

论 著

基于冠状动脉CT血管成像的斑块定量分析联合钙化积分在评价临界病变缺血性狭窄的应用价值*

张瑞荣 马 思 牛媛媛

吴林桦 石 惠*

宁夏医科大学总医院放射科

(宁夏 银川 750004)

【摘要】目的 探究基于CCTA的冠脉钙化积分(CACS)联合斑块特征定量指标对冠脉临界病变缺血性狭窄的诊断效能。**方法** 回顾性收集行CCTA和冠脉造影检查及血流储备分数(FFR)测定的存在冠脉临界病变的患者60例,以FFR为金标准分为FFR>0.80的非缺血组 and FFR≤0.80的缺血组,比较两组CACS,目标斑块特征定量指标间差异。分析临界病变缺血性狭窄的独立影响因素。运用ROC曲线评估相关单一指标及联合指标在临界病变缺血性狭窄的诊断效能。**结果** 缺血组比非缺血组CACS高、斑块体积(TPV)大、斑块负荷(TPB)高,最小管腔面积(MLA)小, (P<0.05)。CACS是临界病变缺血性狭窄的独立影响因素 (OR=1.014; P=0.002)。与TPV(0.668)、TPB(0.742)、MLA(0.720)和CACS(0.793)相比,联合应用(0.924)在临界病变缺血性狭窄的诊断效能明显高于单独使用。**结论** CACS联合斑块特征定量指标的应用可显著提升CCTA检查对临界病变缺血性狭窄的诊断效能。

【关键词】 临界病变; 冠脉钙化积分;
斑块特征; 冠状动脉CT血管成像

【中图分类号】R541.4

【文献标识码】A

【基金项目】宁夏医科大学校级科研项目
(XM2023036)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.08.025

The Application Value of Quantitative Plaque Analysis and Calcification Core Based on Coronary CT Angiography in Evaluating Ischemic Stenosis in Critical Lesions*

ZHANG Rui-rong, MA Si, NIU Yuan-yuan, WU Lin-hua, SHI Hui*.

Department of Radiology, General Hospital of Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, Ningxia Hui Autonomous Region, China

ABSTRACT

Objective To explore the diagnostic efficacy of coronary artery calcium score (CACS) and plaque quantitative indicators based on coronary computed tomography angiography (CCTA) for ischemic stenosis in coronary critical lesions. **Methods** A retrospective collection of patients with coronary critical lesions who underwent CCTA and coronary angiography (CAG) examinations and fractional flow reserve (FFR) measurement was conducted. A total of 60 patients were divided into two groups based on FFR: non-ischemic group (FFR>0.80) and ischemic group (FFR≤0.80). The differences in CACS, target plaque quantitative indicators between the two groups were compared. Analysis of independent influencing factors for ischemic stenosis in critical lesions. The diagnostic efficacy of single indicators and combined indicators for ischemic stenosis in critical lesions was evaluated using ROC curves. **Results** The ischemic group showed higher CACS, larger plaque volume, higher plaque burden, and smaller minimal lumen area compared to the non-ischemic group, (P<0.05). CACS was an independent influencing factor for ischemic stenosis in critical lesions (OR=1.014; P=0.002). Compared to TPV (0.668), TPB (0.742), MLA (0.720), and CACS (0.793), the combined application (0.924) has significantly higher diagnostic efficacy in the diagnosis of ischemic stenosis at critical lesions. **Conclusion** The application of coronary artery calcium score combined with plaque quantitative indicators can significantly enhance the diagnostic efficacy of CCTA for ischemic stenosis in critical coronary lesions.

Keywords: Critical Lesions; Coronary Artery Calcium Score; Plaque Characteristics; Coronary Computed Tomography Angiography

冠状动脉粥样硬化临界病变(狭窄程度50%~70%)如何处理,病人才能获益最大一直是困扰临床医师的难题。过度积极的血运重建容易产生支架内再狭窄和血栓形成等并发症,同时增加医疗费用的支出;而过多的保守治疗,又导致了一些高危病变的血管得不到有效处理,从而增加了心血管事件的发生率^[1]。目前判断冠脉狭窄是否引起心肌缺血的金标准为血流储备分数(fractional flow reserve, FFR),当FFR≤0.8时,认为狭窄有功能学意义,需要行血运重建^[2]。然而基于冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)指导下经压力导丝测量的FFR因操作有创、要求高、辐射剂量大、费用昂贵等,临床上难以广泛推广和反复应用。既往许多研究表明基于冠状动脉CT血管造影(coronary computed tomography angiography, CCTA)检查的斑块特征定量指标对于提示缺血病变有意义^[3-4]。也有研究显示冠脉钙化积分(coronary artery calcium scoring, CACS)是造成冠脉血流动力学异常的重要因素^[5]。而国内有关两者联合使用评估心肌缺血病变的研究较少。因此,本研究以CAG指导下测量的FFR为金标准,探究基于CCTA的CACS联合斑块特征定量指标在临界病变缺血性狭窄的诊断价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集2018年8月至2023年12月行CCTA和CAG检查及FFR测定的住院患者,所有检查均在两周内完成。

纳入标准: 临床诊断为稳定型心绞痛、不稳定型、心绞痛或隐匿性冠心病; CCTA提示、CAG验证存在一处冠脉临界病变(狭窄程度50%-70%); 冠脉CT成像资料完整,图像质量达到评价标准。排除标准: 急性心肌梗死的患者; 接受过冠脉搭桥手术、支架植入手术的患者; 严重心力衰竭(NYHA≥III级)的患者。最终纳入了60例,依据FFR值将其分为FFR>0.80非缺血组(33例)和FFR≤0.80缺血组(27例)。其中男38例,女22例,年龄44岁-76岁,平均(60.8±7.5)岁,两组的年龄、性别、BMI、冠心病危险因素(高血压、高血脂、糖尿病)方面无统计学差异。本研究通过我院伦理委员会批准(KYLL-2024-0662)。

1.2 方法 采用Revolution CT(GE Healthcare, Milwaukee)机行CCTA检查。训练病人呼吸、监测心率。首先行门控下的冠脉钙化积分扫描,随后采用大螺距前瞻性心电门控断层扫描模式,并使用自动智能追踪模式,以主动脉根部为检测兴趣区,当其CT值

【第一作者】张瑞荣,女,主治医师,主要研究方向: 心血管疾病影像诊断。E-mail: zhangrr1987@yeah.net

【通讯作者】石 惠,女,主任医师,主要研究方向: 心血管疾病影像诊断。E-mail: goodshihui@163.com

达到触发阈值80HU后，延迟9秒进行扫描，采集数据。扫描范围为气管隆突下方1厘米至膈肌水平。对比剂注射方案：采用双筒高压注射器，通过肘前静脉注射60~70毫升的非离子型对比剂碘海醇(浓度为350 mg·mL⁻¹)。注射结束后，以相同速率注入60毫升生理盐水；流速(4.5-5.5)mL·s⁻¹。扫描参数：管电压固定为100kV，智能毫安(Smart mA)管电流范围400-670mA，准直器256×0.625，重建层厚和间隔为0.625，转速0.28 s/r。CAG及FFR测量，常规多体位选择性冠状动脉造影，由高年资心血管内科医师利用心血管造影机(荷兰Philips或GE Innova3100)完成，观察每支主干血管。FFR的测量参照中国冠状动脉血流储备分数测定技术临床路径专家共识^[6]。以FFR值≤0.8作为诊断缺血性病变的界值。

1.3 图像分析 扫描结束后根据心率获得最佳时像，将图像传至数坤科技的工作站，应用其Coronary Doc和CACS Doc(门控)人工智能软件完成数据的测量。由1名放射科医师(有10年以上心血管影像工作经验)依据CAG操作过程中记录的FFR导丝压力传感器位置找到CT图像中对应斑块，软件自动化识别血管及斑块并分析，自动获取CACS(Agatston算法获得)及目标斑块特征定量指标。斑块特征定量指标包括斑块长度(plaque length, PL)、斑块总体积(total plaque volume, TPV)、斑块总负荷(total plaque burden, TPB)、钙化斑块体积(calcified plaque volume, CPV)、钙化斑块占比(calcified plaque ratio, CPR)、非钙化斑块体积(non-calcified plaque volume, NCPV)、非钙化斑块占比(non-calcified plaque ratio, NCPR)、最小管腔面积(minimum lumen area, MLA)、重构指数 (remodeling index, RI)、偏心指数(eccentric index, EI)。以不同CT阈值界定斑块内不同成分，脂质-纤维脂质阈值分界为30HU，纤维脂质-纤维阈值分界为130HU，纤维-钙化阈值分界为350HU。TPB=斑块总体积/斑块段血管体积×100%；

NCPV =斑块总体积-钙化斑块体积；NCPR =(斑块总体积-钙化斑块体积)/斑块总体积×100%。MLA即斑块引起血管腔最狭窄处的面积。RI=冠状动脉最狭窄处的管腔面积/近远端参考血管面积的平均值。EI=(斑块最大径-斑块最小径)/斑块最大径。软件自动化识别管腔中心线、血管外轮廓及管腔内轮廓,如自动化标注的血管中心线与实际血管不符或血管内外轮廓不准确，需手动校正。

1.4 统计学方法 采用SPSS 26.0软件及Medcalc15.0软件进行统计学分析。符合正态分布的定量变量资料以($\bar{x} \pm s$)表示，采用两独立样本t检验进行组间比较，非正态分布的以中位数(上、下四分位数)表示，采用Mann-Whitney U非参数检验进行组间比较。筛选出有统计学差异的影响血流动力学的指标，采用多因素logistic回归分析得到临界病变缺血性狭窄的独立预测因子，采用受试者操作特征曲线(receiver operating characteristics, ROC)下面积(AUC)评估相关单一指标及联合指标在临界病变缺血性狭窄的诊断效能。并用Delong法比较ROC曲线下面积的差异，P<0.05为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 CCTA斑块特征定量指标及CACS与临界病变缺血性狭窄的相关性 缺血组TPV、TPB较非缺血组大，缺血组MLA更小、RI更大、CACS更高，差异有统计学意义(P<0.05)(表1)；而斑块特征的其他定量指标PL、CPV、CPR、NCPV、NCPR、EI在两组间的差异无统计学意义。将单因素分析中组间差异具有统计学意义的指标带入多因素logistic回归分析模型，结果显示，CACS是临界病变缺血性狭窄的独立预测因子，钙化积分每增加一个单位，冠脉临界病变导致心肌缺血的概率增加0.014倍(OR=1.014; P=0.002)。典型病例影像表现如图1。

表1 非缺血组与缺血组斑块特征定量指标及CACS比较

项目	FFR>0.80非缺血组(n=33)	FFR≤0.80缺血组(n=27)	Z/t	P值
PL(mm)	12.99(10.86, 29.95)	25.39(10.50, 39.20)	-0.894 ^a	0.371
TPV(mm ³)	71.40(47.24, 134.78)	190.05(63.11, 327.58)	-2.150 ^a	0.032
TPB(%)	0.44(0.35,0.55)	0.59(0.52,0.67)	-3.097 ^a	0.002
CPV(mm ³)	4.02(0.08, 35.73)	66.90(0.19, 190.94)	-1.805 ^a	0.071
CPR(%)	0.03(0.00, 0.42)	0.35(0.0025, 0.72)	-1.545 ^a	0.122
NCPV(mm ³)	56.62(28.10, 92.70)	69.12(22.33, 157.90)	-0.582 ^a	0.561
NCPR(%)	0.96(0.57, 0.99)	0.65(0.28, 0.99)	-1.456 ^a	0.145
MLA(mm ²)	4.34(3.09, 5.83)	2.72(1.89, 3.98)	-2.821 ^a	0.005
RI	1.08±0.20	1.28±0.38	2.380 ^b	0.023
EI	0.65±0.08	0.68±0.10	1.420 ^b	0.161
CACS	81.36(7.55, 146.23)	350.87(60.01, 1160.50)	-2.153 ^a	0.031

注：PL：斑块长度；TPV：斑块总体积；TPB：斑块总负荷；CPV：钙化斑块体积；CPR：钙化斑块占比；NCPV：非钙化斑块体积；NCPR：非钙化斑块占比；MLA：最小管腔面积；RI：重构指数；EI：偏心指数；CACS：冠脉钙化积分；a:Z值；b:t值。

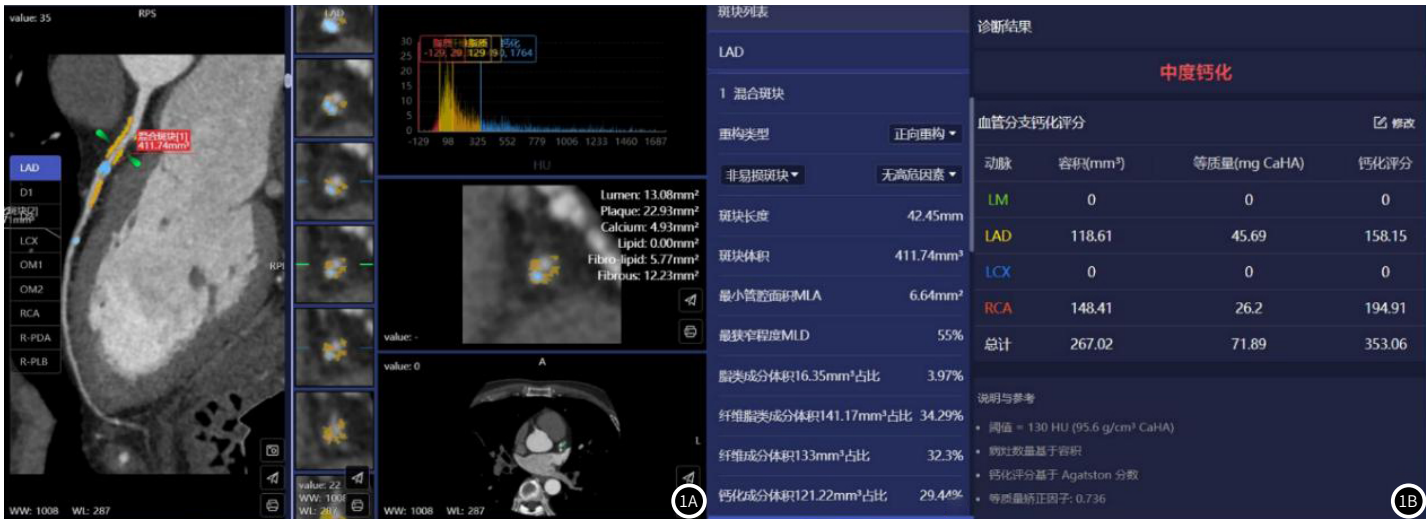


图1A-图1B 男，46岁，冠心病，不稳定型心绞痛。FFR值：0.72；1A：前降支近段斑块，中度狭窄，人工智能（AI）斑块特征定量指标测量；1B：AI冠脉钙化积分计算结果。

2.2 单一指标及联合指标对临界病变缺血性狭窄的诊断效能 重构指数ROC曲线下面积无统计学意义。斑块定量指标联合CACS 诊断临界病变缺血性狭窄的效能显著高于其单独使用($P<0.05$)， 主要在于诊断灵敏度的提高(91.67%)，同时保证了较好的特异度

(81.82%)(表2、图2)。DeLong法比较ROC曲线下面积的差异时， 单一指标间无统计学差异($P>0.05$)，而单一指标与联合指标间均有统计学差异($P<0.05$)。

表2 斑块定量指标联合CACS及其单独使用 对临界病变缺血性狭窄的诊断效能分析

测量指标	阈值	灵敏度	特异度	AUC	P值
TPV	106.09	66.67	75.76	0.668	0.0355
TPB	0.56	62.50	81.82	0.742	0.0004
MLA	3.3	70.83	72.73	0.720	0.0016
RI	-	-	-	0.645	0.0648
CACS	192.32	70.83	93.94	0.793	0.0001
TPV+TPB+MLA+CACS	-	91.67	81.82	0.924	<0.0001

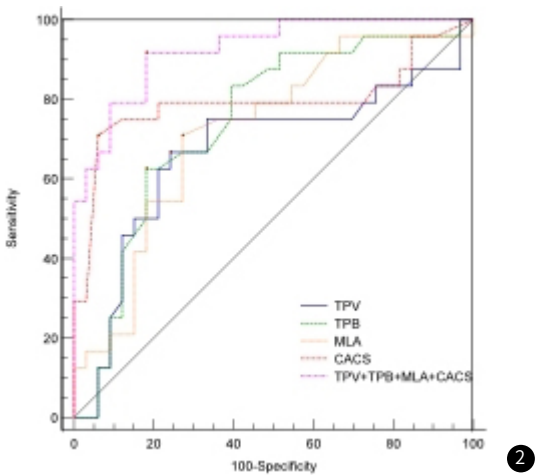


图2 单一指标及联合指标诊断临界病变缺血性狭窄的ROC曲线。

3 讨 论

本研究以在CAG基础上经导管测量的FFR为金标准，探究 CACS联合斑块特征定量指标提升CCTA对冠脉临界病变缺血性狭窄 的诊断效能。本研究结果显示，缺血组CACS较非缺血组高，并且 CACS是心肌缺血的独立影响因素 ($OR=1.014$; $P=0.002$)。这与既往 的一些国内外研究结果类似^[5,7]。冠脉粥样硬化主要涉及脂质积聚 和钙沉积,作为冠状动脉定量分析的常用指标之一的钙化积分，能 早期发现冠脉硬化情况，CACS越高的患者冠脉的弹性越差^[8]， 意味着更高的心血管风险，可用其预测主要的心血管不良事件^[9]。冠

状动脉钙化积分升高会影响血管重构，增加血管阻力，降低血管 顺应性，从而限制心肌供血，是冠心病预后不良的危险因素^[10]。 因此可以认为冠状动脉的钙化积分越高，冠状动脉弹性越差、顺 应性下降，冠状动脉扩张受限从而导致冠脉血流动力学异常。

本研究还发现较非缺血组，缺血组TPV、TPB更大，这与多项 研究结果一致^[4,11-12]。斑块体积、斑块负荷是由斑块内成分不断沉 积后所导致，通过不断网罗血管内流经斑块的血液中的血小板和 纤维蛋白原而使得斑块内沉积物不断增多、体积增大，但在显微

镜下可观察到其相互间缺乏紧密连接,存在着较大的空隙,通常在血液剪切力作用下容易发生破裂,导致组织因子释放,并启动内源性凝血途径,产生大量微血栓,堵塞冠脉远端管腔,诱发心肌缺血^[13-14]。而缺血组的MLA较非缺血组小,这与侯佳蒙等^[15]研究结果一致。MLA是CT血管造影横断面显影的关键指标,可反映斑块堵塞管腔程度^[16]。在冠心病的病情发展过程中,粥样斑块不断聚集增大且稳定性不断下降,斑块的增大及稳定性的下降能够进一步影响心肌血流、引起心肌缺血。本研究结果显示斑块的PL、CPV、CPR、NCPV、NCPR、EI在缺血组和非缺血组间差异无统计学意义,这与既往的一些研究^[17-18]结果显示斑块长度、成分与缺血之间无相关性结果相符。

本研究在评估相关单一指标及联合指标对临界病变缺血性狭窄的诊断效能中显示,与TPV(0.668)、TPB(0.742)、MLA(0.720)和CACS(0.793)相比TPV+TPB+MAL+CACS的联合应用的AUC(0.924)最大,联合指标诊断心肌缺血的效能显著高于其单独使用,主要在于诊断灵敏度(91.67%)的提高,同时保证了较好的特异度(81.82%)。随着计算机算力的提升,AI技术被广泛应用于临床,近些年发展起来的基于深度学习的卷积神经网络算法的人工智能(AI)辅助诊断系统可以利用CCTA数据短时间内完成这些指标的测量,为医生节省大量时间的同时并避免低年资医生因临床经验 and 水平的限制而对冠状动脉粥样斑块的主观评判不当,可重复性好^[19-20]。为临床工作提供了一种简便可行的提示冠脉临界病变缺血性狭窄的无创评估方法。

综上所述,冠脉钙化积分和斑块定量指标中的斑块总体积、斑块总负荷、最小管腔面积是冠脉临界病变缺血性狭窄的主要影响因素,而CACS是其独立影响因素;冠脉钙化积分联合斑块定量指标的应用可以显著提升CCTA检查对临界病变缺血性狭窄的诊断效能。本研究纳入的样本量较少,且为回顾性研究,研究结果可能存在一定的偏移,在后续的研究中加大样本量并进行前瞻性的研究。

参考文献

- [1] 庞智英, 杨飞, 苏亚英, 等. 冠状动脉CT血管成像联合基于CT的血流储备分数预测阻塞性冠心病主要不良心脏事件的价值[J]. 实用医学杂志, 2021, 37(20): 2675-2680.
- [2] Nørgaard BL, Gaur S, Fairbairn TA, et al. Prognostic value of coronary computed tomography angiographic derived fractional flow reserve: a systematic review and meta-analysis[J]. Heart, 2022, 108(3): 194-202.
- [3] 周学儒, 黄文亮, 丁琦峰. 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.
- [4] 王静, 文娣娣, 薛瑞佳, 等. 基于冠状动脉CT血管成像的影像特征分析对诊断缺血性狭窄的价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(4): 398-404.
- [5] 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.

- [6] 《中国冠状动脉血流储备分数测定技术临床路径专家共识》专家组, 中国冠状动脉血流储备分数测定技术临床路径专家共识[J]. 中国介入心脏病学杂志 2019, 27(3): 121-133.
- [7] Nørgaard BL, Mortensen MB, Parner E, et al. Clinical outcomes following real-world computed tomography angiography-derived fractional flow reserve testing in chronic coronary syndrome patients with calcification[J]. Eur Heart J, 2021, 22(10): 1182-1189.
- [8] 杨喆, 叶刚, 王高生. CCTA与ICA评估冠心病患者冠状动脉斑块特征及其与心肌缺血性损伤的相关性[J]. 西部医学, 2023, 35(7): 1083-1088.
- [9] Biavati F, Saba L, Boussoussou M, et al. Coronary artery calcium score predicts major adverse cardiovascular events in stable chest pain[J]. Radiology, 2024, 310(3): e231557.
- [10] 朱楠, 刘亚, 蒋双燕, 等. 第2代追踪冻结技术下冠状动脉钙化积分、CAD-RADS评分及CT血流储备分数的相关性分析[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2023, 21(5): 503-507.
- [11] Sun JT, Sheng XC, Feng Q, et al. Pericoronary fat attenuation index is associated with vulnerable plaque components and local immune-inflammatory activation in patients with non-ST elevation acute coronary syndrome[J]. J Am Heart Assoc, 2022, 11(2): e022879.
- [12] 王静, 薛瑞佳, 任子龙, 等. 冠状动脉CT血管成像多参数联合评估缺血性狭窄的价值[J]. 实用放射学杂志, 2022, 38(8): 1259-1263, 1267.
- [13] Yuan M, Wu H, Li R, et al. The value of quantified plaque analysis by dual-source coronary CT angiography to detect vulnerable plaques: a comparison study with intravascular ultrasound[J]. Quant Imaging Med Surg, 2020, 10(3): 668-677.
- [14] Lee SE, Sung JM, Rizvi A, et al. Quantification of coronary atherosclerosis in the assessment of coronary artery disease[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2018, 11(6): e007562.
- [15] 侯佳蒙, 马雪妍, 张永高, 等. HIV感染患者冠状动脉斑块特征定量参数、高危斑块形态特征与CT-FFR的相关性研究[J]. 临床放射学杂志, 2024, 43(4): 561-566.
- [16] Lee SE, Chang HJ, Sung JM, et al. Effects of statins on coronary atherosclerotic plaques: the PARADIGM study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11(5): 1475-1484.
- [17] Langenbach MC, Langenbach IL, Foldyna B, et al. Advanced CT measures of coronary artery disease with intermediate stenosis in patients with severe aortic valve stenosis[J]. Eur Radiol, 2024, 34(8): 4897-4908.
- [18] 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.
- [19] Lin A, Manral N, McElhinney P, et al. Deep learning-enabled coronary CT angiography for plaque and stenosis quantification and cardiac risk prediction: an international multicentre study[J]. Lancet Digit Health, 2022, 4(4): e256-e265.
- [20] Ihdahid AR, Lan NSR, Williams M, et al. Evaluation of an artificial intelligence coronary artery calcium scoring model from computed tomography[J]. Eur Radiol, 2023, 33(1): 321-329.

(收稿日期: 2024-12-05)

(校对编辑: 姚丽娜、韩敏求)