·综 述·

冠状动脉CT造影评估冠状动脉钙化进展及临床意义

田天[1,3]，王新江[2]，曹丰[1,3]*
（解放军总医院：[1]心血管内科，[2]老年放射科；[3]国家老年疾病临床医学研究中心，北京 100853）

【摘 要】 冠状动脉粥样硬化是冠心病的病理学基础，而冠状动脉钙化是粥样硬化病变的重要标志。检测和评估冠状动脉钙化不仅对预测心血管事件有重要意义，还有助于了解疾病进展，从而更好地指导临床诊治。冠状动脉CT造影（CCTA）是对冠状动脉钙化斑块进行精确量化评估的无创检查手段，其对于定量冠状动脉钙化以及预后评估具有重要的临床价值。本文对冠状动脉钙化CCTA检测方法及其临床应用等进行综述。

【关键词】 冠状动脉粥样硬化；钙化积分；冠状动脉CT造影
【中图分类号】 R541.4 【文献标志码】 A 【DOI】 10.11915/j.issn.1671-5403.2018.09.163

Coronary computed tomography angiography for evaluation of coronary artery calcium and its clinical significance

TIAN Tian[1,3], WANG Xin-Jiang[2], CAO Feng[1,3]*
([1]Department of Cardiology, [2]Department of Geriatric Radiology, [3]National Clinical Medical Center of Geriatric Diseases, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

【Abstract】 Coronary atherosclerosis is the pathological basis of coronary heart disease, while coronary artery calcification is the major marker of coronary atherosclerotic lesions. Detection and evaluation of coronary artery calcification is of great significance for predicting cardiovascular events, and also contributes to understanding the progress of the plaques, so as to further guide clinical treatment. Coronary CT angiography (CCTA) is a non-invasive imaging technique to detect the presence, location and extent of calcified plaques in coronary arteries, and shows great clinical significance in quantitative evaluation of coronary artery calcium and estimation of prognosis. In this article, we reviewed the utilization and clinical application of CCTA in detection and measurement of coronary calcification.

【Key words】 coronary atherosclerosis; calcium scoring; coronary computed tomography angiography
This work was supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (81530058) *and the National Science Fund for Distinguished Young Scholar of China* (81325009).
Corresponding author: CAO Feng, E-mail: wind8828@gmail.com

冠状动脉粥样硬化性心脏病是危害人类健康的高发病率、高死亡率的重大疾病，粥样硬化的发生随着年龄增长和衰老动态演变，钙化斑块主要是斑块进展到一定程度，平滑肌细胞及泡沫细胞发生矿化使得钙盐在斑块中沉积而形成[1]。而冠状动脉钙化不但是动脉粥样硬化的特异性指标，同样也是衡量斑块负荷的客观指标之一。目前通过影像学手段评估冠状动脉钙化积分已成为预测心肌梗死、冠心病和全因死亡的重要指标[2]，最常用的介入诊断方法是经皮冠状动脉造影（coronary angiography，CAG），可对血管腔内狭窄进行定量分析，但由于是有创检查，操作复杂且费用较高，对管壁及斑块内钙化的精准判断具有一定局限性。血管内超声（intravascular ultrasound，IVUS）相比CAG更敏感[3]，不仅能直接显示血管管腔及管壁形态，还可显示冠状动脉粥样硬化的病变范围和程度，并对斑块性质进行分类。但由于钙化对声影的影响，IVUS易低估钙化病变程度及钙化斑块的横截面积[4]，同时介入操作导致手术时间延长。而冠状动脉CT造影（coronary computed tomography angiography，CCTA）具有快速、易操作和随访及高特异度的诊断优势，而且多层螺旋CT的扫描速度更快，为此本文综述了CCTA评估冠状

收稿日期：2018-01-30；修回日期：2018-02-21
基金项目：国家自然科学基金重点项目（81530058）；国家杰出青年科学基金（81325009）
通信作者：曹丰，E-mail：wind8828@gmail.com

动脉钙化积分的方法进展及临床意义。

1 冠状动脉钙化的定量评估

目前基于CCTA的冠状动脉钙化定量评估方法主要有Agatston积分法、体积积分法、质量积分法以及最新的钙化覆盖积分法，每个定量方法均有自己的优缺点。

1.1 Agatston积分法

Agatston积分(Agatston score，AS)法在临床使用最广[5]，这种方法将CT值≥130 Hu、面积≥1 mm^2的病变定义为钙化。AS=∑钙化灶面积×钙化灶峰值积分，130～199 Hu为1分，200～299 Hu为2分，300～399为3分，≥400为4分。该积分法可计算某一支血管的钙化积分，也可计算全部冠状动脉的钙化积分总和。针对血管钙化危险的分层研究大多将AS作为评判钙化严重程度的指标[6]。通过对大量患者CCTA资料的分析，研究人员获得了基于不同人群、年龄及性别的风险评估数据[7,8]。但该积分也有一定不足，首先由于受操作技术影响，积分结果相比体积积分和质量积分存在较高变异性[9]。其次，由于噪声及运动伪影会影响最大Hu值，从而造成测量值不准确[10]，尤其对病变水平接近界值的影响更明显。

1.2 体积积分法

体积积分(volume score，VS)法最早在1998年由Callister提出[11]，即在每个钙化病变部位选取感兴趣区域，将CT值≥130 Hu定义为钙化，超过CT阈值斑块个数及体积纳入计算，VS等于所有钙化斑块的容积之和，VS=∑钙化灶面积×层厚。它的优势在于不依靠钙化灶的密度变化，从而避免了权重因素。因此随着钙化程度加重，VS呈线性增加趋势。另外，相比AS，VS不受噪声影响，有更好的可重复性[12]，缺点与AS相同。VS只能依据CT界值来定义钙化，不能反映钙化斑块的真实体积，任何低于界值的钙化斑块(可能是微小钙化斑块)均不能纳入评分。由于缺少大规模多中心研究数据，VS法在临床中并未广泛开展[13]。

1.3 质量积分法

Hong等[12]提出了钙化灶的质量积分(mass score，MS)法，该方法使用羟磷灰石钙校准体模，此体模由数个已知的含钙浓度的模块组成。体模与受检者需同时进行扫描，通过测量各个模块的CT值便可确定CT值与含钙浓度的计算关系，最后通过软件计算冠状动脉全部的钙化斑块质量积分，即MS=∑钙化灶含钙浓度×容积。AS和VS均不能真正地反映钙化质量，只是通过CT值间接反映密度值。MS的优势在于对钙化斑块CT值进行了校正，并换算出等效钙浓度，因此有良好的准确性及可重复性[13,14]，有研究者提议MS取代AS和VS，可真实地定量分析钙化，而且将每处病变的平均CT值纳入考虑，而不是最大CT值，但由于缺乏定量斑块负荷作为参考标准，目前没有临床广泛应用的研究数据。

1.4 钙化覆盖积分法

2008年Brown等[15]提出钙化覆盖积分(calcium coverage score，CCS)法，该技术通过非增强CT计算钙化斑块的空间分布，定量分析受钙化影响的冠状动脉的百分率。随访3.5年的研究表明CCS较AS和MS预测心血管事件有更好的价值。但它的不足在于可重复率较差，操作依靠对整条血管的精确追踪，追踪过程导致每个操作者的分析结果有差异，读取分析时间也相对较长。

2 冠状动脉钙化定量评估的临床意义

2.1 预测心血管事件

无论前瞻性还是回顾性研究，以整个人群或心血管病患者为研究对象，钙化积分预测心血管事件发生的价值都超过其余危险因素[16]。其中最有影响力的研究是MESA研究[17]，该研究纳入6814例心血管疾病患者，随访中位时间3.8年，部分亚组随访年限达14.5年。纳入的危险因素包括年龄、性别、民族、吸烟、收缩压、是否使用降压药物、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇及钙化积分。结果表明相比钙化积分为0的患者，钙化积分101～300的患者发生心血管事件的相对风险比(relative risk，RR)为7.73，钙化积分>300的患者RR为9.67($P<0.001$)。亚组分析结果表明2232例白种人中，钙化积分>400的患者相比钙化积分1～99和100～399患者，发生心血管事件的概率明显升高[18]。研究人员进一步对钙化积分0～10之间的3923例患者随访10.3年，发现冠状动脉无钙化和轻度钙化(AS积分1～10)患者心血管事件的发生率有明显差别。长达14.5年的随访过程中，无论研究对象冠状动脉钙化程度是否严重，吸烟人员相比存在相同程度钙化患者的的全因死亡率高[19]。MESA研究2684例女性中钙化积分阳性同钙化积分阴性人群相比，患心血管疾病风险也相对增加[20]。44 052例无症状人群5.6年的随访结果表明1000例患者死亡，钙化积分阳性是导致死亡的独立预测因素之一[21]。

2.2 预测充血性心力衰竭

冠状动脉钙化积分可用来区分引起心力衰竭的

原因是缺血性还是非缺血性心肌病。Leening 等[22]研究纳入 120 例原因未明的心力衰竭患者，结果表明存在冠状动脉钙化患者 99% 被诊断为缺血性心肌病。随访 6.8 年结果表明，随着钙化积分增高，充血性心力衰竭患者的风险比（hazard ratio，HR）也上升，钙化积分≥400 患者的 HR 达 4.1。相比传统预测心力衰竭风险指标，钙化积分 >400 能够对无症状患者重新分组。

2.3 预测脑卒中

Hermann 等[23]的研究纳入了 4180 例无症状患者，随访 8 年结果表明发生脑卒中患者钙化积分中位数为 105，而未发生脑卒中事件患者钙化积分仅为 11。与年龄每增加 5 岁（*RR* =1.35）、收缩压每升高10 mmHg（*RR* =1.25）、吸烟（*RR* =1.75）相比，钙化积分的 *RR* 为 1.52。MESA 研究纳入 6779 例患者，根据钙化积分分为 0 ~ 100、101 ~ 400 和 >400 三组，9.5 年随访结果表明钙化积分等级越高，脑卒中事件发生率越高[24]。

2.4 对糖尿病患者的预测价值

关于冠状动脉钙化的一项研究改变了既往认为无症状糖尿病为冠心病等危症的观点。对于存在相同程度冠状动脉钙化患者，诊断明确的糖尿病患者相比正常人群有可能更容易发生心血管事件，但是进一步分析表明无论是否存在糖尿病，这两组人群心血管事件发生概率均较低[6]。2 型糖尿病患者继发冠状动脉中膜钙化对动脉粥样硬化特异性诊断有重要意义，指南[25]推荐应积极检查 40 岁以上糖尿病患者是否同时存在冠状动脉钙化，对于评判远期预后具有特殊诊断价值。

3 钙化对 CCTA 评估结果的影响

大量钙化易导致 CCTA 高估病变，从而导致大量假阳性结果（阳性预测值为 63% ~77%）[26]。研究表明 CCTA 对于存在有严重钙化病变患者（钙化积分 >400）的诊断准确性低于轻度或不存在钙化病变患者[27,28]。随着冠状动脉钙化程度加重，诊断准确度降低。但一项 CORE-64 研究中的亚组分析结果表明[29]，即使存在钙化，以患者为研究对象时，CCTA 诊断准确度并未降低，但以病变部位为研究对象，钙化会影响 CCTA 诊断准确度。还有基于病变部位为研究对象表明，非钙化病变 CCTA 诊断的灵敏度、特异度、阳性及阴性预测值分别为 77%、98%、66% 和 99%，轻微钙化为 87%、93%、72% 和 97%，中度钙化为 92%、83%、65% 和 97%，严重钙化为 93%、72%、64% 和 85%[30]。相比 CAG，严重钙化不仅影响 CCTA 诊断准确性，还会影响图像质量，钙化会造成晕状伪影，导致容积效应，很难区分真实管腔和斑块，能谱 CT 及 CCTA 减影技术可部分消除及降低钙化伪影。

冠状动脉钙化越重，发生阻塞性冠心病概率越高[31]。但冠状动脉钙化程度最重的部位，并不一定就是冠状动脉狭窄最重的部位，冠状动脉钙化积分与管腔狭窄目前无明确证据表明关系为线性正相关[32]。Sangiorgi 等[33]提出冠状动脉重构是造成钙化与管腔狭窄缺乏线性正相关的重要原因，冠状动脉重构是机体一种主动性自我调节过程，管壁外弹力膜层扩张和血管外径增加可代偿因粥样斑块造成的管腔狭窄，从而维持管腔原内径和面积。随着疾病进展，大量钙盐沉积，冠状动脉壁会逐渐失去弹性，丧失重构功能，导致管腔狭窄。光学相干断层扫描（optical coherence tomography，OCT）有助于评估钙化深度及钙化斑块横截面积[4]，可术中辅助评判病变，但对钙化的定量评估仍需提高。

4 冠状动脉钙化定量分析前景与展望

冠状动脉粥样硬化是多种因素作用结果，非钙化斑块和钙化斑块均参与其中。易损斑块主要是非钙化斑块，CT 表现为点状钙化、低密度影、正性重构和餐巾纸环征[34]，而钙化斑块则多为稳定斑块，与急性冠脉事件发生并不直接关联。因此，仅通过冠状动脉钙化积分诊断冠心病远远不够，还必须结合患者症状、体征、实验室和影像检查。

研究表明冠状动脉钙化积分为 0 的患者非钙化斑块的发生率为 6.5% ~20.4%[35]，但也有文献报道非钙化斑块的发生率高达 51%[36]，这可能跟各自研究的种族人群不同有关，不同地域、不同种族人群冠状动脉粥样斑块的发生率存在较大差异。冠状动脉非钙化所致的管腔狭窄多为轻度狭窄，但病变严重者也可致管腔重度狭窄。

钙化严重时可影响对管腔狭窄的真实评估，从而造成许多不必要的 CAG，增加患者经济负担。目前软件工程师已将重心转到重建算法研究及提高空间分辨率上，目的在于消除钙化斑块产生的晕状伪影。能谱 CT 依靠单能量成像技术可校正钙化造成的伪影，与 CAG 判定结果相比准确率超过 90%。但仅美国通用电气及德国西门子公司研制生产能谱 CT，价格昂贵；后期分析处理耗时且占用空间大。CCTA 技术可提高对冠状动脉严重钙化病变的诊断准确度，研究表明[37]对于钙化积分≥400 的病变，应用常规冠脉 CT 对冠心病诊断的灵敏度及特异度

均低于CCTA技术。但是研究纳入的是严重钙化斑块,对于轻中度钙化的研究尚不知晓。失配准伪影的后处理时间也较长,要求计算机配置性能高,仅见于东芝320排CT的研究报道,尚未应用于所有CT设备。

综上所述,CCTA检测技术以其高时间分辨率、高空间分辨率、扫描层厚薄、可重复性好等优势为临床评估冠状动脉钙化提供了一种有效、简便的途径,可有效预测无症状冠心病高危人群和不宜进行心血管有创检查患者的心血管事件发生率,而且对于确诊和疑诊冠心病患者,在判断临床治疗效果方面也具有一定价值。

【参考文献】

[1] Wexler L, Brundage B, Crouse J, *et al*. Coronary artery calcification: pathophysiology, epidemiology, imaging methods, and clinical implications. A statement for health professionals from the American Heart Association Writing Group[J]. Circulation, 1996, 94(5): 1175-1192.

[2] Hecht HS. Coronary artery calcium scanning: past, present, and future[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2015, 8(5): 579-596. DOI: 10.1016/j.jcmg.2015.02.006.

[3] Nicholls SJ, Tuzcu EM, Wolski K, *et al*. Coronary artery calcification and changes in atheroma burden in response to established medical therapies[J]. J Am Coll Cardiol, 2007, 49(2): 263-270. DOI: 10.1016/j.jacc.2006.10.038.

[4] Rolf A, Werner GS, Schuhback A, *et al*. Preprocedural coronary CT angiography significantly improves success rates of PCI for chronic total occlusion[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29(8): 1819-1827. DOI: 10.1007/s10554-013-0258-y.

[5] Agatston AS, Janowitz WR, Hildner FJ, *et al*. Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography[J]. J Am Coll Cardiol, 1990, 15(4): 827-832.

[6] Greenland P, Alpert JS, Beller GA, *et al*. 2010 ACCF/AHA guideline for assessment of cardiovascular risk in asymptomatic adults: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on practice guidelines[J]. J Am Coll Cardiol, 2010, 56(25): e50-e103. DOI: 10.1016/j.jacc.2010.09.001.

[7] Hoff JA, Chomka EV, Krainik AJ, *et al*. Age and gender distributions of coronary artery calcium detected by electron beam tomography in 35 246 adults[J]. Am J Cardiol, 2001, 87(12): 1335-1339.

[8] Budoff MJ, Shaw LJ, Liu ST, *et al*. Long-term prognosis associated with coronary calcification: observations from a registry of 25 253 patients[J]. J Am Coll Cardiol, 2007, 49(18): 1860-1870. DOI: 10.1016/j.jacc.2006.10.079.

[9] Hoffmann U, Siebert U, Bull-Stewart A, *et al*. Evidence for lower variability of coronary artery calcium mineral mass measurements by multi-detector computed tomography in a community-based cohort-consequences for progression studies[J]. Eur J Radiol, 2006, 57(3): 396-402. DOI: 10.1016/j.ejrad.2005.12.027.

[10] Alluri K, Joshi PH, Henry TS, *et al*. Scoring of coronary artery calcium scans: history, assumptions, current limitations, and future directions[J]. Atherosclerosis, 2015, 239(1): 109-117. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2014.12.040.

[11] Callister TQ, Cooil B, Raya SP, *et al*. Coronary artery disease: improved reproducibility of calcium scoring with an electron-beam CT volumetric method[J]. Radiology, 1998, 208(3): 807-814. DOI: 10.1148/radiology.208.3.9722864.

[12] Hong C, Bae KT, Pilgram TK. Coronary artery calcium: accuracy and reproducibility of measurements with multi-detector row CT-assessment of effects of different thresholds and quantification methods[J]. Radiology, 2003, 227(3): 795-801. DOI: 10.1148/radiol.2273020369.

[13] Nasir K, Raggi P, Rumberger JA, *et al*. Coronary artery calcium volume scores on electron beam tomography in 12 936 asymptomatic adults[J]. Am J Cardiol, 2004, 93(9): 1146-1149. DOI: 10.1016/j.amjcard.2004.01.043.

[14] Ferencik M, Ferullo A, Achenbach S, *et al*. Coronary calcium quantification using various calibration phantoms and scoring thresholds[J]. Invest Radiol, 2003, 38(9): 559-566. DOI: 10.1097/01.RLI.0000073449.90302.75.

[15] Brown ER, Kronmal RA, Bluemke DA, *et al*. Coronary calcium coverage score: determination, correlates, and predictive accuracy in the multi-ethnic study of atherosclerosis[J]. Radiology, 2008, 247(3): 669-675. DOI: 10.1148/radiol.2473071469.

[16] Hecht HS, Narula J. Coronary artery calcium scanning in asymptomatic patients with diabetes mellitus: a paradigm shift[J]. J Diabetes, 2012, 4(4): 342-350. DOI: 10.1111/j.1753-0407.2012.00212.x.

[17] Pletcher MJ, Sibley CT, Pignone M, *et al*. Interpretation of the coronary artery calcium score in combination with conventional cardiovascular risk factors: the multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA)[J]. Circulation, 2013, 128(10): 1076-1084. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.113.002598.

[18] Budoff MJ, Mohlenkamp S, McClelland R, *et al*. A comparison of outcomes with coronary artery calcium scanning in unselected populations: the multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA) and Heinz nixdorf recall study (HNR)[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2013, 7(3): 182-191. DOI: 10.1016/j.jcct.2013.05.009.

[19] Schulman-Marcus J, Valenti V, Hartaigh BO, *et al*. Prognostic utility of coronary artery calcium scoring in active smokers: a 15-year follow-up study[J]. Int J Cardiol, 2014, 177(2): 581-583. DOI: 10.1016/j.ijcard.2014.08.153.

[20] Lakoski SG, Greenland P, Wong ND, *et al*. Coronary artery calcium scores and risk for cardiovascular events in women classified as "low risk" based on Framingham risk score: the multi-ethnic study of atherosclerosis(MESA)[J]. Arch Intern Med, 2007, 167(22): 2437-2442. DOI: 10.1001/archinte.167.22.2437.

[21] Blaha M, Budoff MJ, Shaw LJ, *et al*. Absence of coronary artery calcification and all-cause mortality[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2009, 2(6): 692-700. DOI: 10.1016/j.jcmg.2009.03.009.

[22] Leening MJ, Elias-Smale SE, Kavousi M, *et al*. Coronary calcification and the risk of heart failure in the elderly: the Rotterdam

study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2012, 5(9): 874 - 880. DOI: 10.1016/j.jcmg.2012.03.016.

[23] Hermann DM, Gronewold J, Lehmann N, *et al*. Coronary artery calcification is an independent stroke predictor in the general population[J]. Stroke, 2013, 44(4): 1008 - 1013. DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.678078.

[24] Gibson AO, Blaha MJ, Arnan MK, *et al*. Coronary artery calcium and incident cerebrovascular events in an asymptomatic cohort. The MESA study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2014, 7(11): 1108 - 1115. DOI: 10.1016/j.jcmg.2014.07.009.

[25] Greenland P, Bonow RO, Brundage BH, *et al*. ACCF/AHA 2007 clinical expert consensus document on coronary artery calcium scoring by computed tomography in global cardiovascular risk assessment and in evaluation of patients with chest pain: a report of the American College of Cardiology Foundation Clinical Expert Consensus Task Force (ACCF/AHA Writing Committee to update the 2000 expert consensus document on electron beam computed tomography) developed in collaboration with the Society of Atherosclerosis Imaging and Prevention and the Society of Cardiovascular Computed Tomography[J]. J Am Coll Cardiol, 2007, 49(3): 378 - 402. DOI: 10.1016/j.jacc.2006.10.001.

[26] Burgstahler C, Reimann A, Drosch T, *et al*. Cardiac dual-source computed tomography in patients with severe coronary calcifications and a high prevalence of coronary artery disease[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2007, 1(3): 143 - 151. DOI: 10.1016/j.jcct.2007.09.003.

[27] Gottlieb I, Miller JM, Arbab-Zadeh A, *et al*. The absence of coronary calcification does not exclude obstructive coronary artery disease or the need for revascularization in patients referred for conventional coronary angiography[J]. J Am Coll Cardiol, 2010, 55(7): 627 - 634. DOI: 10.1016/j.jacc.2009.07.072.

[28] Meng L, Cui L, Cheng Y, *et al*. Effect of heart rate and coronary calcification on the diagnostic accuracy of the dual-source CT coronary angiography in patients with suspected coronary artery disease[J]. Korean J Radiol, 2009, 10(4): 347 - 354. DOI: 10.3348/kjr.2009.10.4.347.

[29] Vavere AL, Arbab-Zadeh A, Rochitte CE, *et al*. Coronary artery stenoses: accuracy of 64-detector row CT angiography in segments with mild, moderate, or severe calcification — a subanalysis of the CORE-64 trial[J]. Radiology, 2011, 261(1): 100 - 108. DOI: 10.1148/radiol.11110537.

[30] Raff GL, Gallagher MJ, O'Neill WW, *et al*. Diagnostic accuracy of noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography[J]. J Am Coll Cardiol, 2005, 46(3): 552 - 557. DOI: 10.1016/j.jacc.2005.05.056.

[31] Zhang S, Levin DC, Halpern EJ, *et al*. Accuracy of MDCT in assessing the degree of stenosis caused by calcified coronary artery plaques[J]. AJR Am J Roentgenol, 2008, 191(6): 1676 - 1683. DOI: 10.2214/AJR.07.4026.

[32] 李勇, 王成伟, 韩淑华, 等. MSCT血管成像联合钙化积分对冠心病的诊断价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2011, 9(5): 48 - 51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.
Li Y, Wang CW, Han SH, *et al*. The diagnostic value of combined MSCT angiography and calcification score in patients with coronary heart disease[J]. Chin J CT MRI, 2011, 9(5): 48 - 51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.

[33] Sangiorgi G, Rumberger JA, Severson A, *et al*. Arterial calcification and not lumen stenosis is highly correlated with atherosclerotic plaque burden in humans: a histologic study of 723 coronary artery segments using nondecalcifying methodology[J]. J Am Coll Cardiol, 1998, 31(1): 126 - 133.

[34] Cury RC, Abbara S, Achenbach S, *et al*. CAD-RADS(TM) 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 Cardiovasc Comput Tomogr, 2016, 10(4): 269 - 281. DOI: 10.1016/j.jcct.2016.04.005.

[35] Chen CK, Kuo YS, Liu CA, *et al*. Frequency and risk factors associated with atherosclerotic plaques in patients with a zero coronary artery calcium score[J]. J Chin Med Assoc, 2012, 75(1): 10 - 15. DOI: 10.1016/j.jcma.2011.11.001.

[36] Kelly JL, Thickman D, Abramson SD, *et al*. Coronary CT angiography findings in patients without coronary calcification[J]. Am J Roentgenol, 2008, 191(1): 50 - 55. DOI: 10.2214/AJR.07.2954.

[37] Amanuma M, Kondo T, Sano T, *et al*. Subtraction coronary computed tomography in patients with severe calcification[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2015, 31(8): 1635 - 1642. DOI: 10.1007/s10554-015-0746-3.

(编辑: 王彩霞)