

· 论著 ·

改良的校正性腔内密度衰减与冠状动脉狭窄程度及不同性质斑块在 CT 血管成像中的初步研究

粟丽¹ 余建群² 张丽芝²

(1. 成都市第一人民医院放射科, 四川 成都 610041; 2. 四川大学华西医院放射科, 四川 成都 610041)

【摘要】目的 探讨改良的校正性腔内对比剂密度(CCO)的差值与冠状动脉狭窄程度及不同性质斑块的相关性研究。**方法** 105 例患者行回顾性冠状动脉 CT 血管成像检查,并在 15 d 内进行侵入性冠状动脉血管造影检查或经皮冠脉介入术;经图像后处理及统计,记录冠状动脉各节段狭窄程度、斑块类别以及狭窄病变长度(L,cm)。测量冠状动脉各节段病变近侧、远侧端管腔内对比剂密度(即 CT 值)的变化,计算 CCO_差和改良 CCO_差($\text{CCO}_{\text{差}} = \text{冠状动脉狭窄近侧端腔内 CT 值} / \text{同层面降主动脉腔内 CT 值} - \text{冠状动脉狭窄远侧端腔内 CT 值} / \text{同层面降主动脉腔内 CT 值}$;改良 $\text{CCO}_{\text{差}} = \text{CCO}_{\text{差}} / L$)。以 ICA 评估结果为“金标准”,先对各狭窄组中 CCO_差和病变长度进行相关性分析;再对各狭窄组的改良 CCO_差进行两两比较;在每个狭窄组中,对不同斑块性质的改良 CCO_差进行组间比较。**结果** (1)各狭窄组中 CCO_差与相应狭窄病变长度具有良好的相关性($r=0.69 \sim 0.79, P<0.001$)。(2)改良 CCO_差随冠状动脉狭窄程度的增加而增加;狭窄 1 级和 2 级组其改良 CCO_差分别与余组进行比较,发现两两之间均有差异,且差异有统计学意义($P<0.001$);4 级组的改良 CCO_差明显大于 3 级组($P<0.001$)。(3)每个狭窄程度组中不同斑块性质对应的改良 CCO_差值均无明显差异($P>0.05$)。**结论** (1)CCO_差与病变长度有较好的相关性,为改良 CCO_差的提出提供依据;(2)随着狭窄程度的增加,改良 CCO_差均增大;但改良 CCO_差的测量均不受斑块性质影响,它可能成为一种新的无创的评价冠心病的指标。

【关键词】 冠心病;冠状动脉计算机断层血管成像;校正的冠状动脉腔内对比剂密度衰减;冠状动脉病变长度;斑块性质

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2020.08.020

Primary Study on Improved Corrected Transluminal Attenuation Gradient, Degree of Coronary Artery Stenosis and Plaque with Different Properties in CT Angiography

SU Li¹, YU Jianqun², ZHANG Lizhi²

(1. Department of Radiology, Chengdu First People's Hospital, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

【Abstract】Objective To investigate the correlation between the difference of improved corrected coronary opacification and the degree of coronary artery stenosis and plaque with different properties. **Methods** 105 patients underwent retrospective coronary CT angiography, and underwent invasive coronary angiography or percutaneous coronary intervention within 15 days. The degree of coronary artery stenosis, the type of plaque and the length of stenosis were recorded by image post-processing and statistics. The changes of contrast agent density(CT value) in the proximal and distal end of coronary artery lesions were measured, and the CCO difference and improved CCO difference were calculated ($\text{CCO difference} = \text{CT value of proximal coronary artery stenosis} / \text{CT value of descending aorta at the same level} - \text{CT value of distal end lumen of coronary artery stenosis} / \text{CT value of descending aorta at the same level}$; improved $\text{CCO difference} = \text{CCO difference} / L$). According to the results of ICA evaluation as the “gold standard”, the correlation between CCO difference and lesion length in each stenosis group was analyzed, then the improved CCO difference in each stenosis group was compared, and the improved CCO difference was compared in different plaque properties in each stenosis group. **Results** (1) There was a good correlation between the difference of CCO and the length of corresponding stenosis in each stenosis group ($r=0.69 \sim 0.79, P<0.001$). (2) The improved CCO difference increased with the increase of the severity of coronary artery stenosis; the improved CCO difference of the narrow 1-stage group and the 2-

stage group was compared with other groups, and the difference was statistically significant ($P < 0.001$). The improved CCO difference in 4-stage group was significantly larger than that in 3-stage group ($P < 0.001$). (3) There was no significant difference in the improved CCO difference corresponding to different plaque properties in each stenosis group ($P > 0.05$). **Conclusion** (1) There was a good correlation between CCO difference and lesion length, which provided a basis for the improved CCO difference. (2) With the increase of stenosis degree, the improved CCO difference increased, but the improved CCO difference was not affected by the nature of plaques, which may become a new noninvasive index for evaluating coronary heart disease.

【Key words】 Coronary heart disease; Coronary CT angiography; Corrected transluminal attenuation gradient; Coronary lesion length; Plaque property

冠心病是指由于冠状动脉病理性改变,腔内管壁上粥样硬化斑的形成,导致冠状动脉血管逐渐狭窄或闭塞,引起腔内有效血流量的持续减低或可逆性减低,最后出现心外膜下以及心内膜层的心肌发生缺血、缺氧,以致坏死的疾病。侵入性冠状动脉造影(invasive coronary angiography, ICA)被认为是诊断冠心病的金标准,但其具有一定的有创性。冠状动脉计算机断层血管成像是一种非侵入性的、在临床中广泛用于检测和排除冠心病的影像学检查方法,具有较高的灵敏度和准确度^[1]。在临床运用中,由于冠状动脉壁上较多钙化导致严重的部分容积效应,干扰对冠状动脉狭窄程度的观察,因此有研究通过对冠状动脉 CT 血管成像(CT angiography, CTA)图像数据进行分析,找寻一种可以简单、方便地评估冠状动脉腔内血流动力学变化的方法,如冠状动脉腔内对比剂密度衰减梯度(transluminal attenuation gradient, TAG)^[2],或者冠状动脉狭窄处校正的腔内对比剂密度(corrected coronary opacification, CCO)的差值^[3]。通过观察 TAG 和 CCO 值的变化情况间接判断冠状动脉狭窄情况,但对于过于简化的 CCO 的测量,其运用于冠状动脉狭窄程度的评估亦存在争议^[4]。冠状动脉腔内对比剂密度随着其向冠状动脉远端的扩散,管腔直径减小,对比剂密度亦会有所下降^[5]。不同的冠状动脉狭窄中,其狭窄长度往往是不同的。本研究提出在 CCO_差原始测量方法基础上做进一步的改良,拟探讨改良 CCO_差测量法与冠状动脉狭窄和不同斑块性质的初步探讨。

1 材料与方法

1.1 一般资料

回顾性收集、分析于 2017 年 6 月—2018 年 8 月在四川大学华西医院进行冠状动脉 CTA 检查,并在 15 d 内进行 ICA 检查或经皮冠脉介入术治疗的疑似或已确诊的冠心病患者。纳入标准:(1)临床疑似冠心病;(2)成功行冠状动脉 CTA 扫描和 ICA 检查;(3)ICA 检查或经皮冠脉介入术治疗中,观察到冠状动脉各级分支、分段显影良好;(4)冠状动脉 CTA 图像清晰,能够达到测量要求。排除标准:(1)有冠状动脉

CTA 检查禁忌证或明显不适宜的患者,如:严重碘过敏史、心肾功能不全等;(2)冠状动脉主要分支、分段血管管腔纤细(< 2 mm);(3)冠状动脉存在心肌桥;(4)冠状动脉主要分支血管出现闭塞并伴明显可见的侧支循环血管形成;(5)有心脏疾病相关手术史。最终纳入 105 例患者和 423 段血管进行有效数据统计和分析。

1.2 冠状动脉 CTA、图像后处理及改良 CCO_差测量

使用美国通用公司 Revolution 256 CT 扫描仪及其配套的后处理工作(Advantage workstation 4.6)对患者进行扫描和图像后处理。扫描前对患者进行呼吸训练,患者仰卧于机床,双臂上举于头部,脚先进;所有检查者均采用前瞻性心电门控技术扫描(自动管电压:100~120 kV;自动管电流:300~700 mA),范围上至气管分叉下方 1 cm 左右,下至心脏隔面。采用对比剂团注追踪法经肘静脉注射非离子型对比剂 0.9 mL/kg(碘普罗胺, 370 mg/mL)及 30 mL 生理盐水,注射速率 5 mL/s;触发感兴趣区放置于主动脉根部,触发阈值为 200 HU,达到阈值后延迟 5.9 s 启动心脏扫描;扫描结束后,设备会根据患者的心率自动选择最佳收缩时相和最佳舒张期时相的图像,根据心脏最佳时相开启心脏冻结技术传至后处理工作站。冠状动脉重建视野大小约 20 cm;有效重建层厚为 0.65 mm,重建间隔 0.65 mm,迭代重建权重为 50%。

在后处理工作站上,将感兴趣区(region of interest, ROI)放置到每个狭窄血管段近侧及远侧 5 mm 以内的最大横截面和同一层面的降主动脉腔内的中心区域,并测量腔内 CT 值;连续测量 3 次,以平均值作为该血管段腔内的 CT 值(见图 1A、Aa、Ab)以及对应狭窄病变长度(L)(见图 1B)。ROI 选取面积应尽可能包括最大的管腔面积,但不能将血管腔外组织选入(如血管壁),避免容积效应的影响。每一层面的 CCO=冠状动脉腔内 CT 值/相同层面的降主动脉腔内 CT 值;CCO_差=冠状动脉狭窄近侧端腔内 CT 值/同层面降主动脉腔内 CT 值-冠状动脉狭窄远侧端腔内 CT 值/同层面降主动脉腔内 CT 值;改良 CCO_差=CCO_差/L。

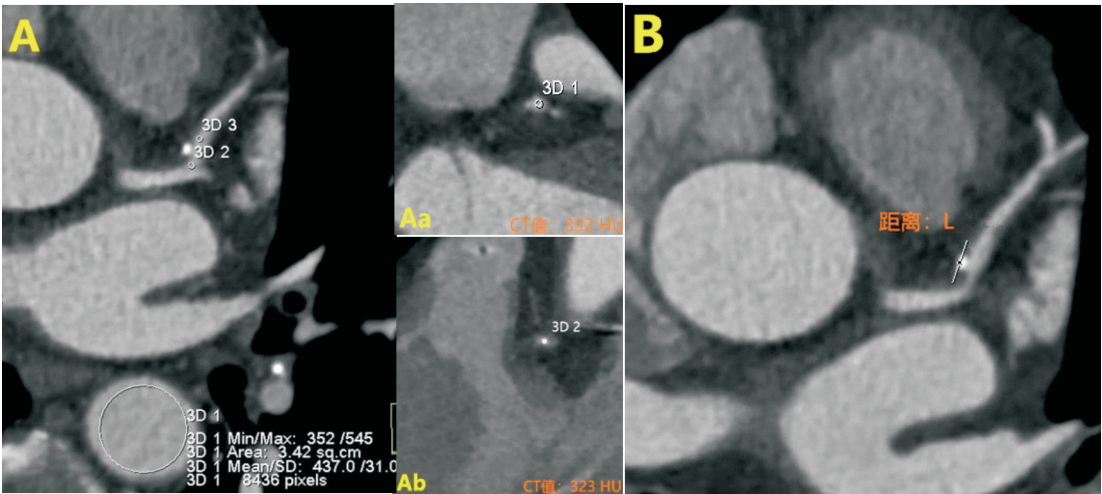


图 1 测量点 ROI 位置和长度测量示意图

注:图 1 A、Aa、Ab:在冠状动脉横断面上确定狭窄部分,并于其近侧及远侧 5 mm 以内的管腔中心,放置 ROI 并测量 CT 值,并同时测量横断面 CT 图像上对应层面的降主动脉腔内的 CT 值。图 1B:冠状动脉狭窄处病变长度 L(cm)。

由 2 名有经验的影像科医生根据冠状动脉血管 18 节段的标准分割法^[6]、冠状动脉狭窄分级^[7](5 组:1 级、2 级、3 级、4 级和 5 级,对应狭窄程度:<25%、25%~49%、50%~69%、70%~99% 和 100%)和斑块性质^[8](钙化斑块、非钙化斑块和混合斑块)对所有纳入的冠状动脉 CTA 图像和 ICA 图像分析和记录,且记录冠状动脉狭窄处斑块的长度。两名医师所测量的 CCO 平均值及斑块长度的平均值分别进行一致性检验(Bland-altman),发现二者之间均不存在显著性差异($P_{\text{CCO}}=0.03$, $P_L=0.31$),最后则取两者测量数据的平均值作为最终测量值进行统计分析。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 21.0 对所有数据进行统计分析,相关

性采用 Pearson 相关性分析,组间对比采用 Kruskal-Wallis 检验方法, $P<0.05$ 具有统计学意义。

2 结果

2.1 改良 CCO_差与冠状动脉狭窄程度

在 CTA 图像上测量每个狭窄组中冠状动脉节段腔内 CCO_差,并对 CCO_差与相应冠状动脉狭窄处病变长度进行相关性分析。发现在 1 级组、2 级组、3 级组、4 级组和 5 级组中,CCO_差与相应病变长度的相关系数分别为 0.718、0.795、0.724、0.690 和 0.701,在 2 级组中,冠状动脉节段腔内 CCO_差与对应病变长度之间的相关性最强;以上所有冠状动脉节段腔内 CCO_差与相应病变长度的相关性之间均存在显著差异($P<0.001$),见表 1。

表 1 冠状动脉各狭窄程度中 CCO_差与病变长度相关性分析

ICA 评估结果	<25%	25%~49%	50%~69%	70%~99%	100%
CCO _差 与病变长度的相关系数	0.718	0.795	0.724	0.690	0.701

在各狭窄程度组内,对 CCO_差和改良 CCO_差进行分析发现:在狭窄程度<25%组、狭窄程度为 25%~49%组,狭窄程度为 50%~69%组以及狭窄程度为 70%~99%组中,CCO_差均小于改良 CCO_差,且两者之间存在显著差异($P<0.001$)。在狭窄程度为 100%时,CCO_差与改良 CCO_差之间不存在明显差异($P=0.086$),见表 2。

在冠状动脉狭窄各组间,观察到随冠状动脉狭窄程度的增加,改良 CCO_差有增加趋势。1 级组的改良 CCO_差最小,且其与其他各狭窄程度组改良 CCO_差对比,差异均有统计学意义($P<0.001$)。5 级组的改良

CCO_差与 3 级组和 4 级组的改良 CCO_差对比,均无显著差异($P=1.000$),见表 3。

2.2 冠状动脉狭窄处斑块与改良 CCO_差的关系

在冠状动脉 CTA 图像中评估所有冠状动脉血管节段,其中有 13 节段血管因伪影干扰或弥漫钙化导致无法准确测量,进而排除。发现有 47 个(11.5%)冠状动脉节段发生 1 级组狭窄,116 个(28.3%)冠状动脉节段发生 2 级组狭窄,112 个(27.3%)冠状动脉节段发生 3 级组狭窄,127 个(30.9%)冠状动脉节段发生 4 级组狭窄,8 个(2.0%)冠状动脉节段发生 5 级组狭窄。有 150 个(36.6%)冠状动脉节段管腔内斑块为非钙化斑块,

134 个 (32.7%) 冠状动脉节段内为钙化斑块, 126 个 (30.7%) 冠状动脉节段为混合斑块, 见表 4。

表 2 各狭窄程度组中 CCO_差 与改良 CCO_差 的比较情况

ICA 评估结果	CCO _差	改良 CCO _差	P 值
<25%	0.032 7±0.016 7	0.058 5±0.015 8	<0.001
25% ~ 49%	0.099 3±0.040 1	0.143 3±0.238 9	<0.001
50% ~ 69%	0.165 1±0.065 3	0.255 7±0.047 5	<0.001
70% ~ 99%	0.249 9±0.095 1	0.416 3±0.088 3	<0.001
100%	0.304 7±0.120 0	0.395 9±0.131 3	0.086

注: $P < 0.05$ 有统计学意义。

表 3 CTA 评估冠状动脉狭窄程度及斑块性质

ICA 结果及测量指标	$\bar{x} \pm s$	P 值			
		vs 2 级	vs 3 级	vs 4 级	vs 5 级
1 级组改良 CCO _差	0.058 5±0.015 8	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
2 级组改良 CCO _差	0.143 3±0.238 9		<0.001	<0.001	<0.001
3 级组改良 CCO _差	0.255 7±0.047 5			<0.001	0.253
4 级组改良 CCO _差	0.416 3±0.088 3				1.000
5 级组改良 CCO _差	0.395 9±0.131 3				

注: $P < 0.05$ 有统计学意义。

表 4 CTA 评估冠状动脉狭窄程度及斑块性质 [n(%)]

	总计	1 级组	2 级组	3 级组	4 级组	5 级组
节段例数	410(100%)	47(11.5%)	116(28.3%)	112(27.3%)	127(30.9%)	8(2.0%)
斑块性质						
钙化斑块	134(32.7%)	11(23.4%)	36(31.0%)	38(33.9%)	48(37.8%)	1(12.5%)
非钙化斑块	150(36.6%)	28(59.6%)	51(44.0%)	30(26.8%)	35(27.6%)	6(75.0%)
混合斑块	126(30.7%)	8(17.0%)	29(24.8%)	44(39.3%)	44(34.6%)	1(12.5%)

根据 ICA 检查的评估结果, 每个狭窄程度组里, 钙化斑块、非钙化斑块和混合斑块节段的管腔内改良 CCO_差 对比, 差异均无统计学意义 (P 均 > 0.05), 见表 5。

表 5 各狭窄程度组不同斑块性质间改良 CCO_差 值的比较

ICA 结果及测量指标	钙化斑块	非钙化斑块	混合斑块	P 值
1 级组改良 CCO _差	0.060 6±0.015 5	0.055 6±0.016 5	0.060 7±0.014 5	0.267
2 级组改良 CCO _差	0.141 6±0.026 1	0.146 3±0.019 5	0.142 3±0.025 7	0.855
3 级组改良 CCO _差	0.248 0±0.046 7	0.259 6±0.044 0	0.262 3±0.052 8	0.104
4 级组改良 CCO _差	0.390 9±0.090 8	0.425 8±0.092 4	0.418 3±0.084 9	0.267
5 级组改良 CCO _差	0.405 2±0.358 3	0.416 8±0.083 9	0.358 5±0.115 0	0.746

注: $P < 0.05$ 有统计学意义。

3 讨论

在近几年的研究中, 有研究者通过 CTA 图像上原有数据, 衍生出多种根据冠状动脉内血流动力学基础对冠状动脉狭窄进一步分析的评价方法^[4,9-11], 如 TAG、CCO_差、TAG-CCO_差 以及计算机断层成像衍生的血流储备分数。本研究中主要探讨改良 CCO_差 与冠状动脉狭窄程度及不同性质斑块的相关性。

CCO_差 的概念是在 2011 年由 Chow 等^[3] 提出的, 认为 CCO 的差异可以预测冠状动脉异常血流的动脉。

以往文献^[12-13] 和本研究结果提示冠状动脉狭窄处 CCO_差 存在差异, 且其值可以预测血流动力学改变和辅助诊断狭窄程度分级。虽然有研究提出 CCO_差 可以预测存在异常的血流^[14], 但因其测量方法的简便以及其他情况的影响, 其运用存在部分争议^[4]。Park 等^[5] 提出管腔内对比剂密度的值随着冠状动脉距离的增加, 会在一定程度上降低。本研究排除了距离对冠状动脉腔内对比剂密度的影响, 对原始 CCO_差 进行改良, 即改良 CCO_差 = CCO_差 / L。

本研究中对冠状动脉 CCO_差 与病变长度进行相关性分析,在各狭窄组中,CCO_差 与对应病变距离有较强的相关性,这符合之前的研究结果^[5]。本研究发现在各狭窄组中,改良 CCO_差 均>CCO_差,且差异有统计学意义,这点再次提示,病变距离对腔内对比剂密度的衰减测量有影响。改良 CCO_差 和 CCO_差 一致,随着冠状动脉狭窄程度的增加,改良 CCO_差 呈逐渐增加的趋势;除 5 级组的改良 CCO_差 与 3、4 级组的改良 CCO_差 无明显差异,其余各组间的改良 CCO_差 均存在差异。本研究中发现 5 级组,即完全闭塞时,其改良 CCO_差 值小于 4 级组,猜测导致该结果的原因可能是由于冠状动脉血管慢性闭塞时,部分隐匿性侧支循环血管建立,引起闭塞远侧的血流逆向增加,相应病变远端管腔内对比剂密度反而较近侧增加^[14-16],从而可能引起改良 CCO_差 的减低,以及导致 5 级组和 3、4 级组之间无明显差异,也可能是本研究中 5 级组的样本量过少。

在冠状动脉 CTA 图像中,冠状动脉管腔内 CT 值的测量容易受到邻近不同斑块产生的部分容积效应的影响,尤其是钙化斑块,从而影响冠状动脉病变处腔内 TAG^[17],但部分研究提出,钙化斑块并不能影响腔内对比剂密度衰减情况的测量^[18]。在本研究中,对各级狭窄组中不同斑块性质下的改良 CCO_差 进行两两比较,发现结果均无明显差异,这与 Peng 等^[19] 的研究结果相符合。对于不同性质斑块,其邻近的腔内对比剂密度的测量是否受到影响,这仍然需要更多研究进一步证实。

4 结论

本研究中,主要发现:(1) CCO_差 与病变长度有较好的相关性,为改良 CCO_差 的提出提供依据;(2) 随着狭窄程度的增加,改良 CCO_差 均增大;而改良 CCO_差 的测量均不受斑块性质影响,它可能成为一种新的无创的评价冠心病的指标,但其在临床的应用以及对功能性冠状动脉狭窄的评估还需要更多大样本的进一步研究、验证。

参考文献

- [1] Bowman AW, Kantor B, Gerber TC. Coronary computed tomographic angiography: current role in the diagnosis and management of coronary artery disease[J]. *Pol Arch Med Wewn*, 2009, 119(6): 381-390.
- [2] Steigner ML, Mitsouras D, Whitmore AG, et al. Iodinated contrast opacification gradients in normal coronary arteries imaged with prospectively ECG-gated single heart beat 320-detector row computed tomography[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2010, 3(2): 179-186.
- [3] Chow BJW, Kass M, Gagn O, et al. Can differences in corrected coronary

- opacification measured with computed tomography predict resting coronary artery flow? [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2011, 57(11): 1280-1288.
- [4] Koo HJ, Yang DH, Kim YH, et al. CT-based myocardial ischemia evaluation: quantitative angiography, transluminal attenuation gradient, myocardial perfusion, and CT-derived fractional flow reserve[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(suppl 1): 1-19.
- [5] Park EA, Lee W, Park SJ, et al. Influence of coronary artery diameter on intracoronary transluminal attenuation gradient during CT angiography[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(9): 1074-1083.
- [6] Suwannasom P, Nieman K, de Araújo Gonçalves P, et al. Functional evaluation of coronary disease by CT angiography [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8(11): 1322-1335.
- [7] Cury RC, Abbara S, Achenbach S, et al. CAD-RADS™: coronary artery disease-reporting and data system; an expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT), the American College of Radiology (ACR) and the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). Endorsed by the American College of Cardiology [J]. *J Am Coll Radiol*, 2016, 13(12 Pt A): 1458-1466. e9.
- [8] Weigold WG, Abbara S, Achenbach S, et al. Standardized medical terminology for cardiac computed tomography: a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2011, 5(3): 136-144.
- [9] Wong DTL, Ko BS, Cameron JD, et al. Transluminal attenuation gradient in coronary computed tomography angiography is a novel noninvasive approach to the identification of functionally significant coronary artery stenosis: a comparison with fractional flow reserve [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 61(12): 1271-1279.
- [10] Doris MK, Otaki Y, Arnson Y, et al. Non-invasive fractional flow reserve in vessels without severe obstructive stenosis is associated with coronary plaque burden [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2018, 12(5): 379-384.
- [11] Stuijzand WJ, Danad I, Raijmakers PG, et al. Additional value of transluminal attenuation gradient in CT angiography to predict hemodynamic significance of coronary artery stenosis [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(4): 374-386.
- [12] Choi JH, Min JK, Labounty TM, et al. Intracoronary transluminal attenuation gradient in coronary CT angiography for determining coronary artery stenosis [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2011, 4(11): 1149-1157.
- [13] Gao Y, Lu B, Hou ZH, et al. Coronary in-stent restenosis: assessment with corrected coronary opacification difference across coronary stents measured with CT angiography [J]. *Radiology*, 2015, 275(2): 403-412.
- [14] Choi JH, Kim EK, Kim SM, et al. Noninvasive discrimination of coronary chronic total occlusion and subtotal occlusion by coronary computed tomography angiography [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(9): 1143-1153.
- [15] Li M. Disease: reverse attenuation gradient sign at CT indicates distal retrograde flow - a useful sign for differentiating chronic total occlusion from subtotal occlusion [J]. *Radiology*, 2013, 266(3): 766-772.
- [16] 周思维, 王鹏贺, 左权, 等. 冠状动脉侧支循环研究进展 [J]. *心血管病学进展*, 2018, 39(4): 521-524.
- [17] Stuijzand WJ, Danad I, Raijmakers PG, et al. Additional value of transluminal attenuation gradient in CT angiography to predict hemodynamic significance of coronary [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(4): 374-386.
- [18] Zheng M, Wei M, Wen D, et al. Transluminal attenuation gradient in coronary computed tomography angiography for determining stenosis severity of calcified coronary artery: a primary study with dual-source CT [J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(5): 1219-1228.
- [19] Peng K, Xu N, Zhang L, et al. Transluminal attenuation gradient and corrected models in coronary CT angiography for determining stenosis severity: a primary study using dual-source CT [J]. *Clin Radiol*, 2017, 72(6): 508-516.

收稿日期: 2019-11-14