

低管电压结合迭代重建腹部 CT 低剂量扫描的体模研究

王新莲, 贺文, 陈疆红, 赵丽琴, 梁宇霆, 王克扬

【摘要】 目的:评价低管电压结合适应性统计迭代重建(ASIR)对腹部体模低剂量扫描图像质量的影响,探讨适合临床应用的腹部低剂量扫描方案。方法:采用 100 kVp、120 kVp 分别对体模进行重复扫描,应用自动管电流调节(ATCM)技术,100 kVp 扫描时预设噪声指数(NI)分别为 11、12、13、14、15、16、17、18、19、20,每组图像均进行 30%、50%、70%、90% ASIR 重建。120 kVp 组为常规剂量组,扫描时预设 NI 为 11,30% ASIR 重建,测量不同扫描条件下肝脏、脊柱的 CT 值、客观噪声,并计算信噪比(SNR),记录不同扫描条件下的 CT 容积剂量指数(CTDIvol)。由两位高年资医师采用盲法对所有序列图像进行主观评价。结果:100 kVp 条件下,随着 NI 增大,CTDIvol 明显下降;同一 NI 条件下随着 ASIR 比例增加,图像噪声减少,SNR 增加;NI \geq 17 时图像质量下降,无法满足临床诊断要求;NI=15,70% ASIR 组图像噪声、SNR 与 120 kVp 常规组差异无统计学意义($P>0.05$),主观评分相当,但辐射剂量较常规组下降 43.8%。NI=15,90% ASIR 组及 NI=16,90% ASIR 组的图像噪声及信噪比优于常规组($P<0.05$),但图像质量主观评分下降。结论:低管电压结合 ASIR 可以在降低辐射剂量的同时保证图像质量满足临床诊断要求。辐射剂量明显降低时,需要增加 ASIR 在图像重建中的权重。

【关键词】 低管电压; 适应性统计迭代重建; 体层摄影术, X 线计算机; 辐射剂量; 人体模型

【中图分类号】 R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2017)09-0951-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2017.09.012

Phantom study of low tube voltage in combination with adaptive statistical iterative reconstruction in low-dose abdominal CT scan WANG Xin-lian, HE Wen, CHEN Jiang-hong, et al. Department of Radiology, Beijing Obstetrics and Gynecology Hospital, Capital Medical University, Beijing 100006, China

【Abstract】 Objective: To evaluate the influence of the image quality of low-dose abdominal CT scanning, a phantom was used, and low tube voltage in combination with adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR) technique was adapted, in order to investigate the clinical applicable protocol for low-dose abdominal CT scanning. **Methods:** An abdominal phantom was scanned repeatedly with tube voltage as 100kVp and 120kVp, respectively. Automatic tube current modulation (ATCM) technique was used. For 100kVp groups, the noise index (NI) was set at 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 and 20; images were reconstructed with 30% ASIR, 50% ASIR, 70% ASIR and 90% ASIR, respectively. For the 120kVp group (routine standard dose group), NI was set as 11 and images were reconstructed with 30% ASIR. Of the groups using different scanning techniques, the CT value and objective noise level of liver and vertebra were measured, the signal to noise ratio (SNR) was calculated, and the computed tomography dose index volumes (CTDIvol) was recorded. Subjective image score was evaluated by two senior radiologists. **Results:** AT 100kVp, the CTDIvol decreased significantly with increase of NI. While, with the same NI, as the increase of ASIR, there was reduce of image noise and increase of SNR. The image quality was not acceptable for clinical application as NI \geq 17. There were no significant difference in the tissue noise level and SNR between the 70% ASIR group (NI=15) and the routine standard group ($P>0.05$). There was a 43.8% reduction of radiation exposure in the 70% ASIR group (NI=15) compared with the routine group, however, subjective image score was comparable with the routine group. The tissue noise level and SNR of the 90% ASIR group (NI=15 or NI=16) were superior to the routine group, respectively ($P<0.05$), yet subjective image score was inferior as compared to the routine group. **Conclusion:** Low tube voltage in combination with ASIR can ensure comparable image quality with routine standard group while the radiation dosage is significantly reduced. With significant reduce of radiation dosage, increase of ASIR is needed.

【Key words】 Low tube voltage; Adaptive statistical iterative reconstruction; Tomography, X-ray computed; Radiation dose; Manikins

目前,CT 在临床诊断及随访观察中发挥着越来越重要的作用,但同时带来的高电离辐射也越来越引

起公众和学者的关注,如何平衡辐射剂量与图像质量之间的关系,获得满足临床诊断要求且辐射剂量较低的图像是国内外关注的焦点。低剂量研究最早在胸部高对比组织中开展^[1],腹盆部因缺乏天然高对比,低剂量扫描应用相对较少。随着重建算法的更新及自动管

作者单位:100006 北京,首都医科大学附属北京妇产医院放射科
作者简介:王新莲(1977),女,山东人,博士,副主任医师,主要从事腹盆腔疾病及胎儿先天发育异常的影像诊断工作。

电流调节 (automatic tube current modulation, ATCM) 等影像技术的发展, 腹部低剂量研究日益增多。相关研究证实通过迭代重建算法可减低因追求辐射剂量下降所产生的噪声, 保证图像质量满足临床诊断要求^[2-9]。本研究利用 ATCM 技术对仿真人体模型进行扫描, 研究 100 kVp 不同噪音指数条件下辐射剂量、图像质量的变化情况及不同适应性统计迭代重建 (adaptive statistical iterative reconstruction, ASIR) 比例对图像噪声的影响, 旨在探讨适合于腹部低剂量扫描的方案。

材料与方法

1. 实验材料

实验材料采用岛津公司 X 线腹部模型 PH-5 (图 1), 材质为聚氨酯树脂 SZ-50 (比重为 1.06), 采用与人体 X 线吸收率相同的软组织等效材料和骨骼等效材料, 能精准模拟上腹部脏器。通过 CT 扫描, 可获得与人体相近的脏器 CT 值, 并产生伪影。人工模型内含有肋骨部分的软骨、肝脏、胆囊、脾脏、肾脏、胰腺、脊柱、肝内及腹腔内血管, 骨骼使用人工骨。

2. 检查方法

CT 扫描采用美国 GE 公司的宝石能谱 CT (Discovery CT750 HD) 扫描仪, 应用 ATCM 技术, 分别采用 100 kVp 及 120 kVp 进行扫描。100 kVp 及 120 kVp 条件下分别以不同的噪音指数 (noise index, NI, NI=11、12、13、14、15、16、17、18、19、20) 对仿真腹部体模进行重复扫描, 并将所得图像按 ASIR 在图像重建中的比例 (分别为 30%、50%、70% 及 90% ASIR) 分别进行重建, 得到共计 40 组图像; 120 kVp、NI=11、30% ASIR 重建图像采用常规扫描参数。其他固定扫描参数: X 线球管旋转时间为 0.8 s, 螺距 0.984, 矩阵 512×512, 层厚 5 mm, 层间距 5 mm, 视野 35 cm×35 cm, 管电流调节范围为 50~600 mAs。扫描结束后记录不同 NI 及管电压条件下的 CT 容积剂量指数 (CT dose index of volumes, CTDIvol)。

3. 图像评价

扫描结束后将所有图像传至 ADW4.6 工作站进行后处理, 由两位高年资放射诊断医师采用盲法分别阅片 (参考窗宽 350 HU, 窗位 50 HU), 对所有图像 (共 40 组) 进行主观评价, 参考相关文献^[10] 的评分方法将图像质量按 5 分制进行评分: 5 分, 图像质量优, 噪声轻微, 无伪影, 脏器轮廓边缘清晰; 4 分, 图像质量较好, 噪声稍多, 伪影轻微或不明显, 脏器边缘较清晰; 3 分, 图像质量尚可, 噪声中等, 脏器或组织边缘略模糊, 伪影不影响诊断; 2 分, 图像质量较差, 噪声多, 脏器边缘模糊不清, 伪影影响诊断; 1 分, 图像无法接受, 噪声重, 影响观察。图像质量主观评分 ≥ 3 分被认为满足临床诊断要求。两位医师通过对 40 组图像进行评分, 确定图像不能满足诊断要求时的 NI 值, 意见不一致时请第 3 位主任医师共同商讨决定。测量所有能够满足诊断要求的图像的肝脏、脊柱的 CT 值及 CT 值的标准差 (standard deviation, SD), SD 代表图像的噪声, 并计算信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR), $SNR = \text{组织 CT 值} / \text{组织噪声}$ 。CT 值测量时以肝门层面为中心向上、向下每间隔一层测量 2~3 个感兴趣区, 共测量 15 个感兴趣区 (region of interest, ROI), 测量时选择密度均匀的区域, 避开大血管, ROI 大小为 80~100 mm²。测量椎体中心层面的 ROI 大小为 50~80 mm², 共测量 9 个 ROI。

4. 统计学分析

采用 SPSS 19.0 软件进行统计学分析, 不同组织的噪声及信噪比以均数 \pm 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 采用方差分析进行组间差异的比较, 两两比较采用 Bonferoni 校正, 不满足方差分析使用条件时采用非参数检验。采用 Kappa 检验分析两位观察者间主观评分的一致性, Kappa 值 > 0.8 为一致性很好, 0.61~0.8 为一致性较好, 0.41~0.6 为一致性中等, 0.21~0.4 为一致性一般, < 0.2 为一致性很差。

结果

100 kVp 扫描时, 不同 NI (NI=11、12、13、14、15、

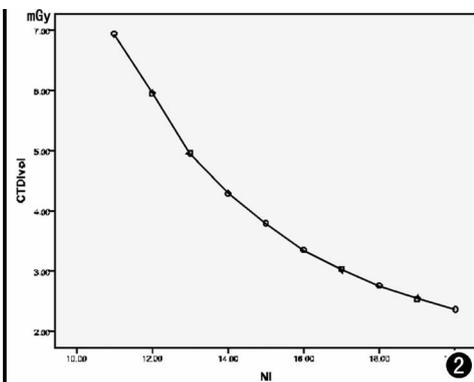


图 1 a) 岛津 PH-5 人体组织等效模体; b) 模体扫描图片。

图 2 CTDIvol 随着 NI 的增大而降低。

16、17、18、19、20)条件下,随着NI指数的升高,CTDIvol下降(图2);NI=11时,CTDIvol=6.94mGy,稍高于120kVp扫描时的常规剂量(CTDIvol=6.76mGy)。自NI=12(CTDIvol=5.95mGy)开始,扫描剂量开始低于常规组。

两位医师最终确定NI \geq 17时图像质量较差,不能满足临床诊断要求。NI=11时,辐射剂量较常规组高,不满足降低辐射剂量的要求。故最终纳入NI=12、13、14、15、16共5组20个序列的图像进行统计分析。测量不同组织在不同扫描条件下的噪声并计算SNR(表1),100kVp时,不同NI组(NI从12~16)不同组织的噪声随ASIR比例的增大而降低,SNR随ASIR比例的增大而增高(图3、4)。综合分析肝脏及脊柱的噪声、SNR结果,其中NI=15时,70%ASIR组肝脏及脊柱的噪声、SNR与常规组差异无统计学意义($P>0.05$);NI=15、16时,90%ASIR组肝脏及脊柱的噪声、SNR优于常规组。NI=15时,与常规组辐射剂量比较,CTDIvol下降约43.8%;NI=16时,与常规组辐射剂量相比,CTDIvol下降约50.4%。

表1 不同扫描条件下肝脏、脊柱的SD及SNR

指标	肝脏		脊柱	
	SD	SNR	SD	SNR
NI=15(100kVp)				
70%ASIR	8.57 \pm 1.23	9.51 \pm 1.56	11.5 \pm 1.66	35.12 \pm 5.69
90%ASIR	7.08 \pm 1.07	11.53 \pm 2.01	9.64 \pm 1.61	42.18 \pm 7.83
NI=16(100kVp)				
90%ASIR	8.01 \pm 1.32	10.19 \pm 1.61	9.66 \pm 1.14	41.57 \pm 5.53
NI=11(120kVp)				
30%ASIR	8.66 \pm 1.09	8.91 \pm 1.17	11.92 \pm 1.72	30.92 \pm 4.77

100kVp时肝脏、脊柱的CT值较120kVp常规组增加(表2),差异均有统计学意义(P 值均 <0.05 ,表2)。对两位医师在不同NI、不同比例ASIR条件下图像质量的主观评分进行kappa检验,Kappa值=0.687,表明两位医师间的一致性较好。综合两位医师的主观评价结果,显示当NI \geq 17时图像评分小于3分,图像质量不能满足临床诊断要求。

讨论

调节管电压及管电流是降低辐射剂量最直接的方法,简单方便,在临床中被广泛应用。迭代重建算法及ATCM技术都是近年来临床研究中降低辐射剂量的新方法,但实际应用中往往结合设备条件综合运用多种技术^[10-14],使扫描方案更优化,最大幅度降低辐射剂

表2 100kVp及120kVp时肝脏、脊柱的CT值(HU)

部位	100kVp	120kVp	t值	P值
肝脏	79.73 \pm 2.57	76.06 \pm 2.84	3.709	0.001
脊柱	395.01 \pm 17.97	361.63 \pm 14.77	4.305	0.001

量。本研究通过调节NI控制管电流,同时降低管电压,提高对比度,并利用迭代重建算法降低因管电压下降及NI增大所产生的噪声,可以保证辐射剂量下降而图像质量不受影响。随着NI增大,辐射剂量逐渐下降,但当NI增大到一定程度时,图像质量不能满足临床诊断要求。本研究结果显示,当NI \geq 17时,图像质量下降,不能满足临床诊断要求。

本研究设置了不同的ASIR比例,观察ASIR对噪声的改善效果,相同NI条件下,随着ASIR在图像重建中的比例增加,噪声减少,信噪比增加。综合不同扫描条件下图像的主客观评价结果,当NI=15时,70%ASIR组图像与常规剂量组最接近,不同组织噪声及SNR差异无统计学意义;而当NI=15、16时,90%ASIR组客观评价指标虽然优于常规剂量组,但图像质量主观评分降低,仅为3分,原因可能是ASIR比例太高,图像出现过度模糊现象,过度模糊是ASIR专属伪影,既往文献推荐腹部的ASIR重建比例为20%~40%^[15-17],但在低辐射剂量要求下需要提高ASIR在重建中的比例^[15,18]。Singh等^[15]研究发现当管电流降低到50mAs时,如果要获得满足临床诊断要求的图像,需要将ASIR的比例提高到70%。因此我们建议在临床应用中可首选NI=15的70%ASIR重建图像,次选90%ASIR,以免过度模糊伪影太重而影响对病变的观察。

本研究的不足之处:①体模研究不能真正取代真



图3 NI=15时,随着ASIR比例增高,图像噪声逐渐降低。a) 30%ASIR图像; b) 50%ASIR图像; c) 70%ASIR图像; d) 90%ASIR图像。

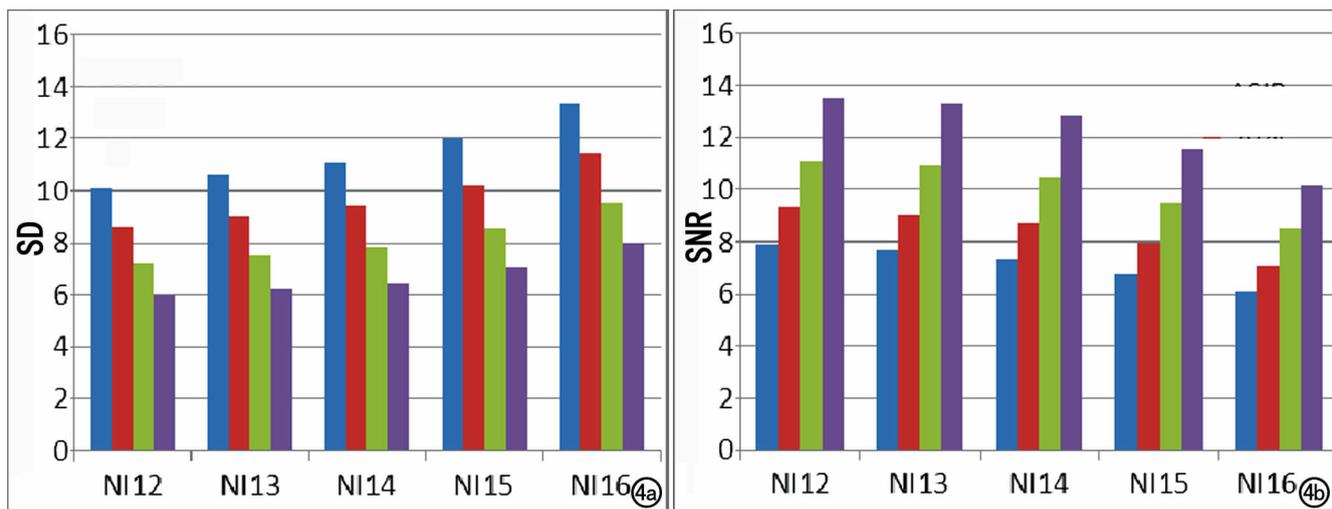


图 4 相同 NI 条件下,随着 ASIR 比例增大,噪声、SNR 的变化趋势,蓝色代表 30% ASIR,红色代表 50% ASIR,绿色代表 70% ASIR,紫色代表 90% ASIR。a) 相同 NI 条件下,随着 ASIR 比例增大,噪声减低; b) 相同 NI 条件下,随 ASIR 比例增大,SNR 增大。

实人体,而且体模形态偏瘦,最终研究结果是否对不同体型条件的人都适用尚不确定,因而尽管当 NI=16 时,图像主客观评价均能满足诊断要求,但在实际应用中我们还是建议首选相对保守的 NI 指数(NI=15); ②体模研究无法行增强扫描,而低 kVp 扫描增加对比度主要在含碘对比剂的增强扫描时明显,将管电压由常规的 120 kVp 降至 100 kVp,碘对比剂的 CT 衰减值会明显升高^[19,20],因而组织强化后的 CT 值会提高,增强了与邻近组织的对比。在平扫情况下,管电压降低,组织 CT 值也有增高,SNR 相应提高,本研究结果显示,100 kVp 与 120 kVp 条件下肝脏、脊柱的 CT 值差异均有统计学意义,100 kVp 条件下组织的 CT 值增高; ③本研究结果仅针对宝石 CT,是否适用于其他设备类型尚不确定; ④未进行更低 kVp 的对比研究,这也是我们将来研究的方向。

参考文献:

- [1] Naidich DP, Marshall CH, Gribbin C, et al. Low-dose CT of the lungs: preliminary observations[J]. *Radiology*, 1990, 175(3): 729-731.
- [2] Li W, Zhang CQ, Li AY, et al. Preliminary study of dose reduction and image quality of adult pelvic low-dose CT scan with adaptive statistical iterative reconstruction[J]. *Acta Radiol*, 2015, 56(10): 1222-1229.
- [3] Martinsen AC, Saether HK, Hol PK, et al. Iterative reconstruction reduces abdominal CT dose[J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(7): 1483-1487.
- [4] 胡娟,王鹤,王霄英,等. 迭代算法在 100kVp 分次团注双期 CTU 检查中的研究[J]. *放射学实践*, 2013, 28(5): 509-513.
- [5] Sagara Y, Hara AK, Pavlieek W, et al. Abdominal CT: comparison of low-dose CT with adaptive statistical iterative reconstruction and routine dose CT with filtered back projection in 53 patients[J]. *AJR*, 2010, 195(3): 713-719.
- [6] Desai GS, Thabet A, Elias AY, et al. Comparative assessment of three image reconstruction techniques for image quality and radiation dose in patients undergoing abdominopelvic multidetector CT examinations[J]. *Br J Radiol*, 2013, 86(1021): 20120161.
- [7] Song JS, Lee JM, Sohn JY, et al. Hybrid iterative reconstruction technique for liver CT scans for image noise reduction and image quality improvement: evaluation of the optimal iterative reconstruction strengths[J]. *Radiol Med*, 2015, 120(3): 259-267.
- [8] Klink T, Obmann V, Heverhagen J, et al. Reducing CT radiation dose with iterative reconstruction algorithms: the influence of scan and reconstruction parameters on image quality and CTDIvol[J]. *Eur J Radiol*, 2014, 83(9): 1645-1654.
- [9] Kalmar PI, Quehenberger F, Steiner J, et al. The impact of iterative reconstruction on image quality and radiation dose in thoracic and abdominal CT[J]. *Eur J Radiol*, 2014, 83(8): 1416-1420.
- [10] Hopper KD, Keeton NC, Kasales CJ, et al. Utility of low mAs 1.5 pitch helical versus conventional high mA abdominal CT[J]. *Clin Imaging*, 1998, 22(1): 54-59.
- [11] Shin HJ, Chung YE, Lee YH, et al. Radiation dose reduction via sinogram affirmed iterative reconstruction and automatic tube voltage modulation (CARE kV) in abdominal CT[J]. *Korean J Radiol*, 2013, 14(6): 886-893.
- [12] Marin D, Nelson RC, Schindera ST, et al. Low-tube-voltage, high-tube-current multidetector abdominal CT: improved image quality and decreased radiation dose with adaptive statistical iterative reconstruction algorithm—initial clinical experience[J]. *Radiology*, 2010, 254(1): 145-153.
- [13] Yu MH, Lee JM, Yoon JH, et al. Low tube voltage intermediate tube current liver mdct: sinogram-affirmed iterative reconstruction algorithm for detection of hypervascular hepatocellular carcinoma[J]. *AJR*, 2013, 201(1): 23-32.
- [14] Shen Y, Sun Z, Xu L, et al. High-pitch, low-voltage and low-iodine-concentration CT angiography of aorta: assessment of image quality and radiation dose with iterative reconstruction[J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0117469.

- [15] Singh S, Kalra MK, Hsieh JA, et al. Abdominal CT: comparison of adaptive statistical iterative and filtered back projection reconstruction techniques[J]. Radiology, 2010, 257(2): 373-383.
- [16] Flicek KT, Hara AK, Silva AC, et al. Reducing the radiation dose for CT colonography using adaptive statistical iterative reconstruction: a pilot study[J]. AJR, 2010, 195(1): 126-131.
- [17] Vardhanabhuti V, Riordan RD, Mitchell GR, et al. Image comparative assessment using iterative reconstructions: clinical comparison of low-dose abdominal/pelvic computed tomography between adaptive statistical, model-based iterative reconstructions and traditional filtered back projection in 65 patients[J]. Invest Radiol, 2014, 49(4): 209-216.
- [18] Singh S, Kalra MK, Gilman M, et al. Adaptive statistical iterative reconstruction technique for radiation dose reduction in chest CT: a pilot study[J]. Radiology, 2011, 259(2): 565-573.
- [19] Kondo H, Kanematsu M, Goshima S, et al. Body size indexes for optimizing Iodine dose for aortic and hepatic enhancement at multidetector CT: comparison of total body weight, lean body weight, and blood volume[J]. Radiology, 2010, 254(1): 163-169.
- [20] Schindera ST, Diedrichsen L, Müller HC, et al. Iterative reconstruction algorithm for abdominal multidetector CT at different tube voltages: assessment of diagnostic accuracy, image quality, and radiation dose in a phantom study[J]. Radiology, 2011, 260(2): 454-462.

(收稿日期: 2016-09-06 修回日期: 2017-04-03)

《放射学实践》(英文稿)稿约

《放射学实践》是由国家教育部主管, 华中科技大学同济医学院主办, 与德国合办的全国性影像学学术期刊, 创刊至今已 32 周年。本刊坚持服务广大医学影像医务人员的办刊方向, 关注国内外影像医学的新进展、新动态, 全面介绍 X 线、CT、磁共振、介入放射及放射治疗、超声诊断、核医学、影像技术学等医学影像方面的新知识、新成果, 受到广大影像医师的普遍喜爱。

本刊为国家科技部中国科技论文核心期刊、中国科学引文数据库统计源期刊, 在首届《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》执行评优活动中, 被评为《CAJ—CD 规范》执行优秀期刊。

2012 年始本刊拟在英文专栏刊发全英文文稿。

1. 文稿应具备科学性、创新性、逻辑性, 并有理论和实践意义。论点鲜明, 资料可靠, 数据准确, 结论明确, 文字简练, 层次清楚, 打印工整。

2. 本刊实行盲法审稿, 来稿附上英文稿一份, 中文对照稿两份(用小 4 号字、1.5 倍行距打印), 文稿中不出现任何有关作者本人的信息。另纸打印一份中英文对照的文题、作者姓名、作者单位(应准确、规范、完整)及邮政编码。如系 2 个单位及以上者, 则在作者姓名右上角排阿拉伯数字角码, 按序将单位名称写于作者下方。并注明第一作者的性别, 职称及第一作者或联系人的电话号码, E-mail 地址。

3. 来稿须经作者所在单位审核并附单位推荐信。推荐信应证明内容不涉及保密、署名无争议、未一稿两投等项。

4. 论著采用叙述式摘要。关键词一般 3~5 个, 请采用最新版的 MeSH 词表(医学主题词注释字顺表)中的主题词。MeSH 词表中无该词时, 方可用习用的自由词。使用缩略语时, 应在文中首次出现处写明中、英文全称。

5. 表格采用三线表, 表序按正文中出现的顺序连续编码。数据不多、栏目过繁、文字过多者均不宜列表。表内同一指标数字的有效位数应一致。

6. 线条图应另纸描绘, 全图外廓以矩形为宜, 高宽比例约为 5:7, 避免过于扁宽或狭长。照片图须清晰, 像素高, 层次分明, 图题及图解说明清楚。

7. 参考文献必须以作者亲自阅读过的近年文献为主, 并由作者对照原文核实(请作者在文章发表前提供 PubMed 等数据库的所含文献页面)。文献一般不少于 30 篇。内部刊物、未发表资料、私人通讯等勿作参考文献引用。参考文献的编号按照在正文中出现的先后顺序排列, 用阿拉伯数字加方括号角注。并按引用的先后顺序排列于文末。

《放射学实践》编辑部