

低剂量冠状动脉 CTA 支架成像研究

王晓瑜, 祁荣兴 综述 黄胜 审核

【摘要】 冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)作为一种检测支架内再狭窄、支架断裂或支架内血栓形成等并发症的方法,其相对可靠和无创,在经皮冠状动脉介入治疗(PCI)术后随访中起到重要作用。如使 PCI 术后患者在 CCTA 检查时既能保证图像质量、达到诊断要求,又能降低辐射剂量,仍是现在关注的热点之一。本文就近年来低剂量 CCTA 支架成像的研究进展作一综述。

【关键词】 低剂量; 冠状动脉疾病; 体层摄影术, X 线计算机; 支架

【中图分类号】 R33; R814.42; R543.3; R618 **【文献标识码】** A

【文章编号】 1000-0313(2019)06-0698-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2019.06.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)已经成为冠状动脉粥样硬化性心脏病(coronary artery disease, CAD)最有效的治疗手段之一,但研究显示使用金属裸支架出现再狭窄(in-stent restenosis, ISR)的发生率约 11%~40%,即使是使用药物涂层支架,其 ISR 的发生率仍然不可忽视^[1],因此 PCI 术后支架的随访具有重要意义。目前,侵入性冠状动脉造影(invasive coronary angiography, ICA)仍是检测 ISR 的金标准,但该方法有创,费用高且易出现并发症^[2]。而冠状动脉 CT 血管成像(coronary computed tomographic angiography, CCTA)作为一种检测支架内再狭窄、支架断裂或支架内血栓形成等并发症的方法^[3],其相对可靠和无创,在 PCI 术后随访中起到重要作用。根据国际放射防护委员会(International Commission of Radiological Protection, ICRP)提出的辐射防护最优化原则(as low as reasonably achievable, ALARA),如何使 PCI 术后患者在 CCTA 检查时既能保证图像质量、达到诊断要求,又能降低辐射剂量,仍是现在关注的热点之一。

CCTA 支架成像技术现状

目前,随着 PCI 技术的发展和广泛应用,支架术后的随访成为 CCTA 的主要适应证之一^[4]。CCTA 通过肉眼观察支架内管腔(是否存在内膜增生等)情况和测量 PCI 术后管腔内密度衰减梯度值及定量分析,

或观察支架远端血管充盈情况^[5],直接或间接地对支架内再狭窄的程度作出评估。研究显示^[6-7] CCTA 评估支架的主要限制因素有时间及空间分辨率不足,部分容积效应及支架线束硬化伪影等,这些因素造成支架管腔内的情况显示欠清,从而影响支架评估的准确性。Kitagawa 等^[6]研究表明使用 16 排螺旋 CT 进行 CCTA 支架成像,对内径 ≥ 3.5 mm 的不锈钢或钴制支架的腔内情况可评估率高达 88.6%,而内径为 2.5 mm 的支架由于金属伪影和部分容积效应的影响大多无法评估。

随着 CT 技术的不断革新,PCI 术后支架的非侵入性 CTA 评估已成为可能。目前,320 排螺旋 CT 具有覆盖范围高达 16 cm 的探测器,可实现在单次机架旋转或心脏跳动中完成心脏的全扫描^[8];第二代双源 CT(dual-source computed tomography, DSCT)以其两套球管/探测器系统的优势获得了 75 ms 单扇区时间分辨率^[9],特别是第三代双源 CT(SOMATOM Force, Siemens Healthcare, Forchheim, Germany)时间分辨率提高到 66 ms,且配备了一个集成电路探测器,能够获得更高的 Z 轴方向的空间分辨率,其特有的单能谱技术和高级迭代重建(advanced modeled iterative reconstruction, ADMIRE)技术^[10]能提高支架的诊断准确性。Mangold 等^[11]的体外模型研究显示双能量 CT 单能谱重建提高了小内径支架的管腔内可视化率,能量 130 keV 时直径 2.25 mm 的支架平均可视化率高达 86%。近年来,冠脉功能学评估方法不断发展,基于 CCTA 的数据应用流体力学方法得到血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)的技术称 FFR-CT,研究表明^[12] FFR-CT 对 PCI 术后患者的血运重建和疗效的评估有重要意义。

作者单位: 226001 江苏,南通大学第二附属医院/南通市第一人民医院影像科

作者简介: 王晓瑜(1993-),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事心血管影像诊断工作。

通讯作者: 黄胜, E-mail: 1074021541@qq.com

基金项目: 南通市民生科技创新与示范推广项目(MS12016065);南通市关键技术研究-民生项目(MS22015061);南通市关键技术研究-农业与社会-民生事业及临床诊疗项目(GJZ17015)

CCTA 支架成像的剂量现状

随着冠脉 CTA 的应用越来越普遍,冠脉疾病人群的检查辐射剂量随之增加。研究表明^[13]CT 扫描的辐射剂量可提高恶性肿瘤 2% 的发病风险。因此,CCTA 辐射剂量问题也越来越引起人们的关注和重视。

1. 剂量参数

CT 扫描时通常有许多剂量参数来描述辐射剂量,最常见的是 CT 剂量指数(CT dose index,CTDI)、有效辐射剂量(effective dose,ED)。目前,新的研究显示患者所接受的剂量需取决于体型,美国放射协会认为^[14]特异性体型估算值(size specific dose estimates,SSDE)估算患者的辐射剂量更为精确,该值是利用 CT 机上提供的容积 CT 剂量指数(volume CT dose index,CTDIvol)和体型转换系数所得。

2. 传统 CCTA 支架成像模式的剂量现状

传统的 CCTA 支架成像模式包括前瞻性心电门控扫描、回顾性心电门控扫描、大螺距扫描、双能量心肌灌注成像等,其中回顾性心电门控扫描需采集整个心动周期,所以辐射剂量最大,高达 13~24 mSv(平均 18.5 mSv)^[15]。双能量心肌灌注可以利用碘图来反映支架植入术后心肌血流灌注情况,其平均有效辐射剂量达 12 mSv^[16]。而根据国际放射防护委员会对人体不同组织、器官所能够接受的 CT 有效辐射剂量提出的要求^[17]:胸部 5~7 mSv,冠脉钙化积分 1~3 mSv,冠脉 CTA 5~12 mSv。

因此,如何使 PCI 术后患者在 CCTA 检查时既能保证图像质量、达到诊断要求,又能降低辐射剂量是目前亟待解决的问题。

3. 低剂量支架成像策略

1. 管电压调制

X 线的辐射剂量与管电压的平方呈正比,因此当管电压降低时,患者的有效辐射剂量将大幅减低。文献报道^[18-21]CCTA 支架成像的管电压可从 120 kV 降低至 100 kV,甚至 80 kV 进行对比研究,Lee 等^[18]采用高分辨率 CT 对正常身体质量指数(body mass index,BMI)患者进行低管电压(100 kVp)与标准管电压(120 kVp)进行冠状动脉支架成像,研究发现低管电压组与标准管电压组图像质量相当,可以达到支架的诊断要求,但患者的有效辐射剂量降低了近 50%。Eisentopf 等^[19]研究显示在管电压、管电流分别降低至 80 kV、165 mA 时进行前瞻性心电门控采集,结合迭代重建技术优化图像,既能降低辐射剂量(0.32 mSv)又具有合理的诊断准确性。

降低管电压会降低 X 线的能量,提高腔内碘对比

剂的 CT 值,间接增加了血管与邻近组织的对比分辨率,使 CCTA 支架成像的双低扫描成为可能。杨帆等^[20]研究显示与常规扫描组(120 kV、370 mg I/mL)相比,双低扫描组(80 kV、270 mg I/mL)在满足诊断要求的前提下,有效辐射剂量降低了近 32%,且对支架管壁及腔内情况的显示更佳,更有助于检测支架内膜增生、支架内再狭窄等并发症。值得注意的是,降低管电压虽能降低有效辐射剂量,但会降低支架图像信噪比(signal noise ratio,SNR),因此,不能一味地降低管电压。Mangold 等^[21]研究发现第三代 DSCT 根据 BMI 应用自动管电压选择(automated tube voltage selection,ATVS)进行扫描,相关分析显示管电压和 BMI 之间存在中度关联($r=0.639$),所以管电压的选择也要根据患者的 BMI 适当做出个体化调整,才能满足临床诊断的需要。

2. 管电流调制

X 线的辐射剂量与管电流呈正比,因此当管电流降低时,患者的有效辐射剂量将相应降低。管电流调制通常包括心电门控(ECG)相关性管电流调制与依赖 BMI 的自动管电流调制(automatic tube current modulation,ATCM)^[22]。

ECG 相关性管电流调制:当患者心率低时,心脏在等容舒张期呈相对静止状态;当患者心率高时,舒张期缩短尤其显著,心脏在等容收缩期呈相对静止状态,此时更宜采集成像。因此,能够在预定的时间间隔内获得最大的管电流而在其他时间间隔使用较低的管电流,可以更好的降低患者的有效辐射剂量。Fleur 等^[8]在 320 排 CT 中对冠状动脉支架进行扫描成像,采用管电压自动调控和前瞻性心电门控相关性管电流调制,研究显示 320 排 CT 在评估支架内再狭窄上有一定的诊断效能,且内径较大和管壁较薄的支架的可视化显示比内径小的支架更好,在 75% R-R 间隔内平均有效辐射剂量为(3.2±1.1) mSv,在 65%~85% R-R 间隔内平均有效辐射剂量为(7.1±1.7) mSv,对于需要测量左室功能的患者平均有效辐射剂量为(10.7±3.6) mSv。

依赖 BMI 的自动管电流调制:管电流降低会增加图像噪声,降低密度分辨率。而自动管电流调制技术是根据患者的体型、厚度、BMI 大小等引起的衰减差异进行适时调整,在保证参考图像质量的前提下,有效降低患者辐射剂量。Siemens 公司推出的 CARE Dose 4D 技术是其中的一种。王苑丁等^[23]在第三代双源 CT 中,采用全自动 CARE Dose4D(参考管电流 180 mAs/rot)、CARE kV(参考管电压 100 kV)技术,有效辐射剂量仅(1.7±0.5) mSv。

3. 前瞻性心电门控扫描

心电门控采集数据分为前瞻性心电门控(prospective ECG-gating)和回顾性心电门控(retrospective ECG-gating)。前瞻性心电门控扫描是对提前设置的采集时相或心动周期的 R-R 间隙进行曝光采集,可以大大降低 CCTA 成像辐射剂量^[15,24-27]。Cui 等^[24]在高分辨率 CT 中对 PCI 术后复查的患者进行前瞻性与回顾性心电门控扫描联合迭代重建算法来评估支架的图像质量及腔内情况,两组图像质量无明显差异,前者辐射剂量降低 79% (2.28 mSv vs 11.34 mSv)。杨耀华等^[25]应用“双低”扫描技术(80 kVp, 270 mg I/mL)在 iCT 256 层螺旋 CT 机中对 PCI 术后患者进行前瞻性与回顾性心电门控扫描,前瞻性组辐射剂量低至(1.90±0.26) mSv。Horiguchi 等^[26]心脏模型研究表明当管电压为 140 kV 时,前瞻性心电门控扫描辐射剂量较回顾性扫描降低了近 75%,但仍然可以改善支架内再狭窄的可见度。相对于回顾性心电门控的支架成像,前瞻性心电门控扫描在降低有效辐射剂量的情况下,对支架评估的准确性却没有降低。以 ICA 为金标准,Andreini 等^[15]研究表明基于各组可评估的支架中,前瞻性心电门控组诊断支架内再狭窄的准确度、特异度、阳性预测值(99%、100%、100%)高于回顾性心电门控组(95%、97%、91%),而有效辐射剂量明显减低。

然而,前瞻性心电门控扫描也会有一定的局限,比如不能对全心进行功能分析、对受检患者的心率有一定限制等。随着多排螺旋 CT 图像的时间分辨率不断地提高,使得 CCTA 前瞻性心电门控扫描受心率的影响很微小。Lei 等^[27]研究显示双源 CT 自适应性前瞻性心电门控扫描对高心率(70~110 次/分)患者是可行的,且主观图像质量评分与回顾性心电门控扫描相似,同时有效辐射剂量降低了近 57%。在 256 层螺旋 CT 中,罗开选等^[28]研究显示对于高心率患者(≥80 次/分),采用自适应性前瞻性心电门控 CCTA 成像,其评估冠脉狭窄的程度与侵入性冠状动脉造影结果相一致,且敏感性、阴性预测值高达 96.8%、97.7%。

4. 卷积核和迭代重建(iterative reconstruction, IR)技术

冠脉 CTA 支架成像通常使用的卷积核包括平滑核与锐利核^[24,29-31]。平滑核值常用于冠状动脉血管成像的显示;锐利核值尽管会增加图像噪声,降低图像质量,但其能锐化支架管壁,更好地显示支架的细微结构^[30]。因此,使用锐利核不仅可以减少支架壁的金属伪影,改善支架内径的显示,还能提高诊断支架内再狭窄的准确性^[32,33]。Zhou 等^[30]研究结果显示观察 CCTA 支架成像的最佳图像是由锐利核联合图像域

迭代重建所得。

近年来 IR 广泛应用在 CCTA 支架成像的研究中,相比于滤波反投影算法(filtered back-projection, FBP),IR 有减弱金属伪影、减小噪声、改善图像质量的重要作用^[34-38],但增加迭代权重会造成图像失真、蜡像感显著。Yang 等^[35]将前瞻性大螺距结合 IR 技术应用于 CCTA 支架成像中,有效辐射剂量仅(1.4±0.5) mSv,图像质量提高,不能诊断的支架的概率较 FBP 减少(2.5% vs 5.7%, $P<0.05$)。赵春荣等^[36]心脏体模研究对冠状动脉支架进行成像,分别用 80 kV 结合 IR 和 120 kV 结合 FBP 成像,结果表明两组图像主观评分无统计学意义,但 FBP 成像组的平均内径显示率为 37.73%,IR 成像组的平均内径显示率达 43.31%,较 FBP 成像组提高了近 5.4%,而且有效辐射剂量明显降低。Ebersberger 等^[38]研究显示即使在辐射剂量降低 50% 的情况下,IR 仍能改善冠状动脉支架的图像评估,有着提高支架内再狭窄的检测准确性并减少假阳性率的潜力。

ADMIRE 是西门子公司推出的三代迭代重建技术,该迭代基于原始数据域、图像域和模型域,通过不断地将由正向投影产生的“虚拟原始数据”与探测器实际采集的数据进行比较,进而减少伪影、减少辐射、减低噪声^[10]。Nils 等^[39]在心脏体模研究中,ADMIRE 联合锐利核重建的图像提高了支架内径的可视化率。

东芝 320 排 CT 的基于正投影模型的迭代重建(forward projected modelbased iterative reconstruction solution, FIRST)和自适应迭代剂量降低技术(adaptive iterative dose reduction 3D, AIDR 3D)也属于 IR 技术。Tatsugami 等^[40,41]研究表明与 AIDR 3D 相比, FIRST 的冠状动脉支架图像质量更佳,支架内 CT 值净增比更低,且检测支架内再狭窄的灵敏度及阴性预测值高达 100%。

因此,采用 IR 技术可在使用锐利核、降低 kV、mAs 引起的图像噪声增加时,对图像质量进行优化,实现 CCTA 支架成像的低剂量检查。

5. 大螺距扫描

螺距定义为扫描床的速度与层厚之比,螺距越大,则扫描时间越短,因此,增大螺距不仅可以缩短扫描的时间,减少扫描过程中的心脏搏动伪影,还可以大大降低患者的辐射剂量。螺距从传统的 0.2 到现在 3.4,辐射剂量可减少到 1 mSv 左右^[34,35,42]。Xia 等^[34]通过大螺距、标准螺距及低螺距 3 种扫描方式,患者心率≤65 次/分,研究表明三者之间支架的图像质量相当,但是采用大螺距扫描的有效辐射剂量最低,仅为(1.0±0.5) mSv。Wichmann 等^[42]在第二代双源 CT 采用大螺距扫描和前瞻性心电门控扫描进行分组对比研究,

管电压设为 100 kV, 前者的有效辐射剂量 $[(1.27 \pm 0.62) \text{ mSv}]$ 低于后者 $[(2.04 \pm 0.94) \text{ mSv}]$ 。Yang 等^[35]采用前瞻性大螺距扫描(螺距为 3.4)联合 IR 技术, 诊断支架内再狭窄的阴性预测值在内径 $>3 \text{ mm}$ 的支架中高达 100%, 在内径 $\leq 3 \text{ mm}$ 的支架中为 90%, 有效辐射剂量仅 $(1.4 \pm 0.5) \text{ mSv}$ 。

大螺距扫描可以显著的降低辐射剂量, 但是其对受检者的心率要求非常严格, 心率需稳定且低于 65 次/分, 因此在临床应用中, 对于满足要求的患者可采用大螺距扫描, 既能保证图像质量、达到诊断要求, 又能降低辐射剂量。

小结与展望

随着多排螺旋 CT 图像的空间分辨率与时间分辨率不断地提高, 冠脉 CTA 成像对检测支架内再狭窄的准确性显著上升, 非侵入性 CTA 在 PCI 术后的随访中扮演着越来越重要的角色。CCTA 支架成像可以通过管电压调制、管电流调制、前瞻性心电门控扫描、大螺距扫描等方式来降低辐射剂量, 结合迭代重建技术来优化图像质量、达到诊断要求。能否在降低辐射剂量的条件下, 保证支架的图像质量和小内径支架的管腔内显示是现在 CCTA 支架成像的研究热点之一。第三代 DSCT 时间分辨率达 66 ms, 联合 AD-MIRE 技术, 未来低剂量 CCTA 在 PCI 术后随访复查中对支架成像的应用将更加广泛。

参考文献:

- [1] Katz G, Harchandani B, Shah B. Drug-eluting stents: the past, present, and future[J]. Curr Atheroscler Rep, 2015, 17(3): 485-496.
- [2] Young N, Chi KK, Ajaka J, et al. Complications with outpatient angiography and interventional procedures[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2002, 25(2): 123-126.
- [3] Mahnken AH. CT imaging of coronary stents: past, present, and future[J]. ISRN Cardiol, 2012, (2): 145-157.
- [4] Taylor AJ, Cerqueira M, Hodgson JM, et al. ACCF/SCCT/ACR/AHA/ASE/ASNC/NASCI/SCAI/SCMR 2010 Appropriate use criteria for cardiac computed tomography. A report of the American college of cardiology foundation appropriate use criteria task force, the society of cardiovascular computed tomography, the American college of radiology, the American heart association, the American society of echocardiography, the American society of nuclear cardiology, the north American society for cardiovascular imaging, the society for cardiovascular angiography and interventions, and the society for cardiovascular magnetic resonance[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2010, 4(6): 407-413.
- [5] Oncel D, Oncel G, Karaca M. Coronary stent patency and in-stent restenosis: determination with 64-section multidetector CT coronary angiography—initial experience[J]. Radiology, 2007, 242(2): 403-409.
- [6] Kitagawa T, Fujii T, Tomohiro Y, et al. Noninvasive assessment of coronary stents in patients by 16-slice computed tomography[J]. Int J Cardiol, 2006, 109(2): 188-194.
- [7] Chung SH, Kim YJ, Hur J, et al. Evaluation of coronary artery in-stent restenosis by 64-section computed tomography: factors affecting assessment and accurate diagnosis[J]. J Thorac Imaging, 2010, 25(1): 57-63.
- [8] de Graaf FR, Schuijff JD, van Velzen JE, et al. Diagnostic accuracy of 320-row multidetector computed tomography coronary angiography to noninvasively assess in-stent restenosis[J]. Invest Radiol, 2010, 45(6): 331-340.
- [9] Scheffel H, Alkadhi H, Plass A, et al. Accuracy of dual-source CT coronary angiography: first experience in a high pre-test probability population without heart rate control[J]. Eur Radiol, 2006, 16(12): 2739-2747.
- [10] Solomon J, Mileto A, Ramirez-Giraldo JC, et al. Diagnostic performance of an advanced modeled iterative reconstruction algorithm for low-contrast detectability with a third-Generation dual-source multidetector CT scanner: potential for radiation dose reduction in a multireader study[J]. Radiology, 2015, 275(3): 735-745.
- [11] Mangold S, Cannaó PM, Schoepf UJ, et al. Impact of an advanced image-based monoenergetic reconstruction algorithm on coronary stent visualization using third generation dual-source dual-energy CT: a phantom study[J]. Eur Radiol, 2016, 26(6): 1871-1878.
- [12] Gognieva D, Gamilov T, Pryamonosov R, et al. One-dimensional mathematical model-based automated assessment of fractional flow reserve in a patient with silent myocardial ischemia[J]. Am J Case Rep, 2018, 20(19): 724-728.
- [13] Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography—an increasing source of radiation exposure[J]. N Engl J Med, 2007, 357(22): 2277-2284.
- [14] Brady SL, Kaufman RA. Investigation of American association of physicists in medicine report 204 size-specific dose estimates for pediatric CT implementation[J]. Radiology, 2012, 265(3): 832-840.
- [15] Andreini D, Pontone G, Bartorelli AL, et al. High diagnostic accuracy of prospective ECG-gating 64-slice computed tomography coronary angiography for the detection of in-stent restenosis: in-stent restenosis assessment by low-dose MDCT[J]. Eur Radiol, 2011, 21(7): 1430-1438.
- [16] De Cecco CN, Varga-Szemes A, Meinel FG, et al. Beyond stenosis detection: computed tomography approaches for determining the functional relevance of coronary artery disease[J]. Radiol Clin North Am, 2015, 53(2): 317-334.
- [17] Lee C, Lee C, Han EY, et al. Consideration of the ICRP 2006 revised tissue weighting factors on age-dependent values of the effective dose for external photons[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(1): 41-58.
- [18] Lee JW, Kim CW, Lee HC, et al. High-definition computed tomography for coronary artery stents: image quality and radiation doses for low voltage (100kVp) and standard voltage (120kVp) ECG-triggered scanning[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2015, 31(Suppl 1): 39-49.
- [19] Eisentopf J, Achenbach S, Ulzheimer S, et al. Low-dose dual-

- source CT angiography with iterative reconstruction for coronary artery stent evaluation[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2013, 6(4):458-465.
- [20] 杨帆,王彦懿,金士琪,等. CCTA 双低扫描对冠脉支架显示影响的实验研究[J]. 放射学实践, 2017, 32(1):28-32.
- [21] Mangold S, Wichmann JL, Schoepf UJ, et al. Automated tube voltage selection for radiation dose and contrast medium reduction at coronary CT angiography using 3 (rd) generation dual-source CT[J]. Eur Radiol, 2016, 26(10):3608-3616.
- [22] Shen H, Dai G, Luo M, et al. Image quality and radiation dose of CT coronary angiography with automatic tube current modulation and strong adaptive iterative dose reduction three-dimensional (AIDR3D)[J]. PLoS One, 2015, 10(11):e0142185.
- [23] 王苑丁,姚新宇,苏壮志,等. 应用高级迭低重建改善低剂量冠状动脉 CT 血管成像图像质量的研究[J]. 医学影像学杂志, 2017, 27(5):819-824.
- [24] Cui X, Li T, Li X, et al. High-definition computed tomography for coronary artery stents imaging: initial evaluation of the optimal reconstruction algorithm[J]. Eur J Radiol, 2015, 84(5):834-839.
- [25] 杨耀华,樊斌,左鹏,等. iCT 低剂量、低浓度应用于冠状动脉支架检查可行性研究[J]. 世界最新医学信息文摘, 2017, 17(58):135-138.
- [26] Horiguchi J, Fujioka C, Kiguchi M, et al. Prospective ECG-triggered axial CT at 140kV tube voltage improves coronary in-stent restenosis visibility at a lower radiation dose compared with conventional retrospective ECG-gated helical CT[J]. Eur Radiol, 2009, 19(10):2363-2372.
- [27] Xu L, Yang L, Zhang Z, et al. Low-dose adaptive sequential scan for dual-source CT coronary angiography in patients with high heart rate: comparison with retrospective ECG gating[J]. Eur J Radiol, 2010, 76(2):183-187.
- [28] 罗开选,查云飞,张亮,等. 新型 256 层螺旋 CT 自由心率 CCTA 评价高心率冠状动脉狭窄患者诊断准确性[J]. 放射学实践, 2018, 33(6):555-560.
- [29] Gassenmaier T, Petri N, Allmendinger T, et al. In vitro comparison of second- and third-generation dual-source CT for coronary stent visualization at different tube potentials[J]. Acad Radiol, 2016, 23(8):961-968.
- [30] Zhou Q, Jiang B, Dong F, et al. Computed tomography coronary stent imaging with iterative reconstruction: a trade-off study between medium kernel and sharp kernel[J]. J Comput Assist Tomogr, 2014, 38(4):604-612.
- [31] Tan S, Soulez G, Diez MP, et al. Coronary stent artifact reduction with an edge-enhancing reconstruction kernel-A prospective cross-sectional study with 256-slice CT[J]. PLoS One, 2016, 11(4):e0154292.
- [32] Ulrich A, Burg MC, Raupach R, et al. Coronary stent imaging with dual-source CT: assessment of lumen visibility using different convolution kernels and postprocessing filters[J]. Acta Radiol, 2015, 56(1):42-50.
- [33] Gassenmaier T, Petri N, Allmendinger T, et al. Next generation coronary CT angiography: in vitro evaluation of 27 coronary stents[J]. Eur Radiol, 2014, 24(11):2953-2961.
- [34] Xia Y, Junjie Y, Ying Z, et al. Accuracy of 128-slice dual-source CT using high-pitch spiral mode for the assessment of coronary stents: first in vivo experience[J]. Eur J Radiol, 2013, 82(4):617-622.
- [35] Yang J, Yang X, De Cecco CN, et al. Iterative reconstruction improves detection of in-stent restenosis by high-pitch dual-source coronary CT angiography[J]. Sci Rep, 2017, 7(1):1-8.
- [36] 赵春荣,徐磊,范占明,等. 低管电压结合迭代重建成像对冠状动脉支架评价的心脏体模研究[J]. 心肺血管病杂志, 2016, 35(4):309-312.
- [37] Cho YJ, Schoepf UJ, Silverman JR, et al. Iterative image reconstruction techniques: cardiothoracic computed tomography applications[J]. J Thorac Imaging, 2014, 29(4):198-208.
- [38] Ebersberger U, Tricarico F, Schoepf UJ, et al. CT evaluation of coronary artery stents with iterative image reconstruction: improvements in image quality and potential for radiation dose reduction[J]. Eur Radiol, 2013, 23(1):125-132.
- [39] Petri N, Gassenmaier T, Allmendinger T, et al. Influence of cardiac motion on stent lumen visualization in third generation dual-source CT employing a pulsatile heart model[J]. Br J Radiol, 2017, 90(1070):616-621.
- [40] Tatsugami F, Higaki T, Sakane H, et al. Coronary artery stent evaluation with model-based iterative reconstruction at coronary CT angiography[J]. Acad Radiol, 2017, 24(8):975-981.
- [41] Tatsugami F, Higaki T, Sakane H, et al. Diagnostic accuracy of in-stent restenosis using model-based iterative reconstruction at coronary CT angiography: initial experience[J]. Br J Radiol, 2018, 91(1082):598-603.
- [42] Wichmann JL, Hu X, Engler A, et al. Dose levels and image quality of second-generation 128-slice dual-source coronary CT angiography in clinical routine[J]. Radiol Med, 2015, 120(12):1112-1121.

(收稿日期:2018-07-03 修回日期:2018-08-21)