

DOI: 10.13210/j.cnki.jhmu.20251202.001

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/46.1089.R.20251202.0814.002>

冠状动脉非阻塞性心肌梗死病因及腔内影像学特征

萧少武^{1,2}, 裴祥文^{1,3}, 曾梦雅^{1,3}, 陈跃武^{1,3}✉

(1. 海南医科大学第二附属医院心血管内科, 海南 海口 570103; 2. 海南医科大学, 海南 海口 571199; 3. 海南省心血管系统性疾病临床医学中心, 海南 海口 570103)

[摘要] 冠状动脉非阻塞性心肌梗死 (non-obstructive myocardial infarction of the coronary artery, MINOCA) 是一类在冠状动脉造影上表现为心外膜冠状动脉狭窄程度不超过 50% 的急性心肌梗死 (acute myocardial infarction, AMI), 约占 AMI 发生率的 5%~15%。其病因高度异质, 包括斑块破裂、斑块侵蚀、钙化结节、血管痉挛、微血管功能障碍、自发性冠状动脉夹层、冠状动脉栓塞或血栓形成等。不同病因的 MINOCA 患者预后存在明显差异。腔内影像技术, 包括光学相干断层扫描和血管内超声在斑块病变、冠脉痉挛、自发性冠状动脉夹层和血栓的诊断中具有明显优势, 但无法评估微血管功能障碍及非冠状动脉病因。尽管关于 MINOCA 的研究不断深入, 针对其病因和腔内影像学特征的系统性研究仍然不足。本文综述了该领域关于 MINOCA 病因、腔内影像学特征及预后的最新研究进展, 旨在提高临床医生对 MINOCA 的全面认识, 并为制定相关二级预防策略提供理论依据。

[关键词] 冠状动脉非阻塞性心肌梗死 (MINOCA); 腔内影像学特征; 光学相干断层扫描; 血管内超声

[中图分类号] R542.22 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-5953(2026)17-1351-10

Etiology and intravascular imaging characteristics of non-obstructive myocardial infarction of the coronary artery

XIAO Shaowu^{1,2}, XI Xiangwen^{1,3}, ZENG Mengya^{1,3}, CHEN Yuewu^{1,3}✉

(1. Department of Cardiovascular Internal Medicine, the Second Affiliated Hospital of Hainan Medical University, Haikou 570103, China; 2. Hainan Medical University, Haikou 571199, China; 3. Cardiovascular Systemic Disease Clinical Medical Center of Hainan Province, Haikou 570103, China)

[Foundation Project]: This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (82360063); Natural Science Foundation of Hainan Province (High Level Talents Project) (821RC1127); Key Research and Development Project of Hainan Province (Social Development) (ZDYF2022SHFZ070)

[Author]: XIAO Shaowu, Associate Chief Physician, E-mail: 250697901@qq.com.

[Correspondence to]: CHEN Yuewu, Ph.D., Doctoral Supervisor, Chief Physician, E-mail: eyuewu@hainmc.edu.cn.

Received: 2025-07-15

Revised: 2025-11-21

JHMu, 2026;32(17):1351-1360

View from specialist: It is creative, and of certain scientific and educational value.

[Abstract] Non-obstructive myocardial infarction of the coronary artery (MINOCA) is a form of acute myocardial infarction (AMI) characterized by less than 50% stenosis on coronary angiography, accounting for approximately 5% to 15% of all AMI cases. Its etiology is highly heterogeneous, encompassing plaque rupture, plaque erosion, calcified nodules, vascular spasm, microvascular dysfunction, spontaneous coronary artery dissection, and coronary artery embolism or thrombosis, etc. The prognosis of MINOCA patients varies significantly depending on the underlying etiology. Intravascular imaging techniques, such as optical coherence tomography and intravascular ultrasound, offer significant advantages in diagnosing plaque lesions, coronary artery

[基金项目] 国家自然科学基金(82360063); 海南省自然科学基金(高层次人才项目)(821RC1127); 海南省重点研发项目(社会发展)(ZDYF2022SHFZ070)

[作者简介] 萧少武, 副主任医师, E-mail: 250697901@qq.com。

[通讯作者] 陈跃武, 博士, 博士研究生导师, 主任医师, E-mail: eyuewu@hainmc.edu.cn。

[收稿日期] 2025-07-15

[修回日期] 2025-11-21

[网络出版时间] 2025-12-02 10:24:13

spasm, spontaneous coronary artery dissection, and thrombus. However, they are limited in assessing microvascular spasm and non-coronary artery etiologies. Although research on MINOCA is ongoing, systematic investigations into its etiology and intravascular imaging characteristics remain limited. This review aims to synthesize recent research on the pathogenesis, intracoronary imaging findings, and clinical outcomes of MINOCA for the purpose of improving clinical recognition of physicians towards MINOCA and providing theoretical basis for developing relevant secondary prevention strategy.

[Key words] Non-obstructive coronary artery myocardial infarction (MINOCA); Intravascular imaging characteristics; Optical coherence tomography (OCT); Intravascular ultrasound (IVUS)

近年来,关于冠状动脉非阻塞性心肌梗死(non-obstructive myocardial infarction of the coronary artery, MINOCA)这一特殊亚型的研究逐渐增加,凸显了其在临床诊断、机制理解及管理策略中的重要性^[1,2]。来自多个心血管学会的科学声明、共识文件、临床实践指南以及心肌梗死的第四个通用定义已经达成一致:即在排除了胸痛和肌钙蛋白升高的一般非冠状动脉原因(如严重贫血或肺栓塞)之后,通过冠状动脉造影确认所有主要心外膜冠状动脉均无超过50%的狭窄的急性心肌梗死(acute myocardial infarction, AMI)^[3,4]。

MINOCA在AMI中的比例约为5%~15%,不同研究报告的患病率存在差异^[5-8]。Pasupathy等^[6]对28项研究进行了荟萃分析,结果显示MINOCA约占所有心肌梗死的6%。与冠状动脉阻塞性心肌梗死患者相比,MINOCA患者更年轻(中位年龄55岁:61岁)、女性比例更高(43%:24%),且高脂血症的发生率较低(21%:32%)。绝经后女性由于激素水平变化,可能增加内皮功能障碍、冠状动脉痉挛及微血管功能障碍的风险,从而更容易患上MINOCA^[9]。黑人、毛利人、太平洋岛民和西班牙裔人群的MINOCA患病率较高^[10,11]。约有14%的MINOCA患者被发现具有遗传性血栓形成倾向^[6],而女性MINOCA患者更易表现出高凝状态^[9]。

MINOCA病因复杂且异质性强,由于冠状动脉造影未显示心外膜主要血管存在明显狭窄(狭窄程度<50%),临床上易漏诊和误诊,从而导致患者无法获得及时、有针对性的治疗。不同病因的MINOCA患者其临床预后也存在明显差异。目前关于MINOCA患者腔内影像学特征及其与预后关系的研究较少,随着影像技术的不断发展,腔内影像技术有望为诊断和治疗提供更为精准的方案。本综述从病因、腔内影像学及预后的角度,深入探讨MINOCA的潜在机制、精确诊断面临的挑战、个性化治疗策略以及预后差异。

1 MINOCA的病因、腔内影像学特征及预后

MINOCA涉及多种致病机制,导致其成为病因异质性明显的急性心肌梗死。根据美国心脏协会

在2019年发布的声明,MINOCA的病因可分为两大类:动脉粥样硬化性和非动脉粥样硬化性^[12]。由动脉粥样硬化引发的缺血机制与冠状动脉阻塞性心肌梗死类似,而非动脉粥样硬化性病因引起的缺血则包括不依赖斑块形成及其引发栓塞的其他机制^[13,14]。

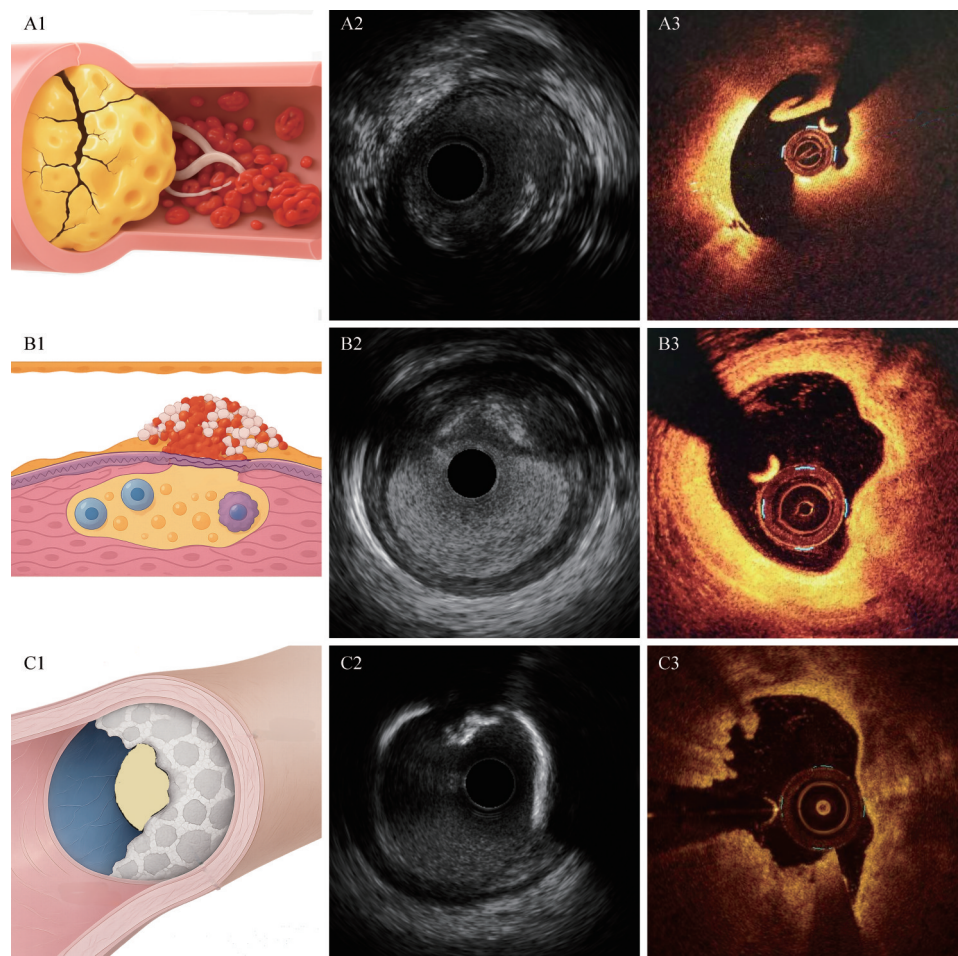
1.1 动脉粥样硬化性MINOCA:机制、影像与预后

MINOCA相关的动脉粥样硬化主要涉及斑块破坏,具体为斑块破裂、斑块侵蚀以及钙化结节,见图1^[15,16]。

1.1.1 斑块破坏机制 在MINOCA患者中,斑块破裂较为常见,其定义为纤维帽的不连续性,导致斑块腔与冠状动脉腔之间形成通路。斑块破裂是冠状动脉血栓形成的主要原因,当纤维帽出现断裂,导致富含脂质的动脉粥样硬化斑块核心暴露于血流中时,会引发血栓形成,进而通过远端栓塞或冠状动脉痉挛引发AMI^[17]。这一过程与纤维帽变薄密切相关,其原因包括纤维帽内血管平滑肌细胞的耗竭和巨噬细胞的浸润,导致富含胶原蛋白的帽基质降解^[17]。在某些情况下,短暂的血栓形成可能会自发溶解,从而缓解症状,这也是MINOCA最常见的原因之一^[6]。

斑块侵蚀是MINOCA的另一种潜在动脉粥样硬化机制,其特征是血栓形成于内皮剥脱的表面,该表面覆盖纤维斑块而非脂质斑块^[18]。斑块侵蚀表现为血栓附着于未破裂的纤维帽表面,且无明显破裂迹象,主要由内皮细胞侵蚀引起^[19]。与“易破裂的脆弱斑块”不同,侵蚀斑块的成分和微环境特征包括:透明质酸降解失调、血小板激活、中性粒细胞和T细胞的激活、Toll样受体2的上调以及直接的细胞毒性作用^[20],这些因素共同导致内皮细胞脱落,进而引发冠状动脉非闭塞性血栓形成^[21]。在MINOCA患者中,斑块侵蚀具有重要的病理生理意义,因为这些患者的冠状动脉造影通常未显示主要血管阻塞,而心肌坏死可能由远端栓塞引起。

钙化结节病理定义为钙化斑块断裂、纤维蛋白夹杂、纤维帽破裂并伴有覆盖的血栓形成。作为MINOCA的较少见原因之一,钙化结节的形成机制尚不完全明确,但在老年患者中更为常见^[22]。



A: 斑块破裂; B: 斑块侵蚀; C: 钙化结节; 1: 示意图; 2: 血管内超声(IVUS)图像; 3: 光学相干断层扫描(OCT)图像; 示意图由玻尔科研绘图协助绘制; IVUS与OCT图像由作者单位提供

图1 动脉粥样硬化病因的三种类型
Fig 1 Three types of atherosclerotic etiology

1.1.2 斑块破坏的腔内影像学特征 血管内成像通过实时360°横截面观察,有效克服了冠状动脉造影的若干已知局限性。该技术在MINOCA的诊断中尤为关键,尤其适用于揭示由斑块引发的事件及小血管阻塞性冠状动脉疾病^[23]。在冠状动脉造影显示正常或血流动力学意义不明确区域,血管内成像能够更为精确地描绘致病性病变的特征^[23]。然而,成本、设备可用性以及专业技术的不足可能限制血管内成像作为MINOCA初步诊断的应用。此外,在患者周转率较高的情况下,额外的导管室时间可能成为限制因素。

血管内超声(intravascular ultrasound, IVUS)通过导管内超声探头,准确评估斑块的严重程度、长度、形态和组成,提供了血管壁全圆周的可视化,但在组织特征描述、斑块并发症及血栓检测方面的分辨率不足^[24,25]。光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)利用光的干涉原理,相较于IVUS能更清晰地区分斑块特征,精确识别动脉粥样硬化斑块的组成、夹层、斑块破裂或侵蚀等病理改变,在血管壁结构和组织特征的分辨率比IVUS高出10倍^[25,26]。需要注意的是,OCT需要使用造影剂,这可能增加急性肾损伤的风险,特别是在已有肾功能损害的患者中^[27]。尽管如此,OCT的高分辨率使其能够更有效地识别诸如破裂、侵蚀、突起结节、空洞、分层(即愈合)以及残留血栓等病变特征,这些特征已通过组织学验证,从而更准确地确定病因^[28]。

OCT是诊断斑块破裂与侵蚀的首选方法,其中,斑块破裂的OCT特征为纤维帽断裂伴腔内血栓,好发于男性及富含脂质斑块^[28]。与之不同的是,斑块侵蚀的病理学定义为内皮缺失伴浅层内膜损伤,但无纤维帽的全层破裂^[19]。然而,OCT的分辨率尚未达到可以清晰识别内皮层的程度。因此,传统的病理学定义不能直接应用于OCT图像分析,故采用“OCT-侵蚀”这一术语来描述斑块的侵蚀现象^[19]。在OCT图像中,血栓附着并覆盖完整

且可见的斑块,从而明确诊断OCT-侵蚀,这种表现常见于女性和非脂质(白色)斑块^[29]。根据OCT成像标准,钙化结节定义为突入动脉内、边界不清且信号衰减的区域^[22]。

通过IVUS检查可以发现大约三分之一MINOCA患者存在斑块破裂^[30,31]。Reynolds等^[30]报道,在42例MINOCA女性患者中,16例(38%)通过IVUS检测发现斑块破裂,其中11例存在斑块破裂,4例存在斑块侵蚀,1例同时表现出斑块破裂和侵蚀。一些患者存在多个破裂斑块,这与冠状动脉阻塞性心肌梗死患者相似^[32]。Ouldzein等^[31]在68例MINOCA患者中发现斑块破裂的发生率为37%。采用更高分辨率的成像技术(如OCT)可能会揭示比之前报道更高的斑块破裂发生率^[33]。在Reynolds等^[34]的另一项研究中,对145例MINOCA患者的OCT图像进行分析后,结果显示46.2%的患者存在明确或可能的病变,其中斑块破裂是主要原因。此外,在上述研究中,图像仅针对其中一条或两条冠状动脉,而未包括三条冠状动脉。

1.1.3 不同类型斑块破坏的预后 在预后方面,由斑块破裂引起的MINOCA患者,其长期心血管事件风险较高。研究表明,此类患者复发心肌梗死、再住院及血运重建的风险明显高于其他病因的MINOCA患者^[22,35]。Zeng等^[22]的研究发现,与斑块侵蚀相比,斑块破裂患者的1年主要不良心血管事件(major adverse cardiovascular events, MACEs)发生率更高(15.3% vs. 4.5%)。而斑块侵蚀型MINOCA患者预后相对较好,尤其是在采取强化抗血小板治疗而非介入治疗的策略下^[36]。Hu等^[37]研究表明,对于OCT证实的斑块侵蚀,标准抗栓治疗与介入治疗相比,在1年MACEs发生率方面无明显差异,但避免了不必要的支架植入。关于钙化结节的MINOCA研究相对较少,现有证据提示其复发事件风险也较高,尤其是在合并慢性肾脏病的患者中^[22]。例如,Zeng等^[22]的研究发现,钙化结节组患者的1年MACEs发生率介于斑块破裂和斑块侵蚀之间。综上所述,斑块破坏的MINOCA预后风险存在明显差异,总体上遵循斑块破裂>钙化结节>斑块侵蚀的风险等级。

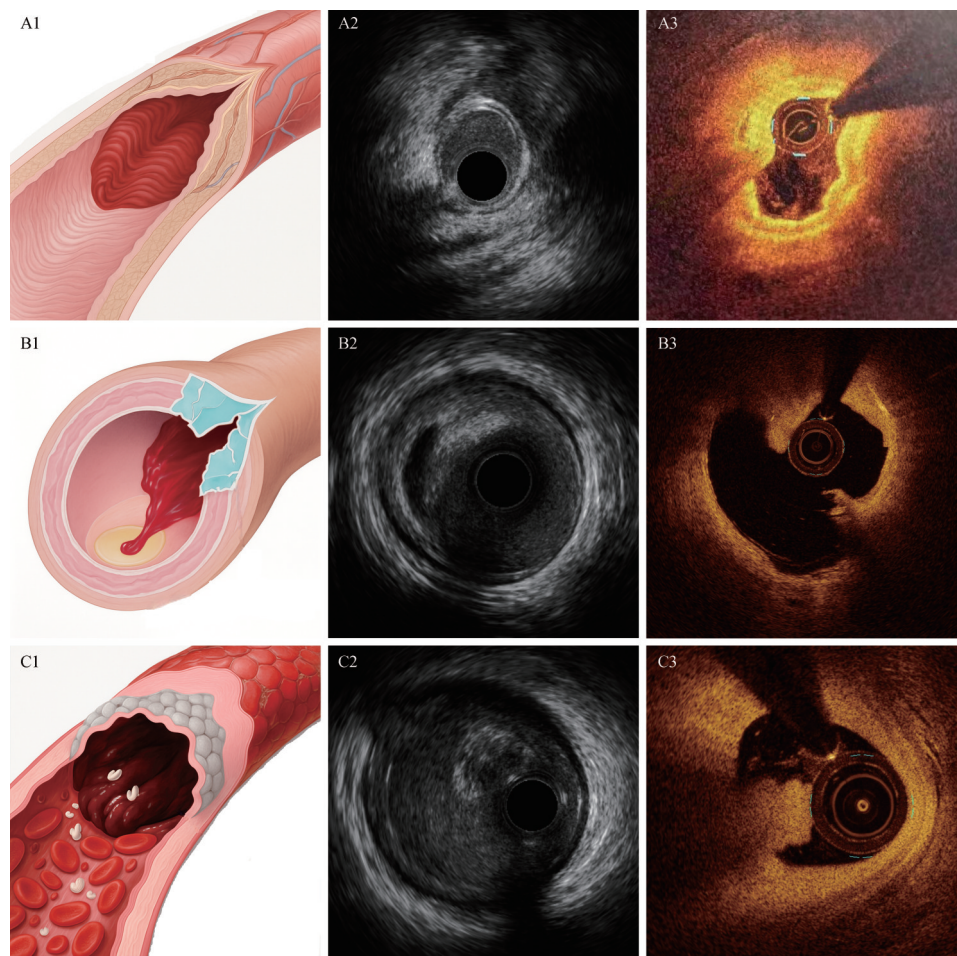
1.2 非动脉粥样硬化性MINOCA:机制、影像与预后

MINOCA相关的非动脉粥样硬化主要包括冠状动脉痉挛、微血管功能障碍、自发性冠状动脉夹层、冠状动脉栓塞或血栓形成,见图2。

1.2.1 冠状动脉痉挛 冠状动脉痉挛是MINOCA的常见病因。在对MINOCA患者进行冠状动脉内乙酰胆碱或麦角新碱激发试验的研究中,24%~70%的患者表现出心外膜或微血管性冠状动脉痉挛的迹象^[38-40]。心外膜痉挛定义为激发试验后血管收缩程度达到至少90%^[41];微血管痉挛则定义为伴有症状发作和心电图变化,但无心外膜痉挛激发反应^[42]。在一项纳入80例MINOCA患者的连续系列研究中,经冠状动脉激发试验共检出37例(46.2%),包括24例心外膜痉挛和13例微血管痉挛^[39]。分析显示,激发试验阳性患者的长期死亡率明显高于阴性患者(32.4% vs. 4.7%, $P=0.002$),且心外膜痉挛患者的预后最差^[39]。在另一项包含40例患者的连续系列研究中,没有发现冠状动脉的腔内影像学证据来解释MINOCA的表现,但其中38%的患者冠状动脉痉挛激发试验呈阳性^[38]。在心肌桥患者中也经常观察到异常的冠状动脉反应性,这一现象在MINOCA患者中比在无阻塞性冠心病的稳定患者中更为常见(21.3% vs. 7.0%, $P=0.002$)^[43]。在心肌桥相关的MINOCA患者中,乙酰胆碱激发试验阳性的可能性高,在相关研究中高达88%(30/34)^[43]。鉴于冠状动脉痉挛在MINOCA患者中较为普遍,当心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance imaging, CMRI)显示梗死或局部水肿,同时冠状动脉内影像学检查(如OCT或IVUS)排除明显狭窄或斑块破裂时,即使未行痉挛激发试验,也可考虑冠状动脉痉挛是MINOCA的潜在原因^[34]。

心外膜血管痉挛和微血管痉挛的主要诱因分别为大中动脉和小动脉水平的内皮功能障碍^[44]。通常内皮功能障碍在心外膜和微血管水平的冠状动脉同时存在,但在冠状动脉疾病的早期阶段,冠状动脉微血管内皮功能障碍可能先于心外膜冠状动脉内皮功能障碍出现,其诱因可能是氧化应激和炎症^[44]。根据冠状动脉痉挛性疾病峰会标准^[41],确诊血管痉挛性心绞痛需满足以下条件:一是硝酸盐缓解的心绞痛(包括自发作期间,或在静息状态、晨起运动耐受差、过度换气诱发或钙通道阻滞剂改善但 β 受体阻滞剂无效的情况下);二是短暂性缺血性心电图变化(如ST段抬高或压低 ≥ 0.1 mV,或新出现的负向U波);或出现冠状动脉痉挛(如自发或在乙酰胆碱、麦角新碱或过度换气诱发时,冠脉狭窄 $\geq 90\%$,伴有心绞痛和缺血性心电图变化)。

在OCT中,冠状动脉痉挛的主要影像学特征为分层斑块,亦称作愈合斑块(图2A)。该特征被认为是由一次或多次无症状斑块破裂或糜烂,继而形



A: 冠状动脉痉挛; B: 自发性冠状动脉夹层; C: 冠状动脉血栓; 1: 示意图; 2: 血管内超声(IVUS)图像; 3: 光学相干断层扫描(OCT)图像; 示意图由玻尔科研绘图协助绘制; IVUS与OCT图像由作者单位提供

图2 非动脉粥样硬化性病因的三种类型
Fig 2 Three types of non-atherosclerotic etiology

成非闭塞性血栓所致。Nishi等^[45]对39例疑似冠状动脉痉挛患者的研究,定量OCT发现痉挛组与非痉挛组在最大斑块负荷和最小管腔面积方面未表现明显差异。然而定性OCT却表明,痉挛组中器质性病变的分层斑块(93% vs. 38%, $P<0.001$)、巨噬细胞(80% vs. 43%, $P=0.016$)以及斑块内微通道(77% vs. 24%, $P<0.001$)的患病率明显高于非痉挛组。

所有类型的冠状动脉痉挛均提示MINOCA患者预后不良,尤其是心外膜痉挛,与长期死亡风险明显升高相关^[39]。这一风险在Montone等^[39]的研究中得到量化:痉挛阳性患者的3年全因死亡率高达32.4%,远高于阴性患者的4.7%。因此,对冠状动脉痉挛的早期识别与积极干预(如使用钙通道阻滞剂)是改善预后的关键管理策略^[46]。

1.2.2 冠状动脉微血管功能障碍 冠状动脉微血管功能障碍(coronary microvascular dysfunction, CMD)是指直径小于0.5 mm的微血管结构和功能

异常,这些异常可损害冠状动脉血流储备,引起心肌缺血。研究表明,CMD在MINOCA的病理生理过程中发挥关键作用^[47],涉及氧化应激、激素失衡、内皮功能障碍及微血管痉挛等多种功能和结构异常。这些异常会激活炎症通路,增加促炎细胞因子并加剧氧化损伤,从而形成恶性循环,进一步加重内皮损伤和微血管功能障碍^[48]。

CMD既可能是缺血的原因,也可能是心肌损伤的后续表现。例如,一项包括40例MINOCA女性患者的应激CMRI研究显示,三分之二的患者出现可诱发的灌注异常,提示CMD的存在^[49]。然而,在所有心肌水肿患者中,包括心肌炎患者,均观察到应激灌注异常。因此,区分微血管功能障碍在MINOCA患者中是疾病的原因还是后果,是一项挑战。尽管可以对MINOCA患者进行微血管功能障碍的侵入性评估,但这难以界定是否急性发作的根源。因此,CMD在MINOCA患者中的作用仍需进一步研究,目前仅有少数研究评估了微血管性心绞痛

痛、微血管痉挛或冠状动脉缓慢血流在这些患者中的影响。

腔内影像技术(如IVUS和OCT)无法直接诊断CMD,原因在于IVUS的轴向分辨率为100~150 μm , OCT的轴向分辨率为10~20 μm ,难以清晰显示直径远小于100 μm 的微血管。CMD可采用非侵入性方法(如正电子发射断层扫描或CMRI)与侵入性检查进行评估。此外,通过多普勒衍生的冠状动脉血流动力学指标,例如冠状动脉血流储备、高灌注微血管阻力等,可对冠状动脉微循环进行功能性评估^[50]。由冠状动脉造影衍生的微血管阻力指数(coronary angiograph derived index of microcirculatory resistance, caIMR)已被广泛用于评估CMD的预后意义。研究表明,caIMR值较高的患者发生MACEs的比例(36.4%)明显高于caIMR值较低的患者(13%)^[49]。此外,作为由冠状动脉造影获得的指标,caIMR是预测MINOCA患者临床结局的有力因素^[49]。

合并CMD的MINOCA患者长期预后较差,具体表现为心绞痛再发和MACEs风险明显增加^[49]。这一关联得到了病理生理学指标的支持:Abdu等^[49]的前瞻性研究证实,caIMR升高是预测MACEs的独立因素,从而确立了CMD在MINOCA预后评估中的关键地位。

1.2.3 自发性冠状动脉夹层 自发性冠状动脉夹层(spontaneous coronary artery dissection, SCAD)是引起MINOCA的罕见病因^[34]。在SCAD患者中,壁内血肿(intramural hematoma, IMH)的自发形成可能导致真腔狭窄、侧支循环阻塞或两者同时发生,从而引发心肌梗死^[51]。尽管SCAD并非由动脉粥样硬化引起,但在冠状动脉造影中,它通常表现为严重的冠脉狭窄,这与MINOCA的血管造影诊断标准不符。在某些情况下,由于动脉粥样硬化或血栓形成,SCAD可能被误诊为心肌梗死^[52],然而狭窄可能在冠脉造影前得到缓解或未被注意到,从而影响MINOCA的诊断。SCAD的诊断依赖于高度的怀疑态度和对血管造影的细致观察。内膜撕裂在某些病例中可能存在,也可能不存在。对于血管造影诊断不明确的具体病例,应考虑进行冠状动脉内影像学检查。在SCAD患者中,绝大多数(约90%)为女性,中位数年龄约为50岁,且传统心血管危险因素较少见,这些特征与MINOCA高风险患者重叠。实际上,SCAD占50岁以下女性心肌梗死

的约35%^[53]。因此,在MINOCA的鉴别诊断中,应将SCAD作为常规考虑因素。

腔内影像学(OCT/IVUS)是诊断SCAD的关键工具^[54]。IVUS信号具有穿透冠状动脉三层结构的能力,能够评估IMH的深度和范围,同时排除由斑块破裂引起的造影剂在血管壁内滞留的现象。此外,IVUS还能检测出内膜撕裂、假腔以及腔内血栓。在IVUS图像中,IMH表现为中膜内均匀的高回声血流聚集,通常呈“新月形”,并引起血管外弹力膜向外挤压和内弹力膜向内挤压。血栓表现为血管腔内的团块状物,呈分叶状或分层状,回声较低,随血流可见轻微波动,有时可观察到团块内部有微小血流通过,部分患者还可见到内膜片^[55]。OCT的典型表现包括:(1)由内膜-中膜撕裂引起的双腔(真腔和假腔);(2)内膜与外层血管壁分离,伴有相对均匀、高反射且强衰减的IMH光学信号;(3)附着在管腔表面或漂浮于腔内的不规则团块状血栓(图2B)^[26]。

SCAD相关的MINOCA患者具有独特的预后特征:长期结局总体良好,但急性期风险不容忽视^[54]。长期随访证实,多数患者左心室功能恢复良好,然而,约10%~20%的患者在5年内可能出现SCAD复发^[56]。因此,治疗策略应以保守管理为首选,除非患者出现持续缺血或血流动力学不稳定^[54]。

1.2.4 冠状动脉栓塞或血栓形成 冠状动脉栓塞或血栓形成是MINOCA的一个罕见病因。当冠脉血栓或栓塞影响微循环,或心外膜冠脉血栓部分溶解时,行冠状动脉造影显示心外膜冠状动脉狭窄<50%,此时应考虑诊断为MINOCA。此类情况可伴随或不伴随高凝状态。

冠状动脉血栓栓塞可分为三种类型:直接型、医源性和反常型^[57]。直接型栓塞源自左心系统(包括心内膜血栓、感染性心内膜炎或心内肿瘤如黏液瘤)脱落的栓子。有潜在心脏疾病(如心肌病、房颤、瓣膜病或冠状动脉扩张)的患者,由于血流停滞和流量减少,发生直接栓塞的风险增加^[57]。尽管较为罕见,感染性心内膜炎也可能引起冠状动脉栓塞,特别是在涉及二尖瓣感染、金黄色葡萄球菌或真菌感染,以及赘生物直径超过10 mm时^[58]。此外,非细菌性血栓性心内膜炎也被报道为罕见的栓塞原因^[59]。在心脏肿瘤中,具有绒毛状结构的黏液瘤比表面光滑的肿瘤更易发生栓塞^[57]。医源性冠

状动脉栓塞通常发生在冠状动脉介入治疗期间,但也可能在心脏手术或瓣膜手术过程中发生^[60]。反常性栓塞是指体循环静脉中的血栓通过右向左分流(如未闭合的卵圆孔或房间隔缺损)绕过肺部过滤系统时发生的栓塞现象^[61]。

原位冠状动脉血栓形成也可能与遗传性或获得性高凝状态相关,这是女性中最常见的原因之一。在梗死后血栓形成的筛查中,约14%的MINOCA患者表现出遗传性血栓倾向,主要包括凝血因子V的Leiden突变、蛋白质C和S缺乏以及凝血酶基因突变^[6,62]。获得性易栓症可增加冠状动脉血栓风险,包括血栓性血小板减少性紫癜、系统性红斑狼疮、抗心磷脂综合征、肝素诱导的血小板减少症以及骨髓增殖性肿瘤^[63]。一项前瞻性横断面研究纳入了84例MINOCA与隐源性卒中患者,旨在评估其血栓形成相关因素,结果显示,在MINOCA患者中,有13例(15.5%)患有抗心磷脂综合征^[64]。

腔内影像学(OCT/IVUS)在血栓的精准识别、特征分析、机制研究及治疗指导中起着关键作用(图2C)^[65,66]。在OCT影像中,血栓表现为附着于管壁或漂浮于腔内的不规则团块,其信号强度明显高于血管壁背景。当光线穿透血栓时,会发生强烈衰减,导致后方结构(如血管壁或支架梁)的信号明显减弱或消失,形成所谓的“信号衰减阴影”。在IVUS影像中,血栓表现为位于管腔内、边界相对清晰、均质(或斑点状)的低回声或无回声充盈缺损,并具有时间依赖的动态变化。新鲜血栓通常表现为均质低回声或无回声,质地较为“松软”,边界有时模糊,斑点状回声较为明显。相比之下,陈旧或机化血栓的回声逐渐增强(色泽趋近灰白),内部可能出现不均匀的回声区和条索状高回声(提示纤维化),边界也趋于清晰。最终,这类血栓可能被新生内膜覆盖,与斑块难以区分,二者界限模糊。

依据栓塞来源与高凝状态,可将栓塞性MINOCA患者区分为不同预后群体。左心系统(如房颤)为来源者属高危群体,年死亡率报告为10%~15%^[57]。而反常栓塞或暂时性高凝状态者,在抗凝治疗后多归属预后良好的群体^[57]。

2 腔内影像学局限性

腔内影像学(OCT/IVUS)是诊断MINOCA中冠状动脉病因(如斑块破裂、侵蚀、SCAD和血栓)的关键工具,但其固有且明显的局限性仍然存在:(1)无法诊断非冠状动脉病因及微血管功能障碍,痉挛和栓塞的诊断也较为困难;(2)面临技术操作的限制、解读的复杂性以及潜在的安全风险。腔内影像

学应作为MINOCA综合诊断流程中的一个环节,需严格掌握适应证,优化操作流程,并结合其他检查方法(特别是CMRI和功能评估)进行多维度分析,由经验丰富的团队操作,以最大限度发挥其价值,避免误诊和误治。

3 人工智能与腔内影像学融合的进展

在MINOCA的诊断中,腔内影像学技术(如OCT与IVUS)对图像判读的专业性要求极高,人工分析不仅耗时,且存在主观差异及误诊风险。近年来,人工智能(artificial intelligence, AI)技术与腔内影像的深度融合,为提升MINOCA病因诊断的自动化、精准化与标准化水平开辟了新的路径^[67]。

AI,特别是深度学习技术,在腔内影像的自动分析方面展现出巨大潜力。研究已证实,基于AI的模型能够高效、准确地自动识别和定量分析斑块的形态学特征,例如区分斑块破裂与斑块侵蚀、检测微钙化以及识别腔内血栓等^[68]。这些能力有望辅助介入医师快速锁定病变原因,减少因经验差异导致的诊断偏倚。

展望未来,基于AI的影像组学能从海量的影像数据中提取人眼难以察觉的深层特征,并将其与临床结局相关联,有望构建出可预测患者个体预后的新型风险模型。尽管目前AI诊断模型在MINOCA领域的临床应用尚处于早期阶段,面临数据标准化、模型泛化能力及临床验证等多重挑战,但其代表着精准医疗的重要发展方向。推动AI与腔内影像学的有机融合,将有望深化对MINOCA发病机制的理解,并最终实现更早期的精准诊断与个体化治疗。

4 结论

综上所述,MINOCA是一种病因高度异质性的急性心肌梗死亚型,其发病率约占所有AMI病例的5%~15%。其发病机制极为复杂,包括斑块破裂、斑块侵蚀、钙化结节、血管痉挛、微血管功能障碍、自发性冠状动脉夹层、冠状动脉栓塞或血栓形成等多种因素。不同病因其腔内影像学特征和预后存在明显差异。斑块破裂、心外膜痉挛及CMD提示预后较差,而斑块侵蚀和部分SCAD患者预后相对良好。因此,精确病因诊断是风险评估和个体化治疗的基础。MINOCA的诊断需结合临床表现、生化指标及影像学检查(包括冠状动脉腔内影像学、心脏磁共振成像和激发试验)进行综合评估。其中,冠状动脉腔内影像学技术,特别是OCT,在识别斑块相关机制(如斑块破裂、斑块侵蚀)和自发性冠状动脉夹层方面具有重要作用。

作者贡献度说明:

萧少武:在本文的创作过程中承担了文献资料检索与整理的核心任务,并负责文章的主体撰写;裘祥文、曾梦雅:为本文的写作思路提供了宝贵的指导,并积极参与文献的搜索与文章的多轮修订工作;陈跃武:负责文章的整体把控,对文章进行了深入的修改与审校,确保文章的质量与学术价值。

所有作者声明不存在利益冲突关系。

参考文献

- Ziada K, Alkhawam H, Hajeh H, et al. Diagnosis and management of acute coronary syndrome patients without obstructive epicardial stenosis[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2025, 27: 43.
- Reynolds HR, Smilowitz NR. Myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries [J]. *Annu Rev Med*, 2023, 74: 171-188.
- Thygesen K, Alpert JS, Jaffe AS, et al. Fourth universal definition of myocardial infarction (2018)[J]. *Circulation*, 2018, 138(20): e618-e651.
- Vignut LS, Angriman F, Franchin L, et al. Investigating the MINOCA: Are the times actually A-Changin'? [J]. *Int J Cardiol*, 2025, 431: 133244.
- Oh S, Cho KH, Kim MC, et al. Pre-hospital delay and outcomes in myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries [J]. *Korean Circ J*, 2024, 54(11): 693-706.
- Pasupathy S, Air T, Dreyer RP, et al. Systematic review of patients presenting with suspected myocardial infarction and nonobstructive coronary arteries[J]. *Circulation*, 2015, 131(10): 861-870.
- Yildiz M, Ashokprabhu N, Shewale A, et al. Myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries (MINOCA)[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 1032436.
- Hao K, Takahashi J, Sato K, et al. Clinical characteristics and outcome of patients with myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries in Japan: insights from the Miyagi Acute Myocardial Infarction Registry Study[J]. *JAHA*, 2025, 14(5): e036802.
- Yildiz M, Pico M, Henry TD, et al. Sex differences in patients presenting with ST-segment elevation myocardial infarction and nonobstructive coronary arteries [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2025, 105(5): 1204-1213.
- Lindahl B, Baron T, Albertucci M, et al. Myocardial infarction with non-obstructive coronary artery disease [J]. *EuroIntervention*, 2021, 17(11): e875-e887.
- Canton L, Fedele D, Bergamaschi L, et al. Sex- and age-related differences in outcomes of patients with acute myocardial infarction: MINOCA vs. MIOCA [J]. *Eur Heart J Acute Cardiovasc Care*, 2023, 12(9): 604-614.
- Tamis-Holland JE, Jneid H, Reynolds HR, et al. Contemporary diagnosis and management of patients with myocardial infarction in the absence of obstructive coronary artery disease: A scientific statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2019, 139(18): e891-e908.
- Sucato V, Comparato F, Ortello A, et al. Myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries (MINOCA): Pathogenesis, diagnosis and treatment [J]. *Curr Probl Cardiol*, 2024, 49(7): 102583.
- Khattab E, Karelis D, Pallas T, et al. MINOCA: A pathophysiological approach of diagnosis and treatment-a narrative review[J]. *Biomedicines*, 2024, 12(11): 2457.
- Tognola C, Maloberti A, Varrenti M, et al. Myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries (MINOCA): Current insights into pathophysiology, diagnosis, and management [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2025, 15(7): 942.
- 张依曼, 黄宝涛, 时瑞娟, 等. 冠状动脉非阻塞性心肌梗死的病因及预后研究进展[J]. *中国全科医学*, 2021, 24(2): 132-137, 153.
- Zhang YM, Huang BT, Shi RJ, et al. Advances in etiology and prognosis of myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries [J]. *Chin Gen Pract*, 2021, 24(2): 132-137, 153.
- Bhatt DL, Lopes RD, Harrington RA. Diagnosis and treatment of acute coronary syndromes: A review [J]. *JAMA*, 2022, 327(7): 662-675.
- Kolte D, Libby P, Jang IK. New insights into plaque erosion as a mechanism of acute coronary syndromes[J]. *JAMA*, 2021, 325(11): 1043-1044.
- Theofilis P, Vlachakis PK, Papanikolaou A, et al. Coronary plaque erosion: Epidemiology, diagnosis, and treatment[J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(11): 5786.
- Meteva D, Vinci R, Seppelt C, et al. Toll-like receptor 2, hyaluronan, and neutrophils play a key role in plaque erosion: The OPTICO-ACS study [J]. *Eur Heart J*, 2023, 44(38): 3892-3907.
- Vergallo R, Jang IK, Crea F. New prediction tools and treatment for ACS patients with plaque erosion[J]. *Atherosclerosis*, 2021, 318: 45-51.
- Zeng M, Zhao C, Bao X, et al. Clinical characteristics and prognosis of MINOCA caused by atherosclerotic and nonatherosclerotic mechanisms assessed by OCT [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2023, 16(4): 521-532.
- Legutko J, Bryniarski KL, Kaluza GL, et al. Intracoronary imaging of vulnerable plaque-from clinical research to everyday practice [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(22): 6639.

- 24 Ugo F, Franzino M, Massaro G, et al. The role of IVUS in coronary complications[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2025, 105(5): 1171-1182.
- 25 朱能元, 曾梦雅, 罗颖, 等. 从 IRA 到 NON-IRA: 全面血运重建在 STEMI 合并 MVD 患者 PCI 治疗中的研究进展[J]. *海南医科大学学报*, 2025, 31(3): 220-228.
Zhu NY, Zeng MY, Luo Y, et al. From IRA to NON-IRA: Progress in total revascularization for PCI in patients with STEMI and MVD [J]. *J Hainan Med Univ*, 2025, 31(3): 220-228.
- 26 Bryniarski K, Gasior P, Legutko J, et al. OCT findings in MINOCA[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(13): 2759.
- 27 Legnazzi M, Agnello F, Capodanno D. Prevention of contrast-induced acute kidney injury in patients undergoing percutaneous coronary intervention[J]. *Kardiol Pol*, 2020, 78(10): 967-973.
- 28 Karamasis G, Xenogiannis I, Varlamos C, et al. Use of optical coherence tomography in MI with non-obstructive coronary arteries[J]. *Interv Cardiol*, 2022, 17: e06.
- 29 Mrevlje B, Kleczyński P, Kranjec I, et al. Optical coherence tomography versus intravascular ultrasound for culprit lesion assessment in patients with acute myocardial infarction[J]. *Postepy Kardiol Interwencyjnej*, 2020, 16(2): 145-152.
- 30 Reynolds HR, Srichai MB, Iqbal SN, et al. Mechanisms of myocardial infarction in women without angiographically obstructive coronary artery disease[J]. *Circulation*, 2011, 124(13): 1414-1425.
- 31 Ouldzein H, Elbaz M, Roncalli J, et al. Plaque rupture and morphological characteristics of the culprit lesion in acute coronary syndromes without significant angiographic lesion: Analysis by intravascular ultrasound[J]. *Ann Cardiol Angeiol (Paris)*, 2012, 61(1): 20-26.
- 32 Fukunaga M, Fujii K, Nakata T, et al. Multiple complex coronary atherosclerosis in diabetic patients with acute myocardial infarction: A three-vessel optical coherence tomography study [J]. *EuroIntervention*, 2012, 8(8): 955-961.
- 33 Kubo T, Imanishi T, Takarada S, et al. Assessment of culprit lesion morphology in acute myocardial infarction: Ability of optical coherence tomography compared with intravascular ultrasound and coronary angiography [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2007, 50(10): 933-939.
- 34 Reynolds HR, Maehara A, Kwong RY, et al. Coronary optical coherence tomography and cardiac magnetic resonance imaging to determine underlying causes of myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries in women[J]. *Circulation*, 2021, 143(7): 624-640.
- 35 Ananthakrishna R, Liang Z, Raman B, et al. Long-term clinical outcomes in patients with a working diagnosis of myocardial infarction with non-obstructed coronary arteries (MINOCA) assessed by cardiovascular magnetic resonance imaging[J]. *Int J Cardiol*, 2022, 349: 12-17.
- 36 Berg E, Agewall S, Brodin EB, et al. Health-related quality-of-life up to one year after myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries [J]. *Eur Heart J Qual Care Clin Outcomes*, 2023, 9(6): 639-644.
- 37 Hu S, Zhu Y, Zhang Y, et al. Management and outcome of patients with acute coronary syndrome caused by plaque rupture versus plaque erosion: An intravascular optical coherence tomography study[J]. *J Am Heart Assoc*, 2017, 6(3): e004730.
- 38 Taruya A, Tanaka A, Nishiguchi T, et al. Lesion characteristics and prognosis of acute coronary syndrome without angiographically significant coronary artery stenosis[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020, 21(2): 202-209.
- 39 Montone RA, Niccoli G, Fracassi F, et al. Patients with acute myocardial infarction and non-obstructive coronary arteries: Safety and prognostic relevance of invasive coronary provocative tests[J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(2): 91-98.
- 40 Choo EH, Chang K, Lee KY, et al. Prognosis and predictors of mortality in patients suffering myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries [J]. *J Am Heart Assoc*, 2019, 8(14): e011990.
- 41 Beltrame JF, Crea F, Kaski JC, et al. International standardization of diagnostic criteria for vasospastic angina [J]. *Eur Heart J*, 2017, 38(33): 2565-2568.
- 42 Ong P, Camici PG, Beltrame JF, et al. International standardization of diagnostic criteria for microvascular angina[J]. *Int J Cardiol*, 2018, 250: 16-20.
- 43 Montone RA, Gurgoglione FL, Del Buono MG, et al. Interplay between myocardial bridging and coronary spasm in patients with myocardial ischemia and non-obstructive coronary arteries: Pathogenic and prognostic implications [J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(14): e020535.
- 44 Godo S, Suda A, Takahashi J, et al. Coronary microvascular dysfunction [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2021, 41(5): 1625-1637.
- 45 Nishi T, Kume T, Yamada R, et al. Layered plaque in organic lesions in patients with coronary artery spasm [J]. *J Am Heart Assoc*, 2022, 11(7): e024880.
- 46 Khorasani N, Mohammadi Y, Sarpoli M, et al. Understanding myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries (MINOCA) : A comprehensive meta-

- analysis of clinical characteristics, management, and prognosis compared to MI with the obstructive coronary artery (MIOCA) [J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2025, 25(1): 143.
- 47 Smati H, Sellke FW, Bourque JM, et al. Coronary microvascular dysfunction: A guide for clinicians[J]. *Am J Med*, 2024, 137(9): 810-817.
 - 48 Del Buono MG, Montone RA, Camilli M, et al. Coronary microvascular dysfunction across the spectrum of cardiovascular diseases: JACC state-of-the-art review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2021, 78(13): 1352-1371.
 - 49 Abdu FA, Liu L, Mohammed AQ, et al. Prognostic impact of coronary microvascular dysfunction in patients with myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries[J]. *Eur J Intern Med*, 2021, 92: 79-85.
 - 50 Pintea Bentea G, Awada A, Berdaoui B. Should we revisit the clinical value of fractional flow reserve in the era of coronary microvascular dysfunction[J]. *Biomedicines*, 2025, 13(5): 1086.
 - 51 胥日, 羊镇宇. 冠状动脉非阻塞性心肌梗死的发病机制及影像学表现[J]. *心血管病学进展*, 2021, 42(2): 148-152.
Xu R, Yang ZY. Pathogenesis and imaging manifestations of myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries [J]. *Adv Cardiovasc Dis*, 2021, 42(2): 148-152.
 - 52 Lionakis N, Briasoulis A, Zouganeli V, et al. Spontaneous coronary artery dissection: A review of diagnostic methods and management strategies[J]. *World J Cardiol*, 2022, 14(10): 522-536.
 - 53 Hayes SN, Kim ESH, Saw J, et al. Spontaneous coronary artery dissection: Current state of the science: A scientific statement from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2018, 137(19): e523-e557.
 - 54 Hayes SN, Tweet MS, Adlam D, et al. Spontaneous coronary artery dissection: JACC state-of-the-art review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 76(8): 961-984.
 - 55 Offen S, Yang C, Saw J. Spontaneous coronary artery dissection (SCAD): A contemporary review [J]. *Clin Cardiol*, 2024, 47(6): e24236.
 - 56 Pitliya A, Pitliya A, Vasudevan SS, et al. In-hospital and long-term clinical outcomes of spontaneous coronary artery dissection (SCAD): A meta-analysis of conservative versus revascularization approaches[J]. *Egypt Heart J*, 2024, 76(1): 153.
 - 57 Ceasovschih A, Mantzouranis E, Dimitriadis K, et al. Coronary artery thromboembolism as a cause of myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries (MINOCA)[J]. *Hellenic J Cardiol*, 2024, 79: 70-83.
 - 58 Zhao J, Yang J, Chen W, et al. Acute myocardial infarction as the first sign of infective endocarditis: A case report [J]. *J Int Med Res*, 2020, 48 (12) : 3000605-20980598.
 - 59 Karamneh M, Golomb M, Arad A, et al. Multi-valvular non-bacterial thrombotic endocarditis causing sequential pulmonary embolism, myocardial infarction, and stroke: A case report and literature review[J]. *Cureus*, 2022, 14 (12): e32261.
 - 60 Raphael CE, Heit JA, Reeder GS, et al. Coronary embolus: An underappreciated cause of acute coronary syndromes [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2018, 11 (2) : 172-180.
 - 61 Talebi S, Jadhav P, Tamis-Holland JE. Myocardial infarction in the absence of obstructive coronary artery disease (MINOCA): A review of the present and preview of the future[J]. *Curr Atheroscler Rep*, 2021, 23(9): 49.
 - 62 Pasupathy S, Rodgers S, Tavella R, et al. Risk of thrombosis in patients presenting with myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries (MINOCA) [J]. *TH Open*, 2018, 2(2): e167-e172.
 - 63 Shen YM, Nagalla S. Hypercoagulable workup in thrombotic cardiovascular diseases[J]. *Circulation*, 2018, 138 (3): 229-231.
 - 64 Stepien K, Nowak K, Wypasek E, et al. High prevalence of inherited thrombophilia and antiphospholipid syndrome in myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries: Comparison with cryptogenic stroke [J]. *Int J Cardiol*, 2019, 290: 1-6.
 - 65 Fujii K, Kubo T, Otake H, et al. Expert consensus statement for quantitative measurement and morphologic assessment of optical coherence tomography: Update 2025[J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2025, 40(2): 226-233.
 - 66 Saito Y, Kobayashi Y, Fujii K, et al. CVIT 2025 clinical expert consensus document on intravascular ultrasound[J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2025, 40(2): 211-225.
 - 67 Koch V, Holmberg O, Blum E, et al. Deep learning model DeepNeo predicts neointimal tissue characterization using optical coherence tomography [J]. *Commun Med (Lond)*, 2025, 5(1): 124.
 - 68 Chu M, Jia H, Gutiérrez-Chico JL, et al. Artificial intelligence and optical coherence tomography for the automatic characterisation of human atherosclerotic plaques [J]. *EuroIntervention*, 2021, 17(1): 41-50.

[本文编辑] 陈思润