

综 述

基于CCTA相关技术对急性冠脉综合征检查的研究进展*

唐异蓓¹ 赵 磊² 刘挨师^{2,*}

1.内蒙古自治区内蒙古医科大学研究生院
院(内蒙古 呼和浩特 010000)

2.内蒙古医科大学附属医院放射科
(内蒙古 呼和浩特 010000)

【摘要】急性冠脉综合征(ACS)是常见的急症，第一时间进行血运重建是挽救心肌梗死的最好方法。随着精准医疗的发展，及时准确给临床医生提供检查报告，为缺血心肌进行准确定位及功能判断成为影像医学的责任。伴随着临床的需求和影像设备的更新，CCTA可以在一次性检查中获得心脏形态和心脏功能，为临床打开了抢救的快速通道，本综述主要讲述了基于CCTA相关技术对急性冠脉综合征提供哪些有用的信息。

【关键词】急性冠脉综合征；血流储备分数；计算流体力学；心肌灌注
【中图分类号】R542.2
【文献标识码】A
【基金项目】内蒙古自治区关键技术攻关项目(2019GG070)
内蒙古自治区自然科学基金项目(2017MS0893)
内蒙古医科大学科技百万工程联合项目(YKD2020KJBW(LH)029)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.02.060

Research Progress of Acute Coronary Syndromes Based on CCTA Related Techniques*

TANG Yi-bei¹, ZHAO Lei², LIU Ai-shi^{2,*}

1. Graduate School of Inner Mongolia Medical University, Hohhot, Inner Mongolia autonomous region 010000, China

2. The Affiliated hospital of Inner Mongolia medical university Radiology department, Hohhot, Inner Mongolia autonomous region 010000, China

ABSTRACT

Acute coronary syndrome (ACS) is a common emergency, the first time to carry out revascularization is the best way to save myocardial infarction. With the development of precision medicine, it has become the responsibility of imaging medicine to provide timely and accurate examination reports to clinicians, and to accurately locate and judge the function of ischemic myocardium. With the clinical demand and the update of imaging equipment, CCTA can obtain the heart shape and function in a one-time examination, which opens a fast channel for clinical rescue. This review mainly describes the useful information for acute coronary syndrome based on CCTA related technologies.

Keywords: Acute Coronary Syndrome; Blood Flow Reserve Fraction; Computational Fluid Dynamics; Myocardial Perfusion

1 引言

随着胸痛中心的建立，“胸痛”成为了急诊科重点关注的症状之一。胸痛中心为突发急性冠脉综合征(acute coronary syndrome ACS)、主动脉夹层、肺动脉栓塞的患者打开绿色通道而建立^[1]。患者应胸部不适前来就医时，临床医生问诊后需结合体格检查、12导联心电图、影像学资料及生化指标(尤其是敏感性肌钙蛋白)等信息，判断患者是否属于急性冠脉综合征。一旦确诊，应根据患者的实际情况，采取溶栓或者血运重建等措施进行治疗^[2-3]。

2 病理生理

据《中国心血管健康与疾病报告2019》^[4]报道，ACS发病率逐年增加，有超过40%的居民是因为严重的心血管事件导致的死亡，目前心血管疾病是我国首位死亡原因。以提倡“防治结合”的理念，降低心血管事件的发病率和提高患者的生存率。该报道指出，近年来有许多非ST段抬高的中、重危ACS患者，因为没有及时得到冠脉造影分析，错过了最佳血运重建治疗手段。所以心脏超声和CCTA成为首当其冲为ACS患者提供临床治疗依据的最佳选择。ACS通常是指不稳定的动脉粥样硬化的斑块发生破裂、脱落，栓塞远端微血管管腔，导致心肌缺血或坏死^[5]。其中，ST段抬高型心肌梗死、非ST段抬高型心肌梗死和不稳定心绞痛是ACS最常见的类型^[2]。有学者^[5]发现不稳定斑块内存在活性的炎性细胞，这些细胞分泌的蛋白水解酶破坏了斑块的薄层纤维帽结构，继而引发斑块局部脱落形成血管栓塞。心电图有利于帮助ACS患者进行初步分类。心电图显示ST段抬高，常见于冠脉的完全阻塞；而心电图显示ST段低平或暂时抬高改变，则提示冠脉不完全阻塞/狭窄。当心电图无法为ACS患者提供更可靠的依据时，需结合急诊影像学检查，尽可能为患者争取更多的抢救时机^[6]。

3 CCTA

CCTA是一项非侵入性冠脉成像检查，众多临床试验已经证实了CCTA可以作为有创性选择性冠脉造影术前的初步筛查，这样有利于促进“精准医疗”理念的推行。CCTA可以观察到阻塞冠脉狭窄的斑块成分和冠脉狭窄的程度。通过斑块成分与冠脉狭窄程度可以间接的反应受累心肌的范围和预测心功能受损程度。为ACS患者的风险分层提供参考依据。学者们将CCTA与心脏超声、心脏磁共振和SPECT心肌灌注检查进行对比，认为这些检查提供的部分参数有同等效益的诊断价值^[3,5]。本综述主要讲述采用CCTA的相关技术，为急性冠脉综合征患者向临床提供哪些有价值的影像资料。

3.1 冠状动脉病变狭窄程度评价 临床医生首要关注的是ACS患者的冠脉闭塞程度，CCTA对冠脉狭窄程度的评估是目前公认的诊断或排除冠心病的检查工具，评估冠脉狭窄程度也是间接评估心功能的血流储备的方法之一^[7]。CCTA扫描结合后处理成像技术能够快速准确提供冠脉狭窄程度等相关信息。临床常在最大密度投影重建图(MIP图像)进行测量冠脉的狭窄程度：即

冠脉的狭窄程度 = 1 -
$$\frac{\text{最狭窄点管腔的直径}(d1)}{[\text{近端正常冠脉直径}(d2) + \text{同等距离远端正常冠脉直径}(d3)]/2}$$

【第一作者】唐异蓓，女，在读硕士，主要研究方向：放射医学-心血管方向。E-mail: 303844255@qq.com

【通讯作者】刘挨师，男，主任医师，主要研究方向：医学影像与核医学。E-mail: liuایش@sina.com

该测量方法的准确程度存在一定局限性,即测量远端正常血管直径的区域不应出现较大的血管分支结构。所以需要计算出较为准确的冠脉狭窄程度,应在较大的血管分支前端获得正常血管的直径,才能够满足计算条件。由于冠脉血管形态及结构存在较大的差异,并且血管狭窄位置的不一致性,运用这种传统的测量模式得到的管腔狭窄程度往往会被高估。高估的结果会使部分患者接受没有必要的有创造影术(Invasive Coronary Angiography ICA)治疗^[6-7]。为了提高血管狭窄程度的准确性,全宽半高宽测量估计值与CT数字校准直径技术被学者们相应提出^[7]。

3.1.1 全宽半高宽测定估计值(Full Width at Half Maximum Determination DFWHM) Contijoch等人^[7]模拟冠脉的狭窄,运用点扩散函数计算血管的全宽半高宽(FWHM)估计值,获得的血管直径是接近于真实大血管的直径(适用于直径大于2.0mm的血管)。该函数主要用于测量血管腔内最大体素值(intraluminal maximum voxel value IMVV)和血管全宽半高宽最大估计值(the full width half maximum FWHM)^[7]。该函数并不适用于直径较小的血管(即直径小于2.0mm的血管),因为心脏的生理运动,会使较小的冠脉丢失部分体素值,最终会高估远端小血管的直径,从而低估狭窄程度^[7]。

3.1.2 CT数字校准直径(CT-number-Calibrated Diameter Dc)技术 学者陈^[8]基于冠脉远端血管的特点(即血管直径<2.0mm),设计了CT数字校准直径(CT-number-Calibrated Diameter Dc)技术来弥补小血管测量不精准的缺陷,这是一种需要先校准冠脉运动方式后才能使用CT值校准直径技术。这种校准技术通过获得IMVV可以直接计算出血管直径,且有较高的精确性(直径狭窄程度误差率≈5.6%)。该学者运用人体模型模仿了冠状动脉狭窄进行验证,证实了CT数字校准直径技术能够准确的计算出整个血管节段的真实直径^[8]。

3.2 冠状动脉高危斑块评价 冠状动脉高危斑块通常用于形容容易导致ACS发生的易损斑块,这类斑块内的活性炎症因子,是导致动脉粥样硬化斑块的破裂、脱落的主要原因^[9]。临床常采用CCTA扫描评价导致冠脉狭窄的斑块。通常影像报告里用钙化斑块、非钙化斑块和混合斑块对斑块成分进行描述^[10]。并总结出易损斑块在CT的特点,即阳性重塑、低密度斑块、餐巾环征、斑点钙化等。这类易损斑块富含脂质成分,所以CT值一般不超过60HU。CCTA上可以较准确的勾画出动脉粥样硬化里的低衰减斑块的大致形态,且有较高的敏感性(73%)和特异性(71%)。但是不能区分低衰减斑块内的具体成分,这是由于CT空间分辨率较低和斑块成分交叉存在所导致的。有学者结合病理结果统计,发现导致冠脉阻塞的斑块破裂与低衰减斑块(<30HU)密切相关(占总因素的80%)。这为提高CCTA、评估高危斑块的能力进行了补充。结合冠状动脉高危斑块的特征与冠脉管腔狭窄程度,可以提高CT对心肌缺血预测的能力(灵敏度81%)^[11-12]。

3.3 冠状动脉血流动力学评价

3.3.1 管腔内梯度衰减(translumenal attenuation gradient TAG) 管腔内梯度衰减是指CCTA扫描后处理图像上,测量冠脉开口至冠脉远端(冠脉管腔横截面面积不低于2mm²)之间CT值衰减系数。首先需获得每隔5mm冠脉管腔CT值,然后计算出每隔10mm的CT值回归系数。TAG可以用于反映冠脉内血流动力学的改变,这也可以辅助性评估心肌缺血^[13]。TAG可以辅助评估钙化斑块所致的冠脉狭窄,即钙化评分越高,管腔内CT衰减密度越明显。TAG用于冠脉狭窄的诊断有较高的准确性(准确性≈92%)但多项实验证明TAG并没有更好的提高CCTA对冠脉狭窄诊断的准确性。通常正常管腔或轻-中度狭窄的管腔TAG呈正向衰减;当冠脉完全闭塞或亚闭塞状态时,冠脉远端出现了造影剂,冠脉管腔密度呈反向梯度衰减,这间接表现出冠脉远端侧支循环的良好建立。反向衰减也可以用于冠脉支架安置术后,如果出现反向梯度衰减,则提示支架内血栓形成。TAG的测量也是受到CCTA扫描周期、扫描期象及扫描次数影响,研究表明一次性全覆盖心脏周期扫描测量的准确度明显大于多个周期扫描^[13-14]。

3.3.2 FFRct(Fraction Flow Reserve coronary flow reserve) 血流储备分数(FFR)是用于衡量因冠脉狭窄导致远端心肌供血不足,相应心功能受损的功能评估指标^[15]。通常采用有创冠脉造影可以获得FFR准确参考值,即在冠脉最大充血期,将狭窄血管远端的

血管压力与狭窄血管近端压力进行比较,获得FFR的比值。FFR已经是临床医学公认的心肌功能评估的金标准。但是有创冠脉造影(ICA Invasive Coronary angiography)是一种侵入性手术,仅用于测量患者的冠脉狭窄程度和血流储备分数可能会引起不必要的血管损伤及其他并发症^[15]。介于ICA的原理,学者们根据血流动力学特点相应开发出了FFRct和计算流体力学(CFD)^[16]。

FFRct是把CCTA与FFR相结合,开发的一款无创检测FFR的模拟软件。由于FFRct是采用的模拟建模方式,想要获得准确的FFR参考值,首要条件是冠状动脉处于较好的充血状态^[16]。当需要通过FFRct为患者评估心功能时,需注射腺苷使冠脉达到最佳充血状态后,在进行CCTA扫描,获得准确的FFR参考值。但是注射腺苷后心肌处于应激状态,不利于患者立即进行血运重建治疗,因此部分患者会丢失最佳心肌抢救时机,所以需要根据患者情况而决定是否进行此项检查^[17]。其次,FFRct采用的是一种稳定性流动模拟计算方式,而不是脉动式模拟计算方式,这往往导致了FFRct获得的结果被低估(准确率≈81.2%)^[16]。

为了克服FFRct提供的参考值被低估这一问题,根据FFRct的缺点进行改良,CFD应运而生。CFD运用计算机能够自动识别CCTA扫描图中的冠脉中心线和血管边界,且该方法不需要冠脉达到最大充血期,就能获得精确的冠状动脉流场和压力场值。这是结合冠脉压力和血流流速信息后,计算获得压降系数(CDP)的新技术。压降系数是指跨狭窄压降与远端压降的比值。与FFR相比,CDP能够直接量化狭窄段的血流动力学^[16,18]。CDP通常在舒张期(R-R间期的60-70%)或收缩期(R-R间期的40-50%)采集CCTA图像重建获得,该学者^[18]在少量患者上验证了CFD与有创FFR呈线性相关(准确率≈90.9%);而另一学者^[19]使用基于CFD的FFRct与有创FFR做了比较,证明了CFD能快速的诊断出冠脉特异性缺血性病变,具有较高的准确性及特异性,并且还在实验中证明≤799钙化分数的患者几乎不会影响CFD的FFRct的诊断结果;而钙化分数>799的患者人数过少,无法证明高钙化分数不会影响CFD的准确性。CCTA提供心脏冠脉狭窄的解剖模型与CFD结合进行分析,填补了解剖学上冠脉梗阻与血流动力学之间的空白^[16,18]。通过模拟计算得到的冠脉管腔狭窄程度与计算流体力学获得的血流储备分数更接近有创冠脉造影的值,减少了不必要的有创冠脉造影^[19]。

3.4 脂肪衰减指数(FAI Fat attenuation index) 血管病理性狭窄通常见于血管附壁血栓的形成,而附壁血栓的不稳定性,随时会给患者带来生命危险。寻找不稳定附壁斑块成为了学者们重要的探索点。学者余^[20]在研究中发现,血管周围脂肪衰减指数(FAI)是一种有潜力的判断冠脉特异性缺血的新指标。这是不稳定的附壁血栓释放活化炎症因子,使相邻血管周围脂肪水肿。血管壁因血液湍流或管壁内压力不均,血管内膜受损,凝血因子聚集形成附壁血栓。附壁血栓形成初期,由于受损血管内壁还未彻底纤维化或钙化时,受损的血管壁周围因炎症因子和水分出现过度聚集,管壁渗透压增高,炎症成分向周围脂肪层渗出,导致周围脂肪密度增高。在CCTA多曲面重建图上,可以观察到冠脉血流受限的病变区域比非血流受限病变区域周围脂肪密度增高,并且炎性水肿累及外周脂肪范围的径向距离与靶血管的直径几乎一致^[20]。该学者还发现当FFR<0.8时,测得附壁血栓周围的脂肪的FAI值会增高。尽管FAI有很高的敏感性(敏感性≈80%),但是特异性很低(特异性≈56%)^[20]。FAI联合直径狭窄(DS)和总斑块体积(TPV)进行综合评估,可以提高评估不稳定斑块的特异性(FAI+DS+TPV组合评估,敏感性≈85.9%,特异性≈67.2)。FAI+DS+TPV这种联合评估方式,是一种省时且安全的用于筛查缺血性冠状动脉狭窄的潜力性组合参数。这项联合评估方法,其性能与基于CFD的FFRct基本一致^[20]。

3.5 左室运动与功能 负性重构也是造成冠脉狭窄的常见因素。当主要供血冠脉狭窄超过50%或其他冠脉狭窄超过70%时,心肌血流量降低,最终因心肌缺血发展到失代偿性心功能收缩障碍,即室壁运动能力减退或消失,甚至左室射血功能也下降。室壁节段性的运动异常与存活心肌的功能状况息息相关^[21]。静息状态下,正常的心肌收缩运动移动度不应低于6mm,收缩期室壁增厚率应大于40%^[22]。室壁增厚率通常定义为收缩末期的室壁厚度减去舒张末期室壁厚度获得的相对的增量百分比^[23]。

(下转第 187 页)

胶质母细胞瘤的较特征性改变,病灶边界较平扫显示不清,邻近未见脑膜尾征^[7],而脑膜瘤增强后多呈较均匀强化,边界较平扫显示更清晰,邻近硬脑膜呈“脑膜尾征”。本例经免疫组化确诊为胶质母细胞瘤(WHO IV级),显微结构显示坏死灶周围瘤细胞呈栅栏状排列(图6),笔者考虑此病理特点正是病灶增强后呈“栅栏样”改变的基础;Ki-67(90%+),Ki-67是反映肿瘤细胞增殖能力的指标,阳性率越高,预示恶性程度越高,预后越差,本例显示90%阳性,说明肿瘤细胞增殖能力强,灌注成像CBF显示病灶壁呈斑片状高灌注(图5),病灶恶性程度很高,但MR平扫为何显示为形态规则、边界清晰、无瘤周水肿等良性病变特点,笔者查阅相关资料,未得到较合理解释,是否与患者年轻、基因分型有关,具体原因还有待进一步研究^[8-9]。

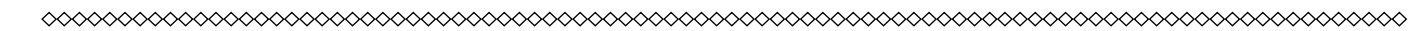
总结本例误诊经验,笔者认为对于MR平扫倾向于颅内脑外肿瘤,尤其考虑脑膜瘤者,增强后仍应仔细分析图像特点,如发现部分征象不相符,还应想到具有不典型表现得胶质母细胞瘤,有利于术前制定更精确的手术方案和患者预后评估^[10]。

参考文献

- [1] 史云峰,钱丽霞,郭晓媛.MRI直方图鉴别胶质母细胞瘤和原发性中枢神经系统淋巴瘤的价值[J].医学影像学杂志,2020,30(7):1133-1137.
- [2] 中国医师协会神经外科医师分会脑胶质瘤专业委员会.胶质瘤多学科诊治(MDT)中国专家共识[J].中华神经外科杂志,2018,34(2):113-118.
- [3] 曾盛熊,王成伟,彭少华.颅内不典型多形性胶质母细胞瘤1例[J].中国CT和MRI杂志,2020,18(9):175-176.
- [4] 夏海红,陈涛,柳钦,等.左侧小脑半球不典型胶质母细胞瘤一例[J].中华神经外科杂志,2022,38(1):96-98.
- [5] Kim Y Z, Kim C Y, Lim J, et al. The Korean Society for Neuro-Oncology (KSNO) Guideline for Glioblastomas: Version, 2018. 01[J]. Brain tumor research and treatment, 2019, 7(1): 1-9.
- [6] 曹英,肖华亮,杨新,等.上皮样胶质母细胞瘤临床病理观察[J].诊断病理学杂志,2018,25(06):19-24.
- [7] 陈绪珠,王军梅,马军.胶质母细胞瘤局部脑膜受侵的临床和MRI特点[J].医学影像学杂志,2018,28(10):1589-1592.
- [8] 王敏红,冯湛.瘤周水肿常规MRI纹理分析鉴别脑胶质母细胞瘤和单发转移瘤的价值[J].中华放射学杂志,2018,52(10):756-760.
- [9] Elizabeth R, Gerstner. Dose diversification in newly diagnosed glioblastoma[J]. Neuro-oncology, 2019, 21(6): 701-702.
- [10] 李莹莹,王晓晨,刘元波,季楠,汪晓鹏,孙胜军.上皮样胶质母细胞瘤的MRI表现[J].实用放射学杂志,2021,37(4):519-522.

(收稿日期: 2021-08-28)

(校对编辑: 姚丽娜)



(上接第 179 页)

学者Kasumi^[24]在动物实验中发现,短暂性的心肌缺血不会产生明显的室壁收缩障碍,这可能是由于心脏血供储备可以满足心肌代偿性收缩;而冠脉严重狭窄时,心肌血供明显下降,缺血的心室肌壁收缩程度较正常心室肌壁收缩程度明显减低。严重的冠脉狭窄所支配的远端心肌壁,室壁运动能力明显减缓;当发展到心肌细胞坏死时,心肌节段性运动消失或心肌壁出现反常运动。左室收缩能力受损时,射血分数相应减低,当左室射血分数(LVEF)<50%时,就已经向临床发出心功能受损的警告了。目前心脏磁共振可以作为评估室壁运动能力的金标准的同时计算出左室射血分数。学者们以心脏磁共振作为参考,探索心脏CT评估室壁运动的能力。实验发现心脏CT在评估室壁运动与心脏磁共振检测室壁运动能力具有一致性^[21,24]。这为心脏CT在运动功能学上的欠缺做了补充。

3.5.1 心脏节段分型 室壁异常运动是心肌缺血的高度敏感标志^[24]。通常临床采用美国心脏协会(AHA)提供的心脏17节段模型来衡量节段性室壁收缩情况。但是,近期一位韩国学者^[23]参考AHA提供的心脏17节段模型对韩国正常人群的心脏节段进行测量后,发现该参考标准并不适用于亚裔人群。并参考美国心脏协会心脏节段分型标准绘制了适用于韩国人群的正常的心肌壁的节段厚度模型。根据这位学者的调研,可以总结出地域海拔及生活习惯不同都会影响心肌的生理结构产生适应性变化。这位学者的研究说明,根据当地居民的实际情况对参考模型进行调整,才有利于临床直观的判断室壁运动是否发生异常,即心肌壁在收缩期的正常增厚能力和心肌节段长度正常伸缩的能力。

3.5.2 左室射血分数(Left ventricular ejection fraction LVEF) 左室射血分数(LVEF)作为心力衰竭的重要指征之一,与心脏磁共振相比临床更多采用心脏超声测量LVEF。心脏超声是一种动态观察心脏的检查,其测量方法的准确性依赖于医师的主观判断^[21]。心脏CT采用门控技术在每次心动周期的10%处,进行回顾性图像重建,生成可自由操作的多平面重建(MPR)图像。自动计算左心室血容量,并在收缩末期(ES)(即RR间期的25-30%)和舒张末期(ED)(即RR间期的95-0%)分别确定为最小和最大左心室直径,计算出左心室射血分数(LVEF)。由于MDCT的时间分辨率较低,获得的收缩末期心室容积容易被高估,所以CT对射血分数值评估较超声检测低^[21]。

4 小 结

综上所述,在突发的急性冠脉综合征影像医生应该结合实际情况选择最快捷的检查方式为临床提供有价值的信息,抢救更多的存活心肌。CCTA能够多模式为心脏提供解剖和功能信息,结合各项检查参数,能够有效提高心脏检查的准确性和灵敏性。这种多参数检查可以更好的为临床提供效用价值。

参考文献

- [1] 胡大一,丁荣晶.“胸痛中心”建设中国专家共识[J].中华危重症医学杂志,2011,4(6):381-393.
- [2] 费英,赵海.急性冠脉综合征概念更新带来诊疗新变化——傅国胜教授解读急性冠脉综合征急诊快速诊治指南(2019)[J].中国医药科学,2019,9(22):1-3.
- [3] Battie J C, Kirsch J et al. ACR appropriateness criteria® chest pain-possible acute coronary syndrome[J]. J Am Coll Radiol, 2020, 17: S55-S69.
- [4] 中国心血管健康与疾病报告2019[J].心肺血管病杂志,2020,39(9):1145-1156.
- [5] 刘斌.炎症微环境的免疫调控与血管重构分子机制的研究[D].山东大学,2020.
- [6] Dehmer G J, Badhwar V, Bermudez E A et al. 2020 AHA/ACC key data elements and definitions for coronary revascularization: a report of the american college of cardiology/american heart association task force on clinical data standards(writing committee to develop clinical data standards for coronary revascularization)[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 75: 1975-2088.
- [7] Contijoch F, Stayman J W, McVeigh E R. The impact of small motion on the visualization of coronary vessels and lesions in cardiac CT: A simulation study[J]. Med Phys, 2017, 44: 3512-3524.
- [8] Chen Z N, Contijoch F, Schluchter A et al. Precise measurement of coronary stenosis diameter with CCTA using CT number calibration[J]. Med Phys, 2019, 46: 5514-5527.
- [9] Yu M M, Dai X, Deng J H et al. Diagnostic performance of perivascular fat attenuation index to predict hemodynamic significance of coronary stenosis: a preliminary coronary computed tomography angiography study[J]. Eur Radiol, 2020, 30: 673-681.
- [10] Nadjiri J, Hausleiter, Jähnichen C, et al. Incremental prognostic value of quantitative plaque assessment in coronary CT angiography during 5 years of follow up[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2016, 10: 97-104.
- [11] Puchner S B, Liu T, Mayrhofer T, et al. High-risk plaque detected on coronary CT angiography predicts acute coronary syndromes independent of significant stenosis in acute chest pain: results from the ROMICAT-II trial[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 64: 684-92.
- [12] Maurovich H P, Ferencik M, Voros S, et al. Comprehensive plaque assessment by coronary CT angiography[J]. Nat Rev Cardiol, 2014, 11: 390-402.
- [13] Steigner M L, Mitsouras D, Whitmore A G, Otero H J, et al. Iodine-based contrast opacification gradients in normal coronary arteries imaged with prospectively ECG-gated single heart beat 320-detector row computed tomography[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2010, 3(2): 179-186.
- [14] 张板平,李丽,王敏.冠状动脉CTA腔内衰减梯度的应用进展[J].医学影像学杂志,2019,29(11):1966-1968.
- [15] Yu M M, Lu Z G, Shen C X et al. The best predictor of ischemic coronary stenosis: subtended myocardial volume, machine learning-based FFR, or high-risk plaque features?[J]. Eur Radiol, 2019, 29: 3647-3657. 1
- [16] Taylor C A, Fonte T A, Min Jame K. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: scientific basis. 2013, 61(22): 2233-41.
- [17] Abbasa S, Blanke P, Maroules Christopher D, et al. SCCT guidelines for the performance and acquisition of coronary computed tomographic angiography: A report of the society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee: Endorsed by the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI), 2016, 10(6): 435-449.
- [18] Xie X Z, Zheng M W, Wen D D et al. A new CFD based non-invasive method for functional diagnosis of coronary stenosis[J]. Biomed Eng Online, 2018, 17: 36.
- [19] Tang C X, Liu C Y, Lu M J, et al. CT FFR for ischemia-specific CAD with a new computational fluid dynamics algorithm: a chinese multicenter study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13: 980-990.
- [20] Yu M M, Dai X, Deng J H, et al. Diagnostic performance of perivascular fat attenuation index to predict hemodynamic significance of coronary stenosis: a preliminary coronary computed tomography angiography study. [J]. Eur Radiol, 2020, 30: 673-681.
- [21] Ko S M, Kim Y J, Park J H et al. Assessment of left ventricular ejection fraction and regional wall motion with 64-slice multidetector CT: a comparison with two-dimensional transthoracic echocardiography[J]. Br J Radiol, 2010, 83: 28-34.
- [22] 卜玉莲,张欢,潘自来,等.能谱CT在局部心肌活性检测中的临床应用探讨[J].CT理论与应用研究,2018,27(5):593-599.
- [23] Cho Y H, Kang J W, Choi S H et al. Reference parameters for left ventricular wall thickness, thickening, and motion in stress myocardial perfusion CT: Global and regional assessment[J]. Clin Imaging, 2019, 56: 81-87.
- [24] Masuda K, Asanuma T, Taniguchi A et al. Assessment of dyssynchronous wall motion during acute myocardial ischemia using velocity vector imaging[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2008, 1: 210-20.

(收稿日期: 2021-07-18)

(校对编辑: 姚丽娜)