

## 定量血流分数的相关研究及临床应用进展\*

李佳玮<sup>1</sup> 程兆云<sup>1</sup> 李正玉<sup>1</sup> 陈乾坤<sup>1</sup> 赵豪<sup>1</sup> 张世权<sup>1</sup>

**【摘要】** 近年来针对冠状动脉狭窄的功能学评估已引起国内外的广泛重视,血流储备分数(FFR)是目前公认的评价病变血管狭窄生理学意义的“金标准”,但因其操作复杂且使用的压力导丝存在创伤风险,故而难以广泛应用于临床。定量血流分数(QFR)与FFR在诊断效能上具有较高的一致性,且在临床实践中更加便捷、安全,能够弥补FFR的不足之处。本文基于国内外现有研究进展,对QFR的原理、临床应用、优势和限制进行阐述。

**【关键词】** 冠心病;定量血流分数;血流储备分数

**DOI:**10.13201/j.issn.1001-1439.2024.04.004

**【中图分类号】** R541.4 **【文献标志码】** A

### Related research and clinical application progress of quantitative flow ratio

LI Jiawei CHENG Zhaoyun LI Zhengyu CHEN Qiankun  
ZHAO Hao ZHANG Shiquan

(Zhengzhou University People's Hospital, Heart Center of Henan Provincial People's Hospital, Fuwai Central China Cardiovascular Hospital, Zhengzhou, 450003, China)

Corresponding author: CHENG Zhaoyun, E-mail: chengzhy@zzu.edu.cn

**Abstract** In recent years, the functional evaluation value of coronary artery stenosis has attracted extensive attention at home and abroad. Fractional flow reserve(FFR) is currently recognized as the "gold standard" to evaluate the physiological significance of pathological vessel stenosis, but it is difficult to be widely used in clinical practice due to its complex operation and the risk of trauma caused by the use of pressure guide wire. Quantitative flow ratio(QFR) has a high consistency with FFR in diagnostic efficacy, and is more convenient and safer in clinical practice, which can make up for the shortcomings of FFR. Based on the current research progress at home and

\*基金项目:河南省科技攻关计划(No:SBGJ202101005)

<sup>1</sup>郑州大学人民医院 阜外华中心血管病医院 河南省人民医院心脏中心(郑州,450003)

通信作者:程兆云,E-mail:chengzhy@zzu.edu.cn

**引用本文:**李佳玮,程兆云,李正玉,等.定量血流分数的相关研究及临床应用进展[J].临床心血管病杂志,2024,40(4):271-275. DOI:10.13201/j.issn.1001-1439.2024.04.004.

- [16] Shafei AE, Ali MA, Ghanem HG, et al. Mesenchymal stem cell therapy: a promising cell-based therapy for treatment of myocardial infarction[J]. J Gene Med, 2017, 19(12): 110.
- [17] Perin EC, Borow KM, Henry TD, et al. Randomized trial of targeted transendocardial mesenchymal precursor cell therapy in patients with heart failure[J]. J Am Coll Cardiol, 2023, 81(9): 849-863.
- [18] 中华医学会组织修复与再生分会心脏再生学组. 自体干细胞移植治疗心力衰竭中国专家共识(2022)[J]. 中华医学杂志, 2023, 103(18): 1376-1385.
- [19] Mebazaa A, Davison B, Chioncel O, et al. Safety, tolerability and efficacy of up-titration of guideline-directed medical therapies for acute heart failure (STRONG-HF): a multinational, open-label, randomised, trial[J]. Lancet, 2022, 400(10367): 1938-1952.
- [20] Messika-Zeitoun D, Verta P, Gregson J, et al. Impact of tricuspid regurgitation on survival in patients with heart failure: a large electronic health record patient-level database analysis[J]. Eur J Heart Fail, 2020, 22(10): 1803-1813.
- [21] Vahanian A, Beyersdorf F, Praz F, et al. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease[J]. Eur Heart J, 2022, 43(7): 561-632.
- [22] Misumida N, Steidley DE, Eleid MF. Edge-to-edge tricuspid valve repair for severe tricuspid regurgitation 20 years after cardiac transplantation[J]. ESC Heart Fail, 2020, 7(6): 4320-4325.
- [23] Rehan ST, Egbal F, Ul Hussain H, et al. Transcatheter Edge-to-Edge repair for tricuspid regurgitation-a systematic review and meta-analysis[J]. Curr Probl Cardiol, 2024, 49(1 Pt B): 102055.
- [24] Sorajja P, Whisenant B, Hamid N, et al. Transcatheter repair for patients with tricuspid regurgitation[J]. N Engl J Med, 2023, 388(20): 1833-1842.

(收稿日期:2024-02-19)

abroad, this paper expounds the principle, clinical application, advantages and limitations of QFR.

**Key words** coronary heart disease; quantitative flow ratio; fractional flow reserve

心血管疾病作为影响我国居民健康的最主要因素之一,其患病率呈逐年上升趋势,《中国心血管健康与疾病报告 2021》指出,心血管疾病分别占我国农村与城市人口死因的 46.74% 和 44.26%<sup>[1]</sup>,该疾病的预防和治疗形势日益严峻,如何更科学地选择治疗策略以改善患者的临床结局是当下研究的热点。选择性冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)作为冠心病诊断与评估解剖狭窄程度的“金标准”,临床医师依据其所提供病变血管的解剖学形态特征制定针对性的治疗方案,改善患者预后及生活质量。随着近年来对冠状动脉(冠脉)狭窄病变下游血流灌注状态的重视度逐渐提高,有相关研究表明将冠脉血管功能学评估作为参考能显著提高患者的临床收益<sup>[2]</sup>。1993 年 Nico Pijls 等提出了血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)的概念,其定义为狭窄血管所供区域所能获得的最大血流与理论上该区域在正常情况下所能获得的最大血流之比,即心肌最大充血状态下的狭窄远端冠脉内平均压(Pd)与冠脉口部主动脉平均压(Pa)的比值。FFR 目前已作为侵入性 CAG 期间评估冠脉疾病生理学意义的“金标准”<sup>[3]</sup>,但因 FFR 技术操作相对复杂,压力导丝价格昂贵,存在的侵入性创伤有可能诱发斑块破裂或损伤血管,测量时使用的腺苷等血管扩张药物可能会引起患者心悸、胸闷、呼吸困难等不良反应<sup>[4-5]</sup>,所以限制了其在临床应用中的推广。作为一项无创血流储备分数测量技术,定量血流分数(quantitative flow ratio, QFR)能够代替 FFR 给予狭窄血管功能学评价,已普遍获得研究者的青睐,现就 QFR 的原理、优缺点和临床应用进展予以综述。

## 1 QFR 的原理及诊断效能

为全面评估冠脉分支病变的严重程度,2015 年 Tu 等<sup>[6]</sup>提出了基于 2 个血管造影投影的三维重建模型,并以 FFR 作为参考标准评价了该模型的准确性,随之研发出的基于 CAG 影像的无导丝 FFR 快速分析系统——QFR 技术近年来已批准上市。QFR 技术的测定原理如下:①对于心外膜正常的冠脉,其血管内压力保持恒定;②冠脉存在的形态学狭窄和流经该狭窄处的血流决定了血管内压力的下降程度,可通过流体力学方程进行分析;③借助三维重建定量分析技术,将狭窄病变处管径与正常冠脉作对比,能够描述出狭窄部位的形态特征;④冠脉末梢血流速度相对于近端保持不变,同时主要冠脉发出侧支后逐渐变细,它的质量流率因而减小。因此,根据平均血流速度和三维重建定量分析技术测定的管径大小,能够得出沿该血管各处

的质量流率<sup>[7]</sup>。具体的测量方法需通过将目标血管的两个成角 $\geq 25^\circ$ 的标准造影图像上传至 Angio-Plus 系统进行三维重建,通过计算血管狭窄部位的管径及面积百分比,经静息态 TIMI 数帧获得流速并拟合出最大充血状态下单位时间血流量,绘制出压力曲线模型,最终计算 QFR 值。

国内多中心的 FAVOR II China 研究共入组了 308 例患者,通过将 328 支病变血管的 QFR 值与 FFR 值作对比,发现 QFR 在患者及血管水平的诊断准确率分别为 92.4% 和 92.7%,诊断灵敏度和特异度分别为 94.6% 和 91.7%<sup>[8]</sup>。在欧洲和日本进行的 FAVOR II E-J 是一项前瞻性、观察性、多中心研究,该研究共纳入 329 例患者,同样以 FFR 作为“金标准”对 317 处病变进行了对比评估,结果显示 QFR 的灵敏度和特异度分别为 86.5% 和 86.9%,结论认为通过 QFR 评价冠脉血管狭窄切实可行<sup>[9]</sup>。WIFI II 研究对 240 处直径狭窄处于 30%~90% 的血管成功进行了 QFR 计算,以 FFR 临界值 0.80 作为参考标准,得出 QFR 诊断灵敏度、特异度、阴性预测值和阳性预测值分别为 77%、86%、75% 和 87%<sup>[10]</sup>。此外,鉴于微循环功能障碍对 FFR 和基于流体动力学的技术存在潜在影响,Mejía-Rentería 等<sup>[11]</sup>在研究中发现 FFR 和 QFR 不一致的病例中,54% 存在微循环功能障碍,尽管高水平的微循环阻力指数致使 QFR 的阳性预测值降低,QFR 在确定功能性狭窄严重程度方面仍然具有一定优势。

## 2 QFR 的临床优势和限制

作为一项无创血流储备分数测定技术,QFR 与 FFR 相比具有一定的临床应用优势:无需昂贵的压力导丝,避免了导丝输送至病变部位时诱发斑块破裂、损伤血管的风险;避免了患者对腺苷等血管扩张剂不耐受而产生的不良反应,如胸痛、呼吸困难、心动过缓等;临床试验显示完成 QFR 检查(包括三维重建和帧数分析)所需平均时间明显短于 FFR,中位数时间分别为 5.0 min 和 7.0 min<sup>[9]</sup>。由此可见 QFR 技术提高了诊断的安全性,减少了诊断时间和费用,更适宜在临床上推广使用。

研究发现 QFR 的诊断效能会受到一些因素的限制,使得其单独评估冠脉狭窄程度的准确性下降。既往研究显示 QFR 的阳性预测值和阴性预测值分别为 85.5% 和 97.1%<sup>[8]</sup>,冠脉微循环阻力增高、既往心肌梗死、慢性肾功能不全、糖尿病需胰岛素治疗等因素都会影响 QFR 准确性,尤其是对于计算数值在 0.80 附近的临界病变血管<sup>[12-13]</sup>。对处于临界病变的患者,临床医生应根据其他相关检查

以及临床症状综合考虑是否需要血运重建,必要时行 FFR 检查以进一步降低风险。

规范的 QFR 分析步骤对冠脉造影的质量要求较为严格,在血管造影图像质量欠佳的情况下需要手动校正,因此其结果受冠脉造影医师和 QFR 分析人员的操作影响<sup>[8]</sup>,如存在冠脉开口处显示不佳、血管显影严重扭曲、多支血管重叠等情况,则无法进行准确测量,可以借助 FFR 或基于光学相干断层成像的 FFR 进行评估。此外,QFR 需应用 TIMI 帧法来评估血流速度,术者注射造影剂的施加力是否影响测量数值的准确性仍待进一步研究。

### 3 QFR 相关临床应用研究

#### 3.1 指导经皮腔内冠脉介入治疗

FAVOR III China 研究是迄今为止针对 QFR 指导经皮腔内冠脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)最大规模的临床对照试验<sup>[14]</sup>,共纳入了 3 781 例患者,研究结果发现在经血管造影评估后分为无需完全血运重建的患者中,有将近 2/3 的患者经 QFR 评估后重新认定为需要进行功能性完全血运重建(functional complete revascularization, FCR),且患者随访 1 年内主要不良心血管事件(major adverse cardiac event, MACE)的显著降低与 PCI 术后达到 FCR 相关。研究还显示,在血管造影评估需 FCR 的患者中,QFR 指导组的 1 年 MACE 结局发生率比 CAG 指导组更低(4.9% vs 7.1%;  $HR = 0.69$ ; 95%  $CI$  0.49~0.98);经血管造影评估无需 FCR 的患者中,QFR 指导组同样降低了 1 年 MACE 结局发生率(2.8% vs 4.1%;  $HR = 0.68$ ; 95%  $CI$  0.35~1.31)。此研究中 QFR 指导下的血运重建策略对远期预后和成本效益的影响仍待后续的探索。

QFR 同样用于对 PCI 术后靶血管缺血改善情况的评价。FANTOM II 试验纳入了 235 例 Fantom 西罗莫司洗脱生物可吸收冠脉支架植入术后的患者,对靶血管分别进行了基线、PCI 术后、6 个月、9 个月和 24 个月随访时的 QFR 测量,结果显示 PCI 术后各随访时间点靶血管的功能性缺血情况相较于基线在总体上明显改善,但随着时间推移 QFR 值略有下降<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 评估患者 MACE 发生率及预后

有研究指出,术者经常忽视 PCI 术后残余的血流限制性狭窄,为研究其与患者临床结局之间的关系,通过对 274 例患者 PCI 术后残余定量血流分数(residual quantitative flow ratio, rQFR)进行测定,证实  $rQFR \leq 0.89$  与 PCI 术后 2 年血管导向复合终点事件(定义为心血管相关死亡、心肌梗死和靶血管血运重建)风险增加相关<sup>[16]</sup>。研究将首次手术后的靶病变血运重建(target lesion revascular-

ization, TLR)作为主要终点事件,发现与解剖学信息相比,术后 QFR 梯度是 TLR 在统计学上独立且更强的预测因素<sup>[17]</sup>。国内一项多中心回顾性队列研究旨在探讨 QFR 对于重度钙化病变患者旋磨术后接受 PCI 治疗的远期预测价值,经过 3 年的随访后发现术后 QFR 值是靶血管再阻塞的强预测因素, $QFR = 0.94$  可作为区分预后的临界截点( $AUC = 0.826$ , 95%  $CI$  0.756~0.895;  $P < 0.01$ ),PCI 术后低 QFR 值与靶血管再阻塞密切相关<sup>[18]</sup>。

#### 3.3 评估心肌梗死急性期非罪犯血管的功能学意义

临床上普遍认同对 ST 段抬高型心肌梗死(ST segment elevation myocardial infarction, STEMI)患者的罪犯血管进行血运重建,然而是否应对非罪犯血管进行积极干预尚未统一共识。一项多中心研究通过过置的方式计算 PCI 手术期间非罪犯血管的 QFR 值,与 FFR 值进行比较,证实了 QFR 在评估 PCI 期间非罪犯血管的功能学意义方面具有良好的诊断准确性( $AUC = 0.91$ ; 95%  $CI$  0.85~0.97)<sup>[19]</sup>。意大利的一项研究纳入了 186 例多支血管病变的 STEMI 患者,通过分析病变血管 QFR 值和术后不良事件发生率之间的关系,发现不完全血运重建组患者相关心脏事件的累积发生率显著高于功能性完全血运重建组(46% vs 24%;  $P = 0.01$ ),且非罪犯血管 QFR 值  $\leq 0.80$  的患者发生不良事件的风险较高( $HR = 2.3$ ; 95%  $CI$  1.2~4.5;  $P = 0.01$ )<sup>[20]</sup>。上述研究表明 QFR 技术用于指导 STEMI 患者非罪犯血管的血运重建是安全可靠的。

#### 3.4 评估冠脉微循环障碍

牛津心脏中心开发并验证了一项 QFR 相关技术——血管造影衍生的微循环阻力指数(angio-IMR),用以作为微循环障碍的评估指标,避免了压力导丝的潜在使用风险和临床应用限制<sup>[21]</sup>。该技术参考压力导丝测量微循环阻力指数(index of microcirculatory resistance, IMR)的计算公式:  $IMR = \text{充血时的远端压力}(Pd) \times \text{充血时的平均通过时间}(tT_{mean})$ ,并用 QFR 作为  $Pd/Pa$  比值的替代,帧数(Nframes)和采集速率(fps)的比值替代  $tT_{mean}$ ,然后将原计算公式变形后得出了 angio-IMR 的计算公式:  $IMR_{angio} = Pa \times QFR \times \frac{Nframes}{fps}$ 。研究者以常规的经导丝测量 IMR 值作为参考标准,经对比研究显示无需导丝测量的 angio-IMR 值和与其同时期的 IMR 值显著相关( $\rho: 0.85$ ,  $P < 0.001$ ),且当  $IMR_{angio} \geq 40$  U 时预测 STEMI 患者存在冠脉微循环障碍准确度较高( $AUC = 0.96$ ; 95%  $CI$  0.92~1.00,  $P < 0.001$ )。Mejia-Renteria 等<sup>[22]</sup>将 104 例患者的 115 支病变血管纳入研究分

析,结果显示 angio-IMR 预测 IMR 的灵敏度、特异度、阳性预测值和阴性预测值分别为 87.5%、85.3%、76.1%、92.8%,认为 angio-IMR 作为一项不使用导丝和腺苷估计 IMR 的技术是可靠的,且通过了解 angio-IMR 有助于更好地解释 QFR 在临床中评估功能性狭窄的结果。

### 3.5 QFR 在冠脉外科领域的应用

目前普遍认同使用功能学评估方法指导 PCI 改善了患者的临床结局<sup>[2]</sup>,然而,功能学评估在指导外科血运重建中的作用尚不明确。国外的一项荟萃分析共采用了 6 篇研究数据,以评估 FFR 指导下的血运重建策略对冠脉旁路移植术(coronary artery bypass grafting, CABG)后临床结局的影响,其结果显示 FFR 引导的 CABG 患者与接受 CAG 引导的 CABG 患者之间的 MACE 风险无显著差异( $HR=0.80$ ;95% $CI$  0.57~1.12),不过在接受 FFR 引导的 CABG 患者中,死亡或心肌梗死的复合风险显著较低( $HR=0.62$ ;95% $CI$  0.41~0.94)<sup>[23]</sup>。虽然 QFR 的诊断效能和 FFR 有高度的一致性,但仍缺乏 QFR 指导下 CABG 的预后研究。上海瑞金医院组织开展的定量血流分数指导原发性瓣膜病合并冠脉病变血运重建策略的研究(QVAS)是一项旨在探索 QFR 指导下外科手术患者有效性与安全性的前瞻性、多中心、随机对照研究,目前正在入组患者。

为探索 QFR 在预测 CABG 移植血管远期通畅率方面的意义,研究者对接受 CABG 且合并左主干病变的冠心病患者进行了 QFR 评估,术后中位随访时间为 3.6 年,长期随访显示 QFR $>0.80$  的靶血管发生移植物闭塞的风险较高(58.6% vs 17.0%),其具有预测移植血管闭塞的能力( $AUC=0.70$ ;95% $CI$ :0.52~0.88; $P=0.03$ ),研究者指出竞争性血流只是影响移植物远期通畅率的多种潜在机制之一,QFR 在单独使用时其临床实用性可能受限,QFR 在此研究中的诊断效能仅为中等<sup>[24]</sup>。另有研究证实了竞争性血流对移植物的影响,通过术前评价左前降支的 QFR 值,结合术中及时血流测定(transit-time flow measurement, TTFM)进行分析,证明了 CABG 期间移植血管的 TTFM 变量(尤其是搏动指数)受到术前 QFR 值的强烈影响,并且在轻度功能性狭窄的冠脉中,产生竞争性血流的机会显著升高<sup>[25]</sup>。QFR 作为一种识别潜在血流限制性病变的无创技术,还可用于对心脏移植患者血管病变(cardiac allograft vasculopathy, CAV)的预测。意大利和西班牙的 4 家临床试验机构合作进行了一项多中心、回顾性、观察性研究,共纳入 143 例心脏移植患者,中位随访时间为 6 年,研究者将心脏移植术后首次行冠脉造影的结果进行分析,得出基线 QFR 值。研究结果表

明基线 QFR 的临界值 $\leq 0.95$ ( $AUC=0.81$ ;95% $CI$  0.71~0.90; $P<0.001$ ),QFR $\leq 0.95$  与 CAV 风险增加相关( $HR=20.87$ ;95% $CI$  5.35~81.43; $P<0.001$ );如出现至少 2 支血管的基线 QFR $\leq 0.95$ ,发生心血管相关死亡或晚期移植物功能障碍的概率显著升高<sup>[26]</sup>。上述研究表明 QFR 可作为预测患者远期临床结局的可靠技术。

QFR 技术在指导心肌桥患者的精准治疗方面具有应用前景。作为一种先天性冠脉发育异常,心肌桥在临床上常被认为是一种“良性病变”,但如果病变位置发生在左前降支等主要血管可能会引起广泛的心肌缺血。因此临床上需要一种有效的评估模型用于心肌桥患者的治疗决策。有研究者提出了使用时间平均 QFR(TA-QFR),即收缩期几何结构 QFR 和舒张期几何结构 QFR 的平均值作为判断心肌桥是否需要外科干预的指标( $AUC=0.91$ ;95% $CI$  0.79~0.98),并认为 TA-QFR 预测是否需要手术的截断值为 0.88,其在准确性、灵敏度、特异度、阴性预测值和阳性预测值方面分别为 89%、85%、92%、90% 和 89%<sup>[27]</sup>。目前国内尚缺少针对心肌桥功能学意义的评估研究,为此需要进一步探索。

## 4 小结

QFR 作为一项无创血流储备分数技术,与 FFR 相比在安全、效率等方面更具有优势,多项大规模临床研究都已证实其在冠脉狭窄功能学评估中具有重要的临床应用价值。目前 QFR 在指导冠心病的介入治疗及评估患者预后等方面已有广泛的关注和研究,而在外科领域的应用价值还需要更加充分的循证医学证据。随着越来越多的数据结果支持,QFR 有望在临床上推广成为优化策略、精准治疗、改善患者预后的常用技术。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] 《中国心血管健康与疾病报告 2021》编写组.《中国心血管健康与疾病报告 2021》要点解读[J]. 中国心血管杂志,2022,27(4):305-318.
- [2] Lawton JS, Tamis-Holland JE, Bangalore S, et al. 2021 ACC/AHA/SCAI Guideline for Coronary Artery Revascularization[J]. Circulation, 2022, 145(3):e18-e114.
- [3] Morris PD, van de Vosse FN, Lawford PV, et al. "Virtual" (Computed) fractional flow reserve: current challenges and limitations[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2015, 8(8):1009-1017.
- [4] 王莽原,宋江平,胡盛寿. 血流储备分数的临床作用和优缺点及近期进展[J]. 中国循环杂志, 2015, 30(6): 599-601.
- [5] 袁兴东,徐瑾,钟长鸣,等. 437 例三磷酸腺苷不良反应的文献分析[J]. 中国药物警戒, 2016, 13(2):94-97.
- [6] Tu S, Echavarría-Pinto M, von Birgelen C, et al. Frac-

- tional flow reserve and coronary bifurcation anatomy: a novel quantitative model to assess and report the stenosis severity of bifurcation lesions[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(4):564-574.
- [7] 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.
- [8] 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(25):3077-3087.
- [9] 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):110.
- [10] 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(3):e7107.
- [11] 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.
- [12] Zaleska M, Koltowski L, Maksym J, et al. Quantitative flow ratio and fractional flow reserve mismatch-clinical and biochemical predictors of measurement discrepancy[J]. *Postepy Kardiologii Interwencyjnej*, 2019, 15(3):301-307.
- [13] Emori H, Kubo T, Kameyama T, et al. Diagnostic accuracy of quantitative flow ratio for assessing myocardial ischemia in prior myocardial infarction[J]. *Circ J*, 2018, 82(3):807-814.
- [14] Zhang R, Wang HY, Dou K, et al. Outcomes of functionally complete vs incomplete revascularization: insights from the FAVOR III China Trial[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2022, 15(24):2490-2502.
- [15] Saito Y, Cristea E, Bouras G, et al. Long-term serial functional evaluation after implantation of the Fantom sirolimus-eluting bioresorbable coronary scaffold[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2021, 97(3):431-436.
- [16] Lee HJ, Mejia-Renteria H, Escaned J, et al. Prediction of functional results of percutaneous coronary interventions with virtual stenting and quantitative flow ratio[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2022, 100(7):1208-1217.
- [17] Kirigaya H, Okada K, Hibi K, et al. Post-procedural quantitative flow ratio gradient and target lesion revascularization after drug-coated balloon or plain-old balloon angioplasty[J]. *J Cardiol*, 2022, 80(6):511-517.
- [18] You W, Zhou Y, Wu Z, et al. Post-PCI quantitative flow ratio predicts 3-year outcome after rotational atherectomy in patients with heavily calcified lesions [J]. *Clin Cardiol*, 2022, 45(5):558-566.
- [19] Lauri FM, Macaya F, Mejia-Renteria H, et al. Angiography-derived functional assessment of non-culprit coronary stenoses in primary percutaneous coronary intervention [J]. *Euro Intervention*, 2020, 15(18):e1594-e1601.
- [20] Spitaleri G, Tebaldi M, Biscaglia S, et al. Quantitative flow ratio identifies nonculprit coronary lesions requiring revascularization in patients with ST-segment-elevation myocardial infarction and multivessel disease [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2018, 11(2):e6023.
- [21] De Maria GL, Scarsini R, Shanmuganathan M, et al. Angiography-derived index of microcirculatory resistance as a novel, pressure-wire-free tool to assess coronary microcirculation in ST elevation myocardial infarction[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(8):1395-1406.
- [22] Mejia-Renteria H, Lee JM, Choi KH, et al. Coronary microcirculation assessment using functional angiography: Development of a wire-free method applicable to conventional coronary angiograms [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2021, 98(6):1027-1037.
- [23] Kang Y, Hong H, Sohn SH, et al. The impact of fractional flow reserve on clinical outcomes after coronary artery bypass grafting: a meta-analysis [J]. *J Chest Surg*, 2022, 55(6):442-451.
- [24] 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.
- [25] Chen C, Zhao Y, Li W, et al. Relation of quantitative flow ratio with transit time coronary artery bypass graft flow measurement [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9:975759.
- [26] Spitaleri G, Brugaletta S, Potena L, et al. Role of quantitative flow ratio in predicting future cardiac allograft vasculopathy in heart transplant recipients [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2022, 15(5):e11656.
- [27] Qi Q, Liu G, Yuan Z, et al. Quantitative flow ratio-guided surgical intervention in symptomatic myocardial bridging [J]. *Cardiol J*, 2020, 27(6):685-692.