

综 述

负荷CT心肌灌注应用于冠状动脉微循环障碍评价的研究进展

李 婧¹ 刘挨师^{2,*}1.内蒙古医科大学附属医院影像诊断科
(内蒙古 呼和浩特 010050)2.内蒙古医科大学附属医院影像诊断科
(内蒙古 呼和浩特 010050)

【摘要】冠心病是目前发病率相对较高的疾病类型，对患者后续的生存质量以及生活效果，有着较为明显的危害和影响，其中冠状动脉病变是否引起心肌功能性缺血有重要的临床指导意义，其中冠状动脉微循环障碍在临床中普遍存在但却常常被忽略，其在冠心病发病、治疗及预后中起着至关重要的作用，需要引起关注，在现阶段临床工作中急需在微循环病变诊断方面提供精准可靠的方法，通过负荷CT心肌灌注可以发现微循环病变，对临床治疗措施及干预方法有重要的指导意义。综述负荷CT心肌灌注应用于冠状动脉微循环障碍评价的研究进展。

【关键词】双能量；CT灌注；冠心病；微循环

【中图分类号】R541.4

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.07.058

Research Progress on the Application of Stress CT Myocardial Perfusion in the Evaluation of Coronary Microcirculation Disorders

LI Jing¹, LIU Ai-shi^{2,*}

1.Inner Mongolia Medical University, Inner Mongolia Hohhot 010050, China

2.Imaging diagnosis in the Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Duanke, Inner Mongolia Hohhot 010050, China

ABSTRACT

Coronary heart disease is the type of disease with a relatively high incidence, On the subsequent quality of life and life effect of patients, Has a more obvious harm and influence, Among them, whether coronary artery lesions cause functional myocardial ischemia has important clinical guidance, Among them, coronary artery microcirculation disorder is common but often ignored in the clinic, It plays a crucial role in the pathogenesis, treatment and prognosis of coronary heart disease, Need to cause attention, In the current clinical work, it is urgent to provide accurate and reliable methods in the diagnosis of microcirculation lesions, Microcirculatory lesions can be detected by loading CT of myocardial perfusion, It has important guiding significance for clinical treatment measures and intervention methods. Review the progress of load CT myocardial perfusion in the evaluation of coronary microcirculation disorders.

Keywords: Dual Energy; CT Perfusion; Coronary Heart Disease (CHD); Microcirculation

冠状动脉粥样硬化性心脏病作为目前发病率相对较高的疾病类型，主要是指心脏营养物质血管出现严重的粥样硬化或痉挛，导致冠状动脉出现堵塞或者狭窄的问题，这种问题的产生会形成血栓的情况，造成血管的闭塞问题，最终引发心肌缺血、缺氧等具有严重风险的症状现象。据《中国心血管病报告2018》，我国心血管病患者率及死亡率不断攀升，其中农村地区冠心病死亡率上升趋势明显^[1]。冠心病对患者危害性极大，减轻患者伤害并改善预后关键在于尽快实现心肌再灌注，但是心外膜大血管重建后，部分病人并未真正实现组织水平上的心肌再灌注，这时冠状动脉微循环障碍可能是罪魁祸首，而且越来越多的证据表明，几种形式的心血管疾病中心脏损伤的最初部位在微循环，局部心肌灌注或微血管通透性的早期异常可能先于阻塞性血管疾病的发展，并可能随着疾病的发展而进展，它可以检测具有心血管危险因素患者的临界或早期疾病，以及疾病进展和更晚期疾病患者的侧支血管功能^[2]，因此，微循环的评估在心脏病的各个阶段都是有用的，需要我们高度重视。

1 冠状动脉微循环概述及临床常见表现

冠状动脉循环系统由左右冠状动脉及其分支以及冠状动脉微循环系统共同组成，冠状动脉微循环系统由冠状动脉分支且直径<150μm的微血管组成，分为微动脉、毛细血管和微静脉，但是冠状动脉造影 (invasive coronary angiography, ICA) 成像不能直接显像^[3]。冠状动脉微循环结构较为丰富，对心肌血流灌注情况有着明显的危害和影响，也会导致代谢问题的不断产生，心肌灌注由心外膜血管和下游微循环的动态和整体变化密切调节。当正常心肌的需氧量增加时，微循环中的自动调节机制会降低小动脉的阻力，从而有效增加心肌血流量，保证心肌血流量在相对恒定状态。

冠心病的产生与心肌梗死有着密切的关联性，微血管阻力的不断增加，会对冠状动脉的血流阻力造成严重的影响，并引发心绞痛、缺血性心电图偏移和心肌灌注缺陷，并导致心外膜冠状动脉通畅患者的左心室功能障碍。在冠心病产生后，会导致管腔出现严重的闭塞或者狭窄的情况，在这样的情况下，必须采取治疗以诱导再灌注。然而，缺血再灌注会对微循环造成一定程度的损伤，包括碎片的微栓子化、内皮完整性受损以及随后通透性增加和水肿形成等，最终导致无复流的毛细血管结构损伤、微血管阻塞。因此，冠状动脉微循环是心脏保护的有效靶点。2013年欧洲心脏病学会 (European Society of Cardiology, ESC) 发布的稳定性冠状动脉疾病 (stable coronary artery disease, SCAD) 管理指南中指出^[4]，微血管功能障碍是SCAD生理机制之一，是导致冠心病产生的重要因素，因此需要在临床治疗中加以重视。

冠状动脉微循环障碍患者可以同时合并阻塞性冠状动脉疾病，在我们临床工作中，即使冠心病患者心外膜血管经过血运重建狭窄解除后，但心绞痛症状仍然存在，这就提示病变不止在大血管，需要关注是否有微血管病变同时存在，这在临床中广泛存在却最容易被忽略；当然不合并阻塞性冠状动脉疾病也不少见，常见原因有肥胖、高血压、高脂血症、糖尿病、心脏X综合征等，其中心脏X综合征是指具有：包括心绞痛症状，运动

【第一作者】李 婧，女，住院医师，主要研究方向：心血管影像诊断。E-mail: 1091174224@qq.com

【通讯作者】刘挨师，男，教授，主要研究方向：心胸影像诊断。Email: liuaishi@sina.com

试验ST段压低及冠状动脉造影阴性三联征,其重要特征是冠状动脉血流储备受限^[5],有部分学者研究了高血压、肥厚型心肌病和糖尿病患者的微血管情况,发现上述因素与冠状动脉微循环密切相关^[6-7];另外Bajaj等研究肥胖与冠状动脉微循环障碍之间的相关性,结果显示BMI是微循环病变严重程度的一个危险因素^[8]。冠状动脉相关危险因素在引起冠状动脉大血管发生病变的同时会损害血管内皮功能,破坏小血管结构及功能。有研究阐述,只有病变血管导致心肌缺血的情况下采取血运重建才能有效治疗疾病,通常未诱发心肌缺血现象不建议选取介入干预的措施,首选疗法是药物治疗^[9-10]。因此,确定病变血管狭窄程度及微循环障碍是否引发心肌缺血,在临床干预措施中及其关键。

2 冠状动脉微循环的检测方法

微循环障碍通常是由功能异常引起的,而不一定是结构异常,或者是两种机制的结合。因此,即使有一种技术可以清楚地显示人体冠状动脉微循环的解剖结构,它仍然是一个不完整的评估,况且要想直接观察微血管异常仍然是不可能的,不管原因是结构性的还是功能性的,最终都要评估其功能性改变。微循环同心外膜大血管一样都会导致冠状动脉血流量(coronary blood flow, CBF)和冠状动脉血流储备(coronary flow reserve, CFR)降低,CFR是指冠状动脉最大扩张时的CBF,在没有心外膜管腔堵塞问题产生的情况下,CFR数值的降低,也就表明微血管出现较为严重的障碍问题,但是当两者都存在堵塞问题的情况,要区分两者比较困难。

目前,指南推荐的评估冠状动脉微血管功能的非侵入性方法包括有核素心肌灌注显像(myocardial perfusion imaging, MPI)、心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)、经胸超声心动图^[10]。(1)MPI是通过量化静态和药物诱导的最大充血期间的心肌血流量来无创评估心肌血流量,可以无创性发现冠状动脉微循环障碍,并评估局部的微血管功能,尤其正电子发射型计算机断层显像(positron emission computed tomography, PET)准确性及灵敏度高,但是有放射性损伤,且费用较高,在临床中难以广泛应用^[11-12]。(2)CMR通过观察钆造影剂在心肌内分布情况,从而对心肌血流和微血管堵塞的情况进行判断,从多个参数、方位对数值进行观察,并且加强空间分辨率的情况下,保证无创效果。但是其扫描时间长,对于冠状动脉重度狭窄患者往往病情严重,常常难以耐受^[13-14]。(3)超声心动图操作简单方便,但是诊断性能有限,在这样的情况下对造影技术进行利用,能够更好的保证造影的质量,经外周静脉注入观察心腔充盈情况,造影剂散射后回声增强,可以观察心肌运动幅度,并且测量收缩舒张功能,从而推测相应节段供血冠状动脉的病变程度及心肌功能^[15]。尽管其低成本、无辐射、容易获得,但是此技术空间分辨率较低,易受检查者的主观性影响。其他还有有创性ICA通过测量心肌显影密度分级等数据,根据探测所需的时间来量化造影剂的灌注速度,其造影后可在术中即刻评价,分析易行直观,但是该项操作有创,有相应的并发症,并且准确性也会受到心率等因素的影响,无法准确量化血液流动^[16]。另外冠状动脉微循环功能障碍导致特有心电活动,心电图主要是针对冠状动脉微循环障碍的情况进行判断,无创、经济且安全,便于临床应用,但是其特异性差,需综合分析患者病史作出诊断。

3 CT心肌灌注

随着CT技术的发展,现如今CT扫描技术检查时间短,空间分辨率高,价格相对较低,而且可以根据相关参数进行定性定量分析,诊断准确性较高,最重要的是可以结合冠状动脉CT血管造影(coronary computed tomography angiography, CCTA)进行一站式检查,一次检查可以同时得到形态学与功能学信息,为临床治疗提供更加全面、精确的信息,且减少了电离辐射及造影剂使用。CT评价心功能已经进入了一个新的阶段,下面将主要介绍CT心肌灌注显像在微循环功能方面的应用。

3.1 影像技术 相对于16层CT, 64层CT其机架扫描速度达到约

0.35 s,探测器宽度达到约4cm,获得了质的飞跃,使得CCTA实现真正意义的临床实践。发展到后来的宽体探测器(256或320排),实现了在一次机架旋转中完成全心脏覆盖^[17]。128层双源CT时间分辨力与采集速度空前提高,在心动周期内对心脏各层面图像进行扫描^[18]。192层双源CT可提供更进一步的时间分辨力与扫描速度,并且急速扫描范围较广,能够更好的保证扫描的效果,对后续工作的开展提供良好的数据参考^[19]。双源CT(dual energy CT, DECT)拥有一对相互独立的互成90°或95°的球管-探测器系统,可同时执行不同的能量扫描(高keV、低keV),不同物质根据其线性衰减系数在不同的能量水平上具有独特的衰减分布,当暴露于低能和高能X射线束时,DECT可以利用数学算法来检查组织,并且对传统技术的影响有着明显改善效果^[20]。通过DECT将碘浓度分布差异准确显示,通过组织内的碘的定量分布计算,从而客观反应心肌灌注情况。

心肌灌注是通过血管扩张和微血管对心肌血容量的代偿性适应来维持的,供应心肌的血流流经心外膜冠状动脉,经过数次分支后进入冠状动脉毛细血管网,对维持心肌正常结构、功能及代谢具有重要作用,照此原理,如果心肌缺血或者梗死后,碘对比剂的摄取减低,在影像学上表现为灌注缺损,从而推断心肌活性。

CT心肌灌注(CT perfusion, CTP)显像有静息和负荷两种方式。如果冠状动脉没有达到一定的狭窄程度,静息CTP可能显示心肌血流无明显异常;而负荷时,由于狭窄冠状动脉CFR减低,调节心肌血流能力受限,表现为病变血管相对供应心肌区域显像剂分布稀疏或缺损。在静息扫描中需要对CCTA进行使用,对阻塞性冠心病进行排除,避免不必要的检查。但是其对比剂会干扰负荷扫描时心肌灌注的显示,而先进行负荷扫描,则可以避免这种干扰,显示更加准确,对临床有更高的参考价值^[21]。目前临床上多采用药物负荷,其中腺苷通过与冠状动脉平滑肌细胞上的A₂受体结合来使血管舒张,且腺苷半衰期短(<10 s)、在给药时直接从体内清除,不良反应较轻微,在临床中应用广泛。但是在使用中一定要注意腺苷有一定的禁忌证:高度房室传导阻滞、哮喘、窦性心动过缓、系统性低血压、严重的颈动脉狭窄^[22]。使用腺苷等负荷药物会引起反射性心率加快,心率过快会影响CCTA图像质量,难以准确评估病变血管严重程度,可以通过服用β受体阻滞剂来降低心率。负荷心肌灌注在注射腺苷后进行CT动态连续扫描,根据CT衰减与碘浓度创建时间-密度曲线,得到包含心肌血流量(myocardial blood flow, MBF)、心肌血容量(myocardial blood volume, MBV)、达峰时间(time to peak, TTP)、组织通过时间(tissues transit time, TTT)等参数^[23]。在评价心肌灌注时,MBF直接反应心肌灌注情况,其中相对MBF灌注参数更不易受个体变异、扫描方案等因素的影响,更能客观评估心肌缺血状况^[24-25]。负荷CT心肌灌注进行定性、半定量及定量测量分析,评估整个心脏功能学改变,明确冠状动脉潜在的功能信息,发现早期心肌缺血,提高检查敏感性与准确性,为临床实践提供正确指导。有学者将心脏MRI作为参考研究动态CT心肌灌注诊断效能,发现所获得的MBF能够准确地检测出微循环病变,证实MBF在诊断方面优于其他定量参数和视觉评估^[26]。

3.2 临床实践 心肌梗死后,微血管损伤与患者临床表现,长期恢复和预后不良相关,冠状动脉微循环侧支血管多存在于心内膜区域,形成了交通动脉,梗死血管再通后,有侧支循环供血的梗死区域,病人心功能显著改善,在患有稳定型冠心病的患者中,即使存在严重狭窄冠心病病变,相对稳定的冠状动脉小动脉血管扩张能力以及侧支血流的发展也可以防止应激诱导的心肌缺血的表现,也会在支架植入和冠状动脉搭桥手术之后,由于潜在的微血管功能障碍,心绞痛症状仍可能持续,微循环在心肌损伤愈合整个过程中都起着关键作用,对微循环功能的状态进行评价,以此来对临床治疗以及后续干预进行指导,减少影响因素的产生^[27]。冠状动脉微循环导致心肌组织代偿能力下降,通过代偿能力的下降来间接反映微循环。

冠心病患者往往在发生冠状动脉痉挛同时存在微血管痉挛,从临床角度来看,微血管功能损害问题的出现,会对心肌血管重建的效果造成严重的影响、限制,从目前的实际情况来看,大约

有30%的患者在经过治疗后,还会出现心绞痛的情况^[28];心外膜血管再通后,微血栓被冲入冠状动脉微循环,引起物理性阻塞、血管收缩、炎症等,最终导致心肌微梗塞,微血栓由血小板、纤维蛋白、包括胆固醇晶体在内的动脉粥样硬化物质和透明质酸组成,微血栓与其附近的典型微浸润相关,引发明显的炎症反应^[29];部分患者在心肌梗死再灌注后,中性粒细胞浸润和氧自由基产生等因素相互作用,造成心肌微血管功能障碍,灌注之后梗死动脉的残余狭窄程度、血管栓塞、损伤的数量不断加重,这些问题都是影响灌注水平的主要因素^[30]。

负荷CT心肌灌注可以获得整个心脏功能学信息,所得相关定量参数在一定程度上能够对病症问题进行详细的反应,也能反映微循环功能障碍的后果,一项回顾性研究证明CT心肌灌注可以提供有关冠状动脉微血管功能的信息^[31],在患有多支血管疾病的冠心病患者中,需要结合CCTA来明确识别微循环病变的血流限制效应可能仍然有困难,CCTA主要反映心外膜冠状动脉的形态学改变,通过CCTA可以克服这种限制,CCTA能无创的评估冠状动脉狭窄程度,检测冠状动脉粥样硬化斑块性质,具有极高的阴性预测值和灵敏度、较高的阳性预测值和诊断准确度^[32],将CCTA与CT心肌灌注相结合进行一站式检查,可以进一步为临床实践及预后干预提供更准确的指导。

4 展望与不足

在目前治疗工作开展的期间内,患者在进行诊断性冠状动脉造影术后,没有明确显示存在阻塞性冠状动脉病变,多数问题都与微循环功能有密切关联性。此外,冠状动脉微血管功能受损与糖尿病、高血压性心脏病等疾病密切相关。在没有冠状动脉狭窄的情况下,有心肌缺血迹象和症状的患者应评估有无微血管功能障碍。尽管现阶段各项技术不够成熟,没有明确的规范 and 标准,对于参考数值没有明确的参考标准,尤其是在患者进行治疗的期间内,临床工作者对于负荷所出现的风险而有所担忧,导致实施相对受限,但应该看到,CT心肌灌注对于检测冠状动脉微循环病变具有极大的突破;而且评估是否存在冠状动脉微循环障碍以及是否导致心肌缺血,对临床诊断及治疗至关重要,在今后的发展中,将形态学与功能学进行结合,是今后心血管疾病影响检查技术的主要方向,能够更好的保证疾病影响治疗的效果。因此,CCTA与CT心肌灌注检查技术一站式评估冠状动脉微循环病变,为冠心病的精准治疗提供更加有效、充分的证据。

参考文献

- [1]胡盛寿,杨跃进,郑哲,等.《中国心血管病报告2018》概要[J].中国循环杂志,2019,034(3):209-220.
- [2]Brainin P,Frestad D,Prescott E. The prognostic value of coronary endothelial and microvascular dysfunction in subjects with normal or non-obstructive coronary artery disease:A systematic review and meta-analysis[J]. Int J Cardiol,2018,254:1-9. PMID: 29407076.
- [3]郭渝成.冠脉微循环冠心病[J].中国微循环,2009,13(6):457-460.
- [4]Task Force Members,Montalescot G,Sechtem U,et al.2013 ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease:the Task Force on the management of stable coronary artery disease of the European Society of Cardiology [published correction appears in Eur Heart J.2014 Sep 1;35(33):2260-1][J].Eur Heart J,2013,34(38):2949-3003. PMID: 23996286.
- [5]Hausenloy DJ,Chilian W,Crea F,et al.The coronary circulation in acute myocardial ischaemia/reperfusion injury:a target for cardioprotection[J]. Cardiovasc Res,2019,115(7):1143-1155. PMID: 30428011.
- [6]Halligan WT,Morris PB,Schoepf UJ,et al.Transient Ischemic Dilation of the Left Ventricle on SPECT:Correlation with Findings at Coronary CT Angiography[J]. J Nucl Med,2014,55(6):917-922. PMID: 24762624.
- [7]Bravo PE,Tahari A,Pozios I,et al.Apparent left ventricular cavity dilatation during PET/CT in hypertrophic cardiomyopathy:Clinical predictors and potential mechanisms[J]. J Nucl Cardiol,2016,23(6):1304-1314. PMID: 25989730.
- [8]Bajaj NS,Osborne MT,Gupta A,et al.Coronary Microvascular Dysfunction and Cardiovascular Risk in Obese Patients[J]. J Am Coll Cardiol,2018,72(7):707-717. PMID: 30092946.
- [9]IbanezB,JamesS,AgewallS,et al.2017 ESC Guidelines for the management of acute myocardial infarction in patients presenting with ST-segment elevation:The Task Force for the management of acute myocardial infarction in patients presenting with ST-segment elevation of the

- European Society of Cardiology (ESC)[J].Eur Heart J,2018,39(2):119-177. PMID: 28886621.
- [10]Knuuti J,Wijns W,Saraste A,et al.2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes [published correction appears in Eur Heart J. 2020 Nov 21;41(44):4242][J].Eur Heart J,2020,41(3):407-477. PMID: 31837136.
- [11]Feher A,Sinusas AJ.Quantitative Assessment of Coronary Microvascular Function:Dynamic Single-Photon Emission Computed Tomography,Positron Emission Tomography,Ultrasound,Computed Tomography,and Magnetic Resonance Imaging[J].Circ Cardiovasc Imaging,2017,10(8):e006427. PMID: 28794138.
- [12]中华医学会核医学分会,中华医学会心血管病学分会.核素心肌显像临床应用指南(2018)[J].中华心血管病杂志,2019,47(7):519-527.
- [13]Yang MX,Xu HY,Zhang L,et al.Myocardial perfusion assessment in the infarct core and penumbra zones in an in-vivo porcine model of the acute,sub-acute,and chronic infarction.Eur Radiol[J],2021,31(5):2798-2808. PMID: 33156386.
- [14]李忠超,何燕.MRI与二维超声心动图评价冠心病心功能及其与NYHA分级的关系[J].中国CT和MRI杂志,2021,19(3):4.
- [15]闫媛媛,丁玫,田园,等.实时心肌超声造影评价冠心病人心肌缺血的临床价值[J].中西医结合心脑血管病杂志,2017,15(14):1693-1696.
- [16]Sucato V,Galassi AR,Novo S,et al.Correlation between longitudinal strain analysis and coronary microvascular dysfunction in patients with heart failure with preserved ejection fraction[J].Microcirculation,2020,27(3):e12605. PMID: 31889374.
- [17]Lewis MA,Pascoal A,Keovil SF,et al.Selecting a CT scanner for cardiac imaging:the heart of the matter[J].Br J Radiol,2016,89(1065):20160376. PMID: 27302494
- [18]Neefjes LA,Rossi A,Genders TS,et al.Diagnostic accuracy of 128-slice dual-source CT coronary angiography:a randomized comparison of different acquisition protocols[J].Eur Radiol,2013,23(3):614-622. PMID: 23052644.
- [19]Chen Y,Jin Z.Currents and Prospects of the Clinical Applications of the Third-generation Dual-source CT[J].Zhongguo Yi Xue Ke Xue Yuan Xue Bao,2017,39(1):1-3. PMID: 28270275.
- [20]Forghani R,De Man B,Gupta R.Dual-Energy Computed Tomography:Physical Principles,Approaches to Scanning,Usage,and Implementation:Part 1[J]. Neuroimaging Clin N Am,2017,27(3):371-384. PMID: 28711199
- [21]Patel AR,Bamberg F,Branch K,et al.Society of cardiovascular computed tomography expert consensus document on myocardial computed tomography perfusion imaging[J].J Cardiovasc Comput Tomogr,2020,14(1):87-100. PMID: 32122795.
- [22]Kurata A,Mochizuki T,Koyama Y,et al.Myocardial perfusion imaging using adenosine triphosphate stress multi-slice spiral computed tomography:alternative to stress myocardial perfusion scintigraphy[J]. Circ J,2005,69(5):550-557. PMID: 15849441.
- [23]Gaur S,Achenbach S,Leipsic J,et al.Rationale and design of the HeartFlowNXT (HeartFlow analysis of coronary blood flow using CT angiography:NeXt sSteps) study[J].J Cardiovasc Comput Tomogr,2013,7(5):279-288. PMID: 24268114.
- [24]Wichmann JL,Meinel FG,Schoepf UJ,et al.Semiautomated Global Quantification of Left Ventricular Myocardial Perfusion at Stress Dynamic CT::Diagnostic Accuracy for Detection of Territorial Myocardial Perfusion Deficits Compared to Visual Assessment[J].Acad Radiol,2016,23(4):429-437. PMID: 26853969.
- [25]佚名.负荷动态CT心肌灌注成像在冠心病患者诊治中的应用[J].中国CT和MRI杂志,2020(6):70-72.
- [26]Yu M,Chen X,Dai X,et al.The Value of Low-Dose Dynamic Myocardial Perfusion CT for Accurate Evaluation of Microvascular Obstruction in Patients With Acute Myocardial Infarction[J].AJR Am J Roentgenol,2019,213(4):798-806. PMID: 31166762.
- [27]Hausenloy DJ,Chilian W,Crea F,et al.The coronary circulation in acute myocardial ischaemia/reperfusion injury:a target for cardioprotection[J]. Cardiovasc Res,2019,115(7):1143-1155. PMID: 30428011.
- [28]Niccoli G,Montone RA,Lanza GA,et al.Angina after percutaneous coronary intervention:The need for precision medicine[J].Int J Cardiol,2017,248:14-19. PMID: 28807510.
- [29]Heusch G,Skyschally A,Kleinbongard P.Coronary microembolization and microvascular dysfunction[J]. Int J Cardiol,2018,258:17-23. PMID: 29429637.
- [30]Zuchi C,Tritto I,Carluccio E,et al.Role of endothelial dysfunction in heart failure[J].Heart Fail Rev,2020,25(1):21-30. PMID: 31686283.
- [31]Bechsgaard DF,Gustafsson I,Michelsen MM,et al.Evaluation of computed tomography myocardial perfusion in women with angina and no obstructive coronary artery disease[J].Int J Cardiovasc Imaging,2020,36(2):367-382. PMID: 31676944.
- [32]中华医学会放射学分会心胸学组,《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排CT临床应用指南写作专家组.心脏冠状动脉CT血管成像技术规范化应用中国指南[J].中华放射学杂志,2017,51(10):732-743.

(收稿日期:2022-02-25)

(校对编辑:谢婷婷)