

“三低”剂量与图像重建算法在CT血管成像应用中的研究进展

李万江, 袁元, 李真林, 余建群

四川大学华西医院 放射科, 四川 成都 610041

[摘要] CT血管成像 (Computed Tomography Angiography, CTA) 在临床上被广泛应用于血管病变的诊断, 然而, CTA存在X线辐射损伤、对比剂外渗和对比剂肾病的3大风险。本文综述了国内外最新文献研究结果, 首先介绍“三低”剂量 (低辐射剂量、低对比剂流速和总量) 下行CTA扫描的理论基础与实现方式; 其次介绍不同等级与强度的迭代重建算法在改善低剂量图像质量的能力; 最后介绍基于人工智能的深度学习算法在改善低剂量图像质量的能力, 以及相较于迭代重建技术的优势。因此, 本文不仅可以指导放射技师正确使用“三低”剂量与图像重建算法行CTA扫描, 而且结合最新的图像重建算法 (基于人工智能深度学习算法) 在低剂量CTA中的研究进展进行综述, 为后续研究提供参考。

[关键词] 计算机断层扫描仪; 血管成像; 迭代重建; 深度学习; 辐射剂量; 对比剂

Research Progress of “Three Low” Dose and Image Reconstruction Algorithm in the Application of CT Angiography

LI Wanjiang, YUAN Yuan, LI Zhenlin, YU Jianqun

Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610041, China

Abstract: CT angiography (CTA) is widely used clinically in the diagnosis of vascular disease. However, CTA has three major risks of X-ray radiation damage, contrast extravasation and contrast nephropathy. This article summarized the latest literature research results at home and abroad. Firstly, it introduced the theoretical basis and implementation of CTA scanning in the “three low” doses (low radiation dose, low contrast agent flow rate and total amount). Secondly, it introduced the ability of iterative reconstruction algorithms with different levels and intensities to improve the image quality of low-dose. Finally, the ability of deep learning algorithms based on artificial intelligence to improve the image quality of low-dose was introduced, as well as their advantages over iterative reconstruction algorithms. Therefore, this paper can not only guide the radiographers to correctly use the “three low” dose and image reconstruction algorithm for CTA scanning, but also provide reference for the follow-up research combined with the latest image reconstruction algorithm (based on artificial intelligence deep learning algorithm) in low-dose CTA.

Key words: computed tomography; angiography; iterative reconstruction; deep learning; radiation dose; contrast agent

[中图分类号] R197.39

[文献标识码] A

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2020.10.017

[文章编号] 1674-1633(2020)10-0082-05

引言

心脑血管疾病无论是在发达国家, 还是在发展中国家, 都具有高发病率、高致死率和高致残率的特点^[1-2]。数字减影血管造影技术 (Digital Subtraction Angiography, DSA) 因其具有较高的时间分辨率和空间分辨率, 是目前临床诊断血管疾病的“金标准”。然而, DSA是一种侵入性影像学检查手段, 可引起缺血性脑卒中、心肌梗死, 甚至死亡等并发症^[3-4]。CT血管成像 (Computed Tomography Angiography, CTA) 不仅检查流程便捷、检查费用低, 而且还是一项无创的影像学检查手段, 在临床上被广泛用于血管病变的筛查和治疗前评估, 常见检查部位包括冠脉

CTA、头颈部CTA、主动脉CTA等^[5-7]。虽然CTA不是临床诊断血管疾病的金标准, 但其诊断血管病变的敏感度和特异性均较高, 甚至在血管管壁评价方面优于DSA^[8]。

随着CT辐射剂量的增加, 受检者发生随机辐射效应的风险也明显增加, 研究发现, CT带来的辐射损伤占有所有医疗辐射损伤的一半左右^[9]。美国的一项流行病学研究表明, 有1.5%~2%的肿瘤可能与CT扫描产生的电离辐射有关^[10]。国际辐射防护委员会提出保证CT图像质量满足诊断要求的前提下, 尽可能降低患者接受的辐射剂量^[11]。无论是医疗行业管理机构, 还是从事医学影像相关的研究者越来越重视X射线剂量的规范使用和规范管理, 研究者均在合理应用X射线检查、优化辐射剂量方面较为关注^[12]。碘对比剂的适当使用是CTA成功的关键因素之一, 行CTA扫描

收稿日期: 2020-07-01

通信作者: 余建群, 主任医师, 主要研究方向为心血管影像诊断。

通信作者邮箱: cjr.yujianqun@vip.163.com

时,对比剂通常使用 5 mL/s 的较高流速注射,对于血管弹性较差的患者存在血管破裂的风险^[13]。此外,碘对比剂可引发肾脏损伤,导致对比剂肾病(Contrast-Media Induced Nephropathy, CIN)的发生,CIN 占医源性急性肾功能衰竭原因中的第三位^[14]。因此,降低对比剂注射流速和对比剂注射总量均使患者受益。然而,降低对比剂的注射流速即降低碘流率,会导致图像 CT 值下降,从而使客观图像质量的信噪比(Signal To Noise Ratio, SNR)与对比噪声比(Contrast To Noise Ratio, CNR)均有所下降。低剂量扫描 CT (Low Dose CT, LDCT)中使用管电压的方法不仅可降低辐射剂量,还可以降低对比剂的流速和总量^[15]。LDCT 扫描必然会导致图像质量的下降,图像质量的下降主要原因是噪声的增加,因此,如何在降低 X 线辐射剂量的情况下,不降低图像质量,只有使用新的重建算法降低图像噪声。迭代重建算法(Iterative Reconstruction, IR)是低剂量 CT 扫描后应用最多的改善图像质量的方法,可明显降低图像的噪声,从而改善图像质量^[16]。但是,既往 IR 算法应用于临床后出现“蜡像感”,也就是图像失真情况,那么最优 IR 算法是什么呢?随着图像重建算法的不断改进,基于人工智能(Artificial Intelligence, AI)的深度学习算法(Deep Learning Reconstruction, DLR)在改善图像质量方面也有相关研究报道,相比 IR 重建,DLR 算法优势又如何?本文就低 X 线辐射剂量、低对比剂用量、流速和图像重建算法在 CTA 应用中的研究进展进行综述。

1 低辐射剂量、低对比剂用量和流速在 CTA 中的研究

CT 检查采用 X 射线作为成像源, X 线具有辐射效应。辐射剂量相关的影响因素较多,主要包括设备本身和检查时所采用的成像参数。涉及设备相关的主要参数包括:扫描模式、螺距、曝光时间、扫描范围、管电压和管电流等。在相同的扫描部位或同一类型的病人,通常扫描模式、曝光时间、扫描范围基本都是相对固定的,因此影响 CT 检查辐射剂量最重要的两个参数就是管电压和管电流。降低管电流会使 CT 图像噪声增加,致图像出现颗粒感,从而导致 CT 图像质量下降,但是如果在适当的范围内降低管电流,图像质量是可以满足诊断要求的^[17-19]。然而,降低管电流不能提高血管内的 CT 值,因此不能实现降低患者对比剂流速和总量的目的。有文献研究表明,低管电压行 CTA 扫描不仅可以降低辐射剂量,而且还可以明显降低对比剂用量^[20]。这是由于低管电压不仅与辐射剂量呈指数关系,且低管电压降低了 X 射线束能量,更接近碘对比剂 K 层电子的结合能,使得碘对比剂衰减增加,血管内 CT 值更高,从而提高 CTA 图像的 SNR 和 CNR^[21]。根据冠脉 CTA 成像技术规范应用中国指南指出,建议冠脉 CTA 的主干分支血管的 CT 值在 300~450 HU 有利于诊断^[22]。根

据头颈部 CTA 扫描专家共识,建议头颈部 CTA 的主要血管分支的 CT 值超过 200 HU 就可以满足要求^[23]。在管电压一定的前提下,对比剂的流速和总量决定了血管内的 CT 值高低。基于低电压与碘对比剂的原子特点,采用低管电压扫描的同时,可以使用较低的对比剂注射流速和总量^[24]。目前的研究结果表明,低管电压使用的大小可参考患者的体质指数(Body Mass Index, BMI):① BMI ≤ 25 kg/m²,选择超低管电压 ≤ 80 kVp;② 25 kg/m² < BMI ≤ 30 kg/m²,选择低管电压 90 kVp 或 100 kVp;③ BMI > 25 kg/m²,管电压选择 120 kVp^[20]。邓亮等^[25]研究表明,使用 100 kVp 管电压与 120 kVp 管电压行冠状动脉 CTA 扫描,对比剂的注射流速从 6 mL/s 降到 4 mL/s,注射流速降低了 23%,对比剂外渗率也明显降低。Qi 等^[26]使用 80 kVp 管电压行冠状动脉 CTA 扫描,不仅可以降低对比剂的注射流速,且可以使用更低的对比剂浓度,减少患者碘总量的注入。Kok 等^[27]分别使用 70、80、100 kVp 管电压和 120 kVp 高管电压在一个冠脉循环体模和 60 例冠脉 CTA 扫描病例的研究结果表明,在保持冠脉血管 CT 值无统计学差异前提下,100 kVp 较 120 kVp 对比剂注射流速和总量降低的范围在 12%~23%,80 kVp 较 120 kVp 对比剂注射流速和总量降低的范围在 34%~56%,70 kVp 较 120 kVp 对比剂注射流速和总量降低的范围在 45%~67%。有研究表明^[28],在 142651 例患者中发生对比剂外渗的病例仅为 321 例,外渗率仅为 0.23%,虽然经过治疗,大部份患者都能较好的康复,但是对于老年或者合并糖尿病的患者,严重对比剂外渗可引起组织溃疡或者坏死。因此,预防对比剂外渗显得尤为重要,降低对比剂注射流速是预防外渗的有效方法之一^[29]。因此,使用低管电压技术不仅可以降低 CTA 扫描时的辐射剂量,同时还可以在一定程度上降低对比剂的注射流速和总量,使靶血管内的 CT 值可接近高管电压、高对比剂流速和总量条件下扫描的图像,保证了血管图像质量。

2 IR 在低剂量 CTA 中的研究

CTA 应用中,图像重建是体现 CTA 质量和效果的重要环节。传统 CT 图像重建通常使用滤波反投影技术(Filtered Back Projection, FBP),然而,低剂量 CT 扫描仍然使用 FBP 算法重建无疑导致图像噪声增加。为解决低剂量 CT 扫描图像噪声增加的问题,各设备厂家推出了 IR 来改善低剂量 CT 图像的噪声^[30]。最初研发的 IR 算法虽然能够在一定程度上解决图像噪声增加的问题,但是也会使图像产生“蜡像感”,导致血管边缘显示不清而影响诊断^[31]。第一代 IR 算法是图像后处理上进行重建,第二代 IR 算法是基于 CT 原始数据的迭代重建,而第三代 IR 算法结合原始数据、图像和多模型三方面的数据进行图像重建。因此,后期研发的 IR 算法不仅改善图像噪声更加有效,而且不产生“蜡

像感”图像^[32-33]。

目前,低剂量扫描数据结合第二代和第三代 IR 算法进行图像重建研究的文献相对较多。Yuki 等^[34]分别使用 IMR、iDose4 和 FBP 对冠脉 CTA 的图像进行重建,结果显示使用 IMR 和 iDose4 两种算法获得的图像噪声小于 FBP 重建,其中 IMR 重建的图像最优。Laqmani 等^[35]将 IMR 应用于肺动脉 CTA 时,IMR 获得的图像明显优于 FBP 重建的图像,IMR 显示肺栓塞的栓子的能力更佳。Niessen 等^[36]使用 IMR 重建头颈部 CTA 图像时,头颈部 CTA 噪声降低,CNR 提高,获得更佳的图像质量。Rompel 等^[37]使用第三代双源 CT 行 3 岁以内小儿胸部 CTA 时,使用 70 kVp 超低管电压联合 ADMIRE 重建算法与 80 kVp 管电压相比,图像质量保持不变,而患儿接受的辐射剂量从 0.63 mSv 降低 0.36 mSv。汤振华^[38]使用 SAFIRE 联合“三低”方案(低管电压、低对比剂量和低对比剂注射流速)在冠状动脉 CTA 应用的研究表明,使用 80 kVp、对比剂总量按 0.7 mL/kg 计算、注射流速 3.5 mL/s 联合 SAFIRE 重建的冠脉 CTA 图像,与 120 kVp、对比剂总量按 0.9 mL/kg 计算、注射流速 5 mL/s 联合 FBP 重建的冠脉 CTA 比较,客观图像质量与主观图像质量差异均无统计学意义。Benz 等^[39]应用 ASIR-V 重建超低剂量扫描的冠脉 CTA 图像,ASIR-V 算法明显降低冠脉 CTA 图像噪声,提高图像质量。Chen 等^[40]在 BMI ≤ 23 kg/m² 的患者冠脉 CTA 扫描时,使用 70 kVp、碘对比剂注射速度以 16 mgI/kg/s 注射时间 9 s、80% ASIR-V 的方案与 100 kVp、碘对比剂注射速度以 25 mgI/kg/s 注射时间 10 s、60% ASIR-V 的方案相比,图像质量可以满足诊断要求,辐射剂量和对比剂用量分别降低了 75.3% 和 42.4%。因此,有效的图像重建算法,为“三低”技术改善 CTA 的图像质量提供了重要的辅助作用。

3 AI 深度学习算法在低剂量 CTA 中的应用

IR 算法能够很好改善图像噪声,无论是第几代 IR 算法,均建议低剂量扫描,且通常应用于正常 BMI 以下的患者或儿童^[37,41]。Chen 等^[40]在冠脉 CTA “三低”剂量研究中纳入的患者 BMI 小于 23 kg/m²,应用范围相对受限。以往的学者研究认为,当 BMI ≤ 25 kg/m² 时,可选择超低管电压 ≤ 80 kVp;当 $25 \text{ kg/m}^2 < \text{BMI} \leq 30 \text{ kg/m}^2$ 时,选择低管电压 90 kVp 或 100 kVp;而当 BMI $> 25 \text{ kg/m}^2$ 时,选择管电压 120 kVp^[20]。这些研究表明较大 BMI 或肥胖者接受低剂量 CT 扫描较难获得满意结果。虽然迭代重建技术较传统滤波反投影可以在低剂量扫描时,改善图像噪声,但是由于迭代重建技术使图像空间分辨率下降,使病变的影像特征和病变的检测能力很难获得满意的诊断结果^[42-43]。

近年来,AI DLR 应用于低剂量 CT 扫描并进行图像重建,大大提高图像质量的能力而备受关注^[44]。目前,基

于卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)的 DLR 算法是通过处理 CT 噪声过高和细节丢失的问题,提高图像质量。CNN 还可以通过深度学习算法减少 CT 图像伪影^[45]。刘珮君等^[46]应用 AI 优化算法在平均 BMI 为 (29.31 ± 3.19) kg/m² 的高 BMI 患者行冠脉 CTA 扫描时,管电压使用 100 kVp,主动脉根部噪声从平均 30.04 降到 9.50,SNR 值从 18.47 升高到 55.82,CNR 值从 24.10 升高到 71.62,客观图像质量改善明显,主观图像评分也明显增高,患者接受的平均辐射剂量约为 2.3 mSv。王明等^[47]应用 AI 成像优化联合迭代算法在“双低”主动脉 CTA 中的研究认为,“双低”剂量组使用 80 kVp 联合 AI ClearView+90% 算法与传统 120 kVp 使用 FBP 重建的图像相比,主观图像质量评分没有差异,但“双低”剂量组客观图像质量的 SD 值、CNR 和 SNR 均明显优于 120 kVp 组。Tatsugami 等^[48]使用 DLR 算法应用于 30 例冠脉 CTA 成像,与混合迭代重建算法(Hybrid Iterative Reconstruction, HIR)相比,图像 SD 值从 23.0 HU 降低到 18.5 HU,图像 CNR 明显提高,冠脉 CTA 血管边界的锐利度明显提高。Higaki 等^[49]使用 DLR 算法在一项体模研究表明,对体模行 CT 扫描后分别使用 FBP、HIR、MBIR 和 DLR 算法进行重建,结果显示 DLR 算法获得图像的 SD 最低,DLR 的空间分辨率更高。因此,DLR 算法获得的 CT 图像质量优于 FBP 和 IR 算法。当然,由于 AI 深度学习算法在临床应用和研究病例较少,且体模研究较多,其可靠性和稳定性还需再临床实践中大数据测试后才能确定,但是,采用 DLR 算法或其他方法的 AI 在图像采集和重建中的应用会越来越多,也是大势所趋。

4 总结与展望

综上所述,“三低”剂量在 CTA 中应用时,可以降低 X 线辐射剂量、减低对比剂用量和流速,减少 CTA 对患者的潜在风险,又能保证图像质量而不影响诊断。图像重建算法可用于改善低剂量扫描的 CT 图像质量,尤其是权重较高的 IR。目前,“三低”剂量联合 IR 的技术常在儿童和正常 BMI 的患者使用,且图像的空间分辨率和图像特征尚需进一步提高。随着 AI 深度学习算法等新技术的应用,“三低”剂量 CTA 图像质量可进一步得以改善,包括图像空间分辨率和图像特征的提高,有望在高 BMI 的患者和血管疾病较严重的患者应用。由于 AI 深度学习算法处于刚起步阶段,很多研究尚不成熟,需要更多的临床研究证明其改善低剂量图像质量的能力。

[参考文献]

- [1] Salavati A, Radmanesh F, Heidari K, et al. Dual source computed tomography angiography for diagnosis and assessment of coronary artery disease: systematic review and meta-analysis[J].

- J Cardiovasc Comput Tomogr*,2012,6(2):78-90.
- [2] Wu S, Wu B, Liu M, et al. Stroke in China: advances and challenges in epidemiology, prevention, and management[J]. *Lancet Neurol*,2019,18(4):394-405.
 - [3] Shuai T, Deng L, Pan Y, et al. Free-breathing coronary CT angiography using 16-cm wide-detector for challenging patients: comparison with invasive coronary angiography[J]. *Clin Radiol*,2018,73(11):986.
 - [4] Inoue S, Hosoda K, Fujita A, et al. Diagnostic imaging of cerebrovascular disease on multi-detector row computed tomography (MDCT)[J]. *Brain Nerve*,2011,63(9):923-932.
 - [5] Stehli J, Fuchs TA, Bull S, et al. Accuracy of coronary CT angiography using a submillisievert fraction of radiation exposure: comparison with invasive coronary angiography[J]. *J Am Coll Cardiol*,2014,64(8):772-780.
 - [6] Sun K, Li K, Han R, et al. Evaluation of high-pitch dual-source CT angiography for evaluation of coronary and carotid-cerebrovascular arteries[J]. *Eur J Radiol*,2015,84(3):398-406.
 - [7] Hachulla AL, Noble S, Ronot M, et al. Low iodine contrast injection for CT acquisition prior to transcatheter aortic valve replacement: aorta assessment and screening for coronary artery disease[J]. *Acad Radiol*,2019,26(7):e150-e160.
 - [8] Achenbach S. Coronary CT angiography-future directions[J]. *Cardiovasc Diagn Ther*,2017,7(5):432-438.
 - [9] Mettler FA, Bhargavan M, Faulkner K, et al. Radiologic and nuclear medicine studies in the United States and worldwide: frequency, radiation dose, and comparison with other radiation sources--1950-2007[J]. *Radiology*,2009,253(2):520-531.
 - [10] Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography--an increasing source of radiation exposure[J]. *N Engl J Med*,2007,357(22):2277-2284.
 - [11] The ALARA (as low as reasonably achievable) concept in pediatric CT intelligent dose reduction. Multidisciplinary conference organized by the Society of Pediatric Radiology. August 18-19, 2001[J]. *Pediatr Radiol*,2002,32(4):217-313.
 - [12] 王森,肖志清,王艳强,等.合理应用X射线检查,优化辐射剂量[J]. *中华放射医学与防护杂志*,2019,39(1):1-5.
 - [13] Kingston RJ, Young N, Sindhusake DP, et al. Study of patients with intravenous contrast extravasation on CT studies, with radiology staff and ward staff cannulations[J]. *J Med Imaging Radiat Oncol*,2012,56(2):163-167.
 - [14] Faucon AL, Bobrie G, Clément O. Nephrotoxicity of iodinated contrast media: from pathophysiology to prevention strategies[J]. *Eur Radiol*,2019,(116):231-241.
 - [15] Thomsen HS. How to avoid CIN: guidelines from the European Society of Urogenital Radiology[A]. Nephrology, dialysis, transplantation: official publication of the European Dialysis and Transplant Association[C]. European Renal Association,2005:18-22.
 - [16] Leil MM, Kachelrieß M. Recent and upcoming technological developments in computed tomography: high speed, low dose, deep learning, multienergy[J]. *Invest Radiol*,2020,55(1):8-19.
 - [17] Othman AE, Brockmann C, Yang Z, et al. Effects of radiation dose reduction in polume perfusion CT imaging of acute ischemic stroke[J]. *Eur Radiol*,2015,25(12):3415-3422.
 - [18] Söderberg M, Gunnarsson M. The effect of different adaptation strengths on image quality and radiation dose using Siemens Care Dose 4D[J]. *Radiat Prot Dosimetry*,2010,139(1-3):173-179.
 - [19] Papadakis AE, Damilakis J. Automatic tube current modulation and tube voltage selection in pediatric computed tomography: a phantom study on radiation dose and image quality[J]. *Invest Radiol*,2019,54(5):265-272.
 - [20] Stocker TJ, Leipsic J, Hadamitzky M, et al. Application of low tube potentials in CCTA: results from the PROTECTION VI study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*,2020,13(2 Pt 1):425-434.
 - [21] Luo S, Zhang LJ, Meinel FG, et al. Low tube voltage and low contrast material volume cerebral CT angiography[J]. *Eur Radiol*,2014,24(7):1677-1685.
 - [22] 中华医学会放射学分会心胸学组.《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排CT临床应用指南写作专家组.心脏冠状动脉CT血管成像技术规范应用中国指南[J]. *中华放射学杂志*,2017,51(10):732-743.
 - [23] 高宏.中华医学会放射学分会头颈部CT血管成像扫描方案与注射方案专家共识[J]. *中华放射学杂志*,2019,52(2):81-87.
 - [24] Chen Y, Zhang X, Xue H, et al. Head and neck angiography at 70 kVp with a third-generation dual-source CT system in patients: comparison with 100 kVp[J]. *Neuroradiology*,2017,59(11):1071-1081.
 - [25] 邓亮,王梦莉.冠状动脉CT血管成像中低管电压结合低流速造影剂注射的可行性分析[J]. *中华老年心脑血管病杂志*,2019,21(10):1012-1015.
 - [26] Qi L, Wu SY, Meinel FG, et al. Prospectively ECG-triggered high-pitch 80 kVp coronary computed tomography angiography with 30 mL of 270 mg I/mL contrast material and iterative reconstruction[J]. *Acta Radiol*,2016,57(3):287-294.
 - [27] Kok M, Muhl C, Hendriks BMF, et al. Optimizing contrast media application in coronary CT angiography at lower tube voltage: evaluation in a circulation phantom and sixty patients[J]. *Eur J Radiol*,2016,85(6):1068-1074.
 - [28] Hwang EJ, Shin CI, Choi YH, et al. Frequency, outcome, and risk factors of contrast media extravasation in 142,651 intravenous contrast-enhanced CT scans[J]. *Eur*

Radiol,2018,28(12):5368-5375.

- [29] 白静静,李健,雄娜,等.CT增强扫描中对比剂外渗的临床应用方法[J].医学影像学杂志,2017,27(11):2196-2197.
- [30] Xu J,Mahesh M,Tsui BMW.Is iterative reconstruction ready for MDCT?[J].*J Am Coll Radiol*,2009,6(4):274-276.
- [31] Winklehner A,Karlo C,Puippe G,*et al*.Raw data-based iterative reconstruction in body CTA: evaluation of radiation dose saving potential[J].*Eur Radiol*,2011,21(12):2521-2526.
- [32] Gatti M,Marchisio F,Fronza M,*et al*.Adaptive statistical iterative reconstruction-V versus adaptive statistical iterative reconstruction: impact on dose reduction and image quality in body computed tomography[J].*J Comput Assist Tomogr*,2018,42(2):191-196.
- [33] Löve A,Olsson ML,Siemund R,*et al*.Six iterative reconstruction algorithms in brain CT: a phantom study on image quality at different radiation dose levels[J].*Br J Radiol*,2013,86(1031):20130388.
- [34] Yuki H,Utsunomiya D,Funama Y,*et al*.Value of knowledge-based iterative model reconstruction in low-kV 256-slice coronary CT angiography[J].*J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2014,8(2):115-123.
- [35] Laqmani A,Kurfürst M,Butscheidt S,*et al*.CT Pulmonary angiography at reduced radiation exposure and contrast material volume using iterative model reconstruction and iDose4 technique in comparison to FBP[J].*PloS one*,2016,11(9):e0162429.
- [36] Niesten JM,van der Schaaf IC,Vos PC,*et al*.Improving head and neck CTA with hybrid and model-based iterative reconstruction techniques[J].*Clin Radiol*,2015,70(11):1252-1259.
- [37] Rempel O,Glöckler M,Janka R,*et al*.Third-generation dual-source 70-kVp chest CT angiography with advanced iterative reconstruction in young children: image quality and radiation dose reduction[J].*Pediatr Radiol*,2016,46(4):462-472.
- [38] 汤振华.迭代重建算法在双源CT三低方案冠状动脉血管成像中的应用价值[J].中华放射医学与防护杂志,2017,37(3):213-236.
- [39] Benz DC,Gräni C,Mikulicic F,*et al*.Adaptive statistical iterative reconstruction-V: impact on image quality in ultra low-dose coronary computed tomography angiography[J].*J Comput Assist Tomogr*,2016,40(6):958-963.
- [40] Chen Y,Liu Z,Li M,*et al*.Reducing both radiation and contrast doses in coronary CT angiography in lean patients on a 16-cm wide-detector CT using 70 kVp and ASiR-V algorithm, in comparison with the conventional 100-kVp protocol[J].*Eur Radiol*,2019,29(6):3036-3043.
- [41] Ren Z,Zhang X,Hu Z,*et al*.Reducing radiation dose and improving image quality in CT portal venography using 80 kV and adaptive statistical iterative reconstruction-V in slender patients[J].*Acad Radiol*,2020,27(2):233-243.
- [42] Millon D,Vlassenbroek A,Van Maanen AG,*et al*.Low contrast detectability and spatial resolution with model-based iterative reconstructions of MDCT images: a phantom and cadaveric study[J].*Eur Radiol*,2017,27(3):927-937.
- [43] Minamishima K,Sugisawa K,Yamada Y,*et al*.Quantitative and qualitative evaluation of hybrid iterative reconstruction, with and without noise power spectrum models: a phantom study[J].*J Appl Clin Med Phys*,2018,19(3):318-325.
- [44] Kahn CE.From images to actions: opportunities for artificial intelligence in radiology[J].*Radiology*,2017,285(3):719-720.
- [45] Kida S,Nakamoto T,Nakano M,*et al*.Cone beam computed tomography image quality improvement using a deep convolutional neural network[J].*Cureus*,2018,10(4):e2548-e2548.
- [46] 刘珮君,王怡宁,于敏,等.人工智能优化算法对提高大体型患者低剂量扫描冠状动脉图像质量的价值[J].放射学实践,2019,34(7):760-766.
- [47] 王明,王怡宁,于敏,等.AI成像优化联合迭代算法在“双低”主动脉CTA的初步应用[J].放射学实践,2018,33(10):1009-1016.
- [48] Tatsugami F,Higaki T,Nakamura Y,*et al*.Deep learning-based image restoration algorithm for coronary CT angiography[J].*Eur Radiol*,2019,29(10):5322-5329.
- [49] Higaki T,Nakamura Y,Zhou J,*et al*.Deep learning reconstruction at CT: phantom study of the image characteristics[J].*Acad Radiol*,2020,27(1):82-87.

本文编辑 韩莹

上接第 70 页

- breast cancer patients receiving neoadjuvant chemotherapy[J].*Breast*,2008,17(3):245-251.
- [21] Siegler P,Holloway CMB,Causser P,*et al*.Supine breast MRI[J].*J Magn Reson Imaging*,2011,34(5):1212.
- [22] Gombos EC,Jayender J,Richman DM,*et al*.Intraoperative supine breast MR imaging to quantify tumor deformation and detection of residual breast cancer: preliminary results[J].*Radiology*,2016:720-729.
- [23] Samani A,Zubovits J,Plewes D.Elastic moduli of normal and pathological human breast tissues: an inversion-technique-based investigation of 169 samples[J].*Phys Med Biol*,2007,52(6):1565-1576.

本文编辑 韩莹