

基于复合权重因子对比剂注射法在冠状动脉 CTA 中的优化研究

徐天才, 万维佳, 夏黎明

【摘要】 目的:探讨基于复合权重因子(CWF)对比剂注射法对优化冠状动脉 CTA 图像质量的可行性。**方法:**前瞻性将 2023 年 1 月—6 月于我院拟行冠状动脉 CTA 检查的患者纳入本研究,最终将 96 例符合研究要求的患者随机分为 2 组:实验组 46 例,采用改良对比剂注射方案(根据 CWF 计算对比剂总量和流速);对照组 50 例,采用传统对比剂注射方案(基于净体重计算对比剂总量)。采用独立样本 t 检验和卡方检验比较两组受试者的人口学资料(年龄、性别、身高、体重)、18 个冠脉节段的 CT 值及其合格率(管腔 CT 值 >325 HU 为合格)、对比剂注射总量、辐射剂量和图像质量主观评级的差异。**结果:**两组患者各项人口学指标的差异均无统计学意义($P>0.05$)。与对照组比较,实验组的冠脉节段 CT 值合格率较高(83.78% vs. 65.16%),差异有统计学意义($\chi^2=30.62, P<0.05$)。实验组对比剂总量低于对照组(50.13 vs. 60.00 mL),差异有统计学意义($P<0.05$)。实验组的 DLP 显著低于对照组[(489.30 $\pm$ 49.02) vs. (585.11 $\pm$ 81.65)mGy·cm],差异有统计学意义($P<0.05$)。实验组的图像质量主观评级高于对照组(4 级图像占比 67.39% vs. 60.00%),差异有统计学意义($P<0.05$)。**结论:**在冠状动脉 CTA 检查中,相比传统的对比剂注射方案,基于复合权重因子的改良注射方案能显著减少对比剂的用量,降低辐射剂量,同时可提供较高的图像质量。

【关键词】 冠状动脉;CT 血管成像;复合权重因子;对比剂注射方案;图像质量;辐射剂量

【中图分类号】 R814.42;R543.3 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)08-1060-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.08.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A study on the feasibility of contrast media injection project based on compound body weight factor for optimizing image quality of coronary CT angiography XU Tian-cai, WAN Wei-jia, XIA Li-ming. Department of Ra-di-ology, Jianli People's Hospital, Hubei 433300, China

【Abstract】 Objective: To optimize image quality by the modified contrast injection protocol (CIP) for coronary CT angiography (CCTA) based on compound weight factor (CWF). **Methods:** From January to June in 2023, the patients in our hospital who proposed to undergo CCTA examination were prospectively collected in this study. Finally, 96 patients met the requirements of our study were randomly divided in the two groups: there were 46 cases in experimental group using modified CIP (the volume of contrast media and injection rate were calculated based on CWF), and 50 cases in control group using conventional CIP (the volume of contrast media was calculated based on the lean body weight). Independent sample t -test and Chi-square test were used to compare the differences of demographic data (age, sex, height, weight), CT values of 18 coronary segments and qualification rate, total injection of contrast agent, radiation dose and subjective score of image quality between the two groups. **Results:** There were no statistical differences in demographic indexes between the two groups ($P>0.05$). Total injection volume of experimental group was significantly lower than that of control group (50.13 vs. 60.00mL, $P<0.05$). The qualification rate of coronary segments in experimental group was significantly higher than that in control group (83.78% vs. 65.16%; $\chi^2=30.62, P<0.05$). The subjective scores in experimental group were significantly higher than those in control group (the proportion of coronary segments with optimal quality: 67.39% vs. 60.0%; $\chi^2=13.12, P<0.05$). Radiation dose in experimental group was lower than that in control group [DLP: (489.30 $\pm$ 49.02) vs.

作者单位: 433300 湖北监利, 监利市人民医院放射科(徐天才); 430030 湖北武汉, 华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科(万维佳、夏黎明)

作者简介: 徐天才(1974—), 男, 湖北监利人, 本科, 副主任医师, 主要从事影像诊断工作。

通讯作者: 夏黎明, E-mail: lmxia@tjh. tjmu. edu. cn

(585.11 ± 81.65) mGy · cm]. **Conclusion:** The modified injection protocol based on CWF in CCTA examination can reduce injection volume of contrast media and radiation dose and provide reliable image quality.

【Key Words】 Coronary artery; Computed tomography angiography; Compound weight factor; Contrast media injection project; Image quality; Radiation dose

过去几十年间,冠状动脉疾病(coronary artery disease,CAD)发病率呈不断上升趋势,在包括我国在内的中低收入国家中疾病负担显著增加^[1-2]。随着冠状动脉 CT 血管成像(coronary computed tomography angiography,CCTA)技术的巨大进步,高精度的 CCTA 技术可评估斑块的负荷和形态,分析斑块成分、炎症、壁运动和心肌瘢痕等,可为一二级心血管预防、风险管理、筛查、诊断和治疗决策提供重要信息,这种无创性血管成像技术已逐渐代替传统的侵入性冠状动脉造影(invasive coronary angiography,ICA)技术^[3-5]。然而,CCTA 技术仍存在图像质量不佳影响诊断准确性、碘对比剂的过量使用以及辐射剂量较高等问题^[6]。如何在保证冠脉清晰成像的前提下减少对比剂用量是 CCTA 技术可改良的方向之一,本研究旨在探讨一种基于复合权重因子(compound body weight factor,CWF)算法的对比剂注射方案能否在有效降低对比剂用量的前提下保证甚至是提高 CCTA 图像质量和诊断准确性^[7-8]。

材料与方法

1. 研究对象

前瞻性收集 2023 年 1 月—2023 年 6 月在本院因疑似冠状动脉疾病而拟行 CCTA 检查的患者,剔除了扫描前心电监护显示房颤、肾功能不全和对比剂过敏的患者后,最终纳入 96 例符合研究要求的患者,并随机分配至实验组和对照组。

所有患者签署了知情同意书。

2. 检查方法

使用 Toshiba Aquilion Vision 320 排 CT 机进行 CCTA 扫描。患者在检查前 4 h 禁食,对每例患者进行呼吸训练,简述检查过程和可能的不良反应。检查时患者取仰卧位,扫描方向为头足向,扫描范围自气管分叉下 2 cm 至心尖水平。注射对比剂后使用智能触发技术,在降主动脉内设定 ROI,触发阈值为 260 HU,采用同层面动态扫描监测 ROI 的 CT 值,达阈值后延迟 5.2 s 启动扫描。CCTA 扫描参数:100 kV,智能管电流调整技术,层厚 0.50 mm,层间距 0.25 mm,矩阵 512×512 ,探测器准直宽度 $0.5 \text{ mm} \times 160\text{i}$ (或 320i),转速 275 ms/r,满足扫描范围前提下选用较小视野,视野大小 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \sim 350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,扫描

时间 0.5~3.8 s。图像后处理采用血管重建 FC43 算法和标准 3D 自适应迭代降低剂量重建(adaptive iterative dose reduction,AIDR)算法。

3. 对比剂的使用及分组

对所有患者使用 18G 套管针和高压注射器(Medrad Stellant),经肘正中静脉注射非离子型碘对比剂优维显(370 mg I/mL)和生理盐水。

实验组采用基于 CWF 的注射方案,即参考患者的身高(height,H;单位为 cm)、体重(weight,W;单位为 kg)及年龄(岁)来计算对比剂用量(volume,V;单位为 mL)和注射流率(rate,R;单位为 mL/s),具体计算方法:

$$\text{CWF} = (\text{H} - 100 + \text{W}) / 2 \quad (1)$$

$$\text{V} = \text{CWF} \times k \quad (2)$$

$$\text{R} = \text{V} / \text{T} \quad (3)$$

其中,k 值的取值范围为 0.8~0.9,对于正常体重患者($\text{BMI} = 18.5 \sim 23.9 \text{ kg/mm}^2$)k 值取 0.85,偏瘦患者($\text{BMI} < 18.5 \text{ kg/mm}^2$)的 k 值取 0.9,偏胖患者($\text{BMI} > 23.9 \text{ kg/mm}^2$)的 k 值取 0.8;T 为对比剂静脉团注时间,采用定时法确定对比剂流率,对于血管状况良好、循环正常的患者 T 值设定为 10 s,血管脆性较大时(如化疗患者)注射流率应适当降低,T 值取 11~12 s。对比剂注射完毕后,以 0.9R 的注射流率团注生理盐水 30 mL。基于上述方法,以一个体重 70 kg、身高 175 cm 的非化疗成年男性患者为例,其 CWF 为 72.5,对比剂注射总量为 62 mL,注射流率为 6.2 mL/s。

对照组采用净体重法注射方案:以 5.0~6.5 mL/s 的流率团注对比剂,然后再以相同的流率注射 30 mL 生理盐水。净体重法计算公式:男性去脂体重 = $[0.297 \times \text{体重}(\text{kg}) + 19.5 \times \text{身高}(\text{m}) - 14.013] / 0.72$;女性去脂体重 = $[0.184 \times \text{体重}(\text{kg}) + 34.5 \times \text{身高}(\text{m}) - 37.27] / 0.72$ ^[5]。

4. 数据收集

记录所有被试者的一般资料(身高、体重、年龄、性别、BMI 和病史)以及辐射剂量。依据欧洲 CT 质量标准指南建议^[6],CCTA 的有效剂量(effective dose,ED)的计算方法为:先测量剂量长度乘积(dose length product,DLP),以 DLP 乘以胸部换算系数 k 即为 ED^[7], $k = 0.014 \text{ mSv} \cdot \text{mGy}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

5. 冠脉分段方法

根据美国心血管 CT 协会 SCCT 指南的推荐,将冠状动脉分为 18 段:右冠状动脉(right coronary artery, RCA)近段、RCA 中段、RCA 远段、RCA 后降支、左主干(left main, LM)、左前降支(left anterior descending, LAD)近段、LAD 中段、LAD 远段、第一对角支(diagonal branches, D1)、第二对角支 D2、回旋支(left circumflex, LCX)近段、LCX 中段、第一钝缘支(obtuse marginal, OM1)、第二钝缘支 OM2、回旋支-后降支(LCX-posterior descending artery, LCX-PDA)、右冠状动脉起源的左室后支(RCA-posterior branch of left ventricle, RCA-PLV)、中间支(ramus intermedius, RI)、回旋支-左室后支(LCX-posterior branch of left ventricle, LCX-PLV)^[8]。

6. 图像质量的评价

图像质量的客观评价:在各段冠脉管腔内的中心位置放置 ROI,测量 CT 值及其 SD 值(代表图像噪声),以 CT 值>325 HU 作为各段血管满足诊断需求的判断标准,记录各段血管的图像质量为合格或不合格(图 1、2)^[9],计算冠脉各段血管的信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR):

$$\text{SNR}=10\times\log(\text{CT 值}/\text{SD})$$
$$\text{CNR}=\text{CT 值}/\text{SD}$$

(4)

(5)

图像质量的主观评价:由两位具有 5 年以上工作经验的放射科医师采用双盲法对每例患者的 CCTA 图像质量进行主观评价,采用 4 级评估法,评价标准:1 级,血管走行不连续,血管周围模糊较重,血管对比不好,运动伪影和噪声大,图像质量差,无法满足诊断要求;2 级,血管周围有明显的模糊,血管对比一般,有中度的运动伪影和噪声,图像质量中等,基本达到诊断要求;3 级,血管走行连续,周围有轻微模糊,对比好,有轻度的运动伪影和噪声,图像质量良好,评估病变有较大把握;4 级,血管走行连续,边缘清晰,对比很好,无运动伪影,噪声小,图像质量优,能充分评估病变^[10]。2~4 级均为能满足诊断要求。记录两位医师的评估结果,用于评估观察者间的一致性;然后,对于两者意见不一致的评分结果,经协商后达成一致意见,用于后续分析。

7. 统计学分析

使用 SPSS 22.0 软件对所有数据进行统计学分析。连续型变量(年龄、体重、身高、心率及 DLP)以均数±标准差表示,组间比较采用独立样本 *t* 检验;离散型变量(性别、CT 值是否满足诊断要求和图像质量评分)采用绝对数和百分比来表示,组间比较采用卡方检验。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。采用 Kappa 检验评估两位观察者对图像质量主观评分的一致性(0~0.2 为一致性极低,0.2~0.4 为一致性低,0.4~

0.6 为一致性中等,0.6~0.8 为一致性较高,0.8~1.0 为一致性极高)。

结 果

1. 临床资料

96 例患者被随机分为 2 组,实验组 46 例,对照组 50 例。两组患者之间年龄、性别、身高和体重的差异均无统计学意义(*P*>0.05),详见表 1。

表 1 两组受检者一般资料

指标	实验组	对照组	统计量	<i>P</i> 值
性别比(男/女)	20/26	19/31	1.65	0.101
年龄/岁	48.90±12.70	53.34±11.02	1.32	0.150
体重/kg	61.80±12.01	62.72±10.38	1.83	0.073
身高/cm	164.25±8.10	164.66±7.55	1.51	0.126

2. 辐射剂量和对比剂总量

实验组的对比剂注射量及各项辐射剂量指标均明显低于实验组,差异均具有统计学意义(*P*<0.05)。

表 2 两组的对比剂注射量和辐射剂量的比较

指标	实验组	对照组	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
对比剂总量/mL	50.13±5.8	60.00	2.63	0.002
CTDIvol/mGy	6.85±0.69	8.19±1.14	2.10	0.041
DLP/mGy·cm	489.30±49.02	585.11±81.65	2.69	0.025
ED/mSv	6.85±0.69	8.19±1.14	2.75	0.010

3. 冠脉血管 CT 值及噪声

实验组和对照组 18 个冠脉节段的 CT 值及组间比较结果详见表 2。实验组冠脉各节段的 CT 值均高于对照组,差异均有统计学意义(*P*<0.05)。

实验组共 820 个冠脉节段,CT 值合格的节段为 687 个;对照组共 841 个冠脉节段,合格节段为 548 个;实验组的合格率高 于 对 照 组 (83.78% vs. 65.16%),差异有统计学意义($\chi^2=30.62, P<0.05$)。

两组中 18 个冠脉节段的 SNR 及 CNR 及组间比较结果详见表 4。实验组中各冠脉节段的 SNR 和 CNR 均高于对照组,差异均有统计学意义(*P*<0.05)。

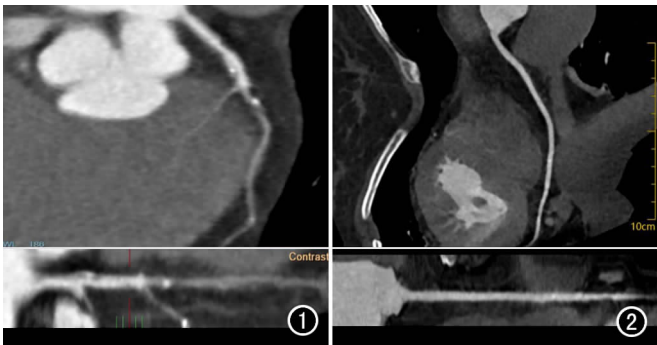


图 1 图像质量评分不合格示例图。LCX 近段,CT 值为 210 HU,未达到 325 HU。图 2 图像质量评分合格血管示例图。RCA 近段,管腔内 CT 值为 415 HU>325 HU。

表 3 两组中 18 个冠脉节段的 CT 值及组间比较结果 /HU

名称	实验组	对照组	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
RCA 近段	401.9±56.0	346.9 ±45.2	-2.120	0.037
RCA 中段	431.8±156.8	375.2 ±143.0	-2.122	0.014
RCA 远段	384.8±134.6	301.0 ±123.4	-2.395	0.021
RCA 后降支	204.4±151.2	188.1±95.5	-2.161	0.017
LM5	479.3±110.6	341.2±104.1	-1.649	0.005
LAD 近段	452.6±111.6	383.2±73.5	-2.624	0.031
LAD 中段	435.2±100.2	350.7±105.3	-2.964	0.005
LAD 远段	394.5±79.2	398.1±102.1	-1.832	0.073
D1	355.3±166.3	295.2±157.4	-2.429	0.030
D2	332.1±143.4	306.2±142.1	-2.674	0.010
LCX 近段	340.5±154.0	271.9±106.1	-2.946	0.005
OM1	303.1±117.1	291.1±117.9	-2.002	0.051
LCX 中段	267.1±97.6	262.2±87.0	-4.068	0.060
OM2	249.7±96.3	229.6±108.6	-4.219	0.033
LCX-PDA	229.7±96.3	229.6±108.6	-4.219	0.071
RCA-PLV	209.7±96.3	199.6±108.6	-4.219	0.002
RI	200.7±96.3	179.6±58.6	-4.219	0.019
LCX-PLV	179.7±60.3	159.6±48.6	-4.219	0.001

4. 图像质量的主观评价

两位医师对所有患者的冠脉图像质量的主观评级结果的一致性较高(Kappa=0.68)。

实验组 46 例中图像质量达到 4 级的有 31 例(67.39%),3 级 11 例,2 级 4 例,没有 1 级的病例;对照组 50 例病例中图像质量达到 4 级的有 30 例(60.00%),3 及 13 例,2 级 7 例,没有 1 级的病例。两组中每例患者的 CCTA 图像均能满足诊断要求,但是实验组的评级结果明显优于对照组,差异有统计学意义($\chi^2=13.12,P=0.011$)。

讨 论

本研究的主要结果为基于身高、体重、BMI 和对对比剂类型的复合权重因子法对比剂注射方案,能在一

次完整的 CCTA 检查中对患者实现个性化的对比剂参数设定,在提供满足诊断要求的高质量图像的同时能有效减少对对比剂用量和患者接受的辐射剂量。

碘对比剂因其对 X 线的吸收衰减能力强,能使血管与周围组织形成的良好对比而清晰显影,成为心血管成像的基本使用药物^[11]。因此,随着 CCTA 检查的广泛临床应用,对比剂的使用日益增多。然而众所周知,碘对比剂可导致机体不同程度的不良反应,根据不良反应发生的机制可分为两类:一类是过敏性反应,为非剂量依赖型;另一类是类生理反应,为剂量依赖型,与对比剂的注射量、流率、注射方式及类型相关,最累及肾脏、心血管系统和神经系统^[12]。

CCTA 检查时,对比剂注射时间应与扫描时间一致,因此注射时间须控制在一定范围内,对比剂用量如果过多,则必然要求注射流率较大,不仅会使得图像上腔静脉伪影的干扰大,而且对于血管弹性差或脆性大的患者,血管破裂和对比剂外渗的风险明显增大,会增加不良反应和检查失败的发生概率,因此尽量减少对比剂的用量是临床应用时的重要一环。本研究中采用的复合权重因子(CWF)法,是参考了患者的身高及体重,个性化调整对比剂注射总量和注射流率,保证碘流率,从而使血管强化值能满足诊断要求,相比净体重法,CWF 法明显降低了患者的对比剂注射量,同时能稳定的提供高质量的血管图像(冠脉各节段 CT 值合格率达 83.78%,4 级图像质量占比达 67.39%)。

既往文献报道的 CTA 检查中降低对比剂用量的方法一般是基于体重的计算法(注射量=体重×1.4 mL/kg,上限 120 mL),或者对体重小于 80 kg 的患者采用降低管电压的方法(由常规的 120 kV 降低至

表 4 两组间冠脉各节段 SNR 和 CNR 的比较

冠脉节段	SNR		<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	CNR		<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
	实验组	对照组			实验组	对照组		
RCA 近段	55.58±5.35	41.64±4.35	-2.103	0.012	60.83±22.90	51.98±16.10	-1.230	0.032
RCA 中段	49.56±22.14	40.86±13.03	-0.814	0.039	55.28±20.31	50.27±14.52	-1.386	0.002
RCA 远段	37.33±20.51	24.69±12.87	-1.271	0.060	57.78±22.67	40.85±11.63	-1.375	0.018
RCA 后降支	56.25±9.63	53.21±7.91	-1.321	0.052	45.96±2.68	38.82±5.56	2.706	0.042
LM	65.95±7.20	54.16±8.01	-0.148	0.013	61.89±7.55	47.51±4.85	-1.322	0.020
LAD 近段	57.19±5.82	39.25±4.17	-0.219	0.016	60.19±7.14	46.48±6.90	-1.090	0.011
LAD 中段	43.46±8.16	30.79±6.02	-1.847	0.071	41.16±5.11	33.50±6.93	-0.384	0.025
LAD 远段	13.29±11.85	15.38±7.86	-0.002	0.081	13.45±3.26	14.32±5.34	0.603	0.465
D1	43.11±5.63	30.90±5.52	-2.185	0.021	29.36±4.53	20.80±6.10	1.272	0.037
D2	44.10±5.52	32.25±6.51	0.032	0.030	32.48±3.94	26.42±5.66	2.792	0.001
LCX 近段	14.18±4.20	9.59±6.81	0.131	0.027	12.40±3.26	15.62±5.22	3.581	0.023
OM1	22.14±12.01	17.610±9.89	0.040	0.034	17.87±2.78	9.92±3.51	1.504	0.013
LCX 中段	17.29±10.22	16.54±11.70	-0.256	0.100	9.70 ±2.71	11.32 ±2.81	1.056	0.200
OM2	18.27±2.57	18.10±2.15	-0.162	0.094	13.78±1.09	17.38±1.01	4.507	0.231
LCX-PDA	12.81±0.45	12.72±0.28	1.033	0.103	7.97±2.73	9.78±4.50	5.332	0.078
RCA-PLV	13.7±0.63	12.14±0.85	-2.003	0.051	14.17±0.78	12.56±1.22	-3.173	0.045
RI	11.7±0.30	10.60±0.86	-5.118	0.018	8.45±0.58	12.70±6.36	2.560	0.060
LCX-PLV	8.70±0.63	11.60±0.46	-3.217	0.103	7.97±2.37	9.55±2.34	3.781	0.119

80 kV)^[13],上述 2 种方法较净体重法分别减少 12%和 25%的对比剂用量。在本研究中,采用 CWF 法时使用的平均对比剂注射量较净体重法减少了 17%,处于上述两种方法之间,原因可能如下:本研究出于对患者不同体型的考虑,为保证图像的信噪比,将管电压统一设置为 100 kV;在较低光子能量的情况下,碘的质量衰减系数增加,而软组织较少依赖于能量,因此低 kV 成像时的平均光子能量较低,碘与软组织之间的吸收差异增加,图像的对比度也随之增加^[14],因此对于体型较瘦的患者,如果降低 kV 值至 70 kV 同时增加管电流则可以实现对比剂用量的进一步减少。

CCTA 检查过程中的辐射剂量也是需要考虑的因素。在实际应用时践行剂量最低原则,最核心的要求是要实现对受检者接受剂量的个性化扫描参数设置^[15],本研究中采用前瞻性心电门控触发扫描模式、低千伏、智能毫安和迭代重建算法,结果显示实验组的辐射剂量显著低于对照组($P<0.05$),说明 CWF 法在减少对比剂用量的同时可降低辐射剂量,原因可能在于对比剂用量和注射流率的降低在一定程度上可提高受检者的舒适度,有利于平稳其心率和呼吸,从而可减少因屏气不佳、心率不稳使得采集时相增宽或需重复采集等情况导致的受检者接受剂量的增加。

在解释本研究结果时应注意以下局限性:首先,本研究为单中心研究,招募的受检者样本量较少,可能导致统计效能和结果外推受限;其次,没有将 CCTA 结果与金标准 ICA 的结果进行对比来评估 CCTA 结果的准确性,虽然评估准确性并不是本研究的主要目的。

综上所述,改良的基于复合权重因子的对比剂注射方案在 CCTA 检查中可减少对比剂用量,能稳定提供满足诊断要求的较高质量的图像,提高检查的安全性和舒适性,具有良好的临床可行性。

参考文献:

[1] 陈伟伟,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告 2016》概要[J]. 中国循环杂志,2017,32(6):521-530.

[2] 胡建平,饶克勤,钱军程,等.中国慢性非传染性疾病经济负担研究[J]. 中国慢性病预防与控制,2007,89(3):189-193.

[3] Domenico M. Radiology: cardiothoracic imaging highlights 2022 [J]. Radiology, 2023, 5(3):675-682.

[4] S. P. W, Hironori H, Scot G, et al. Coronary computed tomographic angiography for complete assessment of coronary artery disease: JACC state-of-the-art review[J]. JACC, 2021, 78(7):355-361.

[5] Lee JM, Choi KH, Koo BK, et al. Prognostic implications of plaque characteristics and stenosis severity in patients with coronary artery disease[J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73(19):2413-2424.

[6] Scholtz JE, Ghoshhajra B. Advances in cardiac CT contrast injection and acquisition protocols[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2017, 7

(5):439-451.

[7] 陈兴艳,万维佳,夏黎明,等.基于复合权重因子对比剂注射方法的下肢 CTA 成像优化研究[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(5): 1002-1007.

[8] 高思抗,管汉雄,夏黎明,等.基于同指数法结合等渗对比剂行 CCTA 的优势研究[J]. 放射学实践, 2020, 35(5):614-618.

[9] Geleijns J, Golding S, Menzel HG, et al. A workshop on quality criteria for computed tomography held in Arhus, Denmark, November 1998[J]. Eur Radiol, 2000, 10(3):44-45.

[10] Halliburton SS, Abbara S, Chen MY, et al. SCCT guidelines on radiation dose and dose-optimization strategies in cardiovascular CT[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2011, 5(4):198-224.

[11] 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.

[12] 王怡宁,吕滨,曹剑,等.冠状动脉 CT 血管成像扫描与报告书写专家共识[J]. 协和医学杂志, 2019, 10(1):23-30.

[13] Austen WG, Edwards JE, Frye RL, et al. A reporting system on patients evaluated for coronary artery disease. Report of the Ad Hoc Committee for Grading of Coronary Artery Disease, Council on Cardiovascular Surgery, American Heart Association[J]. Circulation, 1975, 51(4 Suppl):S5-S40.

[14] 陈韵岱,陈纪言,傅国胜,等.碘对比剂血管造影应用相关不良反应中国专家共识[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2014, 22(6):341-348.

[15] Solomon RJ, Natarajan MK, Doucet S, et al. Cardiac Angiography in Renally Impaired Patients (CARE) study: a randomized double-blind trial of contrast-induced nephropathy in patients with chronic kidney disease [J]. Circulation, 2007, 115(25):3189-3196.

[16] Davenport MS, Chu P, Szczykutowicz TP, et al. Comparison of strategies to conserve iodinated intravascular contrast media for computed tomography during a shortage[J]. JAMA, 2022, 328(5):476-478.

[17] Canstein CKJ. Reduction of contrast agent dose: scanning at low kV[EB/OL]. Siemens Healthineers, 2022. https://cdn0.scrvt.com/39b415fb07de4d9656c7b516d8e2d907/87ec6e04a7686fe0/375ae3698b98/<ct_whitepaper_contrast-agent-dose-at-low-kv-02015844.pdf>.

[18] Entrikin DW, Leipsic JA, Carr JJ. Optimization of radiation dose reduction in cardiac computed tomographic angiography[J]. Cardiol Rev, 2011, 19(4):163-176.

[19] 石明国. CT 技术发展进入低剂量成像时代[J]. 中国医疗设备, 2012, 27(1):39-42, 21.

[20] Torres FS, Crean AM, Nguyen ET, et al. Strategies for radiation-dose reduction and image-quality optimization in multidetector computed tomographic coronary angiography[J]. Can Assoc Radiol J, 2010, 61(5):271-279.