

CT 及其衍生技术评价冠状动脉钙化病变的研究进展

纪欣强¹ 单冬凯² 王凡^{1,3} 赵润涛¹ 杨俊杰^{1,2}

(1. 解放军医学院, 北京 100853; 2. 中国人民解放军总医院第六医学中心心血管医学部, 北京 100048; 3. 解放军总医院第二医学中心心血管内科 国家老年疾病临床医学研究中心, 北京 100853)

【摘要】 冠状动脉钙化病变是引起冠状动脉 CT 血管成像在诊断冠状动脉疾病时的诊断准确性和特异性大幅降低的重要原因。然而, 冠状动脉 CT 血管成像评价冠状动脉疾病患者冠状动脉钙化病变时, 影像采集设备、重建后处理及模拟计算技术的选择和应用目前尚缺乏规范和指导。现对 CT 及其衍生技术用于冠状动脉疾病患者冠状动脉严重钙化病变诊断时的原理、选择以及临床应用做一综述。

【关键词】 计算机断层扫描; 冠状动脉疾病; 冠状动脉钙化病变; 无创影像诊断

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.03.009

Evaluation of Coronary Artery Calcification Using CT and Its Derivative Techniques

Ji Xinqiang¹, Shan Dongkai², Wang Fan^{1,3}, Zhao Runtao¹, Yang Junjie^{1,2}

(1. Medical School of Chinese PLA, Beijing 100853, China; 2. Senior Department of Cardiology, The Sixth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100048, China; 3. Department of Cardiology, The Second Medical Center & National Clinical Research Center for Geriatric Diseases, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

【Abstract】 Coronary artery calcification significantly diminishes the diagnostic accuracy and specificity of coronary CT angiography (CCTA) in the diagnosis of coronary artery disease (CAD). However, the current state of the field lacks standardization and guidance regarding the selection and application of CCTA equipment, reconstruction, and simulation computing in the evaluation of coronary artery calcification in patients with CAD. This article provides an academic review of the principle, selection, and clinical application of these diagnostic methods in patients with coronary artery calcification who are diagnosed with CAD.

【Keywords】 Computer tomography; Coronary artery disease; Coronary artery calcification; Noninvasive imaging diagnosis

对于怀疑稳定型冠状动脉疾病 (coronary artery disease, CAD) 的患者, 目前的国际指南推荐无创检测作为一线诊断手段^[1]。其中冠状动脉 CT 血管成像 (coronary CT angiography, CCTA) 设备易开展、操作简便、准确性高, 已在临床中广泛使用。冠状动脉钙化病变的晕染伪影和部分容积效应可影响管腔边界和内部结构的测量, 导致 CCTA 诊断 CAD 的准确性和特异性大幅降低^[2,3]。在影像采集设备和重建后处理维度上, 双源双能量 CT 成像 (dual-source dual-energy CT imaging, DSCT) 技术利用两种不同的 X 射线谱能量采集两个独立的数据集; 光子计数 CT (photon-counting CT, PCCT) 技术可记录各个光子的相互作用, 并使其转化为能量分辨 CT 技术; 二者及其衍生的重建后处理技术对于冠状动脉严重钙化病变 CAD 的诊断均有

较高价值^[4-5]。在模拟计算技术中, CT 心肌灌注 (CT myocardial perfusion, CTP) 和 CT 血流储备分数 (CT-derived fractional flow reserve, CT-FFR) 是近年来发展迅速的功能学评价手段, 可明显提高 CCTA 诊断效能, 并实现“一站式”检查模式^[6]。CTP 技术可根据血流量的对比变化诊断心肌缺血, 并定量计算心肌血流量 (myocardial blood flow, MBF)^[7]; CT-FFR 技术可在 CCTA 图像基础上计算冠状动脉流体动力学信息, 无需额外的辐射和操作, 易于患者接受和临床推广^[8]。现综述各技术用于冠状动脉严重钙化病变的进展, 讨论比较几种 CCTA 的影像采集设备、重建后处理及模拟计算技术用于冠状动脉严重钙化病变 CAD 患者诊断时的优劣, 并探讨 CCTA 检查手段的选择。

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2021YFC2500505)

通信作者: 杨俊杰, E-mail: fearlessyang@126.com

1 CCTA 的影像采集设备和重建后处理技术

1.1 DSCT 及其重建后处理技术

DSCT 能获取完全同步数据,图像错配率低,CCTA 最前沿成果都是通过最新的 DSCT 获得的^[9]。DSCT 的两个 X 射线球管可提供 80 kV 的最大差值范围,这种改进意味着更准确的双能信息和更精细的密度识别^[10]。多项研究及实践已证明以 DSCT 为基础的重建后处理技术可提高诊断准确性和图像质量,其中虚拟单能量图像(virtual monoenergetic images, VMI)、虚拟平扫(virtual non-contrast, VNC)重建和心肌灌注碘图在 CAD 诊断中的应用具有较好的效果。VMI 可设定一个理想的能量水平完成图像后处理,并通过优化噪声比来提高图像质量,有助于减少造影剂剂量、辐射剂量和检查时间^[11]。VMI 可调整 DSCT 获得图像的能量水平,减少晕染伪影和部分容积效应^[12]。既往研究^[13]表明,高能量水平 VMI(≥ 110 keV)可显著减少钙化晕染伪影,提高图像质量和诊断效能。VNC 通过一次 DSCT 图像采集获得造影前和动脉期的数据,从而减低患者接受的辐射剂量。VNC 有助于区分造影剂和钙化斑块,有研究^[14]已证实其在冠状动脉钙化评分中的应用是可行的。DSCT 获取的心肌灌注碘图联合 CCTA 诊断 CAD,较心脏磁共振成像、单光子计算机断层扫描和有创导管血管造影具有更好的诊断准确性^[15-16]。

1.2 PCCT 及其重建后处理技术

与传统 DSCT 相比,PCCT 能计算 X 射线光子的总数及其分布,从而提高对比噪声比和能量分辨率。PCCT 半导体材料的使用以及探测器单元分类的精确选择可使 PCCT 获得更高空间分辨率的图像,有助于精确评估严重钙化冠状动脉管腔的通畅性^[17]。获取同样的图像质量时,PCCT 可显著减少辐射剂量,PCCT 在颅骨中应用时辐射剂量可减少 85%^[18],造影剂用量亦明显减少。最重要的是,在 DSCT 的基础上,PCCT 在每个层面均可实现多能量数据(“颜色信息”)的扫描,这种多层面且标准一致的数据更加有助于 CAD 的诊断。Rajendran 等^[19]研究证实,“颜色信息”可解决冠状动脉钙化的晕染伪影这一难题。一项针对 PCCT 评估冠状动脉严重钙化病变患者冠状动脉狭窄情况的研究^[20]发现,与 DSCT 完成的 CCTA 相比,只有 PCCT 完成的 CCTA 可评估严重钙化的冠状动脉管腔狭窄(环状钙化斑块,狭窄面积 75%),识别管腔未完全堵塞,表明 PCCT 完成的 CCTA 具有评估冠状动脉严重钙化斑块的潜力,但该研究是利用人体模型进行的,临床研究尚在进行中。基于既往一种去除钙化的重建后处理方法^[21],Allmendinger 等^[22]在 PCCT 完

成的 CCTA 中原创了一种新型去除钙化的重建后处理技术(PureLumen),可在人体模型中有效减少钙化病变引起的钙化晕染伪影,而且在运动状态下仍能保持诊断性能,目前正在临床进一步证实。Eberhard 等^[23]应用基于 PCCT 进行 VMI 重建评价冠状动脉钙化积分,发现其诊断准确性较好。

1.3 CCTA 重建后处理技术

目前针对冠状动脉钙化病变,一些研究正在发掘 CCTA 重建后处理技术,用于弱化、去除钙化对冠状动脉评估的影响。Mannil 等^[21]在评价颈动脉 CT 血管成像中引入了一种可去除钙化影响的重建后处理方法,验证了这种方法的可行性。Li 等^[24]在 CCTA 中使用了一种去除钙化晕染伪影的重建后处理算法,与传统的重建方法相比,新的算法可有效减少晕染伪影,从而提高 CCTA 评估钙化严重病变 CAD 的诊断准确性。Okutsu 等^[25]通过 CCTA 获取的钙化斑块最大 CT 密度估算钙化厚度,与光学相干断层扫描测量钙化的传统方法相比,该方法能更准确地评价钙化斑块的范围。Otgonbaatar 等^[26]的研究发现,在脑血管 CT 血管成像中,深度学习重建方法可提高 CT 血管成像的图像质量,但目前尚未应用于 CCTA。

2 CCTA 的模拟计算技术

2.1 CTP

CTP 技术可分为动态 CTP 及静态 CTP 技术,二者在 CAD 的诊断、危险分层、治疗和预测预后中均具有较好的应用价值。其中,动态 CTP 可通过使用心肌负荷药物提高心肌做功,根据 CTP 下心肌不同节段的造影剂密度模拟计算 MBF 的相对值和绝对值,量化评估相应区域的血供状态,从而间接反映相应冠状动脉的功能状态,可避免冠状动脉支架及钙化对管腔结构判断的影响,既往研究已证实了 CTP 在评估冠状动脉支架内再狭窄中具有较好的诊断效能^[27],而其在严重钙化病变 CAD 患者中的应用也具有临床意义^[28]。在一项前瞻性研究^[29]中,由 MBF 计算出的负荷心肌血流量比值在评价阻塞性 CAD 患者的冠状动脉病变时具有很好的准确性。El Mahdiui 等^[30]前瞻性纳入 131 例有稳定胸痛症状的患者,均行 CTP 及 CCTA 检查,根据 Agatston 评分(Agatston score, AS)分组进行多变量分析。结果发现,大多数冠状动脉严重钙化病变患者在 CTP 检查中发现药物负荷状态下心肌缺血的证据,进一步分析显示 AS 是 CTP 药物负荷状态下心肌缺血的唯一独立预测指标。CORE320 前瞻性研究^[31-33]以 AS 分层(1~300 及 ≥ 400),计算 ROC 曲线下面积以评估 CTP 的诊断性能。结果显示,在疑似 CAD 或已诊断 CAD 患者中,合并冠状动脉严重钙化病变($AS \geq$

400)时,联合 CCTA 和 CTP 比单纯使用 CCTA 或 CTP 有更好的诊断准确性,该研究推荐在冠状动脉严重钙化病变的患者中联合 CCTA 和 CTP 评估 CAD。

2.2 CT-FFR

CT-FFR 将血液视为牛顿流体,通过心肌体积和心肌血流间的关系模型、血管粗细和血流阻力间的关系模型,模拟计算出最大充血状态下冠状动脉的局部压力^[34]。Zhao 等^[35]前瞻性纳入了来自 CT-FFR CHINA 研究中的 305 例患者(348 支靶血管),分别在患者和血管水平上,分析各 AS 组的 CT-FFR 对血流动力学显著病变的诊断效能。结果显示,CT-FFR 测量值误差与 AS 呈正相关,但冠状动脉钙化病变对于 CT-FFR 的诊断效能无显著影响。Di Jiang 等^[36]回顾性纳入 442 例患者的 544 支血管,发现无论随着钙化弧、钙化重构指数还是 AS 的升高,CT-FFR 的诊断性能几乎不受影响,且均高于 CCTA,但当钙化程度超过一定程度时,CT-FFR 的诊断性能出现了一定程度的下降。Mickley 等^[37]前瞻性纳入 FACC 研究中 AS > 399 的 CAD 患者 260 例,在 90 d 的随访中评估了每个患者的 CT-FFR、冠状动脉血运重建和主要不良临床事件之间的联系。结果发现,与最低 CT-FFR 相比,共定位 CT-FFR 可提高诊断的准确性和特异性。术后 90 d 随访 CT-FFR > 0.80 的患者,行冠状动脉血运重建的患者较少,均无主要不良临床事件发生。在 TARGET 研究^[38]中,首次将 CT-FFR 应用于指导 CAD 的临床决策,并对预后进行随访,发现 CT-FFR 的临床应用具有较好的效果及经济学效益。

3 应用局限性

上述几种 CCTA 影像采集设备、重建后处理及模拟计算技术在诊断冠状动脉严重钙化病变的 CAD 时均具有各自的优势,但在临床验证及应用上仍存在许多问题。DSCT 技术的一些缺点限制了其在临床上的使用及推广:DSCT 仪器价格昂贵,成本大约比同等的单能量 CT 高出 25%,其重建后处理系统的成本同样大幅增加;对进行扫描和后处理的医生和技师要求较高,需更系统化的培训和长时间的经验积累才能做到熟练和准确的操作;DSCT 的两个能量数据集有出现错配的可能^[39]。DSCT 技术虽然通过 VMI、VNC 重建后处理可较传统 CCTA 更加准确地评价严重钙化的 CAD,但仍不能完全避免钙化晕染伪影的影响^[13-14];心肌灌注碘图虽可提高心脏 CT 扫描诊断 CAD 的诊断准确性,但目前尚无研究对冠状动脉严重钙化病变诊断效能的影响进行探讨^[15-16]。PCCT 技术虽在 DSCT 技术的基础上可获得空间分辨率更高、密度对比更明显的图像,其重建后处理技术如去除钙化重建

(PureLumen)、VMI 重建亦优于传统能量 CT,但 PCCT 技术图像及后处理数据庞大,而且其临床推广才刚刚开始,许多研究仍停留在实验室阶段,其临床验证及应用尚需进一步探索^[4,20]。在 CORE320 研究^[31-33]中,研究者通过对较大样本量进行了分层分析,最终得出了在冠状动脉严重钙化病变的患者中推荐联合 CCTA 和 CTP 评估 CAD 的结论,但该研究纳入人群并非完全由冠状动脉严重钙化病变人群组成,且并未完全排除支架植入术后的患者。El Mahdiui 等^[30]虽然发现 AS 是负荷 CTP 心肌缺血的唯一独立预测指标,但该研究 CTP 检查采用静态 CTP 的主观评价方法,并未对心肌缺血进行量化评估。CT-FFR CHINA 研究^[35]结果显示冠状动脉钙化病变对于 CT-FFR 的诊断效能无显著影响,但该研究纳入的冠状动脉严重钙化病变患者的比例较少。Di Jiang 等^[36]发现无论随着钙化弧、钙化重构指数还是 AS 的升高,CT-FFR 的诊断性能几乎不受影响,且仍高于 CCTA,但当钙化程度超过一定程度时,CT-FFR 的诊断性能出现了一定程度的下降;该研究还发现,与有创 FFR 对应的 CT-FFR 测量位置并非冠状动脉钙化病变最严重的位置,究竟是管腔最严重钙化处还是管腔最狭窄处引起了血流变化,还需进一步研究。Mickley 等^[37]研究发现与 CT-FFR 相比,共定位 CT-FFR 提高了诊断的准确性和特异性,但未对共定位 CT-FFR 优势是由钙化导致的非特异性缺血引起,还是由冠状动脉钙化晕染伪影造成的进行探讨。

4 讨论与未来展望

冠状动脉钙化病变造成的晕染伪影对 CCTA 冠状动脉解剖学评价的影响很难消除,只有将 CCTA 影像采集设备、重建后处理及模拟计算技术互补、结合才能更准确地评价 CAD 患者的严重钙化病变。在 CCTA 影像采集设备、重建后处理技术方面,目前的临床应用还十分有限,只有硬件、软件设备成本进一步降低,操作更加简化,才能充分发挥这些技术的临床作用,降低严重钙化对 CAD 诊断的影响。在 CCTA 模拟计算技术方面,虽然既往多项研究^[38,40]已证实了 CT-FFR 在 CAD 中评估病变、指导治疗的能力,但其诊断效能与反应局部压力的金标准有创 FFR 尚存在一定差距,故 CT-FFR 需探索冠状动脉钙化的范围和种类对其结果的影响,并探寻最理想的 CT-FFR 测量位置。ADVANCE 研究^[41]和 Yan 等^[42]的研究聚焦于跨病变 CT-FFR 值变化——梯度 CT-FFR (Δ CT-FFR),发现该指标能更准确地反映病变特异性冠状动脉血流压力变化,可一定程度上避免严重钙化病变对局部图像质量造成的影响。然而, Δ CT-FFR 无法反映冠状动脉的全局情况,最近一项研究^[43]引入全局 Δ CT-FFR (global

Δ CT-FFR, Δ CT-FFR) 的概念, 该研究发现在非阻塞性 CAD 的糖尿病患者中, Δ CT-FFR 与 5 年随访的预后相关, 这种改进风险分层的新指标可用于糖尿病患者冠状动脉整体血流动力学评估, 为冠状动脉严重钙化病变 CAD 的诊断提供了新思路。CTP 的优势在于其联合 CCTA 的“一站式检查”不仅可用于阻塞性 CAD 的诊断, 也可同时为 CAD 患者再灌注治疗后微循环功能及远期预后的评估提供思路。然而, 目前针对合并冠状动脉严重钙化病变的 CAD 人群进行的动态 CTP 研究相对有限, 未来需更多针对性研究, 并对其治疗、预后进行进一步探索。

相信随着 DSCT、PCCT 及其重建后处理技术在临床上不断推广, CT-FFR 测量位置和范围更加优化, CTP 获得更广泛的临床验证和普及, 未来 CCTA 在评价 CAD 患者冠状动脉严重钙化病变中一定会有很大突破。

参考文献

- [1] Knuuti J, Wijns W, Saraste A, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes [J]. *Eur Heart J*, 2020, 41 (3): 407-477.
- [2] Yan RT, Miller JM, Rochitte CE, et al. Predictors of inaccurate coronary arterial stenosis assessment by CT angiography [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2013, 6 (9): 963-972.
- [3] Kruk M, Noll D, Achenbach S, et al. Impact of coronary artery calcium characteristics on accuracy of CT angiography [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7 (1): 49-58.
- [4] Dell'Aversana S, Ascione R, de Giorgi M, et al. Dual-energy CT of the heart: a review [J]. *J Imaging*, 2022, 8 (9): 236.
- [5] Flohr T, Petersilka M, Henning A, et al. Photon-counting CT review [J]. *Phys Med*, 2020, 79: 126-136.
- [6] Min JK, Taylor CA, Achenbach S, et al. Noninvasive fractional flow reserve derived from coronary CT angiography: clinical data and scientific principles [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8 (10): 1209-1222.
- [7] Nakamura S, Kitagawa K, Goto Y, et al. Incremental prognostic value of myocardial blood flow quantified with stress dynamic computed tomography perfusion imaging [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12 (7 Pt 2): 1379-1387.
- [8] Rasoul H, Fyyaz S, Noakes D, et al. NHS England-funded CT fractional flow reserve in the era of the ISCHEMIA trial [J]. *Clin Med (Lond)*, 2021, 21 (2): 90-95.
- [9] de Cecco CN, Schoepf UJ, Steinbach L, et al. White paper of the Society of Computed Body Tomography and Magnetic Resonance on dual-energy CT, part 3: vascular, cardiac, pulmonary, and musculoskeletal applications [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2017, 41 (1): 1-7.
- [10] Krauss B, Grant KL, Schmidt BT, et al. The importance of spectral separation: an assessment of dual-energy spectral separation for quantitative ability and dose efficiency [J]. *Invest Radiol*, 2015, 50 (2): 114-118.
- [11] Zeng Y, Geng D, Zhang J. Noise-optimized virtual monoenergetic imaging technology of the third-generation dual-source computed tomography and its clinical applications [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11 (11): 4627-4643.
- [12] de Santis D, Eid M, de Cecco CN, et al. Dual-energy computed tomography in cardiothoracic vascular imaging [J]. *Radiol Clin North Am*, 2018, 56 (4): 521-534.
- [13] Secchi F, de Cecco CN, Spearman JV, et al. Monoenergetic extrapolation of cardiac dual energy CT for artifact reduction [J]. *Acta Radiol*, 2015, 56 (4): 413-418.
- [14] Song I, Yi JG, Park JH, et al. Virtual non-contrast CT using dual-energy spectral CT: feasibility of coronary artery calcium scoring [J]. *Korean J Radiol*, 2016, 17 (3): 321-329.
- [15] Nakahara T, Toyama T, Jinzaki M, et al. Quantitative analysis of iodine image of dual-energy computed tomography at rest: comparison with ^{99m}Tc -tetrofosmin stress-rest single-photon emission computed tomography myocardial perfusion imaging as the reference standard [J]. *J Thorac Imaging*, 2018, 33 (2): 97-104.
- [16] Carrascosa PM, Deviggiano A, Capunay C, et al. Incremental value of myocardial perfusion over coronary angiography by spectral computed tomography in patients with intermediate to high likelihood of coronary artery disease [J]. *Eur J Radiol*, 2015, 84 (4): 637-642.
- [17] Kreisler B. Photon counting detectors: concept, technical challenges, and clinical outlook [J]. *Eur J Radiol*, 2022, 149: 110229.
- [18] Rajendran K, Voss BA, Zhou W, et al. Dose reduction for sinus and temporal bone imaging using photon-counting detector CT with an additional tin filter [J]. *Invest Radiol*, 2020, 55 (2): 91-100.
- [19] Rajendran K, Petersilka M, Henning A, et al. First clinical photon-counting detector CT system: technical evaluation [J]. *Radiology*, 2022, 303 (1): 130-138.
- [20] Koons E, VanMeter P, Rajendran K, et al. Improved quantification of coronary artery luminal stenosis in the presence of heavy calcifications using photon-counting detector CT [J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2022, 12031: 120311A.
- [21] Mannil M, Ramachandran J, Vittoria de Martini I, et al. Modified dual-energy algorithm for calcified plaque removal: evaluation in carotid computed tomography angiography and comparison with digital subtraction angiography [J]. *Invest Radiol*, 2017, 52 (11): 680-685.
- [22] Allmendinger T, Nowak T, Flohr T, et al. Photon-counting detector CT-based vascular calcium removal algorithm: assessment using a cardiac motion phantom [J]. *Invest Radiol*, 2022, 57 (6): 399-405.
- [23] Eberhard M, Mergen V, Higashigaito K, et al. Coronary calcium scoring with first generation dual-source photon-counting CT-first evidence from phantom and in-vivo scans [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11 (9): 1708.
- [24] Li P, Xu L, Yang L, et al. Blooming artifact reduction in coronary artery calcification by a new de-blooming algorithm: initial study [J]. *Sci Rep*, 2018, 8 (1): 6945.
- [25] Okutsu M, Mitomo S, Onishi H, et al. The estimation of coronary artery calcium thickness by computed tomography angiography based on optical coherence tomography measurements [J]. *Heart Vessels*, 2023, 38 (11): 1305-1317.
- [26] Otgonbaatar C, Ryu JK, Kim S, et al. Improvement of depiction of the intracranial arteries on brain CT angiography using deep learning reconstruction [J]. *J Integr Neurosci*, 2021, 20 (4): 967-976.
- [27] 赵润涛, 纪欣强, 刘子暖, 等. 动态 CT 心肌灌注对支架置入术后心肌缺血的诊断价值 [J]. *解放军医学院学报*, 2022, 43 (11): 1138-1145.
- [28] 赵润涛, 王凡, 单冬凯, 等. CT 心肌灌注概述及临床应用进展 [J]. *心血管病学进展*, 2021, 42 (12): 1101-1104.
- [29] Yang J, Dou G, He B, et al. Stress myocardial blood flow ratio by dynamic CT perfusion identifies hemodynamically significant CAD [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13 (4): 966-976.
- [30] El Mahdoui M, Smit JM, van Rosendaal AR, et al. Relationship between coronary artery calcification and myocardial ischemia on computed tomography myocardial perfusion in patients with stable chest pain [J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28 (4): 1707-1714.
- [31] Sharma RK, Arbab-Zadeh A, Kishi S. Incremental diagnostic accuracy of computed tomography myocardial perfusion imaging over coronary angiography

- stratified by pre-test probability of coronary artery disease and severity of coronary artery calcification; the CORE320 study[J]. *Int J Cardiol*, 2015, 201: 570-577.
- [32] George RT, Arbab-Zadeh A, Cerci RJ, et al. Diagnostic performance of combined noninvasive coronary angiography and myocardial perfusion imaging using 320-MDCT; the CT angiography and perfusion methods of the CORE320 multicenter multinational diagnostic study[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2011, 197(4): 829-837.
- [33] Vavere AL, Simon GG, George RT, et al. Diagnostic performance of combined noninvasive coronary angiography and myocardial perfusion imaging using 320 row detector computed tomography; design and implementation of the CORE320 multicenter, multinational diagnostic study[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2011, 5(6): 370-381.
- [34] Tanabe Y, Kurata A, Matsuda T, et al. Computed tomographic evaluation of myocardial ischemia[J]. *Jpn J Radiol*, 2020, 38(5): 411-433.
- [35] Zhao N, Gao Y, Xu B, et al. Effect of coronary calcification severity on measurements and diagnostic performance of CT-FFR with computational fluid dynamics; results from CT-FFR CHINA trial[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 8: 810625.
- [36] Di Jiang M, Zhang XL, Liu H, et al. The effect of coronary calcification on diagnostic performance of machine learning-based CT-FFR: a Chinese multicenter study[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(3): 1482-1493.
- [37] Mickley H, Veien KT, Gerke O, et al. Diagnostic and clinical value of FFR_{CT} in stable chest pain patients with extensive coronary calcification; the FACC study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(6): 1046-1058.
- [38] Yang J, Shan D, Wang X, et al. On-site computed tomography-derived fractional flow reserve to guide management of patients with stable coronary artery disease: the TARGET randomized trial[J]. *Circulation*, 2023, 147(18): 1369-1381.
- [39] Tarkowski P, Czekajka-Chehab E. Dual-energy heart CT: beyond better angiography-review[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(21): 5193.
- [40] Wardziak Ł, Kruk M, Pleban W, et al. Coronary CTA enhanced with CTA based FFR analysis provides higher diagnostic value than invasive coronary angiography in patients with intermediate coronary stenosis[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2019, 13(1): 62-67.
- [41] Takagi H, Leipsic JA, McNamara N, et al. Trans-lesional fractional flow reserve gradient as derived from coronary CT improves patient management; ADVANCE registry[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2022, 16(1): 19-26.
- [42] Yan H, Gao Y, Zhao N, et al. Change in computed tomography-derived fractional flow reserve across the lesion improve the diagnostic performance of functional coronary stenosis[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 8: 788703.
- [43] Liu Z, Ding Y, Dou G, et al. Global trans-lesional computed tomography-derived fractional flow reserve gradient is associated with clinical outcomes in diabetic patients with non-obstructive coronary artery disease[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2023, 22(1): 186.

收稿日期: 2023-08-10

投稿须知

1. 投稿请作者根据系统提示填写完整个人信息(基金项目及编号、单位、地址、邮编、手机号码、E-mail、研究方向等)。
2. 稿件请用 word 格式文件上传,格式参照系统首页 2024 投稿格式示例。
3. 文责自负,编辑部可对文稿作文字修改、删减或退请作者修改。稿件刊登后其版权归《心血管病学进展》编辑部。
4. 收到本刊回执 2 个月后未接到本刊录用通知,则稿件仍在审阅研究中,作者如需另投他刊,请先与本刊联系。请勿一稿多投及多稿一投。
5. 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”等。凡在本刊发表的论文将自然转载其中,如作者有异议,请投稿时声明,否则本刊将视为作者同意。

本刊编辑部