

·论著·

基于 30 mA 管电流低剂量呼吸门控 PET/CT 扫描条件的建立讨论

武萍 李思进 张艳兰 郝新忠 秦志星 鄢敏 程鹏亮 武志芳

【摘要】 目的 通过改善呼吸门控 PET/CT(RG PET/CT)的扫描参数(如管电流、呼吸时相数目、呼吸周期等),拟建立一个低辐射剂量且图像质量适于临床的扫描条件。**方法** 对 26 例有¹⁸F-FDG 摄取的肺结节患者行 1 个床位的低剂量 RG PET/CT(30 mA, 1min/时相),评估其辐射剂量,并对比其与常规 PET/CT(120 mA, 2 min/床位)的图像质量(如均匀性、噪声、视觉评价)的差别。此外,通过模拟不同呼吸周期探讨其与辐射剂量间的关系。**结果** 1 个 PET 床位的低剂量 RG PET/CT 的有效吸收剂量可降至 4.88~7.69 mSv[平均(5.68±0.83) mSv],且其 PET 图像信噪比与常规剂量时相比无明显差异,低剂量 CT 图像的均匀性在可接受范围(<5 HU),噪声较高,视觉评价肺结节特性在某些时相优于常规剂量 CT。受检者的呼吸周期与辐射剂量呈正相关。**结论** 基于 30 mA 管电流、6 个呼吸时相、1 min/时相、平静呼吸下的 RG PET/CT 的图像质量能满足肺结节特性观测及肿瘤放疗生物靶区勾画等临床应用,且辐射剂量大幅减低。

【关键词】 辐射剂量;正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机;呼吸门控

Low-dose respiratory-gated PET/CT: based on 30 mA tube current WU Ping, LI Si-jin, ZHANG Yan-lan, HAO Xin-zhong, QIN Zhi-xing, YAN Min, CHENG Peng-liang, WU Zhi-fang. Department of Nuclear Medicine, the First Hospital of Shanxi Medical University, 030001 Taiyuan, China

Corresponding author: WU Zhi-fang, Email: wuzhifang01@sina.com

【Abstract】 Objective To establish a low-dose but image-comparable respiratory-gated PET/CT (RG PET/CT) protocol based on 30 mA tube current plus other improved scanning parameters, such as the tube current, the number of respiratory phase and length of breathing cycle. **Methods** Twenty-six patients with ¹⁸F-FDG-intaking lung nodules underwent one-bed standard-dose PET/CT(120 mA, 2 min/bed) and low-dose RG PET/CT (30 mA, 6 respiratory phases, 1min/phase). The radiation dose and image quality were analyzed subsequently with signal to noise ratio (SNR) for PET and the homogeneity, noise level for CT in the water phantom respectively. Otherwise the CT images were both visual evaluated by two experienced doctors. In addition, different respiratory cycle was simulated to observe its relation with radiation dose. **Results** The effective dose of low-dose RG PET/CT was 4.88~7.69 mSv [mean (5.68±0.83) mSv]. The PET SNR showed no significance between groups. The homogeneity of 30 mA is good(< 5 HU), although noise level was high, the visual character like lobulation, speculation of lung nodule was superior in some respiratory phases. The radiation dose was positively correlated with respiratory cycle. **Conclusions** The performance of low-dose RG PET/CT was comparable to those of standard-dose PET/CT based on a protocol with 30 mA tube current, 6 respiratory phases and breathing state of eupnoea. It produced a much lower radiation exposure and the image quality was enough for clinical use such as delineation of tumor active target, characterization and staging of lung nodules, etc.

【Key words】 Radiation dosage; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Respiratory gated

呼吸门控 PET/CT(respiratory-gated PET/CT, RG PET/CT)有效改善了 PET/CT 检查中呼吸运动造成的

DOI: 10. 3760/ema. j. issn. 1673-4114. 2013. 05. 001

基金项目: 山西省科技攻关项目(20120321028-03)

作者单位: 030001 太原, 山西医科大学第一医院核医学科

通信作者: 武志芳 (Email: wuzhifang01@sina.com)

干扰,在临床上发挥出越来越重要的应用价值^[1-2]。然而,采用常规剂量管电流进行 RG PET/CT 将产生相当大的辐射剂量,因此造成其临床应用受限。辐射防护的最优化一直是医学影像学研究的热点问题^[3-5]。目前,国内关于 RG PET/CT 的文献仅有几

篇^[6-7], 国外也仅有几篇涉及到 RG CT 的辐射剂量的研究^[8-10], 采用的管电流范围为 50~150 mA, 均将呼吸周期分为 10 个时相, 产生的辐射剂量较大。常规胸部 CT 扫描管电流一般为 250~350 mA, 而常规 PET/CT 一般采用较低剂量管电流(120 mA), 本研究选用 30 mA 管电流行 RG PET/CT, 对比其与 120 mA 的 PET 及 CT 图像质量, 试图建立一个图像质量适于临床(结节诊断分期、放疗生物靶区勾画等)且辐射剂量相对较低的理想扫描条件。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集 2010 年 5 月至 2012 年 8 月在我院核医学科行 PET/CT 检查发现肺结节有 ¹⁸F-FDG 摄取且肺结节分布在一个 PET 床位内的受检者 26 例, 其中, 男性 13 例、女性 13 例, 平均年龄(63.6±9.7)岁。受检者均行 RG PET/CT, 并签署知情同意书。

1.2 仪器和方法

Discovery VCT 型 PET/CT 仪由美国 GE 公司生产, RG 数据的采集由美国 Varian 公司开发的实时监控完成。图像后处理工作在美国 GE 公司 AW4.4 工作站上进行。患者检查前禁食、禁水 6 h 以上, 检查当日空腹血糖浓度控制在适当范围。

常规显像(1 个床位): 注射 ¹⁸F-FDG 后静息 40~65 min, 显像前排空膀胱。CT 扫描条件为: 120 kV, 120 mA, 层厚 3.75 mm, 螺距 0.984:1, 旋转时间 0.8 s, 扫描范围 1 个床位。PET 采集 2 min/床位。

RG PET/CT: 紧接常规显像进行, 检查前对患者行自由呼吸训练。连接好呼吸实时监控。先行衰减校正 CT 扫描: 管电流 120 mA, 其余条件同非门控显像, 再行 6 个时相的 PET 采集, 采集时间 6 min, 即 1 min/时相。PET 采集完成后行低剂量四维 CT 电影模式扫描: 管电压 120 kV, 管电流 30 mA, 旋转时间 0.5 s, 螺距 0.984:1, 上下扫描范围略大于 PET 采集范围, 层厚 2.5 mm, 电影持续时间为呼吸周期+1 s, 间隔时间为 0.3 s。

模拟实验: ①对水模分别行 120 mA 及 30 mA 管电流 CT 扫描, 其余条件同四维 CT, 各扫描 10 幅图像, 测量均匀性及噪声, 评估图像质量; ②应用呼吸模拟机模拟不同的呼吸周期, 探讨呼吸周期长短与辐射剂量间的关系, 寻找低剂量扫描的理想呼吸模式; ③常规胸部 CT 及肺部肿瘤放疗定位常采用 250~350 mA 管电流, 因此我们选取 3 名志愿

者行 1 个床位的常规 PET/CT 显像, 分别采用 250、300、350 mA 的管电流(其余扫描条件同上), 对比其与 30 mA RG PET/CT 产生的辐射剂量的关系。

1.3 数据分析

1.3.1 辐射剂量分析

辐射剂量数据均取自扫描程序结束后计算机自动输出的剂量报告。剂量参数包括 CT 容积剂量指数、剂量长度乘积(dose-length product, DLP)、有效吸收剂量。胸部有效剂量变换系数取 0.017。

1.3.2 图像质量分析

CT 图像质量评估: (1)水模成像的均匀性及噪声评价: 在模拟实验得到的 2 组各 10 幅图像上各选择 5 个面积为 100 mm² 的圆形 ROI, 分别位于图像的中心和上、下、左、右距边缘 20 mm 处, 测量 CT 值和标准差, 计算均匀性及噪声: 均匀性=CT_c-CT_p(CT_c 为中心测量区的平均 CT 值, CT_p 为边缘 4 个测量区的平均 CT 值), 噪声即上述测量区 CT 值的标准差平均值。根据国家计量检定规定, 均匀性绝对值≤5 HU 为可接受范围^[1]。(2)受检者图像的视觉评价: 由 2 名高年资放射科医师对 26 例共 33 个结节所在肺段支气管血管束、结节特性(形态、周边特性)、结节大小进行观测。评价标准为: ①支气管血管束: 段级或段级以下支气管、三级或三级以下肺血管清晰显示, 且边缘锐利为优; 段级或段级以下支气管、三级或三级以下肺血管可以显示, 但边缘略毛糙为较好; 段级或段级以下支气管、三级或三级以下肺血管不可显示为差。②肺结节特性: 分可观和不可观, 结节形态主要包括大体形状(球形、类圆形、不规则形)、分叶征、棘状突起, 周边特性则包括细毛刺征、结节周边磨玻璃密度、卫星灶、胸膜凹陷征等; ③结节大小: 选择结节显示的最大横轴面, 手动勾画测其横截面积, 取 3 次测量的平均值。

PET 图像质量评估: 由于 RG PET/CT 将呼吸时相分为 6 份, 1 个床位 PET 采集 6 min, 即 1 min/时相, 因此会造成 PET 图像信息量的减低。通过查阅文献, 可用 SUV 信噪比这一参数来评价其与常规 PET 图像(2 min/床位)的差异。在肺结节上选取面积为 100 mm² 的圆形 ROI, 测量 SUV 平均值及标准差, 并计算信噪比: 信噪比=SUV 平均值/SUV 标准差^[12]。

1.4 统计学分析

应用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析, 数据采

用 $\bar{x}\pm s$ 表示, 差值满足正态分布及方差齐性的数据用配对 t 检验, 否则用配对秩和检验。 $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 辐射剂量分析结果

受检者行 1 个床位的低剂量(30mA)RG PET/CT 的有效吸收剂量为 4.88~7.69 mSv, 常规剂量(120 mA) PET/CT 的有效吸收剂量为 1.68 mSv, 3 名志愿者行常规剂量(250~350 mA)PET/CT 的有效吸收剂量为 5.60~7.85 mSv(表 1)。低剂量 RG PET/CT 与常规剂量(250~350 mA)PET/CT 产生的剂量接近, 说明采用低管电流行 RG PET/CT 可以使辐射剂量得到有效控制。

表 1 低剂量 RG PET/CT 与常规剂量 PET/CT 的辐射剂量结果($\bar{x}\pm s$)			
CT 剂量类型 (1 个 PET 床位)	例数	有效吸收剂量 (mSv)	剂量长度乘积 (mGy·cm)
30 mA 低剂量 RG PET/CT	26	5.68±0.83	333.95±48.58
250~350 mA 常规 剂量 PET/CT	3	6.73±1.13	395.64±65.94
120 mA 常规剂量 PET/CT	26	1.68±0.73	99.03±43.15

注: 表中, RG: 呼吸门控。

2.2 图像质量分析结果

2.2.1 水模图像的均匀性及噪声分析结果

水模图像的均匀性及噪声分析结果见表 2。30 mA 低剂量 CT 图像的均匀性<5 HU, 在可接受范围, 但噪声较 120 mA 常规剂量 CT 更高, 二者间差异有统计学意义($t=2.736, P<0.05$)。

表 2 低剂量 CT 与常规剂量 CT 图像质量比较($\bar{x}\pm s$)			
CT 剂量类型	例数	均匀性(HU)	噪声(HU)
30 mA 低剂量 CT	10	0.34±0.21	21.65±0.83
120 mA 常规剂量 CT	10	0.29±0.17	8.38±1.46

2.2.2 受检者 CT 图像视觉分析结果

26 例患者共 33 个结节所在肺段的支气管血管束显示常规剂量(120 mA)时全部为优或较好, 低剂量(30 mA)时 85%显示为较好或优, 仅有 3 枚结节因患者呼吸明显不均而显示较差, 二者间差异无统计学意义($Z=-1.615, P>0.05$); 而结节特性观察及大小测量结果显示二者间差异亦无统计学意义($Z=-1.315, P>0.05$), 且在第 3~5 个呼吸时相肺结节的边界更锐

利, 分叶征、细毛刺征等征象更容易观察(图 1)。

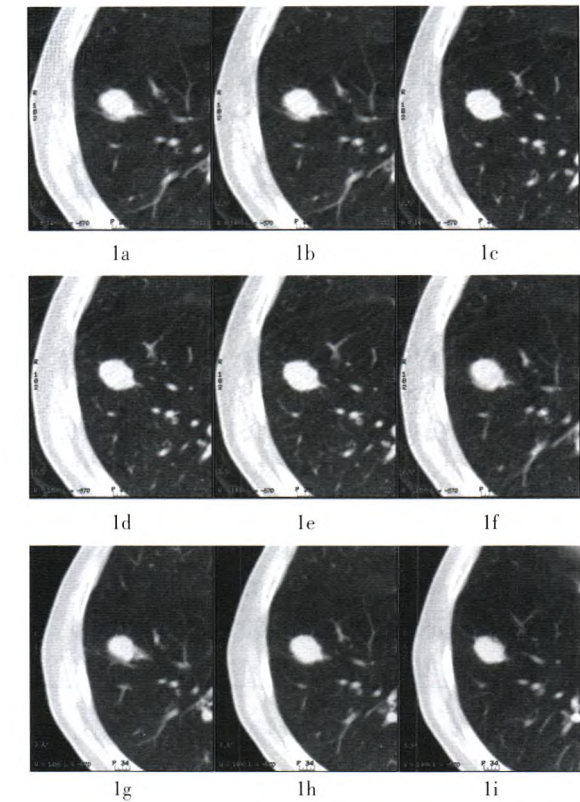


图 1 患者男性, 56 岁, 无明显不适主诉, 体检胸部 X 线片发现右肺结节。PET/CT 发现右下肺前基底段 ^{18}F -FDG 摄取增高结节。图中, 1a~1f 为同一层面肺结节的 6 个呼吸时相的 30 mA CT 图像, 其中, 1c~1e 示第 3~5 个时相的肺结节大小、形态及周边细短毛刺显示清晰; 1g~1i 为连续 3 个层面的 120 mA 常规剂量 CT 图像。

2.2.3 PET 图像质量分析结果

RG PET/CT 的 6 min/床位即 1 min/时相所得的 PET 图像 SUV 信噪比为 4.00 ± 0.35 , 常规 2 min/床位的 PET 图像 SUV 信噪比为 3.98 ± 0.55 , 二者间的信噪比差异无统计学意义($Z=-1.109, P>0.05$)。

2.3 呼吸周期模拟实验结果

由表 3 可以看出, 呼吸周期和扫描持续时间越长, 受检者所接受的 CT 容积剂量指数及 DLP 越大, 即有效吸收剂量越大。因此, 嘱咐受检者尽量缩短呼吸周期是减少辐射剂量的有效办法。

3 讨论

由于 RG PET/CT 能有效校正运动伪影, 其测量的 SUV 相应增高, 从而提高了病变的检出率及争议病变的诊断准确率, 因此在临床及基础研究中的应用越来越广泛, 已从早期较广泛的肺部肿瘤诊断^[1]、放疗靶区勾画研究^[13]扩展到腹部胰腺癌^[14]、

表3 呼吸周期与辐射剂量关系的模拟结果

呼吸 周期(s)	电影持续 时间(s)	CT 容积剂量 指数(mGy)	剂量长度乘积 (mGy·cm)
0.5	1.5	3.94	63.03
1.0	2.0	5.25	84.04
1.5	2.5	6.57	105.05
2.0	3.0	7.88	126.06
2.5	3.5	9.19	147.07
3.0	4.0	10.50	168.07
3.5	4.5	11.82	189.08
4.0	5.0	13.13	210.09
4.5	5.5	14.44	231.10
5.0	6.0	15.76	252.11
5.5	6.5	17.07	273.12
6.0	7.0	18.38	294.13
6.5	7.5	19.70	315.14
7.0	8.0	21.01	336.15
7.5	8.5	22.32	357.16
8.0	9.0	23.64	378.17

肝转移灶^[15]等的研究中，且最新发现已用于建立动物模型的基础研究^[16]。

本研究为了避免受检者短时间内受到大量照射，仅对其行 30 mA 的 RG PET/CT，不足之处在于未能对比低剂量与常规剂量（120 mA 或更高剂量管电流）、6 个呼吸时相与更多呼吸时相（>6 个）的 RG PET/CT 数据。而本研究的重点在于探讨 30 mA、6 个呼吸时相 RG PET/CT 采集的可行性。

3.1 RG PET/CT 管电流的选择

在适当范围内降低管电流对 CT 图像质量的影响在可接受范围内。国内学者报道的最低管电流为 20~35 mA（或 mAs）^[17-18]，殷瑞根等^[19]还针对肺尖部这一特殊部位提出 30~50 mA 的低剂量管电流；而国外较早的相关报道为 50 mAs^[20]，近年则低至 10~20 mAs^[8,21-24]。Christe 等^[24]对比了 5~300 mAs 的不同管电流对肺结节的检出率，结果发现 10 mAs 及以上的低剂量管电流的图像检出率无明显差异。Li 等^[8]对 10 mAs CT 图像进行四维惩罚加权最小二乘算法重建，得到了噪声抑制较好、分辨率较高的 PET/CT 图像。Das 等^[23]也在 10 mAs 基础上对比肉眼与计算机辅助检测算法对肺结节检出率的差异，结果发现借助计算机辅助检测算法能更好地显示肺结节。诸如计算机辅助检测算法及四维惩罚加权最小二乘算法重建技术等都为 RG PET/CT 进一步降低辐射剂量提供了技术基础。

基于以上研究，本研究选择 30 mA 作为实验性低剂量管电流，研究结果证明 30 mA 采集的图像质量基本满意，又能大幅降低对患者的辐射剂量。

3.2 RG 其他参数的讨论

基于非均匀有理 B 样条曲线的心脏-躯干体模是集成了人体解剖数据并能够模拟心脏和呼吸运动的动态数字体模，Zhu 等^[25]研究了不同门控方案对基于非均匀有理 B 样条曲线的心脏-躯干数字体模的蒙特卡罗仿真图像的呼吸伪影校正效果，结果表明：当时相数小于 6 个时，起始时相位于呼气和吸气末时的图像比其他位置的图像更模糊；当时相数在 8 个以上时，可消除起始时相位置对图像的影响，伪影也校正得更彻底。而呼吸时相数目越多，相同采集时间内单个相位获得的信息越少，图像质量则相应变差。故本研究选择 6 个呼吸时相，在有效校正呼吸伪影的同时，又不必特意增加单个床位的采集时间。

呼吸周期模拟实验证实辐射剂量与呼吸周期呈正相关。呼吸周期和扫描时间越短，受检者所接受的辐射剂量越低。但在临床实际中一味要求受检者缩短呼吸周期，反而常会引发呼吸不均，依旧会影响 RG 的采集甚至采集失败。一般来说，正常人呼吸周期多为 3~5 s（12~20 次/min），如此模拟的有效吸收剂量为 2.86~4.28 mSv，仍低于本研究中的实际采集吸收剂量。因此，嘱咐受检者尽量避免大幅度喘气、尽可能平静均匀地呼吸即为相对理想的呼吸方式。

此外，四维 CT 扫描的范围应略大于 PET 范围，技术人员应尽量缩短 Z 轴的扫描范围，这对减低受检者的辐射剂量亦有意义。

3.3 PET/CT 图像质量的讨论

根据国家计量检定规定，低剂量 RG PET/CT 的 CT 图像均匀性良好（<5 HU），但噪声水平较大，除了管电流较低这个主要原因外，2.5 mm 的较小层厚也是重要原因之一^[26]。然而，2 位高年资放射科医师对于肺结节特性的观测在低剂量 CT 中并未受到明显影响，相反，由于克服了呼吸伪影，在某些时相上（如第 3~5 个时相）的观测反而更优。因此，低剂量 CT 不仅足以满足放疗靶区勾画的需要，也能基本满足肺结节的诊断需求。

3.4 RG PET/CT 显像的辐照剂量讨论

国内一项研究报道常规胸部 CT 扫描辐射剂量约为（6.9±0.1）mSv[120 kV，（382.8±26.0）mA]^[27]，本研究中 250~350 mA 常规 PET/CT 扫描患者的有效吸收剂量为 5.60~7.85 mSv。而低剂量 RG PET/CT 的有

效吸收剂量为 4.88~7.69 mSv, 与上述常规诊断的辐射剂量近似, 说明采用低管电流可以使辐射剂量得到有效地控制。国外有研究指出, RG PET/CT 显像的辐射剂量是常规 CT 的 15~16 倍^[9]。Pan 等^[10]的研究发现, 在 50~150 mA 管电流、5 s 的电影持续时间、0.5 s 的球管旋转时间、20 cm 的扫描范围、10 个时相的胸部 RG PET/CT 的采集条件下, 辐照剂量为 23~70 mGy, 有效剂量相当于 7.82~23.8 mSv, 辐射剂量相对较高。而 Li 等^[9]则发现, 在 120 kV、90 mA、2.5 mm 层厚、25 cm 扫描范围、0.45 s 的扫描间隔时间、0.8 s 的持续时间下, 辐照剂量为 80.2 mGy, 有效剂量相当于 34 mSv, 受检者的受照剂量更高。

此外, 关于 30 mA 低剂量 RG PET/CT 在放疗生物靶区定位中的应用, 考虑到放疗患者在定位前多数已行近期诊断剂量的胸部 CT, 因此没有必要采用诊断剂量的管电流对其进行 PET/CT 靶区定位, 而低剂量管电流既可满足定位需求又不致无谓地加大患者的受照剂量。

参 考 文 献

- [1] Guerra I, De Ponti E, Elisei F, et al. Respiratory gated PET/CT in a European multicentre retrospective study: added diagnostic value in detection and characterization of lung lesions. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2012, 39(9): 1381-1390.
- [2] van Elmpt W, Hamill J, Jones J, et al. Optimal gating compared to 3D and 4D PET reconstruction for characterization of lung tumours. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2011, 38(5): 843-855.
- [3] Prokop M. Radiation dose in computed tomography. Risks and challenges. *Radiology*, 2008, 48(3): 229-242.
- [4] Cohen MD. Pediatric CT radiation dose: how low can you go?. *AJR Am J Roentgenol*, 2009, 192(5): 1292-1303.
- [5] McCollough CH, Primak AN, Braun N, et al. Strategies for reducing radiation dose in CT. *Radiol Clin North Am*, 2009, 47(1): 27-40.
- [6] 武志芳, 李思进, 刘建忠, 等. 呼吸门控 PET/CT 对肺部结节 SUV 的影响. *中华核医学与分子影像杂志*, 2012, 32(2): 111-114.
- [7] 樊卫, 张伟光, 杨小春. PET/CT 呼吸门控技术及其应用介绍. *中华核医学杂志*, 2007, 27(2): 126-128.
- [8] Li T, Schreiber E, Thorndyke B, et al. Radiation dose reduction in four-dimensional computed tomography. *Med Phys*, 2005, 32(12): 3650-3660.
- [9] Hara R, Itami J, Kondo T, et al. Stereotactic single high dose irradiation of lung tumors under respiratory gating. *Radiother Oncol*, 2002, 63(2): 159-163.
- [10] Pan T, Mawlawi O, Nehmeh SA, et al. Attenuation correction of PET images with respiration-averaged CT images in PET/CT. *J Nucl Med*, 2005, 40: 1481-1487.
- [11] 北京市计量科学研究所, 首都医科大学医学仪器质量控制技术研究中心. JJG 961-2001 医用诊断计算机断层摄影装置(CT)X 射线辐射源检定规程. 北京: 中国计量出版社, 2001.
- [12] Chang G, Chang T, Pan T, et al. Implementation of an automated respiratory amplitude gating technique for PET/CT: clinical evaluation. *J Nucl Med*, 2010, 51(1): 16-24.
- [13] Lamb JM, Robinson C, Bradley J, et al. Generating lung tumor internal target volumes from 4D-PET maximum intensity projections. *Med Phys*, 2011, 38(10): 5732-5737.
- [14] Kasuya T, Tateishi U, Suzuki K, et al. Role of respiratory-gated PET/CT for pancreatic tumors: a preliminary result. *Eur J Radiol*, 2013, 82(1): 69-74.
- [15] Suenaga Y, Kitajima K, Aoki H, et al. Respiratory-gated ¹⁸F-FDG PET/CT for the diagnosis of liver metastasis. *Eur J Radiol*, 2013, 82(10): 1696-1701.
- [16] Wu A, Zheng H, Kraenzle J, et al. Ferret thoracic anatomy by 2-deoxy-2-(¹⁸F)fluoro-D-glucose (¹⁸F-FDG) positron emission tomography/computed tomography (¹⁸F-FDG PET/CT) imaging. *ILAR J*, 2012, 53(1): 9-21.
- [17] 黎喜, 谢增海, 罗慧. 低剂量(30 mA)胸部螺旋 CT 扫描的效果观察. *广东医学院学报*, 2006, 24(1): 39-40.
- [18] 孔秋雁, 陈廷港, 许崇永, 等. 多排螺旋 CT 低剂量扫描在小儿胸部的应用. *实用放射学杂志*, 2007, 23(6): 792-794.
- [19] 殷瑞根, 王冬青, 赵亮, 等. 多层螺旋 CT 肺部低剂量扫描的参数优化. *实用放射学杂志*, 2004, 20(8): 694-697.
- [20] Karabulut N, Törtü M, Gelebek V, et al. Comparison of low-dose and standard-dose helical CT in the evaluation of pulmonary nodules. *Eur Radiol*, 2002, 12(11): 2764-2769.
- [21] Zhu X, Yu J, Huang Z. Low-dose chest CT: optimizing radiation protection for patients. *AJR Am J Roentgenol*, 2004, 183(3): 809-816.
- [22] Wormanns D, Ludwig K, Beyer F, et al. Detection of pulmonary nodules at multirow-detector CT: effectiveness of double reading to improve sensitivity at standard-dose and low-dose chest CT. *Eur Radiol*, 2005, 15(1): 14-22.
- [23] Das M, Mühlenbruch G, Heinen S, et al. Performance evaluation of a computer-aided detection algorithm for solid pulmonary nodules in low-dose and standard-dose MDCT chest examinations and its influence on radiologists. *Br J Radiol*, 2008, 81(971): 841-847.
- [24] Christe A, Torrente JC, Lin M, et al. CT Screening and follow-up of lung nodules: effects of tube current-time setting and nodule size and density on detectability and of tube current-time setting on apparent size. *AJR Am J Roentgenol*, 2011, 197(3): 623-630.
- [25] Zhu Zhiyu, Tsui BMW, Segars WP. A Simulation Study of the Effect of Gating Scheme on respiratory Motion Blurring in FDG lung PET. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, 50(3): 1554-1558.
- [26] 黄明刚, 郭佑民, 郑桂芳, 等. 早期肺癌低剂量 CT 检测的技术优化与应用. *实用放射学杂志*, 2011, 27(8): 1263-1268.
- [27] 刘彬, 白玫. 64 层螺旋 CT 检查中患者受照剂量的研究. *中华放射学杂志*, 2008, 42(10): 1050-1052.

(收稿日期: 2013-07-02)