

论 著

基于CCTA衍生人工智能测量冠周FAI评估冠状动脉粥样硬化疗效的可行性研究*

杨 锐¹ 王利东^{2,*}
1.包头医学院 (内蒙古 包头 014040)
2.内蒙古自治区国际蒙医医院影像中心 (内蒙古 呼和浩特 010013)

【摘要】目的 本研究旨在基于CCTA衍生人工智能测量冠状动脉周围脂肪衰减指数(冠周FAI)对冠状动脉粥样硬化疗效评估,研究其能否为冠状动脉疾病(CAD)患者预后情况提供诊疗证据。方法 入选包头市中心医院2022年治疗后的CAD患者作为研究对象。按照治疗方法和疗效情况分成六组。行冠状动脉计算机断层扫描血管造影(CCTA)检查符合纳排标准。收集患者基线资料和临床指标等。由2名具有主治医师以上职称医师使用使用CT工作软件进行图像后处理,后用Skview软件FAI智能分析系统测量并记录冠周FAI。采用皮尔逊相关性分析法和秩相关分析法探究冠周FAI与指标相关性。结果 本研究CCTA图像后处理结果显示总体冠周FAI为-83.10±10.46HU,六组冠周FAI分别为-89.71±5.56HU、-71.35±4.39HU、-91.94±3.97HU、-71.62±4.79HU、-89.38±3.07HU、-71.69±3.79HU。PCI疗效效果强于药物及CABG。治疗方法和疗效情况与临床指标呈不同相关性。结论 基于CCTA衍生人工智能测量冠周FAI能够对冠状动脉粥样硬化疗效进行评估并且识别分类残余炎症风险(RIR),从而帮助临床了解CAD患者预后情况。

【关键词】冠状动脉疾病;
冠状动脉计算机断层扫描血管造影术;
冠状动脉周围脂肪衰减指数;
他汀类药物;经皮冠状动脉介入术;
冠状动脉旁路移植术

【中图分类号】R445.3
【文献标识码】A
【基金项目】2022年度自治区卫生健康科技计划项目(202201081)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.10.022

Feasibility Study of Assessing the Efficacy of Coronary Atherosclerosis Based on CCTA-Derived Artificial Intelligence Measurement of Pericoronary Fat Attenuation Index (Pericoronary FAI)*

YANG Kun¹, WANG Li-dong^{2,*}.
1.Baotou Medical College, Baotou 014040, Inner Mongolia, China
2.Department of Medical Imaging Center, International Mongolian Hospital of Inner Mongolia, Hohhot 010013, Inner Mongolia, China

ABSTRACT
Objective The aim of this study was to assess the efficacy of coronary atherosclerosis based on the CCTA-derived artificial intelligence measure of pericoronary fat attenuation index (pericoronary FAI),and to investigate whether it can provide diagnostic and therapeutic evidence of prognostic conditions of patients with coronary artery disease (CAD). **Methods** CAD patients treated in Baotou Central Hospital 2022 were enrolled as study subjects. They were divided into six groups according to treatment methods and efficacy.Coronary computed tomography angiography (CCTA) was performed to meet the criteria for natriuresis. Patients'baseline data and clinical indicators were collected.Two physicians with the title of attending physician or above performed image post-processing using CT work software,and then measured and recorded pericoronary FAI using the FAI intelligent analysis system of Skview software.Pearson's correlation analysis and rank correlation analysis were used to investigate the correlation between peri-coronary FAI andthe indexes. **Results** The post-processing results of CCTA images in this study showed that the totality pericoronary FAI was -83.10±10.46 HU,and the pericoronary FAI of the six groups were -89.71±5.56 HU,-71.35±4.39 HU,-91.94±3.97 HU,-71.62±4.79 HU,-89.38±3.07 HU,-71.69±3.79 HU. PCI efficacy results were stronger than drug and CABG efficacy. Treatment methods and efficacy profiles showed different correlations with clinical indicators. **Conclusion** CCTA-derived artificial intelligence-based measurement of pericoronary FAI enables assessment of coronary atherosclerosis efficacy and identification of categorized residual inflammatory risk (RIR), thus helping to provide clinical insight into the prognosis of patients with CAD. **Keywords:** Coronary Artery Disease; Coronary Computed Tomography Angiography; Pericoronary Fat Attenuation Index; Statins; Percutaneous Coronary Intervention; Coronary Artery Bypass Grafting

冠状动脉疾病(coronary artery disease,CAD)已经影响全球超过2.44亿人,而且CAD将逐渐成为导致死亡的重要因素^[1]。中国指南^[2]提示CAD主要治疗手段包括药物:他汀类药物为主,辅以急性药物溶栓,加以负荷剂量下的抗血小板药物、缓解症状,预防不良心血管事件的其他慢性药物;血运重建:经皮冠状动脉介入术(percutaneous coronary intervention, PCI)治疗和冠状动脉旁路移植术(coronary artery bypass grafting, CABG)治疗。

CAD现在被认为是一种血管炎症性疾病,许多证据表明血管周围脂肪组织(perivascular adipose tissue, PVAT)参与了炎症进展,因而冠状动脉周围脂肪组织(pericoronary adipose tissue, PCAT)对CAD的发展起着重要作用^[3]。冠状动脉通过血管滋养管与PCAT之间存在信号传递,冠状动脉受到刺激向PCAT释放细胞因子,PCAT从脂相转变为水相;功能紊乱的PCAT向冠状动脉释放炎症性细胞因子,启动了血管炎症和冠状动脉粥样硬化进程^[4-5]。

冠状动脉计算机断层扫描血管造影术(coronary computed tomography angiography, CCTA)衍生出的冠状动脉周围脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI),简称冠周FAI,可以量化冠状动脉及周围组织炎症程度^[6]。冠周FAI定义为冠状动脉周围脂肪组织平均CT衰减^[7]。据报道^[8],冠周FAI被认为是一种具有潜力的冠状动脉炎症性标记物。在CCTA心血管危险预测(cardiovascular risk prediction using computed tomography, CRISP-CT)研究^[8]中证实冠周FAI有助于预测CAD全因死亡和心源性死亡,研究者还得出-70.1HU是预测长期全因死亡率和心源性死亡率最佳分界值。然而传统的PCAT测定需要在CCTA图像上进行人工勾画感兴趣区,占用大量人员和时间,且勾画过程中存在主观意识,容易造成准确性不佳及重复性较差等问题。目前人工智能可自动勾画PCAT范围之后自动计算PCAT多项参数,使冠周FAI测量变得更加准确、快速与可重复。虽然如此,人工智能测量冠周FAI对于CAD疗效评价情况尚不清晰,为此本研究选取治疗后的CAD患者通过相关性分析冠周FAI基本特征评估冠状动脉粥样硬化疗效及可行性情况。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究根据赫尔辛基宣言原则进行,研究性质为回顾性,所有患者均签

【第一作者】杨 锐,男,住院医师,主要研究方向:心血管系统疾病的诊断与研究。E-mail: yangkun202107@163.com
【通讯作者】王利东,男,主任医师,主要研究方向:心血管系统疾病的诊断与研究。E-mail: doctorlidong@163.com

署了书面知情同意书。选取包头市中心医院2022年1月1日至12月5日到影像中心行CCTA检查患者,根据纳排标准最终有495例患者成为研究对象。

纳入标准:既往2次以上检查CCTA现复查,右冠状动脉(right coronary artery, RCA)和左冠状动脉前降支(left anterior descending, LAD)、左冠状动脉回旋支(left circumflex, LCX)存在冠状动脉疾病报告和数据库(coronary artery diseasereporting and data system, CAD-RADS)1-4级水平^[9];个人及临床资料完整;治疗资料:在院使用治疗手段包括以他汀类药物为主其他心血管药物为辅后、行PCI后以及行CABG后至少

90天复查结果包括既往治疗资料可对比;图像内容及质量满足诊断与科研需求。排除标准:CCTA显示冠状动脉起源与走行发育异常,生理性冠状动脉完全闭塞或存在非梗阻性狭窄;伴有其他心脏器质性、感染性及肿瘤性疾病;伴有其他系统器质性、感染性及肿瘤性疾病。

1.1.1 研究对象分组 依据中外CAD治疗、预后及相关危险因素指南^[10-13],按照入组患者治疗方式及治疗效果将495例入组患者分为:A组-药物治疗好(n=147)、B组-药物治疗差(n=95)、C组-PCI疗效好(n=122)、D组-PCI疗效差(n=86)、E组-CABG疗效好(n=32)及F组-CABG疗效差(n=13)。



图1 后处理工作站示意图及冠周FAI测量示意图;左上:女性,45周岁,最大密度投影及曲面重组显示:LAD近中段植入支架,支架内非钙化斑块,管腔狭窄25%-49%,轻度狭窄;右上:男性,52周岁,容积再现显示:桥血管自左乳内动脉发出至左前降支供血区域,桥血管通畅;左下:女性,68周岁,容积再现、最大密度投影及曲面重组显示:LAD近端混合斑块,管腔狭窄70%-99%,考虑重度狭窄;造影提示管腔狭窄80%-90%;右下:女性,34周岁,RCA冠周FAI测量示意图,测得值为-96HU。

1.1.2 临床资料收集及计算 通过电子病历系统及临床病例随访收集上述入组患者基本资料和临床指标,包括性别、年龄等。

因研究对象具体信息收集于新型冠状病毒肺炎流行期间,因新冠肺炎可能会影响数据真实性,故时间截止2022年12月5日前。有报道称COVID-19可能通过触发呼吸道上皮细胞、树突状细胞和巨噬细胞释放细胞因子和趋化因子,促进PCAT积累来诱发炎症,这可能使感染者产生局部冠状动脉炎症,导致冠状动脉粥样硬化改变进一步发展^[14-15]。

1.2 方法

1.2.1 CCTA图像采集及处理传输 本研究所有患者均使用西门子公司第三代双源CT机(Force, Siemens Healthcare, Forchheim, Germany)进行检查。首先由影像中心2位主治以上职称医师对每幅图像进行一致性处理,消除不同窗宽和窗位对重建图像质量影响。然后利用后处理系统对冠状动脉进行纵向和轴向多平面重建。最后,由1位主任或副主任职称医师对冠状动脉重建图像质量进行评估校正。为了检验图像质量结果一致性,在上述操作1个月后随机选择20%患者,由1名主治以上职称医师进行再处理评估校正。

1.2.2 冠周FAI测量 冠周FAI测量使用Skview软件FAI智能分析系统(Skview FAI; 数坤科技, 北京, 中国)^[16]。用Oikonomou等描述的方法测量PCAT体积和FAI^[17]。据报道^[7,16-17]: PCAT阈值范围为-190~-30HU;分析主要血管(RCA);提取RCA横向往距离为靶血管平均直径;形成以靶血管为中心环绕血管的圆柱形脂肪聚集区;RCA近端10~50mm为测量纵向范围。软件可以自动提取PACT和计算冠周FAI,当认为自动提取不准确时,可手动调整提取范围。随后,由软件自动计算冠周FAI。上述测量结果由2名主

治以上职称医师独立完成。

1.3 统计分析 采用SPSS 26.0软件进行数据处理与统计学分析。符合正态分布计量资料以均值±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,独立样本设计两组间均数比较采用两独立样本t检验,非正态分布资料以中位数和四分位数[M(Q1~Q3)]表示,计数资料采用例数和百分比表示;相关性分析采用皮尔逊(Pearson)相关性分析法和秩相关分析法(Spearman)探究冠周FAI与年龄、生理生化指标等相关性, $P < 0.05$ 为有统计学意义。

2 结果

2.1 入组患者基本资料 本研究共纳入495例经过治疗后CAD患者作为研究对象,年龄 61.79 ± 8.66 岁,其中男性231例(46.67%),女性264例(53.33%),CCTA图像后处理结果显示冠周FAI为 -83.10 ± 10.46 HU见表1。

2.2 各组组内进行所有指标与冠周FAI相关性分析 采用两独立样本t检验、皮尔逊(Pearson)相关性分析法与秩相关分析法探究各组冠周FAI在不同性别、年龄上的水平差异无统计学意义($P > 0.05$),无明确相关性($P > 0.05$),见表2。

表1 入组患者基本资料统计(n=495)

指标	人数	构成比/均值±标准差/中位数及四分位数
年龄(例, 周岁)	495	61.79 ± 8.66
性别		
男(例, %)	231	46.67%
女(例, %)	264	53.33%

注:冠周FAI为右冠状动脉(RCA)的冠状动脉周围脂肪组织衰减指数(FAI),简称冠周FAI; HU为霍斯菲尔德单位。

表2 各组冠周FAI与性别、年龄相关性分析

组别	指标	冠周FAI(HU)	t	P
A组	性别	男 -89.85±5.83	-0.263	0.793
	女	-89.61±5.37		
	年龄		0.121	0.144
	性别	男 -72.14±3.85	-1.611	0.111
B组	女	-70.69±4.74		
	年龄		0.001	0.989
	性别	男 -92.32±4.08	-0.697	0.487
C组	女	-91.77±3.93		
	年龄		0.031	0.731
	性别	男 -71.37±4.80	0.617	0.539
D组	女	-72.03±4.81		
	年龄		0.105	0.334
	性别	男 -89.38±3.21	0.001	1.000
E组	女	-89.38±2.77		
	年龄		-0.062	0.737
	性别	男 -71.17±3.54	0.447	0.664
F组	女	-72.14±4.22		
	年龄		-0.077	0.802

2.3 根据治疗方法疗效效果进行各组间冠周FAI相关性分析 CCTA图像后处理结果显示A组药物疗效好冠周FAI为-89.71±5.56HU，CCTA图像后处理结果显示B组药物疗效差冠周FAI为-71.35±4.39HU，CCTA图像后处理结果显示C组PCI疗效好冠周FAI为-91.94±3.97HU，CCTA图像后处理结果显示D组PCI疗效差冠周FAI为-71.62±4.79HU，CCTA图像后处理结果显示E组CABG疗效好冠周FAI为-89.38±3.07HU，CCTA图像后处理结果显示F组CABG疗效差冠周FAI为-71.69±3.79HU，见表3。

表3 各组冠周FAI相关性分析

分组	冠周FAI	t	P
A组	-89.71±5.56*	28.552	<0.001
B组	-71.35±4.39		
C组	-91.94±3.97	32.319	<0.001
D组	-71.62±4.79		
E组	-89.38±3.07*	16.362	<0.001
F组	-71.69±3.79		

注：*P<0.05表示与C组-支架疗效好比较有统计学意义。

采用两独立样本t检验比较各组冠周FAI在干预措施下的差异性。结果表明，三种干预措施下冠周FAI差异有统计学意义(P<0.05)。

采用两独立样本方差分析，冠周FAI在B组-药物疗效差、D组-支架疗效差以及F组-CABG疗效差组间结果比较，发现冠周FAI水平差异无统计学意义(P>0.05)；冠周FAI在A-组药物疗效好、C组-支架疗效好以及E组-CABG疗效好组间结果比较，发现冠周FAI表达水平差异有统计学意义(P<0.05)。而进一步两两比较发现，在冠周FAI表达水平上，C组-支架疗效好显著高于A组-药物疗效好以及E组-CABG疗效好(P<0.05)，而A组-药物疗效好与E组-CABG疗效冠周FAI表达水平差异无统计学意义(P>0.05)。

3 讨 论

PVAT类中的PCAT是一种环绕冠状动脉的脂肪组织，其通过血管滋养管与冠状动脉相通，有着同PVAT相似的脂肪细胞表型和分泌功能，深度介入到动脉粥样硬化改变中^[3-5]。冠周FAI作为一种非侵入性方法可应用于临床对CAD患者发病、治疗及后续疗效进行监控，它通过检测冠状动脉炎症对PCAT重塑实现。这种重塑来源于一种“由内到外”信号传递，上述CAD风险因素致使冠状动脉产生炎症，此时冠状动脉血管内其他细胞借助管壁血管滋养管释放促炎症细胞因子、趋化因子、生长因子等^[4-5,18]，在这些炎症介质作用下，脂肪细胞体积缩小，细胞内脂质生成受到抑制，脂质积累减少，一部分脂肪分解后化合水逐渐取代细胞内脂质，使得细胞外液增加，脂肪细胞外环境中化合水增加，发生了水肿现象，即细胞内脂质产生了梯度变化，由脂相转变为水相，且这

种作用是动态变化的^[19]。上述PCAT空间的衰减变化可以被冠周FAI捕捉到^[7]。“由内到外”信号网络允许将冠状动脉炎症传递给PCAT，所以通过检测炎症动脉周围PCAT变化继而识别冠状动脉炎症。据Antonopoulos报道^[7]冠周FAI可以单独成为CAD检测生物标记物，它可能会在三级预防中对个体CAD风险分层和临床管理产生影响。

冠周FAI可以评价CAD患者疗效，据Oikonomou等^[20]报道，急性冠脉综合征(acute coronary syndrome, ACS)患者治疗6个月，无论是病变血管周围还是冠状动脉树近端冠周FAI都发生了较大改变，表明AMI治疗后不仅减轻了病变血管炎症程度，而且还抑制了冠状动脉树整体的炎症程度。由此，冠周FAI是监测他汀类药物动态疗效的实用性工具^[21]。支架内再狭窄(In-stent restenosis, ISR)是导致长期PCI失效乃至血运重建最终失败的主要原因^[22]。这一过程可能发生在PCI术后数月数年到数年，但与冠状动脉内原生动脉粥样硬化病变发展过程相比则迅速的多^[23]。冠周FAI低错误率及可行性使其可以应用于PCI疗效评估^[24]。Jason等^[24]测量出ISR导致支架失败的冠周FAI约-79.0±12.6HU，未失败的约-85.9±10.3HU，与本研究的结果相近，体现了本研究的客观性。Qin等报道^[7,24]ISR患者支架周围冠周FAI明显高于非ISR患者，这与本研究结果相同。总之，基于CCTA的冠周FAI有可能识别ISR而不需要额外成本和医疗辐射。目前为止，还没有报道使用CCTA衍生人工智能测量冠周FAI对CABG后的患者进行评估分析，这可能是CABG独特的术后改变导致，尽管冠周FAI的概念来源于CABG后收集的血管及脂肪组织。

目前，Antonopoulos等^[7]认为CAD引发冠状动脉粥样硬化改变是不可逆的，代表着血管壁永久性结构变化。即对CAD患者患者进行干预，只要血管内炎症持续发生，冠状动脉粥样硬化将继续进展，可称为残余炎症风险(residual inflammatory risk, RIR)。据报道^[26-27]：即使对CAD患者冠状动脉粥样硬化进程实施了医疗干预，但由于残存冠状动脉炎症存在，患者未来仍处于心血管事件心血管高风险可能。有报道^[28]称PROVEN-ITTIMI实验将4162名ACS患者按照他汀类药物剂量随机分组，实验结果是：即使在高强度他汀组，也有464次出现死亡；另外还有275次复发事件包括：AMI、中风、需要再住院的急性心血管事件以及30天以内需要血管重建等。在另外一项研究中^[28-30]接受高强度他汀类药物治疗的慢性冠脉综合征(chronic coronary syndrome, CCS)患者未来心血管事件风险仍然增加60%。而在接受了高强度他汀类药物、改变生活方式以及按照指南接受药物治疗的ACS和CCS患者中发现RIR仍旧存在^[28,30]。此外，Guedeney等研究^[31]表明，RIR与PCI治疗后患者不良结局相关；高RIR患者中，AMI、中风或全因死亡率为152/1000人每年；低RIR患者中，AMI、中风或全因死亡率为64/1000人每年；而调整了众多影响因素后，高RIR患者最终结果的相对风险是低RIR患者两倍多，死亡相对风险则超过三倍。这些研究证实：至少1/3AMI患者已经接受了高强度他汀类药物和其他治疗(如PCI)仍然存在RIR；且RIR与临床相关的AMI、卒中和各种原因死亡率升高相关。

目前缺乏识别分类RIR的有效方法，难以评判CAD患者疗效是否需要辅助治疗。因此，有必要提出一种新颖、高效及经济的预测模型，该模型不仅要求关注区域管腔狭窄程度，还能反映炎症活跃状态。目前报道临床评估冠状动脉炎症的方法主要血浆生物标志物(如促炎性细胞因子等)，不过其与冠状动脉粥样硬化形成过程没有直接关系，并且其在评价局部血管特征方面性能较差^[32-33]。再者，侵入性检查如血管内超声和光学相干断层扫描由于不能显示整个冠状动脉树、患者不易配合及造价昂贵等劣势较难在临床上广泛使用^[34-35]。还有非侵入性检查^[36-37]如心脏核磁共振与PET CT成像使用动脉摄取放射性示踪剂如十八氟-氟脱氧葡萄糖-正电子发射断层扫描(¹⁸F-FDG positron emission tomography computed tomography, ¹⁸F-FDG PET CT)和十八氟-氟化钠(¹⁸F-NAF)则因成本高、缺乏实用性等缺点，无法全面提供冠状动脉炎症的疗效信息。

本研究采用CCTA衍生人工智能测量冠周FAI评估冠状动脉粥样硬化疗效则满足了上述要求。CCTA是一种无创的影像检查手

段,不仅可以直观显示管腔狭窄程度,而且可以呈现病变范围及下游的血流动力学变化,还可以测量动脉粥样硬化血管斑块结构参数^[38-41]。冠周FAI不受冠状动脉钙化程度影响^[17];在一至三级心血管疾病预防中都有价值^[7,17];可以指导CAD患者的医疗管理。近年来,以机器学习和深度学习为特征的人工智能可以提取CCTA扫描中的“隐藏数据”,有助于深入研究经典疾病定义、基因组构成和深度表型分析,能够增强对心血管疾病的理解程度,进行快速、准确和稳健的各项研究(冠周FAI测量),有助于预防未来的不良事件发生,实施精准治疗以提高患者生活质量^[42-44]。

本研究回顾性探讨了CCTA衍生人工智能测量冠周FAI评估冠状动脉粥样硬化疗效情况发现:一部分CAD患者经过单纯药物如:他汀类药物为主,辅其他慢性药物治疗以及血运重建如:PCI和CABG后疗效良好;而另一部分CAD患者在经过上述治疗后疗效较差,同前者相比后者冠周FAI增高。这种增高现象可以在患者症状出现之前被检测到,说明冠周FAI增加可能先于新发冠状动脉粥样硬化形成。本研究还发现:PCI疗效强于药物及CABG。本研究中发现CAD患者治疗方法和疗效情况与临床指标呈不同相关性,对于这个结果尚需进一步探究。该研究有几个局限性:一、本研究是一项小样本、单中心及回顾性研究,入组患者属于非多中心接受CCTA成像的患者。而多中心前瞻性队列研究中大量样本可能会减少这种偏差;二、本研究没有讨论PCAT衰减参数与心脏事件、斑块特征(包括斑块数量、冠状动脉钙化评分、斑块类型和斑块负荷)之间关系,因此,需要后续研究以进一步评估;三、本研究未收集患者相关炎症因子(如白细胞介素-6、白细胞介素-8和肿瘤坏死因子- α 等),故不能全面判断冠状动脉炎症的程度。

冠周FAI是CCTA评价的无创性定量成像生物新型标志物。基于CCTA衍生人工智能测量冠周FAI可评估冠状动脉粥样硬化疗效,可以测量并分类RIR,还可以指导对需要预防性药物患者进行提前用药,避免了增加成本及辐射暴露。至此,冠周FAI可以通过评估CAD影像风险特征来提升CAD疗效及预后评价状况。

参考文献

- [1] Tsao CW, Aday AW, Almarazooq ZI, et al. Heart disease and stroke statistics—2022 update: a report from the American heart association[J]. *Circulation*, 2022, 145(8): 153–639.
- [2] 北京高血压防治协会, 北京糖尿病防治协会, 北京慢性病防治与健康教育研究会等基层心血管病综合管理实践指南2020[J]. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2020, 12(8): 1–73.
- [3] 周茜洋, 唐春香, 张龙江等. 冠状动脉周围脂肪影像学的研究进展[J]. *中华放射学杂志*, 2021, 55(3): 320–323.
- [4] Tinajero MG, Gottlieb AI. Recent developments in vascular adventitial pathology: the dynamic adventitia as a complex regulator of vascular disease[J]. *The American Journal of Pathology*, 2020, 190(3): 520–534.
- [5] Hillock-Watling C, Gottlieb AI. The pathobiology of perivascular adipose tissue (PVAT), the fourth layer of the blood vessel wall[J]. *Cardiovascular Pathology*, 2022, 61(12): 107459.
- [6] Antoniadou Charalambos, Antonopoulos Alexios S, Deanfield John. Imaging residual inflammatory cardiovascular risk[J]. *Eur Heart J*, 2020, 41(6): 748–758.
- [7] A. S. Antonopoulos, F. Sanna, N. Sabharwal, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat[J]. *Science Translational Medicine*, 2017, 9(398): 1–12.
- [8] Klüner LV, Oikonomou EK, Antoniadou C. Assessing cardiovascular risk by using the fat attenuation index in coronary CT angiography[J]. *Radiology Cardiothoracic Imaging*, 2021, 3(1): 1–10.
- [9] Cury RC, Abbara S, Achenbach S, et al. CAD-RADS (TM) coronary artery disease-reporting and data system. An expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT), the American College of Radiology (ACR) and the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). Endorsed by the American College of Cardiology[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2016, 10(4): 269–281.
- [10] 中国心血管病风险评估和管理指南联合工作组. 中国心血管病风险评估和管理指南[J]. *中国循环杂志*, 2019, 34(1): 4–28.
- [11] 中华医学会心血管病学分会, 中国康复医学会心脏预防与康复专业委员会, 中国老年学和老年医学学会心脏专业委员会, 等. 中国心血管病一级预防指南[J]. *实用心脑血管病杂志*, 2021, 29(1): 44–64.
- [12] O P M, Friedhelm B, Rafa S, et al. European Association for Cardio-Thoracic Surgery Statement regarding the 2021 American Heart Association/American College of Cardiology/Society for Cardiovascular Angiography and Interventions Coronary Artery Revascularization guidelines[J]. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 2022, 62(1): 60.
- [13] Lawton JS, Tamis-Holland JE, Bangalore S, et al. 2021 ACC/AHA/SCAI Guideline for Coronary Artery Revascularization: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 79(03): 21–129.
- [14] Law Helen K W, Cheung Chung Yan, Ng Hoi Yee, et al. Chemokine up-regulation

- in SARS-coronavirus-infected, monocyte-derived human dendritic cells[J]. *Blood*, 2005, 106(7): 2366–2374.
- [15] Mester Andras, Benedek Imre, Rat Nora, et al. Imaging cardiovascular inflammation in the COVID-19 era[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(6): 1114.
- [16] Qin Bin, Li Zhengjun, Zhou Hao, et al. The predictive value of the perivascular adipose tissue ct fat attenuation index for coronary in-stent restenosis[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9(5): 822308.
- [17] Oikonomou EK, Marwan M, Desai MY, et al. Non-invasive detection of coronary inflammation using computed tomography and prediction of residual cardiovascular risk (the CRISP CT study): a post-hoc analysis of prospective outcome data[J]. *Lancet*, 2018, 392(10151): 929–939.
- [18] Raun CC, Zhu DL, Chen QZ, et al. Perivascular adipose tissue-derived complement 3 is required for adventitial fibroblast functions and adventitial remodeling in deoxycorticosterone acetate-salt hypertensive rats[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2010, 30(12): 2568–2574.
- [19] Ayala-Lopez N, Watts SW. New actions of an old friend: perivascular adipose tissue's adrenergic mechanisms[J]. *British Journal of Pharmacology*, 2017, 174(20): 3454–3465.
- [20] Oikonomou EK, Williams MC, Kotanidis CP, et al. A novel machine learning-derived radiotranscriptomic signature of perivascular fat improves cardiac risk prediction using coronary CT angiography[J]. *Eur Heart J*, 2019; 40(43): 3529–3543.
- [21] Dai X, Yu L, Lu Z, et al. Serial change of perivascular fat attenuation index after statin treatment: insights from a coronary CT angiography follow-up study[J]. *Int J Cardiol*, 2020, 319(15): 144–149.
- [22] 何思诺. 冠心病老年患者PCI术后冠状动脉血流和支架内再狭窄的危险因素分析[J]. *罕少疾病杂志*, 2022, 29(12): 57–58.
- [23] Mazin I, Paul G, Asher E. Neoatherosclerosis—from basic concept to clinical implication[J]. *Thromb Res*, 2019, 178(1): 12–16.
- [24] Qin Bin, Li Zhengjun, Zhou Hao et al. The predictive value of the perivascular adipose tissue ct fat attenuation index for coronary in-stent restenosis[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9(05): 822308.
- [25] Nogi Jason, Kim Jiwon, Layland Jamie, et al. Peri-coronary adipose tissue is a predictor of stent failure in patients undergoing percutaneous coronary intervention[J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2023, 53(9): 61–66.
- [26] Ridker Paul M. How common is residual inflammatory risk? [J]. *Circ Res*, 2017, 120(4): 617–619.
- [27] Lawler PR, Bhatt DL, Godoy LC, et al. Targeting cardiovascular inflammation: next steps in clinical translation[J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(1): 113–131.
- [28] Cannon CP, Braunwald E, McCabe CH, et al. Intensive versus moderate lipid lowering with statins after acute coronary syndromes[J]. *N Engl J Med*, 2004, 350(15): 1495–1504.
- [29] A. D. Pradhan, A. W. Aday, L. M. Rose, et al. Residual inflammatory risk on treatment with PCSK9 inhibition and statin therapy[J]. *Circulation*, 2018, 138(2): 141–149.
- [30] P. R. Lawler, D. L. Bhatt, L. C. Godoy, et al. “Targeting cardiovascular inflammation: next steps in clinical translation” [J]. *European Heart Journal*, 2021, 42(1): 113–131.
- [31] Guedeney P, Claessen BE, Kalkman DN, et al. Residual inflammatory risk in patients with low LDL cholesterol levels undergoing percutaneous coronary intervention[J]. *Am Coll Cardiol*, 2019, 73(3): 2401–2409.
- [32] R. Lee, M. Margaritis, K. M. Channon, et al. Evaluating oxidative stress in human cardiovascular disease: Methodological aspects and considerations[J]. *Curr J Med Chem*, 2012, 19(16): 2504–2520.
- [33] M. Margaritis, A. S. Antonopoulos, J. Digby, et al. Interactions between vascular wall and perivascular adipose tissue reveal novel roles for adiponectin in the regulation of endothelial nitric oxide synthase function in human vessels[J]. *Circulation*, 2013, 127(22): 2209–2221.
- [34] Mushenkova NV, Summerhill VI, Zhang D, et al. Current advances in the diagnostic imaging of atherosclerosis: insights into the pathophysiology of vulnerable plaque[J]. *Int Mol J Sci*, 2020, 21(8): 2992.
- [35] Stone GW, Maehara A, Lansky AJ, et al. A prospective natural-history study of coronary atherosclerosis[J]. *N Engl J Med*, 2011, 364(3): 226–235.
- [36] Ardissino M, McCracken C, Bard A, et al. Pericardial adiposity is independently linked to adverse cardiovascular phenotypes: a CMR study of 42,598 UK Biobank participants[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022, 23(11): 1471–1481.
- [37] T. Christen, Y. Sheikine, V. Z. Rocha, et al. Increased glucose uptake in visceral versus subcutaneous adipose tissue revealed by PET imaging[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2010, 3(8): 843–851.
- [38] Sun JT, Sheng XC, Feng Q, et al. Pericoronary fat attenuation index is associated with vulnerable plaque components and local immune-inflammatory activation in patients with non-ST elevation acute coronary syndrome[J]. *Journal of the American Heart Association*, 2022, 11(02): 1–12.
- [39] 陈伟, 杨晓峰, 马丽. CTA成像在冠心病筛查中的应用价值及其疾病相关危险因素 Logistic 回归分析[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 20(5): 54–56.
- [40] 庄瑛, 赵森, 张进. 冠脉CTA诊断缺血性心肌病的价值观察[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(5): 61–62, 66.
- [41] 王颖, 何丽, 曹红岩. 多层螺旋CT在冠脉慢性完全闭塞性病变中评估冠状动脉主干及左心室功能的价值研究[J]. *罕少疾病杂志*, 2023, 30(07): 47–48.
- [42] Greco F, Mallio CA. Artificial intelligence and abdominal adipose tissue analysis: a literature review[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(10): 4461–4474.
- [43] Pickhardt PJ, Graffy PM, Zea R, et al. Automated CT biomarkers for opportunistic prediction of future cardiovascular events and mortality in an asymptomatic screening population: a retrospective cohort study[J]. *Lancet Digit Health*, 2020, 2(4): 192–200.
- [44] de Marvao A, Dawes TJW, O'Regan DP. Artificial intelligence for cardiac imaging-genetics research[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2020, 6(2): 195.

(收稿日期: 2023-11-29)

(校对编辑: 姚丽娜)