

本文引用: 韦佳, 鲍海华, 王雪燕, 等. 基于人工智能的 CT-FFR 与冠状动脉狭窄的相关性分析[J]. 中国动脉硬化杂志, 2022, 30(9): 787-792. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2022.09.007.

[文章编号] 1007-3949(2022)30-09-0787-06

· 临床研究 ·

基于人工智能的 CT-FFR 与冠状动脉狭窄的相关性分析

韦佳, 鲍海华, 王雪燕, 拜昕

(青海大学附属医院医学影像中心, 青海省西宁市 810001)

[关键词] 冠心病; CT-血流储备分数; 冠状动脉 CT 血管成像; 钙化积分; 狭窄程度

[摘要] [目的] 应用基于人工智能的 CT-血流储备分数(CT-FFR)探讨冠心病患者冠状动脉狭窄程度、钙化积分与冠状动脉血流动力学的相关性。[方法] 回顾性收集 206 例青海大学附属医院 2020 年 9 月—2021 年 4 月接受冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)的疑似冠心病患者的临床及影像资料,通过人工智能软件分析患者的左前降支、左回旋支、右冠状动脉的 CT-FFR 值、钙化积分及狭窄程度,根据 CT-FFR 值将所有患者分为两组:有功能意义组($CT-FFR \leq 0.8$)和无功能意义组($CT-FFR > 0.8$),分析两组间冠状动脉狭窄程度、钙化积分与冠状动脉血流动力学的相关性。[结果] 206 例患者共有 365 支血管纳入研究,其中有功能意义组 139 支血管,无功能意义组 226 支血管。CT-FFR 与狭窄程度($r = -0.473, P < 0.001$)、钙化积分($r = -0.369, P < 0.001$)呈中度负相关,钙化积分与狭窄程度呈极弱正相关($r = 0.141, P = 0.007$)。与无功能意义组相比,有功能意义组患者男性占比高,发病年龄大,高血压、吸烟史比例均更高。[结论] 冠状动脉狭窄程度和钙化积分是造成冠状动脉血流动力学异常的重要因素,CT-FFR 有助于 CCTA 在冠状动脉病变中的功能学评估。

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

Correlation analysis between CT-FFR and coronary stenosis based on artificial intelligence

WEI Jia, BAO Haihua, WANG Xueyan, BAI Xin

(Department of Medical Imaging Center, the Affiliated Hospital of Qinghai University, Xining, Qinghai 810001, China)

[KEY WORDS] coronary heart disease; CT-fractional flow reserve; coronary CT angiography; calcification score; degree of stenosis

[ABSTRACT] **Aim** To investigate the correlation between coronary artery stenosis, calcification score and coronary hemodynamics in patients with coronary heart disease based on the CT-fractional flow reserve (CT-FFR) of artificial intelligence. **Methods** The clinical and coronary CT angiography (CCTA) datas of 206 patients with suspected coronary heart disease in the Affiliated Hospital of Qinghai University from September 2020 to April 2021 were included in this study retrospectively. The CT-FFR, coronary artery calcification score and stenosis degree of coronary artery were analyzed by artificial intelligence software, including left anterior descending artery, left circumflex branch and right coronary artery. The patients were divided into two groups according to the CT-FFR value. The vessels with $CT-FFR \leq 0.8$ were divided into functional meaning group, and the rest are non-functional meaning group. The correlations between coronary artery stenosis and calcification score and coronary hemodynamics were analyzed. **Results** 365 blood vessels from 206 patients were included in the study, and there were 139 blood vessels in the functional meaning group and 226 blood vessels in the non-functional meaning group. Degree of coronary stenosis ($r = -0.473, P < 0.001$) and calcification score ($r = -0.369, P < 0.001$) were negatively correlated with CT-FFR, and the calcification score was weakly correlated with the degree of stenosis ($r = 0.141, P = 0.007$). Compared with non-functional meaning group, the age of onset was older, and the proportion of male patients, hypertension, smoking history were significantly higher than those in the non-functional meaning group. **Conclusion** Degree of coronary stenosis and calcification score are important factors affecting coronary hemodynamics, CT-FFR is helpful for the functional evaluation of CCTA in coronary artery disease.

[收稿日期] 2021-12-06

[修回日期] 2022-02-24

[基金项目] 青海省医学影像临床重点专科资助项目(2020-1301)

[作者简介] 韦佳, 硕士研究生, 研究方向为心血管影像, E-mail: 736092627@qq.com。通信作者鲍海华, 硕士, 主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向为心脑血管疾病研究, E-mail: baohelen2@sina.com。

冠心病在我国的发生率及病死率呈逐年上升的趋势^[1],冠状动脉 CT 血管成像(coronary CT angiography, CCTA)是公认的评估冠心病的首选无创检查方法^[2],用以提供冠状动脉解剖学信息,但缺乏对心肌血供的功能学评估。目前,有创性冠状动脉造影(invasive coronary angiography, ICA)和血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)是评价冠心病解剖及生理功能的“金标准”,但由于其属于有创检查,存在损伤血管的风险,且有药物禁忌证等局限性,这大大限制了 FFR 在临床中的应用^[3]。经大量的研究证明,基于 CCTA 数据获得的 CT-血流储备分数(CT-fractional flow reserve, CT-FFR)可以从结构和功能上评估冠状动脉狭窄所致的心肌缺血,并被有创 FFR 验证其具有较高的诊断效能^[4-5],应用于临床可以提高 ICA 阳性率,减少冠心病患者的医疗费用及不必要的血运重建。目前关于 CT-FFR 与冠状动脉狭窄等解剖学信息的相关性分析较少。因此,本研究基于冠状动脉计算机断层造影使用人工智能来量化冠状动脉的狭窄程度、钙化积分、斑块性质,探讨这些因素与冠心病患者病变血管血流动力学的相关性。

1 资料和方法

1.1 研究对象

回顾性分析青海大学附属医院 2020 年 9 月—2021 年 4 月接受 CCTA 检查的 206 例疑似冠心病患者的临床及影像资料。临床资料包括年龄、性别、体质指数(body mass index, BMI)、高血压、糖尿病、血脂异常病史、总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDLC)、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDLC)、心绞痛病史、心律失常病史、当前吸烟情况等。纳入标准:①可视化评估管腔直径狭窄 $>25\%$;②狭窄处管腔参考直径 >2 mm。排除标准:①既往接受冠状动脉介入治疗或冠状动脉搭桥手术者;②纵深型或弥漫性心肌桥患者;③CCTA 图像质量不佳。所有患者年龄 38~90 岁,平均 (64 ± 11) 岁,男性 136 例,女性 70 例,具有冠状动脉直径狭窄病变 356 处。根据 CT-FFR 值分成两组:有功能意义组(CT-FFR ≤ 0.8 , $n=139$)和无功能意义组(CT-FFR > 0.8 , $n=226$)。

1.2 CCTA 扫描

所有 CCTA 检查均采用 256 排 CT(Revolution

CT, GE Healthcare),行心脏前瞻性心电门控螺旋式扫描。扫描过程中嘱患者自由呼吸,扫描范围从气管分叉至膈肌下 1 cm 左右,覆盖心脏。首先进行钙化积分扫描,在心脏周期 75%(心率 <65 次/分)或 45%(心率 >65 次/分)的情况下,进行前瞻性心电图触发钙评分扫描;其次进行冠状动脉扫描,采用双筒高压注射器行增强扫描,经肘静脉以流速 4~5 mL/s 注入对比剂碘海醇 6~80 mL,随后注入 40 mL 生理盐水。心脏扫描前行 Auto-gating 监测,采用对比剂自动跟踪阈值触发技术,触发阈值 280 Hu,触发后延迟 2 s 开始扫描,采用迭代重建(ASiR-V)技术进行重建;准直器宽度 256 \times 0.625 mm,扫描层厚 0.625 mm,重建层厚 0.625 mm,重建间隔 0.450 mm。

1.3 人工智能后处理

扫描原始数据使用冠状动脉运动追踪最佳期相选择技术,选取血管显示较好的一组期相进行追踪冻结算法重建,分别将追踪冻结重建图像上传至数坤科技冠状动脉 AI 辅助诊断系统(Coronary Doc)、钙化积分及 AI 血流储备分数测量系统。CT-FFR ≤ 0.8 认为存在血流储备异常。血管狭窄程度分级:轻度狭窄组(狭窄程度 $\leq 50\%$),中度狭窄组($50\% <$ 狭窄程度 $\leq 75\%$),重度狭窄组(狭窄程度 $> 75\%$);冠状动脉钙化积分通过 Agatston 评分分为 0 级(0 分)、1 级(1~99 分)、2 级(100~299 分)、3 级(≥ 300 分)。以上结果由两名经验丰富的影像科医生独立分析。

1.4 统计学处理

数据分析采用 SPSS 22.0 统计软件,计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,组间比较采用 t 检验或秩和检验;计数资料以率/百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验;采用 Spearman 相关分析。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者基线临床资料比较

有功能意义组患者年龄、男性占比、高血压占比、吸烟史占比、TG 水平均显著高于无功能意义组($P<0.05$),HDLC 水平显著低于无功能意义组;两组 BMI、糖尿病占比、血脂异常占比、肌酐水平等差异均无统计学意义(表 1)。

2.2 患者冠状动脉病变特征比较

与无功能意义组相比,有功能意义组患者冠状动脉重度狭窄程度更高,钙化程度更重,部分钙化斑块占比更高,差异有统计学意义($P=0.000$;表 2)。

表 1. 两组一般临床资料比较

Table 1. Comparison of general clinical data between the two groups

项目	CTFFR>0.8 (n=226)	CTFFR≤0.8 (n=139)	P 值
男性/[例(%)]	147(65.04)	108(77.69)	0.011
年龄/岁	62.63±11.03	67.68±10.96	0.000
BMI/(kg/m ²)	24.05±3.32	24.42±3.28	0.693
血脂异常/[例(%)]	137(60.61)	79(56.83)	0.475
高血压/[例(%)]	114(50.44)	88(63.31)	0.016
吸烟史/[例(%)]	69(30.53)	60(43.17)	0.014
糖尿病/[例(%)]	79(34.95)	61(43.88)	0.088
肌酐/(μmol/L)	71.05±20.0	70.77±17.48	0.951
TC/(mmol/L)	3.95±0.86	4.01±1.06	0.611
TG/(mmol/L)	1.64±0.92	2.04±1.84	0.027
HDLc/(mmol/L)	1.02±0.25	0.95±0.25	0.024
LDLc/(mmol/L)	2.39±0.76	2.42±0.90	0.739
心律失常/[例(%)]	69(30.53)	44(31.65)	0.822
心绞痛症状/[例(%)]	49(21.68)	82(58.99)	0.000
稳定型心绞痛	47(20.79)	69(49.64)	
不稳定型心绞痛	2(0.88)	13(9.35)	
无心绞痛	177(78.32)	57(41.01)	

表 2. 两组冠状动脉病变参数比较

Table 2. Comparison of coronary lesion parameters between the two groups

项目	CTFFR>0.8 (n=226)	CTFFR≤0.8 (n=139)	P 值
靶血管/[例(%)]			0.678
前降支	94(41.59)	64(46.04)	
左旋支	52(23.01)	28(20.14)	
右冠状动脉	80(35.39)	47(33.81)	
CT-FFR	0.92±0.05	0.43±0.23	0.000
狭窄程度/[例(%)]			0.000
轻度狭窄	95(42.04)	23(16.54)	
中度狭窄	122(53.98)	67(48.20)	
重度狭窄	9(3.98)	49(35.25)	
钙化积分/[例(%)]			0.000
0 级钙化	70(30.97)	16(11.51)	
1 级钙化	103(45.58)	50(35.97)	
2 级钙化	39(17.26)	39(28.06)	
3 级钙化	14(6.19)	34(24.46)	
钙化积分	71.86±126.45	201.8±237.56	
斑块性质/[例(%)]			0.000
钙化斑块	18(7.96)	7(5.04)	
非钙化斑块	96(42.48)	25(17.98)	
部分钙化斑块	112(49.56)	107(76.98)	

2.3 冠状动脉狭窄程度、钙化积分及 CT-FFR 的相关性分析

Spearman 相关分析显示,冠状动脉狭窄程度($r=-0.473, P<0.001$)、钙化积分($r=-0.369, P<0.001$)与 CT-FFR 呈中度负相关,钙化积分与冠状动脉狭窄程度呈极弱正相关($r=0.141, P=0.007$;图 1-3)。

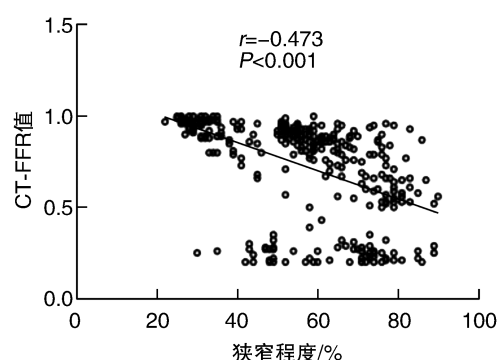


图 1. 狭窄程度与 CT-FFR 的相关性散点图

Figure 1. Scatter plot of correlation between CT-FFR and degree of stenosis

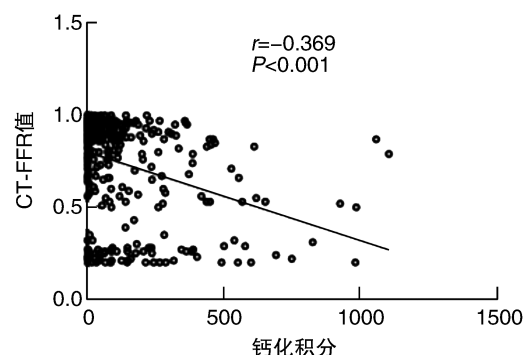


图 2. 钙化积分与 CT-FFR 的相关性散点图

Figure 2. Scatter plot of correlation between CT-FFR and coronary artery calcification score

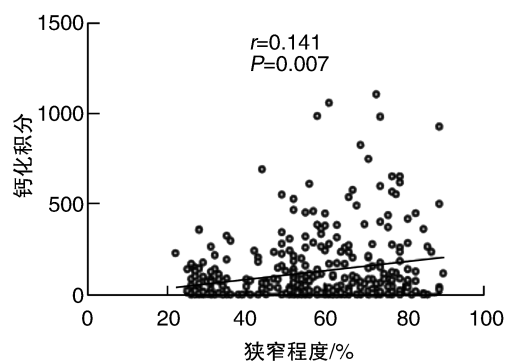


图 3. 狭窄程度与钙化积分的相关性散点图

Figure 3. Scatter plot of correlation between degree of stenosis and coronary artery calcification score

2.4 典型病例 CT 图像

患者,男性,71 岁,具有稳定型心绞痛症状。图 4A 为 CCTA 图像,显示左前降支中远段钙化斑块;图 4B 为冻结算法重建图像,计算出钙化积分为

75.07;图 4C 为基于人工智能的模拟图像,显示左前降支中远段 CT-FFR 值为 0.72;图 4D 为曲面重建图像,显示管腔重度狭窄,最窄处狭窄程度为 73%。

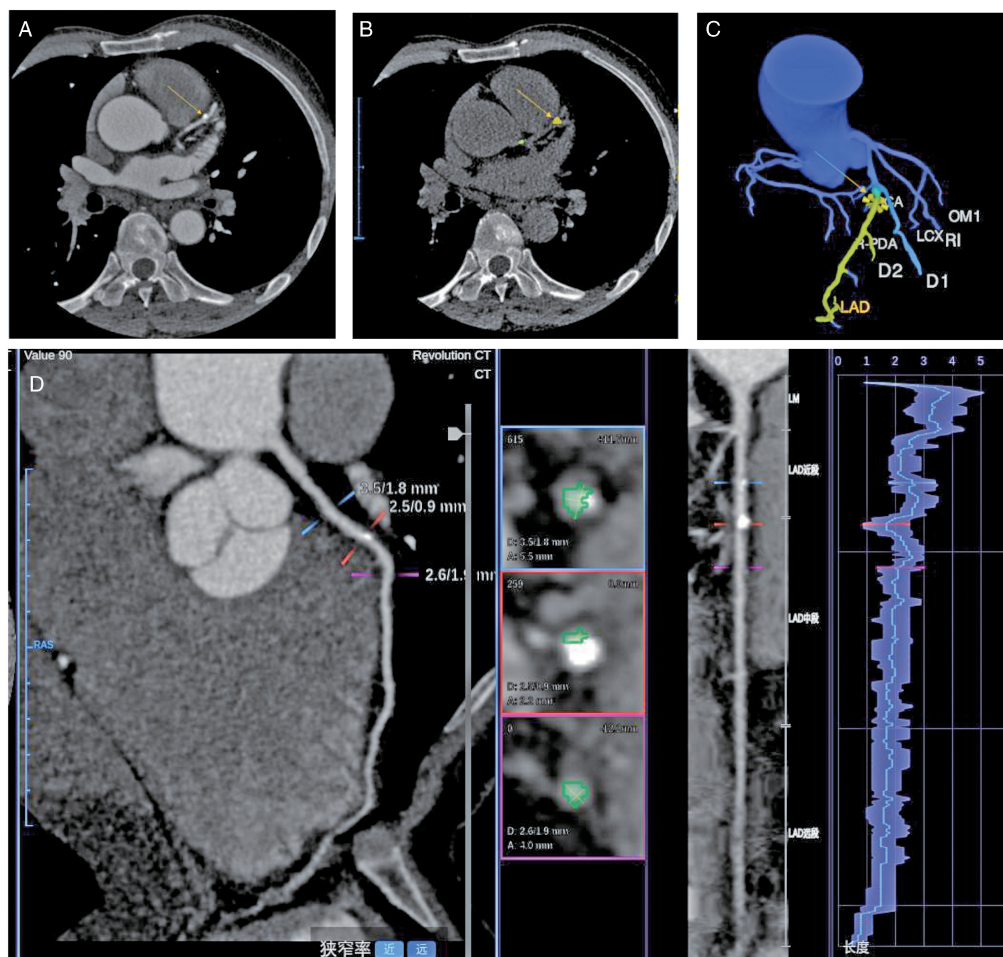


图 4. 某一典型病例 CT 图像
Figure 4. CT image of a typical case

3 讨论

冠心病是指冠状动脉发生粥样硬化引起管腔狭窄或闭塞,进而造成冠状动脉供血和心脏的耗氧平衡失调,心肌暂时或持续的缺血缺氧。目前诊断冠状动脉病变“金标准”是侵入性冠状动脉造影术,其通过介入手段实时显示冠状血管树的分支走行,直观地观察冠状动脉的狭窄情况及病变位置,为冠心病的诊治提供可靠依据,但由于其有创性,部分患者不能耐受。而基于人工智能的 CT-FFR 软件能够无创地快速评估冠状动脉功能性狭窄,进而评估心肌缺血,对指导冠心病患者的治疗策略及优化其临床诊疗路径有重要意义。

病变冠状动脉狭窄程度与 CT-FFR 值呈中度负相关($r = -0.473, P < 0.001$),相关性较好,但与冠状动脉狭窄直接导致心肌缺血的固有认知相比,冠状动脉管腔直径狭窄与冠状动脉病变血流储备功能异常关联欠佳的原因可能不仅包括解剖学狭窄,还有其他可能造成血流动力学异常的因素,比如病变长度、形状、血管内皮功能障碍^[6]、持续冠状动脉痉挛及微循环障碍等。本研究中,有功能意义组高血压、糖尿病、吸烟史占比均较高,高血压、糖尿病、吸烟是导致心肌微循环障碍的危险因素,当微循环存在障碍时,微循环血管结构重塑、管腔壁腔比增加、血管管径变窄,从而增加小血管阻力,限制心肌获得最大血流^[7]。此外,高血压与高血糖也可引起血

管内皮炎症反应,导致血管内皮结构改变、功能障碍,影响冠状动脉微循环扩张能力。

冠状动脉疾病主要涉及脂质积聚和钙沉积,钙化积分是定量分析冠状动脉的常用检测指标之一,能早期发现冠状动脉硬化情况,钙化积分越高的患者冠状动脉的弹性越差^[8],意味着更高的心血管风险,可以用其预测心肌梗死和急性冠状动脉事件^[9]。本研究中,有功能意义组具有更高的钙化评分,钙化积分与 CT-FFR 值呈中度负相关($r = -0.369, P < 0.001$),这和另一研究^[10]得出的结果类似,因此可以认为冠状动脉的钙化程度越重,冠状动脉弹性越差,冠状动脉扩张受限从而导致冠状动脉动力学异常。然而,钙化积分与狭窄程度呈极弱正相关($r = 0.141, P = 0.007$),这与 Nørgaard 等^[11]研究结论相符,表明钙化程度与狭窄程度之间并非完全对应。这是因为当冠状动脉狭窄是由非钙化斑块所致时,钙化积分可为 0;其次,若冠状动脉在粥样硬化的过程中呈代偿性重建扩张,即正性重构时,即使钙化斑块体积较大、钙化积分偏高,仍可能表现为较轻的狭窄程度。

虽然钙化积分与冠状动脉粥样硬化斑块总负荷高度相关^[12],可以辅助进行冠状动脉硬化程度的判断,但是由于钙化斑块成分稳定、沉积缓慢,不易发生脱落而阻塞血管,而非钙化斑块中的纤维及脂质成份是更重要的影响因素^[13]。这与内皮损伤学说有关,脂质过氧化应激反应和炎症反应会对内皮细胞结构造成损伤,引发炎症-纤维增生性反应,促进冠状动脉硬化的发生与发展^[14]。本研究中,有功能意义组的血脂三项 TC、TG、LDLC 水平均较无功能意义组高,而对心血管有保护作用的 HDLC 水平则较无功能意义组低并且具有统计学意义,其水平下降意味着对心血管的保护作用减弱。而富含 TG 的脂蛋白可以引起内皮功能紊乱,其过氧化产物在脂质核内也可参与斑块的破裂,诱发冠状动脉痉挛及闭塞^[15]。本研究中,血流储备异常的冠状动脉中的混合斑块占比显著高于单纯钙化或非钙化斑块。既往也有研究表明,存在脂质坏死核心的易损斑块具有丰富的氧化应激和局部炎症,且有可能降低血管扩张剂的生产和生物利用度,并增加血管收缩剂的含量^[16]。因此,脂质代谢水平的异常和易损斑块的形成可能会导致冠状动脉局部内皮功能障碍,相应节段血管在应激期间不能充分舒张,从而引起冠状动脉血流储备分数下降^[17]。

Pijls 等^[18]发现在有创 FFR 指导的冠状动脉血运重建的病例中,35% 存在中度狭窄(50% ~ 69%)

和 80% 存在重度狭窄($\geq 70\%$)的冠状动脉血管存在血流储备异常。而在本次研究中,48.20% 的中度狭窄和 35.25% 的重度狭窄冠状动脉存在特异性心肌缺血,检出率偏低,这或许与本次样本量小有关。CT-FFR 能有效地区分不需要进一步有创检查或干预的中度狭窄患者(CT-FFR >0.80)和需要进一步检测和干预的高危患者(CT-FFR ≤ 0.80)^[4]。因此,CT-FFR 不仅可以降低患者医疗费用,也为不具备 ICA 资质的地方及基础医院提供筛查工具,有效地提高 ICA 评估患者的阳性率,从而实现分级诊治,优化医疗卫生资源的利用。

本研究的局限性:(1)本研究缺乏冠状动脉造影所获得的 FFR 作为金标准对照,虽然 CT-FFR 的准确性已在大量研究中获得证实。(2)由于本研究中样本量较小,重度狭窄及重度钙化的病变较少,结果可能存在一定的偏倚。(3)本研究分析的斑块成份类型较少,没有详细分析斑块的形态、高危斑块特征等对狭窄程度和血流储备之间的影响,因此需进一步开展大样本、多中心的研究以得到更丰富的数据。(4)本研究缺少患者的基本药物使用情况,如硝酸酯、降压药等,这也会在一定程度上影响本研究的实验结果。

综上所述,冠状动脉狭窄和钙化积分是影响冠心病患者的冠状动脉血流动力学异常的重要因素,但单独评估仍具有局限性,CT-FFR 能拓展 CCTA 对冠状动脉病变的功能学评估,具有十分重要的临床意义及应用前景。

[参考文献]

- [1] 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): 521-545.
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): 521-545.
- [2] DEWEY M, SIEBES M, KACHELRIEB M, et al. Quantitative cardiac imaging study group. clinical quantitative cardiac imaging for the assessment of myocardial ischaemia[J]. Nat Rev Cardiol, 2020, 17(7): 427-450.
- [3] 徐磊, 张龙江, 张佳胤, 等. 无创性 CT 血流储备分数研究现状与展望[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(10): 921-924.
XU L, ZHANG L J, ZHANG J Y, et al. Fractional flow reserve derived from CT: current status and future direction

- [J]. Chin J Radiol, 2020, 54(10): 921-924.
- [4] NØRGAARD B L, TERKELSEN C J, MATHIASSEN O N, et al. Coronary CT angiographic and flow reserve-guided management of patients with stable ischemic heart disease [J]. J Am Coll Cardiol, 2018, 72(18): 2123-2134.
- [5] NØRGAARD B L, LEIPSIC J, GAUR S, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (analysis of coronary blood flow using CT angiography: next steps) [J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63(12): 1145-1155.
- [6] AHMADI A, KINI A, NARULA J. Discordance between ischemia and stenosis, or PINSS and NIPSS: are we ready for new vocabulary [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2015, 8(1): 111-114.
- [7] 周慧源, 赵狄, 董平栓. 冠心病临界病变患者血糖水平与冠脉血流储备分数的相关性研究 [J]. 中国循证心血管医学杂志, 2021, 13(1): 74-77.
- ZHOU H Y, ZHAO D, DONG P S. Correlation between blood glucose level and fractional flow reserve in patients with coronary intermediate lesion [J]. Chin J Evid Based Cardiovasc Med, 2021, 13(1): 74-77.
- [8] 王晓泉, 张佳胤, 李跃华. 冠状动脉钙化积分评价冠状动脉弹性的研究 [J]. 实用放射学杂志, 2016, 32(1): 80-82.
- WANG X Q, ZHANG J Y, LI Y H. A study of the application of the coronary calcium score to evaluate the coronary distensibility [J]. J Pract Radiol, 2016, 32(1): 80-82.
- [9] YUONESS S A, GOHA A M, ROMSA J G, et al. Very high coronary artery calcium score with normal myocardial perfusion SPECT imaging is associated with a moderate incidence of severe coronary artery disease [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2015, 42(10): 1542-1550.
- [10] ASSANTE R, ZAMPELLA E, ARUMUGAM P, et al. Quantitative relationship between coronary artery calcium and myocardial blood flow by hybrid rubidium-82 PET/CT imaging in patients with suspected coronary artery disease [J]. J Nucl Cardiol, 2017, 24(2): 494-501.
- [11] NØRGAARD B L, MORTENSEN M B, PARNER E, et al. Clinical outcomes following real-world computed tomography angiography-derived fractional flow reserve testing in chronic coronary syndrome patients with calcification [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2021, 22(10): 1182-1189.
- [12] VIRMANI R, BURKE A P, KOLODIE F D, et al. Vulnerable plaque: the pathology of unstable coronary lesions [J]. J Interv Cardiol, 2002, 15(6): 439-446.
- [13] 李永霞, 马跃虎, 王同兴, 等. 基于 CCTA 对胸痛病人高危斑块成分及血流动力学特征的研究 [J]. 国际医学放射学杂志, 2021, 44(1): 19-24.
- LI Y X, MA Y H, WANG T X, et al. Plaque and hemodynamic characteristics of cardiac artery on coronary CT angiography in patients with highrisk plaque and chest pain [J]. Int J Med Radiol, 2021, 44(1): 19-24.
- [14] 郭明秋, 殷晓捷, 刁殿琰, 等. 脂质代谢水平与冠状动脉粥样硬化病变的关系 [J]. 中国动脉硬化杂志, 2021, 29(2): 149-155.
- GUO M Q, YIN X J, DIAO D Y, et al. Relationship between the levels of lipid metabolism and coronary atherosclerotic lesions [J]. Chin J Arterioscler, 2021, 29(2): 149-155.
- [15] RALLIDIS L S, PITSAVOS C, PANAGIOTAKOS D B, et al. Non-high density lipoprotein cholesterol is the best discriminator of myocardial infarction in young individuals [J]. Atherosclerosis, 2005, 179(2): 305-309.
- [16] TAYLOR C A, FONTE T A, MIN J K. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: scientific basis [J]. J Am Coll Cardiol, 2013, 61(22): 2233-2241.
- [17] AHMADI N, RUIZ-GARCIA J, HAJSADEGHI F, et al. Impaired coronary artery distensibility is an endothelium-dependent process and is associated with vulnerable plaque composition [J]. Clin Physiol Funct Imaging, 2016, 36(4): 261-268.
- [18] PIJLS N H, FEARON W F, TONINO P A, 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.

(此文编辑 文玉珊)