

· 低 kV 低浓度对比剂专题 ·

低剂量 CT 迭代重建技术及低浓度对比剂的应用进展

葛东泉 综述 耿海 审核

【摘要】 CT 技术的快速发展为临床带来极有益的诊断信息,但 CT 检查及对比剂的过度使用也使辐射风险加大,对比剂肾病及其它并发症日趋增多。如何在保证图像质量的前提下尽可能的降低辐射剂量、减少对比剂应用,成为近年来研究的热点。本文就降低 CT 扫描辐射剂量的技术及低浓度对比剂的应用进展进行综述。

【关键词】 体层摄影术;X 线计算机;辐射剂量;对比剂;对比剂肾病;迭代重建

【中图分类号】 R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2015)10-1001-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2015.10.007

据报道^[1]美国由于 CT 辐射累计而造成的癌症患者可高达 2%。根据德国联邦放射防护办公室公布的年度报告 2003 年 CT 检查的数量占有放射学检查数量的 6.1%,其辐射剂量占有放射学检查辐射剂量的 51.9%;2008 年,上述数据分别上升至 8% 和 60%。随着发达国家 CT 机数目的稳定增加,上述数据应该会进一步增加^[2]。国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection,ICRP)提出 X 线活动三原则,即实践正当化、辐射防护最优化和个人剂量限制值,同时呼吁在放射学检查中遵循辐射的合理及最低化(as low as reasonably achievable,ALARA)原则。近年来,CT 高辐射剂量所带来的风险,成为放射科医师和患者共同担心的重要问题。因此,低剂量 CT 技术的出现是基于临床的迫切需要,意义重大。

迭代重建技术在低剂量 CT 的应用进展

自 1990 年 Naidich 首次提出低剂量 CT 的概念以来,如何降低 CT 检查的剂量问题已经成为医学影像界共同关注的焦点。从 X 射线的产生、路径到接收,各个环节都已有降低剂量的技术^[3],如 X 线球管电流实时动态调节技术、智能滤线系统技术、动态准直系统、探测器采集系统等技术。

1. CT 图像重建技术

在临床诊疗工作中,降低管电流、管电压、自动剂量控制等均可降低辐射剂量^[4],其中降低管电流、管电压是最有效的办法。目前,大部分 CT 采用常规滤波反投影(filtered back projection,FBP)重建。FBP 重建忽略焦点、体素和探测器的实际几何大小,未考虑 X 线光子的系统光学与统计学波动,具有较高的噪声、明显的条纹伪影和较差的低对比可检测性^[5],尽管能降低辐射剂量,但亦可导致图像噪声增加,图像质量下降,故实际工作中,FBP 重建法应用有限。

迭代重建(iterative reconstruction,IR)是近年来出现的一种新型 CT 重建技术,基于噪声的统计模型,考虑到焦点、体素和探测器的实际几何大小,通过对 X 线生成和检测过程进行精确的数学模型建立,选择性识别并去除图像噪声,在每次迭代中提高图像质量,降低图像噪声和伪影。与传统 FBP 重建技术相比,IR 技术能够在较低的辐射剂量下获得噪声较小的高质量

图像,其在降低 CT 辐射剂量方面有明显而独特的优势。

2. IR 技术种类

随着计算机技术的发展及临床对于低剂量 CT 的不断需求,各 CT 制造厂家均推出不同的 IR 技术,按照 IR 算法所利用的数据空间不同,可将其分为 3 类^[6]:①仅在投影数据空间进行 IR;②在投影数据空间和图像数据空间均进行 IR;③仅在图像数据空间进行 IR。

2008 年,GE 公司推出适应性统计迭代重建(adaptive statistical iterative reconstruction,ASiR)技术,该技术在投影数据空间和图像数据空间中均进行 IR。ASiR 技术将 FBP 影像和 IR 影像以不同比例融合,维持类似于 FBP 影像的噪声质地。基于模型的迭代重建(model-based iterative reconstruction,MBIR)技术(即 Veo 技术)为 GE 公司最近研发的 IR 技术,MBIR 是 ASiR 技术的改进,仅在投影数据空间实现全迭代重建,它同时考虑系统光学和系统噪声因素,能够明显降低影像噪声和提高空间分辨率^[7]。然而,MBIR 技术需要较高强度的运算能力(硬件要求高)和较长的重建时间(10~90 min),不适用于常规临床应用。使用这些技术的意义在于可在大幅降低 CT 辐射剂量的同时,获得与常规 FBP 法相同、甚至更好的图像质量。

2010 年,Siemens 公司推出的图像空间迭代重建(iterative reconstruction in image space,IRIS)技术,在 3~5 个迭代循环内降低影像噪声和提高对比度,不同于 ASiR 技术。IRIS 技术仅在图像数据空间实现 IR 循环,以加速重建进程^[8]。近来,该公司推出正弦确定迭代重建(sinogram affirmed iterative reconstruction,SAFIRE)技术,SAFIRE 是 IRIS 的改进,能够在投影数据空间和图像数据空间中均进行 IR 以降低影像噪声。SAFIRE 的优势是基于原始数据的噪声模式,利用原始数据反复插入进行噪声修正,迭代次数增多,图像噪声越低,空间分辨率不受影响。

2011 年,Philips 公司的第 4 代 IR 技术应用于临床,称为 iDose。该技术在投影数据空间和图像数据空间中均进行 IR,随迭代次数增加(iDose 1~7 级),噪声降低幅度增大。iDose 技术采用多频率重建算法(multi-frequency reconstruction,MFR),使噪声功率谱(noise power spectrum,NPS)保持恒定,保证了 IR 影像接近 FBP 影像的噪声质地^[9],容易让临床医生接受。

Toshiba 公司开发出适于宽体探测器和大锥形角的 IR 技

作者单位:266700 山东,平度市人民医院医学影像科(葛东泉);
261041 山东,潍坊医学院附属人民医院放射科(耿海)

作者简介:葛东泉(1969-),男,青岛平度人,硕士,主治医师,主要从事脑血管疾病的影像学诊断工作。

术,即自适应迭代剂量降低(adaptive iterative dose reduction, AIDR),该技术仍在投影数据空间和图像数据空间中重建,能够自动选择迭代次数及影像融合比例,实现降低辐射剂量和维持影像噪声质地的平衡^[10]。

3. IR 技术在各部位的应用

头部:在头部 CT 扫描中,新型的探测器和 IR 技术的联合应用会大大降低辐射剂量。Ozdoba 等^[11]研究证明,在不影响图像诊断质量的前提下,采用 IR 算法的扫描方式相对于采用标准剂量及 FBP 重建法的 CT 检查,其辐射剂量可降低 40%。神经外科 ICU 患者因往往需行多次 CT 检查以监测病情的进程,而不可避免地导致辐射剂量的累计和叠加。因此,头部的 CT 检查更为迫切的需要在满足诊断的同时,采用更低的辐射剂量技术。Corcuera-Solano 等^[12]通过研究得出一种基于 IR 技术的超低剂量扫描方法,其较采用标准剂量及 FBP 重建法可降低 68%的辐射剂量,而两者的图像质量和信噪比相似;该超低剂量扫描方法可以应用于需多次行 CT 检查的患者,对病情的进展、演变和预后进行监测。王建国等^[13]的研究也得出 IR 技术在不影响图像质量的前提下,降低头部 CT 辐射剂量的结论。

胸部:随着胸部 CT 筛查的广泛开展,肺内结节的检出率明显提高,其中磨玻璃密度结节约占 19%~38%,恶性结节约占 7%~24%^[14]。结节体积是否增长以及增长速度是鉴别良恶性肺结节的一个重要特征,理想的方法是应用低剂量扫描方案进行检查,同时系统地去除以低剂量扫描带来的图像噪声并保证结节定量研究的准确性。Kim 等^[15]的研究证明 IR 技术联合低剂量 CT 扫描可在降低图像噪声的同时,提高图像质量。Gordic 等^[16]通过模型研究指出,当采用 100kVp 的单能量扫描并联合 IR 技术,将第三代双源 CT 应用于肺内结节的检出时,仅产生 0.06mSv 的有效辐射剂量。

低剂量扫描是近年来临床肺部筛查的热点。May 等^[17]研究证明,胸部 CT 增强扫描若应用 IR 技术,在辐射剂量降低 50%的情况下,图像质量依然清晰且不影响诊断。Wielputz 等^[18]通过采用极小螺距(0.09)和辐射剂量(1.4~1.9 mSv)对 3 例因慢性阻塞性肺疾病或气管硬化引起的气管不稳患者进行监测,得出低剂量动态呼吸门控多排螺旋 CT 具有前所未有的 Z 轴覆盖面积和时间分辨数据库,能即时发现气道的不稳定、狭窄和膈肌的异常运动。Khawaja 等^[19]研究表明,肺部的亚 mSv 扫描(0.9 mSv)联合 IR 技术比常规扫描(2.9 mSv)联合 FBP 技术的图像边界更清楚,噪声也有 21%~64%的降低。

腹部:Arapakis 等^[20]通过对 183 例患者的胸部-腹部-盆腔联合 CT 扫描的研究指出,IR 技术的有效剂量较传统 FBP 技术减少 46.5%,且图像质量更清晰。Kim 等^[21]通过对三种不同体积大小的体模(直径分别为 24、30、40 cm)的研究指出,IR 技术较 FBP 技术不仅能够降低图像的噪声,同时可以提高图像的质量指标,而且其优势随着体模体积的增大而增加。

肝脏:Goenka 等^[22]通过 18 例影像学家观察体模中模拟的肝脏病变的研究,提出对于边界模糊的低密度的肝脏病变,辐射剂量降低 25%对诊断的准确性无任何影响,但病变的检出率有所降低;辐射剂量降低 25%~50%,IR 和 FBP 技术的诊断效能是一样的;应用 IR 技术的图像中,对于直径为 10 和 15 mm 的病变,观察者诊断的置信度更高。

胰腺:MSCT 检查广泛应用于胰腺病变的检出和术前评估

分期中,胰腺病变往往合并胰管的扩张。Lin 等^[23]通过观察 IR 技术对胰腺病变和胰管的显示情况,指出采用 IR 技术得到的胰腺病变 CT 值较 FBP 技术并无显著差异,但前者图像噪声明显低于后者,胰管的对比噪声比(CNR)明显高于后者。

泌尿系结石:MSCT 扫描是诊断泌尿系结石的重要影像学方法。Veldhoen 等^[24]研究表明,在泌尿系结石的诊断中,运用 IR 技术可在保证图像质量的同时大幅降低辐射剂量(50%)和图像的噪声(61%)。McLaughlin 等^[25]研究指出,在显示泌尿系结石方面,低剂量 CT 联合 IR 技术具有比 FBP 更好的图像质量,对于直径>3 mm 的结石,其结石检出的灵敏度和特异度更高。Gervaise 等^[26]通过对低剂量 CT 扫描和身体体质指数(body mass index, BMI)的关系的研究指出,当 BMI>25 kg/m²时,低剂量 CT 扫描的图像质量和诊断效能较传统检查方法优势明显。

4. IR 技术在儿童中的应用

辐射是 CT 检查一个不可避免的、主要的不利因素,尤其是对儿童这类敏感人群而言,辐射剂量的增加会导致放射相关疾病风险的增大。张祺丰等^[27]研究提出,在儿童腹部 CT 检查中,应用 IR 技术,可在辐射剂量降低 60%的情况下仍保证图像的质量。Koc 等^[28]在儿童小血管 CT 成像方面得出了类似的结论。

5. IR 技术在脊柱的应用

相对于平片,脊柱 CT 扫描可以提供更多、更精确的解剖结构和病变信息。然而,其辐射剂量仍是一个受人关注的问题。Yang 等^[29]研究表明,与传统的脊柱 CT 扫描比较,辐射剂量减少 50%的联合 IR 技术的低剂量扫描,可以获得与传统 CT 扫描类似的诊断精确度,并建议将脊柱的低剂量 CT 扫描作为脊柱病变的筛查手段。

6. IR 技术在 CT 血管成像的应用

头颈部 CTA:国内学者李玮等^[30]对头颈部低剂量 CTA 的研究表明,在降低辐射剂量的情况下,采用 IR 技术仍能保证良好的图像质量。

冠状动脉 CTA:随着 MSCT 的发展,冠状动脉 CTA 以较高的灵敏度和特异度成为冠心病的首选筛查手段。Fuchs 等^[31]关于冠状动脉超低剂量 CTA 的研究指出,在保证诊断精确的前提下,冠状动脉 CTA 的最低辐射剂量为 0.21 mSv。Wang 等^[32]通过研究得出了 IR 技术在降低图像噪声、提高信噪比和对比噪声比等方面的优势。Schindler 等^[33]对冠状动脉管壁钙化的研究提出,相对于 FBP 技术,IR 技术在冠状动脉管壁钙化的定量评价和心脏危险分级等方面,没有显著的优势。

胸主动脉和腹主动脉 CTA:Hansen 等^[34]通过对胸主动脉瘤和腹主动脉瘤的低剂量 CTA 研究指出,在保证图像质量的前提下,运用 IR 技术,较 FBP 技术可减少 73%的辐射剂量,可以应用于胸主动脉瘤和腹主动脉瘤患者的病情监测。Deak 等^[35]研究表明,对于胸主动脉壁的内漏和支架内血栓检出的最低剂量,运用 FBP 技术是 1.46 mGy (80 kVp),运用 IR 技术是 0.54 mGy (80 kVp)。

对比剂的发展、危害及现状

对比剂(contrast media, CM)主要用于增加血管中的碘浓度,从而使血管显影。碘对比剂的发展经历了从离子型到非离

子型、从高渗型到低渗型或等渗型的过程。

1950 年,泛影酸盐、甲基泛影酸盐和碘酞葡胺等问世。泛影酸 (76% 370 mg I/mL, 1940~2140 mOsm/kg H₂O) 属于高渗对比剂,目前仍在使用的离子型对比剂的碘成分几乎全由它衍生而来。但其不良反应较多,冷热不适、消化道反应(恶心、呕吐)、轻度过敏反应(瘙痒、皮疹、支气管、痉挛等)常见,较重的可发生心血管反应。

1974 年,世界上第一个低渗(次高渗)非离子型对比剂——甲泛葡胺上市。甲泛葡胺具有渗透压低及耐受性好等优点,其不良反应较离子型对比剂明显减少,但其性能不稳定。第二代非离子型单体对比剂代表药物有:碘美普尔 (400 mg I/mL)、碘帕醇 (370 mg I/mL)、碘海醇 (350 mg I/mL) 和碘佛醇 (320 mg I/mL)。

1993 年,世界上第一个与血浆渗透压 (280~310 mOsm/kg H₂O) 相同的、属于非离子型双聚体 X 线对比剂碘克沙醇 (320 mg I/mL) 上市,渗透压为 290 mOsm/kg H₂O,与低渗和高渗对比剂相比,等渗对比剂不会造成红细胞严重变形损害。

随着对比剂的使用越来越广泛,高对比剂碘剂量所带来的不良反应风险越来越高,虽然经过不断改良,对比剂急性期副作用明显减少,但远期不良反应(主要是对肝、肾功能的损害)却逐渐增加,其中对比剂肾病(contrast media induced nephropathy, CIN)尤为突出,仅次于肾灌注不足和肾毒性药物,是引起医院获得性肾衰竭的第三大主要原因^[36-37]。CIN 的发生与对比剂的剂量、浓度有直接的相关性。出于对辐射暴露和对比剂治疗安全性的担忧,人们越来越关注能否利用低浓度的对比剂实现图像质量增强,因此,现在对比剂应用浓度逐渐降低,其浓度由 400、370、320 降至 300 mg I/mL。

低浓度、低剂量扫描的展望

如何在降低辐射剂量的同时,应用更少的对比剂来获得相同的图像质量,已经成为目前国际上一个重要的研究方向。“患者安全”是卫生保健的一项基本原则。现在放射科对于“关爱患者安全”发展到了如何降低辐射剂量和安全的对比剂选择等本质问题上。CT 设备生产厂家在不断使用各种先进的前沿技术降低设备检查中的辐射,放射科医生也在尝试通过优化扫描参数的设置降低辐射剂量。

IR 技术的出现,为低剂量 CT 扫描方案的使用提供了技术保障。目前,如何在此基础上进一步降低对比剂用量而获得较好的图像质量已成为相关研究的主流。曹捍波等^[38]应用 370、320 和 300 mg I/mL 的对比剂在腹部血管成像的应用研究中指出,应用较低浓度含碘对比剂 (300 mg I/mL) 能够获得满足诊断的图像资料。王蕊等^[39]应用 80 kV、低浓度对比剂 (300 mg I/mL) 进行冠状动脉 CTA 的研究表明,采用低浓度对比剂、低电压扫描,在降低肾脏代谢负担、减少 CIN 发病率的同时,亦降低辐射剂量 (约 73.4%),且冠状动脉各段均获得了满足临床需要的图像。

更低浓度的等渗对比剂碘克沙醇 (270 mg I/mL) 的推出,进一步促进了低浓度低剂量 CT 扫描的研究进展。目前,应用 IR 技术及低电压结合更低浓度的等渗对比剂 (碘克沙醇 270 mg I/mL) 的扫描方法得到了放射科医师的广泛认可和快速推广。虽然不少研究表明低浓度与低剂量 CT 扫描方案在疾病的诊断

上并没有差异,但该方案缺少大样本量的病例证实,还处于一个探索、评估阶段。目前,国家及医学影像专业尚无低剂量低浓度 CT 扫描技术的相关规范和量化标准,因此,如何在保持尽可能合理的低剂量、低浓度条件下,进一步拓展低剂量 CT 的临床应用任重而道远。

参考文献:

- [1] Valentin J, International Commission on Radiation Protection. Managing patient dose in multi-detector computed tomography (MDCT). ICRP Publication 102[J]. Ann ICRP, 2007, 37(1): 1-79.
- [2] 朱全东, 婭娅芳, 梁宗辉, 等. 迭代重建技术在头颈部 CT 血管成像中的应用[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(4): 970-974.
- [3] Kubo T, Lin PJ, Stiller W, et al. Radiation dose reduction in chest CT: a review[J]. AJR Am J Roentgenol, 2008, 190(2): 335-343.
- [4] Utsunomiya D, Oda S, Funama Y, et al. Comparison of standard and low-tube voltage MDCT angiography in patients with peripheral arterial disease[J]. Eur Radiol, 2010, 20(11): 2758-2765.
- [5] Kilie K, Erbas G, Guryildirim M, et al. Lowering the dose in head CT using adaptive statistical iterative reconstruction[J]. AJNR, 2011, 32(9): 1578-1582.
- [6] Nelson RC, Feuerlein S, Boll DT. New iterative reconstruction techniques for cardiovascular computed tomography; how do they work, and what are the advantages and disadvantages? [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2011, 5(5): 286-292.
- [7] Miéville FA, Gudinchet F, Brunelle F, et al. Iterative reconstruction methods in two different MDCT scanners: physical metrics and 4-alternative forced-choice detectability experiments-A phantom approach[J]. Phys Med, 2013, 29(1): 99-110.
- [8] Ghatti C, Ortenzia O, Serreli G. CT iterative reconstruction in image space: a phantom study[J]. Phys Med, 2012, 28(2): 161-165.
- [9] Hosch W, Stiller W, Mueller D, et al. Reduction of radiation exposure and improvement of image quality with BMI-adapted prospective cardiac computed tomography and iterative reconstruction[J]. Eur J Radiol, 2012, 81(11): 3568-3576.
- [10] Gervaise A, Osemont B, Lecocq S, et al. CT image quality improvement using adaptive iterative dose reduction with wide-volume acquisition on 320-detector CT[J]. Eur Radiol, 2012, 22(2): 295-301.
- [11] Ozdoba C, Slotboom J, Schroth G, et al. Dose reduction in standard head CT: first results from a new scanner using iterative reconstruction and a new detector type in comparison with two previous generations of multi-slice CT[J]. Clin Neuroradiol, 2014, 24(1): 23-28.
- [12] Corcuera-Solano I, Doshi AH, Noor A, et al. Repeated head CT in the neurosurgical intensive care unit: feasibility of sinogram-affirmed iterative reconstruction-based ultra-low-dose CT for surveillance[J]. AJNR, 2014, 35(7): 1281-1287.
- [13] 王建国, 王振常, 杨晓宇, 等. 迭代重建技术与 CT 图像质量及辐射剂量的相关性研究[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(11): 980-983.
- [14] 徐岩, 贺文, 陈卉, 等. 迭代重建技术对低剂量 CT 图像质量和肺磨玻璃密度结节体积测量准确性的影响[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(10): 926-931.
- [15] Kim H, Park CM, Song YS, et al. Influence of radiation dose and

- iterative reconstruction algorithms for measurement accuracy and reproducibility of pulmonary nodule volumetry: A phantom study[J]. *Eur J Radiol*, 2014, 83(5): 848-857.
- [16] Gordic S, Morsbach F, Schmidt B, et al. Ultralow-dose chest computed tomography for pulmonary nodule detection: first performance evaluation of single energy scanning with spectral shaping [J]. *Invest Radiol*, 2014, 49(7): 465-473.
- [17] May MS, Eller A, Stahl C, et al. Dose reduction in computed tomography of the chest: image quality of iterative reconstructions at a 50% radiation dose compared to filtered back projection at a 100% radiation dose[J]. *Rofo*, 2014, 186(6): 576-584.
- [18] Wielputz MO, Eberhardt R, Puderbach M, et al. Simultaneous assessment of airway instability and respiratory dynamics with low-dose 4D-CT in chronic obstructive pulmonary disease: a technical note[J]. *Respiration*, 2014, 87(4): 294-300.
- [19] Khawaja RD, Singh S, Gilman M, et al. Computed tomography (CT) of the chest at less than 1mSv: an ongoing prospective clinical trial of chest CT at submillisievert radiation doses with iterative model image reconstruction and iDose4 technique[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2014, 38(4): 613-619.
- [20] Arapakis I, Efstathopoulos E, Tsitsia V, et al. Using "iDose" iterative reconstruction algorithm in adults' chest-abdomen-pelvis CT examinations: effect on image quality in relation to patient radiation exposure[J]. *Br J Radiol*, 2014, 87(1036): 20130613.
- [21] Kim M, Lee JM, Yoon JH, et al. Adaptive iterative dose reduction algorithm in CT: effect on image quality compared with filtered back projection in body phantoms of different sizes[J]. *Korean J Radiol*, 2014, 15(2): 195-204.
- [22] Goenka AH, Herts BR, Obuchowski NA, et al. Effect of reduced radiation exposure and iterative reconstruction on detection of low-contrast low-attenuation lesions in an anthropomorphic liver phantom: an 18-reader study[J]. *Radiology*, 2014, 272(1): 154-163.
- [23] Lin XZ, Machida H, Tanaka I, et al. CT of the pancreas: comparison of image quality and pancreatic duct depiction among model-based iterative, adaptive statistical iterative, and filtered back projection reconstruction techniques[J]. *Abdom Imaging*, 2014, 39(3): 497-505.
- [24] Veldhoen S, Laqmani A, Derlin T, et al. 256-MDCT for evaluation of urolithiasis: iterative reconstruction allows for a significant reduction of the applied radiation dose while maintaining high subjective and objective image quality[J]. *J Med Imaging Radiat Oncol*, 2014, 58(3): 283-290.
- [25] McLaughlin PD, Murphy KP, Hayes SA, et al. Non-contrast CT at comparable dose to an abdominal radiograph in patients with acute renal colic: impact of iterative reconstruction on image quality and diagnostic performance[J]. *Insights Imaging*, 2014, 5(2): 217-230.
- [26] Gervaise A, Naulet P, Beuret F, et al. Low-dose CT with automatic tube current modulation, adaptive statistical iterative reconstruction, and low tube voltage for the diagnosis of renal colic: impact of body mass index[J]. *AJR*, 2014, 202(3): 553-560.
- [27] 张祺丰, 彭芸, 段晓岷, 等. 应用自适应统计迭代重建技术降低儿童腹部多层螺旋 CT 辐射剂量[J]. *中华放射学杂志*, 2013, 47(2): 112-115.
- [28] Koc G, Courtier JL, Phelps A, et al. Computed tomography depiction of small pediatric vessels with model-based iterative reconstruction[J]. *Pediatr Radiol*, 2014, 44(7): 787-794.
- [29] Yang CH, Wu TH, Chiou YY, et al. Imaging quality and diagnostic reliability of low dose CT lumbar spine for evaluating patients with spinal disorders[J]. *Spine J*, 2014, 14(11): 2682-2690.
- [30] 李玮, 刘建新, 王霄英, 等. 低电压低对比剂剂量头颈 CTA 的可行性研究[J]. *放射学实践*, 2013, 28(5): 482-485.
- [31] Fuchs TA, Stehli J, Bull S, et al. Coronary computed tomography angiography with model-based iterative reconstruction using a radiation exposure similar to chest X-ray examination[J]. *Eur Heart J*, 2014, 35(17): 1131-1136.
- [32] Wang R, Schoepf UJ, Wu R, et al. Diagnostic accuracy of coronary CT angiography: comparison of filtered back projection and iterative reconstruction with different strengths[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2014, 38(2): 179-184.
- [33] Schindler A, Vliegenthart R, Schoepf UJ, et al. Iterative image reconstruction techniques for CT coronary artery calcium quantification: comparison with traditional filtered back projection in vitro and in vivo[J]. *Radiology*, 2014, 270(2): 387-393.
- [34] Hansen NJ, Kaza RK, Maturen KE, et al. Evaluation of low-dose CT angiography with model-based iterative reconstruction after endovascular aneurysm repair of a thoracic or abdominal aortic aneurysm[J]. *AJR*, 2014, 202(3): 648-655.
- [35] Deak Z, Grimm JM, Mueck F, et al. Endoleak and in-stent thrombus detection with CT angiography in a thoracic aortic aneurysm phantom at different tube energies using filtered back projection and iterative algorithms[J]. *Radiology*, 2014, 271(2): 574-580.
- [36] 王忠敏, 傅维安, 陆志俊, 等. CT 引导下经皮射频消融治疗肾上腺转移性肿瘤的初步疗效[J]. *介入放射学杂志*, 2009, 18(4): 340-343.
- [37] Lauer E, Del Pizzo JJ, Raman JD. Needlescopic ablation of small adrenal masses[J]. *Curr Urol Rep*, 2009, 10(1): 73-77.
- [38] 曹捍波, 张卫英. 不同碘浓度对比剂在 MSCT 腹部血管成像的临床应用研究[J]. *医学影像学杂志*, 2013, 23(2): 220-225.
- [39] 王蕊, 张保翠, 王霄英, 等. 80kVp 低浓度对比剂冠状动脉 CTA 检查的初步研究[J]. *放射学实践*, 2013, 28(5): 501-504.

(收稿日期: 2015-08-05 修回日期: 2015-08-31)