

冠状动脉血管内超声与定量血流分数的相关性研究

孙纯刚^{1,2*}, 吴国良², 孙恒晨², 潘振瑞², 张积涛², 于忠祥^{2#}

¹青岛大学医学部, 山东 青岛

²青岛大学附属青岛市海慈医院心血管二科, 山东 青岛

收稿日期: 2026年8月15日; 录用日期: 2026年9月8日; 发布日期: 2026年9月16日

摘要

目的: 探讨血管内超声(IVUS)所测冠脉病变最小面积、病变长度、斑块负荷指标与冠脉血流分数(QFR)的相关性, 为临床判断冠脉病变的程度与性质, 提供关键的数据支持, 进一步分析不同靶血管、斑块类型、合并症亚组下IVUS形态指标与QFR关联的异质性特征。方法: 选取258例行IVUS及QFR检查的冠心病患者作为研究对象, 收集患者一般临床资料、IVUS相关指标(最小面积、病变长度、斑块负荷)及QFR值, 采用Spearman相关性分析, 检验IVUS各项指标与QFR之间的关联性, 依据靶血管、斑块性质、是否合并糖尿病开展亚组分层Spearman相关分析, 对比各亚组相关系数与统计学差异。结果: 病变长度与QFR之间呈显著的负相关($r = -0.138, P = 0.027$), 亚组分层结果: ① 靶血管分层: LAD组病变长度与QFR ($r = -0.161, P = 0.042$); 非LAD组($r = -0.097, P = 0.215$), 仅LAD亚组二者相关性存在统计学意义; ② 斑块性质分层: 钙化斑块亚组($r = -0.174, P = 0.035$), 非钙化斑块亚组($r = -0.102, P = 0.186$), 钙化斑块人群病变长度与QFR关联更显著; ③ 糖尿病分层: 合并DM组($r = -0.189, P = 0.021$), 非DM组($r = -0.105, P = 0.169$), 糖尿病患者病变长度对QFR的负向影响更突出。结论: QFR的降低与靶血管病变长度的增加呈显著负相关, 尤其关联在LAD病变、钙化斑块、合并糖尿病患者中负相关更为明显。

关键词

血管内超声, 冠脉血流分数, 冠脉病变, 相关性, 亚组分析

Correlation Study between Intravascular Ultrasound and Quantitative Flow Ratio in Coronary Arteries

Chungang Sun^{1,2*}, Guoliang Wu², Hengchen Sun², Zhenrui Pan², Jitao Zhang²,

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 孙纯刚, 吴国良, 孙恒晨, 潘振瑞, 张积涛, 于忠祥. 冠状动脉血管内超声与定量血流分数的相关性研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(9): 1708-1715. DOI: 10.12677/acm.2026.1693213

Zhongxiang Yu^{2#}¹Medical School, Qingdao University, Qingdao Shandong²Department of Cardiology II, Qingdao Haici Hospital Affiliated to Qingdao University, Qingdao Shandong

Received: August 15, 2026; accepted: September 8, 2026; published: September 16, 2026

Abstract

Objective: To explore the correlations between the minimum area, lesion length, plaque burden indicators measured by intravascular ultrasound (IVUS) and the coronary flow fraction (QFR), providing key data support for clinical assessment of the severity and nature of coronary artery lesions, and further analyzing the heterogeneity characteristics of IVUS morphological indicators and QFR associations under different target vessels, plaque types, and subgroups with comorbidities. **Methods:** 258 patients with coronary heart disease who underwent IVUS and QFR examinations were selected as the research subjects. General clinical data, IVUS-related indicators (minimum area, lesion length, plaque burden), and QFR values were collected. Spearman correlation analysis was used to test the correlations between IVUS indicators and QFR. Subgroup stratified Spearman correlation analysis was conducted based on target vessels, plaque types, and whether diabetes was present. The correlation coefficients and statistical differences among subgroups were compared. **Results:** There was a significant negative correlation between lesion length and QFR ($r = -0.138$, $P = 0.027$). Subgroup stratified results: ① Target vessel stratification: LAD group ($r = -0.161$, $P = 0.042$); non-LAD group ($r = -0.097$, $P = 0.215$), and only the LAD subgroup had a statistically significant correlation between the two; ② Plaque type stratification: calcified plaque subgroup ($r = -0.174$, $P = 0.035$), non-calcified plaque subgroup ($r = -0.102$, $P = 0.186$), and the association between lesion length and QFR was more significant in the calcified plaque population; ③ Diabetes stratification: DM group ($r = -0.189$, $P = 0.021$), non-DM group ($r = -0.105$, $P = 0.169$), and the negative impact of lesion length on QFR was more prominent in diabetic patients. **Conclusion:** The reduction of QFR is significantly negatively correlated with the increase in the length of the target vessel lesion. This correlation is particularly evident in LAD lesions, calcified plaques, and patients with diabetes.

Keywords

Intravascular Ultrasound, Coronary Flow Fraction, Coronary Artery Lesion, Correlation, Subgroup Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

冠状动脉粥样硬化性心脏病作为心血管系统的常见病，其冠脉病变的形态学与血流动力学特征，被视作临床诊断、治疗方案决策及预后评估的重要基础[1]。血管内超声(IVUS)可清晰显示冠脉血管壁结构、斑块形态及病变的形态学指标，如最小面积、病变长度、斑块负荷等，对冠脉病变进行形态学评估时，该影像学技术提供了重要的支撑[2]-[4]。冠脉定量血流分数(QFR)作为一种无创的冠脉血流动力学评估指标，无需腺苷充血诱导，可精准反映冠脉狭窄对血流的影响，为冠脉病变的功能学评估提供客观依据[5][6]。目前关于冠脉病变形态学指标与功能学指标的关联性研究尚存争议，不同人群、病变特征下二者关

联强度存在明显异质性,既往研究多未开展分层亚组分析[7][8],本研究通过分析 IVUS 所测斑块特点与 QFR 的相关性,并分层探讨靶血管、斑块性质、糖尿病合并症对二者关联的影响,通过整合二者的评估优势,探索其协同潜力,从而指导临床对冠脉病变做出更合理的判断。

2. 资料与方法

2.1. 研究对象

选取行冠脉造影检查提示冠脉病变,并进一步完成血管内超声及冠脉定量血流分数检测的 258 例患者作为研究对象。纳入标准:确诊冠脉病变且完成 IVUS 及 QFR 检测;临床资料完整。排除标准:伴有严重肝肾功能衰竭、或并发恶性肿瘤及自身免疫性疾病;造影剂过敏;无法配合完成相关检查者。

2.2. 检查方法

2.2.1. 血管内超声检查

以波士顿科技血管内超声仪作为检测工具,对冠脉病变部位进行血管内超声成像,由两名资深心血管科医师独立阅片,测量并记录冠脉病变最小面积、病变长度、斑块负荷等指标,最终数据由两位医师测量结果的均值计算得出[9]。

2.2.2. 冠脉定量血流分数检测

基于冠脉造影影像,使用搏动医学软件对 QFR 进行计算,严格按照操作规范完成图像采集、数据处理及指标计算,获得患者病变部位的 QFR 值[10]。

2.3. 观察指标

收集患者一般临床资料:性别、年龄、BMI、吸烟史、既往病史(冠心病 CHD、糖尿病 DM、高血压 HP)、实验室检查指标(TNT/I-肌钙蛋、CKMB-肌酸激酶同工、CRP-C-反应蛋白、肝肾功能、电解质、血脂等)、心脏超声指标(LVEF-左心室射血分、LVIDD-左心室舒张末期径)、冠脉病变预处理方式、介入治疗球囊使用类型等;记录 IVUS 指标(最小面积、病变长度、斑块负荷)及 QFR 值。

分层亚组划分标准:① 靶血管亚组:LAD 组(左前降支病变)、非 LAD 组(LM/LCX/RCA 病变);② 斑块性质亚组:钙化斑块组(IVUS 可见钙化斑块)、非钙化斑块组(仅纤维/脂质斑块,无钙化成分);③ 糖尿病亚组:DM 组(既往确诊 2 型糖尿病)、非 DM 组(无糖尿病病史)。

2.4. 统计学方法

本研究使用 SPSS 27.0 进行数据处理。首先对连续变量实施正态性检验:服从正态分布的以均值 $\pm$ 标准差描述,不服从者则以中位数(四分位距)呈现。分类变量采用频数(百分比)表示。相关性分析方面,正态分布变量选用 Pearson 法,非正态分布变量选用 Spearman 法,依据预设分层标准开展亚组 Spearman 相关性分析,对比各亚组相关系数及显著性差异。所有检验均为双侧,以 $P < 0.05$ 作为差异具有统计学意义的阈值[11]。

3. 结果

3.1. 研究对象一般资料

本研究共纳入 258 例冠脉病变患者,吸烟史阳性者 79 例(30.62%);既往病史分布如下:高血压 166 例(64.34%)、糖尿病 93 例(36.05%)、冠心病 153 例(59.30%);另有 49 例(18.99%)无相关病史。冠脉病变预处理以左前降支(LAD)为主,共 155 例(60.08%);球囊使用类型中棘突球囊 143 例(55.43%),切割球囊

128 例(49.61%)。实验室及心脏超声指标: TNT/I 0.02 (0.20) ng/mL、CK-MB 17.11 (10.31) U/L、LVEF 59.00 (6.00)%、LVIDD 47.00 (5.00) mm。详见表 1。

Table 1. Clinical baseline data of enrolled patients (N = 258)

表 1. 入组患者临床基线资料(N = 258)

变量	(N = 258 例)	变量	(N = 258 例)
性别[例数(%)]		Mg (mmol/L)	0.92 (0.11)
男	183 (70.93)	BUN (μmol/L)	5.43 (2.42)
女	75 (29.07)	Cr (μmol/L)	65.00 (26.34)
年龄(岁)	66.00 (12.00)	UA (mmol/L)	314.60 (134.57)
BMI (Kg/m²)	23.69 (2.95)	LDH (U/L)	202.75 (57.10)
吸烟史[例数(%)]		靶血管[例数(%)]	
是	79 (30.62)	LAD	155 (60.08)
既往史[例数(%)]		LCX	36 (13.95)
—	49 (18.99)	LM	4 (1.55)
CHD	153 (59.30)	RCA	63 (24.42)
DM	93 (36.05)	LVEF (%)	59.00 (6.00)
HP	166 (64.34)	LVIDD (mm)	47.00 (5.00)
TNT/I (ng/mL)	0.02 (0.20)	LDL-C (mmol/L)	2.65 (1.46)
CK-MB (U/L)	17.11 (10.31)	球囊[例数(%)]	
CRP (mg/L)	1.85 (3.15)	非球囊处理	39 (15.12)
谷丙(U/L)	23.30 (14.00)	棘突	143 (55.43)
谷草(U/L)	21.00 (11.70)	切割	128 (49.61)
K (mmol/L)	4.00 (0.43)	旋磨	1 (0.39)
Na (mmol/L)	140.00 (3.00)	振波	2 (0.78)
Ca (mmol/L)	2.20 (0.17)		

3.2. IVUS 及 QFR 一般基线资料

斑块类型以纤维 + 钙化为主, 共 232 例, 其中纤维型 129 例(50.00%), 钙化型 103 例(39.92%); 最小面积 2.45 (1.04) mm², 病变长度 23.90 (14.81) mm, 斑块负荷 80.00 (10.0) (%), QFR 0.40 (0.36)。详见表 2。

Table 2. Baseline data of IVUS and QFR

表 2. IVUS 及 QFR 基线资料

变量	(N = 258 例)	变量	(N = 258 例)
最小面积(mm ²)	2.45 (1.04)	脂质	77 (29.84)
病变长度(mm)	23.90 (14.81)	高危斑块[例数(%)]	
斑块负荷(%)	80.00 (10.00)	是	26 (10.08)

续表

斑块类型[例数(%)]		否	232 (89.92)
超声衰减	19 (7.36)	夹层[例数(%)]	
负性重构	3 (1.16)		
钙化	103 (39.92)	无	252 (97.67)
肌桥	1 (0.39)	有	6 (2.33)
纤维	129 (50.00)	血肿[例数(%)]	
混合	78 (30.23)		
血栓	4 (1.55)	无	255 (98.84)
造影	2 (0.78)	有	3 (1.16)
		QFR	0.40 (0.36)

3.3. 正态性检验结果

正态性检验显示, IVUS 相关指标(最小面积 $W = 0.836$ 、病变长度 $W = 0.919$ 、斑块负荷 $W = 0.924$)及 QFR 值($W = 0.943$)的 P 值均 <0.001 , 不服从正态分布($P < 0.05$)。详见表 3。

Table 3. Normality test results of IVUS and QFR indicators

表 3. IVUS 及 QFR 指标正态性检验结果

变量	w	P
最小面积	0.836	<0.001
病变长度	0.919	<0.001
斑块负荷	0.924	<0.001
QFR	0.943	<0.001

3.4. IVUS 指标与 QFR 的相关性分析

经 Spearman 相关性分析, 冠脉病变最小面积被证实与 QFR 无显著相关性($r = 0.059$, $P = 0.343$), 斑块负荷与 QFR 呈负相关($r = -0.078$, $P = 0.209$), 二者相关性无统计学意义; 病变长度被证实与 QFR 呈负相关($r = -0.138$), 该差异具有统计学意义($P = 0.027$)。详见图 1。

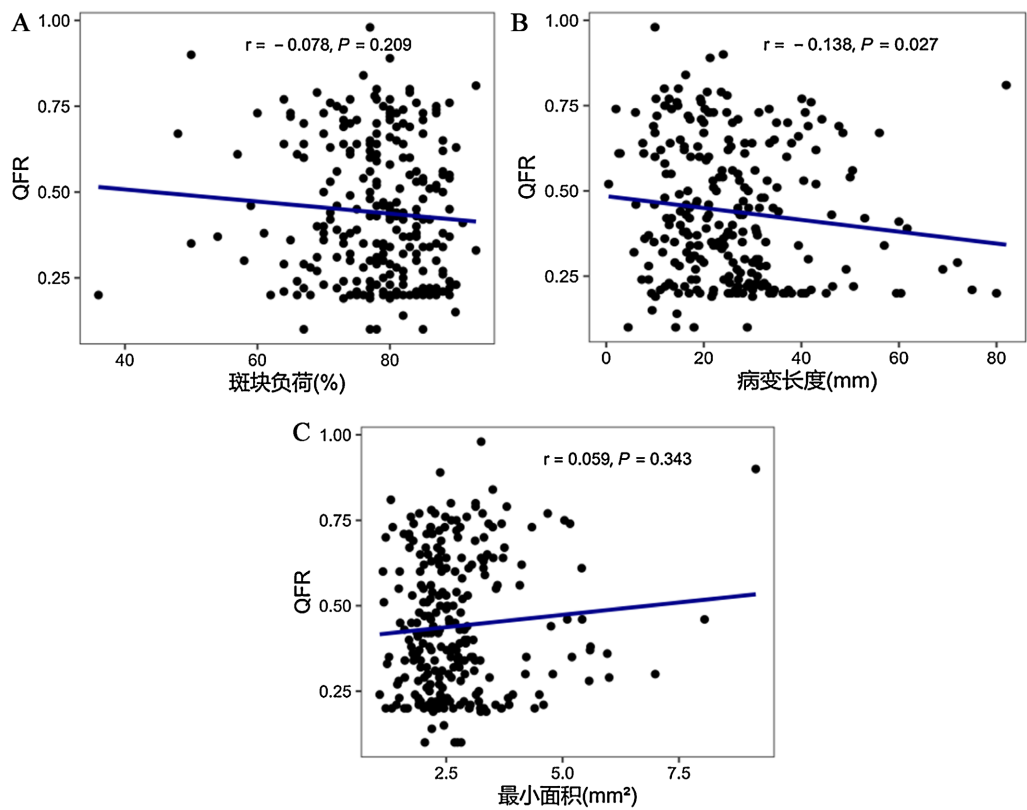
3.5. 分层亚组相关性分析结果

分层分析可见: 仅 LAD 病变、钙化斑块、合并糖尿病亚组中, 病变长度与 QFR 存在统计学显著弱负相关; 其余亚组相关无统计学意义, 提示病变长度对冠脉血流功能的影响存在人群与病变解剖异质性。最小面积、斑块负荷在全部分层亚组中与 QFR 均无显著相关性(均 $P > 0.05$)。见表 4。

4. 讨论

冠脉病变的形态学改变是血流动力学异常的病理基础, 血管内超声可直观反映冠脉病变的形态学特征, 而 QFR 可实现对冠脉狭窄功能学意义的精准判断, 二者联合则为综合评估冠脉病变提供了重要手段 [7] [8]。本研究通过分析 258 例冠脉病变患者的 IVUS 指标与 QFR 的相关性, 并开展多维度分层亚组分析, 旨在揭示冠脉病变形态学与血流动力学的相关性及人群异质。

1. 本研究发现, 随着病变长度增加, QFR 值呈下降趋势($r = -0.138$, $P = 0.027$), 二者为统计学显著的



(附：A 斑块负荷-QFR；B 病变长度-QFR；C 最小面积-QFR)

Figure 1. Scatter plot of the correlation between IVUS indicators and QFR

图 1. IVUS 指标与 QFR 相关性散点图

Table 4. Spearman correlation analysis of lesion length and QFR in different subgroups

表 4. 不同亚组病变长度与 QFR 的 Spearman 相关分析

分层亚组	例数	r	P
LAD 组	155	-0.161	0.042
非 LAD 组	103	-0.097	0.215
钙化斑块组	103	-0.174	0.035
非钙化斑块组	155	-0.102	0.186
糖尿病组	93	-0.189	0.021
非糖尿病组	165	-0.015	0.169

负相关($r = -0.138$, $P = 0.027$), 说明较长的病变节段往往对应更差的冠脉血流储备功能。从血流动力学角度, 冠脉病变长度增加会直接延长狭窄累及的血管节段, 使血流通过阻力显著升高; 同时, 长病变多伴随弥漫性、偏心性狭窄, 进一步破坏血流层流状态, 降低心肌灌注压与血流量, 最终表现为 QFR 值下降。这一结果与这与“病变长度增加→狭窄节段延长→血流阻力升高→冠脉灌注不足→FFR 值降低”的逻辑机制完全一致[12], 也与国内外同类研究结论一致, 证实病变长度是影响冠脉功能的重要解剖因素。结合表 4 分层亚组数据分析: 该负相关仅在 LAD 病变、钙化斑块、合并糖尿病患者中显著存在。LAD 为左心室主要供血血管, 长病变对前壁心肌灌注影响更突出; 钙化斑块血管顺应性下降, 长狭窄段血流阻力

放大；糖尿病患者微血管病变普遍存在，同等长度狭窄下心肌血流储备受损更明显，三类人群中病变长度对 QFR 的负向作用被放大。而 LCX、RCA 等非 LAD 血管、单纯纤维/脂质斑块、无糖尿病患者中，病变长度对血流功能的影响微弱，未达到统计学差异。该异质性结果提示临床解读 IVUS 病变长度时，需结合病变血管、斑块成分、患者代谢基础综合判断，不可单一依靠病变长度预判功能缺血[13]。

本研究在临床应用过程中，研究价值主要体现在：1. 术前功能预判对于 IVUS 提示病变较长的 LAD 病变、钙化斑块、糖尿病患者，即使最小管腔面积未达到重度狭窄标准，也应警惕存在轻度血流动力学受限，及时行 QFR 评估；而对于非 LAD、单纯纤维斑块、无糖尿病患者，单纯长病变导致缺血的风险相对更低，可结合其他指标综合评估，避免过度功能学检查。2. 介入策略指导长病变患者介入治疗时，需充分覆盖病变长度，合理选择支架尺寸，兼顾血流储备恢复；对于 LAD、钙化、糖尿病长病变人群，术后建议复查 QFR 验证血流改善效果，降低术后心肌缺血、心绞痛复发风险；3. 联合评估模式 IVUS 精准测量病变长度，QFR 客观验证功能意义，二者联合可实现“解剖 + 功能”一体化评估，分层识别高风险亚群，提高中等狭窄病变诊疗决策的精准度，进而促进医疗资源的合理分配与利用[5]。

同时需客观认识本指标临床转化局限性：整体相关系数仅-0.138，相关强度弱，提示病变长度仅能轻微解释 QFR 数值波动，临床不可单独依靠病变长度判定病变是否存在缺血功能意义，必须结合 QFR、最小管腔面积、斑块类型、患者基础疾病等多指标综合判断。

2. 本研究中病变最小面积、斑块负荷与 QFR 相关性均无统计学意义($P > 0.05$)，这一结果与部分研究存在差异[14][15]，可能与本研究的样本特征、斑块类型构成及病变部位有关。本研究中斑块类型以纤维 + 钙化型、纤维型为主，高危斑块发生率仅 10.08%，而斑块的成分、稳定性及狭窄的解剖位置均会影响冠脉血流的灌注状态；此外，冠脉血流动力学不仅受局部病变形态的影响，还与冠脉侧支循环、血管弹性、心肌耗氧量等多种因素相关[16]，单一的形态学指标难以全面反映血流动力学变化，这可能是导致最小面积、斑块负荷与 QFR 相关性无统计学意义的重要原因，分层亚组分析中，上述两项指标在各分层人群内仍无显著相关性，进一步提示二者对 QFR 的独立预测价值有限。

3. 本研究存在以下不足：第一，属于单中心回顾性研究，样本规模较小；第二，虽完成靶血管、斑块钙化、糖尿病分层，但未针对不同斑块类型、病变严重程度开展更细化亚组分析；第三，未能纳入冠脉侧支循环、血管重构、微血管功能等潜在影响因素。后续可开展多中心、大样本的前瞻性研究，分层分析不同临床特征患者中 IVUS 指标与 QFR 的相关性，在后续研究中，将纳入更多可影响冠脉血流动力学的相关变量，以深入分析二者之间的本质联系[5]。

5. 结论

血管内超声所测冠脉病变长度与冠脉定量血流分数存在统计学显著的负相关，病变长度增加伴随 QFR 降低；该关联具有明显人群异质性，仅在 LAD 病变、钙化斑块、合并糖尿病患者亚组中存在统计学意义(见表 4)，血管内超声与冠脉定量血流分数的联合检测可为冠脉病变的分层综合评估提供更多依据，值得临床进一步探索。

声 明

本研究获得青岛大学附属青岛海慈医院(青岛市中医医院)伦理委员会批准(审批号：2026HC08LS007)，患者均签署知情同意书。

基金项目

1. 山东省医药卫生科技项目合同书(类型).202503010561.(编号)；2. 青岛市 2024 年度医药卫生科研

指导计划(类型).2024-WJKY033.(编号); 3. 2025~2027 年青岛市医疗卫生重点学科建设项目任务书。

参考文献

- [1] 唐阳阳. 基于 CCTA 的冠脉形态学参数联合 CT-FFR 及 FAI 预测冠脉狭窄患者心肌缺血的价值[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2025.
- [2] 李军, 韩晓峰, 马晓海. 光学相干断层扫描衍生血流储备分数与冠状动脉狭窄形态学参数的相关性及其一致性[J/OL]. 山东医药: 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/37.1156.R.20260804.1646.018>, 2026-08-12.
- [3] 潘力, 谷宁, 张伟, 等. 基于斑块形态学和冠脉生理学特征指导冠状动脉血运重建的研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2026, 46(5): 938-942.
- [4] 顾华丽. 依折麦布联合瑞舒伐他汀治疗 LDL-C 未达标急性冠脉综合征患者的效果[J]. 中国民康医学, 2026, 38(2): 23-25.
- [5] 何文博, 王朗. 2025 年中国经皮冠状动脉介入治疗指南解读[J/OL]. 巴楚医学: 1-8. <https://link.cnki.net/urlid/42.1899.R.20260625.2141.008>, 2026-08-12.
- [6] 冯敏, 龙向淑, 李宗庄, 等. 经冠状动脉射频消融联合支架植入同期治疗先天性冠状动脉瘘合并冠状动脉狭窄[J]. 临床心血管病杂志, 2026, 42(6): 444-448.
- [7] 张维明, 顾立君, 张晗, 等. 基于 Revolution CT 的冠状动脉血管成像联合血流储备分数评估冠心病并发心力衰竭患者 NYHA 心功能分级及预后的效果[J]. 岭南心血管病杂志, 2023, 29(4): 395-399.
- [8] 黄玉艳, 陈然, 韩敏, 等. 冠心病患者冠状动脉临界病变血管内超声参数与 QFR 的相关性[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2026, 18(3): 299-303.
- [9] 王玮, 郝星. 血管内超声技术专利态势与技术发展研究[J]. 中国发明与专利, 2025, 22(S1): 170-176.
- [10] 李梦寰, 柳杨, 何源, 等. 利用血管内超声结果验证定量血流分数对冠状动脉造影临界病变诊断价值的研究[J]. 中国循环杂志, 2020, 35(6): 546-553.
- [11] 周娇. 血管内超声检查对不同类型心绞痛患者病变血管斑块的诊断价值[J]. 名医, 2024(12): 71-73.
- [12] 李婕. 基于血流储备分数指导冠心病患者治疗的预后分析[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2023.
- [13] 王华锋, 张晓瑞, 高云云, 等. 冠状动脉 CT 血管造影及 FFR-CT 对冠心病患者心肌缺血的诊断价值[J]. 广东医学, 2026, 47(1): 64-69.
- [14] 刘德福, 周继升, 韩江莉. 基于冠状动脉造影的微循环阻力对急性 ST 段抬高型心肌梗死患者左心室收缩功能的预测价值[J/OL]. 北京大学学报(医学版): 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.4691.R.20250911.1208.002>, 2026-08-12.
- [15] 姚月明, 赵国力, 李群星, 等. 病变准备后低水平定量血流分数可预测药物涂层球囊治疗新发冠脉病变患者血管相关不良事件的发生[J/OL]. 中国动脉硬化杂志: 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/43.1262.r.20250225.1446.010>, 2026-08-12.
- [16] Ki, Y., Kang, J., Hwang, D. and Koo, B. (2025) TCT-103 Long-Term Prognostic Implications of Quantitative Flow Ratio and Plaque Characteristics in Intravascular Ultrasound-Guided Treatment Strategy. *JACC*, **86**, B47. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2025.09.168>