

本文引用: 史张, 刘崎, 滕忠照, 等. 影像技术在动脉粥样硬化性疾病中的应用进展[J]. 中国动脉硬化杂志, 2022, 30(1): 77-82.

[文章编号] 1007-3949(2022)30-01-0077-06

· 文献综述 ·

影像技术在动脉粥样硬化性疾病中的应用进展

史张¹, 刘崎¹, 滕忠照², 陆建平¹

(1. 海军军医大学第一附属医院, 上海市 200433; 2. 剑桥大学影像学系, 剑桥郡, 英国)

[关键词] 动脉粥样硬化; 超声; 计算机断层扫描; 磁共振; 分子影像

[摘要] 随着全身血管成像技术的迅速发展, 动脉粥样硬化所形成的血管狭窄和斑块能够达到可视化定性及定量评估。多模态成像可通过评估血管壁斑块的组成和代谢过程来进行心脑血管风险的预测。本文概述了当前影像技术在动脉粥样硬化性疾病中的应用进展。

[中图分类号] R54

[文献标识码] A

Application progress on imaging technology of atherosclerotic disease

SHI Zhang¹, LIU Qi¹, TENG Zhongzhao², LU Jianping¹

(1. The First Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200433, China; 2. Department of Radiology, University of Cambridge, Cambridgeshire, UK)

[KEY WORDS] atherosclerosis; ultrasound; computed tomography; magnetic resonance image; molecular imaging

[ABSTRACT] Structural vascular imaging throughout the body has advanced rapidly, and the atherosclerotic stenosis and plaque could be visualized as well as qualitatively and quantitatively assessed. Multimodality imaging can improve cardiovascular and cerebral risk prediction by informing on the constituency and metabolic processes within the vessel wall. This review will provide an overview of current imaging techniques for the imaging of atherosclerotic disease.

动脉粥样硬化(atherosclerosis, As)可造成血管的管腔狭窄及病变部位斑块形成, 从而引起突发性缺血事件。随着全身血管成像技术的迅速发展, As 所形成的血管狭窄和斑块能够达到可视化定性及定量评估, 且研究发现其某些形态特征与疾病的进展密切相关^[1]。As 成像包括有创血管成像和无创血管成像两大部分, 其中有创成像分为血管内超声(intra-vascular ultrasound, IVUS)、光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)、近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)分析和数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)。而动脉粥样硬化的无创血管成像技术有超声(ultrasound, US)、计算机断层扫描血管造影(computed tomographic angiography, CTA)、磁共振(magnetic reso-

nance image, MRI)、核医学及分子成像。因此, 本文对用于动脉粥样硬化性疾病成像技术的基础研究及临床应用进行综述。

1 动脉粥样硬化斑块形成的病理机制

As 是中型和大型动脉的多灶性免疫炎症性疾病。一些已被证实的高危因素(如高血压、高胆固醇血症和吸烟等)会造成系统性血管内膜损伤, 而引起内皮功能障碍^[2]、脂蛋白氧化^[3]、游离氧自由基产生^[4]以及细胞迁移^[5]等一系列病理生理反应。

As 斑块由脂质坏死核心和内膜表面的纤维帽组成, 有生物活性的巨噬细胞聚集在纤维帽中并降

[收稿日期] 2021-01-01

[修回日期] 2021-04-19

[基金项目] 国家自然科学基金(81670396); 海军军医大学第一附属医院“234 学科攀峰计划”(2019YPT001)

[作者简介] 史张, 博士研究生, 主要研究方向为心脑血管动脉粥样硬化性疾病的影像诊断, E-mail 为 shizhang2080007@126.com。通信作者陆建平, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为无创血管成像及腹部影像, E-mail 为 cjr.lujianping@vip.163.com

解血管平滑肌细胞产生的细胞外基质,同时,脂质坏死核心造成了缺氧的微环境并刺激血管生成^[6]。按其生物活性可分为易损斑块和稳定性斑块。易损斑块易于破裂,并且具有较大的脂质坏死核心以及伴有富含巨噬细胞的较薄纤维帽和微钙化等病理学特征^[7]。而易损斑块破裂可能导致突发的动脉闭塞、组织灌注异常和终末器官的梗死^[8],临床上如何快速、准确地识别易损斑块对 As 的诊断和治疗尤为重要。

2 成像技术的应用

随着血管成像技术的发展,在 As 初步筛查中,以 DSA 为代表的传统管腔成像方法已经逐步被以解剖形态学、组织代谢学及分子示踪学的综合评估无创成像技术所代替,使 As 的诊断更加精准。目前,As 无创成像技术可以应用于全身血管评估,可分为管腔评估和管壁评估两大类(表 1)。

表 1 影像技术在 As 中应用的概述
Table 1 Imaging technology in As

As 评估	有创成像技术	无创成像技术
管腔评估		
管腔狭窄程度	IVUS、OCT、DSA	US、CTA、MRA
管壁评估		
纤维帽及斑块表面	IVUS、OCT	hrVW-MRI(头颈部斑块常见)
脂质坏死核心	IVUS、OCT、NIRS	US、CTA、hrVW-MRI
斑块内出血	OCT、NIRS	US、hrVW-MRI(MPRAGE 序列)
斑块内新生血管	IVUS、OCT、NIRS	PET(¹⁸ F-MISO, ¹⁸ F-Galacto-RGD)
巨噬细胞浸润	OCT、NIRS	MRI(USPIO)、PET(¹⁸ F-FDG)
微钙化	—	PET(¹⁸ F-NaF)
斑块强化	—	微泡 US、CTA、hrVW-MRI
斑块代谢情况	—	MRI(USPIO)、PET(¹⁸ F-FDG)

注:hrVW-MRI:高分辨率血管壁磁共振成像(high-resolution vessel wall MRI);¹⁸F-MISO:¹⁸ 氟-甲氧甲基硝基咪唑乙醇(¹⁸F-misonidazole);¹⁸F-Galacto-RGD:¹⁸ 氟-低聚-精氨酸-甘氨酸-天冬氨酸(¹⁸F-Galacto-Arg-Gly-Asp);¹⁸F-FDG:¹⁸ 氟-氟脱氧葡萄糖(¹⁸F-fluorodeoxyglucose)。“—”:表示无法获取。

2.1 管腔评估

通常,As 会造成血管腔狭窄,而评判狭窄程度则是管腔评估的主要任务。临床为了方便评估,通常按照轻度(狭窄率 $\leq 50\%$)、中度($50\% < \text{狭窄率} \leq 70\%$)、重度(狭窄率 $> 70\%$)及闭塞(狭窄率 $= 100\%$)四个等级进行定性评估^[9]。目前大多数成像技术均可实现管腔狭窄程度的评估,常见的无创检查主要为 CTA 和 MRA,但 DSA 仍是诊断的金标准。在早期的动物实验中有关于动脉狭窄程度的研究,近些年来主要应用于临床诊断,例如冠状动脉、颅脑大动脉、颈动脉、胸腹主动脉和下肢动脉的狭窄程度测定,为诊疗提供依据。2016 年,英国国立健康与护理研究所修订了其指南,推荐冠状动脉 CT 血管造影(coronary computed tomographic angiography, CCTA)作为可疑心源性胸痛患者的首选检查手段^[10]。CCTA 在使用 50% 狭窄率作为临界值后,其诊断冠心病的敏感度和阴性预测值均提高到

99%^[11]。因此,CCTA 提供了一种可靠的方法,可将低风险和中风险组的冠状动脉疾病排除在外。另外,周围血管疾病主要涉及双下肢各种闭塞性动脉疾病,常见的病因是动脉壁钙化,而造成钙化的主要原因是 As 引起的内膜钙化和糖尿病及慢性肾病引起的动脉内膜透壁性钙化。目前,CTA 较常用于下肢大血管管腔的成像,但常会因为血管壁钙化造成图像伪影而可能高估动脉狭窄程度(如腘动脉以下),而 MRA 对管腔的评估则不会受到管壁钙化的影响。

2.2 管壁评估

As 的病理特征是动脉内膜损伤后,巨噬细胞吞噬脂质成分而后形成泡沫细胞进而形成脂质斑块,因此 As 斑块的评估便成为管壁评估的重要任务。无创管壁成像技术主要以高分辨力磁共振管壁成像(high-resolution vessel wall MRI, hrVW-MRI)为主,但在冠状动脉粥样硬化中 CTA 却具有其独特的

优势。临床上,斑块的评估主要包括 As 斑块易损性的判别和治疗后疗效评价与预后评估。

2.2.1 判别 As 斑块的易损性 US、CT、MRI 和核医学成像技术均可判别斑块的易损性。US 检查多用于颈动脉和颅内动脉的斑块成像,可以根据斑块表面形态和组成成分来评估斑块的易损性^[12]。首先,在颈动脉斑块的超声成像中,研究者发现颈动脉超声可以检测到斑块的表面情况,表面光滑的斑块多为稳定斑块,而不规则的斑块或溃疡斑块则是易损斑块^[13]。近些年,微泡造影剂也使用于临床,可以通过斑块增强程度来评估斑块内新生血管的多少,而这与炎症的程度有关^[14]。其次,经颅多普勒超声是颅内血管超声成像的方法,主要用于评估脑血管内血流,可以检测高强度瞬态信号,这与在动脉内流动的固体颗粒有关。有研究证明检测到这类信号提示患者的脑血管事件风险可能增加 4 倍,可间接反映斑块的易损性^[15]。

多层螺旋 CT 血管成像因其扫描速度快和空间分辨率高而成为无创斑块成像的首选技术,其除了检测管腔狭窄外,还可以判别斑块的形态特征、结构特点等,能检测一些与斑块易损性相关的特征,如:阳性重构(血管管腔呈轻度狭窄,而血管壁的斑块向外扩张);散在多发钙化灶,尤其是点状微钙化;低密度的脂质核心和明显高密度的斑块内出血^[16]。当有明确 As 高危因素的患者伴有以上任何斑块特征时,其发生急性冠状动脉综合征或急性缺血性脑卒中的可能性更大。在冠心病的研究中,冠状动脉钙化积分(coronary artery calcium score, CACS)是一种非增强的 CT 成像技术,用于估计血管床的总体钙化评估。CACS 提高了对中度缺血性心脏病患者未来心血管事件的预测(弗朗汉风险评分>10%)^[11]。特别是,CACS 捕捉高风险患者,否则他们将使用传统评分方法错误分类。然而,CTA 有辐射,并且由于边缘模糊效应,其在识别薄纤维帽方面并不理想。

MRI 可以使用不同的对比加权成像手段来显示 As 斑块的不同组织成分特征(如水、脂质和纤维等)。然而,由于其低空间分辨率,最适合于静态的大动脉成像,如颅内动脉和颈动脉,而冠状动脉由于其小视野扫描和连续的运动特征而难以成像。MRI 最大的优势在于能够评估纤维帽的表面形态、测量纤维帽的厚度、计算斑块体积、观测斑块强化程度和内出血^[17-18]。大量研究表明易损斑块的形态学特征主要有不规则的斑块表面、薄的纤维帽、较大的脂质核心、斑块重构、斑块内出血、斑块微钙

化以及斑块强化^[19-22]。近年来,影像组学和人工智能在医学中的应用明显增加,MRI 以其高分辨图像质量的优势成为研究的重点,有研究者将影像组学应用于易损斑块的判别,并发现该方法对症状性斑块的判别能力要明显优于传统形态学特征^[23],同时也发现直方图作为简单、便捷的一阶组学特征也可用于斑块易损性的评估,并且准确性、灵敏度和特异度均优于传统的形态学特征^[24]。

核医学由于其全身和靶向成像能力适用于 As 这类系统性疾病的成像。¹⁸F-FDG 是目前最有效的斑块炎症显像示踪剂,特别是 FDG 能在代谢活跃的巨噬细胞中逐渐沉积。FDG 在冠状动脉斑块成像中因邻近心肌的强摄取而使斑块本身显像具有挑战性,¹⁸F-NaF 的摄取对微钙区域更具选择性,是研究冠状动脉的理想示踪剂。在一项基于 PET 和 CTA 对兔 As 模型的研究中,¹⁸F-NaF 能够更准确地检测微钙化,并与颈动脉易损斑块优先结合^[25]。同样,在人群研究中,对 119 名参与者的研究表明,¹⁸F-NaF PET/CT 与潜在心绞痛、先前的心血管事件和弗雷明汉风险评分相关^[26]。在外周 As 斑块的研究中,微钙化也是易损斑块评判的重要特征。Chowdhury 等^[27-28]对 50 例症状性外周动脉疾病的患者在血管成形术前和术后 6 周分别行股浅动脉¹⁸F-FDG 和¹⁸F-NaF 的 PET/CT 成像,结果发现两种示踪剂都能较好地辨别出 12 个月内会发生再狭窄的患者,其中¹⁸F-NaF 表现得更为突出。颈动脉斑块对¹⁸F-FDG 的高摄取已被证明与巨噬细胞的积累有关^[29]。¹⁸F-NaF 进行 PET 成像可以检测出斑块的生物学活性,其以特异性结合富含脂质坏死核心为判别易损斑块为特征^[27]。PET/MRI 可通过评估微钙化、血栓、脂质核心、斑块破裂和坏死性不稳定斑块的结合显著提高易损斑块的检出率,并通过脂质核心等特征来判断斑块易损性和破裂风险,显著提高易损斑块的检出率。

2.2.2 评估 As 斑块的疗效与预后 动脉粥样硬化性疾病的治疗主要分为药物治疗和支架治疗,多模态成像技术为治疗后斑块变化的评估提供了可靠的技术支持。目前,药物治疗中,他汀类药物在心脑血管疾病中的应用较为广泛,是临床指南推荐的一线用药,具有抵抗炎症和稳定斑块的作用。一项基于颈部血管 US 对脑梗死合并颈动脉硬化的患者在住院药物治疗后的随访研究表明,1 年的生存情况与无配偶、文化水平低及合并心脏病有高度相关性^[30]。另一个基于 NIRS 的案例表明,匹伐他汀和依折麦布联合使用,同时强化降脂治疗 1 个月后,

NIRS 提示冠状动脉斑块黄色信号明显减少,表明 NIRS 可用于定量评估 As 斑块的组成成分,并可量化坏死核心脂质含量减少程度^[31]。此外,¹⁸F-FDG 的 PET 成像技术具有高度可重复性,在颈动脉斑块治疗的过程中,对斑块变化的检测可能发挥作用^[32]。

在术后取栓或支架治疗中,多模态成像可用于评估治疗效果和预测患者预后。一项对急性冠状动脉综合征患者进行抽吸血栓效果进行评估的研究,通过 IVUS 量化血栓抽吸后管腔体积增加的百分比来说明积极的干预对支架手术成功率有所帮助^[33]。CT 可以对颈动脉内膜切除术进行治疗评估,研究发现该手术对有症状的高级别颈动脉狭窄有益^[34]。超声是有症状颈动脉疾病风险分层的主要手段,利用中位灰度超声、三维超声或超声造影技术对颈部 As 进行定性及定量分析,可用于早期治疗方案的选择,对减少脑缺血事件的复发性栓塞有很重要的作用^[35]。分子影像,如超微超顺磁性氧化铁纳米粒 (ultra-small superparamagnetic iron oxide, USPIO) 介导的 MRI,不仅可以识别易损斑块,也可以对斑块进行靶向治疗以及疗效的评价^[36]。一项动物实验的研究表明,紫杉醇借助于靶向胶原 IV 型蛋白的 C11 短肽分子,将载有新型 MRI 阴性 USPIO 与杀伤性药物紫杉醇的纳米粒 UP-NP-C11 成功递送至斑块的纤维帽部位,并有效检测出家兔 As 模型的斑块位置与形态,同时动态监测到 UP-NP-C11 对斑块中的炎症细胞具有抑制作用^[37]。

3 优势与局限

目前,无论是有创还是无创的 As 成像技术通常主要关注的是血管腔和血管壁一般的形态学参数,由于检查中无法获取病理结果,因此这些特征与斑块易损程度仍只是间接相关。在斑块的成像中,有创和无创的成像技术各有利弊。

IVUS 和 OCT 均为有创的方式,但可实现可视化评估斑块及其组分。IVUS 可以直接筛查和判别破裂斑块,主要应用于冠状动脉粥样硬化性疾病中,而在非冠状动脉的斑块评估方面效果较差。OCT 以其穿透血管壁的能力和高分辨的图像优势在识别易损斑块方面表现突出,但这种方法也存在诸多弊端。首先,其主要的局限性之一是脂肪组织可以吸收光线,并其后形成阴影,限制了坏死核心之外的组织成像;其次,该技术侵入的深度有限,这可能会影响成像的准确性和易损斑块的形态学特

征及几何特征的判定。IVUS 和 OCT 有创成像的方法虽各有利弊,但将 OCT 和 IVUS 相结合可以更精确测量纤维帽的厚度,这是区分斑块破裂与否的最佳方法。

较之有创成像,无创 As 的成像技术因其便捷、快速、准确而被临床广泛应用。无创的技术方法各有所长,联合应用可以提高疾病诊断和风险评估的准确性。超声检查是颈动脉、冠状动脉、下肢动脉的首选方式,其缺点是操作人为因素影响大、解剖结构无法整体评估。无创 CTA 的方法是临床常用的全身血管成像的技术,其优势在于对钙化斑块的检测敏感性较高,其缺点是对斑块成分的判别能力较弱、检查有 X 射线的辐射暴露、有金属支架治疗或钙化较为严重时血管显示伪影较重等。目前,高分辨 MRI 是无创血管壁成像最佳技术手段,有助于斑块的可视化评估和形态学特征测量,该方法已形成国际专家共识^[19],并表明可以区分早期、中期以及晚期的 As 斑块,并能识别纤维帽破裂。但这种方法耗时较长,很多急性卒中患者难以长时间配合,并且血管壁内可能有热量的积聚。较之以上三种传统影像方法,分子影像在斑块的诊断、治疗及疗效评估上有极大的作用,有助于更好地了解斑块的易损性。然而,目前能用于临床诊断和治疗 As 斑块的特异性示踪剂还较少,大多数探针及靶向标记物都尚属于实验研究阶段。

4 小结

影像技术在动脉粥样硬化性疾病的成像中主要分为有创和无创两类,可以对血管腔和血管壁进行定性、定量的结构和功能评估。多模态血管成像成为实验研究和临床应用的主流,分子影像的发展让斑块代谢成像和诊治一体化成为可能,将这些成像技术转化为临床实践是 As 诊疗中的又一重要课题。

[参考文献]

- [1] BÄCK M, YURDAGUL A J, TABAS I, et al. Inflammation and its resolution in atherosclerosis: mediators and therapeutic opportunities[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2019, 16(7): 389-406.
- [2] SOUILHOL C, SERBANOVIC-CANIC J, FRAGIADAKI M, et al. Endothelial responses to shear stress in atherosclerosis: a novel role for developmental genes [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2020, 17(1): 52-63.
- [3] PIRILLO A, BONACINA F, NORATA G D, et al. The in-

- terplay of lipids, lipoproteins, and immunity in atherosclerosis[J]. *Curr Atheroscler Rep*, 2018, 20(3): 12.
- [4] ALFAIDI M, ACOSTA C H, WANG D, et al. Selective role of Nck1 in atherogenic inflammation and plaque formation[J]. *J Clin Invest*, 2020, 130(8): 4331-4347.
- [5] CARDOSO L, MICROCALCIFICATIONS W S, GENESIS T. Growth, and biomechanical stability in fibrous cap rupture[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2018, 1097: 129-155.
- [6] GUO L, AKAHORI H, HARARI E, et al. CD163⁺ macrophages promote angiogenesis and vascular permeability accompanied by inflammation in atherosclerosis[J]. *J Clin Invest*, 2018, 128(3): 1106-1124.
- [7] SUGIZAKI Y, OTAKE H, KAWAMORI H, et al. Adding alirocumab to rosuvastatin helps reduce the vulnerability of Thin-Cap fibroatheroma: an ALTAIR trial report [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(6): 1452-1454.
- [8] ANDERSON C S, HUANG Y, LINDLEY R I, et al. Intensive blood pressure reduction with intravenous thrombolysis therapy for acute ischaemic stroke (ENCHANTED): an international, randomised, open-label, blinded-endpoint, phase 3 trial[J]. *Lancet*, 2019, 393(1174): 877-888.
- [9] SAMUELS O B, JOSEPH G J, LYNN M J, et al. A standardized method for measuring intracranial arterial stenosis [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2000, 21(4): 643-646.
- [10] ARCHBOLD R A. Comparison between National Institute for Health and Care Excellence (Nice) and European Society of Cardiology (ESC) guidelines for the diagnosis and management of stable angina: implications for clinical practice[J]. *Open Heart*, 2016, 3(1): e000406.
- [11] 吕滨, 张佳胤, 韩磊. 心脏冠状动脉 CT 血管成像技术规范应用中国指南[J]. *中华放射学杂志*, 2017, 51(10): 732-743.
- [12] ZAMANI M, SKAGEN K, SCOTT H, et al. Advanced ultrasound methods in assessment of carotid plaque instability: a prospective multimodal study[J]. *BMC Neurol*, 2020, 20(1): 39.
- [13] HURFORD R, WOLTERS F J, LI L, et al. Prevalence, predictors, and prognosis of symptomatic intracranial stenosis in patients with transient ischaemic attack or minor stroke: a population-based cohort study[J]. *Lancet Neurol*, 2020, 19(5): 413-421.
- [14] SCHINKEL A, BOSCH J G, STAUB D, et al. Contrast-enhanced ultrasound to assess carotid intraplaque neovascularization[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2020, 46(3): 466-478.
- [15] BARADARAN H, GUPTA A, ANZAI Y, et al. Cost effectiveness of assessing ultrasound plaque characteristics to risk stratify asymptomatic patients with carotid stenosis [J]. *J Am Heart Assoc*, 2019, 8(21): e012739.
- [16] MURGIA A, ERTA M, SURI J S, et al. CT imaging features of carotid artery plaque vulnerability [J]. *Ann Transl Med*, 2020, 8(19): 1261.
- [17] KASSEM M, FLOREA A, MOTTAGHY F M, et al. Magnetic resonance imaging of carotid plaques: current status and clinical perspectives [J]. *Ann Transl Med*, 2020, 8(19): 1266.
- [18] SABA L, YUAN C, HATSUKAMI T S, et al. Carotid artery wall imaging: perspective and guidelines from the AS-NR vessel wall imaging study group and expert consensus recommendations of the American society of neuroradiology [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2018, 39(2): E9-E31.
- [19] MANDELL D M, MOSSA-BASHA M, QIAO Y, et al. Intracranial vessel wall MRI: principles and expert consensus recommendations of the American society of neuroradiology [J]. *Am J Neuroradiol*, 2017, 38(2): 218-229.
- [20] LINDENHOLZ A, VAN DER SCHAAF I C, VAN DER KOLK A G, et al. MRI vessel wall imaging after intra-arterial treatment for acute ischemic stroke[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2020, 41(4): 624-631.
- [21] LINDENHOLZ A, VAN DER KOLK A G, ZWANENBURG J J, et al. The use and pitfalls of intracranial vessel wall imaging: how we do it[J]. *Radiology*, 2018, 286(1): 12-28.
- [22] ARENILLAS J F, DIELEMAN N, BOS D. Intracranial arterial wall imaging: Techniques, clinical applicability, and future perspectives[J]. *Int J Stroke*, 2019, 14(6): 564-573.
- [23] SHI Z, ZHU C, DEGNAN A J, et al. Identification of high-risk plaque features in intracranial atherosclerosis: initial experience using a radiomic approach[J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(9): 3912-3921.
- [24] SHI Z, LI J, ZHAO M, et al. Quantitative histogram analysis on intracranial atherosclerotic plaques: a high-resolution magnetic resonance imaging study [J]. *Stroke*, 2020, 51(7): 2161-2169.
- [25] 陈雪, 赵全明, 张学慧, 等. ¹⁸F-氟化钠正电子发射断层显像和 CT 对动脉粥样硬化易损斑块检测价值的初步探讨 [J]. *中华老年心脑血管病杂志*, 2019, 21(10): 1031-1035.
- [26] KWIECINSKI J, SLOMKA P J, DWECK M R, et al. Vulnerable plaque imaging using ¹⁸F-sodium fluoride positron emission tomography [J]. *Br J Radiol*, 2020, 93(1113): 20190797.
- [27] CHOWDHURY M M, TARKIN J M, ALBAGHDADI M S, et al. Vascular positron emission tomography and restenosis in symptomatic peripheral arterial disease: a prospective clinical study [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(4): 1008-1017.

- [28] FERREIRA M J, OLIVEIRA-SANTOS M, SILVA R, et al. Assessment of atherosclerotic plaque calcification using F18-NaF PET-CT[J]. *J Nuclear Cardiol*, 2018, 25(5): 1733-1741.
- [29] CHOWDHURY M M, TARKIN J M, EVANS N R, et al. ¹⁸F-FDG uptake on PET/CT in symptomatic versus asymptomatic carotid disease: a Meta-analysis[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2018, 56(2): 172-179.
- [30] 李婷, 黄欣, 罗琼, 等. 脑梗死合并颈动脉硬化住院患者随访1年的生存情况及影响因素分析[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2021, 29(1): 70-73, 86.
- [31] NISHIHARA K, KURIYAMA N, SHIBATA Y. Impact of 1 month of intensive lipid-lowering therapy on plaque composition evaluated using near-infrared spectroscopy[J]. *Eur Heart J Case Rep*, 2021, 5(2): yta569.
- [32] LEE Y B, CHOI K M. Diet-modulated lipoprotein metabolism and vascular inflammation evaluated by ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography[J]. *Nutrients*, 2018, 10(10): 1382.
- [33] ZIMARINO M, ANGERAMO F, PRASAD A, et al. Reduction of atherothrombotic burden before stent deployment in non-ST elevation acute coronary syndromes: Reduction of myocardial necrosis achieved with nose-dive manual thrombus aspiration (REMNANT) trial. A volumetric intravascular ultrasound study[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2016, 88(5): 716-725.
- [34] STREIFLER J Y, DEN HARTOG A G, PAN S, et al. Ten-year risk of stroke in patients with previous cerebral infarction and the impact of carotid surgery in the Asymptomatic Carotid Surgery Trial[J]. *Int J Stroke*, 2016, 11(9): 1020-1027.
- [35] KASPAR M, BAUMGARTNER I, STAUB D, et al. Non-invasive ultrasound-based imaging of atherosclerosis[J]. *Vasa*, 2019, 48(2): 126-133.
- [36] MERINOPOULOS I, GUNAWARDENA T, STIRRAT C, et al. Diagnostic applications of ultrasmall superparamagnetic particles of Iron oxide for imaging myocardial and vascular inflammation[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(6): 1249-1264.
- [37] DONG Y M, CHEN H W, CHEN C, et al. Polymer-lipid hybrid theranostic nanoparticles Co-delivering ultrasmall superparamagnetic iron oxide and paclitaxel for targeted magnetic resonance imaging and therapy in atherosclerotic plaque[J]. *J Biomed Nanotechnol*, 2016, 12(6): 1245-1257.

(此文编辑 秦旭平)

(上接第64页)

- [16] SHLOFMITZ E, IANTORNO M, WAKSMAN R. Restenosis of drug-eluting stents: a new classification system based on disease mechanism to guide treatment and state-of-the-art review[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2019, 12(8): e007023.
- [17] CUTLIP D, CHHABRA A G, BAIM D S, et al. Beyond restenosis: five-year clinical outcomes from second-generation coronary stent trials[J]. *Circulation*, 2004, 110(10): 1226-1230.
- [18] 张海福, 张媛媛, 张琴霞, 等. 生物可吸收聚合物涂层药物洗脱支架与耐用聚合物涂层药物洗脱支架在冠心病合并糖尿病患者中应用的比较: 临床试验 Meta 分析[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2021, 29(1): 74-81.
- [19] NAKAMURA D, DOHI T, ISHIHARA T, et al. Predictors and outcomes of neoatherosclerosis in patients with in-stent restenosis[J]. *EuroIntervention*, 2021, 17(6): 489-496.
- [20] XIAO S, ZHANG L, WU Q, et al. Development and validation of a risk nomogram model for predicting revascularization after percutaneous coronary intervention in patients with acute coronary syndrome[J]. *Clin Interv Aging*, 2021, 16: 1541-1553.
- [21] FARKOUH M E, DOMANSKI M, DANGAS G D, et al. Long-term survival following multivessel revascularization in patients with diabetes: the FREEDOM follow-on study[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 73(6): 629-638.
- [22] YONETSU T, KATO K, KIM S J, et al. Predictors for neoatherosclerosis: a retrospective observational study from the optical coherence tomography registry[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2012, 5(5): 660-666.
- [23] OSÓRIO G V, BLAYA P, LASEVITCH R, et al. Impact of chronic kidney disease on the efficacy of drug-eluting stents: long-term follow-up study[J]. *Arq Bras Cardiol*, 2011, 96(5): 346-351.
- [24] VLAAR P J, DE SMET B J, VAN DEN HEUVEL A F, et al. Operator dependence of outcome after primary percutaneous coronary intervention[J]. *EuroIntervention*, 2011, 6(6): 760-767.
- [25] KAMENIK M, WIDIMSKY P. Stent thrombosis in acute coronary syndromes: patient-related factors and operator-related factors[J]. *Anatol J Cardiol*, 2020, 24(4): 274-279.

(此文编辑 许雪梅)