·能谱 CT 影像学专题·

能谱 CT 对碘含量测量准确性的实验研究

王乐，刘斌，汪洁，王万勤，周勇，吴兴旺，朱晓红，李小虎，张帅

【摘要】 **目的**：利用 CT 能谱成像(GSI)技术测定不同浓度含碘溶液在静止及运动状态下的碘含量，分析 GSI 碘基图像上碘浓度的测量值与真实值之间的关系。**方法**：采用 GE 公司标准体模，其内放置有 9 种不同浓度的碘溶液试管，浓度依次为 0.4、0.7、2.0、5.0、10.0、20.0、30.0、50.0 和 100.0 mg/ml。使用能谱 CT GSI 模式进行扫描，球管旋转一周时间分别为 0.6、0.8 及 1.0 s/r。利用碘基图，选择相同层面、相同大小兴趣区，测量在静止及运动状态下(振幅为 10 mm，频率为 15 bpm)体模试管内碘含量，采用相关分析及配对 t 检验分析碘含量的测量值与真实值间的关系。**结果**：球管转速为 0.8 及 1.0 s 时，无论是静止还是运动状态下，碘含量的测量值与真实值之间均具有明显的相关性($r=0.999$，$P<0.001$)，且两者之间的差异无统计学意义($P>0.05$)；而球管转速为 0.6 s/r 时，碘浓度测量值与真实值之间仅存在相关性($P<0.001$，$r=0.999$)，两者数值之间差异有统计学意义($P<0.05$)。**结论**：能谱 CT 在球管转速为 0.8 及 1.0 s/r 时能准确测量不同浓度溶液中的碘含量，即使在运动状态下亦可以用于定量分析，有望成为一种可靠的物质成分分析方法。

【关键词】 体层摄影术，X 线计算机；能谱成像；定量分析；碘含量

【中图分类号】R814.42；R814.41 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2012)03-0264-04

Can gemstone spectral imaging accurately determine iodine concentration? (**a phantom study**)

WANG Le, LIU Bin, WANG Jie, et al. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230022, P. R. China

【**Abstract**】 **Objective**: To assess the feasibility of quantification of iodine at static or pulsating status with gemstone spectral imaging (GSI). **Methods**: The phantom containing nine test tubes of solution which varied in iodine concentrations (0.4, 0.7, 2.5, 10, 20, 30, 50 and 100mg/ml) underwent GSI examination with spectral CT (Discovery CT750 HD) at static status and pulsating with frequency of 15 bpm (beat per minute), amplitude of 10mm, at the tube rotation speed of 0.6, 0.8 and 1.0s/r, respectively. All data were transferred to GSI viewer to acquire iodine-based images at which the iodine concentrations were measured with the same size of regions of interest at the same level. The relation and discrepancy between measured iodine concentrations and real iodine concentrations were compared by paired t-test and the linear regression. **Results**: At the tube rotation speed of 0.8 and 1.0s/r, either at static status or pulsating status, the measured concentrations were obviously correlated to the real concentrations ($r=0.999$, $P<0.001$) without significant difference between these two values ($P>0.05$). However, at the tube rotation speed of 0.6s/r, there was significantly statistical difference between the measured values and the real values ($P<0.05$) with only linear correlation between the two concentrations ($r=0.999$, $P<0.001$). **Conclusion**: GSI of spectral CT is a reliable method to accurately quantify iodine with bobbing at the tube speed of 0.8 and 1.0s/r. Owing to its accurate quantification of iodine, GSI might be useful to characterize and differentiate tissues and lesions.

【**Key words**】 Tomography, X-ray computed; Spectral imaging; Quantitative analysis; Iodine concentration

CT 从诞生之日开始，就一直使用混合能量(kilovolt peak，kVp)成像技术进行扫描，但这种模式下产生的 X 线不是单一能量，而是多种能量光的混合。混合能量穿过物体时会导致 X 线能量的平均，使信息丢失、产生硬化伪影[1]，造成 CT 值测量的不准确 。而以瞬时双 kVp 切换为核心的能谱成像(gemstone spectral imaging，GSI)技术彻底改变了几十年来的常规成像模式，不仅可以获得单能量图像(kiloeletron volts，keV)，更可以反映各种基物质(碘、水、钙等)的分布状态，获得不同的基物质图像，并能同时减少一部分硬化伪影。CT 能谱成像的这种可以生成新的物质密度图像的能力为 CT 实现定量测量提供了依据。笔者通过基础实验研究，利用能谱成像技术对标准体模中碘含量进行测定，探讨和分析在静止和一定运动状态下，GSI 技术定量测量物质含量的准确性。

材料与方法

1. 实验材料

采用 GE 公司标准定量动态分析体模。体模分为两部分：定量模型及动力控制装置。定量体模用来安置待测试管，其圆周上有 8 个孔，相互间隔 45°，中心一个孔，共可安装 9 个试管。试管长度为 100 mm，外径为 25 mm，内径为 18 mm，其内装有不同浓度碘水溶液，浓度依次为0.4、0.7、2.0、5.0、10.0、20.0、30.0、

作者单位：230022 合肥，安徽医科大学第一附属医院 CT 室(王乐、刘斌、汪洁、王万勤、周勇、吴兴旺、朱晓红、李小虎)；110006 北京，通用电气医疗集团 CT 影像研究中心(张帅)

作者简介：王乐(1984－)，女，安徽淮南人，住院医师，主要从事神经系统影像诊断工作。

通讯作者：刘斌，E-mail：lbhy2321@126.com

50.0 及 100.0 mg/ml。动力装置可以通过调节振幅及频率来模拟人体的各种运动状态，其中最常见的就是呼吸运动。本实验中将运动参数设定为上下往返运动，振幅为 10 mm，频率为 15 次/分，来模拟呼吸运动，以判断在呼吸运动存在时 CT 值测量是否准确。

2. 扫描方法

采用 GE Discovery CT750 HD 宝石 CT 机对处于静止及运动状态的体模进行扫描。两次扫描采用相同的参数：视野 25 cm×25 cm，层厚 5 mm，层间距 5 mm，螺距 0.984，采用 GSI 模式进行扫描，球管旋转时间分别为 0.6、0.8 和 1.0 s/r。

3. 图像处理

用 GSI Viewer 浏览器对静止及运动状态下的图像进行分析处理。利用基物质分离技术，得到基物质图像。基于碘/水对，选择碘基图上相同层面和相同大小兴趣区（regions of interest，ROI）测量溶液内碘含量，ROI 面积约为 40 mm^2。对同一试管划定 3 个兴趣区，测量 3 次，取平均值作为此试管的碘浓度测量值。对比碘含量的真实值与测量值之间的差异。比较各组间的测量误差，计算公式如下：

$$误差率=\frac{测量值-真实值}{真实值}\times 100\% \quad (1)$$

4. 统计学分析

使用 SPSS 13.0 统计分析软件，采用线性回归分析及配对 t 检验来判定碘浓度测量值与真实值之间的关系，以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结　果

GSI 模式扫描下，基于碘基图，观察静止及运动状态下不同浓度含碘试管的图像。测量不同扫描时间时体模于静止及运动状态下各个含碘试管浓度的测量结果见表 1。不管是静止还是运动状态试管均存在对比剂硬化伪影，而且在运动状态下还存在运动伪影（图 1）。但即使在各种伪影存在的情况下，各个球管旋转一周时间时，随着实际碘浓度的升高，碘浓度测量值均随之递增。

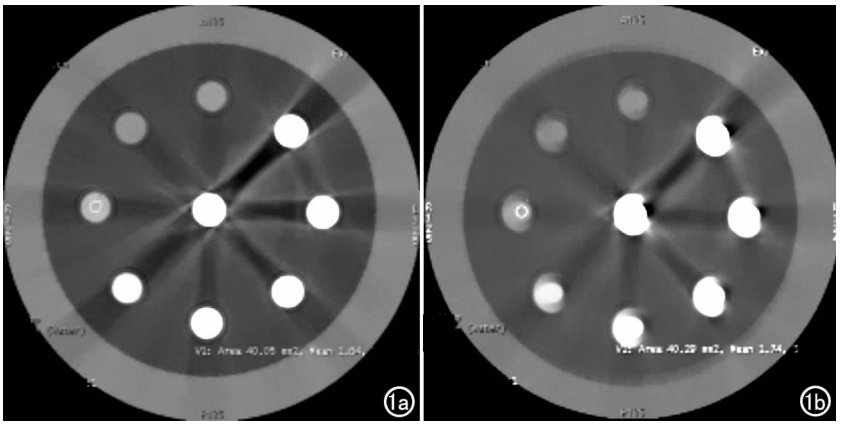

图 1　不同碘浓度试管的碘基图，示静止及运动状态下即使在伪影存在的情况下，试管内碘含量的测量值（密度）仍随着碘浓度的增高而增高。a）静止状态；b）B 运动状动。

不同球管旋转一周时间时碘浓度的真实值和测量值的相关性及一致性分析结果见表 2。无论在静止还是在一定的运动状态下，在球管旋转时间为 0.8 及 1.0 s/r时，碘浓度的测量值与真实值之间成线性正相关，而且两者数值之间差异无统计学意义，可以认为两者来源于同一个总体，故认为测量值与真实值一致。而在球管旋转时间为 0.6 s/r 时，碘浓度的测量值与真实值比较结果显示，二者并不来源于相同的总体，认为两者的数值之间存在差异；但两者之间仍存在明显线性相关，相关系数也很高（$r=0.999$），提示测量结果还是可以很好地反映出碘浓度的变化。

表 2　碘浓度测量值与真实值间相关性及一致性检验结果

状态	回归分析		配对 t 检验	
	P 值	r 值	t 值	P 值
静止				
0.6s/r	<0.001	0.999	0.337	0.010
0.8s/r	<0.001	0.999	0.098	0.925
1.0s/r	<0.001	0.999	−0.367	0.723
运动				
0.6s/r	<0.001	0.999	2.407	0.043
0.8s/r	<0.001	0.999	0.222	0.830
1.0s/r	<0.001	0.999	−0.249	0.810

表 1　不同转速静止及运动状态下碘浓度真实值及测量值　(mg/ml)

编号	实际碘浓度	碘浓度测量值（静止）			碘浓度测量值（运动）		
		0.6s/r	0.8s/r	1.0s/r	0.6s/r	0.8s/r	1.0s/r
1	0.4	0.90±0.17	0.44±0.19	0.33±0.13	0.77±0.21	0.48±0.17	0.35±0.12
2	0.7	1.22±0.15	0.72±0.17	0.72±0.14	1.13±0.18	0.66±0.15	0.65±0.13
3	2.0	2.25±0.20	1.65±0.19	1.60±0.17	2.09±0.17	1.78±0.16	1.66±0.13
4	5.0	5.60±0.17	4.84±0.16	4.67±0.18	5.38±0.16	4.90±0.16	4.65±0.14
5	10.0	11.88±0.18	10.58±0.14	10.48±0.14	11.66±0.19	10.72±0.15	10.59±0.17
6	20.0	23.10±0.19	21.30±0.19	20.90±0.15	22.72±0.19	21.35±0.17	20.84±0.15
7	30.0	34.40±0.26	31.86±0.25	31.37±0.19	33.50±0.16	31.79±0.22	31.12±0.18
8	50.0	55.34±0.56	51.51±0.40	50.99±0.41	53.42±0.29	50.91±0.34	50.63±0.16
9	100.0	102.17±2.55	95.73±1.47	94.93±1.56	99.02±0.83	96.52±1.81	96.61±1.64

表 3 不同转速静止及运动状态下测量误差率 (%)

编号	实际碘浓度 (mg/ml)	测量误差率(静止)			测量误差率(运动)		
		0.6s/r	0.8s/r	1.0s/r	0.6s/r	0.8s/r	1.0s/r
1	0.4	125.00	10.00	−17.50	92.50	20.00	−12.50
2	0.7	74.28	2.86	2.86	61.43	−5.71	−7.14
3	2.0	12.50	−17.50	−20.00	4.50	−11.00	−17.00
4	5.0	12.00	−3.20	−6.60	7.60	2.00	7.00
5	10.0	18.80	5.80	4.80	16.60	7.20	5.90
6	20.0	15.50	6.50	4.50	13.60	6.75	4.20
7	30.0	14.67	6.20	4.57	11.67	5.97	3.73
8	50.0	10.68	3.02	1.98	6.84	1.82	1.26
9	100.0	2.17	−4.27	−5.07	−0.98	−3.48	−3.39

测量并计算各组间的测量误差率，结果见表 3。球管旋转时间为 0.8 及 1.0 s/r 时各个浓度的测量误差率均不大于 20%；在球管旋转时间为 0.6 r/s 时，低浓度下（0.4 及 0.7 mg/ml）测量误差率较大（>60%），较高浓度（2～100 mg/ml）时测量误差率相对较小。

讨 论

传统 X 线采集信息基于混合能量，产生的 CT 值不够精准，也不能够进行物质的分离测量，想要解决这一难题，唯有通过双能量成像[2-3]。以往的双能量成像（如双源 CT）是由两套不同的球管和探测器构成，因此可以发射不同能量的 X 线，进而进行能量的分离。但由于两组数据采集信号的角度不同，因此这种物质能量的分离仅仅存在于图像层面。而能谱 CT 采用的是单源双能量技术，即单个球管在 0.5 ms 内通过高低两种能量的快速切换，获取两组数据。这两组数据同源、同时、同向，具有高度一致性，因此能够在原始数据上进行重建[4]。通过计算，可以把每种结构用对 X 线吸收比例不同的任意两种基物质的组合来表示，即用基物质的密度来表示组织的密度。这两种物质亦可以单独成像，称为基物质密度图像。至此，CT 也由原来仅依靠 CT 值的单参数成像变成了多参数成像，并能够进行物质的分离[5]，是 CT 技术的一次质的飞跃[6-7]。本实验采用碘水混合液，并利用碘和水作为基物质对，可以从碘基图上准确测量得到溶液的碘含量。

1. 运动状态对碘含量测量准确性的影响

人体在扫描过程中存在呼吸运动、血管搏动及胃肠道蠕动等，这些运动伪影的产生给 CT 值或物质浓度的定量测量带来了困难。因此，瞬时双能量获得的图像质量及基物质图像测量的准确性应尽量不受这些因素的影响。实验结果显示，无论静止还是在一定的运动状态下，球管旋转时间为 0.8 及 1.0 s/r 时，碘浓度的测量值与真实值之间呈线性正相关，且两者数值之间无明显差异。这一结果表明，能谱 CT 的碘基图无论是静止时还是在一定的运动状态下均能够真实地测量到碘溶液的碘浓度。而在球管旋转时间为 0.6 s/r时，无论静止或运动状态下，能谱 CT 值与碘浓度之间也存在明显的线性正相关（r 值为 0.999），说明此时测量碘浓度也能准确地反映真实碘浓度的变化趋势，但定量测量误差率相对较大。

2. 球管转速对碘含量测量准确性的影响

选择合适球管的旋转时间是临床工作中关心的另一个问题。球管旋转速度跟 X 线的辐射剂量密切相关，减少患者的辐射剂量是国际上研究的热点[8-9]。球管旋转一周时间越短，患者接受的辐射剂量越小，但采集的信息有限，测量时会出现较大的误差。球管旋转一周时间长，采集信号丰富，但患者接受的辐射剂量也随之增加。本实验中选择了实际临床应用中 3 种常用的球管旋转时间 0.6、0.8 及 1.0 s/r。在 0.6 s/r 时，碘浓度的测量值与真实值之间存在线性相关，但两者数值间存在统计学差异，也就是说在此旋转时间时基物质图像不能准确地反映待测物质的含量。这可能是因为球管旋转较快时，信号采集量有限造成的。而球管旋转时间在 0.8 及 1.0 s/r 时，碘浓度的测量值与实际值之间没有明显统计学差异，表明在碘基图上可以准确地测量出碘浓度。在 0.8 及 1.0 s/r 这两个球管旋转时间中，采用前者患者接受的辐射剂量较小，同时又能够准确反映待测物体的密度，更适用于临床。

3. 浓度的高低对测量准确性的影响

本实验中发现，球管旋转时间为 0.6 s/r 时，碘浓度的测量误差率在低浓度范围内较大，而较高浓度范围内的误差率与 0.8 及 1.0 s/r 时相似。这提示浓度越低，越需要选择长的球管旋转时间，才能测量到准确的信息。这一点也有待于在今后的研究中进一步验证。

本实验结果表明，可以利用 GSI 技术 CT 扫描得到碘基图像，并且在基物质图像上准确地测量碘含量。同样，如果采用其它基物质对，如钙水、钙碘、血水等，也能测量出相应的基物质组成密度，用来分析其它不同物质的 X 线吸收值，体现了能谱 CT 在物质含量的分离和定量测量方面的巨大优势。并且无论是在静止

还是在一定的运动状态下，定量测量均表现出较高的稳定性。

尽管能谱成像为 CT 研究开拓了新的思维方向和思路[10]，但目前还存在一些问题。如怎样选择合适的基物质对，以及如果选择的基物质对与实际物质的组成成分差异较大，测量值的意义究竟有多大，这有待于今后进一步的研究和探讨。而且本实验中采用的模型为标准体模，与人体运动的实际情况可能有所不同，其在临床工作中的应用价值及定量测量的准确性也有待于进一步的临床研究和验证。

参考文献：

[1] Lin XZ, Miao F, Li JY, et al. High-definition CT Gemstone spectral imaging of the brain: initial results of selecting optimal monochromatic image for beam-hardening artifacts and image noise reduction[J]. J Comput Assist Tomogr, 2011, 35(2): 294-297.

[2] Sidky EY, Zou Y, Pan X. Impact of polychromatic X-ray sources on helical, cone-beam computed tomography and dual-energy methods[J]. Phys Med Biol, 2004, 49(11): 2293-2303.

[3] Graser A, Johnson TR, Hecht EM, et al. Dual-energy CT in patients suspected of having renal masses: can virtual nonenhanced images replace true nonenhanced images? [J]. Radiology, 2009, 252(2): 433-440.

[4] Fleischmann D, Boas FE. Computed tomography——old ideas and new technology[J]. Eur Radiol, 2011, 21(3): 510-517.

[5] Zhang D, Li X, Liu B. Objective characterization of GE discovery CT750 HD scanner: gemstone spectral imaging mode[J]. Med Phys, 2011, 38(3): 1178-1188.

[6] Rogalla P, Kloeters C, Hein PA. CT technology overview: 64-slice and beyond[J]. Radiol Clin North Am, 2009, 47(1): 1-11.

[7] 林晓珠，李卫侠，朱延波，等. 宝石能谱 CT 在肿瘤诊断中的初步应用[J]. 诊断学理论与实践，2010，9(2)：155-160.

[8] Mollet NR, Cademartiri F, van Mieghem CA, et al. NRHigh-resolution spiral computed tomography coronary angiography in patients referred for diagnostic conventional coronary angiography [J]. Circulation, 2005, 112(15): 2318-2323.

[9] Raff GL, Gallagher MJ, O'Neill WW, et al. Diagnostic accuracy of noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography[J]. J Am Coll Cardiol, 2005, 46(3): 552-557.

[11] Schlomka JP, Roessl E, Dorscheid R, et al. Experimental feasibility of multi-energy photon-counting K-edge imaging in pre-clinical computed tomography[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(15): 4031-4047.

（收稿日期：2011-10-17 修回日期：2012-02-11）

第十五届全国腹部影像学会议征文通知

为加强全国放射学界同道的学术交流，促进学科的繁荣与发展，经中华医学会学术会务部批准，由中华医学会放射学分会腹部学组主办，广西医学会及广西放射学分会承办的第十五届全国腹部医学影像学会议将于 2012 年 5 月 17～20 日在广西桂林召开。会议将有国内外著名专家作专题讲座，并进行多种形式的学术交流。入选论文将编入会议《论文汇编》，所有与会者将获得国家级Ⅰ类继续教育学分。欢迎广大同仁积极参与。现将会议有关事项通知如下。

一、征文内容

1. 常规及数字 X 线成像的临床应用

2. CT，MRI 及其新技术应用与基础研究

3. 分子影像学

4. 介入放射诊疗技术应用及研究

5. 影像技术与图像后处理

二、征文要求

1. 本次会议全部采用网上投稿。登录大会网站 www. chinaradiology. org ，实名注册投稿。

2. 恕不接受信函、传真、软盘和 Email 投稿。

3. 应征论文必须具有科学性、先进性、实用性，重点突出；文字力求准确、精练、通顺，摘要中不要附图表。根据网上投稿要求，分别按目的、方法、结果和结论四部分填写 4. 截稿时间 2011 年 4 月 30 日。

三、此次会议拟授予国家级Ⅰ类继续医学教育学分。

四、会议地点：广西桂林市

（中华医学会放射学分会 广西医学会 中华放射学分会腹部学组 广西医学会放射学分会）