

# 三维定量冠状动脉造影对冠状动脉功能性狭窄 诊断价值的研究进展\*

肖亚楠<sup>1</sup> 叶发民<sup>1</sup> 肖文涛<sup>1</sup> 郭素萍<sup>1</sup> 张晶晶<sup>1</sup> 屈永生<sup>1</sup> 李建朝<sup>2</sup>  
王文华<sup>1</sup> 吴艳芳<sup>1</sup> 刘晓晴<sup>3</sup> 张静<sup>1</sup> 高传玉<sup>3</sup>

**[摘要]** 准确评估冠状动脉(冠脉)病变的严重程度,对冠心病患者后续的诊疗及预后至关重要。血流储备分数作为冠脉生理学评估的金标准,可准确判断冠脉病变是否导致心肌缺血。但血流储备分数的测量依赖于压力导丝,有创、需药物负荷且花费较大。因此,其临床使用率十分受限。三维定量冠脉造影可通过冠脉造影的原始图像对病变冠脉进行三维重建,并计算病变血管的相关解剖学参数。近年来由三维定量冠脉造影衍生的血流储备分数在冠心病患者诊断、治疗及预后方面也展示出应用潜力。而且,三维定量冠脉造影还可协助优化介入操作。本文将就三维定量冠脉造影在冠心病中的应用研究进展进行综述。

**[关键词]** 三维定量冠状动脉造影;血流储备分数;冠状动脉功能性狭窄

**DOI:**10.13201/j.issn.1001-1439.2024.01.003

**[中图分类号]** R541.4 **[文献标志码]** A

## Research progress of three-dimensional quantitative coronary angiography in the diagnosis of coronary functional stenosis

XIAO Ya'nan<sup>1</sup> YE Famin<sup>1</sup> XIAO Wentao<sup>1</sup> GUO Suping<sup>1</sup> ZHANG Jingjing<sup>1</sup> LI Jianchao<sup>2</sup>  
QU Yongsheng<sup>1</sup> WANG Wenhua<sup>1</sup> WU Yanfang<sup>1</sup> LIU Xiaoqing<sup>3</sup>  
ZHANG Jing<sup>1</sup> GAO Chuanyu<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Coronary Heart Disease Intensive Care Unit, Henan Provincial People's Hospital, People's Hospital of Zhengzhou University, Fuwai Central China Cardiovascular Hospital, Zhengzhou, 450003, China;<sup>2</sup>Department of Extracorporeal Circulation,<sup>3</sup>Heart Center, Henan Provincial People's Hospital, People's Hospital of Zhengzhou University, Fuwai Central China Cardiovascular Hospital)

Corresponding author: GAO Chuanyu, E-mail: gaocy6802@163.com

**Abstract** Accurate assessment of coronary artery disease severity is crucial for the follow-up diagnosis, treatment, and prognosis of patients with coronary heart disease. As the gold standard for the physiological evaluation of coronary artery, fractional flow reserve (FFR) can accurately determine whether coronary artery disease leads to myocardial ischemia. However, FFR operation depends on a pressure guide wire, which is invasive, requires drug load, and incurs high costs. Therefore, the clinical use of FFR is limited. Three-dimensional quantitative coronary angiography can reconstruct diseased coronary arteries from the original angiography images and calculate relevant anatomical parameters of the affected vessels. In recent years, FFR derived from three-dimensional quantitative coronary angiography has also shown application potential in diagnosis, treatment, and prognosis in patients with coronary heart disease. This article will review the research of three-dimensional quantitative coronary angiography in coronary heart disease.

**Key words** three-dimensional quantitative coronary angiography; fractional flow reserve; functional coronary artery stenosis

\*基金项目:2022年度郑州市科技惠民计划项目(No:2022KJHM0036)

<sup>1</sup>郑州大学人民医院 河南省人民医院心脏中心 阜外华中心血管病医院冠心病重症监护室(郑州,450003)

<sup>2</sup>郑州大学人民医院 河南省人民医院 阜外华中心血管病医院体外循环科

<sup>3</sup>郑州大学人民医院 河南省人民医院 阜外华中心血管病医院冠心病一病区

通信作者:高传玉,E-mail:gaocy6802@163.com

在世界范围内,冠心病的发病率和病死率仍呈逐年上升趋势<sup>[1]</sup>。迄今为止,经皮冠状动脉介入术(percutaneous coronary intervention, PCI)仍在冠心病的治疗中占据主导地位。那么,究竟何种情况下施行PCI能给患者带来最大获益呢?在冠状动脉(冠脉)生理学评估领域,血流储备分数(frac-

引用本文:肖亚楠,叶发民,肖文涛,等.三维定量冠状动脉造影对冠状动脉功能性狭窄诊断价值的研究进展[J].临床心血管病杂志,2024,40(1):10-15. DOI:10.13201/j.issn.1001-1439.2024.01.003.

tional flow reserve, FFR)是目前公认的金标准<sup>[2]</sup>。FFR可简化为冠脉最大充血状态下狭窄远端压力(Pd)与主动脉压的比值(Pa)<sup>[3]</sup>。

2020 ESC有关非ST段抬高型急性冠脉综合征(non-ST-segment elevation acute coronary syndrome, NSTEMI-ACS)的指南推荐,在NSTEMI-ACS患者首次PCI时可通过FFR指导非罪犯血管的血管重建(II, B)<sup>[4]</sup>。

但在冠脉生理学评估理念日益深入临床工作的今天,FFR的全球使用率仍十分受限。有研究指出,即使患者有进行冠脉生理学评估的指征,最终也仅有50%的患者进行了FFR或瞬时波形比值(instantaneous wave-free ratio, iFR)测量<sup>[5]</sup>。FFR的有创性、药物负荷带来的不良体验以及经济因素都极大地限制了其临床应用。因此,在实际临床操作中亟需更加简便、易行的临床指标协助术者进行临床决策。定量冠脉造影(quantitative coronary angiography, QCA)则满足了这一临床需求。2018年学术研究联盟-2的共识文件指出,对于有临床指征的重复血运重建,当无法进行FFR等功能学评估时,推荐使用QCA尤其是三维定量冠脉造影(three-dimensional quantitative coronary angiography, 3D-QCA)评估病变严重程度<sup>[6]</sup>。

许多研究探索了3D-QCA相关参数对冠脉功能性狭窄的诊断价值。而3D-QCA衍生的相关参数,如定量血流储备分数(quantitative flow ratio, QFR)在冠心病的诊断、治疗及预后方面也显示出巨大潜力。同时,也有研究表明3D-QCA可协助优化支架植入。本文将就3D-QCA在上述领域相关的临床研究进行综述。

## 1 QCA的发展历程

最初的QCA为二维定量冠脉造影(2-dimensional quantitative coronary angiography, 2D-QCA),存在无法避免的血管短缩、重叠及放大问题<sup>[7]</sup>。20世纪70年代末, Brown等首次报道了3D-QCA。3D-QCA以冠脉造影图像中两幅互成90°角的造影图像为基础,通过数学公式将血管信息转化为数字形式,最终通过电脑计算得出靶血管的DS%、面积狭窄百分比(percent area stenosis, AS%)、最小管腔面积(minimal lumen area, MLA)、最小管腔直径(minimal luminal diameter, MLD)和病变长度(lesion length, LL)等信息<sup>[8]</sup>。随着计算机技术的发展, Klein等<sup>[9]</sup>提出可用两幅非90°角的造影图像信息进行3D-QCA分析,并进一步验证了该算法的准确性和可重复性。这一算法不仅造影角度更加灵活、适宜临床应用,而且使导管室实时进行3D-QCA分析成为可能。经过近几十余年的发展,3D-QCA技术不断完善并进入了商业应用阶段。3D-QCA测量示意图见图1。

## 2 QCA对冠脉功能性狭窄的诊断价值

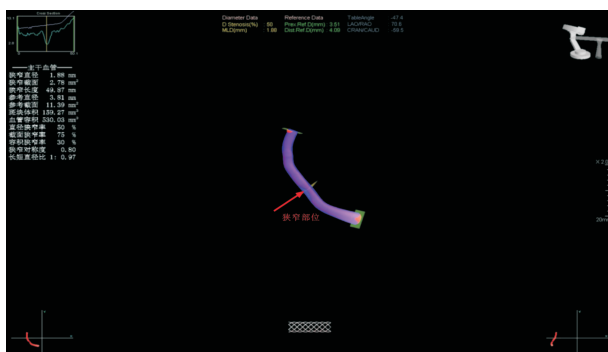
Ding等<sup>[10]</sup>对FAVOR II China及FAVOR II Europe-Japan这两项前瞻性、多中心研究中的576例患者、645支血管进行了3D-QCA、2D-QCA和FFR测量。该研究旨在以FFR为金标准,评估3D-QCA和2D-QCA对冠脉功能性狭窄的诊断价值。结果表明,当最佳临界值为50%时,DS%<sub>3D-QCA</sub>诊断冠脉功能性狭窄的曲线下面积(area under the curve, AUC)为0.81(95%CI 0.77~0.84),而DS%<sub>2D-QCA</sub>的AUC值为0.66(95%CI 0.62~0.71),两者差异具有统计学意义( $P < 0.001$ )。同时,当2D-QCA显示DS% $< 40\%$ 时,有21.6%的血管FFR $\leq 0.80$ ;而2D-QCA显示DS% $\geq 70\%$ 时,有27.3%的血管FFR $> 0.80$ 。但在3D-QCA中,假阴性率、假阳性率分别为5.6%、6.7%。与2D-QCA相比,3D-QCA的假阴性率和假阳性率均显著下降,减少了解剖-功能不匹配的发生率。并且,DS%<sub>3D-QCA</sub>与FFR的相关系数显著优于DS%<sub>2D-QCA</sub>(-0.56 vs -0.32,  $P < 0.001$ )。该研究表明,与2D-QCA相比,3D-QCA对冠脉功能性狭窄的诊断性能更优。

同时,该研究注意到,在不同的病变位置,2D-QCA和3D-QCA诊断冠脉功能性狭窄的最佳临界值有所不同,但其诊断准确性并无显著差异( $P_{3D-QCA} = 0.38, P_{2D-QCA} = 0.13$ )。这表明,血管特异性临界值的使用似乎并无太多获益,因此,为了方便临床实践,在3支主要血管中可使用同一临界值。

Zhang等<sup>[11]</sup>比较了3D-QCA和2D-QCA对冠脉真分叉病变功能学改变的诊断价值(90例)。结果表明,当FFR的临界值为0.75时,在主支血管中,MLA<sub>3D-QCA</sub>(最佳临界值为1.58 mm<sup>2</sup>)对冠脉功能性狭窄的诊断性能最佳,其AUC值为0.85,灵敏度和特异度分别为73.0%和90.6%;MLD<sub>2D-QCA</sub>(最佳临界值为1.1 mm)对冠脉功能性狭窄的诊断性能最佳,其AUC值为0.85,灵敏度和特异度分别为64.9%和90.6%。

在分支血管中,MLA<sub>3D-QCA</sub>(最佳临界值为1.34 mm<sup>2</sup>)对冠脉功能性狭窄的诊断性能最佳,其AUC值为0.81,灵敏度和特异度分别为73.0%和88.7%;DS%<sub>2D-QCA</sub>(最佳临界值为45.6%)对冠脉功能性狭窄的诊断性能最佳,其AUC值为0.91,灵敏度和特异度分别为86.5%和84.9%。Z检验显示,3D-QCA和2D-QCA的诊断价值在主支及分支血管中均无显著差异( $P_{主支} = 0.64, P_{分支} = 0.39$ )。

该研究表明,在冠脉真分叉病变中,2D-QCA及3D-QCA对冠脉功能性狭窄的诊断性能并无统计学差异。但该研究为小样本事后分析,因此研究结果应当慎重解读。



注:直径狭窄率=(1-实际直径/参考直径)×100%,  
截面狭窄率=(1-实际狭窄面积/参考面积)×  
100%,参考直径=(病变血管近端直径+病变血管远  
端直径)/2,参考截面=(病变血管近端面积+病变血  
管远端面积)/2。

图1 3D-QCA测量右冠脉狭窄示意图

Figure 1 Measurement of right coronary artery stenosis by 3D-QCA

### 3 QCA与其他腔内影像学技术的比较

与2D-QCA相比,血管内超声(intravascular ultrasound, IVUS)对管腔形态及病变严重程度的评估更加精确<sup>[12]</sup>。在左主干病变中,MLA<sub>IVUS</sub>与FFR相关性良好<sup>[13]</sup>。但IVUS本身为有创操作且耗时较长,大规模临床应用较为受限。而3D-QCA可对冠脉管腔进行三维重建,更加真实地反映了管腔形态及狭窄严重程度,而且无需额外使用导丝或造影剂,操作也更加简便。那么,3D-QCA对冠脉功能性狭窄的诊断价值能否媲美IVUS?

Nishi等<sup>[14]</sup>以FFR为金标准,回顾性分析了2D-QCA、3D-QCA以及IVUS对冠脉临界病变(狭窄程度40%~80%)功能性狭窄的诊断价值。该研究共纳入40例患者,共42处病变。结果表明,以FFR≤0.80为金标准时,MLD<sub>3D-QCA</sub>和MLA<sub>3D-QCA</sub>诊断冠脉功能性狭窄的AUC值均为0.96,其截断值分别为1.60 mm和2.02 mm<sup>2</sup>; MLA<sub>IVUS</sub>诊断冠脉功能性狭窄的AUC值为0.95,截断值为2.17 mm<sup>2</sup>; MLD<sub>2D-QCA</sub>和MLA<sub>2D-QCA</sub>诊断冠脉功能性狭窄的AUC值均为0.82。

与MLD<sub>3D-QCA</sub>相比,MLA<sub>3D-QCA</sub>、MLA<sub>IVUS</sub>的AUC值均无显著差异( $P=0.48, 0.59$ )。但MLD<sub>2D-QCA</sub>与MLA<sub>2D-QCA</sub>的AUC值均显著低于MLD<sub>3D-QCA</sub>( $P=0.03, 0.03$ )。因此,在鉴别冠脉功能性狭窄方面3D-QCA与IVUS相当,并优于2D-QCA。

Lee等<sup>[12]</sup>探索了3D-QCA和IVUS对稳定性冠心病患者临界病变(50%~70%)血流动力学改变的诊断价值。该研究为一项回顾性研究,共纳入175支病变血管,以FFR≤0.80为金标准时,MLA<sub>IVUS</sub>(截断值3.01 mm<sup>2</sup>)诊断冠脉功能性狭窄

的AUC值为0.73,其诊断准确度为68%; MLA<sub>3D-QCA</sub>(截断值2.37 mm<sup>2</sup>)诊断冠脉功能性狭窄的AUC值为0.77,其诊断准确度为73%; DS%<sub>3D-QCA</sub>(截断值51.3%)诊断冠脉功能性狭窄的AUC值为0.72,其诊断准确度为66%。与MLA<sub>IVUS</sub>相比,MLA<sub>3D-QCA</sub>和DS%<sub>3D-QCA</sub>诊断冠脉功能性狭窄的AUC值均无显著差异( $P=0.23, 0.89$ )。并且,MLA<sub>3D-QCA</sub>与MLA<sub>IVUS</sub>的相关性良好( $r=0.61, P<0.001$ )。因此,当患者存在FFR或IVUS禁忌证时,可考虑行3D-QCA以协助临床决策。

与IVUS相比,光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)的图像分辨率更高、能更好地描绘管腔-内膜边界;同时,OCT的旋转速度更快、数据采集耗时更短,可重复性也更好<sup>[15-16]</sup>。作为一项高分辨率的腔内影像技术,OCT为介入医师提供了更为精准客观的病变信息<sup>[17]</sup>。有研究探索了OCT相关参数对FFR的预测价值。Usui等<sup>[18]</sup>对203处病变血管(狭窄程度30%~80%)进行分析后发现,当FFR临界值为0.75时,DS%<sub>2D-QCA</sub>与IVUS-MLA诊断冠脉功能性狭窄的AUC值无显著差异(0.609 vs 0.615,  $P=0.91$ )。但当FFR的临界值为0.80时,IVUS-MLA的AUC值显著优于DS%<sub>2D-QCA</sub>(0.658 vs 0.534,  $P=0.03$ )。因此FFR临界值不同,也会对QCA及IVUS的诊断性能产生影响。

### 4 3D-QCA衍生的FFR的临床应用

#### 4.1 3D-QCA衍生的FFR的诊断价值

由于不同患者的微血管功能、对腺苷的反应及静息流量调节不尽相同<sup>[19]</sup>。因此在不同患者中,即使狭窄程度相同,其FFR值也会有所差异。为克服QCA仅能对病变进行解剖学评估的缺陷,3D-QCA衍生的FFR——QFR开始进入人们的视野。

3D-QCA可以对冠脉进行三维重建,在此基础上通过泊肃叶定律和伯努利定律或计算机流体力学原理即可计算病变处的压力阶差,从而得出FFR值<sup>[20]</sup>。目前进入商业化应用的软件有QFR(Medis Medical Imaging System B. V.)、vFFR(Pie Medical Imaging B. V)和FFRangio(CathWorks)。

Tu等<sup>[21]</sup>首次提出了QFR的概念,并简要介绍了其计算原理。首先,通过至少两个体位的投影自动轮廓进行血管三维模型构建,通过造影剂帧数分析确定虚拟充血流速,最终计算该段血管压力的变化。

FAVOR Pilot研究<sup>[21]</sup>以FFR为金标准,首次比较了基于3种不同模型计算得出的QFR在冠脉临界病变中的诊断价值。此研究共纳入73例患者、84支病变血管。该研究所涉及的3种QFR模型分别为固定经验性充血流速(fixed flow QFR, fQFR)、非药物性充血的血管造影模拟血流量速度

(contrast-flow QFR, cQFR)、腺苷诱导的充血测量血管造影产生的充血流速(adenosine-flow QFR, aQFR)。结果表明, fQFR、cQFR、aQFR 与 FFR 均具有良好的相关性, 相关系数分别为 0.69、0.77、0.72(均  $P < 0.001$ )。

在患者水平以  $FFR \leq 0.80$  为金标准时, fQFR、cQFR、aQFR 的 AUC 分别为 0.87、0.92、0.90; 在血管水平, fQFR、cQFR、aQFR 的 AUC 分别为 0.88、0.92、0.91。而在患者及血管水平,  $DS_{3D-QCA}^{\%}$  的 AUC 值均为 0.72。该研究表明, 与单纯的 3D-QCA 相比, QFR 在识别冠脉狭窄的血流动力学上具有更高的准确性。尤其是 cQFR, 不仅诊断效能与 aQFR 无显著差异, 而且无需药物负荷, 进而减少手术时间、风险及花费, 具有大规模临床应用的前景。

FAVOR II Europe-Japan 研究<sup>[22]</sup>评估了冠脉造影期间实时测量 QFR 的可行性及其诊断性能。该研究共纳入 329 例稳定性冠心病患者。结果表明, 以 FFR 为金标准时, QFR 诊断冠脉功能性狭窄的 AUC 值为 0.92(95%CI 0.89~0.95)。并且无论是在患者水平还是血管水平, QFR 与 FFR 均具有良好的相关性( $r_{患者水平} = 0.80$ ,  $r_{血管水平} = 0.83$ )。与 FFR 相比, QFR 测量所需时间显著缩短(5 min vs 7 min,  $P < 0.001$ )。该研究还计算了核心实验室及造影术中即时测量的 QFR 值的相关性, 结果表明二者相关性良好( $r = 0.83$ ,  $P < 0.001$ )。并且在患者水平, 核心实验室所测量的 QFR 与造影术中实时计算的 QFR 的诊断性能并无显著差异。FAVOR II Europe-Japan 研究证实了造影术中实时测量 QFR 的可行性及准确性。

CAAS-vFFR 通过 CASS 工作站利用 2 幅互相垂直的冠脉图像构建冠脉三维结构, 可以手动选择合适的造影图像, 也可以采用心电触发机制, 并支持手动修改血管轮廓。FAST 研究<sup>[23]</sup>回顾性分析了 100 例稳定性心绞痛和 NSTEMI 患者的冠脉造影结果, 并计算其 CASS-vFFR 值。结果表明以 FFR 为金标准时, CASS-vFFR 诊断冠脉功能性狭窄的 AUC 值为 0.93(95%CI 0.88~0.97); 同时, CASS-vFFR 和 FFR 之间相关性良好( $r = 0.89$ ,  $P < 0.001$ )。并且, 尽管 CASS-vFFR 支持手动选帧及修改血管轮廓, 但这并未导致观察者间出现显著差异( $r = 0.95$ ,  $P < 0.001$ )。目前 CAAS-vFFR 已经得到美国食品药品监督管理局的 510(K) 和欧盟的 CE 认证。

以色列研发的 FFRangio 则需要至少 3 个造影平面才能构建冠脉三维结构, 并使用了外极线和拓扑约束。FFRangio 不仅可以校正患者位移及呼吸运动带来的误差, 还可将重建的三维图像再次进行二维投射, 以验证其准确性<sup>[24]</sup>。FAST-FFR 研究<sup>[24]</sup>验证了 FFRangio 在可疑冠心病患者中的诊

断价值。该研究纳入 301 例患者(稳定性心绞痛、不稳定性心绞痛及 NST-ACS)、319 支病变血管。结果表明, 以 FFR 为金标准时, FFRangio 的诊断准确性高达 92%, AUC 值为 0.94。并且 FFRangio 与 FFR 相关性良好( $r = 0.80$ ,  $P < 0.001$ )。

除此之外, 在 ST 段抬高型心肌梗死(ST-segment elevation myocardial infarction, STEMI)急性期患者的非罪犯血管中, QFR 展现出与其在稳定性冠心病患者中相似的诊断性能(AUC 0.91 vs 0.94,  $P = 0.5$ )<sup>[25]</sup>。同时, QFR 也可评估 STEMI 患者有无冠脉微血管功能障碍<sup>[26]</sup>。

**4.2 3D-QCA 衍生的 FFR 可协助临床决策并判断患者预后**

FAVOR III China<sup>[27]</sup>是一项随机、多中心的对照研究, 该研究将患者分为两组: QFR 指导 PCI 组和 CAG 指导 PCI 组。结果表明, 在 2 年的随访时间内, 与 CAG 指导 PCI 组相比, QFR 指导 PCI 组的主要不良心血管事件(major adverse cardiac events, MACE)发生风险下降了 34%(8.5% vs 12.5%;  $HR = 0.66$ ,  $P < 0.0001$ )。

而亚组分析也表明, 无论患者有无糖尿病, QFR 指导 PCI 组均可降低患者 1 年内 MACE 的发生率。并且在糖尿病及非糖尿病患者中, 依据 QFR 结果推迟 PCI 并未增加 1 年内 MACE 事件风险(4.5% vs 6.2%,  $P = 0.51$ )<sup>[28]</sup>。FAVOR III China 作为一项大型的前瞻性随机对照试验, 为 QFR 指导下 PCI 方案的有效性和安全性进行了强力佐证。

同时在 STEMI 患者的非罪犯血管中, QFR 指导 PCI 也显著减少了患者 1 年内病死率及血运重建事件, 并可改善生活质量<sup>[29]</sup>。

也有研究指出, 对于植入第 2 代药物洗脱支架(drug-eluting stent, DES)的患者可通过造影剂-血流 QFR(contrast-flow QFR, cQFR)判断预后<sup>[30]</sup>。这是一项单中心、回顾性研究, 研究的主要终点是靶血管血运重建(target vessel revascularization, TVR), 次要终点为主要不良心脑血管事件(major adverse cardiac and cerebrovascular events, MACCE, 包括死亡、心肌梗死和 TVR)。该研究共纳入 61 处病变, 最终有 85% 的病变成功进行了 cQFR 测量。在 18~30 个月的随访期内, 共有 8 支病变血管进行了血运重建, 11 例患者发生了 MACCE。结果表明, TVR 组血管水平的 cQFR 值明显低于无 TVR 组( $0.703 \pm 0.163$  vs  $0.883 \pm 0.103$ ,  $P = 0.016$ ); MACCE 组血管水平的 cQFR 值显著低于无 MACCE 组( $0.775 \pm 0.178$  vs  $0.891 \pm 0.083$ ,  $P = 0.022$ )。同时, cQFR 预测 TVR 事件的 AUC 值为 0.857, 其灵敏度和特异度分别为 88% 和 80%。生存分析表明, 当血管水平  $cQFR \leq 0.82$  时, TVR 的发生率显著增加(log-rank  $P =$

0.000 4)。因此,在植入第2代DES后立即进行cQFR测量以判断有无残余心肌缺血,有助于制定最佳的治疗策略,避免后续再次手术。Buono等<sup>[31]</sup>进行了一项事后分析,旨在探索QFR预测可疑冠心病患者长期不良事件发生率的可行性和可重复性。结果表明,即使患者冠脉造影无明显狭窄,当存在任意一支主要血管 $QFR \leq 0.80$ 时,患者发生MACCE的风险仍显著增加( $HR=3.14, P=0.000 1$ ),并且QFR具有较好的可重复性。

也有前瞻性研究指出,QFR可预测左主干病变患者桥血管的通畅率<sup>[32]</sup>。该研究中位随访时间为3.6年,共纳入22例接受冠脉旁路移植的左主干病变患者,含65条血管。结果表明,QFR判断桥血管闭塞的AUC值为0.70( $P=0.03$ );而QCA和IVUS中的相关参数则无预测价值。

### 5 QFR的限制性

首先,QFR的计算是基于高质量的冠脉造影图像,若冠脉造影质量不佳或存在严重的体位重叠均会导致QFR的错估。其次,在开口病变、严重迂曲钙化病变、冠脉微循环功能障碍以及存在侧支循环的病变中,QFR评估的准确性会有较大的受限<sup>[33]</sup>。最后,QFR始终是对FFR的估测,在某些情况下(如QFR介于0.75~0.85)仍需进行FFR测量,以获得准确的FFR值<sup>[34]</sup>。

### 6 结论

随着技术的进步,冠脉影像学 and 生理学技术得到了飞速发展。在腔内影像学方面,IVUS和OCT均可展示管腔的精细结构。IVUS无需预扩张即可进行腔内成像,不受血管迂曲、重叠的影响;而OCT的超高分辨率可以精确评估斑块特点、识别易损斑块,并可识别IVUS无法识别的细微结构如支架边缘夹层、支架组织覆盖<sup>[35]</sup>。近期更有研究报道了IVUS-OCT融合导管在临床中的应用价值<sup>[36]</sup>。而在冠脉生理学评估方面,iFR、cFFR、计算机断层扫描-血流储备分数(CT-derived fractional flow reserve,CT-FFR)和OCT衍生的FFR(optical coherence tomography-based FFR,OFr)等新技术也不断涌现,并展现出较高的临床应用价值。设备的迭代更新、计算机技术的进步不仅使得冠心病的诊断与治疗更加精准,而且可以协助临床医生优化手术过程、改善患者的临床结局、提高患者的生活质量。

但上述技术均存在价格昂贵或者操作复杂的问题,能够真正渗透到临床常规诊疗流程的必然是更加简单、易行且价格低廉的技术。与其他技术相比,3D-QCA无需额外的有创操作、操作简便、耗时短、成本低、结果解读更加简单,临床实用性强。研究证实,3D-QCA衍生的解剖学参数对冠脉功能性狭窄的诊断价值与IVUS相当<sup>[12]</sup>。而3D-QCA衍生的FFR更是融合了冠脉的解剖与生理学评估,

弥补了3D-QCA的不足。针对QFR的卫生经济学研究也表明,QFR指导下的PCI策略可显著降低患者住院期间的总费用<sup>[27]</sup>。3D-QCA技术及其衍生的QFR可精准评估病变严重性,避免漏诊及过度诊疗,改善患者预后并节省医疗费用。相信随着计算机技术以及人工智能的进一步发展,3D-QCA将具有广阔的发展潜力。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] Neumann F, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization[J]. Eur Heart J, 2019, 40(2): 87-165.
- [2] Freitas SA, Nienow D, da Costa CA, et al. Functional Coronary Artery Assessment; a Systematic Literature Review[J]. Wien Klin Wochenschr, 2022, 134(7-8): 302-318.
- [3] Okutucu S, Cilingiroglu M, Feldman MD. Physiologic Assessment of Coronary Stenosis: Current Status and Future Directions[J]. Curr Cardiol Rep, 2021, 23(7): 88.
- [4] 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.
- [5] Chowdhury M, Osborn EA. Physiological Assessment of Coronary Lesions in 2020[J]. Curr Treat Options Cardiovasc Med, 2020, 22(1): 2.
- [6] Garcia-Garcia HM, McFadden EP, Farb A, et al. Standardized End Point Definitions for Coronary Intervention Trials; The Academic Research Consortium-2 Consensus Document[J]. Circulation, 2018, 137(24): 2635-2650.
- [7] Suzuki N, Asano T, Nakazawa G, et al. Clinical expert consensus document on quantitative coronary angiography from the Japanese Association of Cardiovascular Intervention and Therapeutics[J]. Cardiovasc Interv Ther, 2020, 35(2): 105-116.
- [8] Brown BG, Bolson E, Frimer M, et al. Quantitative coronary arteriography: estimation of dimensions, hemodynamic resistance, and atheroma mass of coronary artery lesions using the arteriogram and digital computation[J]. Circulation, 1977, 55(2): 329-337.
- [9] Klein JL, Hoff JG, Peifer JW, et al. A quantitative evaluation of the three dimensional reconstruction of patients' coronary arteries[J]. Int J Card Imaging, 1998, 14(2): 75-87.
- [10] Ding D, Yang J, Westra J, et al. Accuracy of 3-dimensional and 2-dimensional quantitative coronary angiography for predicting physiological significance of coronary stenosis; a FAVOR II substudy[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2019, 9(5): 481-491.
- [11] Zhang YJ, Zhu H, Shi SY, et al. Comparison between two-dimensional and three-dimensional quantitative coronary angiography for the prediction of functional severity in true bifurcation lesions: Insights from the randomized DK-CRUSH II, III, and IV trials[J].

- Catheter Cardiovasc Interv, 2016, 87 Suppl 1: 589-98.
- [12] Lee J, Seo KW, Yang HM, et al. Comparison of three-dimensional quantitative coronary angiography and intravascular ultrasound for detecting functionally significant coronary lesions[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2020, 10(5): 1256-1263.
- [13] 曾秋棠, 程翔, 彭昱东. 冠状动脉功能学和腔内影像学评价进展[J]. 临床心血管病杂志, 2021, 37(5): 398-401.
- [14] Nishi T, Kitahara H, Fujimoto Y, et al. Comparison of 3-dimensional and 2-dimensional quantitative coronary angiography and intravascular ultrasound for functional assessment of coronary lesions[J]. J Cardiol, 2017, 69(1): 280-286.
- [15] Legutko J, Bryniarski KL, Kaluza GL, et al. Intracoronary Imaging of Vulnerable Plaque-From Clinical Research to Everyday Practice[J]. J Clin Med, 2022, 11(22): 6639.
- [16] Nogic J, Prosser H, O'Brien J, et al. The assessment of intermediate coronary lesions using intracoronary imaging[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2020, 10(5): 1445-1460.
- [17] 卢丽丽, 侯俐, 杨天云, 等. CAG与OCT评价DCB行PCI时的冠状动脉管腔变化的差异[J]. 临床心血管病杂志, 2022, 38(1): 28-33.
- [18] Usui E, Yonetsu T, Kanaji Y, et al. Efficacy of Optical Coherence Tomography-derived Morphometric Assessment in Predicting the Physiological Significance of Coronary Stenosis: Head-to-Head Comparison with Intravascular Ultrasound[J]. EuroIntervention, 2018, 13(18): e2210-e2218.
- [19] Nardone M, McCarthy M, Ardern CI, et al. Concurrently Low Coronary Flow Reserve and Low Index of Microvascular Resistance Are Associated With Elevated Resting Coronary Flow in Patients With Chest Pain and Nonobstructive Coronary Arteries[J]. Circ Cardiovasc Interv, 2022, 15(3): e011323.
- [20] Ramasamy A, Jin C, Tufaro V, et al. Computerised Methodologies for Non-Invasive Angiography-Derived Fractional Flow Reserve Assessment: A Critical Review[J]. J Interv Cardiol, 2020: 6381637.
- [21] 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(19): 2024-2035.
- [22] 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(14): e009603.
- [23] Masdjedi K, van Zandvoort L, Balbi MM, et al. Validation of a three-dimensional quantitative coronary angiography-based software to calculate fractional flow reserve: the FAST study[J]. EuroIntervention, 2020, 16(7): 591-599.
- [24] Fearon WF, Achenbach S, Engstrom T, et al. Accuracy of Fractional Flow Reserve Derived From Coronary Angiography[J]. Circulation, 2019, 139(4): 477-484.
- [25] Lauri FM, Macaya F, Mejia-Renteria H, et al. Angiography-derived functional assessment of non-culprit coronary stenoses in primary percutaneous coronary intervention[J]. EuroIntervention, 2020, 15(18): e1594-e1601.
- [26] Sheng X, Qiao Z, Ge H, et al. Novel application of quantitative flow ratio for predicting microvascular dysfunction after ST-segment-elevation myocardial infarction[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2020, 95 Suppl 1: 624-632.
- [27] Song L, Xu B, Tu S, et al. 2-Year Outcomes of Angiographic Quantitative Flow Ratio-Guided Coronary Interventions[J]. J Am Coll Cardiol, 2022, 80(22): 2089-2101.
- [28] Jin Z, Xu B, Yang X, et al. Coronary Intervention Guided by Quantitative Flow Ratio vs Angiography in Patients With or Without Diabetes[J]. J Am Coll Cardiol, 2022, 80(13): 1254-1264.
- [29] Barauskas M, Ziubryte G, Jodka N, et al. Quantitative flow ratio vs. angiography-only guided PCI in STEMI patients: one-year cardiovascular outcomes[J]. BMC Cardiovasc Disord, 2023, 23(1): 136.
- [30] Suzuki N, Nishide S, Kimura T, et al. Relationship of quantitative flow ratio after second-generation drug-eluting stent implantation to clinical outcomes[J]. Heart Vessels, 2020, 35(6): 743-749.
- [31] Buono A, Muhlenhaus A, Schafer T, et al. QFR Predicts the Incidence of Long-Term Adverse Events in Patients with Suspected CAD: Feasibility and Reproducibility of the Method[J]. J Clin Med, 2020, 9(1): 220.
- [32] Dowling C, Nelson AJ, Lim RY, et al. Quantitative flow ratio to predict long-term coronary artery bypass graft patency in patients with left main coronary artery disease[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2022, 38(12): 2811-2818.
- [33] Mejia-Renteria H, Lee JM, Lauri F, et al. Influence of Microcirculatory Dysfunction on Angiography-Based Functional Assessment of Coronary Stenoses[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2018, 11(8): 741-753.
- [34] Yazaki K, Otsuka M, Kataoka S, et al. Applicability of 3-Dimensional Quantitative Coronary Angiography-Derived Computed Fractional Flow Reserve for Intermediate Coronary Stenosis[J]. Circ J, 2017, 81(7): 988-992.
- [35] Raber L, Mintz GS, Koskinas KC, et al. Clinical use of intracoronary imaging. Part 1: guidance and optimization of coronary interventions. An expert consensus document of the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions[J]. Eur Heart J, 2018, 39(35): 3281-3300.
- [36] Ono M, Kawashima H, Hara H, et al. Advances in IVUS/OCT and Future Clinical Perspective of Novel Hybrid Catheter System in Coronary Imaging[J]. Front Cardiovasc Med, 2020, 7: 119.