

低剂量 CT 尿路造影应用

杨峰 综述 查云飞 审校

【摘要】 CT 尿路造影(CT urography, CTU)已经得到广泛应用,对泌尿系疾病的诊断具有重要价值。但其相对 X 线片及尿路造影具有较高的辐射剂量,辐射剂量过大是限制 CTU 应用的主要矛盾,国内外众多学者采用低剂量 CTU 检查泌尿系疾病,本文就泌尿系疾病低剂量 CTU 检查的应用进展进行综述。

【关键词】 泌尿系疾病; 辐射剂量; 体层摄影术, X 线计算机

【中图分类号】 R69; R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2015)06-0696-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2015.06.023

以往泌尿系统疾病的影像学检查以腹部 X 线片(KUB)、静脉肾盂造影(IVU)、B 超及核磁共振尿路水成像(MRU)为主,它们有各自的特点。近年来计算机技术不断进步,多排螺旋 CT(MDCT)不断发展,其密度分辨率及空间分辨率显著提高,图像后处理功能也更加强大。在此基础上发展起来的 CT 尿路造影(CTU)相对传统泌尿系成像技术有明显优势,但螺旋 CT 具有较高的辐射剂量,如何在降低成像质量下减少放射剂量是进行 CTU 检查的现实问题。

低辐射剂量螺旋 CT 的研究背景

世界卫生组织(WHO)和国际放射防护委员会(NRPB)提出^[1]恶性肿瘤的发病率与接受到的 X 线辐射剂量成正比,每增加 1 msv(millisievert)的辐射剂量,恶性肿瘤将增加 1/20 万的发病率。国际医学物理组织(IOMP)与世界卫生组织(WHO)及国际放射防护委员会(NRPB)制定了 ALARA 原则(As Low As Reasonably Achievable)^[2-3]即是以最少的辐射代价获得最佳的诊断质量。1990 年 Naidich 等^[4]第一次提出了低剂量 CT 扫描(low dose CT, LDCT)的概念,他认为可以通过降低管电流的方法降低患者的辐射剂量,并且不影响诊断图像质量。随着人们生活水平的提高,公众对自身辐射防护的认识得到提高,对低剂量扫描技术更加关注。国内外文献研究显示低剂量 CT 扫描技术在婴幼儿颅脑、副鼻窦及胸部方面研究较多。CT 机扫描方案不同及 CT 机自身设置不同,是影响 CT 辐射剂量的两个主要因素。主要包括管电压、管电流、扫描层厚、层间隔以及管电流与输出剂量关系等等。可以通过降低扫描条件、减少扫描期像及严格掌握 CT 检查适应证来达到降低 CT 辐射剂量的目的。CT 扫描技术参数的调整包括降低管电流(mA)、增大螺距及降低管电压(kV)。增大螺距虽然可以减少扫描时间,但同时会导致 Z 轴上的分辨率下降,降低了图像质量^[5],容易造成小病灶的漏诊;管电压的降低会引起 X 线能量的减少,从而导致人体组织 X 线吸收量的增多,破坏了患者接受辐射剂量与图像质量之间的关系,同时降低了图像的信噪比。理论上辐射剂量在其他参数不变时与 mAs 呈正相关,但同时 mAs 值的降低会增加图像的噪声。降低管电流已成为低辐射剂量研究的主要方法^[6]。当 X 线减少至原来的 1/4 时会增加一倍的图像噪声。Mayo 等^[7]研究显示图像质量随着管电流的减少而降

低,当管电流从 400 mAs 降到 140 mAs 时,图像质量仅仅下降了 17%;而当管电流从 140 mAs 降到 20 mAs 时,图像质量下降了 47%,结果表明大幅度地降低管电流可以使接受到的辐射剂量明显下降,而图像质量没有明显地下降。国内也有多位学者提出了自己研究的降低管电流的低剂量 CT 扫描方案,主要集中在副鼻窦及胸部等疾病的 CT 扫描检查中^[8]。

泌尿系低剂量 CTU 应用进展

1. 泌尿系低剂量 CTU 检查的必要性

计算机技术的提高促进了多排螺旋 CT 的发展进步,使得泌尿系成像(CTU)水平得到明显提高。多排螺旋 CT 具有高空间分辨力及强大的后处理功能,它有多种后处理方法,包括多平面重组(multi-planar reformation, MPR)、曲面重组(curved planar reformation, CPR)、最大密度投影(maximum intensity projection, MIP)、最小密度投影(minimum intensity projection, MinIP)、容积再现(volume rendering, VR)、CT 仿真内镜成像(CT virtual endoscopy, CTVE)等。它能够对泌尿系组织的解剖结构及空间关系清楚地显示^[8],能够多平面、多角度、立体地观察泌尿系结构,同时它又保留了 IVU 对肾脏排泄功能成像的优势。它对泌尿系畸形、感染及尿路上皮样肿瘤有明显的诊断优势^[9]。欧洲学者一项 Meta 分析显示 CTU 诊断血尿患者尿路上皮肿瘤的灵敏度为 96%,特异度为 99%,阴性似然比约为 0.08^[10]。多排螺旋 CT 尿路造影不需要胃肠道准备,并且速度快,患者的耐受性好,它对泌尿系疾病诊断的灵敏度、诊断准确率及特异度较 IVU 均有明显提高。近年来 CTU 应用越来越广泛,对泌尿系疾病的诊断越来越重要,美国的一项调查研究显示在美国有 87%的放射学家已经开展了 CTU 检查,其中 69%的被调查者表示如果他们需要泌尿系统成像时选择 CTU 检查的比率超过了 75%;并且 27%的人强调在他们的机构 IVU 已经完全被 CTU 所取代了^[11]。但是同时国外对辐射剂量比较关注,对辐射造成的公众危害比较关注,CTU 检查患者所接受的辐射剂量较大,它需要多期扫描并且扫描范围比较大,扫描范围从 Th₁₁ 椎体下缘水平到耻骨联合上缘,CTU 的辐射剂量过大限制了它的广泛应用,因此降低射线剂量有重要的临床意义。

2. 泌尿系低剂量 CTU 检查的可行性

CTU 是经静脉注入对比剂后,通过肾脏的分泌排泄功能使肾盂、肾盏、输尿管及膀胱充盈对比剂,然后利用多排螺旋 CT 对泌尿系统进行多期容积扫描,并将得到的原始图像传送到工作站,经计算机处理后进行后处理重组,从而获得整个泌尿系

作者单位:441000 湖北,湖北医药学院附属襄阳医院放射科(杨峰);430160 武汉,武汉大学人民医院放射科(查云飞)

作者简介:杨峰(1976—),男,硕士研究生,副主任医师,主要从事影像诊断工作。

立体的三维重建图像^[12,8]。它包括多期相扫描及薄层重建,欧洲泌尿生殖放射协会 CTU 工作组给出的 CTU 定义是它是一种有利于显示肾脏、输尿管、膀胱的影像诊断检查,包括了多层螺旋 CT 薄层扫描、静脉注射对比剂和排泄期成像^[12]。泌尿系统由高浓度的对比剂充盈,与周围组织对比分辨率高。降低管电流主要是增加图像的量子噪声,降低图像的密度分辨率,对高对比分辨率影响甚小^[13],而对低对比组织如脾脏、肝脏、脑等实质脏器的图像质量有明显的下降,因此,可以通过降低管电流来降低患者所接受到的辐射剂量。高浓度对比剂充盈的输尿管相对于周围组织为高对比组织,泌尿系病变可以引起输尿管和肾盂肾盏的积水,它与周围软组织亦为高对比组织,通过适当降低管电流,图像质量影响不大,不影响对泌尿系病变的检出。因此,通过降低管电流的低剂量 CTU 检查泌尿系疾病在理论上是可行的。同时随着科学的进步,社会的发展,许多医院的 CT 机都完成了由普通 CT 到螺旋 CT、由低排螺旋 CT 向多排螺旋 CT 的转换,这为低剂量 CTU 检查泌尿系疾病提供了物质基础。

3. 泌尿系低剂量 CTU 检查的基础和临床研究

泌尿系 CTU 体外模型的低剂量研究:国外学者曾经对泌尿系 CTU 体外模型进行过研究,Joern Kemper 等^[14]利用 4 排螺旋 CT 对 8 只健康的猪进行动物模型试验。扫描方案为保持管电压 120 kV 不变,管电流从 200 mAs 降至 20 mAs,分 10 个步骤逐渐降低管电流,每一次只降低 10 mAs,结果发现当管电流最大减少到 70 mAs 时,图像噪声对 CTU 图像质量没有显著性影响,上尿路结构仍然能够得到明确地显示和区分。该研究表明通过降低管电流行低剂量 CTU 检查泌尿系统疾病是可行的。Coppentrath 等^[15]利用 4 排及 16 排螺旋 CT 进行模型试验,他们将充满了不同浓度对比剂的 5 个平行的塑料管(直径 2.7 mm)放在水盒(14 cm×32 cm×42 cm)里,降低管电压(90~120 kV)进行扫描,结果表明适当降低管电压也可以减少辐射剂量而对图像质量没有显著地影响。

泌尿系低剂量 CTU 扫描研究:CTU 辐射剂量与扫描期相、扫描范围及扫描参数等众多因素有关。因此可以通过减少扫描期相^[16]、减少扫描范围及调整扫描参数降低 CTU 的辐射剂量。Mitsuru Takeuchi 等^[17]利用双源双能 CT 扫描的增强图像重建虚拟的非增强的图像代替真实的非增强图像,从而通过减少扫描期相达到降低辐射剂量的目的,他们的研究表明省略了真实的非增强图像可以减少 52% 的总辐射剂量。有学者研究应用分次团注技术只进行两期扫描。第 1 次注射对比剂后 8~10 min 注射第 2 次,然后进行 CT 扫描,其图像包括了第 1 次注射的对比剂形成的排泄期图像及第 2 次注射对比剂形成的肾实质期图像,通过减少 CT 扫描次数达到减少辐射剂量的目的。但是分次团注技术的具体扫描参数如两次注射对比剂的 CT 扫描延迟时间、用量及间隔时间等还没有统一标准,需要做进一步的研究^[8,18]。帅桃等^[19]运用分次团注与双能虚拟平扫相结合的改良 CTU 扫描技术,不仅能获得与传统 CTU 扫描相同的图像质量,同时减少了约一半的辐射剂量。降低患者的辐射剂量也可以根据患者的临床问题调整 CTU 检查方法,减少不必要的扫描期相。如对年轻血尿患者(上皮肿瘤风险较小)或者腹痛怀疑结石者就不必要进行 CTU 检查^[20],而对泌尿道畸形、外伤患者可能就不需要平扫。Martingano^[21]评估 64

排螺旋 CT 行 CTU 检查应用的研究表明辐射剂量和图像质量的不同很大程度上取决于重建参数,CTU 不能被认为是一个标准的检查,扫描参数需要调整以适应特定的临床所需的图像质量。扫描参数的调整包括降低管电压、降低管电流、增大螺距及使用自动电流调整软件等^[22]。Ulrike 等^[23]采用降低管电流低剂量方案(120 kV, 29 mAs)与标准剂量方案(120 kV, 176 mAs)进行对比研究,结果表明低剂量扫描方案对肾脏集合系统(IRCS),近段中段输尿管显示 CTU 的辐射剂量可以大幅降低而没有显著地图像质量下降并且显示近段中段输尿管腔内病变也是可能的。但为了显示远段病变辐射剂量将提高 40%。麻增林等^[24]应用 16 排螺旋 CT 进行低剂量扫描方案(120 kV, 115~120 mA)与标准剂量扫描方案(120 kV, 200~250 mA)对比研究,结果显示常规剂量 CTU 对泌尿系统结构的显示效果略优于低剂量 CTU 组,但无显著性差异($P>0.05$),两组的尿路总体显示效果均达到了影像学诊断要求。李建文等^[25]将低剂量组分为 3 组 100 mA、75 mA、50 mA 分别与标准剂量组(220 mA)比较辐射剂量分别降低了 57%、68%、79%,低辐射剂量 CTU 对泌尿系统结构的总体显示效果能够满足影像学诊断要求,具有较好的临床应用价值。张丽芝等^[26]运用低剂量多排螺旋 CT 尿路造影评价儿童肾盂输尿管交界处狭窄时认为低剂量扫描方案可有效降低 CT 辐射剂量(千伏恒定 120 kV,毫安分成 3 组 115 mA、100 mA、75 mA),可在不牺牲图像质量情况下减轻 CTU 检查多次泌尿系扫描对儿童造成的辐射伤害。赵子凤等^[27]采用增大螺距及运用 Flash 双源 CT 低剂量措施施行小儿 CTU 应用研究表明 Flash 双源 CT 低剂量措施适用于小儿 CTU 检查,不仅扫描时间短,同时图像质量没有明显的下降,可以满足临床诊断要求。近年来通过降低管电压进行低辐射方面的研究已经逐步增加,并且成为低剂量研究的热点,但是降低管电压会使 X 线穿透力降低,图像噪声增大,影响诊断准确性,可以通过适当增加管电流及采用迭代重建算法提高图像质量。Yanaga 等^[28]采用降低管电压(80 kV)及运用智能降噪滤波器与标准剂量方案(120 kV)对比研究显示低剂量方案仅能够评价肾集合系统及上段输尿管,中下段输尿管显示欠佳,若要评价显示中下段输尿管及膀胱则必须要代偿性增加管电流。胡娟等^[29]利用迭代算法与低电压相结合行低剂量 CTU 检查可以提高图像质量、增加图像对比,降低 X 线辐射剂量。另外对比剂肾病的防治一直受到广泛关注,降低对比剂的用量可减少对比剂肾病的发生率。近年来提出的“双低”技术逐步受到重视,使用“双低”技术需要在保证诊断影像质量的基础上降低 CT 检查中患者对比剂用量及所受辐射剂量。许多研究将降低管电压与使用迭代重建技术相结合并使用“双低”技术可以降低 CT 检查的辐射剂量、提高图像对比噪声比、降低对比剂剂量^[30-31]。

基于自动管电流调制技术的低剂量泌尿系 CTU:自动管电流调制技术(automatic tube current modulation, ATCM)是系统根据扫描区域形体或解剖结构,通过预先选择图像噪声指数(noise index, NI)或设置参考电流,自动实时调制扫描过程中管电流的大小。ATCM 可以在保证图像质量没有损失的情况下降低 10%~50% 的 mAs 值。ATCM 技术目前主要有 3 种类型^[32]。① Z 轴调制:根据扫描方向上的不同部位及层面调制管电流。② 角调制:球管在同一横断面的不同投射方向调制管电

流(从侧位方向到前后或后前位方向,电流逐渐减少)。③联合调制:结合角调制和 Z 轴调制两种技术,从 X、Y、Z 3 个方向上进行管电流调制。李伟等^[33]应用自动管电流调制技术结合适应性迭代重建算法与常规剂量对比研究成人腹盆腔,结果认为运用自动管电流调制技术结合适应性迭代重建算法可以明显减少辐射剂量,而对图像噪声及疾病诊断没有显著性影响。

基于智能降噪滤波器的泌尿系低剂量 CTU:Yanaga 等^[34]采用降低管电压(80 kV)及运用智能降噪滤波器与标准剂量方案(120 kV)对比研究显示低剂量方案能够评价肾集合系统及上段输尿管,中下段输尿管显示欠佳,若要评价显示中下段输尿管及膀胱则必须要代偿性增加管电流;Takeyama 等^[34]用低噪声系数(9.88)与高噪声系数(20)结合智能降噪滤波器对比研究结果发现后者虽然增加了噪声,但图像质量没有得到明显的下降,对疾病定量及定性诊断没有显著性差别。

基于迭代重建技术的低剂量 CTU 研究:自适应统计迭代重建技术(adaptive statistical iterative reconstruction, ASIR)是 GE 公司 2008 年推出的基于系统统计模型的一项技术。它通过建立噪声性质和被扫描物体模型,并利用迭代重建算法对噪声进行抑制和校正,得到更为清晰的图像。它可以明显降低图像噪声,改善图像质量。与传统的滤波反投影算法(filtering back-projection,FBP)相比较,迭代重建算法扫描剂量下降的约 50%^[35]。西门子公司、飞利浦公司和东芝公司也相继推出自己的类似技术。GE 公司的迭代重建技术(ASIR、VEO);飞利浦公司的迭代重建技术(iDOSE);东芝公司的迭代低剂量技术(AIDR);西门子的空间迭代重建(IRIS)及正弦图确定迭代重建(SAFIRE)。第一代统计迭代重建技术经临床研究证实能保证相同图像质量和相似重建速度的前提下,辐射剂量可以降低 30%~65%^[36]。同时迭代重建技术也为提高 CTU 图像质量,降低 CTU 辐射剂量提供了一种有效的工具^[37]。王艳等^[38]比较应用自适应统计迭代重建技术(ASIR)和滤波反投影(FBP)两种重建技术获得不同剂量腹部 CT 扫描图像的质量及对病变的优化显示,结果表明采用 ASIR 重建算法可有效提高图像质量,降低腹部 CT 扫描辐射剂量。王慧慧等^[39]利用 100 kV 双期团注 CTU 成像,重建的 FBP 与各组 ASIR 图像比较,ASIR 图像的主观和客观评价均高于 FBP 组,并推荐使用 80% ASIR 重建图像。Froemming 等^[40]利用西门子 iDOSE 迭代重建技术结合个性化管电压及降低管电流方案可以明显降低辐射剂量(平均 42.5%)。Hiroshi 等^[41-42]运用东芝第三代迭代重建技术 AIDR 3D 低剂量扫描方案可以在图像质量不降低情况下降低 45%~70%的辐射剂量。胡娟等^[29]探讨不同比例自适应统计迭代重建(ASIR)、基于模型的迭代重建(MBIR)在 100 kV 分次团注双期 CTU 检查中的应用价值,结果表明 ASIR 及 MBIR 技术可以提高图像质量、增加图像对比,使常规剂量对比剂 100 kV 分次团注双期 CTU 达到或超过常规管电压单次团注 3 期 CTU 成像效果,从而明显降低 X 线辐射剂量。最新报道的重建技术在原有的基础上再降低剂量 67%~82%,依旧能得到完美的 CT 图像^[43]。迭代重建技术是目前 CT 低剂量成像研究的一个重要方向。

结语与展望

降低 CT 辐射剂量的方法有很多,降低管电流已成为低辐

射剂量研究的主要方法,泌尿系疾病患者进行通过降低管电流的低剂量螺旋 CTU 检查有理论基础及设备物质基础,其临床应用是可行的,由于多排螺旋 CT 设备型号、内部结构设计不同,导致各种低剂量研究不能形成统一标准,目前泌尿系 CTU 的低剂量研究多为 50~100 mAs。泌尿系疾病患者进行降低管电流的低剂量螺旋 CTU 扫描既降低了受检者的 X 线辐射剂量,同时又减少了对 X 线管、探测器的损耗,降低了 CT 运行成本,其不足之处主要是管电流减少导致了图像噪声增加,因此如何使用最低辐射剂量而又获得能满足诊断要求的图像,在辐射剂量与图像噪声之间找到最佳平衡点,有待今后进一步研究。同时由于迭代重建及时的广泛应用,根据受检者身体尺寸的大小(如体重、横截面直径、身高体重指数等),合理降低管电压,结合迭代重建技术的低剂量研究已经成为高端 CT 重要的临床研究方向之一。另外降低管电流及管电压是在射线源头减低剂量,自适应统计迭代重建技术是通过数据重建系统降低辐射剂量,如果能针对射线路径^[15]、射线信息采集过程设计出有效的应用软件,同时联合运用多种低剂量扫描方法减低患者剂量,这将是泌尿系低剂量 CTU 研究的一种有效的方式。

参考文献:

- [1] Kennedy TC, Miller Y, PrinDiville S. Screening for lung cancer revised and the roles of Sputum Cytology and Fluorescence Bronchoscopy in High-risk group[J]. Chest, 2000, 117(1): 72-79.
- [2] Guillerman RP. Newer CT applications and alternatives; what is appropriate in children? [J]. Pediatr Radiol, 2011, 41(2): 534-548.
- [3] Wallace AB, Goergen SK, Schick D, et al. Multidetector CT dose: clinical practice improvement strategies from a successful optimization program[J]. J Am Coll Radiol, 2010, 7(8): 614-624.
- [4] Naidich DP, Marshall CH, Gribbin C, et al. Lowdose CT of the lungs: preliminary observations[J]. Radiology, 1990, 175(3): 729-731.
- [5] Polacin A, Kalender WA, Marchal G. Evaluation of section sensitivity profiles and image noise in spiral CT[J]. Radiology, 1992, 185(1): 29-35.
- [6] 夏巍,吴晶涛,尹肖睿. 低管电压法与低管电流法在降低多层螺旋 CT 下肢静脉成像辐射剂量中的对比研究[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(4): 451-453.
- [7] Mayo TR, Hartman TE, Lee KS, et al. CT of the chest: minimal tube required for good image quality with the least radiation dose [J]. AJR, 1995, 164(3): 603-607.
- [8] Silverman SG, Leyendecker JR, Amis ES Jr. What is the current role of CT urography and MR urography in the evaluation of the urinary tract? [J]. Radiology, 2009, 250(2): 309-323.
- [9] Wu GY, Lu Q, Wu LM, et al. Comparison of computed tomographic urography, magnetic resonance urography and the combination of diffusion weighted imaging in diagnosis of upper urinary tract cancer[J]. Eur Radiol, 2014, 83(5): 893-899.
- [10] Chlapoutakis K, Theocharopoulos N, Yarmenitis S, et al. Performance of computed tomographic urography in diagnosis of upper urinary tract urothelial carcinoma, in patients presenting with hematuria; systematic review and meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2010, 73(2): 334-338.
- [11] Townsend BA, Silverman SG, Morteale KJ, et al. Current use of

- computed tomographic urography; survey of the society of uro-radiology[J]. J Comput Assist Tomogr, 2009, 33(1): 96-100.
- [12] Van Der Molen AJ, Cowan NC, Mueller-Lisse UG, et al. CT urography: definition, indications and techniques. A guideline for clinical practice[J]. Eur Radiol, 2008, 18(1): 4-17.
- [13] Vrtiska TJ, Hartman RP, Kofler JM, et al. Spatial resolution and radiation dose of a 64-MDCT scanner compared with published CT urography protocols[J]. AJR, 2009, 192(4): 941-948.
- [14] Kemper J, Regier M, Bansmann PM, et al. Multidetector CT urography: experimental analysis of radiation dose reduction in an animal model[J]. Eur Radiol, 2007, 17(2): 2318-2324.
- [15] Coppnath E, Meindl T, Herzog P, et al. Dose reduction in multidetector CT of the urinary tract. Studies in a phantom model [J]. Eur Radiol, 2006, 16(9): 1982-1989.
- [16] Kekelidze M, Dwarkasing RS, Dijkshoom ML, et al. Kidey and urinary tract imaging: triple-bolus multidetector CT urography as a one-stop shop-protocol design, opacification, and image quality analysis[J]. Radiology, 2010, 255(2): 508-516.
- [17] Mitsuru Takeuchi, Tatsuya Kawai, Masato Ito, et al. Split-bolus CT-urography using dual-energy CT: feasibility, image quality and dose reduction[J]. Eur Radiol, 2012, 81(11): 3160-3165.
- [18] 王鹤, 孙晓伟, 王继琛, 等. 正常集合系统分次团注双期与传统单次团注多期 CT 泌尿系造影的比较[J]. 中国医学影像技术, 2009, 25(11): 2076-2079.
- [19] 帅桃, 李真林, 邓莉萍, 等. 分次团注结合虚拟平扫技术在泌尿系统 CT 造影成像中的价值[J]. 四川大学学报医学版, 2012, 43(4): 588-591.
- [20] Evelyne CC, Cauberg CY, Nio Jean MCH, et al. Computed tomography-urography for upper urinary tract imaging; is it required for all patients who present with Hematuria? [J]. Journal of Endourology, 2011, 25(11): 1733-1740.
- [21] Martingano P, Stacul F, Cavallaro MF, et al. 64-slice CT urography: optimisation of radiation dose [J]. Radiol Med, 2011, 116(3): 417-431.
- [22] 王倩, 赵心明, 宋俊峰. 自动管电流调制技术对腹部 CT 图像质量及辐射剂量影响的体模研究[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(7): 648-653.
- [23] Ulrike L, Mueller-Lisse, Eva M, et al. Delineation of upper urinary tract segments at MDCT urography in patients with extra-urinary mass lesions: retrospective comparison of standard and low-dose protocols for the excretory phase of imaging[J]. Eur Radiol, 2011, 21(8): 378-384.
- [24] 麻增林, 贺丽英, 闰玉昌, 等. 低剂量 CT 尿路造影的应用价值[J]. 中国临床医学影像杂志, 2009, 20(6): 494-496.
- [25] 李建文, 张剑, 何平, 等. 低剂量 CT 尿路造影的临床应用[J]. 实用放射学杂志, 2012, 28(3): 451-453.
- [26] 张丽芝, 曾涵江, 黄子星, 等. 低剂量多排 CT 尿路造影技术在儿童肾盂输尿管交界部狭窄的应用评价[J]. 中国普外基础与临床杂志, 2013, 20(5): 565-568.
- [27] 赵子风, 柳澄, 赵宁, 等. Flash 双源 CT 在小儿低剂量 CT 尿路成像中的应用[J]. 医学影像学杂志, 2014, 24(3): 451-455.
- [28] Yumi Yanaga, Kazuo Awai, Yoshinori Funama, et al. Low-Dose MDCT urography: feasibility study of low-tube-voltage technique and adaptive noise reduction filter[J]. AJR, 2009, 193(9): W220-W229.
- [29] 胡娟, 王鹤, 王霄英, 等. 迭代算法在 100kVp 分次团注双期 CTU 检查中的应用研究[J]. 放射学实践, 2013, 28(5): 509-513.
- [30] Nakaura T, Nakamura S, Harada K, et al. Low contrast agent and radiation dose protocol for hepatic dynamic CT of thin adults at 256-detector row CT: effect of low tube voltage and hybrid iterative reconstruction algorithm on image quality[J]. Radiology, 2012, 264(2): 445-454.
- [31] Potana F, Duhamel A, Pagniez J, et al. Chest computed tomography using iterative reconstruction vs filtered back projection (Part 2): image quality of low-dose CT examination in 80 patients[J]. Eur Radiol, 2011, 21(3): 636-643.
- [32] 刘士远, 于红. CT 低剂量扫描的研究和应用现状[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(4): 295-300.
- [33] 李伟, 张建东, 庞涛, 等. 自动管电流调制技术结合迭代重建算法在成人盆腔低剂量 CT 中的初步应用[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2014, 34(6): 470-473.
- [34] Takeyama N, Ohgiya Y, Hayashi T, et al. CT urography in the urinary bladder: to compare excretory phase images using a low noise index and a high noise index with adaptive noise reduction filter[J]. Acta Radiol, 2011, 52(6): 692-698.
- [35] Hara AK, Paden RG, Silva AC, et al. Iterative reconstruction technique for reducing body radiation dose at CT: feasibility study [J]. AJR Am J Roentgenol, 2009, 193(3): 764-771.
- [36] Mieville FA, Gudincher 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.
- [37] Silva AC, Lawder HJ, Hara A, et al. Innovations in CT dose reduction strategy: application of the adaptive static iterative reconstruction algorithm[J]. AJR, 2010, 194(1): 191-199.
- [38] 王艳, 史大鹏, 朱绍成, 等. 比较以自适应统计迭代重建技术和滤过反投影重建的低剂量腹部 CT 的图像质量[J]. 中国医学影像技术, 2012, 28(10): 1902-1905.
- [39] 王慧慧, 王鹤, 王霄英, 等. 100kVp 条件下碘克沙醇 (270mgI/ml) 应用于分次团注双期 CTU 的可行性研究[J]. 放射学实践, 2014, 29(4): 373-377.
- [40] Froemming AT, Kawashima A, Takahashi N, et al. Individualized kV selection and tube current reduction in excretory phase computed tomography urography: potential for radiation dose reduction and the contribution of iterative reconstruction to image quality[J]. Comput Assist Tomogr, 2013, 37(4): 551-559.
- [41] Juri H, Matsuki M, Itou Y, et al. Initial experience with adaptive dose reduction 3D to reduce radiation dose in computed tomographic urography[J]. Comput Assist Tomogr, 2013, 37(1): 52-57.
- [42] Juri H, Matsuki M, Inada Y, et al. Low-dose computed tomographic urography using adaptive iterative dose reduction 3-dimensional: comparison with routine-dose computed tomography with filtered back projection[J]. Comput Assist Tomogr, 2013, 37(3): 426-431.
- [43] Mieville FA, Gudincher 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.