

· 临床研究 ·

## 急性冠脉综合征患者冠状动脉计算机断层扫描血管成像斑块定量分析的对比研究

王蔚然<sup>1</sup>, 王玺<sup>2</sup>, 窦冠华<sup>3</sup>, 何柏<sup>1</sup>, 荆晶<sup>1</sup>, 单冬凯<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国人民解放军总医院第一医学中心心血管内科, 北京 100853; <sup>2</sup> 中国人民解放军总医院第六医学中心心血管病医学部, 北京 100048; <sup>3</sup> 中国人民解放军总医院第二医学中心心血管内科, 北京 100853)

**【摘要】目的** 应用冠状动脉计算机断层扫描血管成像(CCTA)斑块定量分析,比较急性冠脉综合征(ACS)和稳定性冠心病(SCAD)患者冠状动脉斑块成分与负荷特征。**方法** 回顾性纳入2021年1月至3月就诊于中国人民解放军总医院第一医学中心心血管内科的116例冠心病(CAD)患者的临床资料,根据患者临床诊断结果将其分为ACS组(81例)和SCAD组(35例)。2组患者均在14d内先后接受CCTA和冠状动脉造影检查。采用CCTA斑块定量分析软件测量各类斑块成分体积及负荷、最小管腔直径和重构指数(RI)、偏心指数(EI)等影像学指标并比较分析。采用SPSS 20.0软件进行数据分析。根据数据类型,组间比较分别采用*t*检验、Wilcoxon检验及 $\chi^2$ 检验。**结果** ACS组患者较SCAD组患者具有更大的总斑块负荷(TPB)、非钙化成分负荷(NCPB)和脂质成分负荷(LPB),差异均有统计学意义[(60.5±11.2)%和(51.7±14.4)%、(58.9±12.0)%和(50.1±15.2)%、17.9%(11.6%,27.6%)和14.2%(7.5%,20.8%)],均 $P<0.05$ 。斑块各类成分体积、钙化成分负荷(CPB)、RI和EI的组间差异均无统计学意义。ACS患者的罪犯病变较非罪犯病变具有更大的TPB、NCPB和LPB,差异均有统计学意义[(62.3±10.4)%和(54.8±10.6)%、(60.7±11.0)%和(52.4±11.0)%、(19.7±10.3)%和(15.1±9.2)%],均 $P<0.05$ 。此外,罪犯病变较非罪犯病变具有更小的CPB[0.5%(0.0,2.6)%和1.5%(0.3,3.6)%], $P<0.05$ 。**结论** 通过CCTA斑块定量分析技术测量斑块成分构成后发现,ACS患者和罪犯病变呈现出更高的TPB、NCPB和LPB。

**【关键词】** 冠心病;急性冠脉综合征;冠状动脉计算机断层扫描血管成像;斑块定量分析

**【中图分类号】** R541.4

**【文献标志码】** A

**【DOI】** 10.11915/j.issn.1671-5403.2022.09.144

## Comparative study of quantitative coronary computed tomography angiography analysis of coronary plaques in patients with acute coronary syndrome

WANG Wei-Ran<sup>1</sup>, WANG Xi<sup>2</sup>, DOU Guan-Hua<sup>3</sup>, HE Bai<sup>1</sup>, JING Jing<sup>1</sup>, SHAN Dong-Kai<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>Department of Cardiology, First Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>2</sup>Senior Department of Cardiology, Sixth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100048, China; <sup>3</sup>Department of Cardiology, Second Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

**【Abstract】 Objective** To compare the plaque composition and burden between patients with acute coronary syndrome (ACS) and those with stable coronary artery disease (SCAD) using quantitative plaque assessment with coronary computed tomography angiography (CCTA). **Methods** A total of 116 patients in the Department of Cardiology, First Medical Center, Chinese PLA General Hospital from January 2021 to March 2021 were retrospectively included, who were divided into the ACS group ( $n=81$ ) and the SCAD group ( $n=35$ ) according to the clinical diagnosis. All the patients underwent CCTA and coronary angiography within 14 days after the diagnosis. A CCTA software for plaque quantification analysis was used to measure such imaging features as plaque component volume and burden, minimal lumen diameter (MLD), remodeling index (RI), and eccentric index (EI). SPSS 20.0 was used for statistical analysis. Depending on the data type, data comparison between two groups was performed using *t*-test, Wilcoxon test or  $\chi^2$  test. **Results** The ACS patients had higher total plaque burden (TPB), non-calcified component burden (NCPB), and lipid component burden (LPB), the differences being statistically significant [(60.5±11.2)% vs (51.7±14.4)%, (58.9±12.0)% vs (50.1±15.2)%, 17.9%(11.6%,27.6%) vs 14.2%(7.5%,20.8%)], all  $P<0.05$ . There was no significant difference between the two groups in plaque component volume, calcification component burden (CPB), RI and EI. In the ACS patients, the culprit lesions had higher TPB, NCPB and LPB than the non-culprit lesions [(62.3±10.4)% vs (54.8±10.6)%, (60.7±11.0)% vs (52.4±11.0)%, (19.7±10.3)% vs (15.1±9.2)%], all  $P<0.05$ . In addition, the culprit lesions had smaller CPB than non-culprit lesions

收稿日期: 2022-05-19; 接受日期: 2022-08-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1300304)

通信作者: 单冬凯, E-mail: shandongkai1234@163.com

[0.5%(0.0, 2.6)% vs 1.5%(0.3, 3.6)% , $P<0.05$ ]. **Conclusion** Quantitative CCTA analysis of the coronary plaque composition revealed that patients with ACS and culprit lesions show higher TPB, NCPB and LPB.

**【Key words】** coronary artery disease; acute coronary syndrome; coronary computed tomography angiography; plaque quantification analysis

The study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC1300304).

Corresponding author: SHAN Dong-Kai, E-mail: shandongkai1234@163.com

急性冠脉综合征 (acute coronary syndrome, ACS) 是当前严重威胁我国城乡居民生命健康的心血管疾病<sup>[1,2]</sup>。ACS 的病理基础是具有破裂倾向的不稳定斑块形成,与斑块破裂和继发血栓密切相关。冠状动脉计算机断层扫描血管成像 (coronary computed tomography angiography, CCTA) 作为重要的无创影像学诊断技术,不仅可以实现解剖学定性分析,也能够借助定量分析精准测定各类斑块成分,检出可能导致潜在 ACS 风险的高危斑块,有助于冠心病 (coronary artery disease, CAD) 患者的临床风险分层<sup>[3,4]</sup>。尽管既往研究已明确指出 CCTA 高危斑块特征包括点状钙化、正性重构、低密度斑块和餐巾环征,然而对高危斑块进行定量分析仍需进一步探讨<sup>[5-9]</sup>。本研究旨在比较 ACS 和稳定性冠心病 (stable coronary artery disease, SCAD) 患者斑块成分的差异,并进一步分析 ACS 患者中罪犯病变和非罪犯病变斑块构成的差异。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

回顾性纳入 2021 年 1 月至 3 月因胸痛就诊于中国人民解放军总医院第一医学中心心血管内科的 CAD 患者 116 例,其中非 ST 段抬高型 ACS 患者 81 例,SCAD 患者 35 例,详细记录其临床资料 and 主要检验检查指标。纳入标准:(1) 年龄 18~75 岁;(2) 在院期间依次接受 CCTA 和冠状动脉造影检查,两项检查间隔时间不超过 14 d;(3) CCTA 和冠状动脉造影图像质量满足分析需求;(4) 临床资料完整。排除标准:(1) 血流动力学或临床情况不稳定;(2) 冠状动脉支架或冠状动脉搭桥术后;(3) 既往心肌梗死病史;(4) 冠状动脉严重钙化病变;(5) 严重肝肾功能不全;(6) 碘对比剂禁忌证。由心血管介入团队中 3 名经验丰富的专家通过冠状动脉造影确定 ACS 患者的罪犯病变。本研究通过中国人民解放军总医院医学伦理委员会批准,纳入患者在接受 CCTA 和冠状动脉造影检查前均签署知情同意书。

纳入分析的 ACS 患者临床情况基本稳定,主要包括非 ST 段抬高型心肌梗死和不稳定性心绞痛。

非 ST 段抬高型心肌梗死定义:(1) 特异性心电图 ST 段下移、一过性 ST 段抬高或 T 波改变;(2) 高敏肌钙蛋白  $\geq 52$  ng/L,或在最初 1 h 内绝对变化值  $\geq 3$  ng/L<sup>[10,11]</sup>。不稳定性心绞痛定义:(1) 长时间静息性心绞痛 (>20 min);(2) 新发严重心绞痛,表现为自发性心绞痛或劳力性心绞痛;(3) 最近 1 个月内症状加重的稳定性心绞痛<sup>[10,11]</sup>。区别于 ACS 患者,SCAD 患者主要包括以下 3 种情况:(1) 慢性稳定性劳力型心绞痛;(2) ACS 之后稳定的病程阶段;(3) 缺血性心脏病<sup>[12,13]</sup>。

### 1.2 CCTA 扫描方案

所有患者均在中国人民解放军总医院第一医学中心心脏介入中心接受 CCTA 检查。检查设备为西门子第二代双源 CT (Definition Flash, Siemens Healthcare, Germany),扫描参数如下:采用 Z 轴飞焦点技术,探测器准直 0.6 mm×64.0 mm,扫描层厚 0.6 mm,机架旋转时间 0.28 s。所有患者均进行屏气训练以减少呼吸运动伪影,并于扫描前 3 min 舌下含服硝酸甘油以扩张冠状动脉,如果心率 >75 次/min 则静脉给予  $\beta$  受体阻滞剂,根据患者心率和呼吸情况选择前瞻性或回顾性心电门控扫描。经肘正中静脉以 4.5~5.0 ml/s 的速度由双筒高压注射器注射碘造影剂 (370 mgI/100 ml,碘帕醇注射液,博莱科信谊药业有限公司,中国),于主动脉根部感兴趣区监测 CT 衰减值,当 CT 衰减值达到 100 HU 时触发扫描,扫描范围为主动脉弓上 1 cm 至膈面下 1 cm<sup>[14]</sup>。

### 1.3 CCTA 斑块定量分析

由 1 名经验丰富的心血管医师独立阅片,使用西门子斑块定量分析软件 (Coronary Plaque Analysis Syngo. via Frontier, Siemens Healthcare, Germany) 对整个冠状动脉树中直径 >2 mm 的冠状动脉节段的病变进行成分测定。通过识别并手动校正血管与管腔边界,测定各类斑块成分体积及负荷、最小管腔直径 (minimum lumen diameter, MLD)、重构指数 (remodeling index, RI) 及偏心指数 (eccentric index, EI)。斑块定量分析各指标包括:总斑块体积 (total plaque volume, TPV)、钙化成分体积 (calcified plaque volume, CPV)、非钙化成分体积 (non-calcified plaque volume, NCPV)、脂质成分体积 (lipid plaque volume,

LPV)、总斑块负荷(total plaque volume burden, TPB)、钙化成分负荷(calcified plaque volume burden, CPB)、非钙化成分负荷(non-calcified plaque volume burden, NCPB)及脂质成分负荷(lipid plaque volume burden, LPB)<sup>[15]</sup>。根据CT阈值区分各类斑块成分:脂质成份为-190~30 HU,纤维成分30~130 HU,钙化成份>130 HU。MLD定义为最狭窄处管腔直径,RI定义为最大血管横截面积/近端参考血管横截面积,EI定义为最狭窄处管腔中心线距血管壁最大距离和最小距离的差值/最大距离,斑块成分负荷定义为斑块成分体积/对应血管体积×100%<sup>[16]</sup>。

### 1.4 统计学处理

采用SPSS 20.0统计软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料用均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,采用t检验;非正态分布的计量资料,用中位数(四分位数间距) $[M(Q_1, Q_3)]$ 表示,采用Wilcoxon检验。计数资料用例数(百分率)表示,采用 $\chi^2$ 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 纳入患者临床资料

本研究共计纳入116例患者,根据患者临床诊断结果将其分为ACS组(81例)和SCAD组(35例)。与SCAD组相比,ACS组患者中阻塞性冠心病占比较高,差异有统计学意义( $P < 0.05$ );其余指标比较,差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$ ;表1)。

### 2.2 2组患者CCTA斑块定量分析比较

基于患者水平比较ACS组与SCAD组患者CCTA斑块定量分析主要指标后发现,2组患者TPV、CPV、NCPV、LPV、RI及EI指标比较,差异均

无统计学意义(均 $P > 0.05$ );与SCAD组相比,ACS组患者TPB、NCPB、LPB更重,MLD更小,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$ ;表2)。

### 2.3 ACS患者罪犯病变与非罪犯病变CCTA斑块定量分析比较

基于病变水平进一步比较ACS患者罪犯病变与非罪犯病变CCTA斑块定量分析主要指标后发现,2组病变在TPV、NCPV、LPV指标比较,差异无统计学意义(均 $P > 0.05$ );相较非罪犯病变,罪犯病变TPB、NCPB、LPB更重,CPV和MLD更小,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$ ;表3)。

表1 2组患者一般临床资料比较

Table 1 Comparison of general characteristics between two groups

Item	ACS group (n=81)	SCAD group (n=35)	P value
Age(years, $\bar{x} \pm s$ )	60.8±9.1	60.2±9.1	0.75
Male[n(%)]	49(61.3)	26(74.3)	0.18
BMI(kg/m <sup>2</sup> , $\bar{x} \pm s$ )	24.8±3.3	25.7±3.2	0.17
Dyslipidemia[n(%)]	18(22.5)	10(28.6)	0.49
Hypertension[n(%)]	45(56.3)	18(51.4)	0.63
Diabetes mellitus[n(%)]	26(32.5)	8(22.9)	0.30
Current smoking[n(%)]	27(33.8)	9(25.7)	0.39
TC(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	4.1±0.8	3.9±1.0	0.30
HDL-C(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	1.2±0.3	1.1±0.3	0.21
LDL-C(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	2.6±0.7	2.4±0.9	0.47
TG(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	1.5±0.8	1.5±0.7	0.99
FBG(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	6.4±2.7	6.6±2.9	0.85
Obstructive coronary artery[n(%)]	71(87.7)	25(71.4)	0.03

ACS: acute coronary syndrome; SCAD: stable coronary artery disease; BMI: body mass index; TC: total cholesterol; HDL-C: high-density lipoprotein cholesterol; LDL-C: low-density lipoprotein cholesterol; TG: triglyceride; FBG: fasting blood glucose.

表2 2组患者斑块定量分析比较

Table 2 Comparison of plaque quantification analysis between two groups

Item	ACS group(n=81)	SCAD group(n=35)	P value
MLD[mm, $M(Q_1, Q_3)$ ]	1.4(1.1, 1.6)	1.6(1.4, 1.8)	0.02
TPV[mm <sup>3</sup> , $M(Q_1, Q_3)$ ]	254.6(158.1, 486.0)	233.3(149.7, 356.4)	0.31
CPV[mm <sup>3</sup> , $M(Q_1, Q_3)$ ]	2.2(0.0, 14.0)	4.6(0.0, 12.4)	0.63
NCPV[mm <sup>3</sup> , $M(Q_1, Q_3)$ ]	251.3(157.9, 466.5)	231.0(141.4, 356.4)	0.28
LPV[mm <sup>3</sup> , $M(Q_1, Q_3)$ ]	78.2(43.9, 144.4)	68.9(25.1, 118.3)	0.24
TPB(% , $\bar{x} \pm s$ )	60.5±11.2	51.7±14.4	0.01
CPB[% , $M(Q_1, Q_3)$ ]	0.5(0.0, 2.6)	0.8(0.0, 2.2)	0.51
NCPB(% , $\bar{x} \pm s$ )	58.9±12.0	50.1±15.2	0.01
LPB[% , $M(Q_1, Q_3)$ ]	17.9(11.6, 27.6)	14.2(7.5, 20.7)	0.04
RI[ $M(Q_1, Q_3)$ ]	1.4(1.2, 1.7)	1.4(1.1, 1.4)	0.73
EI[ $M(Q_1, Q_3)$ ]	1.0(0.9, 1.0)	0.9(0.9, 1.0)	0.08

ACS: acute coronary syndrome; SCAD: stable coronary artery disease; MLD: minimal lumen diameter; TPV: total plaque volume; CPV: calcified plaque volume; NCPV: non-calcified plaque volume; LPV: lipid plaque volume; TPB: total plaque volume burden; CPB: calcified plaque volume burden; NCPB: non-calcified plaque volume burden; LPB: lipid plaque volume burden; RI: remodeling index; EI: eccentric index.

表3 ACS患者罪犯病变与非罪犯病变斑块定量分析比较

Table 3 Comparison of plaque quantification analysis between culprit and non-culprit lesion in ACS patients

Item	Culprit lesion (n=81)	Non-culprit lesion (n=48)	P value
MLD (mm, $\bar{x}\pm s$ )	1.4±0.2	1.6±0.5	0.01
TPV [mm <sup>3</sup> , M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]	261.5 (175.3, 501.1)	297.2 (167.1, 478.0)	0.73
CPV [mm <sup>3</sup> , M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]	2.0 (0.0, 12.7)	7.87 (1.1, 23.4)	0.02
NCPV [mm <sup>3</sup> , M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]	261.3 (177.1, 474.3)	273.3 (163.4, 459.8)	0.81
LPV [mm <sup>3</sup> , M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]	82.1 (45.6, 147.1)	81.7 (31.7, 132.4)	0.64
TPB (% , $\bar{x}\pm s$ )	62.3±10.4	54.8±10.6	0.01
CPB (% , $\bar{x}\pm s$ )	0.5 (0.0, 2.9)	1.5 (0.3, 3.6)	0.03
NCPB (% , $\bar{x}\pm s$ )	60.7±11.0	52.4±11.0	0.01
LPB (% , $\bar{x}\pm s$ )	19.7±10.3	15.1±9.2	0.01
RI [M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]	1.4 (1.1, 1.9)	1.3 (1.2, 1.6)	0.36
EI [M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]	1.2 (0.9, 1.3)	1.0 (0.9, 1.0)	0.04

MLD: minimal lumen diameter; TPV: total plaque volume; CPV: calcified plaque volume; NCPV: non-calcified plaque volume; LPV: lipid plaque volume; TPB: total plaque volume burden; CPB: calcified plaque volume burden; NCPB: non-calcified plaque volume burden; LPB: lipid plaque volume burden; RI: remodeling index; EI: eccentric index.

### 3 讨论

本研究通过 CCTA 斑块定量分析发现, ACS 患者较 SCAD 患者具有更重的 TPB、NCPB 和 LPB, ACS 患者的罪犯病变较非罪犯病变也具有更重的 TPB、NCPB 和 LPB。尽管我们也发现其他个别斑块体积指标同样存在显著差异,但是考虑到不同冠状动脉的血管体积存在差异,经过血管体积标准化后的斑块成分负荷更能客观反映冠状动脉病变的严重程度和组间差异。

临床常规以目测定性评估 CCTA 狭窄程度和斑块特征,随着后处理和影像分析技术的进步,研究人员已经可以通过 CCTA 斑块定量分析软件半自动测定各类斑块成分体积及其他定量指标,本课题组前期研究也证实该方法具有较佳的准确性和可重复性<sup>[6,15]</sup>。既往研究曾对 ACS 患者的冠状动脉斑块特征进行了探索,证实 ACS 较 SCAD 患者具有更大的 NCPV、TPV 以及更低的 CT 衰减<sup>[17,18]</sup>。Pfleiderer 等<sup>[6]</sup>和 Kim 等<sup>[19]</sup>观察到冠状动脉斑块低 CT 衰减值与 ACS 具有一定的相关性,病理学研究也证实了低 CT 衰减值是冠状动脉斑块脂质核心的重要影像学特征。Motoyama 等<sup>[20]</sup>在对接受 CCTA 检查的 1059 例冠心病患者进行的 27 个月中位随访后进一步发现,远期发生 ACS 的患者具有更大的 RI、TPV 和更低的 CT 衰减值。这些结果都从不同的影像学特征角度证明了 CCTA 斑块定量分析的作用和价值,但本研究对于采用血管体积标准化的斑块成分负荷进行评估具有一定探索创新。

CCTA 斑块定量分析与血管内超声 (intravascular ultrasound, IVUS) 在斑块成分测定精确度方面具有较强的相关性<sup>[4]</sup>。低密度斑块、正性重构、NCPV 等 CCTA 影像学特征有助于 CAD 患者的临床风险评估,

指导后续的二级预防以期改善远期临床预后<sup>[21,22]</sup>。本研究不仅从患者水平强调了 TPB、NCPB 和 LPB 这类斑块成分负荷指标可能与斑块稳定性存在关联,而且从病变水平进一步发现 ACS 患者的罪犯病变和非罪犯病变在 TPB、NCPB 和 LPB 等斑块成分负荷方面的显著差别。我们认为斑块成分负荷相比斑块成分体积,更能反映冠状动脉斑块稳定性,即使较小的冠状动脉斑块中某些特定成分负荷在达到一定程度后,也可能带来严重的不良后果,因此需要重点关注此类指标的异常情况。然而既往研究提示我们仍需要进一步结合有创腔内影像学检查完善无创影像学检查的评估价值<sup>[23]</sup>。

但是,我们也注意到,部分 ACS 患者在住院期间经强化药物治疗后症状已得到缓解,这导致临床路径中选择 CCTA 检查优先于直接冠状动脉造影。因此此种情况下进行 CCTA 斑块定量分析可能受到斑块已经破裂的现实影响,从而导致本研究中部分测量结果与既往研究存在一定差异。此外,值得注意的是,在我们的研究中,同时从整个冠状动脉树和罪犯病变水平分别进行了测量和分析,也考虑到血管体积的差异,以斑块成分负荷 (相对值) 代替斑块成分体积 (绝对值),避免了高估或低估斑块定量分析结果。

本研究存在以下局限性: (1) 作为单中心回顾性研究,样本量偏小,研究结果需要在前瞻性队列研究中加以验证; (2) 上述各项指标仍然为 CCTA 的特异性发现,缺乏有创腔内影像学诊断“金标准”进行甄别明确。

综上,本研究通过 CCTA 斑块定量分析技术测定斑块成分后发现,ACS 患者和 ACS 罪犯病变呈现出更高的 TPB、NCPB 和 LPB。依靠 CCTA 斑块定量分析技术评估冠状动脉斑块稳定性,有助于推进基于无创影像学特征的 CAD 的临床风险评估。

## 【参考文献】

- [1] GBD 2013 Mortality and Causes of Death Collaborators. Global, regional, and national age-sex specific all-cause and cause-specific mortality for 240 causes of death, 1990–2013; a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013[J]. *Lancet*, 2015, 385(9963): 117–171. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)61682-2.
- [2] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2020 概要[J]. *中国循环杂志*, 2021, 36(6): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2021.06.001.
- The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on Cardiovascular Health and Diseases Burden in China: an updated summary of 2020[J]. *Chin Circ J*, 2021, 36(6): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2021.06.001.
- [3] Smit JM, van Rosendaal AR, El Mahdiu M, *et al.* Impact of clinical characteristics and statins on coronary plaque progression by serial computed tomography angiography[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(3): e009750. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.119.009750.
- [4] Dey D, Schepis T, Marwan M, *et al.* Automated three-dimensional quantification of noncalcified coronary plaque from coronary CT angiography: comparison with intravascular US[J]. *Radiology*, 2010, 257(2): 516–522. DOI: 10.1148/radiol.10100681.
- [5] Lee SE, Park HB, Xuan D, *et al.* Consistency of quantitative analysis of coronary computed tomography angiography [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2019, 13(1): 48–54. DOI: 10.1016/j.jcct.2018.09.012.
- [6] Pflederer T, Marwan M, Schepis T, *et al.* Characterization of culprit lesions in acute coronary syndromes using coronary dual-source CT angiography[J]. *Atherosclerosis*, 2010, 211(2): 437–444. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2010.02.001.
- [7] Van Assen M, Varga-Szemes A, Schoepf UJ, *et al.* Automated plaque analysis for the prognostication of major adverse cardiac events[J]. *Eur J Radiol*, 2019, 116: 76–83. DOI: 10.1016/j.ejrad.2019.04.013.
- [8] Cury RC, Abbara S, Achenbach S, *et al.* CAD-RADS (TM) coronary artery disease — reporting and data system[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2016, 10(4): 269–281. DOI: 10.1016/j.jcct.2016.04.005.
- [9] Yuan M, Wu H, Li R, *et al.* The value of quantified plaque analysis by dual-source coronary CT angiography to detect vulnerable plaques; a comparison study with intravascular ultrasound [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2020, 10(3): 668–677. DOI: 10.21037/qims.2020.01.13.
- [10] Collet JP, Thiele H, Barbato E, *et al.* 2020 ESC guidelines for the management of acute coronary syndromes in patients presenting without persistent ST-segment elevation[J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(14): 1289–1367. DOI: 10.1093/eurheartj/ehaa575.
- [11] 葛均波, 戴宇翔. 中国非 ST 段抬高型急性冠状动脉综合征诊断和治疗现状[J]. *中华心血管病杂志*, 2017, 45(5): 355–358. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2017.05.002.
- Ge JB, Dai YX. Status of diagnosis and treatment of non-ST-segment elevation acute coronary syndrome in China [J]. *Chin J Cardiol*, 2017, 45(5): 355–358. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2017.05.002.
- [12] Knuuti J, Wijns W, Saraste A, *et al.* 2019 ESC guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes[J]. *Eur Heart J*, 2020, 41(3): 407–477. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz425.
- [13] 中华医学会心血管病学分会介入心脏病学组. 稳定性冠心病诊断与治疗指南[J]. *中华心血管病杂志*, 2018, 46(9): 680–694. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2018.09.004.
- Section of Interventional Cardiology of Chinese Society of Cardiology. Guideline on the diagnosis and treatment of stable coronary artery disease[J]. *Chin J Cardiol*, 2018, 46(9): 680–694. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2018.09.004.
- [14] 王玺, 刘子暖, 丁熠璞, 等. 脂蛋白(a)与冠脉病变严重程度的相关性分析[J]. *解放军医学院学报*, 2021, 42(11): 1129–1133, 1147. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2021.11.001.
- Wang X, Liu ZN, Ding YP, *et al.* Association between lipoprotein(a) and severity of coronary artery disease[J]. *Acad J Chin PLA Med Sch*, 2021, 42(11): 1129–1133, 1147. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2021.11.001.
- [15] Wang X, Shan DK, Dou GH, *et al.* Lipoprotein(a) is associated with coronary atheroma progression; analysis from a serial coronary computed tomography angiography study [J]. *J Geriatr Cardiol*, 2021, 18(12): 996–1007. DOI: 10.11909/j.issn.1671-5411.2021.12.001.
- [16] Yin P, Dou G, Yang X, *et al.* Noninvasive quantitative plaque analysis identifies hemodynamically significant coronary arteries disease[J]. *J Thorac Imaging*, 2021, 36(2): 102–107. DOI: 10.1097/RTI.0000000000000494.
- [17] Ferencik M, Schlett CL, Ghoshhajra BB, *et al.* A computed tomography-based coronary lesion score to predict acute coronary syndrome among patients with acute chest pain and significant coronary stenosis on coronary computed tomographic angiogram [J]. *Am J Cardiol*, 2012, 110(2): 183–189. DOI: 10.1016/j.amjcard.2012.02.066.
- [18] Dey D, Cheng VY, Slomka PJ, *et al.* Automated 3-dimensional quantification of noncalcified and calcified coronary plaque from coronary CT angiography [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2009, 3(6): 372–382. DOI: 10.1016/j.jcct.2009.09.004.
- [19] Kim U, Leipsic JA, Sellers SL, *et al.* Natural history of diabetic coronary atherosclerosis by quantitative measurement of serial coronary computed tomographic angiography: results of the PARADIGM study [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(10): 1461–1471. DOI: 10.1016/j.jcmg.2018.04.009.
- [20] Motoyama S, Sarai M, Harigaya H, *et al.* Computed tomographic angiography characteristics of atherosclerotic plaques subsequently resulting in acute coronary syndrome [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 54(1): 49–57. DOI: 10.1016/j.jacc.2009.02.068.
- [21] Liu T, Maurovich-Horvat P, Mayrhofer T, *et al.* Quantitative coronary plaque analysis predicts high-risk plaque morphology on coronary computed tomography angiography: results from the ROMICAT II trial [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2018, 34(2): 311–319. DOI: 10.1007/s10554-017-1228-6.
- [22] Hwang D, Kim HJ, Lee SP, *et al.* Topological data analysis of coronary plaques demonstrates the natural history of coronary atherosclerosis [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(7): 1410–1421. DOI: 10.1016/j.jcmg.2020.11.009.
- [23] Ternovoy S, Ustyuzhanin D, Shariya M, *et al.* Reliability of coronary computed tomography angiography in acute coronary syndrome in an emergency setting [J]. *Heliyon*, 2021, 7(2): e06075. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06075.