

• 研究原著 •

能谱CT成像中测量位置与校正系数的关系

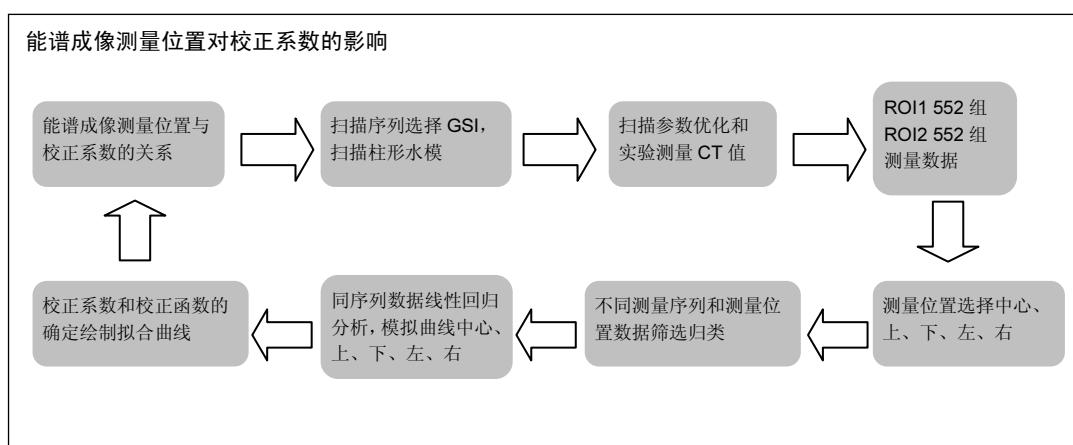
盖立平¹, 刘爱连², 刘义军², 孙美玉², 刘静红², 浦仁旺², 孙敏芹², 丁晓东¹, 王礼¹(¹大连医科大学物理教研室, 辽宁省大连市 116044; ²大连医科大学附属第一医院放射科, 辽宁省大连市 116011)

引用本文: 盖立平, 刘爱连, 刘义军, 孙美玉, 刘静红, 浦仁旺, 孙敏芹, 丁晓东, 王礼. 能谱 CT 成像中测量位置与校正系数的关系[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(31):4677-4686.

DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2016.31.017

ORCID: 0000-0002-1682-2645(盖立平)

文章快速阅读:



文题释义:

能谱成像扫描序列: 不同的扫描参数组合, 构成不同的扫描序列, 如序列 GSI-56(转速 0.6 s/r, 管电流 275 mA, 视野 Medium, 螺距 0.984, 层厚 5 mm)。实验采用不同的扫描数据测量水模, 共测量数据 552 组。

测量位置校正: 测量数据读取选取大小 2 个测量区域, ROI1 和 ROI2。测量位置选取中心点和上下左右 4 个方向的数据, 并都中心点数据进行对比。不同位置测量数据结果有差别, 且不同位置影响各不相同, 利用非线性统计模型可以得到不同位置的校正函数。

摘要

背景: 能谱 CT 成像研究中, 扫描参数的选择是大多数研究者容易考虑的, 而针对测量位置对成像的影响往往被忽略。实际测量发现不同的测量位置对测量结果有显著影响。通过大量数据的测量和数学模型可以对测量位置带来的结果差异进行校正, 结果与真实数据吻合度较高。

目的: 探讨能谱 CT 成像不同测量位置对测量结果的影响, 优化校正系数。

方法: 采用 GE 公司标准水模, 5 个扫描参数有序组合, 测量 552 组数据。测量方法分为大小两个测量范围, 分别为 ROI1 和 ROI2。水模上选取中心、上北、下南、左西、右东 10 个测量点测量 CT 值。归类筛选相同测量序列的 ROI1 和 ROI2 测量数据。建立数学模型, 利用概率统计分析法, 校正位置系数, 建立校正函数, 绘制实验模拟曲线。

结果与结论: ①能谱 CT 水模成像 ROI1 方法测量好于 ROI2 方法测量; ②不同的扫描序列测量结果不同。相同的扫描序列, 不同的测量位置对测量结果有显著影响, 且不同位置影响效果不同; ③但通过建立数学模型, 采用统计分析法可以获得不同位置的校正函数; ④结果提示, 通过能谱 CT 扫描参数的理论模型和实验数据结合分析, 可以校正位置系数, 优化测量结果。

关键词:

骨科植入物; 数字化骨科; 能谱成像; 水模; 位置校正系数; 非线性回归分析; 国家自然科学基金

主题词:

回归分析; 组织工程

基金资助:

2014 年国家自然基金项目一般课题(2015-01/2016-12), 课题批准号: 81470078

盖立平, 女, 1970 年生, 吉林省四平市人, 汉族, 1995 年东北师范大学毕业, 硕士, 教授, 主要从事从事医学影像物理学的教学和研究工作。

通讯作者: 刘爱连, 博士, 教授, 博士生导师, 大连医科大学附属第一医院放射科, 辽宁省大连市 116011

中图分类号: R318

文献标识码: B

文章编号: 2095-4344

(2016)31-04677-10

稿件接受: 2016-05-06

Gai Li-ping, Master,
Professor, Department of
Physics, Dalian Medical
University, Dalian 116044,
Liaoning Province, China

Corresponding author:
Liu Ai-lian, M.D., Professor,
Doctoral supervisor,
Department of Radiology,
First Affiliated Hospital,
Dalian Medical University,
Dalian 116011, Liaoning
Province, China

Relationship of correction coefficient and measuring position in spectral CT imaging

Gai Li-ping¹, Liu Ai-lian², Liu Yi-jun², Sun Mei-yu², Liu Jing-hong², Pu Ren-wang², Sun Min-qin²,
Ding Xiao-dong¹, Wang Li¹ (¹Department of Physics, Dalian Medical University, Dalian 116044, Liaoning
Province, China; ²Department of Radiology, First Affiliated Hospital, Dalian Medical University, Dalian
116011, Liaoning Province, China)

Abstract

BACKGROUND: In spectral CT imaging study, the selection of scanning parameters is considered by most researchers, but the effects of measuring position are often overlooked. Actual measurement found that different measurement location had significant impact on the result of the measurement. Through measurement and mathematical model of a large amount of data, we can correct the measurement results of different location. The results with real data alignment are higher.

OBJECTIVE: To explore effects of different measuring positions on results in spectral CT imaging, and to optimize correction coefficients.

METHODS: GE standard water phantom was applied to orderly obtain 5 combined scanning parameters with 552 groups of data. Size measurement method was divided into two measuring range: ROI1 and ROI2. We selected 10 points to measure CT value, including Center, North, South, West and East. The measurement data of ROI1 and ROI2 were classified and screened based on the same sequence. Mathematical modeling and probability statistics analysis were used to optimize correction coefficient, get calibration function and draw experimental simulation curve.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Measuring methods of ROI1 were superior to the ROI2's on water phantom in spectrum CT. (2) To different scanning sequences, the measuring results were different. To the same scanning sequences, the measurements for different positions on water phantom in spectrum CT had remarkable influence on the measuring results, which varied from points to points. (3) Through setting up mathematical modeling, using method of statistical analysis, we could get the correction function on different measuring positions. (4) Above results confirmed that compared with the theoretical model and the experimental data of spectral CT scanning parameters, the coefficients of position can be adjusted, which can optimize the measuring results.

Subject headings: Regression Analysis; Tissue Engineering

Funding: the General Program of National Natural Science Foundation of China in 2014
(2015-01/2016-12), No. 81470078

Cite this article: Gai LP, Liu AL, Liu YJ, Sun MY, Liu JH, Pu RW, Sun MQ, Ding XD, Wang L. Relationship of correction coefficient and measuring position in spectral CT imaging. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2016;20(31):4677-4686.

0 引言 Introduction

在CT成像系统中, 用于成像的X射线具有混合能量的平均效应^[1-4]。具有混合能量的X射线通过物质后被硬化, 而导致X射线硬化效应更为明显。而能谱CT成像采用单源瞬时切换技术^[5-7], 在极短时间内(< 0.5 ms)完成高低能量(140–80 kVp)的切换^[8-11], 可以说几乎同时同角度得到匹配的高、低能量采样, 实现投影数据空间的能谱分析^[12-13]。但在实际成像过程中, 序列扫描参数的选择是大多数研究者容易考虑的, 而针对测量位置对成像的影响往往被忽略^[14-16]。且不同的扫描序列影响不同。针对这一问题, 可用的评价方法有指数评价^[17]、模糊评价^[18]、非线性回归分析。

课题组测试不同序列实验数据共552组, 利用MATLAB软件编程, 采用非线性回归分析法, 研究不同

位置对测量结果的影响, 给出了校正方程^[19-21]。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 非线性回归模型分析。

1.2 时间及地点 于2015年9月至2016年2月在大连医科大学附属第一医院放射科完成。

1.3 材料 采用GE公司标准水模, 不同的扫描序列分组测试, 采用扫描序列有47个, 测量大小范围ROI1和ROI2共10个测量点数据552组, 每一个扫描序列的测量位置有中心、相对中心取上北、下南、左西、右东(数据来源于大连医科大学附属第一医院放射科自然课题组), 其中有效数据550组。扫描参数有转速(s/r), 管电流(mA), 视野(Large and Medium), 层厚(mm)和螺距共5个参数, 水模数据测量选取ROI1和ROI2两种测量方法。

表1 不同扫描序列测量结果(截选)

Table 1 Measurement results to different scan sequences (part data)

GSI	s/r	mA	L/M	螺距	层厚	C1	N1	S1	W1	E1	C2	N2
37	0.8	260	1	1.375	5	0.96	0.47	2.17	1.56	1.08	1.39	0.62
53	0.5	360	1	1.375	5	-0.62	-1.2	-1.3	-1.78	-0.66	-0.95	-1.26
38	0.8	260	1	1.375	5	-0.69	0.04	0	0.49	-0.77	-0.22	-0.13
46	0.7	275	1	1.375	5	-0.24	0.25	-0.42	-0.37	0.47	0.07	0.02
54	0.6	275	2	1.375	5	2.03	1.3	2.85	2.46	1.68	32.19	2.1
40	0.6	360	2	1.375	5	1.21	1.1	0.95	0.26	2.47	1.06	1.85
31	0.6	375	2	1.375	5	2.07	2.04	3.01	2.93	1.38	2.07	2.17
41	0.6	360	1	1.375	5	0.3	-0.2	1	-0.17	1.12	0.09	-0.08
32	0.6	375	1	1.375	5	0.78	1.11	1.61	0.37	2.73	1.06	1.36
33	0.6	375	2	1.375	5	0.77	1.11	1.41	1.71	0.41	1.07	1.02
42	0.6	360	1	1.375	5	-0.34	0.22	-0.77	-0.63	-0.48	-0.34	-0.11
37	0.8	260	1	1.375	1.25	0.93	0.46	1.81	1.67	1.58	1.44	0.69
45	0.7	275	1	1.375	1.25	0.68	0.98	1.23	0.33	1.14	1.01	1.51
53	0.5	360	1	1.375	1.25	-0.79	-0.3	-2.16	-1.94	-1.42	-0.16	-0.56
38	0.8	260	1	1.375	1.25	-0.12	0.54	0.69	0.23	-0.63	0.31	-0.25
46	0.7	275	1	1.375	1.25	0.07	0.52	-0.29	-0.31	0.77	0.13	0.5
40	0.6	360	2	1.375	1.25	1.54	2.28	1.45	0.92	3.36	1.69	2.89
37	0.8	260	1	1.375	1.25	0.93	0.46	1.81	1.67	1.58	1.44	0.69

表注: GSI 代表不同的扫描序列, s/r 代表转速, mA 代表管电流大小, 螺距分为 0.984 和 1.375 两种, 视野 Large/Medium 简写为 L/M, 其中 L=1, M=2, 层厚选取 5 mm 和 1.25 mm 两种类型。对于 ROI1 方法, C1 代表中心点数据, N1 代表中心正上方数据, S1 代表中心正下方数据, W1 代表中心正左方数据, E1 代表中心正右方数据。对于 ROI2 方法, C2 代表中心点数据, N2 代表中心正上方数据, W2, E2 规则同上。

1.4 方法 采用 GE 公司宝石能谱 CT 对标准水模进行不同条件 GSI 横断面扫描^[22]。选择管电压为 80/140 kV, 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的评估。水基浓度共 5 组, 分别为水(钙)、水(HAP)、水(碘)、水(血)、水(脂)。转速分别取 0.0, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 s/r; 扫描视野: 腹部 Large 和 Medium; 层厚间距: 5 mm、1.25 mm; 螺距: 1.375 和 0.984; 管电流取: 260, 275, 360, 375, 550, 600, 630, 640 mA。

ROI 两种测量方法是指测量范围的大小, 如图 1 所示。ROI1—小圈, ROI2—大圈, 大小呈同心圆样排列。ROI1 和 ROI2 各自取了 5 个测量点, 命名分别为上北(N)、下南(S)、左西(W)、右东(E)、中心(C), 即 C1, N1, S1, W1, E1 为 ROI1 测量数据, C2, N2, S2, W2, E2 为 ROI2 测量数据。

1.5 主要观察指标 扫描样品为 GE 公司标准水模, 测量时间点均为上午 9:00–11:00。扫描过程中的主要依赖指标为转速、管电流、视野、层厚和螺距; 测量过程中的主要观察指标为 ROI1 和 ROI2、测量位置数据监测参量中心 C、上北 N、下南 S、左东 W 和右西 E 的 CT 值,

同时观测 5 对双基元法的测量数据和能谱曲线。

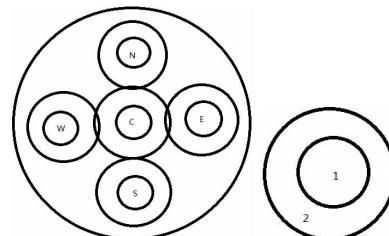


图 1 ROI 的测量位置标记

Figure 1 Marks of measuring position of ROI

图注: 图中 1 代表 ROI1 的测量范围小圈, 2 代表 ROI2 的测量范围大圈。ROI 两个测量范围各自对应 5 个测量位置, C(中心)、N(上北)、S(下南)、W(左西)、E(右东)。

2 结果 Results

2.1 水模测量数据受扫描序列和测量位置影响(截选) 不同扫描条件下的水模测量数据共计 552 组, 表 1 为随机截选的部分数据。其中 GSI 代表不同的扫描序列, s/r 代表转速, mA 代表管电流大小, 融合分为 0.984 和 1.375 两种, 视野 Large/Medium 简写为 L/M, 其中 L=1, M=2, 层厚选取 5 mm 和 1.25 mm 两种类型。对于 ROI1 方法, C1 代表中心点数据, N1 代表中心正上方数据, S1 代表中心正下方数据, W1 代表中心正左方数据, E1 代表中心正右方数据。对于 ROI2 方法, C2 代表中心点数据, N2 代表中心正上方数据, W2, E2 规则同上。

心正右方数据。对于ROI2方法, C2代表中心点数据, N2代表中心正上方数据, W2, E2规则同上。不同扫描条件随机组合再进行测量, 测量数据发现, 扫描序列和测量位置对测量结果有明显影响, 中心点测量数据好于周边位置测量数据, 且不同序列影响不同。实际使用过程中应先优化扫描序列, 利用优化的扫面序列测量数据, 再讨论测量位置对测量结果的影响, 从而进行合理校正。

2.2 不同ROI方法对GSI数据影响 ROI的测量结果取CT值和标准差SD。对不同GSI序列扫描的550组测量数据进行筛选分析。根据CT值求各个测量位置的标准偏差, ROI1 和ROI2测量数据标准偏差分别为:

ROI1: SD(C1)=1.113, SD(N1)=1.388, SD(S1)=1.533, SD(W1)=1.396, SD(E1)=1.438

ROI2: SD(C1)=1.728, SD(N2)=1.575, SD(S2)=1.580, SD(W2)=1.593, SD(E2)=1.638

对比550组测量数据的标准偏差可知, 同一测量位置, ROI1的测量结果标准差均小于ROI2, 因此ROI1 方法测量的数据都好于ROI2方法。对比所有标准偏差, 发现ROI1(C1)数值测量的标准偏差1.113最小, 数据最好, 故此下面的位置校正系数分析都以ROI1(C1)数据作为分析标准数据。

2.3 测量位置对数据的影响曲线 图2中Center-C1线为ROI1方法时, 中心位置的测量数据截取, 取Medium视野, 不同GSI序列, 共计测量水模数据310组。North-N1为ROI1方法中心正上方位置North的测量数据截取, Medium视野, 不同GSI序列, 共计测量水模数据310组, 数据呈不规则分布, 相对于中心点的数据有明显偏差, 说明不同的测量位置对数据有较大影响。

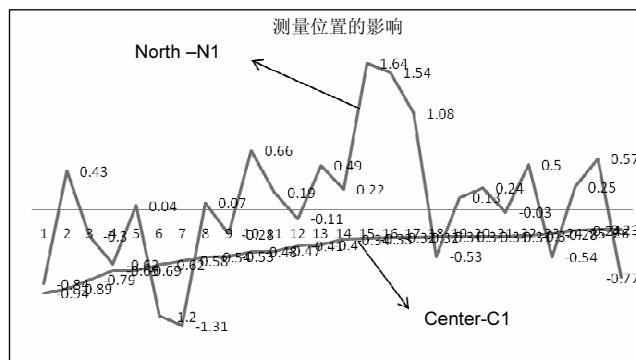


图2 Medium 视野时 ROI1 的 C1 和 N1 位置数据分布曲线

Figure 2 Distribution curve of position data (C1 and N1) to ROI1 in Medium field

图注: 显示了ROI1 测量中心点 C 和中心点正上方 N 的数据分布曲线。其中中心点 Center-C1 分布曲线接近直线, 数据点分布较密集, 中心点正上方 North-N1 的数据分布曲线波动较大, 但基本围绕中心点数据上下波动, 个别点的数据偏差较大, 说明测量位置对测量结果有影响。

2.4 测量视野对数据的影响曲线 图3, 4是用552组测量数据统计的视野对中心点和周边测量点的影响曲线^[23]。中心点数据C1和周围数据N1的分布规律有明显差别, 且与视野有关, 说明N1数据需要向中心点校正。

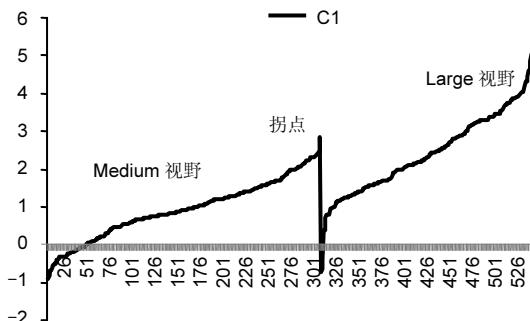


图3 Large 和 Medium 视野对中心点 C1 测量数据的影响

Figure 3 Large and Medium view impact on the measurement data of center C1

图注: 显示了方法 ROI1 测量中心点 C 的数据。大视野 Large 和小视野 Medium 分布曲线各自接近直线, 斜率相近。但在 309 数据点附近两个分布曲线出现拐点, 说明大小视野对测量结果有显著影响。

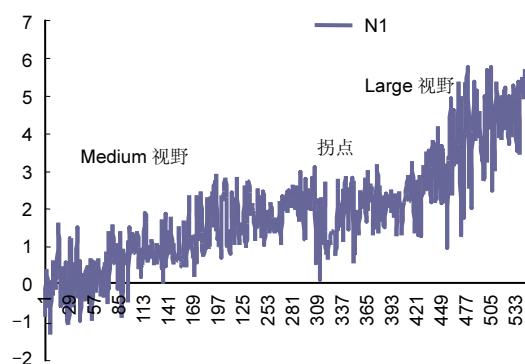


图4 Large 和 Medium 视野对 N1 点测量数据的影响(ROI1)

Figure 4 Large and Medium view impact on the measurement data of North-N1 (ROI1)

图注: 显示了方法 ROI1 测量 N1 点的数据。大视野 Large 和小视野 Medium 分布曲线各自呈不规则分布, 但波动围绕各自中心点直线, 但在 309 数据点附近两个分布曲线出现拐点, 说明测量位置对测量结果有显著影响, 且满足一定规律, 同时大小视野不同, 影响亦不同。

图3 中 中 心 点 数 据 ROI1-C1 在 Large=2 和 Medium=1 时呈不连续分布, 各自满足近直线分布。在视野发生变化的交叉点, 测量数据有明显拐点。说明视野对测量结果有明显影响。

图4为 中 心 点 正 上 方 数 据 ROI1-N1 同样在 Large=2 和 Medium=1 时呈不连续, 各自满足非线性分布。在视野发生变化的交叉点, 测量数据有明显拐点, 说明视野对测量数据有显著影响。

表 3 四个测量位置(北、南、西、东)相对于中心点 C1 的位置校正数据

Table 3 Correction data for four measuring positions (north, south, west and east) relative to the center C1

序号	C1	N1	校正 y_N	S1	校正 y_S	W1	校正 y_W	E1	校正 y_E
1	-0.94	-0.84	-0.94	-0.17	-0.934	-1.63	-0.951	-0.42	-0.934
2	-0.89	0.43	-0.89	-0.41	-0.886	0.4	-0.870	-1.04	-0.892
3	-0.79	-0.3	-0.79	-2.16	-0.801	-1.94	-0.808	-1.42	-0.795
4	-0.69	-0.62	-0.69	-0.13	-0.686	0.7	-0.668	-0.85	-0.691
5	-0.69	0.04	-0.69	0	-0.685	0.49	-0.679	-0.77	-0.691
6	-0.62	-1.2	-0.62	-1.3	-0.625	-1.78	-0.631	-0.66	-0.620
7	-0.58	-1.31	-0.58	-1.43	-0.587	-1.88	-0.593	-0.33	-0.578
8	-0.54	0.07	-0.54	-0.62	-0.541	0.42	-0.541	-1.23	-0.545
9	-0.53	-0.28	-0.53	-1.97	-0.541	-1.83	-0.552	-0.2	-0.527
10	-0.48	0.66	-0.48	-0.86	-0.483	0.56	-0.486	-1.53	-0.488
11	-0.47	0.19	-0.47	-0.84	-0.473	0.45	-0.473	-0.72	-0.472
12	-0.41	-0.11	-0.41	-0.15	-0.408	-0.05	-0.406	-0.75	-0.413
13	-0.4	0.49	-0.4	-0.11	-0.398	0.8	-0.395	-1.04	-0.405
14	-0.34	0.22	-0.34	-0.77	-0.343	-0.63	-0.347	-0.48	-0.341
15	-0.33	1.64	-0.33	-0.03	-0.328	0.51	-0.325	1.11	-0.319
16	-0.32	1.54	-0.32	-1.29	-0.328	0.49	-0.335	0.86	-0.311
17	-0.32	1.08	-0.32	-0.44	-0.321	-0.05	-0.322	0.32	-0.315
18	-0.31	-0.53	-0.31	-0.58	-0.312	-1.38	-0.314	-0.17	-0.309
19	-0.31	0.13	-0.31	-1	-0.315	-0.58	-0.321	-0.65	-0.313

3 讨论 Discussion

3.1 扫描序列模型优化 采用多元线性回归模型、多元非线性回归模型和多元二项式组合分析模型, 得到了优化组合模型如表 2 所示。各种扫描参数对图像影响都较大, 其中测量误差最小的数据, 视野都是 medial=1 的视野; 转速选择最好的参数为 0.5 s/r 和 0.6 s/r; 管电流最好的选择是 275 mA 和 260 mA, 螺距 1.375 和 0.984 影响都较大, 应根据其他参数合理选择, 层厚 5 mm and 1.25 (mm)也应根据其他参数优化选择。表 2 中给出了对 CT 值影响最小的扫描参数组合。水模测量 CT 值与真实 CT 值非常接近, 说明扫描序列优化模型成立。

表 2 优化的扫描参数组合列表

Table 2 Combination list of optimization of the scanning parameters

转速 (s/r)	管电流 (mA)	视野	螺距	层厚 (mm)	预测 CT 值	理论 CT 值
0.6	275	1	1.375	5	0.056	0.000
0.6	275	1	1.375	1.25	0.081	0.000
0.6	275	1	0.984	5	0.083	0.000
0.6	260	1	1.375	1.25	0.024	0.000
0.6	260	1	1.375	5	0.016	0.000
0.5	260	1	1.375	5	-0.026	0.000
0.5	275	1	1.375	5	0.0147	0.000
0.5	260	1	0.984	5	0.030	0.000
0.5	275	1	0.984	5	0.088	0.000

3.2 周边位置测量数据与中心数据的相关性 为了研究测量位置数据和中心位置测量数据间的关系, 采用同样本, 同扫面条件测量, 采用逐渐逼近法, 可以寻找到两者之间的联系公式, 经过 550 组数据反复验证, 得到如下校正公式:

$$y_N = \frac{N1 + (2^n - 1)C1}{2^n} , n \geq 5 \quad (1)$$

ROI1 方法, C1 为中心位置的数据, N1 为相对中心正上方 North 位置的测量数据, y_N 为经过位置校正后的数据。同理可得 South, West, East 位置的校正数据 y_S , y_W , y_E 。

$$y_S = \frac{S1 + (2^n - 1)C1}{2^n} , n \geq 5 \quad (2)$$

$$y_W = \frac{W1 + (2^n - 1)C1}{2^n} , n \geq 5 \quad (3)$$

$$y_E = \frac{E1 + (2^n - 1)C1}{2^n} , n \geq 5 \quad (4)$$

研究发现, n 取值越大, 校正后的数据越接近中心点的数据, 可以达到差异 $< 10^{-7}$ 。表 3 列出任选序列 4 个位置上下左右(见图 1 位置)相对于中心点的位置校正数据。 $n=20$ 时, N1 校正后数据与中心点测量数据几乎完全相同; S1 校正数据 y_S 是在 $n=7$ 时的数据; W1 校正数据 y_W 是在 $n=6$ 时得到的; E1 校正数据 y_E 是在 $n=7$ 时得到的。N 取值越大, 校正数据越接近真实数据。

表 4 水模测量位置 N1 相对于中心点 C1 的 CT 值校正

Table 4 Correction of CT data for N1 measuring position relative to the center C1

序列	转速(s/r)	电流(mA)	视野	螺距	层厚(mm)	C1	N1	N1 校正 y_N	校正函数
GSI-56	0.6	275	1	0.984	5	0.05	0.28	0.028	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	5	0.01	0.28	0.028	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	5	-0.14	0.48	-0.134	polyfit
GSI-55	0.6	275	1	0.984	5	0.83	1.36	0.770	polyfit
GSI-55	0.6	275	1	0.984	5	0.83	1.45	0.845	polyfit
GSI-55	0.6	275	1	0.984	5	0.71	1.88	0.653	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	1.375	5	0.18	0.61	0.121	regress
GSI-56	0.6	275	1	1.375	5	0.14	0.66	0.140	regress
GSI-56	0.6	275	1	1.375	5	0.09	0.71	0.160	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	5	0.71	1.64	0.687	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	5	0.84	1.8	0.808	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	5	0.82	1.87	0.864	regress

如果已知上下左右位置的测量，利用校正公式，可以反推真实数据。首先选取相同的序列扫面条件，即转速、管电流、螺距、层厚和重建等条件不变时，中心点数据的依赖式为：

$$C1 = N1 - 2^n \Delta x, n \geq 5 \quad (5)$$

其中 $\Delta x = y_N - C1$ 为相同扫描条件时，相同测量样品时，中心点和测量点之间 CT 的差值。认为相同扫描条件，相同测量样品的位置差异的影响相同，这样只要知道测量位置的数据，即使不知道中心点的数据，也可依据公式(5)，求得校正后的真实数据。

3.3 GSI-55 和 GSI-56 ROI1-N1 位置校正系数的非线性回归统计 利用 Matlab 函数 `stepwise(x, y)` 多元逐步回归、`regress(x, y)` 多元线性回归、`rstool(x, y)` 优化组合序列，发现 GSI49, GSI50, GSI45, GSI46, GSI55, GSI56 序列测量数据比较接近真实水模数据，下面以上述序列作为分析对象^[24]。用概率统计中的 `polyfit(x, y, n)` 一元多次非线性函数和 `regress(y, x, n)` 函数估计模型参数，建立模型数学表达式，再利用 MATLAB 编程技巧实现位置校正系数的校正。`regress(y, x)` 中的参数 b 是回归方程中的参数估计值， $bint$ 是 b 的置信区间， r 和 $rint$ 分别表示残差及残差对应的置信区间。`StatS` 数组包含 3 个数字，分别是相关系数， F 统计量及对应的概率 p 值^[25-26]。

表 4 代表两种扫描序列 GSI-55 和 GSI-56, 5 个扫描参数分别取转速 0.6 s/r, 管电流 275 mA, 小视野 Medium, 用数字 1 代表, 螺距分别为 0.984 and 1.375, 层厚为 5 mm。C1 代表中心点的 CT 测量值, N1 代表中心点正上方的 CT 测量值, y_N 代表采用数学模型校正

后的 N1 位置测量的 CT 值，最后一列代表模型采用的校正函数。

下面以 GSI-55 和 GSI-56 扫描数据的 N1 位置测量数据表 3 为例，进行系数校正分析，其他位置测量数据分析思路相同：

① 序列 GSI-56-55，转速 0.6 s/r、电流 275 mA、视野 medium、螺距 0.984、5 mm 层厚。利用 Matlab 函数和编程技巧，采用 `polyfit(x, y, n)` 一元二项式回归分析模型比较合适 `polyfit(x, y, n)`, $n=3$ 。利用扫面条件相同的数据，寻找校正方程^[27-28]。校正结果 y_N 好于测量值 N1，接近真实值 C1，模型成立，校正方程如下：

$$y_N = -1.6120 x^3 + 5.1317 x^2 - 3.9881 x + 0.7776 \quad (6)$$

如图 5 所示，校正曲线趋势满足实际曲线趋势。图中实线为拟合后的曲线，趋势与真实线趋势完全吻合。测量点基本在拟合曲线上分布。

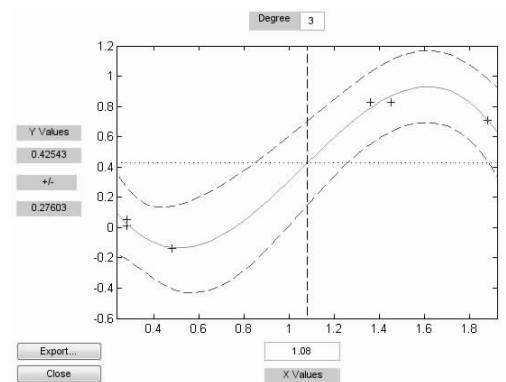


图 5 GSI-56-55 的 N1 位置校正函数曲线

Figure 5 Correction function curve of position N1 for GSI 56-55

图注：显示了 GSI-56-55 测量位置 N1 相对于中心点 C1 的校正曲线。图中十字星为测量点，实线为拟合后的曲线，虚线为真实趋势线。拟合曲线趋势与真实线趋势完全吻合。测量点基本在拟合曲线上分布，说明校正函数(6)合理。

表 5 水模测量位置 S1 相对于中心 C1 的 CT 值校正

(ys 为校正后的 S1 数据)

Table 5 Correction of CT data for S1 measuring position relative to the center C1

序列	转速(s/r)	电流(mA)	视野	螺距	层厚(mm)	C1	S1	S1 校正 ys	校正函数
GSI-55	0.6	275	1	0.984	5	0.71	0.66	0.707	polyfit
GSI-55	0.6	275	1	0.984	5	0.83	0.4	0.839	polyfit
GSI-55	0.6	275	1	0.984	5	0.83	0.36	0.826	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	5	-0.14	-0.67	-0.121	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	5	0.01	-0.36	-0.002	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	5	0.05	-0.84	0.041	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	1.375	5	0.82	0.27	0.781	regress
GSI-56	0.6	275	1	1.375	5	0.84	0.48	0.859	regress
GSI-56	0.6	275	1	1.375	5	0.09	-0.78	0.045	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	5	0.14	-1.07	0.156	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	5	0.18	-0.4	0.223	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	5	0.71	0.17	0.715	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	1.25	2.24	-0.17	2.189	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	1.25	2.29	3.14	2.291	regress
GSI-55	0.6	275	1	1.375	1.25	2.31	0.24	2.326	regress
GSI-56	0.6	275	1	1.375	1.25	0.81	-0.66	0.684	regress
GSI-56	0.6	275	1	1.375	1.25	0.83	-0.61	0.919	regress
GSI-56	0.6	275	1	1.375	1.25	1.02	-0.57	1.092	regress
GSI-55	0.6	275	1	0.984	1.25	0.68	-0.25	0.689	polyfit
GSI-55	0.6	275	1	0.984	1.25	1.3	0.1	1.297	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	1.25	-0.06	-0.02	-0.049	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	1.25	0.11	-0.13	0.095	polyfit
GSI-56	0.6	275	1	0.984	1.25	0.37	-0.4	0.368	polyfit

②序列 GSI-55-56, 转速 0.6 s/r、275 mA, 视野 Medium, 1.375 螺距, 5 mm 层厚。

采用一元多项式回归模型不合适, 找不到满足要求的模型, 故此采用一元线性回归模型, 在 Matlab 环境下, 利用 Regress(y, x, 3)一元非线性回归函数和实验数据建立回归模型^[29], 计算求得模型系数如下:

$$b = \text{回归系数估计} -0.0398 0.1581 0.1738$$

bint = 置信区间

$$\begin{array}{ll} -1.2821 & 1.2024 \\ -2.3789 & 2.6952 \\ -0.8602 & 1.2078 \end{array}$$

$$\text{stats} = 0.9819 \quad 81.5275 \quad 0.0024 \quad 0.0039$$

stats 代表检验回归模型的统计量为: 相关系数 R^2 , 统计量值 F , 与统计量 F 对应的概率 p

$$R^2 = 0.9819, F = 81.5275, p = 0.0039, R^2 \text{ 接近 } 1,$$

F 值很大, p 值很小, 线性回归模型成立。

N1 位置系数校正回归方程如下:

$$y_N = -0.0398 + 0.1581 x + 0.1738 x^2 \quad (7)$$

3.4 GSI-55 和 GSI-56 ROI1-S1 位置校正系数的非线性回归统计 表 5 给出了序列 GSI-55 和 GSI-56 测量位置

S1 相对于中心点数据 C1 的校正数据列表。从校正项 ys 数据看, 校正后的数据非常接近中心点数据, 说明校正模型非常理想, 最后一列给出了相应的校正函数。下面①-④分析了表中 4 种扫描条件的校正函数和校正曲线(图 6)。

① GSI-55, GSI-56, 参数选择 0.6 s/r, 275 mA, Medium, 0.984, 5 mm-S1 校正

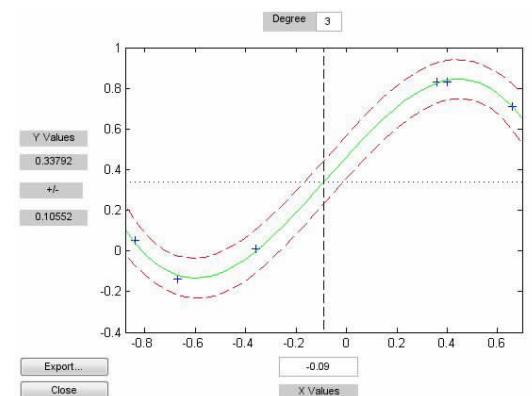


图 6 GSI-56-55 的 S1 位置校正函数曲线

Figure 6 Correction function curve of position S1 for GSI 56-55

图注: 显示了 GSI-56-55 测量位置 S1 相对于中心点 C1 的校正曲线。图中十字星为测量点, 实线为拟合后的曲线, 虚线为真实趋势线。拟合曲线趋势与真实线趋势完全吻合。测量点基本在拟合曲线上分布, 说明校正函数(8)合理。

表 6 序列 GSI-49 和 GSI-50 四个位置 N1,S1,W1,E1 相对于中心点 C1(转速 0.7 s/r, 管电流 260 mA, 视野 Medium)的 CT 值校正

Table 6 Correction of CT data for N1, S1, W1, E1 measuring position relative to the center C1 for GSI 49 and GSI-50 (rotation speed 0.7 s/r, tube current 260 mA, Medium)

螺距	层厚(mm)	C1	N1	N1 校正	S1	S1 校正	W1	W1 校正	E1	E1 校正
0.984	1.25	1.58	1.85	1.497	2.25	1.532	1.62	1.399	1.17	1.580
0.984	1.25	1.81	1.98	1.863	1.56	1.784	2.13	1.784	0.75	1.810
0.984	1.25	0.95	1.7	0.983	2.03	1.632	1.65	1.150	0.45	0.950
0.984	1.25	2.7	3.52	2.692	1.92	2.394	3.57	2.795	2.91	2.700
0.984	1.25	2.62	3.69	2.629	1.83	2.955	3.87	2.685	2.77	2.602
0.984	1.25	2.6	4.19	2.601	1.98	1.964	3.73	2.433	2.79	2.625
0.984	5	1.76	1.4	1.623	1.09	No	1.3	1.649	1.18	1.636
0.984	5	1.54	1.51	1.637	1.15	No	1.31	1.655	0.93	1.565
0.984	5	1.58	1.24	1.624	1.15	No	1.67	1.574	1.29	1.683
0.984	5	2.51	3.04	2.450	2.27	No	2.75	2.579	2.65	2.527
0.984	5	2.44	3.13	2.498	2.11	No	2.72	2.432	2.45	2.414
0.984	5	2.69	3.65	2.684	2.25	No	2.76	2.630	3.05	2.683
1.375	1.25	-0.4	0.97	-0.412	1.78	-0.593	2.18	-0.399	0.4	-0.639
1.375	1.25	-0.72	0.62	-0.547	1.76	-0.519	1.4	-0.720	0.51	-0.647
1.375	1.25	-0.64	1.41	-0.639	2.05	-0.637	1.56	-0.640	0.31	-0.451
1.375	1.25	0.37	0.18	0.358	1.56	0.355	0.71	0.370	-0.1	0.342
1.375	1.25	-0.89	0.43	-0.661	-0.41	-0.888	0.4	-0.595	-1.04	-0.875
1.375	1.25	-0.3	0.5	-0.657	-0.54	-0.303	0.4	-0.595	-1.3	-0.316
1.375	1.25	-0.48	0.66	-0.502	-0.86	-0.480	0.56	-0.480	-1.53	-0.475
1.375	5	-0.1	-0.27	-0.100	-0.74	-0.101	-0.27	-0.101	-0.31	-0.088
1.375	5	-0.17	0.6	-0.136	-0.92	-0.169	0.06	-0.167	-0.2	-0.225
1.375	5	-0.23	0.57	-0.259	0.11	-0.229	0.38	-0.233	-0.11	-0.165
1.375	5	0.7	0.91	0.687	1.25	0.699	1.87	0.720	0.12	0.636
1.375	5	0.78	1.06	0.789	1.77	0.772	1.93	0.759	0.23	0.862
1.375	5	0.8	1.26	0.798	1.73	0.809	2.27	0.803	0.28	0.759

校正函数: $\text{polyfit}(x, y, 3)$

校正方程:

$$y_s = -1.699 \cdot 9 \cdot x^3 - 0.395 \cdot 1 \cdot x^2 + 1.370 \cdot 6x + 0.463 \quad (8)$$

②GSI-55, GSI-56, 参数 0.6 s/r, 275 mA, 1.375, Medium, 5 mm-S1 校正

采用 $\text{regress}(y, x, 4)$ 一元 4 次幂函数进行校正。

校正结果如下:

系数: $b = 0.576 \cdot 7 \quad 0.882 \cdot 3 \quad -0.280 \cdot 2 \quad -0.689 \cdot 3$

置信区间: $b_{\text{int}} =$

0.384	7	0.768	7
0.519	5	1.245	1
-1.314	2	0.753	8
-1.688	8	0.310	2

状态: $\text{stats} = 0.990 \cdot 7 \quad 71.272 \cdot 5 \quad 0.013 \cdot 9 \quad 0.003 \cdot 0$

$R^2 = 0.990 \cdot 7$, $F = 71.272 \cdot 5$, $p = 0.003 \cdot 0$, R^2 接近 1, F 值很大, p 值很小, 线性回归模型成立, 且建立的回

归模型非常理想。

校正方程为:

$$y_s = 0.576 \cdot 7 + 0.882 \cdot 3 \cdot x - 0.280 \cdot 2 \cdot x^2 - 0.689 \cdot 3 \cdot x^3 \quad (9)$$

③GSI-55, GSI-56, 参数 0.6 s/r, 275 mA, 1.375, Medium, 1.25 mm-S1 校正

校正方程:

$$y_s = 2.349 \cdot 3 + 0.479 \cdot 0 \cdot x - 2.587 \cdot 3 \cdot x^2 + 0.773 \cdot 5 \cdot x^3 \quad (10)$$

④GSI-55, 56, 参数 0.6 s/r, 275 mA, Medium, 0.984, 1.25 mm-S1 校正

校正方程:

$$y_s = 110.579 \cdot 0 \cdot x^3 + 60.030 \cdot 4 \cdot x^2 - 5.402 \cdot 0 \cdot x + 0.037 \cdot 4 \quad (11)$$

3.5 GSI-49 和 GSI-50 四个方向位置数据的校正统计
采用相同的校正方法, 可以得到其他序列测量位置的校正方程和校正函数, 如 GSI-49-50, GSI-45-46, 得到 S1, W1, E1, N2, W2, S2, E2 的校正方程。但是,

针对不同的扫描序列, 校正方程依赖的回归函数可能不同, 但校正系数的规划思路完全相同。**表 6** 给出了序列 GSI-49 和 GSI-50 ROI1 测量方法, 不同位置 N1, S1, W1, E1 的校正数据, 校正函数分别用 Y_N , Y_S , Y_W , Y_E 表示。对于个别序列的不同层厚测量时, 会出现位置对测量结果影响非常小的情况, 此时, 测量数据不需校正^[30]。

表 6 数据的校正方程分析如下:

①校正方程: (螺距 0.984, 1.25 mm, 转速 0.7 s/r, 电流 260 mA, 视野 Medium)

$$y_N=0.452\ 5\ x^3-4.689\ 6\ x^2+15.796\ 6\ x-14.541\ 9$$

$$y_S=55.062\ 3\ x^3-321.752\ 1\ x^2+619.488\ 8\ x-390.642\ 1$$

$$y_W=4.316\ 9\ x^4-48.567\ 7\ x^3+196.868\ 2\ x^2-338.036\ 8\ x+209.112\ 5$$

$$y_E=-1.036\ 5\ x^4+7.622\ 2\ x^3-18.785\ 0\ x^2+17.955\ x-3.977\ 7$$

②校正方程: (螺距 0.984, 层厚 5 mm, 转速 0.7 s/r, 电流 260 mA, 视野 Medium)

$$y_N=-0.139\ 1\ x^3+1.077\ 22\ x^2-2.106\ 4\ x+2.852\ 1$$

$$y_W=2.106\ 2\ x^3-11.266\ 6\ x^2+19.253\ 8\ x-8.967\ 5$$

$$y_E=-0.142\ 8\ x^3+0.867\ 8\ x^2-1.068\ 0\ x+1.923\ 3$$

③校正方程: (螺距 1.375, 层厚 1.25 mm, 转速 0.7 r/s, 电流 260 mA, 视野 Medium)

$$y_N=-1.036\ 5\ x^4+7.622\ 2\ x^3-18.785\ 0\ x^2+17.955\ 0\ x-3.977\ 7$$

$$y_S=1.846\ 5\ x^5-5.733\ 3\ x^4+0.806\ 4\ x^3+7.416\ 2\ x^2-0.996\ 7\ x-2.304\ 1$$

$$y_W=-21.772\ 4\ x^5+131.317\ 0\ x^4-293.458\ 1\ x^3+297.649\ 0\ x^2-133.925\ 2\ x+20.993\ 3$$

$$y_E=4.060\ 8\ x^5+9.791\ 3\ x^4+2.533\ 3\ x^3-5.603\ 5\ x^2-1.193\ 7\ x+0.280\ 5$$

④校正方程: (螺距 1.375, 层厚 5 mm, 转速 0.7 s/r, 电流 260 mA, 视野 Medium)

$$y_N=5.691\ 3\ x^4-18.038\ 4\ x^3+16.689\ 8\ x^2-1.475\ 6\ x-2.100\ 3$$

$$y_S=-0.303\ 2\ x^4+0.370\ 2\ x^3+0.635\ 4\ x^2-0.034\ 7\ x-0.233\ 7$$

$$y_W=-0.212\ 8\ x^4+0.659\ 3\ x^3-0.099\ 4\ x^2-0.262\ 6\ x-0.150\ 6$$

$$y_E=-52.562\ 4\ x^4-28.041\ 7\ x^3+6.159\ 3\ x^2+3.805\ 4\ x+0.149\ 7$$

同理, 可以得到其他任何序列测量位置的校正方程和校正函数。但是, 针对不同的扫描序列, 校正方程依赖的回归函数可能不同, 但校正系数的校正思路完全相同。校正模型的相关系数均大于 0.98, 概率 $p < 0.05$, 模型都成立。表 3-5 数据显示, 校正后的数据接近中心

点 C1 的数据, 校正模型都非常准确。

结论: 能谱 CT 成像, 在相同扫描条件时, 测量位置对测量数据有显著影响, 可以通过位置校正公式, 对测量结果进行校正。如果知道中心点的数据, 采用校正公式(1) 进行校正, 数据非常精确。如果不知道中心点的测量数据, 可以依赖校正公式(5)或非线性回归公式(6)或公式(7)进行校正, 数据与真实值会有稍许偏差, 但远好于校正前的数据。校正模型的相关系数均大于 0.98, 概率 $p < 0.05$, 模型都成立。实验中也发现, 有些序列的个别位置对测量结果影响非常小, 这些数据不需要校正, 但 95%以上的数据都需要位置校正, 校正后的数据更接近临床真实值。

致谢: 感谢鞠烨、田士峰、李烨在数据录入和整理方面的辛苦付出。

作者贡献: 刘爱连负责课题设计、指导、论文修改; 孙美玉负责每周跟进研究进度, 汇总原始材料, 数据分析; 刘义军和浦仁旺负责扫描参数(不同参数——影响因素)扫描: GSI、平扫(增强), 用机协调; 盖立平负责所得参数结果解读、数学分析、模型优化; 刘静红和孙敏芹负责标准液配置、临床标本的配置与实验室结果, 细胞学、有形成分检查; 丁晓东和王礼负责实验结果的检验。采用盲法评估。

利益冲突: 所有作者共同认可文章内容不涉及相关利益冲突。

伦理问题: 实验采用标准水模测量, 目前还不涉及伦理问题。

文章查重: 文章出版前已经过 CNKI 反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。

文章外审: 文章经国内小同行外审专家双盲外审, 符合本刊发稿宗旨。

作者声明: 第一作者盖立平对研究和撰写的论文中出现的不端行为承担责任。论文中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁, 可接受核查。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

4 参考文献 References

- [1] Chiro GD,Brooks RA,Kessler RM,et al. Tissue signatures with dual-energy computed tomography. Radiology. 1979;131(2):521-523.
- [2] Johnson TR. Dual-energy CT: general principles. AJR Am J Roentgenol. 2012;199(5):3-8.

- [3] De Cecco CN, Darnell A, Rengo M, et al. Dual-energy CT: oncologic applications. *AJR Am J Roentgenol.* 2012;199(5):98-105.
- [4] Kaza RK, Platt JF, Cohan RH, et al. Dual-energy CT with single-and dual-source scanners: current applications in evaluating the genitourinary tract. *Radio Graphics.* 2012;32(2):353-369.
- [5] Holmes DR III, Fletcher JG, Apel A, et al. Evaluation of non linear blending in dual-energy computed tomography. *Eur J Radiol.* 2008;68(3):409-413.
- [6] Ho IM, Yoshizumi TT, Hurwitz LM, et al. Dual energy versus single energy MDCT: measurement of radiation dose using adult abdominal imaging protocols. *Acad Radiol.* 2009;16(11):1400-1407.
- [7] Graser A, Johnson TR, Bader M, et al. Dual energy CT characterization of urinary calculi: initial in vitro and clinical experience. *Invest Radiol.* 2008;43(2):112-119.
- [8] Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT. *Radiology.* 2011;259(1):257-262.
- [9] Schindera ST, Nelson RC, Mukundan S Jr, et al. Hypervascular liver tumors: low tube voltage, high tube current multi-detector row CT for enhanced detection—phantom study. *Radiology.* 2008;246(1):125-132.
- [10] Song I, Yi JG, Park JH, et al. Virtual Non-Contrast CT Using Dual-Energy Spectral CT: Feasibility of Coronary Artery Calcium Scoring. *Korean J Radiol.* 2016;17(3):321-329.
- [11] Schwarz F, Nance JW Jr, Ruzsics B, et al. Quantification of coronary artery calcium on the basis of dual-energy coronary CT angiography. *Radiology.* 2012;264(3):700-707.
- [12] Yu L, Leng S, McCollough CH. Dual-energy CT-based monochromatic imaging. *AJR.* 2012;199:9-15.
- [13] Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilo voltages switching: Improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT. *Radiology.* 2011;259(1):257-262.
- [14] Zou Y, Silver MD. Analysis of fast KV-switching in dual energy CT using a pre-reconstruction decomposition technique. *Proc Spie.* 2008;13:6913.
- [15] Primak AN, Ramirez Giraldo JC, Liu X, et al. "Improved dual-energy material discrimination for dual-source CT by means of additional spectral filtration." *Med. Phys.* 2009, 36: 1359-1369.
- [16] Roessl E, Proksa R. K-edge imaging in x-ray computed tomography using multi-bin photon counting detectors. *Phys Med Biol.* 2007;52: 4679-4696.
- [17] Sullivan C. Calculating a water poverty index. *World Dev.* 2012;30(7):1195-1210.
- [18] 黄英, 刘新有, 史正涛, 等. 复杂系统评价指标的评价方法研究—以诚实水安全为例[J]. 水文, 2009, 29(2):45-49.
- [19] Banerjee M, Chakraborty R, Ofori E, et al. Nonlinear regression on Riemannian manifolds and its applications to Neuro-image analysis. *Med Image Comput Comput Assist Interv.* 2015;9349(10):719-727.
- [20] Fang X, Liang C, Li M, et al. Dose-response relationship between dietary magnesium intake and cardiovascular mortality: A systematic review and dose-based meta-regression analysis of prospective studies. *J Trace Elem Med Biol.* 2016;29(3):S0946-672X.
- [21] He Y, Wang Y, Wang J, et al. Frequency-domain nonlinear regression algorithm for spectral analysis of broadband SFG spectroscopy. *Opt Lett.* 2016;41(5):874-877.
- [22] 汪哲荪, 金菊良, 李如忠, 等. 基于风险的区域水安全评价模糊数随机模拟模型[J]. 四川大学学报, 2010, 42(6):1-5.
- [23] 赵永为, 郭小超, 王霄英, 等. 扫描视野对双能CT成像CT值及物质分离的影响——模体研究[J]. 放射学实践, 2012, 27(3): 271-274.
- [24] Evans JD, Whiting BR, O'Sullivan JA, et al. Prospects for in vivo estimation of photon linear attenuation coefficients using post processing dual-energy CT imaging on a commercial scanner: Comparison of analytic and poly energetic statistical reconstruction algorithms. *Med Phys.* 2013;40: 121914.
- [25] He X, Feng X, Tong X, et al. Semiparametric partially linear varying coefficient models with panel count data. *Lifetime Data Anal.* 2016. [Epub ahead of print]
- [26] Banerjee M, Chakraborty R, Ofori E, et al. Nonlinear regression on Riemannian manifolds and its applications to Neuro-image analysis. *Med Image Comput Comput Assist Interv.* 2015;9349(10):719-727.
- [27] 汪嘉杨, 王文圣, 李祚泳, 等. 基于TS-SVM模型的水安全评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 1-9.
- [28] 李祚泳, 张正健, 邹艳玲. 蛙跳算法优化的地下水水质评价的参数化组合算子模型[J]. 环境工程, 2010, 28(5):94-97.
- [29] Zimmermann HJ, Zysco P. Latent connectives in human decision making. *Fuzzy Sets Sys.* 1980;(4):37-51.
- [30] Burden CJ, Qureshi SE, Wilson SR. Error estimates for the analysis of differential expression from RNA-seq count data. *Peer J.* 2014;23(9):e576.