



CCTA斑块特征在冠状动脉管腔狭窄程度进展预测及预后的价值研究

李正腾, 王 敏, 潘冬梅, 王宪凯

Predictive Value of CCTA Plaque Characteristics for the Progression and Prognosis of Coronary Artery Stenosis

LI Zhengteng, WANG Min, PAN Dongmei, and WANG Xiankai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.172>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

心绞痛患者斑块进展危险因素与冠状动脉CT血管成像指标的关系研究

Risk Factors of Plaque Progression in Patients with Angina Pectoris and Their Relationships with Coronary CT Angiography

CT理论与应用研究. 2023, 32(2): 217-222

基于CCTA的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展

Research Progress of Pericoronary Adipose Tissue Radiomics Based on Coronary Computed Tomography Angiography

CT理论与应用研究. 2024, 33(4): 531-538

血流储备分数CT成像对冠状动脉旁路移植术后的影像学评价

CT Imaging Evaluation of Fractional Flow Reserve Score after Coronary Artery Bypass Grafting

CT理论与应用研究. 2021, 30(3): 361-369

CT冠状动脉造影应用于急性胸痛临床实践研究进展

Clinical Practice of CT Coronary Angiography in Acute Chest Pain: A Review

CT理论与应用研究. 2019, 28(6): 747-752

基于Polar1DMLP模型的CCTA冠脉管腔分割方法研究

Polar1DMLP: A Coronary Artery Lumen Segmentation Network in CCTA

CT理论与应用研究. 2020, 29(6): 631-642

CTA与MRI评估无症状性颈动脉狭窄及其临床关联

CTA and MRI Evaluation of Asymptomatic Carotid Artery Stenosis and Its Clinical Association

CT理论与应用研究. 2019, 28(6): 721-730



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李正腾, 王敏, 潘冬梅, 等. CCTA 斑块特征在冠状动脉管腔狭窄程度进展预测及预后的价值研究[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 23-30. DOI:10.15953/j.ctta.2024.172.
LI Z T, WANG M, PAN D M, et al. Predictive Value of CCTA Plaque Characteristics for the Progression and Prognosis of Coronary Artery Stenosis[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 23-30. DOI:10.15953/j.ctta.2024.172. (in Chinese).

CCTA 斑块特征在冠状动脉管腔狭窄程度 进展预测及预后的价值研究

李正腾, 王敏, 潘冬梅, 王宪凯[✉]

济宁市第一人民医院放射科, 山东 济宁 272000

摘要: 目的: 探讨冠状动脉 CTA (CCTA) 斑块定性、定量特征在预测冠状动脉管腔狭窄程度进展及预后的价值。方法: 回顾性分析济宁市第一人民医院 2018 年 5 月至 2023 年 8 月行 2 次 CCTA 检查的患者 66 例, 分为管腔狭窄非进展组和进展组, 将患者 CCTA 图像传入人工智能软件进行斑块分析, 共检出斑块 87 个。分析参数包括一般临床资料、斑块性质、狭窄范围、斑块长度、钙化成分 CT 值及体积、非钙化成分 CT 值及体积、低密度成分 CT 值及体积、斑块总体积、总钙化积分、钙化斑块等效质量、重构指数、低密度斑块、正性重构、“餐巾环征”、点状钙化。分别比较斑块进展组和非进展组以及存在易损斑块和非易损斑块患者的预后情况。结果: 与狭窄非进展组相比, 进展组糖尿病、易损斑块比例高于非进展组; 进展组钙化积分、斑块钙化成分体积、钙化成分占比和钙化斑块等效质量低于非进展组且点状钙化发生率高于非进展组。多因素 Logistic 回归显示糖尿病 (OR 值 = 3.67, 95%CI: 1.21 ~ 11.11)、易损斑块 (OR 值 = 3.97, 95%CI: 1.32 ~ 11.94)、点状钙化 (OR 值 = 5.73, 95%CI: 2.03 ~ 16.17) 为狭窄进展的独立危险因素, 钙化成分体积 (OR 值 = 0.986, 95%CI: 0.976 ~ 0.997) 为狭窄进展的独立保护因素。生存分析曲线显示, 非进展组无 MACE 生存率高于进展组; 非易损斑块组无 MACE 生存率高于易损斑块组。结论: 糖尿病、易损斑块、点状钙化为狭窄进展的独立危险因素, 钙化成分体积为狭窄进展的独立保护因素, 冠状动脉 CTA 斑块定性、定量特征在预测冠状动脉管腔狭窄进展及预后中有较好的临床价值。

关键词: 冠状动脉 CT 血管造影; 冠心病; 斑块进展

DOI:10.15953/j.ctta.2024.172 中图分类号: R 814 文献标识码: A

Predictive Value of CCTA Plaque Characteristics for the Progression and Prognosis of Coronary Artery Stenosis

LI Zhengteng, WANG Min, PAN Dongmei, WANG Xiankai[✉]

Department of Radiology, Jining No.1 People's Hospital, Jining 272000, China

Abstract: Objective: To investigate the value of qualitative and quantitative plaque characteristics on coronary computed tomography angiography (CCTA) in predicting coronary stenosis progression and prognosis. Methods: This retrospective study analyzed the data of 66 patients who underwent two CCTA examinations in Jining First People's Hospital from May 2018 to August 2023. Patients were categorized into non-progressive and progressive groups. CCTA images were processed with an artificial intelligence software for plaque analysis, identifying 87 plaques. Analysis parameters included general clinical data; plaque characteristics; stenosis range; plaque length; CT values and volumes of calcified, non-calcified, and low-density components; total plaque volume; total calcification score; equivalent mass of calcified plaque; remodeling index; low-density plaque; positive remodeling; “napkin-ring sign;” and punctate calcification. Prognoses were compared between the progression and non-progression groups and between the vulnerable and non-vulnerable plaque groups. Results: The progression group had a higher proportion of patients with diabetes and vulnerable plaques compared to the non-progression group. The calcification score, calcified component volume, proportion of calcified components, and equivalent mass of calcified plaque in the progression group were lower than those in the non-progression group, whereas punctate

收稿日期: 2024-08-07。

基金项目: 济宁市重点研发计划 (双源 CT 双能量减影技术在评估严重钙化冠状动脉狭窄程度的应用研究 (2023YXNS074); AI 辅助下的冠状动脉 CTA 预测斑块进展和急性冠脉综合征的价值探讨 (2024YXNS173))。

第一作者: 李正腾, 男, 主治医师, 主要从事心胸疾病影像诊断工作, E-mail: lztmail@163.com。

通信作者: 王宪凯[✉], 男, 主管技师, 主要从事心血管扫描及后处理工作, E-mail: xraywang1987@163.com。

calcification incidence was higher than that in the non-progression group. Multivariate logistic regression analysis indicated that diabetes (odds ratio OR = 3.67, 95% confidence interval CI: 1.21 ~ 11.11), vulnerable plaque (OR = 3.97, 95% CI: 1.32 ~ 11.94), and punctate calcification (OR = 5.73, 95% CI: 2.03 ~ 16.17) were independent risk factors for stenosis progression, whereas calcification volume (OR = 0.986, 95% CI: 0.976 ~ 0.997) was an independent protective factor. Survival analysis curve revealed that major adverse cardiovascular event-free survival rate was significantly lower in the progression group than in the non-progression group and similarly lower in the vulnerable plaque group than in the non-vulnerable plaque group. Conclusions: Diabetes, vulnerable plaques, and punctate calcification are independent risk factors for coronary stenosis progression, whereas calcified component volume is an independent protective factor. The qualitative and quantitative characteristics of plaques on coronary CTA provide a good clinical value for predicting the progression and prognosis of coronary stenosis.

Keywords: coronary computed tomography angiography; coronary heart disease; plaque progression

冠状动脉粥样硬化性心脏病, 简称冠心病, 其主要病因是动脉粥样硬化^[1]。动脉粥样硬化不稳定期的斑块主要为易损性斑块, 易破裂和形成血栓。血栓的形成和易损斑块的破裂是发生主要不良心血管事件 (major adverse cardiovascular event, MACE) 的主要原因^[2]。

冠状动脉 CTA (coronary computed tomography angiography, CCTA) 作为一种无创的影像学检查方法, 不仅可以获得冠状动脉的狭窄情况, 还可获得基于斑块多个维度的定量信息, 包括斑块位置、范围和构成, 以及特异性高风险斑块 (high-risk plaque, HRP), 与传统心血管危险因素相比, 高风险斑块会出现更多的心血管不良事件^[3-5]。国内已有很多研究证明进展性斑块与长期死亡率有较高的相关性^[6]。但鲜有基于斑块定性和定量参数预测狭窄进展以及不良事件发生的相关研究。

随着技术的发展, 基于辅助诊断软件的冠状动脉斑块半自动分析功能和易损斑块特征不仅可提供更多参数, 还具有较好的可重复性, 使斑块的定性和定量评估得以在临床及科研中广泛应用^[7-9]。

本研究拟探讨基于辅助诊断软件的冠状动脉 CTA 斑块定性、定量特征在预测冠状动脉管腔狭窄程度进展的价值。

1 资料与方法

1.1 临床资料

回顾性分析济宁市第一人民医院 2018 年 5 月至 2023 年 8 月行 2 次 CCTA 检查的患者 66 例 (斑块 87 个)。狭窄程度 (diameterstenosis, DS) 变化率: $DS \text{ 变化率} = (\text{随访 DS} - \text{基线 DS}) / \text{基线 DS} \times 100\%$ 。将 66 例患者按是否存在斑块狭窄进展 ($DS > 10\%$) 分为: 有斑块狭窄进展 (28 例) 和无狭窄进展 (38 例)^[10]。87 个斑块中 $DS > 10\%$ 为进展组 (40 个), 反之为非进展组 (47 个)。

纳入标准: ① 所有患者行 CCTA 检查的次数 ≥ 2 次; ② 两次 CCTA 检查间隔时间 > 6 个月; ③ 所有患者临床资料及病史齐全。

排除标准: ① 随访期间行腔内支架或冠状动脉旁路移植术; ② 合并其他病变如: 主动脉夹层、瓣膜病变、先天性心脏病、心肌病、大动脉炎等; ③ CT 不能明确显示病灶或图像质量不佳, 不能用于分析。

一般临床资料包括: 性别、年龄、BMI、高血压、糖尿病、高血脂、吸烟史、临床症状。

进行预后情况随访, 随访途径包括: 电话、电子医疗记录随访, 了解患者身体状况。随访站点事件为 MACE, 包括: 心源性死亡、脑卒中、非致死性心肌梗死、不稳定心绞痛或心力衰竭再入院、非计划血运重建发生情况。

1.2 CT 检查方法

采用第 2 代双源 CT (SOMATOM Definition Flash, Siemens Healthcare) 或第 3 代双源 CT (OMATOM Definition Force, Siemens Healthcare)。患者仰卧于检查床, 上抬双手并置于头顶, 采取前瞻性心电门控扫描, 扫描范围为气管分叉处下 1 cm 至心底水平, 吸气相屏气后扫描。

扫描参数: 固定 120 kV 管电压, 开启 CARE Dose4D, 自动管电流。视野 (FOV) 180 ~ 250 mm。重建层厚 0.75 mm, 重建间隔 0.5 mm。以患者体重为基准, 使用 BAYER MeDRaD 双筒高压注射器以流速 4.0 ~ 5.0 mL/s 经肘正中静脉注射碘海醇 (350 mgI/mL) 50 ~ 80 mL, 后相同速率跟注生理盐水 40 mL。

运用对比剂追踪触发技术, 选择胸主动脉层面为 ROI, 对比剂 CT 值超过 100 HU 时延迟 5 s 自动触发扫描。重建图像均上传图像存档与传输系统 (picture archiving and communication system, PACS)。

1.3 CCTA 斑块特征分析

冠状动脉 CTA 图像传输至联影智能冠状动脉辅助诊断软件 (uAI-Coronary CTA), 单支血管存在多处狭窄时选取最狭窄处斑块。观察斑块智能识别情况, 遇自动分析中心线及斑块勾画不准的情况, 手动校正后再进行自动分析。

特征定量参数包括: 斑块性质、狭窄范围、斑块长度、钙化成分 CT 值及体积、非钙化成分 CT 值及体积、低密度成分 CT 值及体积、斑块总体积、总钙化积分、钙化斑块等效质量、重构指数。上述参数均进行两次测量取平均值。

易损斑块特征 CT 表现: ① 低密度斑块, 斑块中 3 个随机感兴趣区 (region of interest, ROI) 的平均密度 $\leq 30\text{HU}$; ② 正性重构, 病变段的最大血管直径与斑块近端和远端的平均直径之间的比值; ③ “餐巾环征”, 具有中央低密度部分的周围高衰减组织环状包绕; ④ 点状钙化: 冠状动脉管壁内局灶性钙化病变在任意方位测量最大径 $< 3\text{mm}$ 且平均密度 $> 130\text{HU}$ 的高密度灶。

同一病变中至少同时存在两个高危斑块特征被认为是易损斑块^[11]。由两名分别具有 8 年和 15 年以上冠状动脉 CT 诊断经验的医师在未知随访结果情况下分析图像, 定性参数意见有分歧者经协商达成一致。

1.4 统计学处理

应用 SPSS 26.0 统计软件进行数据处理。

连续变量用 Kolmogorow-Smirnov 检验进行正态性检验, 正态分布的计量资料以平均值 $\pm$ 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 若不符合正态分布则以中位数 (P_{25} , P_{75}) 的形式呈现。分类变量表示为数值和百分率 (%)。适当时, 使用独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验比较连续变量, 对于分类变量比较采用卡方检验。非参数检验适用于非正态分布的数据。应用校准曲线及受试者操作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线来评价各参数的预测效能。将单因素分析具有统计学意义的变量均纳入二元 Logistic 回归模型, 采用逐步法 (向前) 确定预测狭窄进展的独立影响因素。用 Kaplan-Meier 法评估无 MACE 事件生存率。

$P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 临床资料

66 例患者中, 冠状动脉斑块 87 个。其中 59

个分布于左主干和左前降支, 9 个分布于左回旋支, 19 个分布于右侧冠状动脉。

进展组糖尿病、易损斑块比例高于非进展组, 总钙化积分低于非进展组, 以上差异有统计学意义。两组年龄、BMI、高血压、高血脂、吸烟史、临床症状差异无显著统计学意义 (表 1)。

2.2 CT 特征参数

进展组斑块钙化成分体积、钙化成分占比、钙化斑块等效质量低于非进展组, 而点状钙化发生率高于非进展组, 差异均有统计学意义。

两组斑块性质、狭窄范围、钙化成分 CT 值、钙化成分体积、非钙化成分 CT 值、非钙化成分体积、非钙化成分占比、低密度成分 CT 值、低密度成分体积、低密度成分占比、重构指数、低密度斑块、正性重构、“餐巾环征”差异无显著统计学意义 (图 1 和表 2)。

2.3 临床及 CT 特征预测狭窄进展的 ROC 分析及多因素 logistic 回归结果

经 ROC 分析, 糖尿病、钙化成分体积、钙化成分占比、钙化斑块等效质量、点状钙化、易损斑块的曲线下面积分别为 0.647、0.653、0.627、0.630、0.668 和 0.658 (图 2 和表 3)。

多因素 Logistic 回归显示糖尿病、易损斑块、点状钙化为狭窄进展的独立危险因素, 钙化成分体积为狭窄进展的独立保护因素 (表 4)。

2.4 预后分析

非进展组心源性死亡、脑卒中、非计划血运重建各 1 例, 不稳定心绞痛或心力衰竭再入院 4 例。进展组中脑卒中 3 例、不稳定心绞痛或心力衰竭再入院 9 例。在中位随访时间 2.93 年, 共有 19 例发生 MACE, 发生率为 28.8%, 年发生率为 9.83%。

非进展组发生率为 18.4%, 年发生率为 6%; 进展组发生率为 42.9%, 年发生率为 17.1%。Kaplan-Meier 生存曲线显示, 非进展组无 MACE 生存率高于进展组, 非易损斑块组无 MACE 生存率高于易损斑块组 (图 3)。

3 讨论

动脉粥样硬化斑块进展是冠状动脉粥样硬化性心脏病急性事件发生的重要机制, 斑块快速进展是心肌梗死的独立危险因素之一^[12]。

本研究通过对 66 例患者的连续 CCTA 分析显

表 1 进展组与非进展组之间基线临床特征的比较
Table 1 Comparison of baseline clinical features between the progressive and non-progressive groups

临床特征		组别		统计检验	
		无狭窄进展 (n = 38)	狭窄进展 (n = 28)	t/χ ² /z	P
年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$)		55.6 ± 8.2	56.5 ± 7.3	-1.12	0.236
BMI		24.6 (22.1, 28.6)	24.9 (22.9, 27.7)	-0.18	0.859
性别/(例, %)	男	25 (65.8)	15 (53.6)	1.01	0.227
	女	13 (34.2)	13 (46.4)		
高血压/(例, %)	有	21 (55.3)	20 (71.4)	1.79	0.140
	无	17 (44.7)	8 (28.6)		
糖尿病/(例, %)	有	16 (42.1)	20 (71.4)	5.59	0.017
	无	22 (57.9)	8 (28.6)		
高血脂/(例, %)	有	14 (36.8)	12 (42.9)	0.24	0.405
	无	24 (63.2)	16 (57.1)		
吸烟史/(例, %)	有	18 (47.4)	7 (25.0)	3.43	0.054
	无	20 (52.6)	21 (75.0)		
症状/(例, %)	心绞痛	16 (42.1)	12 (42.9)	—	0.652*
	不典型的心绞痛胸痛	8 (21.1)	9 (32.1)		
	胸闷或心悸	7 (18.4)	5 (17.9)		
	无症状	6 (15.8)	2 (7.1)		
易损斑块/(例, %)	有	10 (26.3)	16 (57.1)	6.42	0.021
	无	28 (73.7)	12 (42.9)		
总钙化积分		145.6 (13.4, 270.7)	43.3 (4.6, 101.3)	-2.38	0.017

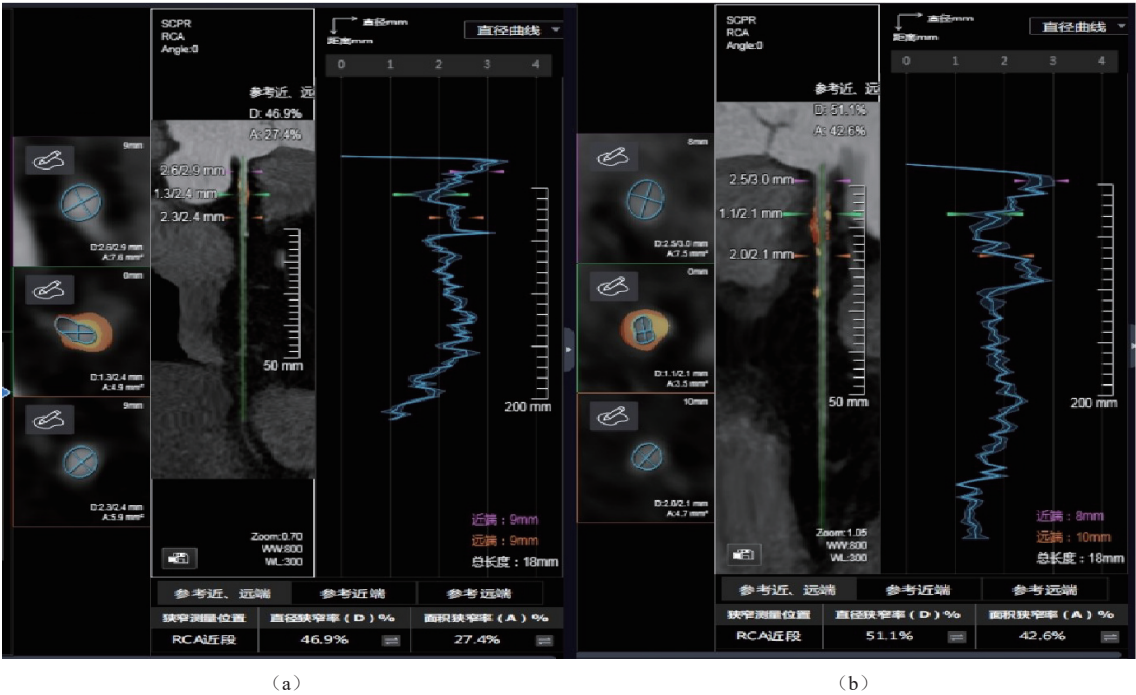


图 1 男性, 50 岁。(a) 为基线 CCTA 显示管腔轻度狭窄。(b) 为 12 个月后随访 CCTA 显示管腔中度狭窄。对比两次检查该斑块狭窄进展变化率为 55.5%, 其中长度增加 7.8 mm, 斑块体积增加 49.4 mm³

Fig.1 A 50-year-old man. (a) baseline CCTA demonstrates mild luminal stenosis. (b) CCTA indicates that moderate lumen stenosis is present after 12 months. The plaque stenosis has progressed by 55.5%, increasing in length by 7.8 mm and in volume by 49.4 mm³

表 2 进展组与非进展组之间基线 CT 特征的比较
Table 2 Comparison of baseline CT features between the progressive and non-progressive groups

CT 特征		组别		统计检验	
		非进展组 (n = 47)	进展组 (n = 40)	t/x ² /z	P
斑块性质/例	非钙化斑块	4	4	—	0.782*
	混合斑块	32	29		
	钙化斑块	11	7		
狭窄范围/例	局限性狭窄	12	13	1.16	0.601
	节段性狭窄	24	21		
	弥漫性狭窄	11	6		
斑块长度/mm		19.2 (10.8, 30.3)	15.8 (9.4, 24)	-1.32	0.190
钙化成分 CT 值/HU		432.0 ± 146.6	389.5 ± 121.9	-1.45	0.148
钙化成分体积/mm ³		51.4 (12.7, 89.4)	17.2 (6.7, 35.1)	-2.44	0.014
钙化成分占比 (%)		0.5 (0.3, 0.8)	0.3 (0.1, 0.7)	-2.04	0.042
非钙化成分 CT 值/HU		103.4 ± 28.5	98.9 ± 33.3	-0.84	0.407
非钙化成分体积/mm ³		41.7 (14.9, 91.7)	40.3 (19.1, 90)	-0.38	0.712
非钙化成分占比 (%)		0.5 (0.3, 0.8)	0.7 (0.4, 0.9)	-1.80	0.072
低密度成分 CT 值/HU		8 (0, 15)	8 (0, 13)	-0.68	0.498
低密度成分体积/mm ³		1.8 (0, 16.7)	3.6 (0.2, 20.6)	-0.66	0.510
低密度成分占比 (%)		0.03 (0, 0.1)	0.05 (0.003, 0.2)	-1.03	0.305
斑块总体积/mm ³		106.2 (45.6, 224.6)	64.4 (39.1, 168.5)	-1.39	0.167
钙化斑块等效质量		9.5 (1.6, 28.1)	5.1 (0.7, 12.1)	-2.08	0.037
重构指数		0.9 (0.8, 1.1)	0.9 (0.8, 1)	-0.19	0.850
低密度斑块/ (例, %)	有	11 (23.4)	4 (10.0)	—	0.154*
	无	36 (76.6)	36 (90.0)		
正性重构/ (例, %)	有	9 (19.1)	7 (17.5)	0.039	1.000
	无	38 (80.9)	33 (82.5)		
餐巾环征/ (例, %)	有	8 (17.0)	9 (22.5)	0.410	0.593
	无	39 (83.0)	31 (77.5)		
点状钙化/ (例, %)	有	23 (48.9)	33 (82.5)	10.610	0.002
	无	24 (51.1)	7 (17.5)		

注: *采用 Fisher 检验。

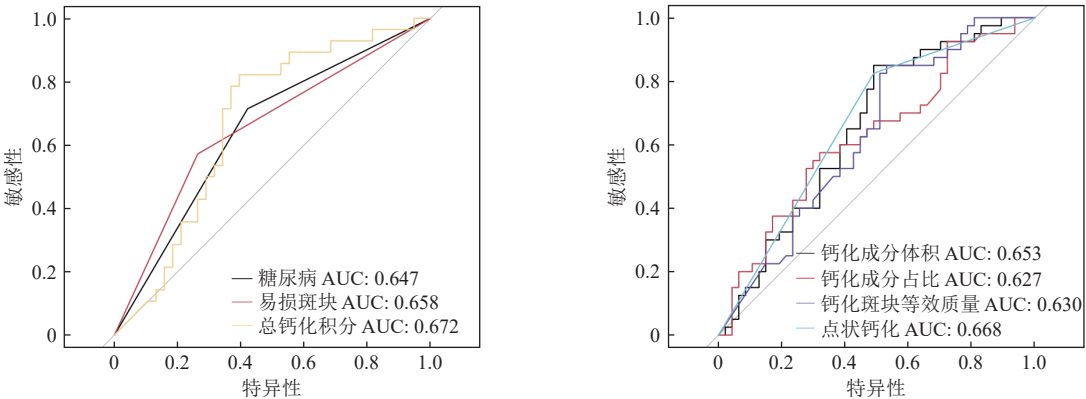


图 2 不同参数预测冠状动脉病变进展的 ROC 曲线
Fig.2 ROC curves of different parameters predicting the progression of coronary artery disease

示, 近 1/2 患者出现狭窄进展, 结果提示冠状动脉粥样硬化患者定期复查 CCTA 的必要性。

本研究显示进展组糖尿病比例高于非进展组, 且为狭窄进展的独立危险因素, 与相关研究结果一致^[13], 可能与高血糖状态导致血管功能障碍和晚期糖基化终产物的堆积, 促进炎症反应, 进而加快动

表 3 不同参数对冠状动脉病变进展的预测价值
Table 3 Predictive values of different parameters for the progression of coronary artery disease

特征	曲线下面积	标准误	<i>P</i>	95% CI	最佳截断值	敏感度	特异度
糖尿病	0.65	0.069	0.043	0.512 ~ 0.781	有	0.579	0.714
易损斑块	0.66	0.070	0.031	0.521 ~ 0.795	有	0.615	0.700
总钙化积分	0.67	0.067	0.018	0.540 ~ 0.804	106.985	0.605	0.821
钙化成分体积	0.65	0.059	0.015	0.537 ~ 0.768	50.225	0.511	0.850
钙化成分占比	0.63	0.060	0.042	0.509 ~ 0.745	0.385	0.681	0.575
钙化斑块等效质量	0.63	0.060	0.038	0.513 ~ 0.746	17.345	0.468	0.850
点状钙化	0.67	0.058	0.007	0.554 ~ 0.782	有	0.825	0.511

表 4 采用逐步法 Logistic 回归筛选出预测狭窄进展的独立影响因素
Table 4 Stepwise Logistic regression was used to screen independent factors influencing stenosis progression

危险因素	β 值	标准误	OR 值	95% CI		<i>P</i>
				lower	upper	
糖尿病	1.300	0.565	3.668	1.211	11.110	0.022
易损斑块	1.379	0.562	3.973	1.321	11.944	0.014
钙化成分体积	-0.014	0.005	0.986	0.976	0.997	0.009
点状钙化	1.745	0.530	5.727	2.028	16.174	0.001

注： β 值为回归系数，OR 值为优势比，CI 为可信区间。

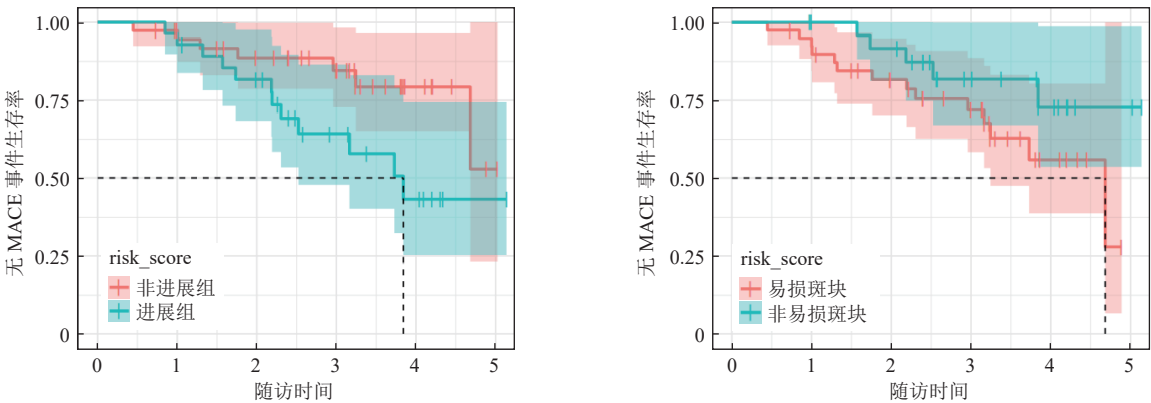


图 3 Kaplan-Meier 生存曲线评估进展组和非进展组间无 MACE 事件生存率，易损斑块和非易损斑块间无 MACE 事件生存率

Fig.3 Kaplan-Meier survival curve assessing the incidence of non-MACEs between the progressive and non-progressive groups

脉粥样硬化的发展有关。

本研究中进展组具有较小的钙化成分体积、钙化成分占比、钙化斑块等效质量，Jian 等^[14]在研究 II 型糖尿病患者斑块快速进展中得出的，基线钙化斑块体积是 II 型糖尿病患者冠状动脉粥样硬化快速进展的独立保护因素与本研究结果相符。

钙化斑块反映了非钙化和晚期斑块的愈合，斑块钙化越多提示越稳定^[15]。另有相关研究表明^[16]，在钙化程度较低的斑块中，更容易出现急性心肌梗死死亡或急性冠状动脉综合征。

在我们的研究中，钙化体积较大的患者不容易发生冠状动脉狭窄的进展，显示了钙化成分对斑块的保护作用。本研究中的发现与 Nicholls 等^[17]在研

究血管内超声评估的钙化斑块对斑块总体积的改变和进展更具耐受性的结果相一致。

本研究中进展组点状钙化发生比例较高，为狭窄进展的独立危险因素之一。点状钙化、低密度斑块均是非阻塞性冠状动脉发生进展的独立危险因素。既往研究指出^[18]点状钙化不是广泛的钙化斑块，是斑块内含有长度 < 3 mm 的钙化灶，其可能通过额外的促炎反应引起斑块的稳态变化^[19]。

本研究进展组非 MACE 发生率显著低于非进展组。与 Shi 等^[20]的结果一致，进展组脑卒中、不稳定心绞痛或心力衰竭再入院发生率更高。多项基于连续 CCTA 扫描的研究表明，基线定量斑块特征和定量斑块的变化是预测斑块进展和 MACE 发

生的重要指标^[21]。Yu 等^[22]的研究表明病变进展组的 MACE 发生率高于病变非进展组 (56.25% (9/16) 和 4.84% (6/124)), 与本研究 MACE 发生率相近。本研究中易损斑块无 MACE 事件生存率显著低于非易损斑块, 与罗玮等^[23]的研究一致。

上述结论证明斑块狭窄进展和易损斑块均可以预测 MACE 事件发生风险, 据此提示连续冠状动脉 CTA 随访在冠心病诊断治疗方面的亦存在一定价值, 后续研究可以加入连续 CCTA 斑块变化量用以预测 MACE 和/或斑块进展, 进一步指导冠心病及其并发症的防治。

本研究局限性。① 本研究样本量偏少, 可能存在选择偏倚; ② 本次研究患者复查时间跨度较大, 后续会增加病例数量并进行不同复查时间段的亚组分析; ③ 仅研究了病变区域狭窄程度进展, 后续可以加入斑块负荷的相关研究, 以更全面的分析冠状动脉粥样硬化的变化; ④ 本次研究为回顾性研究, 未选择冠状动脉造影结果作为金标准。

本研究显示冠状动脉 CTA 斑块定性、定量特征结合临床特征, 不仅可在冠状动脉 CTA 随访检查时预测管腔狭窄程度进展, 而且在预测心脏不良事件发生方面具有重要价值, 为冠心病患者的诊疗提供更精准科学的指导。

参考文献

- [1] 胡盛寿, 高润霖, 刘力生, 等. 《中国心血管病报告 2018》概要[J]. 中国循环杂志, 2019, 34(3): 209-220. DOI:10.3969/j.issn.1000-3614.2019.03.001. HU S, GAO R, LIU L, et al. Summary of the 2018 report on cardiovascular diseases in China[J]. Chinese Circulation Journal, 2019, 34(3): 209-220. DOI:10.3969/j.issn.1000-3614.2019.03.001. (in Chinese).
- [2] AHMADI A, ARGULIAN E, LEIPSIC J, et al. From subclinical atherosclerosis to plaque progression and acute coronary events: JACC state-of-the-art review[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2019, 74(12): 1608-1617. DOI:10.1016/j.jacc.2019.08.012.
- [3] DESEIVE S, KUPKE M, STRAUB R, et al. Quantified coronary total plaque volume from computed tomography angiography provides superior 10-year risk stratification[J]. European Heart Journal: Cardiovascular Imaging, 2021, 22(3): 314-321. DOI:10.1093/ehjci/jeaa228.
- [4] 朱娜君, 方欣欣, 尹伊君, 等. 心绞痛患者斑块进展危险因素与冠状动脉 CT 血管成像指标的关系研究[J]. CT 理论与应用研究, 2023, 32(2): 217-222. DOI:10.15953/j.ctta.2022.219. ZHU N J, FANG X X, YIN Y J, et al. Risk factors of plaque progression in patients with angina pectoris and their relationships with coronary CT angiography[J]. CT Theory and Applications, 2023, 32(2): 217-222. DOI:10.15953/j.ctta.2022.219. (in Chinese).
- [5] Van ROSENDAEL A R, SHAW L J, XIE J X, et al. Superior risk stratification with coronary computed tomography angiography using a comprehensive atherosclerotic risk score[J]. Journal of the American College of Cardiology: Cardiovascular Imaging, 2019, 12(10): 1987-1997. DOI:10.1016/j.jcmg.2018.10.024.
- [6] 谢丽响, 胡春峰. 基于冠状动脉 CT 血管成像的冠状动脉斑块风险分层的研究进展[J]. 中国临床医生杂志, 2023, 51(11): 1272-1277. DOI:10.3969/j.issn.2095-8552.2023.11.004.
- [7] 袁嘉俊, 袁明远, 张佳胤. 人工智能在冠状动脉 CT 血管成像中的应用与进展[J]. 中国医刊, 2023, 58(5): 468-472. DOI:10.3969/j.issn.1008-1070.2023.05.002.
- [8] 宋瑶, 霍怀璧, 李晗, 等. 冠状动脉 CTA 多参数 AI 特征对急性冠脉综合征的诊断价值[J]. 放射学实践, 2023, 38(7): 873-878. DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.07.011. SONG Y, HUO H, LI H, et al. Diagnostic value of multi-parameter AI features in coronary computed tomography angiography for acute coronary syndrome[J]. Radiologic Practice, 2023, 38(7): 873-878. DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.07.011. (in Chinese).
- [9] 闫昕, 赵建华. 基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2024, 33(4): 531-538. DOI:10.15953/j.ctta.2023.179. YAN X, ZHAO J H. Research progress of pericoronary adipose tissue radiomics based on coronary computed tomography angiography[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(4): 531-538. DOI:10.15953/j.ctta.2023.179. (in Chinese).
- [10] 中国医师协会放射医师分会. 冠状动脉 CT 血管成像斑块分析和应用中国专家建议[J]. 中华放射学杂志, 2022, 6(56): 595-607. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20211129-01055. Chinese Medical Doctor Association Radiology Branch. Chinese expert recommendations of coronary atherosclerotic plaque assessment and applications of using CT angiography[J]. Chinese Journal of Radiology, 2022, 6(56): 595-607. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20211129-01055. (in Chinese).
- [11] 李苏豫, 唐春香, 张龙江. 冠状动脉 CT 血管成像评估易损斑块新进展[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(3): 330-334. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20210315-00231. LI S Y, TANG C X, ZHANG L J. Coronary CT angiography of vulnerable plaque[J]. Chinese Journal of Radiology, 2022, 56(3): 330-334. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20210315-00231. (in Chinese).
- [12] 刘博清, 余再新. 连续冠状动脉 CT 血管造影评估动脉粥样硬化斑块逆转治疗的研究进展[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2023, 31(10): 775-780. DOI:10.3969/j.issn.1004-8812.2023.10.009. LIU B Q, YU Z X. Research progress on evaluating

- atherosclerotic plaque regression therapies using serial coronary CT angiography[J]. *Chinese Journal of Interventional Cardiology*, 2023, 31(10): 775-780. DOI:10.3969/j.issn.1004-8812.2023.10.009. (in Chinese).
- [13] VERGALLO R, CREA F. Atherosclerotic plaque healing[J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 383(9): 846-857. DOI:10.1056/NEJMr2000317.
- [14] JIAN Z, YAO G, GUO H, et al. The impact of baseline calcified plaque volume on coronary rapid plaque progression by serial coronary computed tomography angiography in patients with type 2 diabetes[J]. *Annals of Medicine*, 2023, 55(1): 2196438. DOI:10.1080/07853890.2023.2196438.
- [15] JIN H Y, WEIR-MCCALL J R, LEIPSIC J A, et al. The relationship between coronary calcification and the natural history of coronary artery disease[J]. *Journal of the American College of Cardiology: Cardiovascular Imaging*, 2021, 14(1): 233-242. DOI:10.1016/j.jcmg.2020.08.036.
- [16] MAURIELLO A, SERVADEI F, ZOCCAI G B, et al. Coronary calcification identifies the vulnerable patient rather than the vulnerable plaque[J]. *Atherosclerosis*, 2013, 229(1): 124-129. DOI:10.1016/j.atherosclerosis.2013.03.010.
- [17] NICHOLLS S J, TUZCU E M, WOLSKI K, et al. Coronary artery calcification and changes in atheroma burden in response to established medical therapies[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2007, 49(2): 263-270. DOI:10.1016/j.jacc.2006.10.038.
- [18] ITO H, MOTOYAMA S, SARAI M, et al. Characteristics of plaque progression detected by serial coronary computed tomography angiography[J]. *Heart Vessels*, 2014, 29(6): 743-749. DOI:10.1007/s00380-013-0420-4.
- [19] 史东星, 王道清, 张卉, 等. CCTA 技术下斑块定量分析预测冠心病患者斑块进展的价值[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2023, 21(2): 73-75. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.02.026.
- SHI D X, WANG D Q, ZHANG H, et al. Value of plaque quantitative analysis in predicting plaque progression in patients with coronary heart disease by CCTA[J]. *Chinese Journal of CT and MRI*, 2023, 21(2): 73-75. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.02.026. (in Chinese).
- [20] SHI X, GAO J, LV Q, et al. Calcification in atherosclerotic plaque vulnerability: Friend or foe?[J]. *Frontiers in Physiology*, 2020, 11: 56. 2020. DOI:10.3389/fphys.2020.00056.eCollection.
- [21] Van DRIEST F Y, BIJNS C M, Van der GEEST R J, et al. Utilizing (serial) coronary computed tomography angiography (CCTA) to predict plaque progression and major adverse cardiac events (MACE): Results, merits and challenges[J]. *European Radiology*, 2022, 32(5): 3408-3422. DOI:10.1007/s00330-021-08393-9.
- [22] YU M, LI W, LU Z, et al. Quantitative baseline CT plaque characterization of unrevascularized non-culprit intermediate coronary stenosis predicts lesion volume progression and long-term prognosis: A serial CT follow-up study[J]. *International Journal of Cardiology*, 2018, 264: 181-186. DOI:10.1016/j.ijcard.2018.03.021.
- [23] 罗玮, 赵茹, 赵惠, 等. 冠状动脉轻中度狭窄患者的预后影响因素分析[J]. *临床放射学杂志*, 2021, 40(12): 2410-2415. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2021.12.031.
- LYO W, ZHAO R, ZHAO H, et al. Prognostic factors of patients with mild to moderate coronary artery stenosis[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2021, 40(12): 2410-2415. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2021.12.031. (in Chinese).