

能谱CT成像多个测量参数分析

盖立平¹, 刘爱连², 孙美玉², 刘义军², 孙芹敏², 刘静红², 鞠 烨², 浦仁旺², 田士峰², 李 烨², 丁晓东¹, 王 礼¹, 王桂莲¹, 孙福伯¹

1. 大连医科大学医学影像学院, 辽宁 大连 116044; 2. 大连医科大学附属第一医院放射科, 辽宁 大连 116011

【摘要】目的:探讨能谱CT扫描所测量CT值与碘浓度之间的关系, 测量未知成分混合物的衰减系数、混合物密度和有效原子序数。**方法:**采用GE公司标准定量分析体模, 体模圆周上9个孔, 共安装3个试管(ROI1, ROI2, ROI3), 试管长度100 mm, 外径25 mm, 内径18 mm, 其内装有不同浓度标准碘液, 浓度依次为0.6 mg/mL、0.4 mg/mL、0.2 mg/mL。**结果:**能谱CT成像可以探讨多参数成像, 可以获得CT单能量成像, 混合能量图像、能谱曲线//有效原子序数、混合物的密度对临床诊断的多参数分析提供了理论依据。**结论:**通过能谱CT的理论模型和实验数据结合分析, 可以测量多个成像参数。

【关键词】能谱成像; 碘含量; 混合物密度; 有效原子序数

【中图分类号】R812

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)03-0317-05

Multiple parameters in spectral CT imaging

GAI Li-ping¹, LIU Ai-lian², SUN Mei-yu², LIU Yi-jun², SUN Qin-min², LIU Jing-hong², JU Ye², PU Ren-wang², TIAN Shi-feng², LI Ye², DING Xiao-dong¹, WANG Li¹, WANG Gui-lian¹, SUN Fu-bo¹

1. Department of Medical Imaging, Dalian Medical University, Dalian 116044, China; 2. Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, China

Abstract: Objective To discuss on the relationship between iodine concentration and CT values measured by CT spectra imaging technology, and to measure the attenuation coefficient of mixture of the unknown composition, the density of mixture and the effective atomic number. **Methods** The standard quantitative analysis phantom of GE company was applied. There were nine holes on the circumference of a circle phantom. Three tubes (ROI1, ROI2, ROI3), with 100 mm in the tube length, 25 mm in the outside diameter, and 18 mm in the inside diameter, were installed, with different concentrations of iodine solution. And the different concentrations were, in order, 0.6 mg/mL, 0.4 mg/mL, 0.2 mg/mL. **Results** Multi-parameter imaging could be studied by spectral CT imaging, and CT single energy imaging, hybrid energy imaging, spectral curve, effective atomic number and the density of mixture could be obtained, which provided a theoretical basis for the multi-parameter analysis of clinical diagnosis. **Conclusion** Multiple imaging parameters can be measured by analyzing the theoretical model and experimental data of spectral CT.

Key words: spectral imaging; iodine content; attenuation mixture coefficient density; effective atomic number

前言

在CT成像系统中, 电子高速撞击钨靶发生韧致辐射而产生X射线。电子的能量转换为X光子, 这些X线光子的能量并非一致, 有一个很宽的能量范围,

是连续的能量分布, 用于成像的X线也就具有混合能量的平均效应。具有混合能量的X线通过物质后被硬化, 即经过物体后的射线中高能量的X线的比例大于低能量X线的比例。对于原子量较大的物体如骨头和碘对比剂, 这种选择吸收更为明显, 进而导致X线硬化效应更为明显。传统CT成像是单参数成像, 主要依赖于物质的吸收系数。而能谱CT成像采用单源瞬时切换技术, 在极短时间内(<0.5 ms)完成高低能量(140 kVp-80 kVp)的切换, 可以说是几乎同时同

【收稿日期】2014-12-30

【基金项目】国家自然科学基金(81470078)

【作者简介】盖立平(1970-), 女, 教授, 从事医学物理学的教学和研究工作, E-mail: gai_liping@sina.com。

【通信作者】刘爱连, 教授, 博导, E-mail: cjr.liuailian@vip.163.com。

角度得到匹配的高、低能量采样, 实现投影数据空间的能谱分析^[1-2]。根据物质衰减系数的理论公式, 将每个射线路径上的双能投影都分解成为与两个基物质材料性质相关、能量无关的分量, 然后计算得到相应的原子序数和电子密度积分值, 最后利用CT重建理论得到每个像素点上的有效原子序数和电子密度值, 可以实现多参数成像。能谱成像重建是在原始数据空间进行, 能够保留从 20 keV 前后到 140 keV 的原始能量信息^[3]。通过直接对两组球管电压下获得的能量数据进行解析, 首先获得两种基物质的密度图像以实现物质分离和定量, 然后通过使用物理学提供的随能量变化的质量吸收函数获取 101 个单能量图像。

1 材料和方法

1.1 实验材料

采用GE公司标准定量分析体模, 体模圆周上9个孔, 共安装3个试管(ROI1, ROI2, ROI3), 试管长度100 mm, 外径25 mm, 内径18 mm, 其内装有不同浓度标准碘液, 浓度依次为0.6 mg/mL、0.4 mg/mL、0.2 mg/mL。

1.2 扫描方法

采用GE公司宝石能谱CT对标准体模进行不同条件GSI扫描。参数: 视野FOV=24.5 cm, 层厚为5 mm, 螺距为1.375 mm, 球管旋转速度为0.7 s/HE, 管电流取375 mA, 选择管电压为80/140 kVp, 重建函数均为STND, 能谱成像使用70 keV单能量图像用于图像质量评估。

2 结果

2.1 混合能量图像和能谱曲线

375 mA 管电流扫描时, ROI1、ROI2、ROI3 的对比结果如图1a、图1b、图1c所示。其中能谱曲线图中

的曲线自上至下依次代表ROI1、ROI2、ROI3 三种浓度碘对比剂; 碘浓度不同时, CT图像灰度值有明显差异, 能谱曲线呈现分离状态, 混合物成分不同时有效原子序数大小不同。

2.2 单能量图像成像分析

图2a、图2b、图2c为70 keV单能量图像和基物质对分离后水密度图像和碘密度图像。利用水和碘的质量吸收函数随能量变化关系和求得的基物质对的密度值, 就能计算出感兴趣物质在各个能量点对X射线的吸收系数, 从而实现单能量CT成像^[4]。基物质密度 D_w (基物质水的密度) 和 D_i (基物质碘的密度) 的理论模型^[5-6]依据如下:

$$D_w = \frac{\mu_i(E_{high})\mu(E_{low}) - \mu_i(E_{low})\mu(E_{high})}{\mu_w(E_{low})\mu_i(E_{high}) - \mu_w(E_{high})\mu_i(E_{low})} \quad (1)$$

$$D_i = \frac{\mu_w(E_{high})\mu(E_{low}) - \mu_w(E_{low})\mu(E_{high})}{\mu_w(E_{high})\mu_i(E_{low}) - \mu_w(E_{low})\mu_i(E_{high})} \quad (2)$$

其中 μ_i 、 μ_w 和 μ 分别为碘、水和混合物的线性吸收系数, E_{high} 和 E_{low} 分别指高低能量状态。由基物质密度和单能量状态下的水、碘吸收系数, 可求得该能量状态下的总线性吸收系数和CT值为:

$$\mu(E_{keV}) = D_w \mu_w(E) + D_i \mu_i(E) \quad (3)$$

$$CT = 1000 \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (4)$$

3 分析与讨论

3.1 CT值和标准差与碘浓度的关系

表1是在管电流375 mA时, 样本ROI1, ROI2, ROI3的CT值和标准差对比, 电压范围为40 keV~140 keV对应的单能量图像。对应任一单能量状态下, 样品浓度不同时CT值有明显差别, 随着碘浓度降低(1-3

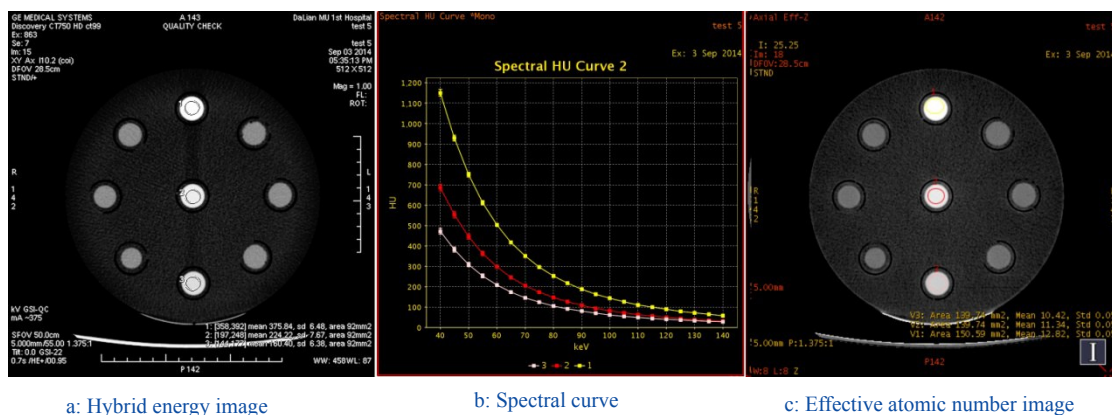


图1 混合能量图像与能谱曲线对比

Fig.1 Hybrid energy image compared with spectrum curve

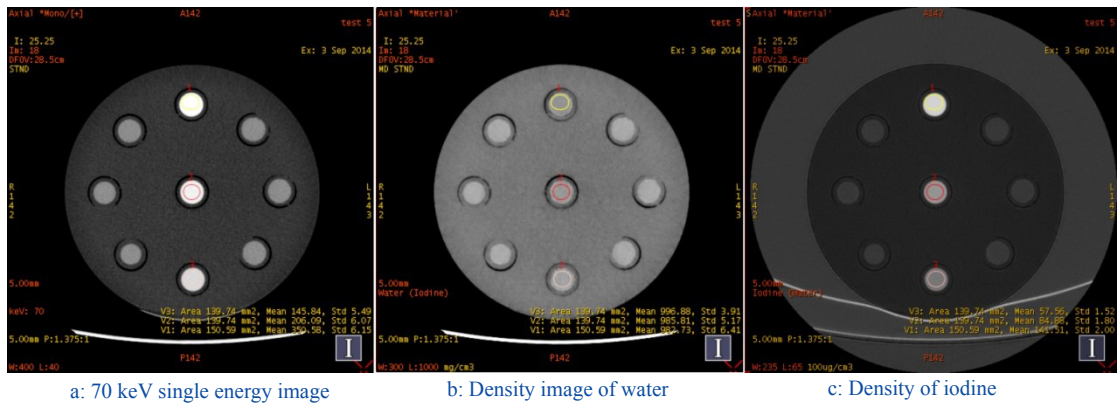


图2 混合能量图像与基物质对密度图像对比

Fig.2 Hybrid energy image compared with the density image of basis materials

号样本),CT值明显下降。在40 keV~80 keV范围内,3种样本的变化规律相同,在90 keV~140 keV范围内样本的变化规律也相同,但不同于前^[7]。

3.2 混合物密度测量结果对比

表2是9对基物质对应测量样本ROI1的密度值,

依据基物质对的分离密度值,可以估算混合物的密度。表中物质1密度列对应基物质1所在列的密度值。如基物质对碘和水的组合, ρ_i 的密度值为141.51($100\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^3$), ρ_w 的密度值为982.73(mg/cm^3),根据各自对应的单位量纲,可以得到混合物的密度值为

表1 375 mA时样本ROI1, ROI2, ROI3在不同管电压下的CT值和标准差

Tab.1 The CT and SD values of 375 mA-ROI1, ROI2, ROI3 in the different tube voltage

keV	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
1-CT	1150.08	749.79	503.50	350.58	252.43	188.23	143.3	111.48	89.01	71.97	58.41
2-CT	686.20	446.01	298.08	206.09	147.43	109.08	82.14	63.03	49.57	39.27	31.19
3-CT	471.94	309.04	208.31	145.84	106.31	80.49	62.21	49.24	40.17	33.17	27.65
1-SD	16.84	11.78	7.36	6.15	7.10	6.64	6.48	6.38	6.38	6.35	6.36
2-SD	17.31	12.30	7.47	6.07	7.13	6.30	5.98	5.74	5.65	5.51	5.45
3-SD	14.71	10.68	6.62	5.49	6.16	5.36	5.02	4.81	4.64	4.50	4.41

表2 375 mA-ROI1-基物质分离密度值

Tab.2 Separated density value of base material to 375 mA-ROI1

Density	Basis material 1	Basis material 2	Density of material 1	Coefficient (mg/cm^3)	Density of mixture (mg/cm^3)	Observed density error	Real density error
2 mg/cm^3	Calcium	Iodine	781.7	2	1466.054	405.392	465.584
200 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$	Iodine	Calcium	-486.73	0.2			
1 mg/cm^3	Calcium	Water	198.42	1	1056.43	-4.232	55.96
1 mg/cm^3	Water	Calcium	858.01	1			
1 mg/cm^3	Calcium	blood	194.64	1	1066.16	5.496	65.69
1 mg/cm^3	blood	Calcium	871.52	1			
1 mg/cm^3	Calcium	bone	22.27	1	1097.14	36.478	96.67
1 mg/cm^3	bone	Calcium	1074.87	1			
1 mg/cm^3	Calcium	fat	214.06	1	1055.1	-5.562	54.63
1 mg/cm^3	fat	Calcium	841.04	1			
200 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$	Iodine	HAP	-144.04	0.2	1251.392	190.73	250.922
2 mg/cm^3	HAP	Iodine	640.1	2			
100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$	Iodine	Water	141.51	0.1	996.881	-63.781	-3.589
1 mg/cm^3	Water	Iodine	982.73	1			
1 mg/cm^3	HAP	Water	421.38	1	1080.5	19.838	80.03
1 mg/cm^3	Water	HAP	659.12	1			
1 mg/cm^3	fa	Water	-10701.1	1	1072.42	11.758	71.95
1 mg/cm^3	Water	fa	11773.47	1			

996.881 mg/cm³。排查离散的坏数据点(CA/I, I/HAP, 1466.054, 1251.392), 则平均混合物密度为1060.662 mg/cm³。如果已知混合物的密度值, 可以判断哪种基物质对测量混合物的密度值更准确, 如果未知混合物的密度值, 可以采用平均混合物密度值求解法。双基元密度误差项是用测量值减去平均混合物密度值; 真实密度误差项是测量值减去真实值, 双基元水碘法测量误差最小, 其他误差偏离较大者, 基本与用平均误差计算结论相同。

3.3 混合物密度和质量吸收系数的关系

X射线与物质发生相互作用的主要过程有光电效应、康普顿效应、电子对效应, 其他次要的作用过程有相干散射、光核反应。在上述5种相互作用形式中, 光电效应、康普顿效应和电子对效应是主要作用形式, 相干散射的概率很小, 光核反应可以忽略。因此, 总的质量吸收系数为:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{\tau}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} + \frac{\mu_p}{\rho} + \frac{\mu_{coh}}{\rho} \quad (5)$$

其中: $\frac{\mu_{\tau}}{\rho} = k_1 \frac{Z^3}{(hv)^3}$ 为光电效应吸收系数, $\frac{\mu_c}{\rho} = k_2 \frac{1}{hv}$ 为康

普顿效应吸收系数: $\frac{\mu_p}{\rho} = k_3 z hv (> 1.02 \text{ MeV})$,
 $\frac{\mu}{\rho} = z \ln(hv) (>> 1.02 \text{ MeV})$

为电子对效应吸收系数, $\frac{\mu_{coh}}{\rho} = k_4 \frac{Z}{(hv)^2}$ 为相干散射吸收系数, $k_1 \sim k_4$ 为常数。

相干散射仅仅在非常低的能量(小于10 keV)和原子序数特别高的物质中重要。由于相干散射过程中没有能量转移, 因此总质能转移系数和质能吸收系数为光电效应, 康普顿效应和电子对效应。通常在10 keV~100 MeV范围内, 能量较低时光电效应占优势, 中间部分康普顿效应占优势, 高端部分电子对效应占优势。对应双能成像的40 keV~140 keV能量范围, 以光电效应和康普顿效应为主, 几乎不会发生电子对效应。质量吸收系数简化为:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{\tau}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} = k_1 \frac{Z^3}{(hv)^3} + k_2 \frac{1}{hv} \quad (6)$$

上式中 hv 代表入射X光子的能量 E , μ 为线性吸收系数, ρ 为密度, Z 代表有效原子序数 Z_{eff} 。

对于混合物或化合物的质量系数等于各种物质的质量吸收系数乘以各自质量百分比的代数和。表达式如下为:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \left(\frac{\mu_{\tau}}{\rho} \right)_i m_i = k_1 \frac{Z_{eff}^3}{(hv)^3} + k_2 \frac{1}{hv} \quad (7)$$

根据(7)式, 如果已知样本测量时常数 k_1 和 k_2 的大小, 再根据测得的有效原子序数和CT值, 就可以估算混合物的密度大小^[8-10]。

$$\rho = \frac{\mu}{k_1 \frac{Z_{eff}^3}{(hv)^3} + k_2 \frac{1}{hv}} \quad (8)$$

利用不同管电压下测得的CT值, 有效原子序数可以估测系数 k_1 和 k_2 。如表1所示, 利用3种体膜的管电压和CT值的关系, 例如对于体膜ROI1, 利用50 keV时, CT=749.79 HU; 60 keV, 时CT=503.5 HU; 80 keV时, CT=252.43 HU, 以CT值为参考, 再根据不同体膜的有效原子序数, 采用多组数据拟合的方法, 可以确定常数 k_1 和 k_2 。在管电流为375 mA时: 体膜ROI1的有效原子序数为: $Z_{eff}=12.82$; 体膜ROI2的有效原子序数为: $Z_{eff}=11.34$; 体膜ROI3的有效原子序数为: $Z_{eff}=10.42$ 。当光子能量分别为40 keV、50 keV、60 keV、80 keV、100 keV时, 水的质量吸收系数 μ_w 分别为0.2248 m²/kg、0.0214 m²/kg、0.0197 m²/kg、0.0179 m²/kg、0.0168 m²/kg。依赖公式如(9)所示

$$\mu = \frac{CT_{low} \mu_w}{1000} + \mu_w = \left(k_1 \frac{Z_{eff}^3}{(hv)^3} + k_2 \frac{1}{hv} \right) \rho \quad (9)$$

利用MATLAB软件工具包, 用多元线性方程组求解函数编程, 可得常数 $\rho \cdot k_1$ 和 $\rho \cdot k_2$ 为: 8.561856×10^{-45} 和 8.958480×10^{-14} 。已知体膜ROI1混合物的真实密度 ρ 为1000.47 mg/mL, 则可求得系数 k_1 和 k_2 为 8.5578×10^{-45} 和 8.9542×10^{-14} 。反之, 利用已知系数 k_1 和 k_2 , 也可以估算混合物的密度值。

3.4 有效原子序数的估算

理论估算有效原子序数: 在物理学中, 对应混合物或化合物的平均有效原子序数可以用下面的理论公式表示: $Z_{eff} = \sqrt[2.94]{\sum_i (f_i Z_i^{2.94})}$, f_i 为第 i 种元素的质量百分比, Z_i 为第 i 种元素的原子序数。但对应未知成分的混合物, 不能依赖理论公式计算电子密度。

实验法估算有效原子序数: 在CT成像中, 有效原子序数是利用瞬间切换的高低两种能量状态下的系数求比值的方法, 间接求得。设低能和高能(40 keV/140 keV)照射时的吸收系数分别为 μ_{low} 和 μ_{high} 。所以当X射线能量单一确定时, 则可得到关于 Z^* , E^* 两个变量的函数 $f(Z^*, E^*)$, 但无法提取到被检物的单个特征量。如果要把 Z^* 值从函数中分离出来, 则

至少需要两组能量的入射X射线, 如公式(10)和(11)。这样就可以把 Z^* 值分离出来, 得到有效原子序数^[11-12]。

$$\mu_{low} = \frac{CT_{low}\mu_w}{1000} + \mu_w = (k_1 \frac{Z_{eff}^3}{(hv)^3} + k_2 \frac{1}{hv})\rho \quad (10)$$

$$\mu_{high} = \frac{CT_{high}\mu_w}{1000} + \mu_w = (k_1 \frac{Z_{eff}^3}{(hv)^3} + k_2 \frac{1}{hv})\rho \quad (11)$$

4 结论

能谱CT成像可以探讨多参数成像, 通过对比CT单能量成像, 混合能量图像, 能谱曲线, 有效原子序数, 混合物的密度, 基物质对的分离密度图等多角度研究CT图像, 使CT成像在临床应用中更具有效率和竞争性^[13-15]。文章通过理论模型和实验数据结合, 探讨了未知成分混合物的衰减系数、密度和有效原子序数的测量方法及参数的确定, 对未知成分的混合物研究提供了有力参考。

【参考文献】

- [1] Jung D, Oh Y, Kim M, et al. Usefulness of the virtual monochromatic image in dual-energy spectral ct for decreasing renal cyst pseudo enhancement: a phantom study[J]. AJR, 2012, 199(6): 1316-1319.
- [2] Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilo voltage switching: Improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT[J]. Radiology, 2011, 259(1): 257-262.
- [3] Yu L, Leng S, Mccollough C. Dual-energy CT-based monochromatic imaging [J]. AJR, 2012, 199: S9-S15.
- [4] Toepker M, Moritz T, Krauss B, et al. Virtual non-contrast in second-generation, dual-energy computed tomography: reliability of attenuation values[J]. Eur J Radiol, 2012, 81: e398-e405.
- [5] Xin L, Li FY, Andrew N, et al. Quantitative imaging of element composition and mass fraction using dual-energy CT: Threematerial decomposition[J]. Med Phys, 2009, 36(5): 1602-1609.
- [6] Primak AJ, Ramirez G. Improved dual-energy material discrimination for dual-source CT by means of additional spectral filtration[J]. Med Phys, 2009, 36: 1359-1369.
- [7] 王乐, 刘斌. 能谱成像测量单能量下CT值与碘含量的相关性分析[J]. 实用放射学杂志, 2012, 28(5): 784-788.
- Wang L, Liu B. The correlation between CT value and iodine content in vitro using spectral CT imaging [J]. Journal of Practical Radiology, 2012, 28(5): 784-788.
- [8] 刘爱连, 沈云. 能谱CT临床应用图谱[M]. 北京: 人民军医出版社, 2014: 2-26.
- Liu AL, Shen Y. Atlas of clinical applications of spectral CT [M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2014: 2-26.
- [9] 吉强, 洪洋. 医学影像物理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009: 5-25.
- Ji Q, Hong Y. Medical imaging physics[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2009: 5-25.
- [10] 陈克敏. 能谱CT的基本原理与临床应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 40-55.
- Chen KM. Principles and clinical applications of spectral CT imaging [M]. Beijing: Science Press, 2012: 40-55.
- [11] Landry G, Joao S, Mathieu G, et al. Deriving effective atomic numbers from DECT based on a parameterization of the ratio of high and low linear attenuation coefficients[J]. Phys Med Biol, 2013, 58: 6851-6866.
- [12] 黄科峰, 周宝成. 能谱CT有效平均原子序数对离体尿路结石成分分析的前瞻性研究[J]. 临床医师杂志, 2011, 39(4): 615-617.
- Huang KF, Zhou BC. Prospective study on component analysis of isolated urinary calculus by effective average atomic number of energy spectrum CT[J]. J Clinician, 2011, 39(4): 615-617.
- [13] 王乐, 刘斌. 能谱CT对碘含量测量准确性的实验研究[J]. 放射学实践, 2012, 27(3): 264-267.
- Wang L, Liu B. Can gemstone spectral imaging accurately determine iodine concentration (A phantom study) [J]. Radiologic Practice, 2012, 27(3): 264-267.
- [14] 杜祥颖, 李倩文. CT能谱成像中利用能谱曲线进行碘定量分析[J]. 放射学实践, 2013, 28(6): 616-618.
- Du XY, Li QW. Preliminary study on the quantitative analysis of iodine with spectral curve in CT spectral imaging [J]. Radiologic Practice, 2013, 28(6): 616-618.
- [15] 范兵, 邱建星. 双能CT对离体泌尿系尿酸结石的诊断价值[J]. 放射学实践, 2012, 27(3): 268-270.
- Fan B, Qiu JX. Diagnosis of uric acid calculi by dual energy CT: with ex vivo calculi spectroscopy as the reference standard [J]. Radiologic Practice, 2012, 27(3): 268-270.