

# 冠状动脉 CT 血管成像狭窄评分定量评估缺血相关病变的临床价值

熊青峰 付晓荣 吕丰甫 郭生鹏

**【摘要】** 目的:分析冠状动脉 CT 血管成像狭窄评分(CCTA-SS)在定量评估缺血相关病变中的临床价值。 方法:回顾性分析经冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)诊断为左前降支单支病变的冠状动脉粥样硬化性心脏病(冠心病)疑似患者的临床资料。患者入院 1 周内接受有创冠状动脉造影(ICA)及血流储备分数(FFR)检查,分析影像特征并计算 CCTA-SS,以数值  $\geq 70\%$  判断缺血相关病变。以  $\text{FFR} \leq 0.80$  评价 CCTA、ICA、CCTA-SS 诊断缺血相关冠心病的准确性,分析三者受试者工作特征(ROC)曲线。临床依据  $\text{FFR} \leq 0.80$  行经皮冠状动脉介入术(PCI)并随访。 结果:共入选患者 101 例,左室前壁与侧壁心肌早期灌注及心肌功能的差异有统计学意义( $P < 0.001$ )。35 例患者有高风险斑块,37 例患者  $\text{FFR} \leq 0.80$ 。以  $\text{FFR} \leq 0.80$  为标准,CCTA、ICA、CCTA-SS 诊断准确率分别为 46.53%、66.34%、89.11%,最佳截断值分别为 60%、66%、38%,敏感度与特异度分别为 82.98%与 55.56%、91.04%与 82.35%、80.00%与 81.82%;CCTA-SS 的 ROC 曲线下面积明显大于 CCTA( $P < 0.05$ ),CCTA-SS 与 ICA 的 ROC 曲线下面积差异无统计学意义。37 例患者接受 PCI 治疗,其中 36 例(97.30%)CCTA-SS  $\geq 70\%$ ,提示心肌缺血;64 例接受药物治疗,其中 56 例(87.50%)CCTA-SS  $< 70\%$ ,提示无心肌缺血。8 例患者再次住院,其中 2 例接受 PCI 治疗,CCTA-SS 再次评分  $> 70\%$ ,6 例接受药物治疗,CCTA-SS 再次评分  $< 70\%$ 。 结论:CCTA-SS 在判断冠状动脉解剖狭窄的同时,可反映供血区心肌功能,提高 CCTA 评价冠状动脉缺血相关病变的能力。

**【关键词】** 冠状动脉疾病;冠状动脉计算机断层造影;缺血相关病变;冠状动脉造影;血流储备分数

doi:10.3969/j.issn.1673-6583.2021.01.011

**Clinical value of coronary CT angiography stenosis score in quantitative assessment of ischemic-related lesions** XIONG Qingfeng<sup>1</sup>, FU Xiaorong<sup>2</sup>, LYU Fengfu<sup>1</sup>, GUO Shengpeng<sup>1</sup>. 1. Department of Radiology, the Affiliated Asia Heart Hospital of Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430022; 2. Department of Pediatrics, the Affiliated Wuhan Wuchang Hospital of Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430063, China

**【Abstract】** **Objective:** To analyze the clinical value of coronary CT angiography (CCTA) stenosis score (CCTA-SS) in quantitative assessment of ischemic-related lesions. **Methods:** Patients with suspected coronary artery disease (CAD) diagnosed by CCTA, who represented single vessel lesion in left anterior descending (LAD) coronary artery, were included. All the patients underwent invasive coronary angiography (ICA) and fractional flow reserve (FFR) within one week after admission. The

基金项目:武汉市卫健委医学项目(WX18C01)

作者单位:430022 武汉科技大学附属武汉亚洲心脏病医院放射科(熊青峰,吕丰甫,郭生鹏);430063 武汉科技大学附属武汉市武昌医院儿科(付晓荣)

通信作者:付晓荣,E-mail:393450082@qq.com

image features were analyzed and the value of CCTA-SS was calculated. Ischemic-related lesion was defined as the value of CCTA-SS $\geq$ 70%. The accuracy of CCTA, ICA and CCTA-SS was evaluated in receiver operating characteristic (ROC) analysis, using FFR $\leq$ 0.80 as a reference standard for diagnosing CAD. Percutaneous coronary intervention (PCI) was performed in patients with FFR $\leq$ 0.80. And the patients were followed-up. **Results:** A total of 101 patients were included. There were 35 cases with the high-risk plaque, and 37 cases with FFR $\leq$ 0.80. There was statistically significant difference in the early myocardial perfusion and the myocardial function between the anterior and the lateral wall ( $P<0.001$ ). The diagnostic accuracy of CCTA, ICA, and CCTA-SS was 46.53%, 66.34%, 89.11%, respectively. The cutoff value was 60%, 66% and 38%, respectively. And the sensitivity was 82.98%, 91.04%, and 80.00%, respectively with specificity of 55.56%, 82.35%, and 81.82%. The area under the curve (AUC) of CCTA-SS was bigger than that of CCTA ( $P<0.05$ ). There was not statistically significant difference between CCTA-SS and ICA ( $P>0.05$ ). PCI was performed in 37 cases, and there were 36 cases (97.30%) with CCTA-SS $\geq$ 70%, which indicated ischemic-related lesions. Sixty-four patients received drug treatment, and among them 56 cases (87.50%) presented with CCTA-SS $<$ 70%, indicating non-ischemic-related lesions. Eight patients were hospitalized again, among whom 2 cases underwent PCI with CCTA-SS $>$ 70%. Six patients accepted drug treatment with CCTA-SS $<$ 70%. **Conclusions:** CCTA-SS could reflect the myocardial function of the blood supply area while judging the coronary artery anatomical stenosis, and significantly improve the ability of CCTA to evaluate coronary artery ischemia related lesions.

**【Key words】** Coronary artery disease; Coronary computed tomography angiography; Imaging characteristics; Ischemic-related lesions; Coronary angiography; Fractional flow reserve

冠状动脉疾病目前仍然是住院患者死亡的主要原因<sup>[1]</sup>,临床中为了避免漏诊常借助多种医学影像手段辅助诊断,但心脏事件的漏诊率并未减少<sup>[2]</sup>,可能是临床对该类患者风险程度的识别存在局限性。传统的风险分层算法是对冠状动脉疾病高危因素进行计算,依据 logistic 回归分析赋予一定分值<sup>[3]</sup>,比如 Framingham 风险评分,但在单独使用时,其风险分层能力有限<sup>[4]</sup>。钙化评分可以预测患者预后,提高对患者风险的识别能力,已成为无症状患者风险分层的重要工具<sup>[5]</sup>,但增加了患者的辐射风险。冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)作为冠状动脉粥样硬化性心脏病(冠心病)重要的无创性检查手段,已被用于低-中度风险急性冠脉综合征(ACS)患者的筛查<sup>[6]</sup>。将心肌节段性心肌功能与冠状动脉解剖狭窄相结合可明显提高 CCTA 诊断冠状动脉疾病的准确性<sup>[7-8]</sup>。尽管 CCTA 的一些功能参数可以提高对冠状动脉病变的识别能力<sup>[9]</sup>,但辐射剂量及对比剂肾病限制了其广泛应用<sup>[10]</sup>。CT 血流储备分数(CT-FFR)可同时提供冠状动脉解剖信息与功能信息<sup>[11]</sup>,但明显的钙化斑块、呼吸和运动伪影、弥漫性病变会干扰结果的判断<sup>[12]</sup>。本研究引入冠状动脉 CT 血管造影狭窄评分(CCTA-SS),以侵入性血流储备分数(FFR)为金标准,旨在阐明其

在诊断冠状动脉缺血相关病变中的临床价值。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

回顾性分析 2012 年 2 月至 2019 年 8 月 2 603 例因胸痛接受 CCTA 检查,诊断为冠状动脉左前降支单支病变,并在 1 周内接受侵入性冠状动脉造影(ICA)以及 FFR 检查的患者的临床资料。最终入选 101 例患者,其中诊断为非 ST 段抬高型心肌梗死 4 例,不稳定型心绞痛 77 例,隐匿性心肌缺血 7 例,稳定型心绞痛 13 例。排除患者包括 ICA 检查后未行侵入性 FFR 检查 2 385 例,ICA 与 CCTA 检查时间间隔 $>$ 1 周 31 例,经皮冠状动脉介入术(PCI)或冠状动脉旁路移植术后胸痛 4 例,左心功能不全(射血分数 $<$ 30%)28 例,CCTA 检查中出现心脏事件 5 例,CCTA 检查图像质量不佳 19 例,合并心脏瓣膜病或行瓣膜置换术 8 例,血管直径 $<$ 2 mm 8 例,深肌桥或弥漫性心肌桥 14 例。

### 1.2 CCTA 及心肌早期血流灌注

使用西门子 SOMATOM Definition Flash 二代双源 CT 机。行心脏平扫,扫描范围为气管分叉下方 10~15 mm 至心脏膈面。随后行 CCTA 检查,注射对比剂欧乃派克(流率 3.9~4.3 mL/s,用量 40~50 mL)和 30 mL 生理盐水(流速 3.0 mL/s)。

使用对比剂示踪技术,在主肺动脉窗层面降主动脉管腔内选择感兴趣区监测 CT 值,触发阈值为 120 HU,延迟 4 s 自动启动扫描,获取心肌早期血流灌注信息。扫描参数:前瞻性心电门控扫描,120 kV,选用自动毫安秒技术,层厚 0.75 mm,层间距 0.4 mm。重建 35%~75% 期相图像,将所有成像数据传入工作站,行最大密度投影(MIP)、多平面重建(MPR)和曲面重建(CPR)成像,要求主动脉根部 CT 值为 330~380 HU。筛选出图像质量最佳者,于左室短轴乳头肌水平比较左室前壁与左室侧壁心肌 CT 值差异,将差值低于 20 HU 定义为左室前壁心肌早期血流灌注减低<sup>[13]</sup>。

### 1.3 冠状动脉管壁斑块特征及管腔狭窄程度的判断

采用美国心脏协会冠状动脉改良分段方法,由 5 名放射科高年资医师对冠状动脉 15 个主要节段进行评价,选择左冠状动脉前降支单支病变进行分析。运用后处理软件分析斑块特征,根据富脂斑块(CT<30 HU)、斑点钙化、餐巾环征和血管重构指数>1.10 确定高风险斑块。血管管腔狭窄程度=(病变近端正常管腔的直径-病变处管腔的直径)/病变近端正常管腔的直径×100%。

### 1.4 左室节段心肌功能分析

分别于舒张期(二尖瓣完全开放)及收缩期(二尖瓣完全关闭)的心脏短轴面测量心肌厚度,并计算心肌增厚率<sup>[9]</sup>。

### 1.5 ICA 和 FFR 测量

常规冠状动脉造影按照标准临床实践进行。冠状动脉内注射三硝酸甘油酯(100  $\mu\text{g}/\text{min}$ )以减少血管痉挛,肘前静脉注射三磷酸腺苷(140  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )。在冠状动脉稳态充血时,使用 Radianalyzer Xpress (St. Jude Medical Company, St. Paul, Minn)评估 FFR,FFR=狭窄远端压力传感器测量的平均冠状动脉压力/导管测量的平均主动脉压力。FFR $\leq$ 0.80 可认为狭窄病变导致供应区域缺血<sup>[14]</sup>。ICA $\geq$ 70%可认为缺血相关狭窄。

### 1.6 CCTA-SS

CCTA-SS 是以传统 CCTA 为基础的评分方法,传统 CCTA 诊断冠心病的标准基于冠状动脉造影管腔直径狭窄 $>50\%$ 的金标准<sup>[15]</sup>,但 CCTA 受到图像质量、心率、心律、钙化等诸多因素影响,诊断准确度降低。CCTA-SS 对与心肌缺血损伤直接相关的 4 个方面进行评分,即管壁斑块特征、冠状动脉

解剖狭窄程度、心肌早期灌注以及与狭窄直接相关的节段心肌功能,运用二元 logistic 回归分析确定附加值,并依据各要素对冠心病发病的贡献大小进行矫正,其中管壁斑块特征最大评分值赋予 24%,冠状动脉解剖狭窄程度最大评分值赋予 50%。冠状动脉狭窄程度 $\geq 70\%$ 可以导致静息状态下心肌缺血<sup>[16]</sup>,心肌缺血时心肌早期灌注减低,当心肌缺血加重出现缺血损伤时,即可出现心肌功能减退,包括心肌舒张功能和心肌收缩功能降低。因此,在冠状动脉血管解剖形态的基础上按照贡献值大小追加 5%~35%。运用 CCTA-SS 狭窄定量评分软件求所有数值的总分值,得到 CCTA-SS 值(见表 1,图 1、图 2)。当 CCTA-SS $\geq 70\%$ 时,即可认为存在缺血相关的冠状动脉狭窄。

### 1.7 统计学分析

采用 MedCalc 18.2.1 软件进行统计学分析,计量资料用均数 $\pm$ 标准差表示,组间比较采用 *t* 检验或单因素方差分析,计数资料用百分率表示, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。CCTA、ICA、CCTA-SS 均以数值 $\geq 70\%$ 判断冠状动脉缺血相关狭窄,以 FFR $\leq 0.80$ 为标准,评价三者诊断的准确性,并比较三者受试者工作特征(ROC)曲线。

## 2 结果

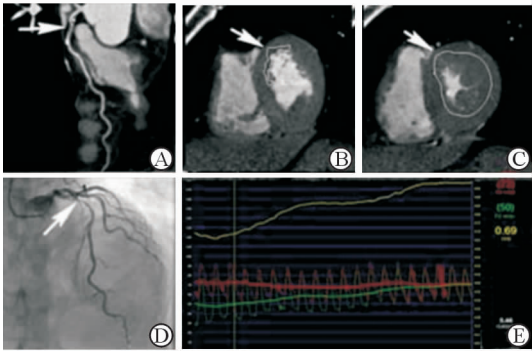
本研究最终入选 101 例患者,平均年龄为(60.16 $\pm$ 9.35)岁,其中男性 60 例(59.41%),不稳定型心绞痛 77 例(76.24%)。冠状动脉存在高风险斑块 35 例(34.65%)。左室前壁与侧壁心肌早期灌注及心肌功能差异明显( $P$ 均 $<0.001$ ),见表 2。以 $\geq 70\%$ 为界值,CCTA、ICA、CCTA-SS 判断缺血相关病变的准确率分别为 75.25%、64.36%、32.67%。以 FFR $\leq 0.80$ 为金标准,三者诊断准确率分别为 46.53%、66.34%、89.11%,最佳截断值分别为 60%、66%、38%,诊断缺血相关病变的敏感度和特异度分别为 82.98%与 55.56%、91.04%与 82.35%、80.00%与 81.82%,见图 3。CCTA-SS 的 ROC 曲线下面积明显大于 CCTA( $P=0.035$ ),CCTA-SS 与 ICA 的 ROC 曲线下面积差异无统计学意义。患者平均随访 27 个月,接受 PCI 治疗 37 例,其中 36 例(97.30%)CCTA-SS $\geq 70\%$ ,提示心肌缺血;接受药物治疗 64 例,其中 56 例(87.50%)CCTA-SS $<70\%$ ,提示无心肌缺血。在接受药物治疗的患者中,有 2 例再次入院接受 PCI 治疗,再次评分 CCTA-SS $>70\%$ ,6 例再次入院仍接受药物治疗,再次评分 CCTA-SS $<70\%$ 。

表 1 CCTA-SS 定量评分

项目	分值
斑块特点	钙化斑块
	纤维斑块
	高风险斑块
	偏心性斑块
	向心性斑块
	局限性斑块
	节段性斑块
	弥漫性斑块
管腔狭窄程度	<50%
	≥50%且<70%
	≥70%且<90%
	≥70%且<90%
	≥95%
心肌早期灌注	心内膜下灌注降低
	透壁性灌注降低
舒张末期心肌厚度	心肌局限性变薄
	心肌节段性变薄
心肌增厚率	轻度降低
	中度降低
	重度降低

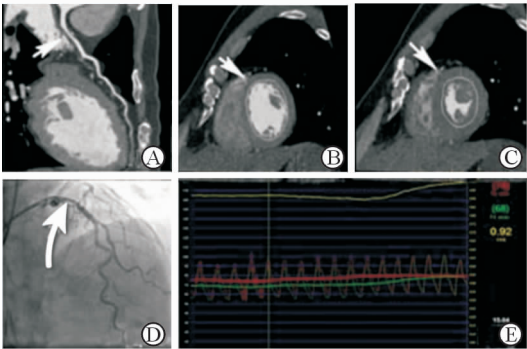
表 2 左室节段性心肌功能分析(n=101)

	节段心肌早期灌注/HU	舒张末期节段心肌厚度/mm	节段心肌增厚率/%
左室前壁	69.01±10.33	6.53±1.34	42.43±11.43
左室侧壁	93.09±7.91	8.27±0.93	52.70±5.60
t	18.60	10.73	8.12
P	<0.001	<0.001	<0.001



注:患者男性,63 岁,冠心病,不稳定型心绞痛;A 为 CCTA 图像,箭头所指为左冠状动脉前降支近中段管壁弥漫性高风险斑块,管腔向心性重度狭窄(70%~90%),评分 54%;B 为 CCTA 下左室短轴乳头肌水平左室舒张末期心肌早期血流灌注,箭头所示前壁心内膜下心肌早期血流灌注减低伴舒张末期前壁心肌厚度局限性变薄,评分 10%;C 为 CCTA 下左室短轴乳头肌水平左室收缩末期心肌厚度,箭头所示前壁心肌增厚率中度减低,评分 10%,计算 CCTA-SS 总分为 74%,提示缺血相关病变;D 为侵入性冠状动脉造影图像,箭头所指为左冠状动脉前降支近中段管腔狭窄 80%;E 示压力导丝测得 FFR 值为 0.69

图 1 CCTA-SS 评价不稳定型心绞痛患者缺血相关管腔狭窄



注:患者女性,61 岁,冠心病,不稳定型心绞痛;A 为 CCTA 图像,箭头所指为左冠状动脉前降支近中段管壁局限性纤维斑块,管腔向心性重度狭窄(70%~90%),评分 46%;B 示 CCTA 下舒张末期左室短轴面心肌密度均匀,无早期灌注降低,无心肌变薄;C 示 CCTA 下左室短轴前壁心肌功能正常,计算 CCTA-SS 总分为 46%,提示非缺血相关病变;D 为侵入性冠状动脉造影图像,箭头所指为左冠状动脉近中段管腔狭窄 40%;E 示压力导丝测得 FFR 值为 0.92

图 2 CCTA-SS 评价不稳定型心绞痛患者非缺血相关管腔狭窄

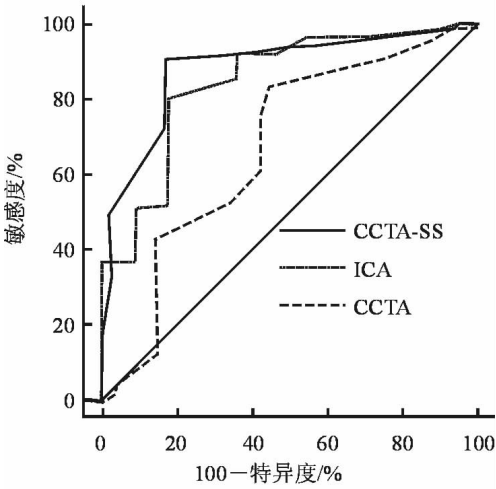


图 3 CCTA、ICA、CCTA-SS 诊断缺血相关病变 ROC 曲线

3 讨论

在冠心病的诊断方法中,无创性影像学检查手段具有自身优势,但由于单纯依据血管解剖形态进行判断,容易受到呼吸运动伪影、钙化伪影以及心率等因素的干扰,导致误诊或漏诊。CCTA-SS 纳入了冠状动脉管壁斑块特征、管腔狭窄程度、心肌早期灌注以及心肌功能等方面的内容<sup>[17-19]</sup>,理论上可提高冠心病诊断的准确性。

冠心病患者在心肌血供、血氧出现供需失衡时可出现心肌缺血,诱发心绞痛发生。本研究中,77 例患者为不稳定型心绞痛,依据临床症状判断,存在缺血性病变的患者为 81 例,占 80.20%,以狭窄程度值≥70%来判断缺血相关病变,CCTA 的诊断准确性最高

(75.25%), ICA 次之(64.36%)。以  $\text{FFR} \leq 0.80$  为标准判断缺血相关病变时, CCTA-SS 诊断准确性(89.11%), 略高于临床(80.20%), 这可能由于临床症状常晚于心肌病理生理改变, 即部分患者虽然存在心肌缺血, 但并不表现为心绞痛。因此, 仅依据临床典型表现来判断心肌缺血状态可能会漏掉急需处理的部分病例。而 ICA 诊断准确性(66.34%)略低于临床, 可能由于 ICA 判断为非缺血相关病变的部分病例中实际上存在心肌缺血。因此, 单纯依据管腔解剖狭窄进行判断存在一定局限性, 解剖形态学与功能学的结合有望提高 CCTA 的诊断精准性。

需要紧急处理的冠心病患者的冠状动脉管壁斑块性质常表现为高风险斑块<sup>[18]</sup>。本研究中, 通过 CCTA 发现 35 例(34.65%)患者冠脉有高风险斑块, CCTA-SS 是以传统 CCTA 为基础的, 因此同样具备识别高风险斑块的特性。由于高风险斑块存在斑块破溃、糜烂或由此导致的管腔急性狭窄闭塞等多种形态, 因此单纯依据上述形态判断冠心病严重程度可能会漏掉部分闭塞后再通的急诊患者。对冠状动脉管腔急性狭窄患者而言, 当管腔狭窄到一定程度时, 下游心肌会因血流灌注的减低而出现心肌缺血以及心肌功能降低<sup>[20]</sup>。CCTA-SS 由于结合了心肌早期灌注即心肌功能等指标, 拓展了诊断视野。本研究显示, 与左室侧壁心肌相比, 前壁心肌早期灌注以及心肌增厚率显著降低, 证实心肌缺血后改变往往继发于冠状动脉急性病变, 重视心肌缺血后改变可以避免漏诊部分急诊病例。

从三者诊断的 ROC 曲线分析来看, 由于结合了解剖形态学与功能学指标, CCTA-SS 明显优化了 CCTA 的诊断曲线( $P = 0.035$ )。分析三者的最佳截断值可见, CCTA-SS 在保持较高敏感度的前提下, 明显提高了 CCTA 诊断缺血相关病变的特异性。

在平均随访 27 个月后, 97.30%的  $\text{FFR} \leq 0.80$  的冠心病患者 CCTA-SS  $\geq 70\%$ , 属于缺血相关狭窄, 治疗方式倾向于行 PCI; 87.50%的  $\text{FFR} > 0.80$  的冠心病患者 CCTA-SS  $< 70\%$ , 属于非缺血相关狭窄, 治疗方式倾向于药物保守治疗。对于接受药物治疗后因胸痛症状不缓解而再次入院的患者, 依据 CCTA-SS 数值也可以做出鉴别, 当 CCTA-SS  $\geq 70\%$  时, 需要行血管再通术治疗, 而当 CCTA-SS  $< 70\%$  时, 更倾向于药物保守治疗。可见 CCTA-SS 整合了与冠心病心肌缺血相关的参数后, 其判断缺血相关

病变的准确性明显提高。

CCTA-SS 以传统的评价冠状动脉解剖狭窄的 CCTA 为基础, 整合了反映冠心病严重程度的其他影像学特征, 对比传统 CCTA, 可明显提高对缺血相关病变的识别能力及冠心病诊断的准确性。本研究为单中心回顾性分析, 排除了冠状动脉旁路移植术、有支架植入史以及合并瓣膜病的患者, CCTA-SS 在这些患者中的应用需要进一步完善。

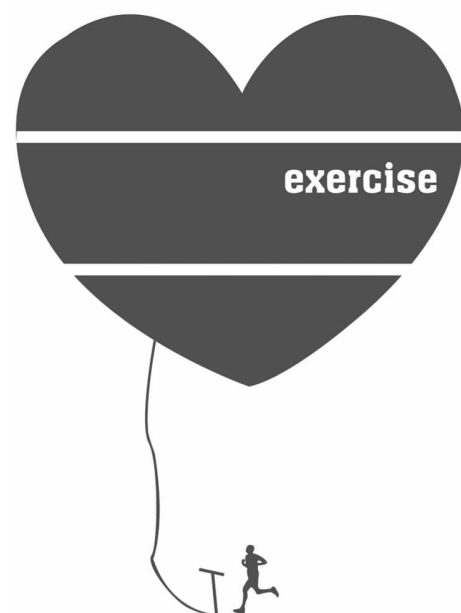
### 参 考 文 献

- [1] Go AS, Mozaffarian D, Roger VL, et al. Heart disease and stroke statistics—2014 update: a report from the American Heart Association[J]. Circulation, 2014, 129(3):e28-e292.
- [2] Siontis GC, Mavridis D, Greenwood JP, et al. Outcomes of non-invasive diagnostic modalities for the detection of coronary artery disease: network meta-analysis of diagnostic randomised controlled trials[J]. BMJ, 2018, 360:k504.
- [3] Six AJ, Backus BE, Kelder JC. Chest pain in the emergency room: value of the HEART score[J]. Neth Heart J, 2008, 16(6):191-196.
- [4] Vergallo R, Xing L, Minami Y, et al. Associations between the Framingham Risk Score and coronary plaque characteristics as assessed by three-vessel optical coherence tomography[J]. Coron Artery Dis, 2016, 27(6):460-466.
- [5] Lehmann N, Erbel R, Mahabadi AA, et al. Value of progression of coronary artery calcification for risk prediction of coronary and cardiovascular events: result of the HNR study (heinz nixdorf recall)[J]. Circulation, 2018, 137(7):665-679.
- [6] Roffi M, Patrono C, Collet JP, et al. 2015 ESC guidelines for the management of acute coronary syndromes in patients presenting without persistent ST-segment elevation task force for the management of acute coronary syndromes in patients presenting without persistent ST-segment elevation of the European Society of Cardiology (ESC)[J]. Eur Heart J, 2016, 37(3):267-315.
- [7] 熊青峰, 陈艳, 陈险峰, 等. 双源 CTA 评价非 ST 段抬高型急性冠脉综合征[J]. 放射学实践, 2017, 32(1):33-36.
- [8] Ko BS, Cameron JD, Leung M, et al. Combined CT coronary angiography and stress myocardial perfusion imaging for hemodynamically significant stenoses in patients with suspected coronary artery disease: a comparison with fractional flow reserve[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2012, 5(11):1097-1111.
- [9] Wong DT, Ko BS, Cameron JD, et al. Transluminar 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] Afshar AE, Parikh PB. Prevention of contrast and radiation

- injury during coronary angiography and percutaneous coronary intervention [J]. *Curr Treat Options Cardiovasc Med*, 2018, 20(4):32.
- [11] 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.
- [12] Donnelly PM, Kolosváry M, Karády J, et al. Experience with an on-site coronary computed tomography-derived fractional flow reserve algorithm for the assessment of intermediate coronary stenoses[J]. *Am J Cardiol*, 2018, 121 (1):9-13.
- [13] Iwasaki K, Matsumoto T. Myocardial perfusion defect in patients with coronary artery disease demonstrated by 64-multidetector computed tomography at rest[J]. *Clin Cardiol*, 2011, 34(7):454-460.
- [14] Pijls NH, Fearon WF, Tonino PA, et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention in patients with multivessel coronary artery disease; 2-year follow-up of the FAME (Fractional Flow Reserve Versus Angiography for Multivessel Evaluation) study[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2010, 56(3):177-184.
- [15] Gould KL, Lipscomb K, Hamilton GW. Physiologic basis for assessing critical coronary stenosis. Instantaneous flow response and regional distribution during coronary hyperemia as measures of coronary flow reserve [J]. *Am J Cardiol*, 1974, 33(1):87-94.
- [16] 胡盛寿, 高润霖, 杨跃进, 等. 中国冠状动脉血运重建适宜性标准的建议(试行)[J]. *中国循环杂志*, 2016, 31(4): 313-317.
- [17] Bischoff B, Bamberg F, Marcus R, et al. Optimal timing for first-pass stress CT myocardial perfusion imaging[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2013, 29(2):435-442.
- [18] Nakazato R, Otake H, Konishi A, et al. Atherosclerotic plaque characterization by CT angiography for identification of high-risk coronary artery lesions: a comparison to optical coherence tomography[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(4):373-379.
- [19] Takamura K, Fujimoto S, Kondo T, et al. Incremental prognostic value of coronary computed tomography angiography: high-risk plaque characteristics in asymptomatic patients [J]. *J Atheroscler Thromb*, 2017, 24 (11): 1174-1185.
- [20] Dweck MR, Williams MC, Moss AJ, et al. Computed tomography and cardiac magnetic resonance in ischemic heart disease[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 68(20): 2201-2216.

(收稿:2020-04-17 修回:2020-11-23)

(本文编辑:胡晓静)



运动演绎精彩

健康成就未来