论 著

基于CCTA的FFR对冠心病心肌缺血状态的评估价值*

喻 珏[1,2,*] 赵本立[3] 周 林[2]
1.四川大学华西医院上锦医院(成都上锦南府医院)放射科
2.成都医学院第三附属医院(成都市郫都区人民医院)放射科
3.四川大学华西医院上锦医院(成都上锦南府医院)信息科 (四川 成都 61000)

【摘要】**目的** 分析基于CT血管成像(CCTA)的血流储备分数(FFR)对冠心病心肌缺血状态的评估价值。**方法** 选取2023年3月至2024年3月本院收治的92例冠心病患者，所有患者均接受CCTA检查，获取患者CCTA无创FFR(CT-FFR)、冠脉狭窄情况、病变长度以及斑块总体积负荷；同时患者接受有创冠状动脉造影及有创FFR检测，以有创FFR值为标准将患者分为心肌缺血组和非心肌缺血组。比较两组CT-FFR、冠脉狭窄情况、病变长度以及斑块总体积负荷等参数，分析CCTA量化参数对冠心病心肌缺血损伤诊断的评估价值。**结果** 经有创FFR测定，92例冠心病患者中有创FFR值≤0.8患者38例纳入为心肌缺血组，有创FFR值＞0.8患者54例纳入为非心肌缺血组。心肌缺血组CT-FFR值小于非心肌缺血组，病变长度、总斑块负荷、狭窄程度均大(长)于非心肌缺血组(P＜0.05)；经ROC分析显示，CT-FFR、病变长度、总斑块负荷和狭窄程度评估冠心病心肌缺血的AUC值为0.935(0.864~0.976)、0.704(0.600~0.795)、0.745(0.643~0.830)和0.766(0.666~0.848)，其中CT-FFR评估效能显著高于病变长度、总斑块负荷和狭窄程度(Z=3.765、3.065、2.910，P＜0.05)。参数联合评估冠心病心肌缺血的AUC值为0.977(0.922~0.997)，显著高于CT-FFR、病变长度、总斑块负荷和狭窄程度单独评估(Z=2.048、5.094、4.297、4.300，P＜0.05)。**结论** CCTA量化FFR及冠脉相关参数可良好评估冠心病心肌缺血损伤，联合检测可显著提高诊断效能。

【关键词】冠心病；心肌缺血；CT血管成像；血流储备分数；冠脉狭窄；斑块
【中图分类号】R541.4
【文献标识码】A
【基金项目】四川省医学会(恒瑞)科研基金专项科研课题(2021HR68)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.04.023

Value of CCTA-Derived FFR in Evaluating the State of Myocardial Ischemia in Coronary Heart Disease*

YU Jue[1,2,*], ZHAO Ben-li[3], ZHOU Lin[2].
1.Radiology Department of West China Hospital of Sichuan University, Shangjin Hospital (Chengdu Shangjin Nanfu Hospital), Chengdu 610000, Sichuan Province, China
2.Radiology Department of the Third Affiliated Hospital of Chengdu Medical College (People's Hospital of Pidu District, Chengdu), Chengdu 610000, Sichuan Province, China
3.Information Department of West China Hospital of Sichuan University, Shangjin Hospital (Chengdu Shangjin Nanfu Hospital), Chengdu 610000, Sichuan Province, China

ABSTRACT
Objective To analyze the value of coronary computed tomography angiography (CCTA)-derived fractional flow reserve (FFR) in evaluating the state of myocardial ischemia in coronary heart disease. ***Methods*** 92 patients with coronary heart disease who were admitted to the hospital from March 2023 to March 2024 were selected. All of them underwent CCTA, and CCTA-derived FFR (CT-FFR), coronary stenosis status, lesion length, and total plaque load were obtained. Meanwhile, patients underwent invasive coronary arteriography and invasive FFR testing. According to invasive FFR, the patients were divided into myocardial ischemia group and non-myocardial ischemia group. CT-FFR, coronary stenosis status, lesion length, and total plaque load were compared between the two groups. The value of quantitative parameters of CCTA in diagnosing myocardial ischemia injury in coronary heart disease was evaluated. ***Results*** According to invasive measurement of FFR, 38 patients with invasive FFR ≤ 0.8 were included in the myocardial ischemia group and 54 patients with invasive FFR > 0.8 were included in the non-myocardial ischemia group. CT-FFR of the myocardial ischemia group was lower than that of the non-myocardial ischemia group. Lesion length, total plaque load, and stenosis degree were greater than those in the non-myocardial ischemia group (P<0.05). ROC curve analysis results showed that the AUC values of CT-FFR, lesion length, total plaque load, and stenosis degree for diagnosing myocardial ischemia in coronary heart disease were 0.935 (0.864-0.976), 0.704 (0.600-0.795), 0.745 (0.643-0.830), and 0.766 (0.666-0.848), respectively. The diagnostic efficacy of CT-FFR was significantly higher than that of lesion length, total plaque load, and stenosis degree (Z=3.765, 3.065, 2.910, P<0.05). The AUC of combination of above parameters for diagnosing myocardial ischemia in coronary heart disease was 0.977 (0.922-0.997), which was significantly larger than that of each parameter (Z=2.048, 5.094, 4.297, 4.300, P<0.05). ***Conclusion*** CCTA-derived FFR and coronary artery related parameters can effectively help to diagnose myocardial ischemia injury in coronary heart disease, and combined use can significantly improve diagnostic efficacy.

Keywords: Coronary Heart Disease; Myocardial Ischemia; CT Angiography; Fractional Flow Reserve; Coronary Artery Stenosis; Plaque

冠心病为临床发病率较高的慢性病，主要特征为冠状动脉粥样硬化斑块的形成，且疾病病因复杂，好发于中老年人群，具有较高的死亡率[1]。随着社会环境以及生活方式的变化，冠心病发病呈年轻化趋势。冠心病患者预后好坏与患者心肌缺血情况相关，因此对冠心病患者心肌缺血的诊断与评估具有重要意义[2]。目前临床诊断冠心病以及评估冠心病心肌缺血的“金标准”为冠状动脉造影及有创血流储备分数(FFR)，但此方式属于侵入性操作，在临床应用上存疑一定风险，无法进行广泛推广[3]。而CT血管成像(CCTA)属于无创检测技术，可获取较高质量的图像，实现对冠脉狭窄以及硬化斑块的评估，但针对钙化情况严重的患者诊断中应用受限[4]。基于CCTA的FFR(CT-FFR)为临床新式的无创检测冠脉血流情况的技术，可弥补常规CCTA方式的不足，对临床决策进行指导[5]。但有资料显示[6]，CT-FFR检测仍然可受到患者钙化程度的影响，需要结合其他参数进行准确评估，因此CT-FFR在冠心病心肌缺血中的评估效果尚存在一定争议。鉴于此，本篇进一步分析CT-FFR、冠脉相关参数对冠心病心肌缺血患者评估效果并比较效能，旨在为临床评估与决策制定提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集本院2022年6月至2024年3月收治的92例冠心病患临床资料。符合《赫尔辛基宣言》相关内容。

纳入标准：(1)符合冠心病诊断标准[7]；(2)患者均接受CCTA以及相关实验室检查；(3)患者在CCTA检查后1个月内接受有创冠状动脉造影检查；(4)患者临床资料完整，且满足需求。排除标准：(1)既往有冠脉介入治疗史；(2)伴有其他肿瘤疾病者；(3)合并心、肝、肾重要脏器功能不全者；(4)患有脑部或精神疾病；(5)影像质量较差者。

1.2 方法

1.2.1 CCTA检查及分析：(1)CCTA检查：患者入院后采用美国GE公司多排螺旋CT扫

【第一作者】喻 珏，女，主治医师，主要研究方向：心脏CT及MRI、神经MRI。E-mail：yjj189735@126.com
【通讯作者】喻 珏

描冠状动脉，以及定位相规定扫描范围，模式选择心电门控扫描，在主动脉阈值300~330HU下应用对比剂追踪技术，以双筒高压注射器往肘静脉注入碘普罗胺50mL+30mL生理盐水混合液，速率4.5~5.5mL/s；参数设置：管电压=80~100kV，管电流=150~200mA，球管转速=0.28r/s，扫描后传输至配套工作站进行处理。(2)图像分析：数据传入至人工智能软件后，依据人工智能模型，在冠状动脉树狭窄病变远端约2cm处获取CT-FFR；同时在冠状动脉三维血管树中直接获取病变出血管管腔狭窄程度。总斑块负荷：采用Siemens Frontier Version4.0软件定义斑块近、远端，自动检测总斑块体积，管腔总体积，两者相加得到血管总体积，总斑块负荷=总斑块体积/血管总体积，同时测量病变部位长度。上述操作由两位资历丰富的影像科医师完成，最终结果取平均值，见图。

1.2.2 有创FFR测定与分组：采用飞利浦数字减影血管造影X线机，进行检查，对左右冠脉进行造影，每支病变血管至少选择两个不同的体位进行造影观察，并采用FFR测量系统，将导管置于病变血管近端，使主动脉压力与压力导丝同步，将压力导丝送至病变血管远端，待稳定后注射腺苷使达到最大充血状态，测定有创FFR值。患者有创FFR值≤0.8时存在心肌缺血纳入为心肌缺血组，有创FFR值＞0.8时认为不存在心肌缺血纳入为非心肌缺血组。

1.3 统计学方法 选用统计学软件SPSS 25.0进行处理，计数资料采用例(%)表示，比较采用χ^2检验；计量资料采用均值±标准差($\bar{x}\pm s$)表示，两组比较采用t检验；CT-FFR及冠脉参数对冠心病心肌缺血的评估价值采用受试者工作特征曲线(ROC)分析，评估效能以曲线下面积(AUC)表示，诊断效能比较采用DeLong检验；检验水准α=0.05。

2 结　果

2.1 两组一般资料比较 经有创FFR测定，92例冠心病患者中有创FFR值≤0.8患者38例纳入为心肌缺血组，有创FFR值＞0.8患者54例纳入为非心肌缺血组。两组患者一般资料均衡可比(P＞0.05)，见表1。

2.2 两组CT-FFR以及冠脉相关参数比较 心肌缺血组CT-FFR值小于非心肌缺血组，病变长度、总斑块负荷、狭窄程度均大(长)于非心肌缺血组(P＜0.05)，见表2。

2.3 CT-FFR、冠脉相关参数对冠心病心肌缺血评估价值 经ROC分析显示，CT-FFR、病变长度、总斑块负荷和狭窄程度评估冠心病心肌缺血的AUC值为0.935(0.864~0.976)、0.704(0.600~0.795)、0.745(0.643~0.830)和0.766(0.666~0.848)，其中CT-FFR评估效能显著高于病变长度、总斑块负荷和狭窄程度(Z=3.765、3.065、2.910，P＜0.05)。参数联合评估冠心病心肌缺血的AUC值为0.977(0.922~0.997)，显著高于CT-FFR、病变长度、总斑块负荷和狭窄程度单独评估(Z=2.048、5.094、4.297、4.300，P＜0.05)，见表3、图1。

表1 两组一般资料比较[例(%)]

组别	例数	性别(例)		年龄(岁)	体质量指数(kg/m²)	吸烟史(例)	饮酒史(例)
		男	女				
心肌缺血组	38	22(57.89)	28(42.11)	63.19±4.26	23.72±2.33	7(18.42)	8(21.05)
非心肌缺血组	54	26(48.15)	26(51.85)	62.86±3.99	23.46±2.26	14(25.93)	16(29.63)
χ^2/t值		0.849		0.268	0.394	0.713	0.851
P值		0.357		0.789	0.694	0.398	0.356

表2 两组CT-FFR以及冠脉相关参数比较

组别	例数	CT-FFR值	病变长度(mm)	总斑块负荷(%)	狭窄程度(%)
心肌缺血组	38	0.74±0.07	27.32±4.33	40.23±5.29	63.87±9.26
非心肌缺血组	54	0.92±0.11	23.46±3.86	36.56±4.83	56.74±9.42
t值		8.892	4.025	3.450	3.600
P值		＜0.001	＜0.001	0.001	0.001

表3 CT-FFR、冠脉相关参数对冠心病心肌缺血评估价值

参数	AUC	Z	P	约登指数	cut-off	敏感度(%)	特异度(%)
CT-FFR	0.935(0.864~0.976)	15.203	＜0.001	0.836	0.81	94.74	88.89
病变长度	0.704(0.600~0.795)	3.756	0.002	0.432	23.0 mm	89.47	53.70
总斑块负荷	0.745(0.643~0.830)	4.726	＜0.001	0.462	37.97 %	68.42	77.78
狭窄程度	0.766(0.666~0.848)	5.230	＜0.001	0.427	56.99 %	81.58	61.11
参数联合	0.977(0.922~0.997)	30.463	＜0.001	0.900	-	97.37	92.59

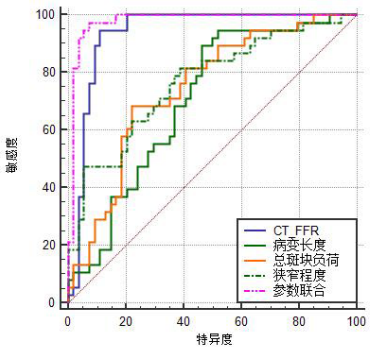
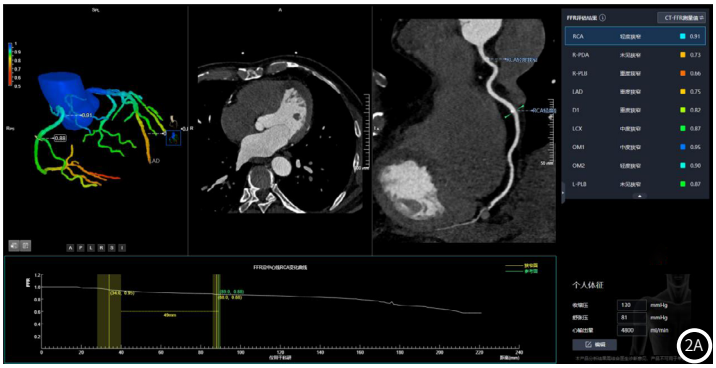
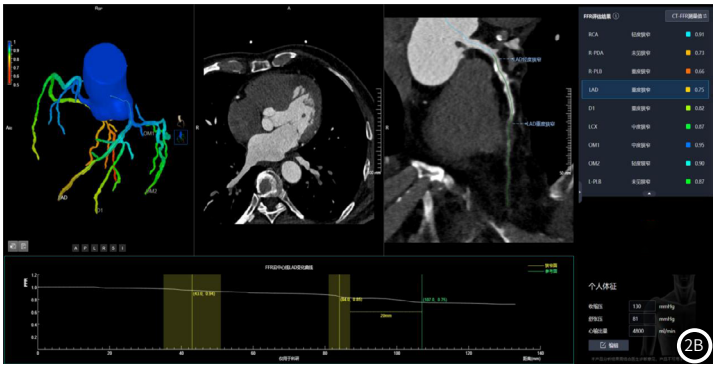


图1 CT-FFR、冠脉相关参数对冠心病心肌缺血评估价值的ROC曲线

2.4 影像学资料 见图2。





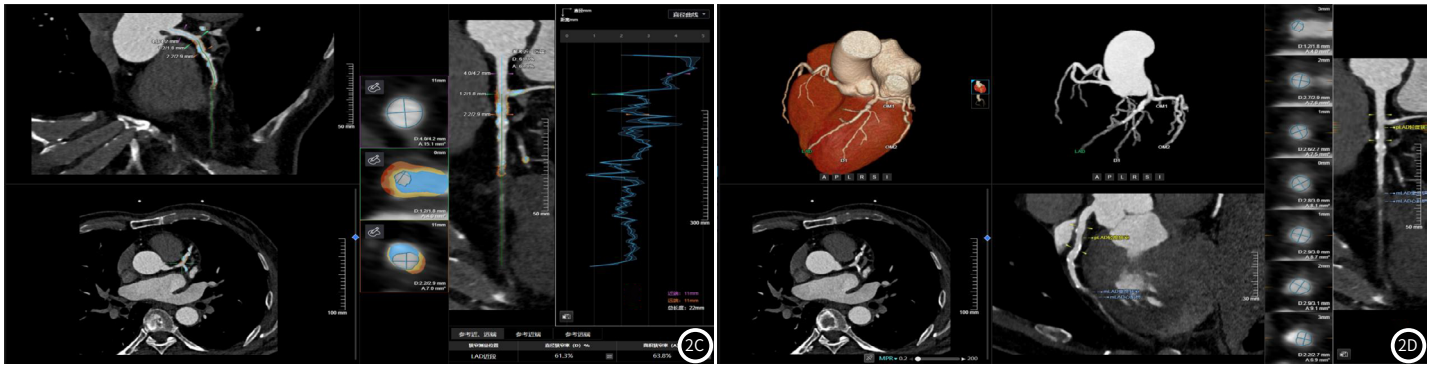


图2 CCTA检查图像(2A～2B: CT-FFR测量数据分析; 2C～2D: 冠状动脉狭窄测量分析)。

3 讨 论

冠心病作为临床上常见的心血管慢性病，若患者不加以干预治疗，疾病可进展为心肌梗死或心力衰竭，导致预后较差[8]。其中冠心病患者缺乏典型临床表现或冠脉病变程度较大的患者，病情评估更佳困难，此类患者具有更高的心肌缺血概率，增加心血管风险[9]。因此冠心病心肌缺血的诊断对患者治疗方案的制定以及预后具有积极作用。既往临床评估冠心病患者心肌缺血的标准为冠脉血管造影和有创FFR的检测，FFR通过测定狭窄冠状动脉压力来间接反映血流量的改变，依据远近两端压力差得出，此方案可良好评估冠心病患者冠脉狭窄程度，但此方案具有一定创伤性，在检查过程中操作相对复杂，且具有较高的检查费用，因此在临床中无法得到广泛使用[10-11]。因此寻找一种创伤较小、操作简便、可重复性高的诊断方式一直为临床关注的重点。

CCTA为非侵入性的检查方式，具有扫描速度快、时间和空间分辨率高、图像质量高等优势，与冠脉血管造影相比，CCTA检查可清晰显示冠状动脉解剖信息，不仅可通过图像评估冠状动脉狭窄程度，还可显示硬化斑块的性质等特征，在冠心病的评估中占据重要地位[12]。但CCTA常规检查同样存在不足，通常CCTA只用于评估冠状动脉解剖学上的变化，无法评估受累冠状动脉是否造成心肌缺血和血流动力学变化[13]。随着计算机科学、硬件技术的发展，CT-FFR无创评估逐渐运用于冠心病的评估中。CT-FFR是在CCTA检查基础上，在静息状态下的CCTA原始图像数据基础上，对冠脉最大充血状态进行模拟，依据传统方式重建冠状动脉树与心室肌结构的三维模型，当血流通过纳维-斯托克斯方程变化被模拟为牛顿流体，从而计算出FFR值，此方式通过建模，整合血管壁弹性，模拟冠状动脉的自身调节和血流量、腺苷介导下冠状动脉的最大充血状态，结合多种因素，获取CT-FFR，在最大程度上得到与常规有创FFR相同效果[14-15]。结果显示，心肌缺血组CT-FFR值小于非心肌缺血组，病变长度、总斑块负荷、狭窄程度均大(长)于非心肌缺血组；结果提示，在冠心病心肌缺血损伤患者中，存在冠脉的明显病变，表现为病变程度相对更长，总斑块体积占比以及管腔狭窄程度的增加，此外CT-FFR值显著更低。在ROC分析中显示，CT-FFR、病变长度、总斑块负荷和狭窄程度评估冠心病心肌缺血的AUC值为0.935、0.704、0.745和0.766，其中CT-FFR评估效能显著高于病变长度、总斑块负荷和狭窄程度；参数联合评估冠心病心肌缺血的AUC值为0.977，显著高于CT-FFR、病变长度、总斑块负荷和狭窄程度单独评估；结果表明，CCTA常规的管腔狭窄、病变部位长度以及总斑块占比均可对冠心病心肌缺血情况进行评估，但CT-FFR对冠心病心肌缺血的评估效果明显优于上述常规CCTA参数，具有十分良好的诊断效能，具有更高的准确率，此外在CT-FFR联合常规CCTA参数的条件下，评估效能还可进一步提升，因此临床可考虑通过CT-FFR检测或多指标联合实现对冠心病心肌缺血损伤的评估。

资料显示[16]，CT-FFR除了无创、扫描速率快等优势外，还可通过血流剪切应力、血液流流速的分析、对冠状动脉旁路血管功能以及血流停滞情况进行评价，可避免常规CCTA对钙化斑块的过度评估，且在多支血管进行测定时具有可重复性，在冠脉缺血程度、解剖学和功能学评估以及定位罪犯血管等方面具有较好发挥。CT-FFR同样具有局限性，由于其基于CCTA影像，因此影响影像质量的伪影、噪声等均可对诊断结果产生影响，故CT-FFR的应用对CCTA影像建模的要求较高；且CT-FFR的诊断效果可能受到患者微循环个体差异的影响，因此临床在运用时仍需注意上述局限性[17]。

综上所述，冠心病心肌缺血患者中存在CT-FFR的降低，同时伴有冠脉狭窄以及显著的斑块特征，临床上可通过对患者进行CCTA检查获取上述相关参数，实现对冠心病心肌缺血损伤的无创检测，且在CT-FFR的基础上联合冠脉其他参数可提高诊断效果，值得临床推广。

参考文献

[1]盛玉杰, 王询, 王泽静. CT冠状动脉定量在评估冠心病患者心肌缺血诊断中的应用价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22(5): 103-105.
[2]吴丹. 冠状动脉CT血管造影判断冠心病病变情况的价值分析[J]. 罕少疾病杂志, 2025, 32(1): 74-76.
[3]俞雯吉, 陈勇峻, 杨晓宇, 等. 心外膜脂肪容积预测阻塞性冠心病伴心肌缺血的增益价值[J]. 中华心血管病杂志, 2023, 51(6): 633-641.
[4]马雪妍, 侯佳蒙, 张永高. 基于CCTA的斑块及冠状动脉周围脂肪特征对非梗阻性心肌缺血的诊断价值[J]. 临床放射学杂志, 2023, 42(2): 252-257.
[5]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.
[6]王圣楠, 卜荣生, 杜静茹, 等. CT-FFR参数联合斑块定量技术在心肌缺血再灌注损伤预测中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40(1): 66-70.
[7]中华医学会心血管病学分会介入心脏病学组, 中华医学会心血管病学分会动脉粥样硬化与冠心病学组, 中国医师协会心血管内科医师分会血栓防治专业委员会, 等. 稳定性冠心病诊断与治疗指南[J]. 中华心血管病杂志, 2018, 46(9): 680-694.
[8]王君, 刘玉森, 郝苑苑. 超声斑点追踪成像技术联合实时三维超声心动图对老年冠心病的诊断价值[J]. 罕少疾病杂志, 2025, 32(7): 90-92, 106.
[9]王子杨, 刘美志, 胡晓贞, 等. 脉通君安汤治疗气虚血瘀型冠心病心绞痛的临床疗效及转录组学研究[J]. 南京中医药大学学报, 2024, 40(4): 419-428.
[10]杜艳, 王雅雯, 张海龙, 等. 以定量冠状动脉造影为"金标准"评价ATP负荷心肌灌注显像对冠心病的诊断价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2023, 43(2): 70-74.
[11]田亚楠, 孙莹, 彭扬. TBiL及HbA1c在老年冠心病合并2型糖尿病中的水平及与冠状动脉不同病变程度的相关性[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43(15): 3635-3638.
[12]宣拓, 魏来, 董慧玲. CCTA与DSA在诊断冠状动脉斑块的临床应用价值[J]. 中国临床医学影像杂志, 2024, 35(5): 325-328.
[13]沈旨艳, 夏坤, 幸志洋, 等. 冠周脂肪衰减指数评估冠心病研究进展[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(4): 614-617.
[14]刘军, 吴勇, 黄虹, 等. CT-FFR及斑块定量分析预测非阻塞性冠心病不良结局的价值[J]. 中华危重病急救医学, 2023, 35(6): 615-619.
[15]江京洲, 郭翔, 左蕊, 等. 基于冠状动脉CT血流储备分数预测老年冠心病患者远期结局的研究[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2023, 25(12): 1255-1259.
[16]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损伤指标的相关性[J]. 中国介入影像与治疗学, 2023, 20(8): 478-482.
[17]曹红岩, 蔡晓航, 孙国臣. CCTA及CT-FFR评估冠脉病变特异性缺血的价值观察[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(5): 52-54.

(收稿日期：2024-11-15) (校对：姚丽娜 排版：张鸿燊)