

基于 CCTA 的不同影像学参数在 CAD 患者预后评估中的研究进展

庞智英¹ 杨飞² 苏亚英¹ 宋德领¹ 崔书君²

(1. 河北北方学院研究生院, 河北 张家口 075000; 2. 河北北方学院附属第一医院放射科, 河北 张家口 075000)

【摘要】近年来, 冠状动脉 CT 血管成像已成为诊断冠状动脉疾病最常用的无创影像检查技术。冠状动脉 CT 血管成像通过提供关于冠状动脉斑块成分和形态的详细信息, 可准确地评估冠状动脉斑块负荷和容积指数, 并有效识别高危斑块特征, 从而进一步改善冠状动脉狭窄评估之外的风险分层。此外, 无创 CT 心脏功能学成像的应用可能会进一步改善对未来主要不良心血管事件的风险评估。现就基于冠状动脉 CT 血管成像的不同影像学参数在评估冠状动脉疾病患者预后方面的研究进展做一综述。

【关键词】冠状动脉 CT 血管成像; 斑块负荷; 高危斑块; 容积指数; 心肌 CT 灌注成像; 基于 CT 的血流储备分数

【DOI】10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2021.11.013

Different Imaging Parameters Based on CCTA in Evaluating Prognosis of Patients with CAD

PANG Zhiying¹, YANG Fei², SU Yaying¹, SONG Deling¹, CUI Shujun²

(1. Graduate Faculty, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 2. Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Hebei North University, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

【Abstract】In recent years, coronary artery computed tomography angiography (CCTA) has become the most commonly used non-invasive imaging technique in the diagnosis of coronary artery disease (CAD). By providing detailed information about the composition and morphology of coronary artery plaques, CCTA can accurately evaluate coronary plaque burden and volume index, and effectively identify the characteristics of high-risk plaque, thus further improving the risk stratification beyond the assessment of coronary artery stenosis. In addition, the application of non-invasive computed tomography cardiac functional imaging may further improve the risk assessment of future major adverse cardiovascular events. This article reviews the research progress of different imaging parameters based on CCTA in evaluating the prognosis of patients with CAD.

【Key words】Coronary artery computed tomography angiography; Plaque burden; High-risk plaque; Volume index; CT myocardial perfusion; CT derived fractional flow reserve

近年来冠状动脉 CT 血管成像 (coronary artery computed tomography angiography, CCTA) 已成为诊断冠状动脉疾病 (coronary artery disease, CAD) 最常用的无创影像技术。CCTA 通过提供关于冠状动脉斑块成分和斑块形态的详细信息, 不仅能准确地分析和评估冠状动脉狭窄程度、斑块负荷和容积指数, 还可有效地识别高危斑块, 从而为临床预后提供有价值的信息。心肌 CT 灌注成像 (computed tomography perfusion imaging, CTP) 和基于 CT 的血流储备分数 (CT derived fractional flow reserve, CT-FFR) 的应用能进一步改善对未来主要不良心血管事件 (major adverse cardiovascular events, MACE) 的风险评估^[1-6]。现就 CCTA 斑块特征定量参数、冠状动脉容积指数和

冠状动脉血流动力学参数在 CAD 患者预后评估中的价值进行综述。

1 CCTA 斑块特征定量参数的预测价值

近年来, 随着 CCTA 斑块精确定量分析技术的逐步应用, CCTA 不仅用于评估冠状动脉的狭窄程度, 而且能进一步量化冠状动脉斑块成分和斑块形态 (高危斑块) 等定量参数, 与单独使用临床危险因素相比, 联合临床危险因素和斑块定量分析的 CCTA 多参数预后模型显著地提高了对 CAD 患者 MACE (心脏性死亡、心肌梗死和非计划性血运重建) 的预测能力^[7]。多项验证研究将 CCTA 与超声内镜和有创冠状动脉造影等有创检查手段进行比较, 证实 CCTA 在冠状动脉斑块成像中的关键作用^[8-9]。

基金项目: 张家口市重点研发计划项目 (2021030D)

通信作者: 崔书君, E-mail: hbjkcsj@126.com

1.1 冠状动脉斑块负荷

冠状动脉斑块负荷(某血管的斑块总体积/血管总体积)是 CAD 患者冠状动脉粥样硬化进展和 MACE 的独立预测指标,有助于改善 CAD 的风险分层及指导个体化预防治疗^[10-12]。陆晓晨等^[12]探讨了冠状动脉斑块负荷对急性 ST 段抬高型心肌梗死老年患者预后的预测价值,结果发现,与出院后 1 年内未发生 MACE 的患者相比,发生 MACE 的患者斑块负荷明显升高。研究表明,斑块负荷是急性 ST 段抬高型心肌梗死老年患者 MACE 复发的危险因素。

近年来,很多研究通过 CCTA 的解剖学评分系统来评估斑块负荷以提高 CCTA 对 CAD 预后的预测价值。冠状动脉钙化(coronary artery calcium, CAC)评分是冠状动脉粥样硬化总斑块负荷的替代指标^[13],通常在对斑块预后方面比传统的危险因素^[14]和临床风险预测方案^[15]有更高的增量预测价值。大量研究证明, CAC 评分是无症状的中低危患者 MACE 的可靠预测指标,随着 CAC 评分的增高, MACE 的发生风险也会增加^[14,16-17],有助于心血管疾病患者的风险分层^[16-18]。目前的欧美指南都强调了 CAC 评分在改善无症状患者风险评估中的重要性。2019 年美国心脏病学会/美国心脏协会预防指南建议中等风险($7.5\% \leq 10$ 年心血管疾病风险 $< 20\%$)或处于临界风险($5\% \leq 10$ 年心血管疾病风险 $< 7.5\%$)的特定成年人可进行 CAC 评分测定,从而指导个性化管理决策^[19]。在这些低中风险人群中, CAC 评分可将一部分人的风险等级进行重新划分。因此,2019 年欧洲血脂管理指南提出,在无症状的低风险或中等风险人群中,可采用 CCTA 评估的 CAC 评分作为心血管风险评估的风险修正工具^[20],从而决定是否实施或推迟预防性药物(即他汀类药物和/或阿司匹林)的治疗。最近也有研究证明 CAC 评分对有症状 CAD 患者预后具有良好的预测价值。在一项对丹麦心脏登记中心的 23 759 例有症状 CAD 患者进行 CCTA 检查的队列研究中, Mortensen 等^[11]通过 CAC 评分对 MACE 的风险进行了评估,研究发现 CAC 评分是 MACE 事件和死亡风险的主要预测指标,随着 CAC 评分的增加, MACE 发生的风险也增加。

节段狭窄评分反映了有斑块的冠状动脉节段的数量,并对狭窄的严重程度进行了加权;节段受累评分反映了与狭窄严重程度无关的有斑块的节段的数量;修正的 Duke 预后指数考虑了狭窄的严重程度、斑块分布和斑块位置^[21]。在一项对有症状的 CAD 患者进行为期 25 个月的随访研究^[21]中发现,所有这些评分参数提高了 CAC 评分预测患者发生急性心肌梗死

风险和死亡风险的能力。此外,其他评分参数也被提出,例如基于 CT 的 Leaman 评分(CT-LeSc)^[22-23]和 Leiden 评分^[24],通过评估斑块的位置、成分和血管狭窄程度,更好地对患者进行风险分层。CT-LeSc > 5 分已被证明是非阻塞性 CAD 患者 MACE 的独立预测指标,改善了非阻塞性 CAD 患者的预后分层^[23]。在一项探讨 CT-LeSc 与 CAD 进展关系的随访研究中, Hideo-Kajita 等^[25]发现在由 CT-LeSc 评分确定的高危患者中,在 7 年的随访期后 CT-LeSc 由 14.6 分增加到 16.9 分。这一变化主要是由先前病变节段动脉粥样硬化的进展推动,同时也是由新病变(阻塞性和非钙化病变)的出现及转变导致的。然而,如何通过适当的风险因素管理和药物使用来减缓冠状动脉粥样硬化的进展还需进一步研究。另一项前瞻性多中心研究根据 Leiden 评分评估冠状动脉粥样硬化斑块负荷时,发现随着评分的增加,非阻塞性 CAD 患者发生 MACE 的风险也增加,而且 Leiden 评分 > 12 分的患者与节段受累评分 > 5 分的患者发生 MACE 的风险相当^[24]。

1.2 高危斑块特征

CCTA 除了能有效地评估冠状动脉狭窄程度和斑块负荷外,还可通过分析斑块形态(即高危斑块特征)来改善心血管风险分层,为临床风险和狭窄程度的综合评估提供增量预后价值^[26-27]。目前,正性重构指数(最大血管横截面与近端健康参考横截面面积之比) > 1.1 、低密度斑块(< 30 HU)、餐巾戒指征(斑块中心为富含脂质的低密度坏死区,周围环绕高密度区)和点状钙化(钙化长度 < 3 mm 以及角度 $< 90^\circ$)都被认为是高危斑块的特征^[28-29]。在一项经 CCTA 确诊为非阻塞性 CAD 患者的长期随访研究中, Conte 等^[30]探讨了冠状动脉斑块特征与非阻塞性 CAD 患者 MACE 发生风险的相关性,研究发现在调整了其他临床变量后,冠状动脉正性重构指数 > 1.4 ($HR = 3.31$)、低密度斑块 ($HR = 8.45$)、斑块负荷 > 0.7 ($HR = 5.25$)和餐巾戒指征 ($HR = 12.12$)与发生 MACE 相关,有助于非阻塞性 CAD 患者的风险分层。然而, Senoner 等^[26]的研究数据表明,高危斑块中低密度斑块(< 30 HU)和餐巾戒指征是 MACE 的独立和更特异的预测指标,并且增加了预后价值,而点状钙化和正性重构指数却不能预测 MACE。此外,研究还发现高危斑块标准联合冠状动脉病变报告数据系统(CAD-RADS)及 CAC 评分对 MACE 风险的预测优于 CAD-RADS 联合 CAC 评分或单独使用 CAC 评分。在急性冠状动脉综合征发生前,这类具有高危斑块特征的患者往往会因为无相关临床症状或冠状动脉未出现严重狭窄而错过了最佳的

诊疗时机。因此,尽早识别高危斑块能有效地减少 MACE 的发生。

2 冠状动脉容积指数的预测价值

基于 CCTA 的冠状动脉容积指数(冠状动脉容积与左心室重量之比)是一种新的影像学参数,比狭窄和斑块负荷有更独立的预后价值,最近被认为是弥漫性动脉粥样硬化的潜在指标^[31-32]。Benetos 等^[32]首次证明了低剂量 CCTA 测得的冠状动脉容积指数对斑块负荷和阻塞性 CAD 具有独立的长期预后价值,在平均为期 5.4 年的随访研究中发现,冠状动脉容积指数低($<27.9 \text{ mm}^3/\text{g}$)的患者 MACE 的发生率明显高于冠状动脉容积指数高的患者(17.2% vs 4.5%, $P < 0.001$),且节段狭窄评分和低冠状动脉容积指数是 MACE 的有效预测指标。此外,冠状动脉容积指数可进一步对非阻塞性 CAD 患者进行风险分层。在最近 Taylor 等^[31]的一项研究中,对冠状动脉容积指数与冠状动脉造影术测量的有创血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)进行相关分析,研究发现冠状动脉容积指数是 $\text{FFR} \leq 0.80$ 的独立预测指标,在非阻塞性 CAD 患者中,冠状动脉容积指数低的患者表现出更高的缺血率($\text{FFR} \leq 0.80$)。

3 冠状动脉血流动力学参数的预测价值

作为新兴的两种无创 CT 心脏功能学技术,CTP 和基于 CCTA 影像数据应用高级计算流体力学及深度学习等方法获得的 CT-FFR 可同时提供冠状动脉形态学(斑块形态、斑块负荷)和冠状动脉血流动力学信息,用于指导疑似或确诊 CAD 患者的诊疗策略和冠状动脉血运重建的实施,减少不必要的有创检查,改善临床预后。

3.1 CTP

CTP 不仅用于判断冠状动脉狭窄性病变是否导致了心肌缺血,还能定性和定量评估心肌缺血的灌注参数,如心肌血流量和心肌血容量^[33]。关于 CTP 的预后价值和改善风险分层的初步证据已有报道。CORE320 前瞻性多中心研究^[1]表明,CCTA 和 CTP 联合应用对 2 年内 MACE 发生率和无事件存活率的预测结果与有创冠状动脉造影和单光子发射计算机断层显像相结合提供的预测结果相近。然而,这项研究并未探讨 CTP 相对于 CCTA 的独立和增量预后价值。最近,有研究发现负荷动态 CTP 对未来 MACE 的预测价值高于基于 CCTA 的冠状动脉狭窄和临床危险因素^[2-3,33]。Nakamura 等^[2]首次评估了动态 CTP 定量的心肌血流量在疑似 CAD 患者中的增量预后价值,该研究对 332 例疑似 CAD 患者进行了 2.5 年的随访,结果显示,动态 CTP 定量的心肌血流量是 MACE 的独立预

测因子,对基于 CCTA 的冠状动脉狭窄具有增加的预后价值($HR = 5.7, 95\% CI 1.9 \sim 16.9, P = 0.002$)。更重要的是,CCTA 联合动态 CTP 改善了阻塞性 CAD 患者的风险分层。van Assen 等^[3]探讨了动态 CTP 和 CT-FFR 对 MACE 的预后价值,该研究对入选的 81 例 CAD 患者进行了 CCTA 检查、动态 CTP 和 CT-FFR 分析,并分别在成像后 6、12、18 个月对患者进行随访,25 例(31%)患者在随访期间发生了 MACE。研究发现,心肌血流量指数预测 MACE 的 HR 为 11.4, $95\% CI 3.4 \sim 38.2, P < 0.001$,与临床危险因素、CCTA 和 CT-FFR 相比,具有优越和独立的预测价值。

3.2 CT-FFR

近年来 CT-FFR 逐渐用于评估疑似或确诊 CAD 患者的预后,被认为是斑块进展^[34]和 MACE^[4-5,35]的独立预测指标。ADVANCE 试验研究发现 CT-FFR 可预测疑似或确诊 CAD 患者 90 d 的 MACE,降低非阻塞性 CAD 患者的有创冠状动脉造影检查率^[35],1 年后的随访数据亦证实,随着 CT-FFR 值的减低,MACE 发生的风险增加^[5]。有研究发现 $\text{CT-FFR} \leq 0.80$ 通过联合不同预测指标,如 $\text{CAD-RADS} \geq 3$ ^[36]、CCTA 狭窄程度 $\geq 50\%$ 及斑块特征^[6],可提高其预测 MACE 的能力。基于 CT-FFR 等血流动力学参数也可识别高危斑块和高危人群。近期的研究结果显示,在 CCTA 检查后 1 个月~2 年内发生急性冠状动脉综合征的患者中,通过整合高危斑块特征与冠状动脉血流动力学信息,可提升高危斑块预测发生急性冠状动脉综合征的能力^[37],筛选出高危人群,从而减少 MACE 的发生。最近基于 CT-FFR 的无创性功能 SYNTAX 评分(FSSCTA)的预测价值和治疗决策指导价值也得到了验证。研究发现,随着 FSSCTA 评分的升高,患者发生 MACE 和重复血运重建的风险增高,因而 FSSCTA 可用于优化三支冠状动脉病变患者的风险分层和血运重建策略,以改善临床预后^[38]。总之,CT-FFR 可作为 CAD 患者近期和远期预后评估的方法,优化患者的风险分层。

4 小结与展望

CCTA 通过准确地评估冠状动脉狭窄程度、斑块形态、斑块负荷、冠状动脉容积指数和冠状动脉血流动力学等影像学参数,为 CAD 的治疗提供了重要的诊断和预后信息。CCTA 的一个重要优势是识别非阻塞性 CAD,从而对危险因素进行调整和指导预防性治疗。近年来,放射组学、机器学习和深度学习等先进的数据分析技术已逐渐用于心血管疾病的预后预测和风险评估,这些技术通过充分利用 CCTA 中有关解剖学和功能学的信息,对 CAD 进行全面评估^[39],从而

提供个性化的精准诊疗。然而这些技术仍处于起步阶段,尚需大型临床试验来验证这些新的图像和数据分析技术的临床效用,从而确定是否可提高对 CAD 患者预后的预测价值,选出最佳评估方法。

参 考 文 献

- [1] Chen MY, Rochitte CE, Arbab-Zadeh A, et al. Prognostic value of combined CT angiography and myocardial perfusion imaging versus invasive coronary angiography and nuclear stress perfusion imaging in the prediction of major adverse cardiovascular events: the CORE320 multicenter study[J]. *Radiology*, 2017, 284(1):55-65.
- [2] 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.
- [3] van Assen M, de Cecco CN, Eid M, et al. Prognostic value of CT myocardial perfusion imaging and CT-derived fractional flow reserve for major adverse cardiac events in patients with coronary artery disease[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2019, 13(3):26-33.
- [4] Ihsdayhid AR, Norgaard BL, Gaur S, et al. Prognostic value and risk continuum of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary CT angiography[J]. *Radiology*, 2019, 292(2):343-351.
- [5] Patel MR, Norgaard BL, Fairbairn TA, et al. 1-Year impact on medical practice and clinical outcomes of FFRCT: the ADVANCE registry[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(1 Pt 1):97-105.
- [6] von Knebel Doeberitz PL, de Cecco CN, Schoepf UJ, et al. Impact of coronary computerized tomography angiography-derived plaque quantification and machine-learning computerized tomography fractional flow reserve on adverse cardiac outcome[J]. *Am J Cardiol*, 2019, 124(9):1340-1348.
- [7] van Assen M, Varga-Szemes A, Schoepf UJ, et al. Automated plaque analysis for the prognostication of major adverse cardiac events[J]. *Eur J Radiol*, 2019, 116: 76-83.
- [8] Dahal S, Budoff MJ. Implications of serial coronary computed tomography angiography in the evaluation of coronary plaque progression[J]. *Curr Opin Lipidol*, 2019, 30(6):446-451.
- [9] Matsumoto H, Watanabe S, Kyo E, et al. Standardized volumetric plaque quantification and characterization from coronary CT angiography: a head-to-head comparison with invasive intravascular ultrasound [J]. *Eur Radiol*, 2019, 29 (11):6129-6139.
- [10] Gu H, Gao Y, Hou Z, et al. Prognostic value of coronary atherosclerosis progression evaluated by coronary CT angiography in patients with stable angina [J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(3):1066-1076.
- [11] Mortensen MB, Dzaye O, Steffensen FH, et al. Impact of plaque burden versus stenosis on ischemic events in patients with coronary atherosclerosis[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 76(24):2803-2813.
- [12] 陆晓晨, 耿海华, 陆德明. 冠状动脉斑块负荷对急性 ST 段抬高型心肌梗死老年患者预后的预测价值[J]. *中国老年学杂志*, 2020, 40(6):1121-1125.
- [13] Clemente A, Traghella I, Mazzone A, et al. Vascular and valvular calcification biomarkers[J]. *Adv Clin Chem*, 2020, 95:73-103.
- [14] Grandhi GR, Mirbolouk M, Dardari ZA, et al. Interplay of coronary artery calcium and risk factors for predicting CVD/CHD mortality: the CAC consortium [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(5):1175-1186.
- [15] Takamura K, Fujimoto S, Kondo T, et al. Incremental prognostic value of coronary computed tomography angiography: high-risk plaque characteristics in asymptomatic patients[J]. *J Atheroscler Thromb*, 2017, 24(11):1174-1185.
- [16] Wang X, Le EPV, Rajani NK, et al. A zero coronary artery calcium score in patients with stable chest pain is associated with a good prognosis, despite risk of non-calcified plaques[J]. *Open Heart*, 2019, 6(1):e000945.
- [17] Uddin SMI, Mirbolouk M, Kianoush S, et al. Role of coronary artery calcium for stratifying cardiovascular risk in adults with hypertension [J]. *Hypertension*, 2019, 73(5):983-989.
- [18] Liu S, Zheng X, Xu J, et al. Predictive value of coronary artery calcium score in cardiovascular disease[J]. *Front Biosci (Elite Ed)*, 2020, 12:113-125.
- [19] Arnett DK, Blumenthal RS, Albert MA, et al. 2019 ACC/AHA Guideline on the primary prevention of cardiovascular disease: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association task force on clinical practice guidelines [J]. *Circulation*, 2019, 140(11):e596-e646.
- [20] Mach F, Baigent C, Catapano AL, et al. 2019 ESC/EAS Guidelines for the management of dyslipidaemias: lipid modification to reduce cardiovascular risk [J]. *Eur Heart J*, 2020, 41(1):111-188.
- [21] Al-Mallah MH, Qureshi W, Lin FY, et al. Does coronary CT angiography improve risk stratification over coronary calcium scoring in symptomatic patients with suspected coronary artery disease? Results from the prospective multicenter international CONFIRM registry [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2014, 15 (3):267-274.
- [22] van Rosendaal AR, Shaw LJ, Xie JX, et al. Superior risk stratification with coronary computed tomography angiography using a comprehensive atherosclerotic risk score [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12 (10): 1987-1997.
- [23] Andreini D, Pontone G, Mushtaq S, et al. Long-term prognostic impact of CT-Leaman score in patients with non-obstructive CAD: results from the COronary CT Angiography Evaluation For Clinical Outcomes International Multicenter (CONFIRM) study [J]. *Int J Cardiol*, 2017, 231:18-25.
- [24] van Rosendaal AR, Bax AM, Smit JM, et al. Clinical risk factors and atherosclerotic plaque extent to define risk for major events in patients without obstructive coronary artery disease: the long-term coronary computed tomography angiography CONFIRM registry [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020, 21 (5):479-488.
- [25] Hideo-Kajita A, Garcia-Garcia HM, Rubarth R, et al. Natural history of adapted Leaman score assessing coronary artery disease progression by computed tomography angiography: a 7 year follow-up report [J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2021, 27:38-44.
- [26] Senoner T, Plank F, Barbieri F, et al. Added value of high-risk plaque criteria by coronary CTA for prediction of long-term outcomes [J]. *Atherosclerosis*, 2020, 300:26-33.
- [27] Finck T, Stojanovic A, Will A, et al. Long-term prognostic value of morphological plaque features on coronary computed tomography angiography [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020, 21(3):237-248.
- [28] Feuchtnr G, Kerber J, Burghard P, et al. The high-risk criteria low-attenuation plaque < 60 HU and the napkin-ring sign are the most powerful predictors of MACE: a long-term follow-up study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2017, 18(7):772-779.
- [29] Ferencik M, Mayrhofer T, Bitner DO, et al. Use of high-risk coronary atherosclerotic plaque detection for risk stratification of patients with stable chest pain: a secondary analysis of the PROMISE randomized clinical trial [J]. *JAMA Cardiol*, 2018, 3(2):144-152.
- [30] Conte E, Annoni A, Pontone G, et al. Evaluation of coronary plaque characteristics with coronary computed tomography angiography in patients with non-obstructive coronary artery disease: a long-term follow-up study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2017, 18(10):1170-1178.

- [11] 金慧,张振刚,袁晓晨.非瓣膜性心房颤动卒中风险评估研究进展[J].国际心血管病杂志,2019,46(6):324-327.
- [12] Glotzer TV, Daoud EG, Wyse DG, et al. The relationship between daily atrial tachyarrhythmia burden from implantable device diagnostics and stroke risk: the TRENDS study[J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2009, 2(5):474-480.
- [13] Israel CW, Grönefeld G, Ehrlich JR, et al. Long-term risk of recurrent atrial fibrillation as documented by an implantable monitoring device; implications for optimal patient care[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2004, 43(1):47-52.
- [14] Ogata T, Matsuo R, Kiyuna F, et al. Left atrial size and long-term risk of recurrent stroke after acute ischemic stroke in patients with nonvalvular atrial fibrillation[J]. *J Am Heart Assoc*, 2017, 6(8):e006402.
- [15] Broughton ST, O'Neal WT, Salahuddin T, et al. The influence of left atrial enlargement on the relationship between atrial fibrillation and stroke[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2016, 25(6):1396-1402.
- [16] Lai CL, Chien KL, Hsu HC, et al. Left atrial dimension and risk of stroke in women without atrial fibrillation: the Chin-Shan Community Cardiovascular Cohort study[J]. *Echocardiography*, 2011, 28(10):1054-1060.
- [17] 孙艺红,胡大一.非瓣膜病心房颤动患者全球抗凝注册研究中国亚组基线数据分析[J].中华心血管病杂志,2014,42(10):846-850.
- [18] 国家卫生健康委员会脑卒中防治专家委员会房颤卒中防治专业委员会,中华医学会心电生理和起搏分会,中国医师协会心律学专业委员会.中国心源性卒中防治指南(2019)[J].中华心律失常学杂志,2019,23(6):463-484.
- [19] 杨英,扶泽南,杨龙,等.左心耳结构复杂性与非瓣膜性心房颤动患者左心耳血栓形成的关系[J].中国循环杂志,2020,35(3):277-281.
- [20] Yamamoto M, Seo Y, Kawamatsu N, et al. Complex left atrial appendage morphology and left atrial appendage thrombus formation in patients with atrial fibrillation[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(2):337-343.
- [21] Healey JS, Alings M, Ha A, et al. Subclinical atrial fibrillation in older patients[J]. *Circulation*, 2017, 136(14):1276-1283.
- [22] Verma A, Cairns JA, Mitchell LB, et al. 2014 focused update of the Canadian Cardiovascular Society Guidelines for the management of atrial fibrillation[J]. *Can J Cardiol*, 2014, 30(10):1114-1130.
- [23] Kirchhof P, Benussi S, Kotecha D, et al. 2016 ESC Guidelines for the management of atrial fibrillation developed in collaboration with EACTS[J]. *Eur Heart J*, 2016, 37(38):2893-2962.
- [24] Hart RG, Pearce LA, Miller VT, et al. Cardioembolic vs. noncardioembolic strokes in atrial fibrillation: frequency and effect of antithrombotic agents in the stroke prevention in atrial fibrillation studies[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2000, 10(1):39-43.
- [25] Jia B, Lynn HS, Rong F, et al. Meta-analysis of efficacy and safety of the new anticoagulants versus warfarin in patients with atrial fibrillation[J]. *J Cardiovasc Pharmacol*, 2014, 64(4):368-374.
- [26] Eikelboom JW, Connolly SJ, Bosch J, et al. Rivaroxaban with or without aspirin in stable cardiovascular disease[J]. *N Engl J Med*, 2017, 377(14):1319-1330.

收稿日期:2021-05-21

(上接第 1015 页)

- [31] Taylor CA, Gaur S, Leipsic J, et al. Effect of the ratio of coronary arterial lumen volume to left ventricle myocardial mass derived from coronary CT angiography on fractional flow reserve[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2017, 11(6):429-436.
- [32] Benetos G, Buechel RR, Goncalves M, et al. Coronary artery volume index: a novel CCTA-derived predictor for cardiovascular events[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(4):713-722.
- [33] Seitun S, Clemente A, de Lorenzi C, et al. Cardiac CT perfusion and FFRCTA: pathophysiological features in ischemic heart disease[J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2020, 10(6):1954-1978.
- [34] 乔红艳,许棚棚,卢佳庆,等.基于冠状动脉 CT 血管成像的斑块定量分析及血流储备分数预测斑块进展的研究[J].中华放射学杂志,2020,54(10):934-940.
- [35] Fairbairn TA, Nieman K, Akasaka T, et al. Real-world clinical utility and impact on clinical decision-making of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve: lessons from the ADVANCE Registry[J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(41):3701-3711.
- [36] Duguay TM, Tesche C, Vliegenthart R, et al. Coronary computed tomographic angiography-derived fractional flow reserve based on machine learning for risk stratification of non-culprit coronary narrowings in patients with acute coronary syndrome[J]. *Am J Cardiol*, 2017, 120(8):1260-1266.
- [37] Lee JM, Choi G, Koo BK, et al. Identification of high-risk plaques destined to cause acute coronary syndrome using coronary computed tomographic angiography and computational fluid dynamics[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(6):1032-1043.
- [38] Qiao HY, Li JH, Schoepf UJ, et al. Prognostic implication of CT-FFR based functional SYNTAX score in patients with de novo three-vessel disease[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020, jeaa256. DOI:10.1093/ehjci/jeaa256.
- [39] Kolossváry M, Cecco CND, Feuchtnner G, et al. Advanced atherosclerosis imaging by CT: radiomics, machine learning and deep learning[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2019, 13(5):274-280.

收稿日期:2021-04-28