

论 著

冠脉CTA-FFR评估冠脉狭窄及心肌缺血风险的价值

尹 淳* 厉 菁 张 宇
张 华郑州市第七人民医院心内科
(河南 郑州 450000)

【摘要】目的 分析冠脉CT血管成像-血流储备分数(CTA-FFR)评估冠脉狭窄及心肌缺血风险的临床价值。方法 回顾性收集2021年5月至2024年3月期间60例就诊我院的冠脉狭窄患者的临床资料,患者均接受冠脉血管造影(CAG)、CTA、有创性FFR检测,并计算冠脉CTA-FFR值,分析冠脉CTA-FFR评估冠脉狭窄及心肌缺血风险的价值,同时通过Kappa检验分析冠脉CTA-FFR对冠脉狭窄及心肌缺血风险的评估结果与CAG、有创性FFR检测结果的一致性。结果 以CAG诊断结果为“金标准”,CTA-FFR对冠状动脉狭窄程度评估的敏感度为89.58%,特异度为83.33%,阳性预测值为95.56%,阴性预测值为66.67%,准确度为88.33%,CTA-FFR检测结果与CAG检测结果的一致性较好(kappa值=0.81)。以有创性FFR检测结果为金标准,基于患者计数,CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血评估的敏感度为92.68%,特异度为89.47%,阳性预测值为95.00%,阴性预测值为85.00%,准确度为91.67%,CTA-FFR检测结果与有创性FFR检测结果的一致性较好(kappa值=0.85);基于血管计数,CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血评估的敏感度为94.54%,特异度为92.86%,阳性预测值为96.30%,阴性预测值为89.66%,准确度为93.98%,CTA-FFR检测结果与有创性FFR检测结果的一致性较好(kappa值=0.88)。结论 CTA-FFR计数对于冠状动脉下肢及心肌缺血具有较好诊断价值,可在临床推广应用。

【关键词】冠脉CT血管成像;血流储备分数;冠脉狭窄;心肌缺血;诊断价值

【中图分类号】R543.3+1

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.02.037

Value of Coronary CTA-FFR in Assessing the Risk of Coronary Artery Stenosis and Myocardial Ischemia

YIN Bo*, LI Jing, ZHANG Yu, ZHANG Hua.

Department of Cardiology, The 7th People's Hospital of Zhengzhou, Zhengzhou 450000, Henan Province, China

ABSTRACT

Objective To analyze the clinical value of fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography (CTA-FFR) in assessing the risk of coronary artery stenosis and myocardial ischemia. **Methods** The clinical data of 60 patients with coronary artery stenosis who were treated at the hospital between May 2021 and March 2024 were collected retrospectively. All patients included underwent coronary angiography (CAG), CTA and invasive FFR testing. The coronary CTA-FFR values were calculated. The value of coronary CTA-FFR in assessing the risk of coronary artery stenosis and myocardial ischemia was analyzed. The consistency between the evaluation results of coronary CTA-FFR for the risk of coronary artery stenosis and myocardial ischemia and the results of CAG and invasive FFR testing was analyzed through Kappa test. **Results** With the diagnostic result of CAG as the gold standard, the sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value and accuracy of CTA-FFR for evaluating the degree of coronary artery stenosis were 89.58%, 83.33%, 95.56%, 66.67% and 88.33%, respectively. The consistency between CTA-FFR testing results and CAG results was good (kappa value=0.81). With invasive FFR testing results as the gold standard and based on patients counting, the sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value and accuracy of CTA-FFR for evaluating myocardial ischemia after coronary artery stenosis were 92.68%, 89.47%, 95.00%, 85.00% and 91.67%, respectively. The consistency between CTA-FFR testing results and invasive FFR testing results was good (kappa value=0.85). Based on blood vessels counting, the sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value and accuracy of CTA-FFR for evaluating coronary myocardial ischemia after coronary artery stenosis were 94.54%, 92.86%, 96.30%, 89.66% and 93.98%, respectively. The consistency between CTA-FFR testing results and invasive FFR testing results was good (kappa value=0.88). **Conclusion** CTA-FFR has good diagnostic value for coronary artery stenosis and myocardial ischemia.

Keywords: Coronary CT Angiography; Fractional Flow Reserve; Coronary Artery Stenosis; Myocardial Ischemia; Diagnostic Value

冠心病作为常见心血管疾病,可对患者生命健康产生严重不良影响,且近年来其发病率呈不断升高趋势,发病年龄也具有年轻化趋势^[1]。冠状动脉狭窄是引发冠心病的主要原因之一,其可导致心肌供血不足,从而导致心肌缺血缺氧,逐渐坏死,因此早期对冠脉狭窄进行评估和干预,对于减少心肌缺血缺氧发生风险,降低不良心血管事件发生率具有重要临床意义^[2-3]。冠状动脉CT血管成像(CTA)是临床评估冠心病病变的常用无创影像学诊断技术,其可在解剖学层面对于冠状动脉的狭窄程度进行评估,但其对于冠状动脉狭窄在远端血流中产生的影响难以准确评估,即其无法在功能学层面对冠状动脉狭窄后心肌缺血发生风险进行评估^[4]。冠状动脉血流储备分数(FFR)是对冠状动脉狭窄造成的血流动力学功能性狭窄进行评估的主要技术之一,也是功能学评估的金标准,其主要通过导丝法进行测量,但测量操作难度较大,费用较高,从而导致临床应用受限^[5]。而近年随着医疗技术的创新与发展,临床将CTA与FFR创新性结合应用于冠脉动脉狭窄的评估,从而可通过一次检查获取解剖学以及功能学等全面信息,且其还可避免使用FFR导丝以及额外注射药物,从而降低操作难度,减少费用,同时还具有无创等优势,因此其也逐渐成为冠心病方向的热点研究内容^[6]。但冠脉CTA-FFR所使用的软件主要由国外研发,相关临床数据也主要来源于国外,目前国内关于冠脉CTA-FFR在冠状动脉狭窄中的研究与报道均较少。基于此,本研究主要分析冠脉CTA-FFR评估冠脉狭窄及心肌缺血风险的临床应用价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集2021年5月至2024年3月期间60例就诊我院的冠脉狭窄患者的临床资料,其中男37例,女23例,年龄53~78岁,平均(62.19±4.57)岁;身体质量指数(BMI)为18.1~28.5kg/m²,平均BMI为(24.01±0.66)kg/m²。

纳入标准:年龄不低于18岁;具备CTA及有创性FFR检测指征且自愿接受检查;CTA检查结果提示直径2mm以上冠状动脉分支至少存在一处管径狭窄率达到30%~90%;临床资料完整。排除标准:检测图像质量不佳,存在伪影或信息不全等问题;存在经皮冠状动脉介入治疗术(PCI)、冠状动脉旁路移植术、心脏起搏器植入术等;CTA检查结果提示存在冠状动脉起源异常;合并严重心功能不全、心律失常、肝肾功能不全者;合并恶性肿瘤者;合并精神类或意识不清等疾病,影响检查配合度;存在检查

【第一作者】尹 淳,男,主治医师,主要研究方向:心血管内科。E-mail: 15890146916@163.com

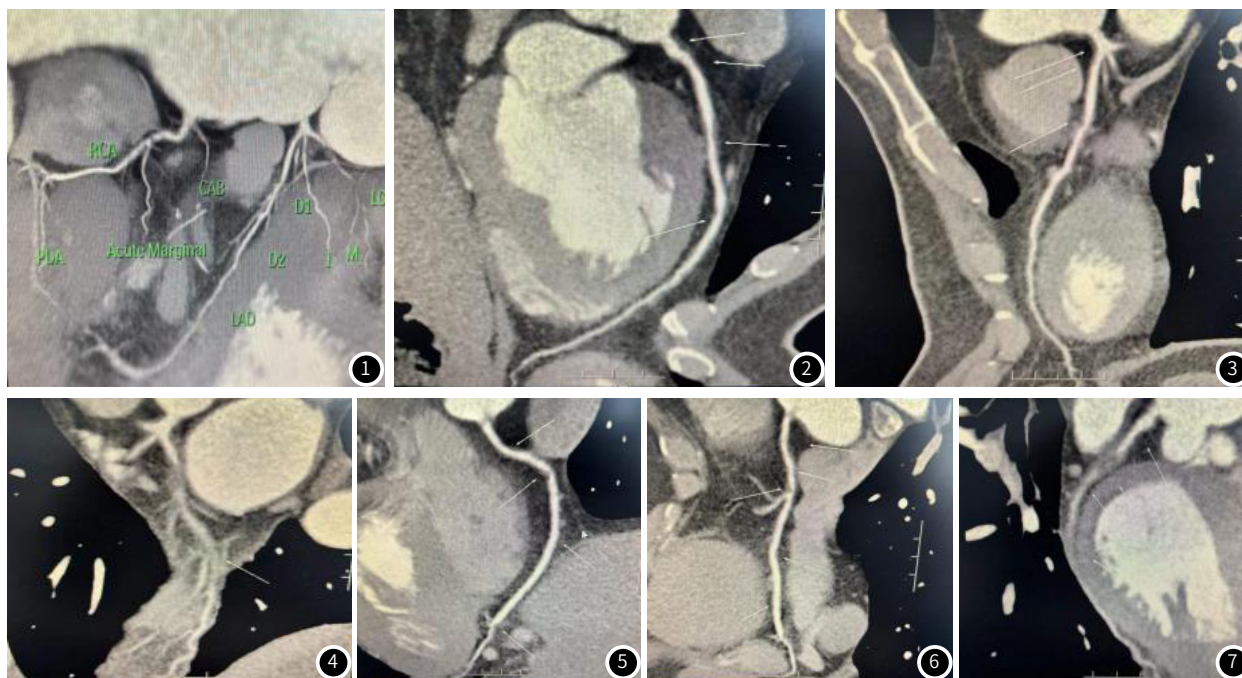
【通讯作者】尹 淳

禁忌症或碘剂过敏。

1.2 方法 患者检查结果均由2名资深影像科医师进行评估和判断。

1.2.1 冠状动脉CTA检查 以GE公司生产的256排Revolution CT扫描仪为检查工具,检查开始前先指导患者练习屏气,并将其心律控制在85次/min以下,若患者心率超过85次/min,通过口服酒石酸美托洛尔片(阿斯利康制药有限公司,国药准字H32025392,规格0.1g/片)50mg降低并稳心率。扫描前先通过定位图像明确扫描范围为患者气管分叉至膈肌下2cm处,然后先进行CT钙化积分扫描,接着通过前瞻性心电门控进行对比增强

CTA扫描,且扫描参数设置如下:管电压设置为120kV,管电流设置为200~600mAs,有效厚度设置为0.625mm,探测器准直宽度设置为140mm,0.28s/r。接着借助双筒高压注射器经患者外周静脉注入碘帕醇对比剂,注入计量为1~1.5mL/kg,注入速度为4~5mL/s,然后利用对比剂跟踪技术触发扫描,将监测感兴趣区域(ROI)设置于升主动脉管腔内,并设置触发阈值为100HU。扫描检查所获取图像均以DICOM格式进行保存。冠状动脉狭窄患者CTA检查示例图如下图1~7。



患者主要表现为冠状动脉分布成右冠优势型,冠脉走行区可见钙化影。其左主干非钙化斑块并管腔轻度狭窄,约25%,管腔正性重构,CT值约27.3HU,前降支非钙化斑块并管腔轻-中度狭窄,约60%,回旋支非钙化斑块并管腔轻-重度狭窄,局部管腔闭塞,以远管腔显影淡,右冠状动脉钙化及非钙化斑块并管腔轻-重度狭窄,约75%,中间支非钙化斑块并管腔轻-中度狭窄,约50%,第一对角支非钙化斑块并管腔轻-重度狭窄,约80%,钝缘支开口处管腔闭塞,锐缘支非钙化斑块并管腔轻-中度狭窄,约50%,后降支非钙化斑块并管腔轻度狭窄,约40%,第二对角支、圆锥支管腔充盈良好,未见明显异常。受患者呼吸及心率影响,部分管腔存在伪影。左心室侧壁心肌密度减低,CT值约10HU,降主动脉可见斑片状低密度影。

1.2.2 冠状动脉CTA-FFR计算 测量计算软件来源于北京深睿博联科技有限公司,先将CTA扫描检测图像进行三维后处理,并基于流体力学计算原理先模拟冠状动脉最大血流量,然后参考患者具体生理特征建立与其冠状动脉生理学指标间的统计预测模型,最后重建患者的冠状动脉以及心肌结构的三维模型,经此模型对患者冠状动脉血流量和最大充血状态进行模拟,从而对冠状动脉狭窄远端压力与理想状态下的压力比值进行计算,即计算CT-FFR值,当CT-FFR计算值 ≤ 0.8 即可认为该部位狭窄且存在功能性心肌缺血,否则提示不存在功能性心肌缺血。

1.2.3 有创性FFR检测 以800mA大型数字减影血管造影X线机(飞利浦,型号:ALaura Xperia FD20)作为检测仪器,依次对患者的左右冠状动脉进行造影检查,每支血管至少接受2个不同体位的造影观察,计算有创FFR值,且计算前提为不知道患者具体的CTA及CT-FFR值计算结果。若患者病变累及多支血管,则取平均值。有创FFR计算方法为:将导管放置于病变血管近端,使导丝压力与患者主动脉压力处于同步状态,然后将压力导丝移至病变血管远端,然后待压力处于稳定状态后经静脉注入腺苷,注入速度达140~180 μ g/kg $\cdot$ min,从而诱使患者冠状动脉达到最大

充血状态,接着利用压力导丝与指引导管分别对患者病变血管远端压力和主动脉压力进行测量,而病变血管远端压力与主动脉压力即为有创FFR值。然后将压力导丝回撤,使压力传感器处于指引导管口部,若与压力导丝以及主动脉压力的验证差值不超过3mmHg,则表明有创FFR测量值准确,当有创FFR值 ≤ 0.8 即可提示管腔狭窄程度可致心肌功能性缺血。本研究60例患者共累计83支病变血管,根据检查结果显示本研究患者中有创FFR值 ≤ 0.8 共41例,而病变血管中有创FFR值 ≤ 0.8 共55支。

1.2.4 冠状动脉造影(CAG)检查 以数字减影血管造影系统作为检测仪器,指导患者取标准体位,然后对患者左冠状动脉至少进行4个体位的造影检查,对其右冠状动脉至少进行3个体位的检查,必要时可增加其他体位造影检查,对比剂注入速度为2~3mL/s,注入总量为40mL。通过直径法进行评估,评估结果分为4个等级: $<50\%$ 为正常或轻度狭窄,50%~70%为中度狭窄, $\geq 70\%$ 为重度狭窄或完全闭塞。根据检查结果显示本研究患者中正常或轻、中度狭窄患者共48例,重度狭窄或完全闭塞患者共12例。

1.3 统计学方法 采用统计学软件SPSS 26.0处理分析数据,计数数据以(%)显示,并通过卡方检验分析差异;计量数据以($\bar{x} \pm s$)显示,并通过t检验分析差异。以患者CAG为冠状动脉狭窄程度评估金标准,探讨CTA-FFR对冠状动脉狭窄的评估价值,以有创性FFR检测结果为冠状动脉狭窄后心肌缺血评估金标准,探讨CTA-FFR对冠状动脉狭窄后心肌缺血的评估价值,并通过kappa检验法分析冠状动脉CTA-FFR分别于与CAG及有创性FFR检测的一致性。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 冠状动脉CTA-FFR对冠状动脉狭窄程度的评估价值 以CAG诊断结果为“金标准”,CTA-FFR对冠状动脉狭窄程度评估的敏感度为89.58%,特异度为83.33%,阳性预测值为95.56%,阴性预测值为66.67%,准确度为88.33%,CTA-FFR检测结果与CAG

检测结果的一致性较好(kappa值=0.81)。详见下表1。

表1 冠状动脉CTA-FFR对冠状动脉狭窄程度的评估价值

CTA-FFR	CAG		合计
	>70%	≤70%	
>70%	43	2	45
≤70%	5	10	15
合计	48	12	60

2.2 冠状动脉CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血风险的评估价值 以有创性FFR检测结果为“金标准”，基于患者计数，CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血评估的敏感度为92.68%，特异度为89.47%，阳性预测值为95.00%，阴性预测值为85.00%，准确度为91.67%，CTA-FFR检测结果与有创性FFR检测结果的一致性较好(kappa值=0.85)；基于血管计数，CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血评估的敏感度为94.54%，特异度为92.86%，阳性预测值为96.30%，阴性预测值为89.66%，准确度为93.98%，CTA-FFR检测结果与有创性FFR检测结果的一致性较好(kappa值=0.88)。详见下表2~3。

表2 患者水平冠状动脉CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血风险的评估价值

CTA-FFR	患者有创性FFR		合计
	阳性	阴性	
阳性	38	2	40
阴性	3	17	20
合计	41	19	60

表3 血管水平冠状动脉CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血风险的评估价值

CTA-FFR	血管有创性FFR		合计
	阳性	阴性	
阳性	52	2	54
阴性	3	26	29
合计	55	28	83

3 讨论

心肌缺血可由血压、血粘度、主动脉供血以及冠状动脉病变等多种因素诱发，其中冠状动脉狭窄是其最常见以及最主要的病因之一，而冠状动脉狭窄合并心肌缺血可加大临床治疗难度，进一步影响患者的预后^[7-8]。因此早期诊断冠状动脉狭窄以及评估是否合并心肌缺血，对于临床制定干预方案具有重要临床意义。CAG为评估冠状动脉狭窄程度的金标准，但其存在有创、费用高等局限性。FFR为评估心肌功能性缺血的标准，但其也属于有创性检查。而CTA为目前临床在冠心病等相关病变中的常用无创检查方法，但其在病变冠状动脉的血流动力学以及是否引发功能性心肌缺血等方面存在局限性^[9]。近年来随着计算机技术在医学领域应用中的发展，CT-FFR作为冠状动脉病变评估的新方法逐渐受到临床关注。本研究则主要探讨冠脉CTA-FFR评估冠脉狭窄及心肌缺血风险的价值。

研究结果显示，以CAG诊断结果为“金标准”，CTA-FFR对冠状动脉狭窄程度评估的敏感度为89.58%，特异度为83.33%，阳性预测值为95.56%，阴性预测值为66.67%，准确度为88.33%，CTA-FFR检测结果与CAG检测结果的一致性较好(kappa值=0.81)。结果表明冠状动脉CTA-FFR检测结果对于冠状动脉狭窄具有较好临床应用效果。CAG与CTA均为目前评估冠状动脉狭窄的常用影像学方法，CTA检查具有较高的空间分辨率与时间分辨力，可为临床提供冠状动脉较为准确与直观的解剖学信息，对于导致狭窄的斑块性质可进行无创且重复性评估，及时帮助临床分辨钙化、非钙化以及混合等不同性质的斑块^[10-11]。但钙化动脉壁的容积效应是CT检查难以避免的问题，如低密度组织中检测高密度病灶，可导致CT值偏低，而受容积效应影响，CT检测图像的边界部位CT值可明显升高，导致临床评估的动脉管径较其实际值小，从而导致血管狭窄程度被过度评估。此外，运动伪影、信噪比、增强对比度差等因素也可对CTA的评估准确性产生一定不良影响，但其对CT-FFR评估准确性的影响则相对较小。CT-FFR是基于CTA单一成像方法的基础上利用计算机技术增加FFR的计算与分析，因此相对CTA技术仅能从解剖学层面评估，其可从解剖学-生理学进行更为全面地评估^[12]。CT-FFR不仅可评估冠状动脉狭窄

的解剖形态，还可利用冠状动脉FFR、血流剪切应力等多个血流动力学指标对冠状动脉血液流速进行分析，从而可对冠状动脉旁路血管的流动停滞以及功能等进行评估，进而有利于避免出现钙化斑块对狭窄程度的评估的影响，从而有利于提高对冠状动脉狭窄评估的准确性^[13]。

本研究结果也显示，以有创性FFR检测结果为“金标准”，基于患者计数，CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血评估的敏感度为92.68%，特异度为89.47%，阳性预测值为95.00%，阴性预测值为85.00%，准确度为91.67%，CTA-FFR检测结果与有创性FFR检测结果的一致性较好(kappa值=0.85)；基于血管计数，CTA-FFR对冠状动脉后心肌缺血评估的敏感度为94.54%，特异度为92.86%，阳性预测值为96.30%，阴性预测值为89.66%，准确度为93.98%，CTA-FFR检测结果与有创性FFR检测结果的一致性较好(kappa值=0.88)，结果表明冠状动脉CTA-FFR检测结果对冠状动脉狭窄诱发的心肌缺血也具有较好临床应用价值。因考虑冠状动脉狭窄病变可能累及到多支血管，故分别以患者计数和血管计数进行CTA-FFR的统计和分析。CT-FFR检测值主要是通过对CTA检测原始数据进行识别、切割，从而获取病变血管的生理及病理学信息，进行利用计算机处理软件对冠状动脉CT-FFR值进行计算。冠状动脉正常情况下远端压力与其近端压力不存在差异，故其CT-FFR检测值为1，而当其发生狭窄时，其远端血管压力可明显下降，从而较近端低，故其CT-FFR计算值也通常低于1。而CT-FFR值越小，表明冠状动脉狭窄越严重，从而对于心肌供血的不良影响也越大，患者出现心肌缺血的风险也越高。目前关于CT-FFR评估准确性的相关研究多以国外为主，Beg等^[14]的研究表明CT-FFR值由0.80降至0.75时，其评估的特异度与准确率均可得到明显升高，因此该研究认为CT-FFR在评估因冠状动脉造成的心肌缺血的临床价值较高。Peper等^[15]的研究也显示CT-FFR在心肌缺血中的诊断价值较好。

综上所述，CT-FFR在利用CTA检测数据的基础上从解剖以及生理层面对患者冠状动脉进行评估，可有效对冠状动脉狭窄程度以及可能引起的心肌缺血进行评估和讨论。且CT-FFR检测既保留了CTA检查的无创优势，同时还不需增加额外影像学检查及对比剂用量，具有临床推广应用价值。但本研究不足之处在于作为回顾性分析，且样本量选取较少，容易导致数据存在偏差，因此后续可通过扩大样本量进一步对研究结果进行证实。

参考文献

- [1] 吕鑫, 张文忠. 青岛地区糖尿病合并冠心病患者发生心肌梗死的流行病学特征及危险因素[J]. 公共卫生与预防医学, 2023, 34(5): 145-148.
- [2] 肖亚楠, 肖文涛, 叶发民, 等. 定量血流分数对非ST段抬高型急性冠状动脉综合征患者冠状动脉临床病变功能性狭窄的诊断价值[J]. 中国循环杂志, 2024, 39(1): 48-53.
- [3] 朱楠, 齐吴娟, 吴红艳, 等. 基于第二代追踪冻结技术重建冠状动脉CT造影图像所测冠状动脉跨狭窄CT血流储备分数差值与冠状动脉狭窄风险及心肌梗死指标的相关性[J]. 中国介入影像与治疗学, 2023, 20(8): 478-482.
- [4] 赵桂喜, 潘颀, 邢伟. 基于心肌缺血危险因素的冠状动脉CTA和CT-FFR诊断价值的探讨[J]. 影像研究与医学应用, 2023, 7(1): 19-22.
- [5] 徐浩, 张治, 解学乾, 等. 冠脉生理功能评估软件(DEEPVESSEL FFR)与有创FFR在评估冠脉缺血中的对比研究[J]. 诊断学理论与实践, 2021, 20(4): 384-390.
- [6] Becker L, Peper J, Verhappen B J L A, et al. Real world impact of added FFR-CT to coronary CT angiography on clinical decision-making and patient prognosis-IMPACT FFR study[J]. European Radiology, 2023, 33(8): 5465-5475.
- [7] 周学儒, 黄文亮, 丁瑞峰. 基于冠脉CT特征评估冠脉狭窄患者心肌缺血的价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22(3): 76-78.
- [8] 郑媛媛, 叶莎, 张倩榕, 等. 一氧化氮、血清加压素II与老年稳定型心绞痛患者冠脉粥样硬化斑块的关系及对功能性心肌缺血的预测[J]. 现代生物医学进展, 2023, 23(16): 3123-3128.
- [9] 赵娜, 高扬, 徐波, 等. 基于冠状动脉CT血管成像的狭窄率与斑块特征联合分析对提高CT诊断心肌缺血效能的价值[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(1): 40-47.
- [10] 邓以川, 李川, 颜小杭, 等. CT血管成像技术评估血液因子在冠状动脉硬化狭窄的相关性研究[J]. 实用放射学杂志, 2021, 37(4): 567-602.
- [11] 万书友, 杜灵艳, 郑琦. CTA与DSA评估冠心病冠状动脉狭窄程度的临床价值[J]. 医学影像学杂志, 2023, 33(1): 135-138.
- [12] Schuessler M, Saner F, Al-Rashid F, et al. Diagnostic accuracy of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve (CT-FFR) in patients before liver transplantation using CT-FFR machine learning algorithm[J]. European Radiology, 2022, 32(12): 8761-8768.
- [13] Vincent M, Daniele A, Edoardo C, et al. Long term effects of surgical and transcatheter aortic valve replacement on FFRCT in patients with severe aortic valve stenosis[J]. The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2022, 38(2): 427-434.
- [14] Beg F, Rehman H, Chamsi-Pasha MA, et al. Association between FFR(CT) and instantaneous wave-free ratio (iFR) of intermediate lesions on coronary computed tomography angiography[J]. Cardiovasc Revasc Med, 2021, 31(1): 57-60.
- [15] Peper J, Becker LM, van den Berg H, et al. Diagnostic performance of CCTA and CT-FFR for the detection of CAD in TAVR work-up[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2022, 15(11): 1140-1149.

(收稿日期: 2024-07-08)

(校对编辑: 韩敏求)