

论 著

复杂病变对基于冠状动脉CT血管成像的定量血流分数诊断准确度的影响*

刘晓雪¹ 于鑫鑫² 康 冰²
高 琳² 马文珊¹ 张 帅²
纪淙山² 王锡明^{2,*}

1.滨州医学院医学影像学院

(山东 烟台 264003)

2.山东第一医科大学附属省立医院医学

影像科 (山东 济南 250021)

【摘要】目的 探讨CT-QFR在复杂病变中识别特异性缺血性缺血的诊断效能。方法 本研究为一项回顾性分析，自2019年1月至2021年6月，连续招募了接受CCTA和侵入性冠状动脉造影(ICA)的患者。对三种不同类型的病变(局灶性病变、弥漫性病变和串联病变)进行了分析。以基于ICA的QFR作为参考标准评估CT-QFR在缺血性病变的诊断性能。结果 共纳入171名患者420支血管。179(42.62%)支血管的QFR≤0.80。在血管水平上分析，CT-QFR与QFR之间诊断效能具有强相关性和良好一致性($r=0.868$, $P<0.001$, mean difference $\pm$ SD: 0.01 ± 0.09)，总体诊断准确度、灵敏度和特异度分别为93.1% [95% CI, 90.7 - 95.5]、88.88% [95% CI, 83.3 - 93.0] 和 96.27% [95% CI, 93.0 - 98.3]。在串联和非串联病变的血管之间(AUC = 0.960 VS. 0.961, $P=0.964$)以及弥漫性和局部病变之间(AUC = 0.956 VS. 0.943, $P=0.655$)发现了类似的诊断性能。结论 在患者和血管水平分析中，CT-QFR在检测冠脉特异性缺血方面均显示出良好诊断性能，其诊断准确性未受串联或弥漫性病变斑块复杂性的影响。

【关键词】冠心病；冠状动脉CT血管造影；定量血流分数

【中图分类号】R541.4

【文献标识码】A

【基金项目】国家自然科学基金(82271993)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.02.034

Impact of Complex Lesions on the Diagnostic Accuracy of Quantitative Flow Fraction Based on Coronary CT Angiography*

LIU Xiao-xue¹, YU Xin-xin², KANG Bing², GAO Lin², MA Wen-shan¹, ZHANG Shuai², JI Cong-shan², WANG Xi-ming^{2,*}.

1.School of Medical Imaging, Binzhou Medical University, Yantai 264003, Shandong Province, China

2.Department of Radiology, Shandong Provincial Hospital Affiliated to Shandong First Medical University, Jinan 250021, Shandong Province, China

ABSTRACT

Objective We explored the role of CT-QFR in identifying ischemia-specific stenosis in complex lesion.

Methods Patients with CCTA and ICA were consecutively enrolled in this post-hoc analysis from January 2019 to June 2021. Three different types of lesions (focal lesion, diffuse lesion and tandem lesion) were classified and analyzed. Diagnostic performance of CT-QFR in detecting hemodynamic significant stenosis was evaluated using invasive coronary angiography (ICA)-based QFR as a reference standard.

Results A total of 171 patients with 420 vessels were included. 179 (42.62%) vessels had QFR≤0.80. Strong correlation and good agreement were observed between CT-QFR and QFR ($r=0.868$, $P<0.001$; mean difference $\pm$ SD: 0.01 ± 0.09). The overall diagnostic accuracy, sensitivity and specificity were 93.1% [95% CI, 90.7-95.5], 88.88% [95% CI, 83.3-93.0] and 96.27% [95% CI, 93.0 - 98.3] on vessel level. Similar diagnostic performances were found between vessels with tandem and non-tandem lesions (AUC = 0.960 versus 0.961, $P=0.964$) as well as diffuse and localized lesions (AUC = 0.956 versus 0.943, $P=0.655$). **Conclusion** CT-QFR showed high diagnostic performance in detecting ischemia-specific coronary stenosis in both patient-level and vessel-level analysis, and its diagnostic accuracy was not affected by the plaque complexities of tandem or diffuse lesions.

Keywords: Coronary Artery Disease; Coronary CT Angiography; Quantitative Flow Ratio

作为在导管室治疗前诊断冠状动脉疾病(CAD)的首选非侵入性检查方法^[1-2]，冠状动脉CT血管成像(CCTA)在识别冠状动脉显著狭窄方面具有高灵敏度。然而，由于CCTA的特异性和阳性预测值不理想，其不能单独使用，因此仍需高准确性的补充策略。

血流储备分数(FFR)是一种在侵入性冠状动脉造影(ICA)过程中使用的生理学方法，其通过在最大血流状态下将带有压力传感器的导线置于冠状动脉病变处来检测生理特性。FFR得到了广泛的验证，并以Ⅰ类/A级的推荐标准^[3-4]用于检测需要血运重建的功能性狭窄。然而，由于压力导丝和最大血流所需药物导致的操作复杂性和围手术期风险，基于导丝的FFR在许多发展中国家的普及受到限制^[5]。为了克服这一限制，研究者们开发了一种新的基于ICA的计算方法，称为定量血流分数(QFR)^[6]，其与FFR相比显示出很高的诊断准确性^[7-11]。最近，FAVOR III China的随机对照试验^[12]表明，基于QFR的指导策略可以显著改善经皮冠状动脉介入术(PCI)的1年临床结果，表明QFR在诊断血流动力学狭窄和指导血运重建方面具有很大的潜力。

基于CCTA的定量血流分数(CT-QFR)是基于CCTA图像使用QFR算法的无创计算CT-FFR新技术，研究发现其与“金标准”FFR有良好的一致性，能显著提高CCTA对冠状动脉缺血性病变的诊断^[13]。Kawashima^[14]等人研究了另一种基于CCTA的计算FFR(FFRct)与QFR之间的相关性，结果显示强相关性。然而，CT-QFR和QFR的一致性尚未得到证实，尤其是在具有复杂解剖学病变的患者中。

本研究以QFR作为参考标准，评估CT-QFR在局灶性、弥漫性病变以及串联、非串联病变中的诊断效能。

1 资料与方法

1.1 研究人群 本研究为一项回顾性单中心研究。在2019年1月至2021年6月期间，连续招募在山东省立医院接受冠状动脉CT血管成像(CCTA)和冠状动脉造影(ICA)检查的患者作为本次事后分析的研究对象。

以下患者被排除在外：在CCTA之前接受ICA检查；ICA与CCTA间隔时间超过一个月以上；接受了冠状动脉旁路移植(CABG)治疗；CCTA检查中缺失舒张期数据。对于CT-QFR和QFR分析，如果满足以下任一条件，血管将被排除：有过PCI治疗；存在慢性完全闭塞(CTO)；软件未能检测到血管开口；图像质量较差；软件未能导入数据。本研究获得了山东省立医院伦理审查委员会的批准，并且免除了知情同意。

1.2 CCTA 采用双源CT扫描仪(德国Siemens SOMATOM Definition Flash/Force)进行，设置以下参数：90 kVp/100 kVp, 370 mAs, $64 \times 2 \times 0.6$ mm/ $96 \times 2 \times 0.6$ mm, 0.28 s/0.25 s, 采用自动管电流调节(CARE Dose 4D)。使用回顾性心电图门控技术同步数据重建。图像重建厚度为0.75 mm，重建间隔为0.5 mm，使用中等软组织卷积重建核(I26f/Bv40)。在CCTA扫描前立即给予患者舌下含服硝酸甘油(每剂0.1 mg；硝酸甘

【第一作者】刘晓雪，女，硕士研究生，主要研究方向：心血管。E-mail: lxx675886@163.com

【通讯作者】王锡明，男，主任医师，主要研究方向：心血管。E-mail: wxming369@163.com

油吸入剂, 济南京卫药业有限公司, 中国)进行预处理。对比剂(40–45 mL iohexol, 350 mgI/mL, 北京北陆药业, 中国)通过肘前静脉以4–4.5 mL/s的流速注射, 随后以相同流速注入40–45 mL生理盐水。采用波束追踪法触发图像采集。双重病变定义为两个连续的≥50%的狭窄区段, 中间以正常段隔开。弥漫性病变定义为长度≥2cm的病变^[15-16]。

1.3 介入冠状动脉造影(ICA) 根据标准操作流程进行介入冠状动脉造影(ICA)^[3,17]。采用单平面或双平面放射系统(美国GE Innova 3100型心血管造影机)以15帧/秒的速度记录血管造影图像。导管通过股动脉或桡动脉插入。在评估主要心外膜血管时, 至少获取五个投影以充分显示狭窄情况。所有图像均以DICOM格式存储和传输。

1.4 CT-QFR测量 使用一款商业软件(CtaPlus, 上海博动医疗科技股份有限公司), 由一位对ICA和QFR结果不知情的资深放射科医师进行测量。CT-QFR分析的详细流程已在之前的研究中发表^[13]。简而言之, 所有参考直径≥1.5 mm的冠状动脉段均自动重建并合并为冠状动脉树。随后, 重建参考管腔, 并基于参考管腔大小推导出患者特异性的冠状动脉灌注流量。最后, 基于已提出和验证的流体动力学方程计算每个冠状动脉树位置的CT-QFR值^[6,13,18]。每位患者在三条主要血管的最远端记录CT-QFR值。CT-QFR值≤0.80表示心肌缺血。

1.5 QFR测量 基于ICA图像, 使用一款商业设备(AngioPlus Pro, 上海博动医疗科技股份有限公司)进行测量, 由一个对CT-QFR结果和CTA图像不知情的独立核心实验室完成。选择一幅能清晰展现目标病变的血管造影图像进行QFR分析。整个过程与CT-QFR相似。在此过程中, 如果分析师认为自动分割不令人满意, 允许进行手动修正。QFR计算算法在之前的研究中已有报道^[19]。

1.6 统计分析 符合正态分布的定量资料用($\bar{x} \pm s$)描述, 非正态分布的定量资料用M(Q1, Q3)描述, 组间比较采用 Wilcoxon 秩和检验。定性资料用例数(%)描述, 组间比较采用 χ^2 检验。采用 Spearman 相关系数评价CT-QFR与QFR之间的相关性, Bland-Altman图评价两种方法间的一致性。CT-QFR和QFR的比较采用配对样本t检验或配对秩和检验。对于CT-QFR和QFR均使用界值≤0.80判断功能性狭窄。CT-QFR的诊断性能通过敏感性、特异性、阳性预测值和阴性预测值以及95%置信区间(CI)描述。根据不同亚组绘制CT-QFR的受试者工作特征曲线(ROC)评价诊断性能。采用DeLong方法在亚组之间比较ROC下面积(AUC)。所有统计分析均在MedCalc(版本14.12)上进行。

2 结 果

2.1 患者及血管特征 本研究纳入了171名患者、420条血管。基线特征和血管特征分别列于表1和表2。纳入的血管在三条主要冠状动脉中均匀分布。直径狭窄的中位值约为43%, 最小管腔直径约为1.60 mm。其中179条(42.62%)血管的QFR ≤0.80。在纳入血管中, 93条(22.1%)血管存在串联性病变, 168条(40.0%)血管存在弥漫性病变。

表1 患者基线特征

特征	患者 (171)
年龄	60.89±10.02
男性	108 (63.2%)
BMI	24.24 (22.49, 26.09)
心率	68 (60, 78)
高血压	115 (67.3%)
高脂血症	43 (25.1%)
吸烟史	73 (42.7%)
糖尿病	54 (31.6%)
临床表现	
不稳定型心绞痛	138 (80.7%)
稳定型心绞痛	10 (5.8%)
无症状缺血	2 (1.2%)
心肌梗死后	16 (9.4%)
无症状, 无缺血	5 (2.9%)
陈旧性心肌梗死	10 (5.8%)

注: 连续变量用均值±标准差或中位数±四分位数描述, 分类变量用例数(%)描述。

表2 血管特征

特征	血管(420)
血管分布	
LAD	148 (35.2%)
LCX	142 (33.8%)
RCA	130 (31.0%)
直径狭窄率(%)	43 (29,56)
最小管腔直径(mm)	1.60 (1.20, 2.10)
参考管腔直径(mm)	2.93±0.67
串联病变	93 (22.1%)
弥漫性病变	168 (40.0%)
QFR	
≤0.80	179 (42.6%)
>0.80	241 (57.4%)

2.2 CT-QFR与QFR之间的相关性和一致性 血管的平均CT-QFR为0.85(0.69-0.94), 平均QFR为0.86(0.66-0.95)。CT-QFR与QFR之间没有显著差异($P=0.292$)。CT-QFR与QFR之间呈现出强相关性($r=0.868$, $P<0.001$)及良好的一致性(mean difference±SD, 0.01 ± 0.09)(图1)。

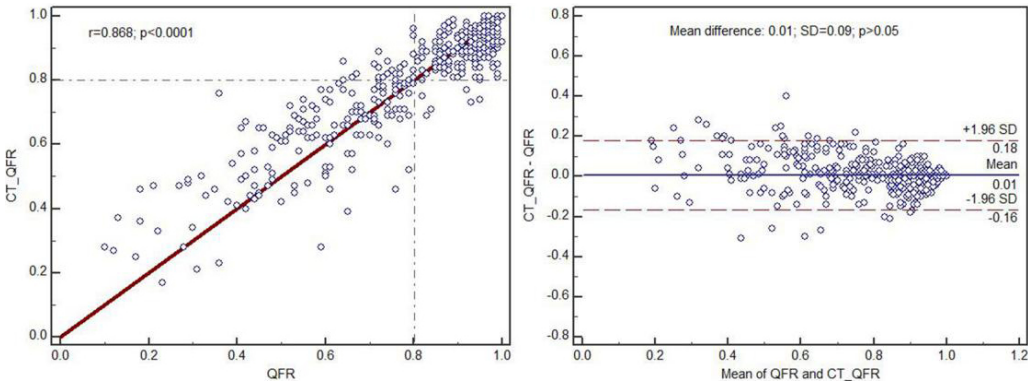


图1 QFR和CT-QFR之间的相关性和Bland-Altman图。

2.3 CT-QFR的诊断性能 CT-QFR的诊断性能分别在血管层面和患者层面进行了分析。CT-QFR的总体诊断准确率在血管层面为93.1%(95% CI, 90.7-95.5), 在患者层面为91.2%(95% CI, 86.9-95.5)。在血管层面, CT-QFR的灵敏度、特异度、阳性预测值和阴性预测值分别为88.8%(95% CI, 83.3-93.0)、96.3%(95% CI, 93.0-98.3)、94.6%(95% CI, 90.1-97.5)和92.1%(95% CI, 88.0-95.1), 而在患者层面, 灵敏度、特异度、阳性预测值和阴性预测值分别为91.4%(95% CI, 85.1-95.6)、90.7%(95% CI, 77.9-97.4)、96.7%(95% CI, 91.8-99.1)和78.0%(95% CI, 64.0-88.5)(表3)。

表3 CT-QFR诊断准确性

	血管水平	患者水平
准确度(%)	93.1 [90.7 - 95.5]	91.2 [86.9 - 95.5]
灵敏度(%)	88.8 [83.3 - 93.0]	91.4 [85.1 - 95.6]
特异度(%)	96.3 [93.0 - 98.3]	90.7 [77.9 - 97.4]
PPV(%)	94.6 [90.1 - 97.5]	96.7 [91.8 - 99.1]
NPV(%)	92.1 [88.0 - 95.1]	78.0 [64.0 - 88.5]
AUC	0.975 [0.955-0.988]	0.975 [0.939-0.993]

无论是在血管层面还是在患者层面, CT-QFR在预测缺血性狭窄均表现出较高的诊断性能。(血管: AUC = 0.975 [95% CI, 0.955 - 0.988]; 患者: AUC = 0.975 [95% CI, 0.939 - 0.993])。

2.4 CT-QFR在具有串联或弥漫性病变血管中的诊断性能 在亚组分析中, 结果是一致的。如图2所示, CT-QFR在局灶性病变(N = 157)和弥漫性病变(N = 168)血管中的AUC相似, (0.943 [95% CI, 0.895 - 0.974] VS. 0.956 [95% CI, 0.913 - 0.982],

P=0.655)。同样, CT-QFR在非串联(N = 232)和串联病变组(N = 93)之间的AUC也无统计学差异(0.961 [95% CI, 0.927-0.982] VS. 0.960 [95% CI, 0.897-0.990], P=0.964)。图3和图4分别展示了串联病变和弥漫性病变的代表性病例。

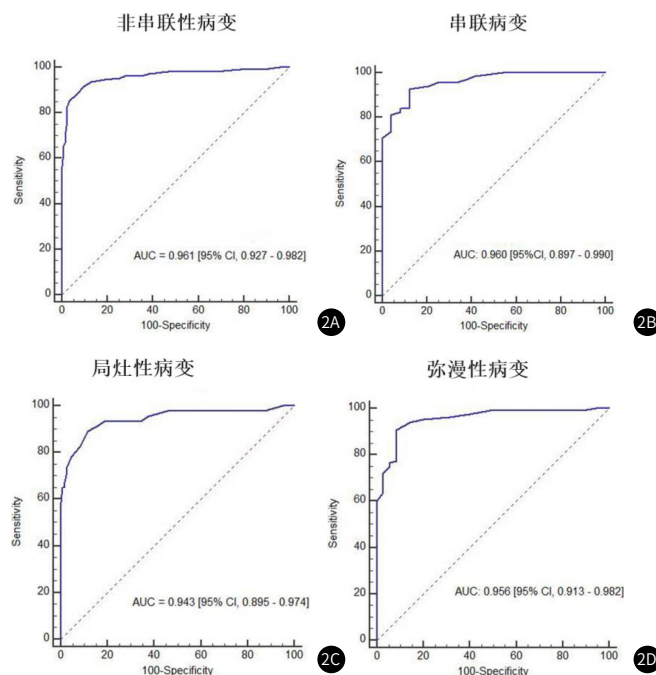


图2A-图2D 非串联病灶(2A)、串联病灶(2B)、局灶性病灶(2C)和弥漫性四个亚组的受试者工作特征曲线。

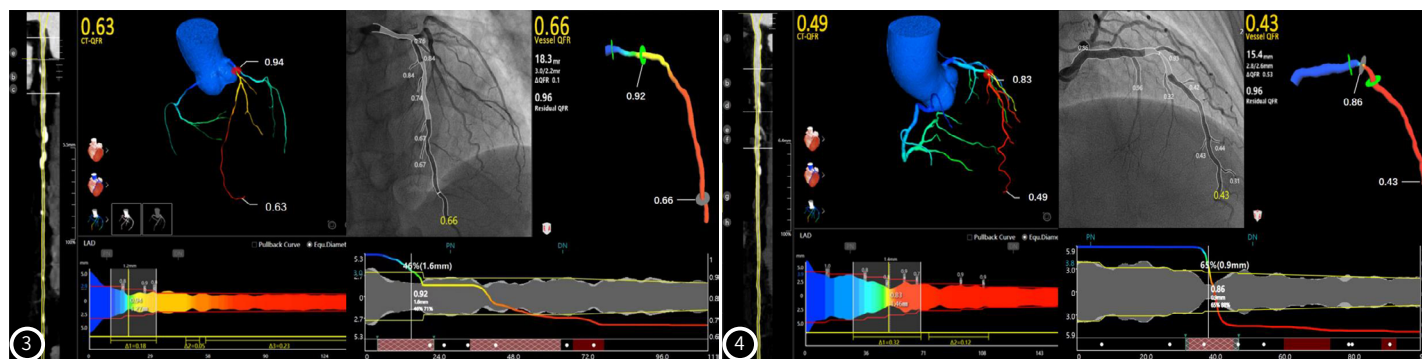


图3 串联病变患者CT-QFR和QFR评估的代表性病例。56岁男性, 左冠状动脉前降支串联病变, CT-QFR (0.63) 和QFR (0.66) 显示血流动力学显著狭窄, 诊断一致性良好。

图4 弥漫性病变患者CT-QFR和QFR评估的代表性病例。66岁女性, 左冠状动脉前降支弥漫性病变, CT-QFR (0.49) 和QFR (0.43) 显示血流动力学显著狭窄, 诊断一致性良好。

3 讨论

本研究的主要发现: (1)CT-QFR与QFR之间具有良好的相关性和一致性; (2)CT-QFR在血管和患者水平上均表现出较高的诊断性能; (3)CT-QFR的诊断性能未受到串联和弥漫性病变的影响。本研究是首次使用QFR作为参考标准, 大规模数据评估CT-QFR的诊断性能。QFR是一种新兴的计算FFR的技术, 与FFR^[11,20-21]或瞬时无波比率(iFR)^[22-24]相比, 显示出优异的诊断准确性。一项大型随机对照试验^[12]证明QFR引导的血运重建能够显著改善临床结果, 并减少支架植入和造影剂的使用。

在这项回顾性研究中, 患者首先接受了CCTA检查, 并认为有必要进行ICA及进一步的血运重建。然而, 在所调查的420条血管中, 241条(57.38%)血管被QFR判定为无功能性缺血, 并不需要血运重建, 建议最佳药物治疗^[12,25]。本研究表明CT-QFR在血管水平上的诊断准确率达到93.1%, 识别出96.27%无功能性缺血, 避免了在导管室进行侵入性检查。患者层面的分析结果在数字上相似, 从而展示了CT-QFR在CCTA基础上的增量价值。

对于具有高风险因素的患者, 如具有高血压、糖尿病和吸烟

史, 发展动脉粥样硬化的可能性较大^[26], 因此出现长病变(即串联病变和弥漫病变)的情况更为普遍。研究表明, 串联病变和弥漫病变更容易导致功能性缺血^[27], 而解剖评估的准确性较低, 尤其是在病变不明确时。QFR已用于确定串联病变和弥漫病变的功能相关性^[11,19,28]。因此, 我们也评估了CT-QFR在串联病变和弥漫病变中的诊断性能。结果显示, 在预测QFR≤0.80方面, 串联病变与非串联病变亚组之间、弥漫病变与局灶性病变亚组之间的差异无统计学意义, 表明这两种病变模式下的诊断性能是一致的。

已有其他研究报道了几种基于CCTA衍生的测量FFR技术^[5]: 如FFRct、cFFR和CT-FFR。其中, FFRct的诊断性能更为人们所熟知, 其诊断准确性优于CCTA^[29-30], 并在非梗阻性冠心病中降低了血管造影(ICA)的使用率, 同时主要不良心血管事件(MACE)发生率相似^[31-32]。在本研究中, CT-QFR在识别需要进行血管造影及进一步干预的功能性缺血方面也表现出了较高的诊断准确性和特异性。此外, CT-QFR的计算时间不足一分钟^[13], 便于其现场使用, 而FFRct由于对大型计算能力的需求仍需为中心实验室分

析。CT-QFR显示出作为导管室“守门人”的潜力，以减少不必要的侵入性检查。

本研究存在一定的局限性。首先，本研究为回顾性单中心研究。为了尽可能减少选择偏倚，我们在特定时间范围内连续招募了接受ICA和CCTA的患者。研究结果仅来源于计划接受经皮冠状动脉介入治疗(PCI)的患者，因此研究人群无法代表接受CCTA筛查的疑似冠心病(CAD)患者。第二，>80%的患者为不稳定型心绞痛，这并不符合真实的临床情况。因此，对本研究纳入人群存在偏差。第三，本研究中未进行侵袭性血流储备分数(FFR)的检测，导致CT-QFR与FFR之间的平行比较缺失。然而，之前的研究均以FFR作为参考标准验证了QFR及CT-QFR的诊断准确性，因此，我们认为探讨这两种同类方法之间的一致性是有必要的，尤其是在存在串联性病变和弥漫性病变的情况下。

4 结 论

在疑似冠心病患者中CT-QFR与QFR表现出了良好的相关性与一致性。在患者层面和血管层面分析中，CT-QFR在诊断功能性心肌缺血方面均表现良好，并且该结果未受弥漫性与串联性病变的解剖复杂性的影响。

参考文献

- [1] Narula J, Chandrashekar Y, Ahmadi A, et al. SCCT 2021 Expert Consensus document on coronary computed tomographic angiography: a report of the society of cardiovascular computed tomography[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2021, 15: 192-217.
- [2] 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: 407-477.
- [3] Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS guidelines on myocardial revascularization[J]. Eur Heart J, 2019, 40: 87-165.
- [4] Lawton JS, Tamis-Holland JE, Bangalore S, et al. 2021 ACC/AHA/SCAI guideline for coronary artery revascularization: executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. Circulation, 2022, 145: e4-e17.
- [5] Kogame N, Ono M, Kawashima H, et al. The impact of coronary physiology on contemporary clinical decision making[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2020, 13: 1617-1638.
- [6] Tu S, Westra J, Yang J, et al. Diagnostic accuracy of fast computational approaches to derive fractional flow reserve from diagnostic coronary angiography: the international multicenter favor pilot study[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2016, 9: 2024-2035.
- [7] Xing Z, Pei J, Huang J, et al. Diagnostic performance of QFR for the evaluation of intermediate coronary artery stenosis confirmed by fractional flow reserve[J]. Braz J Cardiovasc Surg, 2019, 34: 165-172.
- [8] Zuo W, Yang M, Chen Y, et al. Meta-analysis of diagnostic performance of instantaneous wave-free ratio versus quantitative flow ratio for detecting the functional significance of coronary stenosis[J]. Biomed Res Int, 2019: 5828931.
- [9] Zhang R, Zhang J, Guo L. Meta-Analysis of diagnostic performance of contrast-fractional flow reserve versus quantitative flow ratio for functional assessment of coronary stenoses[J]. J Intervent Cardiol, 2020: 1-10.
- [10] Duarte A, Llewellyn A, Walker R, et al. Non-invasive imaging software to assess the functional significance of coronary stenoses: a systematic review and economic evaluation[J]. Health Technol Assess, 2021, 25: 1-230.
- [11] Xu B, Tu S, Qiao S, et al. Diagnostic accuracy of angiography-based quantitative flow ratio measurements for online assessment of coronary stenosis[J]. J Am Coll Cardiol, 2017, 70: 3077-3087.
- [12] Xu B, Tu S, Song L, et al. Angiographic quantitative flow ratio-guided coronary intervention (FAVOR III China): a multicentre, randomised, sham-controlled trial[J]. Lancet, 2021, 398: 2149-2159.
- [13] Li Z, Zhang J, Xu L, et al. Diagnostic accuracy of a fast computational approach to derive fractional flow reserve from coronary CT angiography[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13: 172-175.
- [14] Kawashima H, Kogame N, Ono M, et al. Diagnostic concordance and discordance between angiography-based quantitative flow ratio and fractional flow reserve derived from computed tomography in complex coronary artery disease[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2022, 16: 336-342.
- [15] De Bruyne B, Pijls NH, Heyndrickx GR, et al. Pressure-derived fractional flow reserve to assess serial epicardial stenoses: theoretical basis and animal validation[J]. Circulation, 2000, 101: 1840-1847.
- [16] Guidelines for percutaneous transluminal coronary angioplasty, A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Assessment of Diagnostic and Therapeutic Cardiovascular Procedures (Subcommittee on Percutaneous Transluminal Coronary Angioplasty) [J]. J Am Coll Cardiol, 1988, 12: 529-545.
- [17] Bashore TM, Balter S, Barac A, et al. 2012 American College of Cardiology Foundation/Society for Cardiovascular Angiography and Interventions expert consensus document on cardiac catheterization laboratory standards update: a report of the American College of Cardiology Foundation Task Force on Expert Consensus documents developed in collaboration with the Society of Thoracic Surgeons and Society for Vascular Medicine[J]. J Am Coll Cardiol, 2012, 59: 2221-2305.
- [18] Cortés C, Carrasco-Moraleja M, Aparisi A, et al. Quantitative flow ratio-Meta-analysis and systematic review[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2021, 97: 807-814.
- [19] Tu S, Ding D, Chang Y, et al. Diagnostic accuracy of quantitative flow ratio for assessment of coronary stenosis significance from a single angiographic view: a novel method based on bifurcation fractal law[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2021, 97: 1040-1047.
- [20] Westra J, Andersen BK, Campo G, et al. Diagnostic performance of in-procedure angiography-derived quantitative flow reserve compared to pressure-derived fractional flow reserve: the FAVOR II Europe-Japan study[J]. J Am Heart Assoc, 2018, 7: e009603.
- [21] Westra J, Tu S, Winther S, et al. Evaluation of coronary artery stenosis by quantitative flow ratio during invasive coronary angiography: the WIFI II study (wire-free functional imaging II) [J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2018, 11: e007107.
- [22] Watarai M, Otsuka M, Yazaki K, et al. Applicability of quantitative flow ratio for rapid evaluation of intermediate coronary stenosis: comparison with instantaneous wave-free ratio in clinical practice[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2019, 35: 1963-1969.
- [23] Hwang D, Choi KH, Lee JM, et al. Diagnostic agreement of quantitative flow ratio with fractional flow reserve and instantaneous wave-free ratio[J]. J Am Heart Assoc, 2019, 8: e011605.
- [24] Smit JM, El Mahdoui M, van Rosendaal AR, et al. Comparison of diagnostic performance of quantitative flow ratio in patients with versus without diabetes mellitus[J]. Am J Cardiol, 2019, 123: 1722-1728.
- [25] Pijls NH, van Schaardenburgh P, Manoharan G, et al. Percutaneous coronary intervention of functionally nonsignificant stenosis: 5-year follow-up of the DEFER Study[J]. J Am Coll Cardiol, 2007, 49: 2105-2111.
- [26] Lechner K, von Schacky C, McKenzie AL, et al. Lifestyle factors and high-risk atherosclerosis: pathways and mechanisms beyond traditional risk factors[J]. Eur J Prev Cardiol, 2020, 27: 394-406.
- [27] Natsumeda M, Nakazawa G, Murakami T, et al. Coronary angiographic characteristics that influence fractional flow reserve[J]. Circ J, 2015, 79: 802-807.
- [28] Dai N, Zhang R, Hu N, et al. Integrated coronary disease burden and patterns to discriminate vessels benefiting from percutaneous coronary intervention[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2022, 99: E12-E21.
- [29] Hamon M, Geindreau D, Guittet L, et al. Additional diagnostic value of new CT imaging techniques for the functional assessment of coronary artery disease: a meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2019, 29: 3044-3061.
- [30] Celeng C, Leiner T, Maurovich-Horvat P, et al. Anatomical and functional computed tomography for diagnosing hemodynamically significant coronary artery disease: a meta-analysis[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2019, 12: 1316-1325.
- [31] Patel MR, Nørgaard BL, Fairbairn TA, et al. 1-Year impact on medical practice and clinical outcomes of FFRCT: the ADVANCE registry[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13: 97-105.
- [32] Fairbairn TA, Nieman K, Akasaka T, et al. Real-world clinical utility and impact on clinical decision-making of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve: lessons from the ADVANCE Registry[J]. Eur Heart J, 2018, 39: 3701-3711.

(收稿日期: 2024-11-09)

(校对编辑: 韩敏求)