

· 心血管影像学 ·

基于机器学习 CT 血流储备分数评估冠状动脉狭窄特异性缺血以及对 CCTA 的增量价值

李逸雯, 秦瑞丽, 张波, 贾崇富, 杨志强, 王照谦

【摘要】 目的:探讨基于冠状动脉 CTA(CCTA)和机器学习方法测量的血流储备分数(CT-FFR)对冠状动脉狭窄特异性缺血诊断的准确性以及对 CCTA 的增量价值。方法:回顾性连续纳入 2019 年 4 月—2024 年 1 月因胸痛在本院接受 CCTA、侵入性冠状动脉造影(ICA)和血流储备分数(FFR)测量的 83 例患者。使用第三代双源 CT 进行 CCTA 扫描。对于接受了侵入性 FFR 测量的冠状动脉狭窄病变,使用基于机器学习 CT-FFR 软件测量 CT-FFR 值。以侵入性 FFR \leq 0.80 作为血管狭窄特异性缺血的诊断标准,采用 ROC 曲线评估 CCTA、CT-FFR 和 CCTA+CT-FFR 的诊断效能。结果:83 例患者 ICA 共检出 97 支血管狭窄病变,其中 57 支血管狭窄病变的 FFR \leq 0.80(其中 21 支血管狭窄病变的 FFR 为 0.75~0.80),40 支血管狭窄病变的 FFR $>$ 0.80。在血管水平,CT-FFR(AUC=0.870)和 CCTA+CT-FFR(AUC=0.896)对血管狭窄特异性缺血的诊断效能显著高于 CCTA(AUC=0.641),差异均有统计学意义($P<0.001$)。CT-FFR 检出血管狭窄特异性缺血的特异度明显高于 CCTA(77.5% vs. 30.0%),61.3% 的 CCTA 假阳性病变被 CT-FFR 正确归类为阴性。结论:基于机器学习 CT-FFR 能显著提高对冠状动脉狭窄特异性缺血诊断的特异度,对 CCTA 具有显著增量价值。

【关键词】 冠状动脉狭窄;体层摄影术,X 线计算机;心肌缺血;血流储备分数

【中图分类号】 R814.42;R543.3 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)04-0415-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Diagnostic accuracy of machine learning-based CT-FFR in detecting coronary stenosis-specific ischemia and its incremental value to CCTA LI Yi-wen, QIN Rui-li, ZHANG Bo, et al. Department of Cardiovascular Radiology, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Liaoning 116011, China

【Abstract】 Objective: To investigate the diagnostic accuracy of machine learning (ML)-based fractional flow reserve derived from CT (CT-FFR) in detecting coronary stenosis-specific ischemia and its incremental value to coronary CT angiography (CCTA). **Methods:** 83 consecutive patients who underwent CCTA and invasive coronary angiography (ICA) with FFR measurement from April 2019 to January 2024 in our hospital were retrospectively recruited in this study. CCTA was performed with a third generation dual-source CT scanner. The CT-FFR value of coronary stenosis that underwent ICA with measurement of FFR was calculated using a ML-based FFRCT software. Taken invasive FFR \leq 0.80 as the reference standard for coronary stenosis-specific ischemia, ROC curve analysis was used to assess the diagnostic performance of CCTA, CT-FFR and CT-FFR plus CCTA. **Results:** Of the 97 coronary stenosis in 83 patients, 57 had invasive FFR \leq 0.80 (of which 21 had invasive FFR in 0.75~0.80), and 40 had invasive FFR $>$ 0.80. On a per-vessel level, the diagnostic performance of CT-FFR (AUC=0.870) and CCTA plus CT-FFR (AUC=0.896) was significantly higher than that of CCTA (AUC=0.641) with statistic difference (both $P<0.001$). The specificity of CT-FFR was significantly higher than that of CCTA (75% vs. 30%), which correctly reclassified 61.4% false-positive lesions in CCTA. **Conclusion:** The incorporation of ML-based CT-FFR provides incremental value to CCTA in detecting coronary stenosis-specific ischemia, especially through the improvement in specificity.

【Key words】 Coronary stenosis; Tomography, X-ray computed; Myocardial ischemia; Fractional flow reserve

冠状动脉 CT 血管成像(coronary CT angiography, CCTA)检出阻塞性(狭窄程度 \geq 50%)冠状动脉病变(coronary artery disease, CAD)的敏感度和阴性预测值很高,但在预测血管狭窄特异性缺血时的特异

性偏低且假阳性率偏高^[1]。血管狭窄病变是否导致心肌缺血是影响临床决策(药物治疗或血运重建)的决定性因素之一。对于侵入性冠状动脉造影(invasive coronary angiography, ICA)所示血管狭窄病变,通过压力导丝测量的血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)作为反映血管狭窄病变的功能性指标,在血运重建指南中获得了 Ia 类推荐^[2]。然而此方法为有创性检查,在临床实践中具有一定局限性。

近十余年来,CT 血流储备分数(CT-derived frac-

作者单位:116011 辽宁大连,大连医科大学附属第一医院心血管放射科(李逸雯、秦瑞丽、贾崇富、杨志强、王照谦),心内科(张波)

作者简介:李逸雯(1997—),女,四川宜宾人,硕士,住院医师,主要从事心血管系统放射学研究。

通讯作者:王照谦, E-mail: wangzq2000@hotmail.com

基金项目:辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/1012300081)

tional flow reserve, CT-FFR) 测量作为一种新兴的非侵入性冠状动脉功能学评估技术已取得一定进展。早期的基于计算流体力学方法测量的 CT-FFR 对 CCTA 检出血管狭窄特异性缺血具有增量价值,能减少下游功能性评估方法(如核素、磁共振心肌灌注成像和 ICA 等)的使用^[3-4]。NXT 实验发现,基于计算流体力学方法测量的 CT-FFR 对血管狭窄特异性缺血的诊断特异度明显高于 CCTA(79% vs. 34%),约三分之二的 CCTA 假阳性患者被 CT-FFR 重新归类为阴性^[5]。然而,基于计算流体力学方法的 CT-FFR 计算过程耗时较长且难以在现场实施。为了弥补该技术的不足,基于机器学习 CT-FFR 计算技术应运而生,此方法的计算时间仅数分钟,并可在现场实时计算^[6-8]。然而,它对 CCTA 增量价值的循证证据相对匮乏。本研究的目的是探讨基于机器学习方法测量的 CT-FFR 对冠状动脉狭窄特异性缺血诊断的准确性以及对 CCTA 的增量价值。

材料与方法

1. 临床资料

回顾性连续纳入 2019 年 4 月—2024 年 1 月因胸痛在本院接受 CCTA、ICA 和 FFR 测量的 102 例患者。纳入标准:①年龄 ≥ 35 岁;②CCTA 与侵入性 FFR 检查的间隔时间 ≤ 14 天。排除标准:①既往有心肌梗死、冠状动脉血运重建等病史;②CCTA 检出慢性冠状动脉闭塞;③CCTA 图像质量不满足 CT-FFR 计算。

本研究已获本院伦理委员会批准(PJ-KS-KY-2024-432)。

2. CCTA 采集和分析方法

心率 > 80 次/分的患者于检查前 60 min 左右口服美托洛尔(Metoprolol)47.5 或 95.0 mg,于检查前 3~5 min 舌下含服硝酸甘油 0.25 mg。使用 Siemens Somatom Force 第三代双源 CT 机,首先行冠状动脉钙化积分 CT 扫描(层厚 3 mm),然后以前瞻性心电触发序列行 CCTA 采集^[9]。

调阅自动生成的舒张期和收缩期心脏 CT 图像,从两者中选择质量更优的图像数据。对于接受了侵入性 FFR 测量的血管(左前降支、左回旋支和右冠状动脉)狭窄病变,由两位医师(分别有 17 和 21 年 CCTA 诊断经验)分别在 CCTA 图像上独立评估血管狭窄程度,将血管狭窄病变分类为非阻塞性血管病变(狭窄程度 $< 50\%$)和阻塞性血管病变(狭窄程度 $\geq 50\%$,提示血管狭窄病变具有功能学意义)。如果某支血管存在多处狭窄病变,以狭窄程度最重处的评估结果作为最终结果。两位医师对同一处血管狭窄的分类评估意见

有分歧时通过协商达成一致意见。

3. CT-FFR 测量方法

利用 CCTA 图像数据并使用基于机器学习的 CT-FFR 测量软件(syngo. CT computed Fractional Flow Reserve VA1.0, Siemens Healthineers, Germany)进行 CT-FFR 测量。该软件自动识别冠状动脉中心线及管腔轮廓,自动识别有偏差时由分析者手动编辑,经计算机运算后自动生成三维彩色冠状动脉树图像,点击冠状动脉树的任意点位即可获得相应的 CT-FFR 值。对于接受了 ICA 和 FFR 测量的血管狭窄病变,由两位医师(有 3 年 CCTA 诊断经验)分别测量距血管狭窄病变远端 2.0 cm 处的 CT-FFR,取两位医师测量值的平均值。CT-FFR ≤ 0.80 提示血管狭窄病变具有功能学意义。

4. ICA 检查和 FFR 测量方法

ICA 检查由心脏介入医师团队按标准化流程实施^[10]。分析 ICA 图像并确定需进行 FFR 测量的血管狭窄病变。首先由微量注射泵经前臂静脉输注腺苷 $[140 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{min})]$ 诱导心肌达最大充血状态,使用压力导丝(QuantienTM Pressure WireTM interface)测量主动脉压力和血管狭窄病变远端(距狭窄病变 2~3 cm)压力并计算 FFR。FFR ≤ 0.80 提示血管狭窄特异性缺血。

5. 统计学分析

使用 SPSS 22.0 软件进行统计分析。通过正态性检验评估连续变量是否符合正态分布,符合正态分布者组间比较采用独立样本 *t* 检验,不符合正态分布者组间比较采用 Mann-Whitney *U* 检验;分类变量差异分析采用卡方检验。两位观察者间基于 CCTA 的冠状动脉狭窄分类一致性分析采用 Kappa 值,CT-FFR 测量一致性分析采用 ICC 评价,并分别采用 Pearson 相关分析和 Bland-Altman 分析评估 CT-FFR 与 FFR 的相关性和一致性。当患者存在多支血管狭窄病变时,采用 FFR 值最低者用于患者水平的分析。绘制 CCTA、CT-FFR 和 CCTA+CT-FFR 的 ROC 曲线并计算曲线下面积(AUC),基于诊断试验统计学方法计算准确度、敏感度、特异度、NPV、PPV 和 F1-score,并采用 DeLong 检验比较 AUC 的差异。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

1. 基线临床特征

102 例患者中,19 例被排除(既往心肌梗死和/或冠状动脉血运重建 6 例;慢性冠状动脉闭塞 6 例;CCTA 图像数据不满足 CT-FFR 计算 3 例;CCTA 与 FFR 检查的时间间隔 > 14 d 者 4 例),其余 83 例最终

被纳入本研究。

患者的基线特征:年龄(60.7 ± 8.3)岁,男 66 例(79.5%);具有高血压、血脂异常、糖尿病、吸烟史和冠心病家族史者分别为 57(68.7%)、42(50.6%)、18(21.7%)、38(45.8%)和 9 例(10.8%)。CCTA 采集的有效辐射剂量为(5.9 ± 1.2)mSv。

2. 侵入性 FFR 和 CCTA 分析

83 例患者共 97 支血管狭窄病变接受了侵入性 FFR 测量,其中左前降支、左回旋支和右冠状动脉分别为 65 支(67.0%)、13 支(13.4%)和 19 支(19.6%);57 支(58.8%)血管狭窄病变的 FFR ≤ 0.80 (其中 21 支血管狭窄病变的 FFR 为 0.75~0.80);狭窄病变累及 1 支、2 支和 3 支血管的患者分别为 71 例(85.5%)、10 例(12.1%)和 2 例(2.4%)。

83 例中,冠状动脉总钙化积分 ≥ 400 为 15 例(18.1%)。97 支冠状动脉狭窄病变中,CCTA 显示 84 支(86.6%)为阻塞性血管病变。

观察者间 CT-FFR 测量值的一致性较高(ICC=0.772)。观察者间冠状动脉狭窄病变分类 CCTA 评估的一致性较高(Kappa=0.883)。

3. CT-FFR 与侵入性 FFR 的相关性

Bland-Altman 分析结果显示,与侵入性 FFR 值相比,CT-FFR 值的平均值低估 0.01(图 1);但 Pearson 相关性分析结果显示两者具有高度相关性($r = 0.796, P < 0.001$;图 2)。

4. 诊断效能分析

以侵入性 FFR ≤ 0.80 为参考标准,CCTA、CT-FFR 及 CCTA+CT-FFR 检出血管狭窄特异性缺血

的效能指标见表 1 和图 3。CT-FFR 检出血管狭窄特异性缺血的 AUC 显著高于 CCTA(在血管水平分别为 0.870 和 0.641, $P < 0.001$;在患者水平分别为 0.855 和 0.662, $P < 0.001$);CCTA+CT-FFR 检出血管狭窄特异性缺血的 AUC 显著高于 CCTA(在血管水平分别为 0.896 和 0.641, $P < 0.001$;在患者水平分别为 0.888 和 0.662, $P < 0.001$)。在 CCTA 假阳性诊断的 31 支血管狭窄病变中,CT-FFR 对其中的 19 支血管狭窄病变(占 61.4%)做出正确诊断;在 CCTA 假阳性的 24 例患者中,CT-FFR 对其中的 13 例(占 54.2%)做出正确诊断。

5. 其它结果

在 CT-FFR 为 0.71~0.80 的 27 支血管狭窄病变中,以侵入性 FFR ≤ 0.80 为参考标准,CT-FFR 对 7 支血管狭窄病变(25.9%)做出假阳性诊断,占 CT-FFR 全部假阳性的 77.8%(7/9)(图 4)。在侵入性 FFR 位于“灰区(0.75~0.80)”的 21 支血管狭窄病变中,CT-FFR 无假阴性结果。

讨论

本研究中以侵入性 FFR 为金标准,对比了 83 例患者 97 支血管狭窄病变的 CCTA、CT-FFR 及 CCTA+CT-FFR 诊断结果,发现 CT-FFR 对血管狭窄特异性缺血的诊断效能高于 CCTA,尤其是诊断特异度显著高于 CCTA,减少了 61%的 CCTA 假阳性病变或 54%的 CCTA 假阳性患者;与 CCTA 相比,CT-FFR 的加入在诊断血管狭窄特异性缺血的特异度方面对 CCTA 具有显著增量价值。

表 1 CCTA、CT-FFR 及 CCTA+CT-FFR 检出血管狭窄特异性缺血的效能

| 诊断方法 | 符合率(95%CI) | 敏感度(95%CI) | 特异度(95%CI) | NPV(95%CI) | PPV(95%CI) | F1-score(95%CI) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 患者水平 | | | | | | |
| CCTA | 73.4%(62.66%~82.58%) | 98.04%(89.55%~99.95%) | 34.38%(18.57%~53.19%) | 91.67%(61.52%~99.79%) | 70.42%(58.41%~80.67%) | 0.8197(0.7232~0.9162) |
| CT-FFR | 87.95%(78.96%~94.07%) | 96.08%(86.54%~99.52%) | 75.00%(56.60%~88.54%) | 92.31%(74.87%~99.05%) | 85.96%(74.21%~93.74%) | 0.9074(0.8301~0.9847) |
| CCTA+CT-FFR | 89.16%(80.41%~94.92%) | 94.12%(83.76%~98.77%) | 81.25%(63.56%~92.79%) | 89.66%(72.65%~97.81) | 88.89%(77.37%~95.81%) | 0.9143(0.8386~0.9900) |
| 血管水平 | | | | | | |
| CCTA | 70.10%(59.96%~78.98%) | 98.25%(90.61%~99.96%) | 30.00%(16.56%~46.53%) | 92.31%(63.97%~99.81%) | 66.67%(55.54%~76.58%) | 0.7943(0.7000~0.8887) |
| CT-FFR | 88.66%(80.61%~94.20%) | 96.49%(87.89%~99.57%) | 77.50%(61.55%~89.16%) | 93.94%(79.77%~99.26%) | 85.94%(74.98%~93.36%) | 0.9091(0.8366~0.9815) |
| CCTA+CT-FFR | 89.69%(81.86%~94.94%) | 94.74%(95.38%~98.90%) | 82.50%(67.22%~92.66%) | 91.67%(77.53%~98.25%) | 88.52%(77.78%~95.25%) | 0.9153(0.8442~0.9863) |

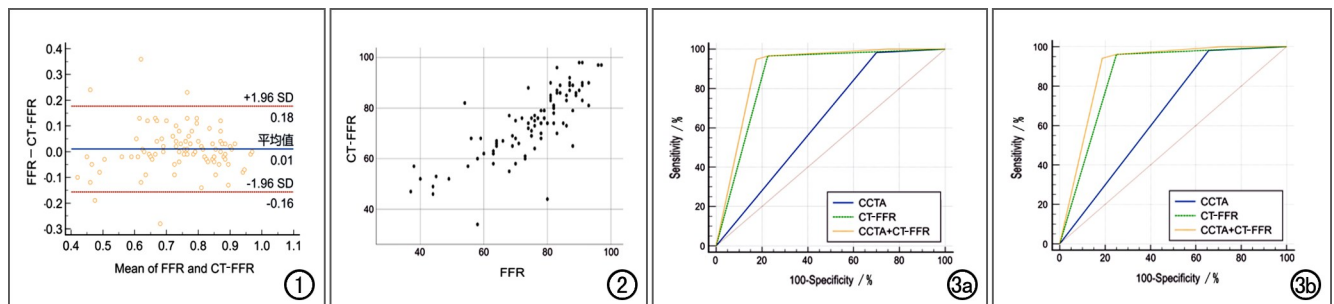


图 1 CT-FFR 与侵入性 FFR 测量值一致性分析的 Bland-Altman 图,显示 CT-FFR 与 FFR 具有良好的 consistency。图 2 CT-FFR 与侵入性 FFR 测量结果相关性分析散点图,显示 CT-FFR 与 FFR 具有高度相关性。图 3 CCTA、CT-FFR 以及 CCTA+CT-FFR 检出血管狭窄特异性缺血的 ROC 曲线。a)血管水平;b)患者水平。



图4 男性患者,55岁,因胸痛行CCTA,2天后行ICA并测量血管狭窄病变的FFR。a) CCTA显示左前降支阻塞性病变(狭窄程度 $\geq 50\%$;箭); b) 软件测量该处(箭)的CT-FFR值为0.79; c) ICA显示左前降支局部狭窄程度为70%(箭),测量的FFR值为0.72。

冠状动脉狭窄特异性缺血的评估是血运重建决策的重要考虑因素之一。侵入性FFR是目前诊断血管狭窄特异性缺血的“金标准”,是由压力导丝在最大充血时测量并计算得到的($FFR = \text{血管狭窄病变远侧管腔压力均值} / \text{主动脉压力均值}$)。CT-FFR计算的基本原理则是将计算流体力学与超级计算技术相结合,并利用CCTA图像数据模拟冠状动脉生理学特征而计算得到的,不涉及辐射剂量的增加及碘剂和诱导充血药物的使用。总体而言,CT-FFR对血管狭窄特异性缺血的诊断敏感度和总体准确性(血管水平)高于核素显像,但特异度低于核素显像和磁共振心肌灌注成像^[11-15]。另外,CT-FFR的诊断效能与另一项新兴的功能学成像技术即CT心肌灌注成像相当^[16]。与上述其它非侵入性功能学评估方法相比,CT-FFR作为CCTA显示血管狭窄病变之后的首选功能学方法更具优势^[17-18]。

基于机器学习CT-FFR计算是通过计算机学习技术对CCTA图像数据进行解剖学特征分析,基于计算流体力学原理分析血管解剖学特征与FFR值的相关性,利用CCTA数据库进行训练,构建与CCTA解剖学特征相对应且更接近实际FFR值的模型并计算FFR。本研究评估了基于机器学习CT-FFR的诊断效能并与CCTA进行比较,结果显示,CT-FFR的诊断效能无论在血管水平还是患者水平均显著高于CCTA($P < 0.001$)。尤其值得关注的是,CT-FFR检出血管狭窄特异性缺血的特异度明显高于CCTA(在血管水平分别为77.5%和30.0%),61.3%(19/31)的CCTA假阳性病变或54.2%(13/24)的CCTA假阳性患者被CT-FFR正确归类为阴性。Coenen等^[19]在MACHINE实验中,评估了基于机器学习CT-FFR与CCTA对血管狭窄特异性缺血的诊断效能,结果显

示,CT-FFR减少了73%的CCTA假阳性患者;同本研究的结果接近。另外,本研究发现,CCTA+CT-FFR检出血管狭窄特异性缺血的特异度明显高于CCTA(在血管水平分别为82.5%和30.0%),提示CT-FFR的加入能大幅提升CCTA对血管狭窄特异性缺血的诊断效能,体现了CT-FFR对CCTA的增量价值。

本研究结果显示,CT-FFR值与FFR值相比低估0.01。近期的一项研究中也得出类似结果^[20]。当CT-FFR以0.80作为阈值时,假阳性结果较多,而导致非必要的ICA和/或FFR检查^[21]。近期有学者提及CT-FFR“灰区(0.71~0.80)”的概念^[22-23]。本研究发现,在CT-FFR值为0.71~0.80的27支血管狭窄病变中,7支血管狭窄病变(占25.9%)为假阳性诊断,占CT-FFR全部假阳性诊断的77.8%(7/9),提示CT-FFR为0.71~0.80时,其假阳性率较高。另外,本研究还发现,在侵入性FFR值位于“灰区(0.75~0.80)”的21支血管狭窄病变中,CT-FFR无假阴性诊断。

本研究存在一定的局限性。首先,作为一项单中心回顾性研究,样本量偏小,研究结果也许存在一定偏倚;其次,尽管本队列中冠状动脉总钙化积分 ≥ 400 的患者比例(18.1%)偏低,但未评估冠状动脉钙化严重程度对基于机器学习CT-FFR计算结果的影响;最后,本队列中阻塞性(狭窄程度 $\geq 50\%$)CAD患者的比例(86.6%)偏高(这也是目前临床实践中的现实状况,因为CCTA所示非阻塞性(狭窄程度 $< 50\%$)CAD患者通常不会被转诊来院实施ICA和/或FFR),也许导致CT-FFR对血管狭窄特异性缺血诊断效能评估的偏倚。

总之,与CCTA相比,基于机器学习方法测量的CT-FFR的加入明显提升了对冠状动脉狭窄特异性缺

血的诊断特异度,对 CCTA 具有增量价值,有望减少下游功能性评估方法(如核素、MRI 或 CT 心肌灌注成像)以及非必要 ICA(包括 FFR)的使用。随着 CT-FFR 软件的更新以及测量方法的改进,其诊断效能有望进一步提升,从而有利于指导临床精准规划后续侵入性检查方案和优化临床管理策略。

参考文献:

- [1] Cury RC, Abbara S, Achenbach S, et al. CAD-RADS (TM) coronary artery disease: Reporting and Data System. An expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT), the American College of Radiology (ACR) and the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). Endorsed by the American College of Cardiology[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2016, 10(4): 269-281.
- [2] Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS guidelines on myocardial revascularization[J]. Eur Heart J, 2019, 40(2): 87-165.
- [3] Zhuang SL, Wang SL, Zhao SH, et al. Computed tomography angiography-derived fractional flow reserve (CT-FFR) for the detection of myocardial ischemia with invasive fractional flow reserve as reference: systematic review and meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2020, 30(2): 712-725.
- [4] Mickley H, Veien KT, Gerke O, et al. Diagnostic and clinical value of FFR (CT) in stable chest pain patients with extensive coronary calcification: the FACC study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2022, 15(6): 1046-1058.
- [5] Nørgaard BL, 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] Yang JJ, Shan DK, Wang X, et al. On-site computed tomography-derived fractional flow reserve to guide management of patients with stable coronary artery disease: the TARGET randomized trial[J]. Circulation, 2023, 147(18): 1369-1381.
- [7] Takagi H, Leipsic JA, McNarama N, et al. Trans-lesional fractional flow reserve gradient as derived from coronary CT improves patient management: ADVANCE registry[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2022, 16(1): 19-26.
- [8] Yan HK, Geng WL, Zhao N, et al. Identification of ischemia-causing lesions using coronary plaque quantification and changes in fractional flow reserve derived from computed tomography across the lesion[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(6): 3630-3643.
- [9] 刘庆爽, 杨志强, 贾崇富, 等. 负荷动态 CT 心肌灌注成像对疑似冠心病患者的预后价值[J]. 放射学实践, 2025, 40(3): 356-361.
- [10] Scanlon PJ, Faxon DP, Aud AM, et al. ACC/AHA guidelines for coronary angiography. A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on practice guidelines (Committee on Coronary Angiography). Developed in collaboration with the Society for Cardiac Angiography and Interventions[J]. J Am Coll Cardiol, 1999, 33(6): 1756-824.
- [11] Danad I, Szymonifka J, Twisk JWR, et al. Diagnostic performance of cardiac imaging methods to diagnose ischaemia-causing coronary artery disease when directly compared with fractional flow reserve as a reference standard: a meta-analysis[J]. Eur Heart J, 2017, 38(13): 991-998.
- [12] Nørgaard BL, Jensen JM, Leipsic J. Fractional flow reserve derived from coronary CT angiography in stable coronary disease: a new standard in non-invasive testing[J]. Eur Radiol, 2015, 25(8): 2282-2290.
- [13] Driessen RS, Danad I, Stuijzand WJ, et al. Comparison of coronary computed tomography angiography, fractional flow reserve, and perfusion imaging for ischemia diagnosis[J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73(2): 161-173.
- [14] Rønnow Sand NP, Nissen L, Winther S, et al. Prediction of coronary revascularization in stable angina: Comparison of FFRCT with CMR stress perfusion imaging[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(4): 994-1004.
- [15] Danad I, Rajmakers PG, Driessen RS, et al. Comparison of coronary CT angiography, SPECT, PET, and hybrid imaging for diagnosis of ischemic heart disease determined by fractional flow reserve[J]. JAMA Cardiol, 2017, 2(10): 1100-1107.
- [16] Soschynski M, Storelli R, Birkemeyer C, et al. CT myocardial perfusion and CT-FFR versus invasive FFR for hemodynamic relevance of coronary artery disease[J]. Radiology, 2024, 312(2): 233-234.
- [17] Coenen A, Rossi A, Lubbers MM, et al. Integrating CT myocardial perfusion and CT-FFR in the work-up of coronary artery disease[J]. JACC Cardiovasc imaging, 2017, 10(7): 760-770.
- [18] 李逸雯, 李晶晶, 王照谦. CT 血流储备分数在冠心病心肌缺血评估中的应用[J]. 放射学实践, 2024, 39(7): 977-980.
- [19] Coenen A, Kim YH, Kruk M, et al. Diagnostic accuracy of a machine-learning approach to coronary computed tomographic angiography-based fractional flow reserve: result from the MACHINE consortium[J/OL]. Circ Cardiovasc Imaging, 2018, 11(6): e007217 [2018-06-18]. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.117.007217.
- [20] Cook CM, Petraco R, Shun Shin MJ, et al. Diagnostic accuracy of computed tomography-derived fractional flow reserve[J]. JAMA Cardiol, 2017, 2(7): 803-810.
- [21] Rajiah P, Cummings KW, Williamson E, et al. CT fractional flow reserve: a practical guide to application, interpretation, and problem solving[J]. Radiographics, 2022, 42(2): 340-358.
- [22] 中国医师协会心血管内科医师分会超声心动图和影像学组. 冠状动脉 CT 血流储备分数应用临床路径中国专家共识[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2023, 31(4): 241-251.
- [23] Liu MJ, Zhen YH, Shang J, et al. The predictive value of lesion-specific pericoronary fat attenuation index for major adverse cardiovascular events in patients with type 2 diabetes[J]. Cardiovasc Diabetol, 2024, 23(1): 191-194.

(收稿日期: 2025-09-12 修回日期: 2026-01-15)