

# PET/CT 中 CT 自动管电流模式的图像质量与受检者有效剂量关系的研究

吴一田<sup>1,2</sup> 耿建华<sup>1,2</sup> 杜召猛<sup>1</sup> 毕高畅<sup>1</sup> 齐雍鹤<sup>1</sup> 张朝坤<sup>1</sup> 郑容<sup>1,2</sup> 吴宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国家癌症中心、中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院 PET/CT 中心 100021;

<sup>2</sup>国家癌症中心、中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院核医学科 100021

通信作者:耿建华, Email: gengjean@163.com

**【摘要】** 目的 研究 PET/CT 中 CT 自动管电流模式图像质量与受检者有效剂量(ED)的关系,探讨最优采集方案。方法 使用美国 GE Discovery ST-16 型和 Discovery Elite 型 PET/CT 设备对仿真人体模型进行扫描,CT 采集条件相同:管电压 120 kV,螺距 1.375,转速 0.8 s,噪声指数 8~30,间隔为 2,自动管电流低限 30 mA,高限 200~350 mA,间隔 50 mA。计算腹部主要器官噪声、信噪比(SNR)及优良指数(FOM),分析图像质量与 ED 间的关系。组间比较采用两样本 *t* 检验。结果 各器官图像噪声随 ED 增加而降低,但 ST-16 型 ED 增至 15 mSv,Elite 型增至 12 mSv 后,图像噪声降低幅度减小,变化趋势平缓。各器官图像 SNR 随 ED 增加而升高;肝脏 FOM 随 ED 增加而降低,其他器官 FOM 随 ED 增加变化不明显。相同 ED(5~20 mSv)时,Elite 型扫描图像指标均优于 ST-16 型,但差异无统计学意义(*t* 值:0.133~4.701,均  $P>0.05$ );ED 为 5 mSv 时,ST-16 型肝脏图像噪声较 Elite 型高出 12.0%(28.9 与 25.8),Elite 型肝脏图像 SNR 及 FOM 较 ST-16 型分别高出 13.9%(4.1 与 3.6)及 66.7%(0.50 与 0.30)。结论 2 种机型所致 ED 在 5~20 mSv 间,在一定范围内增加 ED,图像质量随之提高。

**【关键词】** 正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机;辐射剂量;腹部;人体模型

**基金项目:**国际科技合作项目(2009DFA32960);中国癌症基金会北京希望马拉松专项基金(LC2016A02)

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.03.007

## Relationship between image quality of PET/CT in automatic tube current modulation and effective dose

Wu Yitian<sup>1,2</sup>, Geng Jianhua<sup>1,2</sup>, Du Zhaomeng<sup>1</sup>, Bi Gaochang<sup>1</sup>, Qi Yonghe<sup>1</sup>, Zhang Chaokun<sup>1</sup>, Zheng Rong<sup>1,2</sup>, Wu Ning<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of PET/CT Center, National Cancer Center, Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100021, China; <sup>2</sup>Department of Nuclear Medicine, National Cancer Center, Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100021, China

Corresponding author: Geng Jianhua, Email: gengjean@163.com

**【Abstract】 Objective** To investigate the relationship between image quality of PET/CT in automatic tube current modulation and effective dose(ED) of patients and to determine the optimal acquisition scheme. **Methods** Scanning was performed on anthropomorphic phantom RS-550 using GE Discovery ST-16 or Discovery Elite PET/CT. The same CT acquisition conditions was used: tube voltage 120 kV, pitch 1.375, rotation speed 0.8 s, noise index ranged from 8 to 30, interval 2, automatic tube current low limit 30 mA, high limit ranged from 200 to 350 mA, interval 50 mA. The images were analyzed, and the noise, signal to noise ratio (SNR) and figure of merit (FOM) of main organs in the abdomen were calculated. The relationship between image quality and ED was analyzed. Two-sample *t* test was used for data analysis. **Results** The noise of each organ decreased significantly along with the increase of ED until the ED of ST-16 increased to 15 mSv or Elite increased to 12 mSv, then the image noise decreased gently. SNR of each organ image increased along with the increase of ED. The FOM of liver decreased along with the increase of ED, while the FOM of other organs did not change significantly with ED. All image indicators of Elite PET/CT were better than ST-16 PET/CT at the same ED (5~20 mSv), though there was no significant difference (*t*: 0.133~4.701, all  $P>0.05$ ). When ED was 5 mSv, the noise of liver with ST-16 was 12.0% (28.9 vs 25.8) higher than that with Elite, and the SNR and FOM of liver with Elite was 13.9% (4.1 vs 3.6) and 66.7% (0.50 vs 0.30) higher than that with ST-16, respectively. **Conclusion** When the ED caused by the 2 PET/CT systems was between 5~20 mSv, the image quality is improved along with the ED increasing in a certain range.

**【Key words】** Photon-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Radiation dosage;

Abdomen; Manikins

**Fund program:** International S&T Cooperation Program of China (2009DFA32960); Beijing Hope

Run Special Fund of Cancer Foundation of China (LC2016A02)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.03.007

PET/CT 在临床中的应用不断增加,图像质量及辐射剂量的控制非常重要。有研究使用美国 GE Discovery ST-16 型 PET/CT 在多种固定管电流和一种自动管电流条件下对仿真人体模型 RS-550 进行扫描,并对图像质量和有效剂量 (effective dose, ED) 的关系进行探讨,结果显示使用自动管电流模式 (automatic tube current modulation, ATCM) 时,不仅 ED 较固定管电流模式更低,图像质量也更好<sup>[1-4]</sup>。本研究用 2 种型号的 PET/CT 仪,在 CT 采集部分采用 ATCM,对仿真人体模型进行扫描,以探讨不同采集条件所获的图像质量与受检者 ED 间的关系,为确定最优化采集方案提供参考依据。

### 材料与方 法

1. 仪器设备。使用 2 种不同机型 PET/CT 仪,分别为美国 GE Discovery ST-16 型和美国 GE Discovery Elite 型。仿真人体模型为 The Fission-Product Model RS-550 型,各部分构成与标准成年人一致<sup>[2]</sup>。

2. 采集条件。(1)扫描范围。使用与临床检查一致的头-颈部及体部分段扫描方式,即头顶至锁骨上为头-颈部,2 个床位,共 87 层,扫描长度 281.22 mm;锁骨上至股骨上段为体部,5 个床位,共 207 层,扫描长度 673.62 mm。

(2)扫描参数。PET/CT 中 CT 部分的扫描均使用 ATCM,2 个机型重建算法分别为:Discovery ST-16 型,滤波反投影法 (filtered backprojection, FBP);Discovery Elite 型,自适应统计迭代重建法 (adaptive statistical iterative reconstruction, ASiR)。其他 CT 采集条件相同:管电压 120 kV,螺距 1.375,转速 0.8 s,噪声指数 8~30,间隔 2,自动管电流低限均为 30 mA,高限为 200~350 mA,间隔 50 mA,共 48 组。采用上述条件分别对仿真人体模型 RS-550 进行扫描。

3. CT 图像质量指标。将仿真人体模型在 2 个机型 PET/CT 各 CT 扫描参数下获得的图像传输至 GE Xeleris 工作站,对腹部主要器官(肝、脾、胃、左肾)的图像进行分析,并计算不同 CT 采集条件下的图像质量指标,即噪声、信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 及优良指数 (figure of merit, FOM)。(1)噪声。CT 图像噪声指在均匀物质的影像中,给定区域 CT 值偏离平均 CT 值的程度,可用感兴趣区 (region

of interest, ROI) 中均匀物质 CT 值的标准差 (standard deviation, SD) 表示<sup>[3-4]</sup>。在 CT 图像的腹部主要器官及组织中心层面勾画 ROI,ROI 应在避开该器官及组织边缘的条件下尽量大,且不同扫描条件下所获图像上绘制的 ROI 大小、形状、位置尽量保持一致,记录系统自动得出的 ROI 的 SD 值。每组图像中各器官 ROI 绘制并测量 3 次,取平均值。

(2) SNR。即 ROI 中有效信号与噪声强度的比值,可由公式(1)计算获得。

$$SNR = ROI_t / SD_t \dots\dots\dots (1)$$

其中,t 为靶 (target),ROI<sub>t</sub> 为器官 ROI 的 CT 值,SD<sub>t</sub> 为噪声值,两者单位均为 HU。由公式可知,有效信号强度越高、噪声强度越低,SNR 则越高。

(3) FOM。反映不同 CT 采集条件下图像质量与辐射剂量关系的综合指标,计算公式为<sup>[5]</sup>:

$$FOM = CNR^2 / ED \dots\dots\dots (2)$$

其中,对比信噪比 (contrast to noise ratio, CNR) 为靶器官与相邻器官或组织图像对比差异的评价指标,为靶器官 ROI 与肌肉 ROI (ROI<sub>m</sub>) 的差值与背部肌肉 ROI SD 值的比;ED 为 CT 部分扫描所致有效剂量<sup>[6]</sup>。FOM 越大,该 CT 采集方案合理性及性价比相对越高。

4. 统计学处理。采用 IBM SPSS 22.0 软件分析数据。符合正态分布的计量数据以  $\bar{x} \pm s$  表示。2 种机型间数据比较采用两样本 t 检验,P<0.05 为差异有统计学意义。

### 结 果

1. ED 与图像噪声。ST-16 型和 Elite 型 PET/CT 仪显像腹部主要器官图像噪声随 ED 的增加而降低,且 ED 较低时变化幅度较大,当 ED 增加至 15 mSv (ST-16 型) 或 12 mSv (Elite 型) 时,图像噪声下降趋势逐渐平缓,并维持在较低水平。Elite 型 ED 为 12 mSv 时,肝噪声为 19.0 HU。相同 ED 范围内 (5~20 mSv),Elite 型 PET/CT 图像噪声均低于 ST-16 型 (表 1),但差异无统计学意义 (t 值: 0.55~1.010, 均 P>0.05)。

2. ED 与 SNR。在 48 种 CT 采集条件下,2 个机型显像腹部主要器官图像 SNR 均随 ED 增加而上升,但变化趋势为非线性;ED 增至较高水平 (ST-16 型 15 mSv, Elite 型 12 mSv) 时,SNR 增加幅度减小,

表 1 ST-16 型与 Elite 型 PET/CT 不同有效剂量(ED)下腹部器官的图像质量指标结果

机型	有效剂量 (mSv)	噪声(HU; $\bar{x}\pm s$ )				信噪比( $\bar{x}\pm s$ )				优良指数( $\bar{x}\pm s$ )			
		肝	胃	脾	左肾	肝	胃	脾	左肾	肝	胃	脾	左肾
ST-16 型	5	28.9±1.2	23.5±2.5	27.1±2.1	25.8±1.9	3.6±0.6	3.7±0.5	3.3±1.2	3.4±1.5	0.30±0.20	0.07±0.01	0.07±0.02	0.09±0.01
	10	23.5±0.9	18.1±2.0	21.7±1.7	17.5±1.3	4.5±0.4	5.2±0.5	4.4±0.5	4.3±0.7	0.27±0.10	0.06±0.01	0.05±0.01	0.06±0.00
	15	21.0±1.3	15.5±1.2	17.3±1.3	16.3±1.7	5.0±0.6	6.1±0.7	4.9±0.4	5.3±0.7	0.25±0.40	0.05±0.03	0.05±0.02	0.06±0.01
	20	20.1±1.1	15.5±0.9	16.9±1.1	14.5±0.5	5.2±1.1	6.4±0.4	5.2±0.7	5.7±0.6	0.22±0.30	0.04±0.02	0.03±0.01	0.04±0.01
Elite 型	5	25.8±1.7	19.2±1.5	21.2±2.3	19.1±1.3	4.1±0.4	4.4±0.6	4.1±0.9	4.5±0.8	0.50±0.30	0.10±0.02	0.09±0.01	0.20±0.02
	10	20.5±1.2	15.2±0.8	16.8±1.4	15.2±0.6	4.9±0.7	5.5±0.6	5.1±0.4	6.0±0.6	0.37±0.20	0.09±0.01	0.08±0.02	0.15±0.02
	15	19.0±1.4	13.0±0.7	14.3±0.7	13.0±0.6	5.3±0.9	6.5±0.7	5.9±0.6	6.9±0.6	0.29±0.20	0.07±0.02	0.07±0.01	0.13±0.01
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注:“-”为无数据(Elite 型有效剂量未到 20 mSv)

变化趋势平缓。Elite 型 ED 为 12 mSv 时,SNR 为 5.2。相同 ED 范围内(5~20 mSv),Elite 型各器官信噪比均高于 ST-16 型(表 1),但差异无统计学意义( $t$  值:0.133~1.328,均  $P>0.05$ )。

3. ED 与 FOM。肝 FOM 随 ED 增加而降低,ST-16 型变化幅度较小,Elite 型在 ED 增至较大值(12 mSv)后,变化平缓;其他器官 FOM 随 ED 增加变化幅度均不明显。Elite 型 ED 为 12 mSv 时,FOM 为 0.37。相同 ED 范围内(5~20 mSv),Elite 型各器官 FOM 高于 ST-16 型(表 1),但差异无统计学意义( $t$  值:0.133~4.701,均  $P>0.05$ )。

## 讨 论

PET/CT 中 CT 部分所致 ED 随采集条件变化差异较大,而扫描所获图像质量与 ED 关系密切,因此 CT 采集条件的选择尤为重要。理想的采集条件是既能保证图像质量,又能将辐射剂量控制在较低水平。仿真人体模型能很好地模拟人体各器官 X 线的衰减特性,且不存在伦理问题,允许使用多种采集条件反复扫描,以寻求最优化 CT 采集方案。

噪声、SNR 及 FOM 是评价 CT 图像质量的最常用指标。图像噪声是均匀物质 CT 值的 SD,是影响图像质量的重要因素,图像噪声越大,质量越差,图像越不清晰。本研究结果显示,2 个机型 PET/CT 显像腹部主要器官图像噪声总体上随 ED 的增加而降低,但变化趋势并非线性。ST-16 型 ED<15 mSv,Elite 型 ED<12 mSv 时,图像噪声随 ED 增加而降低的趋势显著;ED 大于该值时,图像噪声随 ED 增加而降低的幅度减小,变化趋势平缓,噪声值始终维持在较低水平。不同器官的图像噪声不尽相同。ST-16 型 ED=15 mSv、Elite 型 ED=12 mSv 分别为 2 种机型 ED 拐点值。比较 2 种机型各指标时,为便于比较,采用相同截点 ED 对应的各指标值(表 1)。统计本中心

2 个机型各 10 例临床实际检查所得剂量报告,当 ST-16 型 ED 从 8.12 mSv 增至 11.93 mSv 时,肝噪声值从 24.93 降至 23.58;Elite 型 ED 从 7.68 mSv 增至 9.58 mSv 时,肝噪声值从 22.52 降至 21.32。虽然仿真人体模型与人体有所差异,但使用相同 CT 采集条件扫描,所致 ED 相同,图像噪声值随 ED 的变化趋势应一致。

图像 SNR 是综合了图像有效信号及噪声的质量评价指标,其值越大,图像质量越好。本研究结果表明,图像 SNR 随 ED 的增加而上升,其变化趋势与噪声变化趋势对应,同样为非线性;当 ED 超过一定范围,SNR 随 ED 增加而上升的幅度逐渐减小,变化趋势趋于平缓。本研究结果中噪声及 SNR 的变化趋势与前期采用 CT 固定管电流的文献[1]结果相似。

理论上,一般 FOM 越大,采集方案性价比越高。本研究结果显示,ST-16 型主要器官 FOM 随 ED 增加变化幅度均较小,Elite 型 ED>12 mSv 后,变化亦趋于平缓。因此,此时根据 FOM 来判断采集方案的性价比价值不高,还应综合其他指标。本研究中噪声及 SNR 的变化趋势与前期采用 CT 固定管电流的文献[1]结果有差异,可能是计算公式不同所致。

ED 相同时,Elite 型的各评价指标数据均高于 ST-16 型,如 ED 为 5 mSv 时,ST-16 型肝脏图像噪声较 Elite 型高出约 12.0%(28.9 与 25.8),Elite 型肝脏图像 SNR 及 FOM 较 ST-16 型分别高出约 13.9%(4.1 与 3.6)及 66.7%(0.50 与 0.30)。ED 为 15 mSv 时,ST-16 型肝脏图像噪声较 Elite 型高出约 10.5%(21.0 与 19.0),Elite 型肝脏图像 SNR 及 FOM 较 ST-16 型分别高出约 6.0%(5.3 与 5.0)及 16.0%(0.29 与 0.25)。该结果与浦仁旺等<sup>[7]</sup>的研究结果相似。分析原因:Elite 型 PET/CT 采用的重建算法为 ASiR,而 ST-16 型为 FBP,ASiR 可对所有投射数据进行多次迭代和校正,重建出噪声较低而质量较高的图像,FBP 会混入正常穿透人体射线中的散射线一并进行

计算,使图像噪声增加<sup>[8-10]</sup>。2 种机型各指标的差异均无统计学意义,但在临床实际运用时,若对图像质量有较高要求或在剂量上需严格控制时,还是应选择 Elite 型。

本研究使用 ATCM, 所得各项图像评价指标随 ED 的变化趋势与此前在固定管电流模式下的研究结果相似,但指标更优。如当 ED 分别为 5、10 和 15 mSv 时,ST-16 型 PET/CT 使用固定管电流扫描,肝图像噪声分别较使用 ATCM 时高 50.2% (43.4 与 28.9)、8.9% (25.6 与 23.5) 和 4.8% (22.0 与 21.0), 使用 ATCM 肝脏图像 SNR 分别较使用固定管电流高约 50.0% (3.6 与 2.4)、4.7% (4.5 与 4.3) 和 4.2% (5.0 与 4.8)。使用 CT ATCM 扫描时,系统会根据受检者特性变化自动调节,从而保障各层扫描图像获得稳定的图像质量,有效降低辐射剂量<sup>[11-13]</sup>。

综上,对于 PET/CT 中 CT 部分最优化采集方案的选择,应综合考虑评价图像质量的各个参数及扫描所致 ED。本研究 ST-16 型 ED 为 15 mSv 时,肝脏图像噪声、SNR 及 FOM 分别为 21.0 HU、5.0 和 0.25;Elite 型 ED 为 12 mSv 时,肝脏图像噪声、SNR 及 FOM 分别为 19.0 HU、5.2 和 0.37,此时图像噪声较低、SNR 较高、FOM 合理且 ED 可接受,视为优良采集方案。Elite 型 PET/CT 由于采用更为合理的重建算法 ASiR 以及前述原因,其扫描图像各项质量指标均优于 ST-16 型,且所致 ED 低于 ST-16 型。CT 部分扫描时采用 ATCM,可有效降低辐射剂量,明显提升图像质量,值得推广。在临床实际应用中,对于病灶明显、性质判定较为容易的患者,图像质量以满足诊断需求为主,可能并不需要达最佳图像质量;但对于病灶不明确或性质难以确定者,图像质量应力求在辐射剂量能被接受的情况下达到最佳。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参 考 文 献

[1] 梁子威,耿建华,王弈斌,等. PET/CT 中 CT 仿真人体模型的图像质量与辐射剂量关系的研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36(7): 524-529. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.07.010.  
Liang ZW, Geng JH, Wang YB, et al. Effect on image quality and radiation dose in a phantom study for PET/CT[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2016, 36(7): 524-529. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.07.010.

[2] 梁子威,耿建华,王弈斌,等. PET/CT 受检者的有效剂量及其影响因素的研究[J]. 中国医学装备, 2015, 12(11): 1-5. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2015.11.001.  
Liang ZW, Geng JH, Wang YB, et al. Research on effective dose and influence factors for PET/CT patients[J]. Chin Med Equip, 2015, 12(11): 1-5. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2015.11.001.

[3] Buls N, Van Gompel G, Van Cauteren T, et al. Contrast agent and radiation dose reduction in abdominal CT by a combination of low tube voltage and advanced image reconstruction algorithms[J]. Eur Radiol, 2015, 25(4): 1023-1031. DOI:10.1007/s00330-014-3510-5.

[4] Schindera ST, Nelson RC, Yoshizumi T, et al. Effect of automatic tube current modulation on radiation dose and image quality for low tube voltage multidetector row CT angiography: phantom study[J]. Acad Radiol, 2009, 16(8): 997-1002. DOI: 10.1016/j.acra.2009.02.021.

[5] Zamboni GA, Ambrosetti MC, Guariglia S, et al. Single-energy low-voltage arterial phase MDCT scanning increases conspicuity of adenocarcinoma of the pancreas[J]. Eur J Radiol, 2014, 83(3): e113-e117. DOI:10.1016/j.ejrad.2013.12.022.

[6] 吕培杰,柴亚如,阎晓朋,等. CT 能谱智能匹配技术联合自适应统计迭代重组技术对腹部低对比剂量扫描图像质量和辐射剂量的影响[J]. 中华放射学杂志, 2016, 50(2): 122-127. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2016.02.010.  
Lyu PJ, Chai YR, Yan XP, et al. Effect of automatic spectral imaging mode selection and adaptive statistical iterative reconstruction at abdominal CT with low contrast agent dose[J]. Chin J Radiol, 2016, 50(2): 122-127. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2016.02.010.

[7] 浦仁旺,刘义军,刘静红,等. 低管电压结合 ASIR 重建对腹部 CT 图像质量的影响:体模研究[J]. 实用放射学杂志, 2015, 31(2): 296-299. DOI:10.3969/j.issn.1002-1671.2015.02.032.  
Pu RW, Liu YJ, Liu JH, et al. Impact of low tube voltage with ASIR on abdominal CT image quality: a phantom study[J]. J Pract Radiol, 2015, 31(2): 296-299. DOI:10.3969/j.issn.1002-1671.2015.02.032.

[8] Shuman WP, Chan KT, Busey JM, et al. Standard and reduced radiation dose liver CT images: adaptive statistical iterative reconstruction versus model-based iterative reconstruction-comparison of findings and image quality[J]. Radiology, 2014, 273(3): 793-800. DOI:10.1148/radiol.14140676.

[9] Marin D, Nelson RC, Samei E, et al. Hypervascular liver tumors: low tube voltage, high tube current multidetector CT during late hepatic arterial phase for detection—initial clinical experience[J]. Radiology, 2009, 251(3): 771-779. DOI:10.1148/radiol.2513081330.

[10] Thibault JB, Sauer KD, Bouman CA, et al. A three-dimensional statistical approach to improved image quality for multislice helical CT[J]. Med Phys, 2007, 34(11): 4526-4544. DOI:10.1118/1.2789499.

[11] Scholtz JF, Wichmann JI, Bennett DW, et al. Detecting intracranial hemorrhage using automatic tube current modulation with advanced modeled iterative reconstruction in unenhanced head single- and dual-energy dual-source CT[J]. AJR Am J Roentgenol, 2017, 208(5): 1089-1096. DOI:10.2214/AJR.16.17171.

[12] Peng W, Li Z, Xia C, et al. A CONSORT-compliant prospective randomized controlled trial: radiation dose reducing in computed tomography using an additional lateral scout view combined with automatic tube current modulation: phantom and patient study[J]. Medicine (Baltimore), 2017, 96(30): e7324. DOI: 10.1097/MD.0000000000007324.

[13] Sookpeng S, Martin CJ, Gentle DJ, et al. Relationships between patient size, dose and image noise under automatic tube current modulation systems[J]. J Radiol Prot, 2014, 34(1): 103-123. DOI:10.1088/0952-4746/34/1/103.

(收稿日期:2018-07-29)