

个体化对比剂注射方案在冠状动脉 CT 成像中的应用

王凤仙, 张记清, 刘利霞 综述 张月英 审核

【摘要】 冠状动脉 CT 血管成像已成为临床工作者筛查和诊断冠状动脉疾病的重要手段,而合适且均匀的血管强化程度是准确诊断的前提。当前,根据影响血管强化的相关因素制定的个体化对比剂注射方案受到研究者的广泛关注。本文旨在对近年来国内外关于个体化对比剂注射方案在临床中的应用及进展进行综述。

【关键词】 冠状动脉; 体层摄影术, X 线计算机; 对比剂; 注射方案

【中图分类号】 R543.3; R541.4; R814.4; R981.1; R452 **【文献标识码】** A

【文章编号】 1000-0313(2021)10-1307-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.10.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



冠状动脉 CT 血管成像(coronary CT angiography, CCTA)检查因其安全、无创成为诊断冠状动脉(冠脉)疾病的主要影像学方法,已在临床得到广泛应用^[1,2]。然而,准确的评估诊断有赖于合适且均匀的血管强化程度,这与合理的对比剂注射方案密切相关^[3,4]。以往研究中的注射方案较单一,通常采用固定的对比剂用量及流率,导致不同个体冠脉强化效果有所差异。为患者制定的个体化对比剂注射方案可在保持图像质量的前提下优化使用碘对比剂,具有重要的临床意义。

对比剂注射期相

目前,对比剂注射技术主要有单期相、双期相及三期相 3 种。单期相注射指仅注射对比剂无盐水冲洗,是最早在临床应用的注射方案,由于对比剂总量相对较多而易产生上腔静脉伪影,干扰对右冠状动脉近段的评估,目前主要用于主动脉、肺动静脉及大部分先天性心脏病的检查^[5];双期相注射是在注射对比剂后追加定量生理盐水,而三期相注射是第 I 期注射部分对比剂,第 II 期注射对比剂与生理盐水按一定比例组成的混合液,第 III 期追加定量生理盐水。其中,注射方案中生理盐水的作用主要有减少上腔静脉内存留的高浓度对比剂产生的放射状硬化伪影对图像质量的影响;增加患者的水化程度,有助于降低对比剂肾病的发生率等^[6]。

鲁锦国等^[7]认为三期相注射方案可以清楚地显示

右心系统,使肺动脉获得一定强化而不会遗漏肺栓塞等病变的检测,因此三期相注射方案要优于双期相注射方案且以第 II 期对比剂和生理盐水以 3:7 混合的注射方案为优。基于以上优势,三期相注射方案已成为行 CCTA 检查首选的方案。近年来,也有学者提出四期相注射的概念即在三期相注射之前注射定量生理盐水以减少外渗的发生^[8]。

个体化对比剂注射方案的应用

冠脉血管强化程度由患者相关因素(如体重、体表面积、心输出量、心率等)、对比剂相关因素(如对比剂浓度、注射速度、盐水冲洗等)和扫描相关因素(管电压、扫描时间、扫描方案等)共同决定^[9,10]。指南^[1]指出理想的冠脉强化标准为 300~450 HU,过高或过低都会影响疾病的诊断。根据影响血管强化的相关因素制定个体化对比剂注射方案能获得不同患者之间较一致的血管增强效果且减少对比剂用量,使患者最大程度获益^[11,12]。

1. 患者相关因素(表 1)

体重是影响血管强化最重要的患者相关因素,在临床工作中也因其计算简单而最常用。Isogai 等^[13]认为在 64 排 CCTA 检查中要想获得满意的冠脉增强效果(CT 值 ≥ 325 HU),至少需要 0.7 mL/kg(350 mg I/mL)的对比剂用量(注射持续时间 10 s)。随着 CT 冠脉扫描时间明显缩短,使减少对比剂注射时间进而减少总量成为可能。崔明雨等^[14]研究表明在第三代双源 CT 检查中的对比剂总量按 0.6 mL/kg(350 mg I/mL)计算,根据公式 $V = \text{对比剂总量} / (5 + \text{扫描曝光时间})$ 计算注射流率得到的图像质量与固定注射方案组(50 mL & 5.0 mL/s)差异无统计学意义,而对比剂总量及注射流率均有所降低。但有学者认为根据体重

作者单位: 030000 太原,山西医科大学(王凤仙、张记清、刘利霞); 030000 太原,山西医科大学第二医院影像科(张月英)

作者简介: 王凤仙(1995—),女,山西运城人,硕士在读,主要从事影像护理工作。

通讯作者: 张月英, E-mail: zhangyy2080@163.com

基金项目: 山西省重点研发计划基金资助项目(201903D321192)

表 1 根据患者相关因素制定的对比剂注射方案

作者/分组 (病例)	体重 (kg)	瘦体重 (kg)	BSA (m ²)	心率 (次/min)	浓度 (mg/mL)	用量 D (mL)	流率 V (mL/s)	盐水冲洗
Isogai 等 ^[13] (64 排 MDCT) A(20) B(20) * C(20)	63.9±13.7 64.4±13.3 66.0±8.5			62.1±10.9 63.0±8.2 62.9±10.5	碘海醇 300 碘海醇 350	0.7mL/kg($\bar{x}$ =44.7) 0.6mL/kg($\bar{x}$ =38.6) 0.7mL/kg($\bar{x}$ =46.2)	$\bar{x}$ =4.5 $\bar{x}$ =3.9 $\bar{x}$ =4.6	20mL, 流率同对比剂
崔明雨等 ^[14] (第三代 DSCT) 对照组(60) * 试验组(60)	68.82±8.84 67.69±10.03				碘海醇 350	5.00±0.00 0.6mL/kg (39.55±6.23)	5.00±0.00 3.96±0.62	50mL, 流率同对比剂
刘忠啸等 ^[15] (64 排 DSCT) A 组(99) * B 组(101)	68.1±10.1 69.5±10.7	50.2±7.9 50.6±8.0		72.65±14.0 74.0±13.9	碘海醇 350	1.14mL/kg (77.8±11.4) 男:每公斤瘦体重 1.52mL 女:每公斤瘦体重 1.63mL (72.6±13.8)	D/(扫描时间+8)	40mL, 流率同对比剂
于易通等 ^[16] (第二代 DSCT) 对照组(150) * 实验组(150)	66.75±8.63 68.28±8.49		1.75±0.15 1.76±0.16	70±10 71±11	碘佛醇 350	I 期 60mL+II 期 9mL I 期 10700BSA/350+ II 期 1160BSA/350	5.0 I 期 10700BSA/350+ II 期 1160BSA/350	30mL, 5.0mL/s
杨琴等 ^[17] (第二代 DSCT) 对照组(100) 体重调节组(100) * BSA 调节组(100)	63.13±8.32 62.54±8.12 60.78±7.56		1.65±0.13 1.63±0.14 1.62±0.15	71.2±11.6 73.3±12.3 69.7±10.7	碘佛醇 320	75.00±0.00 0.9mL/kg(61.43±8.23) 36.5mL/m ² (60.00±7.53)	5.0 4.02±0.45 4.11±0.38	

注:瘦体重=体重×(1-体脂率),体脂率由体质测量仪测量;BSA=(身高×体重)1/2;* 为推荐注射方案

调节对比剂用量是基于体重与血容量间的简单线性关系,由于体内脂肪的影响,对于儿童及肥胖患者该方案并不能准确计算用药剂量^[6]。研究表明^[15-17]与根据体重确定对比剂用量的方案相比,基于瘦体重(lean body weight, LBW)及体表面积(body surface area, BSA)计算对比剂用量的方案能获得更好的血管增强效果。但在临床实践中由于二者的计算较复杂,目前关于根据 LBW 及 BSA 调整对比剂注射方案的报道也相对较少。

此外,患者的心率也是影响冠脉图像质量的重要因素。一项心率对对比剂强化影响的研究表明极高心率患者(≥100 次/min)的达阈值时间早、曝光时间短、检查时间短,上腔静脉及右心系统容易出现对比剂聚集而产生伪影,血管强化程度降低;而极低心率患者(≤50 次/min)的达阈值时间晚、曝光时间长、检查时间长,会出现远端充盈不足的现象,因此曹希明等^[18]建议在设定对比剂注射方案时应同时考虑患者的心率。但是,目前的大多数注射方案往往对心率要求较严格,如将心率控制在 70~90 次/min 以下。因此,根据心率如何优化对比剂注射方案值得深入研究,尤其是对于心率>90 次/min 的人群。

2. 对比剂相关因素(表 2)

研究表明碘流率是影响血管强化最重要的因素^[19,20]。碘流率为每秒所注射的对比剂碘量(gI/s)即对比剂浓度(gI/mL)×对比剂注射流率(mL/s),指南^[1]推荐应根据受检者体重选择不同的碘流率,进而确定合理化的对比剂用量。马伟等^[21]证实了依据患者体重设定碘流率的注射方案可在图像质量满足诊断需要的基础上得到一致的血管强化程度。根据体重将患者分为≤60、61~70、71~80、81~90、>90 kg 5 组,

每组分别应用 1.0、1.2、1.4、2.0 和 2.2 g/s 的注射碘流率,研究结果显示不同体重组间各血管平均 CT 值、图像噪声、信噪比、对比噪声比及图像质量主观评分比较差异均无统计学意义。Yin 等^[22]研究表明基于碘流率和 BSA 调整的对比剂注射方案均可在保证图像质量的前提下实现不同个体冠状动脉较一致的血管强化。

以上研究中均采用了单一浓度的对比剂,存在一定的局限性。在不同浓度对比剂对血管增强效果影响的研究中,Xing 等^[23]按体重确定碘含量(280 mg/kg),对比剂总量为(体质量×280 mg/kg)/对比剂浓度,注射流率为对比剂用量/12 s,结果显示该方案下不同浓度组的所有目标血管 CT 值均>300 HU,符合诊断要求,同时减少了对比剂用量及注射流率。体模研究^[24]显示当碘流率及总碘负荷一定时,不同浓度的对比剂可产生一致的血管增强效果,这也为不同浓度对比剂在临床中的应用提供了思路。Rengo 等^[25]对 1024 名患者进行的研究表明以固定碘流率(2.0 gI/s)分别注射碘含量为 300、350、370、400 mg I/mL 的对比剂,各组血管强化水平差异无统计学意义。但是值得注意的是该方案中低浓度对比剂往往需要以高流率注射,这在一定程度上增加了外渗发生的风险;高浓度对比剂注射流率虽然相对较低,但因其黏度大(37℃ 时)可能会对患者肾功能造成不同程度的影响^[26]。

CCTA 检查中大部分医疗机构的工作者常根据患者的年龄、肾功能水平等其他自身情况选择不同浓度的碘对比剂(低渗或等渗)。笔者认为在不同医疗机构中对符合检查要求的患者采用根据其体重确定碘流率的注射方案可保证不同浓度的对比剂在检查中得到合理利用。由于该方案中低浓度对比剂需要以高流率

注射,所以需要根据患者的血管情况确定合理的注射速度以防外渗的发生。

3. 扫描相关因素(表 3)

16 层螺旋 CT 使 CCTA 检查成为一种可靠、无创的诊断冠状动脉疾病的方法,但其临床检查时需严格控制患者的心率(最好<65 次/min),训练患者屏气,通常采用回顾性心电门控技术进行扫描(导致辐射剂量相对较高),同时冠脉扫描时间较长(18~20 s),对比剂总量一般在 100~120 mL 左右。相比于 16 层螺旋 CT,64 排螺旋 CT 的时间分辨率及扫描速度均显著提高(冠脉扫描时间为 6~10 s),对比剂用量有所减少(<100 mL),对于心率≤65 次/min 的患者选择前瞻性心电门控技术可有效降低辐射剂量^[27]。后 64 排 CT 机在硬件和软件方面进行了不同程度的创新,不仅提高了图像质量,辐射剂量也有所降低,扫描速度的提升也使对比剂用量的减少成为可能。目前,西门子双源 CT、GE256 排 Revolution CT、东芝 320 排 CT 等

已投入临床使用,Qu 等^[28]的研究中利用 Revolution CT 的优势(16 cm 宽体探测器、0.28 s 球管旋转时间、迭代算法等)将对比剂注射时间减少至 8 s 可明显减少对比剂用量,而图像质量与常规方法无明显差异。双源 CT 前瞻性心电门控大螺距(high-pitch)扫描模式可在 0.25 s 内完成全心脏容积采集,采用超低对比剂用量方案(20 mL & 3.0 mL/s)也可获得满意的图像质量^[29]。

在国际放射防护委员会提倡的 ALARA 原则指导下,国际心血管 CT 协会^[30]建议对于体重<100 kg、体重指数(body mass index,BMI)<30 kg/m² 的患者,CCTA 检查时应尽可能选择 100 kV 管电压。有学者^[31]认为在 320 排 CCTA 检查中对于肥胖患者(BMI>30 kg/m²)同样可以选择 100 kV 管电压。降低管电压增加了对比剂对 X 线的衰减,含碘对比剂的 CT 值提高使血管与其周围组织的对比度增加,从而允许减少对比剂用量(或使用低浓度对比剂)同时保证图像质

表 2 根据对比剂相关因素制定的对比剂注射方案

作者/分组(病例)	管电压(kV)	浓度(mg/mL)	碘流率(g/s)	对比剂流率(mL/s)	总碘摄入量(g)	对比剂用量(mL)
马伟等 ^[21]						
≤60kg(33)	100	碘帕醇 370	1.0	2.7	14.4	
61~70kg(33)			1.2	3.2	17.3	
71~80kg(31)			1.4	3.8	20.2	
81~90kg(31)	120		2.0	5.4	28.8	
>90kg(31)			2.2	5.9	31.7	
Xing 等 ^[23]						
实验组						
亚组 1(30)	120	碘帕醇 300		5.5±0.6		67±9
亚组 2(30)		碘佛醇 320		5.2±0.7		64±8
亚组 3(30)		碘海醇 350		5.1±0.6		62±7
亚组 4(30)		碘帕醇 370		5.0±0.6		61±7
对照组						
亚组 1(30)	120	碘帕醇 300		5.5		80
亚组 2(30)		碘佛醇 320				
亚组 3(30)		碘海醇 350				
亚组 4(30)		碘帕醇 370				
Rengo 等 ^[25]						
IP300(254)	120	碘普罗胺 300	2.0	6.7	35.9±6.4	119.7±21.2
IH350(251)		碘海醇 350		5.7	36.1±6.1	103.0±17.4
IP370(258)		碘普罗胺 370		5.4	35.7±5.6	96.6±15.2
IM400(261)		碘美普尔 400		5.0	35.8±5.8	90.0±14.5

表 3 根据扫描相关因素制定的注射方案

作者/分组(病例)	BMI(kg/m ²)	心率(次/min)	对比剂浓度(mg/mL)	对比剂用量(mL)	对比剂流率(mL/s)	盐水冲洗	团注追踪	辐射剂量(mSv)	碘负荷(g)
Yin 等 ^[38] (第二代 DSCT) 120kV(116) 100kV(115)	未限制	<90	碘普罗胺或 碘帕醇 370 碘克沙醇 270	60~70	5.0	30mL,5.0mL/s	升主动脉,100HU, 延迟 6s	$\bar{x}$ =3.5 $\bar{x}$ =2.3	24.9±0.9 18.3±0.5
Zhang 等 ^[39] (64 排 MDCT) 80kV(31) 100kV(34) 120kV(36)	<28	<65	300 370	1mL/kg	4.0	46~55mL		1.51±0.70 2.59±1.24 4.92±2.82	
△Feng 等 ^[40] (第三代 DSCT) A(52) B(52)	<26	<70	碘普罗胺 370	28 40	3.5 5.0	40mL,流率 同对比剂	升主动脉,100HU, 延迟 4s	0.36±0.06 0.38±0.07	10.36 14.80
Chen 等 ^[41] (Revolution CT) 70kV(30) 100kV(30)	≤23	未限制	碘帕醇 370	22.46±2.94 38.99±5.10	16mgI/kg/s 25mgI/kg/s		降主动脉,220HU, 延迟 1.6~2.2s	0.43±0.20 1.74±1.01	

注:△管电压均为 70kV

量不受影响^[32-34]。但降低管电压的同时会增加图像噪声,而迭代重建算法为降低管电压以有效降低辐射剂量同时提高图像信噪比、保持图像质量提供了技术支持^[35,36]。ESUR 指南^[37]推荐使用的非离子型低渗或等渗碘对比剂浓度为 270~400 mg/mL,其中含碘量较低的碘克沙醇(270 mg I/mL)比其他对比剂更安全、舒适,逐渐受到国内外学者的青睐。一项前瞻性、多中心研究^[38]表明当 100 kV 管电压结合迭代重建时应用低浓度对比剂(270 mg/mL)即可获得与 120 kV 管电压结合滤波反投影重建及 370 mg I/mL 对比剂同样的图像质量且碘负荷减少了 26.5%,有效辐射剂量降低了 34.9%。在 64 排螺旋 CT 检查中,Zhang 等^[39]认为对于体重<80 kg 的患者可选择 80 kV 管电压,同时结合迭代重建、低浓度碘对比剂(270 mg I/mL, 80 mL)可在保证图像质量及诊断准确性的前提下降低辐射剂量及碘负荷。目前,已投入临床使用的高端 CT 设备具备更低的管电压(70 kV),为进一步降低辐射剂量提供了条件。Feng 等^[40]研究表明在第三代双源 CCTA 检查中 70 kV 管电压结合迭代重建技术的应用可使 BMI<26 kg/m²、心率<70 次/min 患者的对比剂用量降至 28 mL,注射流率降至 3.5 mL/s,而图像质量仍符合诊断要求。Chen 等^[41]利用 16 cm 宽体探测器(Revolution CT)的优势,在检查中未限制患者的心率,对 BMI≤23 kg/m² 的患者使用 70 kV 管电压结合迭代重建算法(80% ASiR-V)并按体重计算对比剂注射流率(16 mgI/kg/s,注射时间 9 s)。结果表明与 100 kV 组相比,该方案在保持图像质量不受影响的前提下可使有效辐射剂量降低 75.3%(1.74 mSv vs 0.43 mSv),对比剂用量降低 42.4%(38.99 mL vs 22.46 mL)。

因此,考虑到辐射剂量的致癌风险,在图像质量满足诊断要求的前提下,各医疗机构应结合扫描设备的特点设置扫描参数(如低管电压、采用前瞻性心电门控、大螺距扫描技术等)以控制 CCTA 检查的辐射剂量,同时降低对比剂用量,实现检查的“双低”。

总结与展望

综上所述,依据影响血管强化的相关因素制定个体化对比剂注射方案可实现不同个体间较一致的血管增强效果且在一定程度上降低了对比剂肾病的发生风险。检查时根据患者体型选择低管电压在降低辐射剂量的同时也降低了对比剂用量。临床工作者需根据扫描设备的特点不断优化扫描方案 and 对比剂注射方案,尤其是对于高心率人群。

参考文献:

[1] 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.

- [2] Liu K, Hsieh C, Zhuang N, et al. Current utilization of cardiac computed tomography in mainland China: A national survey[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2016, 10(1): 76-81.
- [3] Kawaguchi N, Kurata A, Kido T, et al. Optimization of coronary attenuation in coronary computed tomography angiography using diluted contrast material[J]. Circ J, 2014, 78(3): 662-670.
- [4] Muhl C, Kok M, Altintas S, et al. Evaluation of individually body weight adapted contrast media injection in coronary CT-angiography[J]. Eur J Radiol, 2016, 85(4): 830-836.
- [5] 宋会军, 王宏宇, 侯志辉, 等. 房间隔缺损患者行冠状动脉 CTA 检查的个性化对比剂注射方案研究[J]. 放射学实践, 2012, 27(11): 1217-1220.
- [6] Bae KT. Intravenous contrast medium administration and scan timing at CT: considerations and approaches[J]. Radiology, 2010, 256(1): 32-61.
- [7] 鲁锦国, 吕滨, 邱金海, 等. 64 层螺旋 CT 冠状动脉血管成像不同对比剂注射方案应用的研究[J]. 中华放射学杂志, 2008, 42(6): 586-591.
- [8] Karády J, Panajotu A, Kolossváry M, et al. The effect of four-phasic versus three-phasic contrast media injection protocols on extravasation rate in coronary CT angiography: a randomized controlled trial[J]. Eur Radiol, 2017, 27(11): 4538-4543.
- [9] Utsunomiya D, Tanaka R, Yoshioka K, et al. Relationship between diverse patient body size- and image acquisition-related factors, and quantitative and qualitative image quality in coronary computed tomography angiography: a multicenter observational study [J]. Jpn J Radiol, 2016, 34(8): 548-555.
- [10] Zhang M, Hao P, Jiang C, et al. Personalized application of three different concentrations of iodinated contrast media in coronary computed tomography angiography[J]. J Cell Mol Med, 2020, 24(10): 5446-5453.
- [11] Muhl C, Maas M, Turek J, et al. Contrast media administration in coronary computed tomography angiography-A systematic review[J]. Rofo, 2017, 189(4): 312-325.
- [12] Eijssvoegel NG, Hendriks BMF, Nelemans P, et al. Personalization of CM injection protocols in coronary computed tomographic angiography (people CT trial)[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2020, 2020: 5407936.
- [13] Isogai T, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Body weight-tailored contrast material injection protocol for 64-detector row computed tomography coronary angiography[J]. Jpn J Radiol, 2011, 29(1): 33-38.
- [14] 崔明雨, 张永高, 刘杰, 等. 第三代双源 CT 个体化“双低”技术在冠状动脉成像中的应用[J]. 中国介入影像与治疗学, 2019, 16(1): 52-56.
- [15] 刘忠啸, 谢雨响, 徐凯. 冠状动脉 CTA 中基于瘦体重的对比剂注射方案与基于体重方案的比较[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2018, 16(3): 46-49.
- [16] 于易通, 尹卫华, 马伟, 等. 冠状动脉 CTA 个体化对比剂注射方案实现图像质量均一化的可行性研究[J]. 放射学实践, 2019, 34(4): 427-431.
- [17] 杨琴, 何其舟, 余飞, 等. 基于体表面积和体重的个体化对比剂方

- 案在冠脉 CT 血管造影中的应用价值[J]. 解放军医学杂志, 2018, 43(2): 135-139.
- [18] 曹希明, 郑君惠, 钟小梅, 等. 双源 CT 前瞻性心电门控冠状动脉成像中心率对对比剂强化的影响[J]. 广东医学, 2019, 40(14): 2058-2062.
- [19] De Santis D, Caruso D, Schoepf UJ, et al. Contrast media injection protocol optimization for dual-energy coronary CT angiography: results from a circulation phantom[J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(8): 3473-3481.
- [20] Lell MM, Jost G, Korporeal JG, et al. Optimizing contrast media injection protocols in state-of-the art computed tomographic angiography[J]. *Invest Radiol*, 2015, 50(3): 161-167.
- [21] 马伟, 尹卫华, 于易通, 等. 基于碘流率注射方案实现冠状动脉 CT 血管成像质量均一化的可行性研究[J]. 中华放射学杂志, 2019, 53(6): 492-496.
- [22] Yin WH, Yu YT, Zhang Y, et al. Contrast medium injection protocols for coronary CT angiography: should contrast medium volumes be tailored to body weight or body surface area? [J]. *Clin Radiol*, 2020, 75(5): 395. e17-395. e24.
- [23] Xing Y, Azati G, Pan CX, et al. Improving patient to patient CT value uniformity with an individualized contrast medium protocol tailored to body weight and contrast medium concentration in coronary CT angiography[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e132412.
- [24] Muhl C, Wildberger JE, Jurencak T, et al. Intravascular enhancement with identical iodine delivery rate using different iodine contrast media in a circulation phantom[J]. *Invest Radiol*, 2013, 48(11): 813-818.
- [25] Rengo M, Dharampal A, Lubbers M, et al. Impact of iodine concentration and iodine delivery rate on contrast enhancement in coronary CT angiography: a randomized multicenter trial (CT-CON)[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(11): 6109-6118.
- [26] Azzalini L, Spagnoli V, Ly HQ. Contrast-induced nephropathy: from pathophysiology to preventive strategies[J]. *Can J Cardiol*, 2016, 32(2): 247-255.
- [27] Johnson PT, Pannu HK, Fishman EK. IV contrast infusion for coronary artery CT angiography: literature review and results of a nationwide survey[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2009, 192(5): W214-W221.
- [28] Qu TT, Li JY, Jiao XJ, et al. Contrast dose reduction with shortened injection durations in coronary CT angiography on 16cm Wide-detector CT scanner[J]. *Br J Radiol*, 2018, 91(1092): 20180580.
- [29] 梁蓉, 张璋, 李锋坦, 等. 第三代双源 CT 冠状动脉成像三低扫描方案的初步经验[J]. 放射学实践, 2017, 32(4): 378-382.
- [30] Abbara S, Blanke P, Maroules CD, et al. SCCT guidelines for the performance and acquisition of coronary computed tomographic angiography: A report of the society of cardiovascular computed tomography guidelines committee; endorsed by the north American society for cardiovascular imaging (NASCI)[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2016, 10(6): 435-449.
- [31] Pan YN, Li AJ, Chen XM, et al. Coronary computed tomographic angiography at low concentration of contrast agent and low tube voltage in patients with obesity: a feasibility study[J]. *Acad Radiol*, 2016, 23(4): 438-445.
- [32] Kok M, Muhl C, Hendriks BM, 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.
- [33] 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.
- [34] Albrecht MH, Nance JW, Schoepf UJ, et al. Diagnostic accuracy of low and high tube voltage coronary CT angiography using an X-ray tube potential-tailored contrast medium injection protocol[J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(5): 2134-2142.
- [35] Park CH, Lee J, Oh C, et al. The feasibility of sub-millisievert coronary CT angiography with low tube voltage, prospective ECG gating, and aknowledge-based iterative model reconstruction algorithm[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2015, 31(Suppl 2): 197-203.
- [36] Den Harder AM, Willemlink MJ, De Ruiter QM, et al. Dose reduction with iterative reconstruction for coronary CT angiography: a systematic review and meta-analysis[J]. *Br J Radiol*, 2016, 89(1058): 20150068.
- [37] Stacul F, van der Molen AJ, Reimer P, et al. Contrast induced nephropathy: updated ESUR contrast media safety committee guidelines[J]. *Eur Radiol*, 2011, 21(12): 2527-2541.
- [38] Yin WH, Lu B, Gao JB, et al. Effect of reduced X-ray tube voltage, low iodine concentration contrast medium, and sinogram-affirmed iterative reconstruction on image quality and radiation dose at coronary CT angiography: results of the prospective multicenter REALISE trial[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2015, 9(3): 215-224.
- [39] Zhang C, Yu Y, Zhang Z, et al. Imaging quality evaluation of low tube voltage coronary CT angiography using low concentration contrast medium[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e120539.
- [40] Feng R, Tong J, Liu X, et al. High-pitch coronary CT angiography at 70kVp adopting a protocol of low injection speed and low volume of contrast medium[J]. *Korean J Radiol*, 2017, 18(5): 763-772.
- [41] Chen Y, Liu Z, Li M, et al. Reducing both radiation and contrast doses in coronary CT angiography in lean patients on a 16cm wide-detector CT using 70kVp and ASiR-V algorithm, in comparison with the conventional 100kVp protocol[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(6): 3036-3043.

(收稿日期: 2020-05-30 修回日期: 2020-08-03)