浓度(normalized iodine concentrations, NIC),公式: $NIC = \text{病灶碘浓度} / \text{同层面腹主动脉碘浓度}$ 。提取能谱曲线数据,采用拉伸-指数非线性回归模型($Y = -bX^\alpha$)计算拉伸指数(α 值)及 b 值,具体步骤:①坐标的平移变换,首先将原始坐标根据实际需要左移 40 个单位,将 (0,0) 点作为坐标的原点;②归一化计算,将 S 除以最大值 S_0 , 获得归一化值 $S' = S / S_0$;③对于归一化值 S 进行对数变换 $y = \ln(S)$;④通过

非线性最小二乘法进行拟合,获得 α 值的最优估计值。其中 S_0 为 40 keV 所对应的 CT 值, S 为 40~140 keV (以 10 keV 为间隔)各单能量水平的 CT 值(HU), X 为自变量,定义为 0~10 的 11 个连续整数。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 16.0 统计分析软件,计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示。对所有数据均进行正态性检验和方差齐性检验。采用方差分析比较 5 种组织结构间 NIC、 α 及 b 的差异,对动脉期、实质期病变 α 值、 b 值与 NIC 进行 Pearson 相关性分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

所有患者均顺利完成能谱 CT 检查,无不适及不良反应。59 例中,左肾病变 25 例,右肾 34 例。见图 1~3。

平扫 5 组间 α 值的差异均无统计学意义(P 均 > 0.05)。动脉期 A 组与 B 组间 NIC 及 α 值差异均无统计学意义(P 均 > 0.05),实质期两者 α 值差异有统计学意义($P < 0.05$),但 NIC 差异均无统计学意义($P > 0.05$)。动脉期 C 组与 D 组各参数差异均无统计学意义(P 均 > 0.05),实质期两组间 NIC、 α 值差异有统计学意义(P 均 < 0.05)。动脉和实质期 E 组与其他各组 NIC 及 α 值的差异均有统计学意义(P 均 < 0.05)。见表 1。

表 1 各组平扫、动脉期及实质期的 NIC、 α 值、 b 值($\bar{x} \pm s$)

组别	平扫		动脉期			实质期		
	α 值	b 值	NIC(mg/ml)	α 值	b 值	NIC(mg/ml)	α 值	b 值
A 组($n=8$)	0.36 ± 0.03	0.21 ± 0.07	0.26 ± 0.12	0.59 ± 0.07	0.50 ± 0.09	0.52 ± 0.24	0.53 ± 0.06	0.55 ± 0.22
B 组($n=18$)	0.38 ± 0.03	0.22 ± 0.09	0.22 ± 0.11	0.56 ± 0.07	0.47 ± 0.08	0.62 ± 0.30	0.57 ± 0.05	0.49 ± 0.04
C 组($n=34$)	0.37 ± 0.04	0.15 ± 0.08	0.46 ± 0.15	0.63 ± 0.05	0.51 ± 0.05	0.91 ± 0.29	0.59 ± 0.04	0.49 ± 0.04
D 组($n=23$)	0.37 ± 0.08	0.32 ± 0.10	0.54 ± 0.07	0.63 ± 0.04	0.52 ± 0.02	0.40 ± 0.25	0.64 ± 0.03	0.52 ± 0.01
E 组($n=23$)	0.36 ± 0.05	0.10 ± 0.05	0.05 ± 0.01	0.42 ± 0.03	0.28 ± 0.06	0.20 ± 0.05	0.43 ± 0.03	0.30 ± 0.06

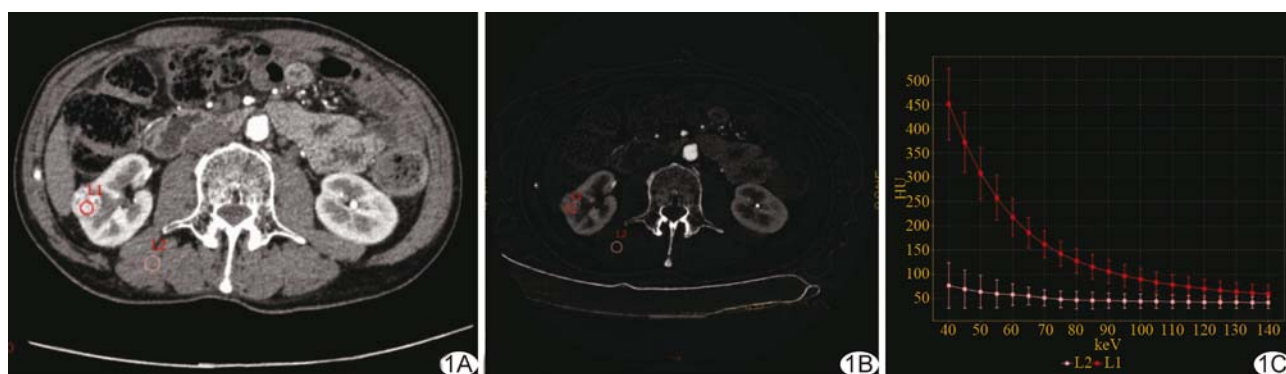


图 1 男,52 岁,右肾透明细胞癌(Ⅱ级) A. 动脉期 70 keV 单能量图像; B. 动脉期碘基图像,病灶碘浓度为 $50.70 \times 100 \mu\text{g/ml}$,腰大肌碘浓度为 $4.53 \times 100 \mu\text{g/ml}$; C. 病变(红色)与腰大肌(粉色)的能谱曲线

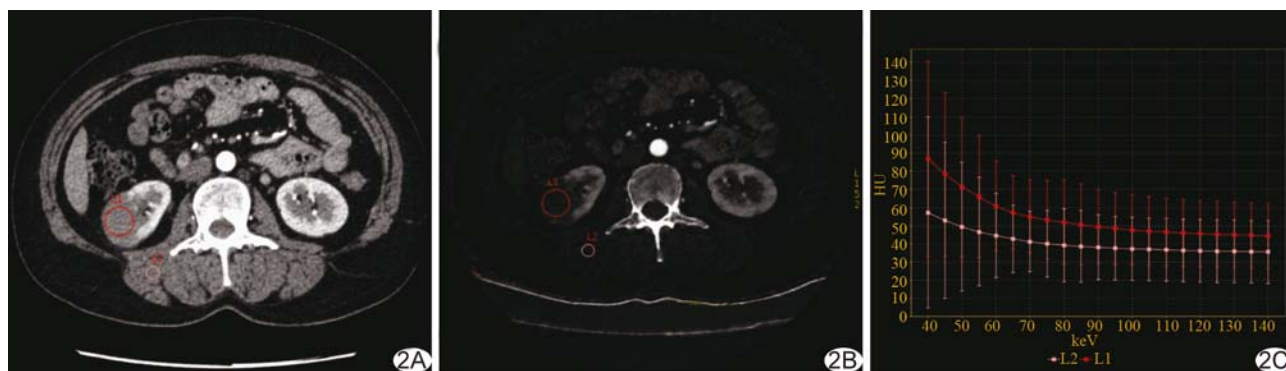


图 2 女,36 岁,右肾错构瘤 A. 动脉期 70 keV 单能量图像; B. 动脉期碘基图像,病灶碘浓度为 $5.47 \times 100 \mu\text{g/ml}$,腰大肌碘浓度为 $2.65 \times 100 \mu\text{g/ml}$; C. 病变(红色)与腰大肌(粉色)的能谱曲线

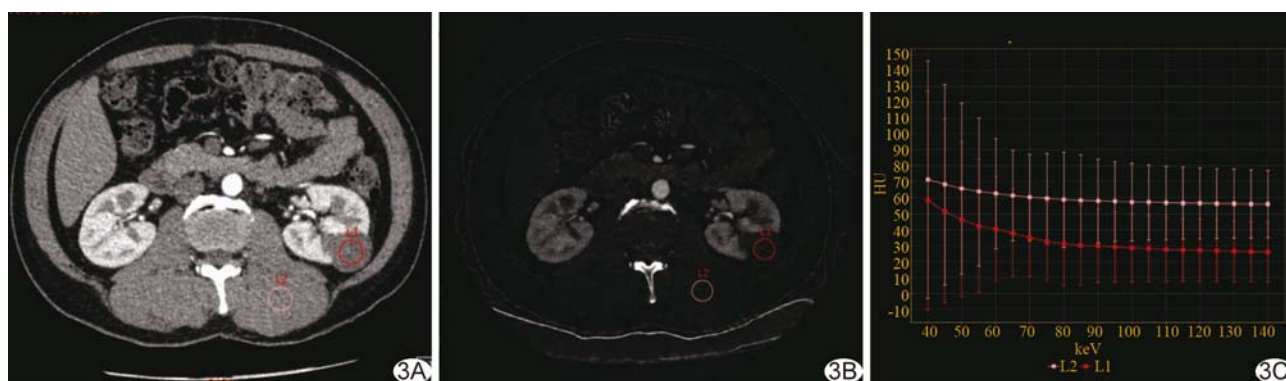


图3 男,41岁,左肾乳头状肾细胞癌 A. 动脉期70 keV单能量图像; B. 动脉期碘基图像,病灶碘浓度为 $4.16 \times 100 \mu\text{g/ml}$,腰大肌碘浓度为 $1.95 \times 100 \mu\text{g/ml}$; C. 病变(红色)与腰大肌(粉色)的能谱曲线

平扫、动脉期及实质期,E组与其他各组间b值差异均有统计学意义(P 均 <0.05);平扫、实质期,C组与D组间b值差异有统计学意义(P 均 <0.05),其余各组间b值差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。见表1。

相关性分析显示,病变动脉期($r=0.771$)和实质期($r=0.695$) α 值及动脉期b值($r=0.487$)与NIC呈正相关(P 均 <0.001),实质期b值与NIC无相关性($r=0.09$, $P=0.500$)。

3 讨论

能谱CT可实现0.5 ms内瞬时140 kVp和80 kVp周期切换并采集数据,同时获得40~140 keV范围内的单能量图像,可用于显示不同组织类型的细微差别^[9]。与混合能量CT值相比,单能量CT值能更准确地反映物质的X线吸收特性^[10]。

一般认为能谱曲线按照指数模型衰减,本研究中通过坐标的平移变换、归一化计算以及非线性最小二乘法进行拟合,设置参数的最小误差和拟合回归平方和的最小误差,获得拉伸指数的最优估计值。非线性决定系数可达到0.8以上。平扫时各组间 α 值差异无统计学意义,说明 α 值不能区分正常和病变的软组织结构的差异。但有研究^[11-12]表明不同分泌泌尿系结石的能谱曲线形态不同,能谱CT参数(结石成分伪彩图及曲线斜率)也不同,考虑采用拉伸指数模型分析不同分泌泌尿系结石的能谱曲线, α 值可能有区别。因此推断,平扫时本算法中 α 值可能与物质成分相关。增强后,部分正常和病变组织间 α 值的差异有统计学意义,同时, α 值与NIC呈正相关,说明 α 值主要反映正常和病变组织内的碘含量,但两者相关性一般,这可能与 α 值的计算模型和ROI的选择有关。Nguyen等^[13]研究表明,碘基值是一个具有高度精确性的定量

参数,可以直接反映脏器和组织的血供情况;另外杜祥颖等^[7]研究表明能谱CT成像能准确反映不同浓度溶液的碘含量;与本研究结果一致。

研究^[14]表明磁共振体素不相干运动成像方法中的 α 值与组织的复杂程度有关,这一结果与本研究结论具有相似性。本研究针对肾脏肿瘤,肾脏血流丰富,通过外周静脉注入的对比剂到达时间早,所以选择的动脉期及实质期时较早,分别为注入对比剂后30 s和70 s。动脉期乏脂肪错构瘤与乏血供肾癌 α 值差异无统计学意义,而实质期后者 α 值高于前者,且差异有统计学意义,这一差异可能与肾脏良、恶性肿瘤的病理结构特点有关^[15]。动脉期组织内碘含量主要受组织内动脉供血影响,本研究选择的动脉期时较早,两者接受含有对比剂的、流速快的毛细血管容量相似,因此组织内碘含量无明显差异;而实质期组织内碘含量受组织内血容量、血管外组织间隙容量及毛细血管通透性影响,由于肾脏恶性肿瘤较良性肿瘤新生血管多,且多不成熟,相邻内皮间隙较大,通透性较高,对比剂外渗较快,因此组织内碘含量高。虽然动脉期和实质期两种肿瘤组织内NIC的差异均无统计学意义,但实质期较动脉期NIC差异更明显,因此实质期 α 值的差异具有统计学意义。相似结果也出现在ccRCC与正常肾皮质的对比研究中,考虑原因应与上述两种肿瘤间的状况相似。所以认为,注入对比剂后的 α 值可以反映不同的正常与病变组织的微循环特性。

各期E组与其他各组间b值差异均有统计学意义;平扫和实质期,C、D两组间b值差异有统计学意义,其余各组间b值差异均无统计学意义。此结果提示b值可能与软组织结构特性有关。平扫时,理想情况下反映各组织结构的b值应保持不变,但由于CT成像过程中电流、电压等影响所致图像噪声不一致、以

及 ROI 选择的不同, CT 值测定存在一定的不准确性, 造成 b 值波动。增强后, b 值受含碘量的影响出现不规律变化。考虑可能因为本研究扫描时相较早, 对比剂未能充分弥散至组织的血管外间隙, 所以认为增强后 b 值的变化规律性不强。

本研究的不足: 针对肾脏几种良、恶性肿瘤的能谱曲线进行分析, 部分病例数较少; 能谱曲线本身受电流、电压、ROI 选择等噪声因素的影响。

总之, 本研究采用拉伸指数非线性回归模型对能谱曲线进行解析, 初步探讨该方法在不同病理类型肾脏肿瘤鉴别诊断中的应用价值, 结果提示平扫时 α 值可能与物质成分相关, 增强后 α 值可以反映正常和病变组织的微循环特性; b 值可能与软组织结构特性有关。因此认为采用拉伸指数模型解析能谱曲线这一方法可以作为软组织肿瘤性病变诊断的辅助手段, 具有一定的临床应用价值, 但其临床实用性仍有待进一步研究。

[参考文献]

- [1] Wei W, Yu Y, Lv W, et al. Predictive value of dual-energy spectral computed tomographic imaging on the histological origin of carcinomas in the ampullary region. *Abdom Imaging*, 2014, 39(4):702-710.
- [2] Lv P, Lin XZ, Li J, et al. Differentiation of small hepatic hemangioma from small hepatocellular carcinoma: Recently introduced spectral CT method. *Radiology*, 2011, 259(3):720-729.
- [3] Wang L, Liu B, Wu XW, et al. Correlation between CT attenuation value and Iodine concentration in vitro: Discrepancy between gemstone spectral imaging on single-source dual-energy CT and traditional polychromatic X-ray imaging. *J Med Imaging Radiat Oncol*, 2012, 56(4):379-383.
- [4] 王茹欣, 董越, 孙利飞, 等. 能谱 CT 显示肺癌不典型骨转移瘤的图像质量和最佳单能量水平. *中华放射学杂志*, 2015, 49(3):164-167.
- [5] 薛蕴菁, 段青, 孙斌, 等. 能谱 CT 在鉴别甲状腺良恶性结节中的临床应用. *中国医学影像技术*, 2013, 29(1):30-33.
- [6] 郝丽, 刘爱连, 汪禾清, 等. CT 能谱成像鉴别膀胱后壁癌与前列腺增生突入膀胱. *中国医学影像技术*, 2013, 29(2):269-272.
- [7] 杜祥颖, 李倩文, 王艳, 等. CT 能谱成像中利用能谱曲线进行碘定量分析. *放射学实践*, 2013, 28(6):616-618.
- [8] 张迎, 邢立红, 武莹莹, 等. 能谱 CT 成像区别不同溶液的可行性研究. *实用放射学杂志*, 2014, 30(5):838-840, 847.
- [9] Srinivasan A, Hoeffner E, Ibrahim M, et al. Utility of dual-energy CT virtual keV monochromatic series for the assessment of spinal transpedicular hardware-bone interface. *AJR Am J Roentgenol*, 2013, 201(4):878-883.
- [10] Langan DA. Gemstone spectral imaging: GE white paper. Waukesha, Wis:GE Healthcare, 2008.
- [11] 李小虎, 余永强, 王万勤, 等. 体外区分泌尿系结石成分: 对比观察 CT 能谱扫描与常规扫描. *中国医学影像技术*, 2011, 27(11):2331-2334.
- [12] Mansouri M, Aran S, Singh A, et al. Dual-Energy computed tomography characterization of urinary calculi: Basic principles, applications and concerns. *Curr Probl Diagn Radiol*, 2015, 44(6):496-500.
- [13] Nguyen NC, Kaushik A, Wolverson MK, et al. Is there a common SUV threshold in oncological FDG PET/CT, at least for some common indications? A retrospective study. *Acta Oncol*, 2011, 50(5):670-677.
- [14] Zhang Z, Yuan Q, Zhou H, et al. Assessment of tumor response to Oxygen challenge using quantitative diffusion MRI in an animal model. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 42(5):1450-1457.
- [15] Chen C, Liu Q, Hao Q, et al. Study of 320-slice dynamic volume CT perfusion in different pathologic types of kidney tumor: Preliminary results. *PLoS One*, 2014, 9(1):e85522.

消息

据《中文核心期刊要目总览》(2014 年版)编委会通知,《中国医学影像技术》杂志入编《中文核心期刊要目总览》2014 年版(即第七版)临床医学核心期刊。

感谢编委会专家、作者及读者长期以来对杂志的关心、支持和厚爱。