

· 文献研究与综述 ·

DOI: 10.26946/j.cnki.1000-3649.sczy.2506160006

冠心病经皮冠状动脉介入治疗术后冠状动脉微循环障碍的研究进展

唐翰章, 殷拥军, 孔令秋, 王依澜[△]
(成都中医药大学附属医院, 四川 成都 610037)

摘要: 冠状动脉微循环障碍 (CMD) 是由各种原因引起的冠状动脉微循环结构、功能异常, 导致冠状动脉血供无法满足心肌需氧的临床综合征。经皮冠状动脉介入治疗 (PCI) 是治疗冠心病的主要方法, 而冠心病患者接受 PCI 术后容易发生 CMD。在临床上, CMD 是左心室重构的独立预测因子, 与 PCI 术后 1 年内主要不良心血管事件 (MACE) 风险增加直接相关, CMD 的病理影响贯穿心肌再灌注损伤、进行性纤维化及心功能下降全过程, 成为制约 PCI 疗效的关键因素。因此深入探索 CMD 机制与防治策略, 对改善冠心病患者介入治疗预后具有重要临床意义。本文从 CMD 的发病机制、诊断评估技术、防治策略及展望等方面阐述 CMD 的研究进展, 以期临床诊疗提供一定参考。

关键词: 冠心病; 冠状动脉微循环障碍; 发病机制; 防治策略; 研究进展

中图分类号: R256.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3649(2026)02-0120-11

Research progress on coronary microvascular dysfunction after Percutaneous coronary intervention for coronary heart disease

TANG Hanzhang, YIN Yongjun, KONG Lingqiu, WANG Yilan[△]

(Affiliated Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610037, China)

Abstract: Coronary microvascular dysfunction (CMD) is a clinical syndrome in which the structure and function of the coronary microcirculation are abnormal due to various reasons, resulting in the inability of coronary blood supply to meet the oxygen demand of the myocardium. Percutaneous coronary intervention (PCI) is the main method for treating coronary heart disease, and patients with coronary heart disease are prone to CMD after PCI. Clinically, CMD is an independent predictor of left ventricular remodeling and is directly related to the increased risk of major adverse cardiovascular events (MACE) within one year after PCI. The pathological effects of CMD run through the entire process of myocardial reperfusion injury, progressive fibrosis and decreased cardiac function, becoming a key factor restricting the efficacy of PCI. Therefore, in-depth exploration of the mechanism and prevention and treatment strategies of CMD has important clinical significance for improving the prognosis of interventional therapy in patients with coronary heart disease. This review elaborates on the research progress of CMD from aspects such as the pathogenesis, diagnostic and evaluation techniques, prevention and treatment strategies, and prospects, with the aim of providing certain references for clinical diagnosis and treatment.

Keywords: Coronary heart disease; Coronary microvascular dysfunction; Pathogenesis; Prevention and treatment strategies; Research progress

冠状动脉微循环系统由微动脉、毛细血管和微静脉构成, 承担心肌组织养分传输、血流调节及代谢平衡的核心功能^[1]。冠状动脉微循环障碍 (Coronary microvascular dysfunction, CMD) 是由各种原因引起的冠状动脉微循环结构、功能异常,

导致冠状动脉血供无法满足心肌需氧的临床综合征^[2], 患者常出现胸痛、胸闷、气短、乏力等症状, 疼痛性质与典型心绞痛类似, 但此类患者常规检查 (如冠脉造影) 可能显示为大血管“正常”。CMD 包括导致冠状动脉微循环功能和 / 或结构变

第一作者: 唐翰章, 硕士, 主治医师, 研究方向: 心血管疾病的中西医结合精准诊疗, 中西医诊治冠脉微循环障碍, E-mail: 15196628841@163.com。

[△]通讯作者: 王依澜, 博士, 主治医师, 研究方向: 中医药防治呼吸循环系统疾病的临床与基础研究, E-mail: wangyilan@stu.cdutcm.edu.cn。

引用格式: 唐翰章, 殷拥军, 孔令秋, 等. 冠心病经皮冠状动脉介入治疗术后冠状动脉微循环障碍的研究进展[J]. 四川中医, 2026, 44(2): 120-130.

化的几种致病机制,其决定了无阻塞性冠状动脉疾病(Coronary artery disease, CAD)的心绞痛和心肌缺血的发生,CMD在冠心病经皮冠状动脉介入治疗(Percutaneous coronary intervention, PCI)术后具有高发性与隐蔽性特点^[3]。PCI是治疗冠心病的主要方法,而冠心病患者接受PCI术后容易发生CMD,有研究表明罹患CMD的PCI术后患者发生心绞痛、心肌梗死、恶性心律失常甚至心源性猝死等不良心血管事件风险增加^[4]。流行病学数据显示,尽管成功实施PCI开通心外膜冠状动脉,仍有约42%的患者存在术后心绞痛复发,其中超过60%的病例归因于未识别的CMD^[5]。随着流行病学研究的不断深入,越来越多的证据表明传统的心血管危险因素,例如高血压、糖尿病、高脂血症等也对CMD的发生和发展起着关键作用。血管斑块可以阻塞冠状动脉,减少流向心肌的血液,导致心肌缺血。肥胖、高血压和糖尿病等疾病可导致冠状动脉血管周围脂肪组织衍生的血管活性产物失衡,促进炎症细胞的浸润,触发冠状动脉血管平滑肌和内皮细胞功能的紊乱,促进大动脉僵硬并导致下游微血管功能障碍,引发CMD。

在临床上,CMD是左心室重构的独立预测因子,与PCI术后1年内MACE风险增加直接相关,但临床诊疗率仍有待提高。有资料显示,心肌缺血人群中CMD的发病率为40%~64%,但仅有约6.3%的人群得到正确的诊疗^[6]。研究证实,PCI术后出现无复流(TIMI 0~1级)的患者,其卒中与室性心动过速/心室颤动发生率显著高于微循环正常者^[7]。CMD的病理影响贯穿心肌再灌注损伤、进行性纤维化及心功能下降全过程,成为制约PCI疗效的关键因素。因此,深入探索CMD机制与防治策略,对改善冠心病患者介入治疗预后具有重要临床意义。

1 CMD的发病机制

1.1 微血管栓塞与痉挛

PCI术中操作导致的远端栓塞是CMD发生的直接诱因。球囊扩张和支架置入过程可导致斑块碎屑、微血栓和胆固醇结晶脱落,随血流栓塞直径<200 μ m的微血管,其中高血栓负荷病变(如破裂斑块、富含脂质斑块)患者风险更高。这些栓塞物不仅直接阻塞微血管腔,同时激活血小板释放血栓素A₂(TXA₂)和血清素,诱发微血管痉挛,进一步增加微循环阻力^[8]。有研究表明,在102例置入支架的患者中,13%的患者术后出现与支架置入相

关的冠脉血管痉挛型心绞痛(Vasospastic angina, VSA)。支架置入会引起或增强VSA,并且支架置入也已被证明会诱发CMD^[9]。同时,急性心肌缺血触发交感神经过度激活,儿茶酚胺释放增加引起微血管持续收缩。应激或心衰状态下,儿茶酚胺和血管紧张素II(Ang II)水平升高,持续刺激微血管收缩,降低血流储备。此外,内皮损伤后,一氧化氮(NO)合成减少而内皮素-1(ET-1)释放增加亦使微血管持续痉挛^[10]。

微血管痉挛是CMD患者血管异常谱的一部分,与血管活性紧张性为主的内皮功能障碍密切相关。微血管痉挛作为一种血管运动障碍,表现为冠状动脉平滑肌细胞的短暂性过度收缩,导致血管狭窄和血流受阻。这种血管痉挛在冠状动脉微血管中的表现尤为重要,可能引发微血管血流障碍,成为PCI后微循环障碍的潜在机制之一。冠心病患者PCI术后微循环障碍的发生率较高,对患者预后产生重要影响。在接受PCI的患者中,不同研究报道的微循环障碍发生率有所差异。在一项对74例接受PCI的缺血性心脏病患者的研究中,通过微循环阻力指数(IMR)评估发现,急性冠状动脉综合征患者占总队列的49%,高敏C反应蛋白(hsCRP) ≥ 3 mg/L组的术前和术后IMR均显著高于hsCRP<3mg/L组,提示炎症与微循环障碍密切相关^[11]。另一项对572例稳定型冠状动脉疾病患者的研究中,术后IMR ≥ 25 (定义为微血管功能受损)的患者在随访4年期间,主要不良心脏事件的累积发生率显著高于低IMR组,表明PCI术后微血管功能障碍与不良事件相关^[12]。此外,在对39例患者的研究中,发现脂质核心斑块与术后微血管功能障碍相关,高脂质核心负担指数组的术后IMR更高,冠状动脉血流储备更低,微血管功能障碍发生率更高^[13]。

1.2 缺血再灌注损伤与内皮功能障碍

再灌注阶段产生的氧化应激是CMD的核心机制。心肌缺血缺氧导致ATP耗竭及黄嘌呤堆积,再灌注后氧分子大量进入,经黄嘌呤氧化酶途径产生超氧阴离子等活性氧(ROS)^[14]。ROS的直接损伤导致内皮细胞膜脂质过氧化,细胞肿胀坏死;NO生物利用度下降,血管舒张功能障碍。再灌注激活中性粒细胞释放髓过氧化物酶(MPO)和弹性蛋白酶,破坏基底膜完整性,引发毛细血管“渗漏综合征”及间质水肿,压迫微血管。

内皮功能障碍是CMD的重要发病机制之一。正常情况下,血管内皮通过释放血管活性物质(如

NO)来调节血管张力,维持血管的舒张功能。然而,在CMD中,内皮功能受损,导致NO生成减少且生物利用度降低,血管收缩因子(如内皮素)增加,血管舒张能力减弱,从而引起血管平滑肌收缩,导致微血管痉挛^[15]。内皮细胞凋亡或异常增生可导致微血管稀疏(毛细血管密度降低),减少心肌有效灌注面积。

1.3 炎症反应与微血管的结构重塑

全身炎症反应在CMD中发挥持续性作用^[16]。PCI术后24小时,血浆炎症因子TNF- α 、IL-6水平显著升高,通过上调黏附分子(ICAM-1、VCAM-1)表达,促进白细胞-血小板聚集体形成,阻塞微血管^[17]。慢性炎症状态(如肥胖、自身免疫疾病)可诱导微血管周围纤维化,管壁增厚,管腔狭窄。此外,再灌注时冠状动脉微循环会聚集大量中性粒细胞和血小板,活化的中性粒细胞释放的促炎分子和活性氧成分,进一步增加了炎症反应^[18]。

冠状动脉微血管的结构重塑似乎主要由肥大细胞、血小板和中性粒细胞活化引发的炎症诱导,导致内皮糖萼的侵蚀^[19]。长期的高血压、糖尿病等危险因素也会导致微血管壁增厚、管腔狭窄,增加血管阻力^[20]。

1.4 个体化危险因素

临床因素如糖尿病、肥胖、妊娠期高血压疾病、慢性炎症和自身免疫性风湿性疾病、慢性肾脏疾病、肥厚型心肌病和主动脉瓣狭窄等疾病显著增加CMD风险^[21]。PCI术后微循环障碍受多种因素影响。临床因素方面,如患者的年龄、性别、糖尿病史、吸烟史等均与微循环障碍相关。在一项对3837例接受PCI的冠心病患者的研究中,多因素逻辑回归分析显示,女性、年龄较大、当前吸烟、低密度脂蛋白胆固醇 $\geq 1.8\text{mmol/L}$ 以及TIMI帧数增加是术后复发性心绞痛的危险因素,而TIMI帧数增加与CMD相关^[22]。在一项对160例ST段抬高型心肌梗死患者的研究中,发现Killip分级、症状发作后延迟住院、峰值肌钙蛋白水平和多支血管疾病与高IMR相关,而实现最终心肌梗死溶栓心肌灌注3级倾向于与低IMR相关,远端栓塞与高IMR显著相关^[23]。

高血糖环境导致内皮依赖性舒张功能下降40%~60%^[24],而肾功能不全患者,尿毒症毒素蓄积促进微血管钙化。血脂异常,尤其是高胆固醇血症,也被认为与CMD密切相关,脂质沉积和血脂

异常可能加重微血管的损伤^[25]。血管因素包括靶病变血栓负荷重(TIMI血栓分级 ≥ 3 级)、侧支循环不良及梗死相关动脉(IRA)直径 $>3.0\text{mm}$ 等。尤其值得注意的是,缺血时间与CMD严重程度呈线性正相关,每延长30分钟,无复流发生率增加7.5%。性别因素,在无阻塞性CAD的情况下,女性胸痛患者阻塞性CAD的患病率较低,但CMD的患病率较高^[26],CMD患病率的性别差异由多种机制共同作用导致,包括性激素效应、自主调节和对致动脉粥样硬化介质(如氧化应激、内皮素-1和血管紧张素II)的易感性差异^[27]。遗传因素也在CMD的发病中起一定作用。某些基因的多态性(如RAAS、过氧化物酶体增殖物激活受体及内皮素等基因)可能影响CMD的发生风险^[28]。

2 CMD的诊断评估技术

2.1 无创诊断评估技术

心肌声学造影(MCE)被誉为无创评估微循环的“金标准”。通过静脉注射含微泡造影剂,利用超声波实时观察心肌灌注情况。微泡浓度与微血管密度直接相关,灌注缺损区提示微血管阻塞^[29]。MCE对微循环障碍的检出敏感性达88%,特异性达92%。2023年研究显示,基于深度学习的MCE定量分析可提升ST段抬高型心肌梗死(STEMI)患者PCI术后预后预测精度^[4]。MCE也有一定的局限性:第一,快心率对于成像的干扰,其形成的组织信号和运动伪影可导致左心室的基底段心肌显像不佳;第二,目前基于MCE的冠心病诊断尚无统一标准,且对于造影结果的准确性及可靠性值得商榷;第三,大多数时候,超声心肌灌注显像的某些灌注缺陷可能是伪影所致,尤其是在心尖部和基底节段处,可通过专业人员的规范操作来纠正,需要同时定性评估灌注异常的位置和范围。

心脏磁共振成像(CMR)和正电子发射断层扫描(PET)等技术被用于评估心肌灌注和微血管功能,提高了CMD的诊断准确性。CMR提供多维微循环信息。首过灌注缺损提示微血管阻塞,晚期钆增强(LGE)区反映心肌纤维化。CMR特征性表现为“无复流区”即梗死核心区高信号环绕的等信号区域,其面积与MACE风险呈正相关。但CMR在急性期应用受限,多推荐于PCI术后7天进行。PET可通过计算静息时和峰值血管扩张剂负荷时左心室心肌中放射性示踪剂摄取率来确定冠状动脉血流储备^[30]。CMR定量成像等众多新技术的出现使

常规心脏磁共振如虎添翼，目前新技术普遍存在成像时间长、图像质量不稳定以及缺乏统一诊断标准等缺陷，但其极大地推动了人们对疾病病理生理变化的认识与理解。

单电子发射计算机断层成像 (SPECT) 技术近期取得重要突破。SPECT 通过定量测算冠状动脉血流储备 (Coronary flow reserve, CFR)，反映冠脉微循环功能。在 PCI 后仍存在心绞痛的患者中，SPECT 诊断 CMD 的灵敏度和特异度较高。2025 年发表的升级版 SPECT 结合心肌血流定量软件，通过测定 CFR 诊断 CMD。以 IMR 为金标准，CFR 截断值 1.985 时诊断曲线下面积 (Area under the curve, AUC) 达 0.840 (95%CI: 0.716~0.964)，展现出良好诊断性能^[31]。SPECT 具有无创、易操作、价格低的优点，并且相比于其他检查方法，不需要使用造影剂，也就表示不会增加急性肾损伤的风险。

经胸多普勒超声心动图利用腺苷达到最大充血扩张状态，可检测 CFR，是评估 CMD 的重要工具^[32]。无创心肌做功超声成像通过压力-应变环分析左心室整体纵向应变 (GLS)、整体做功效率 (GWE) 等参数，敏感评估 PCI 术后心肌功能恢复。研究显示，术后 3 个月 GWI、GWE 显著改善，较左室射血分数 (LVEF) 更早反映心功能变化^[33]。心电图 (ECG) 特别是 ST-T 段改变情况，便于临床进一步了解患者血管再通后心肌再灌注效果，对于评估患者预后具有重要意义^[34]。

2.2 有创诊断评估技术

无创诊断评估技术在微循环评估中存在一定局限性，主要表现为定性和主观性较强。相较之下，侵入性指标可以更客观地反映微血管的状态。

IMR 是一种热稀释法测量的最小可达到的微血管阻力，通过压力导丝同步测量冠脉内压力和传导时间，相对容易测量，更具有可重复性，具有更清晰的正常值，并且与心外膜冠状动脉狭窄无关，不受心外膜病变和侧支循环影响，是目前公认的 CMD “金标准”。IMR 已被证明对 ST 段型抬高心肌梗死和心脏移植后心脏移植血管病变患者具有预后价值。新的数据表明它在评估胸痛和非阻塞性 CAD 患者中的作用^[35]。IMR 越来越多地被用作临床试验中侵入性评估微血管的参考标准。造影衍生微循环阻力指数 (Angio-IMR) 术中实时计算，截断值 $\geq 40\text{mmHg}\cdot\text{s}$ 提示高风险，与心肌梗死面积扩大显著相关^[36]。

CFR 反映冠脉系统对代谢需求的调节能力，是

评价局灶性或微循环 CAD 所致心肌血流损害的生理指标，但受心外膜病变和血流动力学波动影响，重复性差^[37]。微血管阻力储备 (MRR) 为静息微血管阻力与充血微血管阻力之比，可校正心外膜病变的影响，作为新提出的指标，更精准评估微循环功能^[38]。

不同诊断技术各有优缺点。侵入性技术如测量 IMR，可直接评估冠状动脉微循环阻力，具有较高的特异性和可重复性，在预测心肌恢复和长期死亡率方面具有重要价值^[39]。然而，该方法属于有创操作，存在一定风险，且需要特定的设备和技术人员。非侵入性成像技术如 CMR 和 PET，可无创地评估心肌灌注和微循环功能，具有较高的准确性和安全性，能提供有关心肌血流和血流储备的信息^[40]。但这些技术通常需要昂贵的设备，检查费用较高，且部分技术对患者的配合度要求较高。MCE 作为一种非侵入性技术，可检测心肌灌注并量化冠状动脉血流，在评估微循环功能方面具有一定优势，但其结果可能受多种因素影响，如超声探头的位置、患者的呼吸等^[41]。此外，一些新兴诊断技术如近红外光谱技术等，虽然具有潜在的应用价值，但目前仍处于研究阶段，其准确性和可靠性还需要进一步验证。

3 CMD 的防治策略研究进展

3.1 药物干预

尼可地尔通过开放 K^+ -ATP 通道和激活 NO-cGMP 信号通路，具有硝酸酯类和钾通道开放剂的双重作用，能够扩张冠脉微血管，改善冠状动脉微血管内皮细胞功能和心肌灌注，减轻缺血再灌注损伤，调节微血管收缩增加血供，抑制冠脉痉挛和微栓塞的形成^[42]，是预防冠脉微循环障碍发生发展，减轻患者临床症状，提高生活质量方面重点研究药物之一。

抗栓药物强化是防治微栓塞的核心。替罗非班 (GP II b/ III a 受体拮抗剂) 与硝普钠联合冠脉内给药，通过协同机制抑制血小板聚集并扩张微血管。研究证实，该方案较单纯生理盐水显著改善冠状动脉血流灌注 (ST 段回落率提高 35%)^[21]。对于高血栓负荷患者，术中比伐卢定持续静滴 (术后 $0.25\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ 维持 4 小时) 较传统肝素方案降低出血风险，同时减少支架内血栓形成^[43]。

他汀类药物具有减少斑块内脂质丰富的坏死核心、减少巨噬细胞和泡沫细胞的形成、减轻炎症、促进纤维帽增厚、并降低血小板反应性的功能。不

仅降脂,还可调节血管内皮功能、控制炎症反应、保护心肌、稳定斑块和血栓。有研究表明,与未接受他汀类药物治疗的患者相比,接受他汀类药物治疗的非梗阻性CAD患者的结局明显更好^[44]。

血管紧张素转换酶抑制剂/血管紧张素Ⅱ受体阻滞剂(ACEI/ARB),通过反向重塑冠状动脉和改善微血管功能来改善冠脉动脉血流。他汀改善内皮NO合成,ACEI抑制肾素-血管紧张素-醛固酮(RAAS)系统,减少微血管周围纤维化。有研究表明,基线ⅡA组分泌型磷脂酶A2(血管中的炎症介质)水平升高是心血管事件发生的独立预测因子,并且编码该蛋白的PLA2G2A他汀类药物和ACEI联合治疗可有效改善胸痛和冠状动脉造影正常患者的内皮功能和生活质量^[45]。WARRIOR试验正在评估高强度他汀类药物、ACEI和阿司匹林的联合治疗对CMD患者长期预后的影响^[46]。

Rho激酶抑制影响鸟苷三磷酸结合蛋白Rho,其通过抑制肌球蛋白磷酸酶的肌球蛋白结合亚基来增强肌球蛋白轻链磷酸化,从而导致血管平滑肌过度收缩^[47]。Rho激酶在冠状动脉血管运动异常和相关VSA的发病机制中起关键作用,其中Rho激酶在循环中性粒细胞中的活性是诊断、活性评估和长期预后的重要生物标志物^[48]。Rho激酶抑制剂(如法舒地尔)可改善血管痉挛性心绞痛患者的IMR,高效预防乙酰胆碱诱导的冠状动脉痉挛和由此导致的心肌缺血。Rho激酶途径已被证明与内皮功能障碍、血管平滑肌过度收缩和血管痉挛以及血管外膜中的炎性细胞积聚密切相关,是胸痛和非阻塞性CAD患者发病的重要机制。冠状动脉内使用法舒地尔不仅对心外膜冠状动脉痉挛患者有效,而且对约三分之二的微血管性心绞痛(MVA)患者也有效。

精氨酸酶Ⅰ在冠状动脉微血管内皮细胞中表达,并通过与内皮NO合酶竞争共同底物L-精氨酸来抑制NO的产生^[49]。精氨酸酶Ⅰ是一种依赖双锰离子的胞浆水解酶,催化L-精氨酸分解为尿素和L-鸟氨酸,与内皮型NO合酶(eNOS)竞争共同底物L-精氨酸,构成“精氨酸-NO”代谢轴的核心分支^[50]。在人冠状动脉微血管内皮及平滑肌细胞中,精氨酸酶Ⅰ可被氧化应激、TNF- α 、血栓素等炎症信号快速诱导;其活性升高直接降低细胞内L-精氨酸浓度,减少NO生成,导致内皮依赖舒张障碍、血小板聚集及白细胞黏附增强。大量动物与早期临床证据显示,靶向抑制精氨酸酶Ⅰ可显著降低IMR、改善CFR,并减少PCI术后靶血管

失败率。未来需要大规模随机对照研究进一步验证其疗效与安全性,并制定基于精氨酸酶Ⅰ水平的个体化治疗路径^[51]。ILIAS注册研究首次证实:PCI术后,微血管阻力升高组术后10个月靶血管失败率增加3.6倍,且该组术前IMR显著高于对照组,而两组术前冠脉造影狭窄参数无差^[52]。虽然未直接测定精氨酸酶Ⅰ,但其“高IMR亚组”临床表型(高炎症、内皮功能障碍)与精氨酸酶Ⅰ高表达人群高度重合;基础部分已证实精氨酸酶Ⅰ活性与IMR呈正相关。

钙通道阻滞剂对微血管痉挛性CMD有较好疗效,在用钙通道阻滞剂治疗后,痉挛的冠状动脉血管周围炎症的程度显著降低。贝尼地平是L-、N-和T-型三重钙通道阻滞剂,对冠状动脉平滑肌细胞有高亲和力,以及与其他用于治疗血管痉挛性心绞痛的主要钙通道阻滞剂(如硝苯地平和地尔硫卓)相比更有益的预后作用,因此贝尼地平被优先用作药物的选择^[53]。

中医药通过多层次干预改善CMD,多项研究表明,中药对冠状动脉介入术后CMD有显著疗效^[54]。“一种治疗心肌缺血的药物组合物”复方制剂(包括雷诺嗪、丹参、三七、冰片),研究显示其具有通过抑制晚钠电流,减少心肌细胞内钙超载,改善微血管功能的作用^[55]。麝香通心滴丸可改善血管内皮功能,缓解心绞痛症状,尤其适用于非阻塞性冠心病患者^[56]。陈皮一半夏主要通过保护冠脉微循环内皮细胞功能,抑制细胞凋亡,影响炎症反应,从而达到治疗冠脉微血管功能障碍的作用^[57]。

3.2 非药物策略

运动康复是CMD治疗的重要手段,运动康复可以改善冠状动脉血流动力学,增强心肺功能,提高患者预后及生活质量^[58]。研究发现规律的运动训练可改善患者的心脏功能和微循环灌注。在一项针对急性ST段抬高型心肌梗死患者PCI术后的研究中,通过心肌声学造影评估发现,运动康复可改善患者的心肌微循环灌注,表现为与IMR相关的定量参数如A值、 β 值和 $A \times \beta$ 值的改善^[45]。

生活方式干预包括戒烟、控制体重、健康饮食等。吸烟是CMD的危险因素之一,戒烟可降低心血管疾病风险,改善微循环功能。肥胖与代谢综合征相关,可加重微循环障碍,控制体重对于合并肥胖的患者也很重要。健康饮食如减少饱和脂肪酸和胆固醇摄入,增加蔬菜、水果和全谷物摄入,有助于控制心血管危险因素,对改善微循环可能具有一

定作用。而采用地中海饮食或低脂饮食,有助于控制体重、血脂和血糖,降低CMD的发病风险^[59]。此外,心理调适也应作为生活方式干预的一部分,可帮助患者缓解焦虑和压力,提高治疗依从性和生活质量。有氧运动可提高CMD患者的运动耐量,改善心肌灌注和内皮功能。

压力控制间断性冠状动脉阻塞(PICSO)通过使用球囊导管控制冠状窦压力的间歇性升高,促进低灌注或缺血心肌的逆行灌注,从而对心脏供血产生有利影响。一项非前瞻性随机试验结果显示,CMD患者PCI后行PICSO治疗,可以明显降低患者IMR,改善冠状动脉微循环供血,并且有利于改善患者的长期预后^[60]。

3.3 手术操作优化

术前使用血管内超声(IVUS)或光学相干断层扫描(OCT)进行详细的血管壁评估,可以提供比冠状动脉造影(CAG)更丰富的信息。OCT具有更高的分辨率,能够检测到血栓、斑块侵蚀和纤维帽厚度等细节,有助于识别易损斑块^[61]。

规范化操作流程是预防医源性CMD的基础,近端保护装置应用对静脉桥血管病变或退行性大隐静脉移植血管,可拦截94%的碎屑物质^[62]。维持有效灌注压避免低血压(SBP<90mmHg),必要时使用主动脉球囊反搏(IABP)^[63]。减少对对比剂用量,推荐最大剂量 $\leq 3.7\text{mL/kg}$ (血清肌酐正常者),降低血液高渗状态对微循环的影响^[64]。简化手术流程,高CMD风险患者避免旋磨等复杂操作。

远端保护装置可降低STEMI患者术后MACE和无复流的发生率,但不能提高微循环的血流灌注和降低心肌梗死面积^[65]。

血栓减负技术是处理高血栓负荷的关键。手动血栓抽吸适用于IRA直径>3.0mm、TIMI血栓分级 ≥ 3 级的患者。尽管TOTAL研究未显示常规抽吸获益,但对选择性高危人群(如静脉桥血管病变、大血栓负荷),抽吸仍可减少远端栓塞。准分子激光消融术(ELCA)通过光化学效应溶解血栓,适用于反复抽吸无效的顽固性血栓,尤其对支架内再狭窄合并血栓效果显著。血栓抽吸,可降低术后再梗死和支架内血栓的发生率,但对全因死亡率无显著影响^[66]。

对冠状动脉内血栓负荷重或大隐静脉桥血管介入的患者可考虑采用准分子激光消融术,以减少无复流的发生^[67]。

延迟支架植入策略为高危患者提供新选择,与

PCI术后即刻植入支架相比,支架延迟植入可优化支架植入参数,降低远端栓塞率和慢血流/无复流发生率,促进心功能恢复^[68]。

术后密切监测患者的心电、血压、呼吸等生命体征,及时发现并处理穿刺部位并发症、造影剂肾病及抗血小板药物引起的血小板减少等问题^[69]。对于慢性完全闭塞性病变患者,术后需特别注意观察手术入路伤口有无渗血、血肿及假性动脉瘤,并监测心功能情况^[70]。

4 讨论

4.1 基因与分子机制深入研究

基因多态性在CMD的易感性中起重要作用,单核苷酸多态性(SNPs)在调节冠状动脉血流的基因中可能成为CMD的遗传决定因素^[71]。例如,编码腺苷2A受体基因的1976T.C多态性与PCI后无复流的发生率相关。此外,VEGFA和CDKN2B-AS1基因特定区域的变异也被证实与冠脉微循环紊乱有关^[72]。

针对CMD相关的基因突变,如RAS基因家族^[73],开展基因治疗研究,有望从根本上改善微血管功能。目前尚无针对基因多态性变异的直接干预研究,但已有研究揭示了某些基因与CMD的关联,如BPIFB4在微血管调控中具有保护作用,其调节微血管的机制可能通过影响血管舒缩和抗炎反应实现^[74]。此外,糖尿病患者中,特定的遗传变异与PCI后微血流不畅(No-reflow)现象密切相关,提示遗传背景在微血管功能障碍中的重要性^[75]。

4.2 精准疾病诊断与评估

目前仍需进一步研究CMD的自然史,以识别高风险人群,并开发更有效的治疗策略。最新研究关注PCI后微循环障碍的管理策略。通过结合血管成像、微循环功能检测与临床表现,能够实现微循环障碍的早期识别与个体化干预^[76]。这些方法的应用,有望改善PCI患者的预后,减少心血管事件的发生。

有研究通过光学相干断层成像(OCT)观察INOCA患者的冠状动脉形态特征,发现冠状动脉的血管外膜血管(AVV)和瘤内新血管(IPN)与微循环功能异常密切相关^[77]。该研究首次揭示了冠状动脉形态学特征与微循环功能异常之间的联系,为微循环障碍的早期诊断提供了结构基础。

在微循环功能的评估方面,IMR作为一种重要的指标,已被广泛应用于PCI后微循环障碍的检测。IMR的测定不仅可以反映微血管的血流阻力,还具

有良好的预后预测价值。特别是在 PCI 后, IMR 的即时测量有助于识别微循环功能障碍, 从而指导个体化的治疗策略。此外, 微循环阻力评估技术的出现, 为非侵入性微循环检测提供了新的可能性, 提升了诊断的便利性和准确性^[78]。

在微循环障碍的机制研究方面, 微血管功能障碍常与血管钙化、血管新生异常等结构性变化相关。这些结构性变化不仅影响血流动力学, 还与冠状动脉疾病的临床表现密切相关。结合血管成像与功能指标的多模态评估, 有助于揭示微循环障碍的复杂机制, 为精准治疗提供依据^[79]。

4.3 中医药治疗

近年来, 中医药在治疗冠状动脉微血管疾病 (CMD) 方面取得了显著进展。中医药在治疗 CMD 方面具有独特优势, 通过多靶点、多途径的综合调节作用, 可显著改善心肌微循环灌注、缓解临床症状并提高患者生活质量。CMD 在中医文献中未有专门记载, 但多数医家将其归属于“胸痹”“心痛”范畴, 部分医家认为其属于“络病”范畴。中医认为, CMD 的主要病机为气滞痰阻血瘀, 治疗多采用理气、宽胸、化痰、活血等方法^[80]。中医药以“通补络脉”为核心, 通过多靶点调节内皮功能、炎症及血流动力学, 为 CMD 提供了独特治疗维度^[81]。

除此之外, 中医药可与西医常规治疗 (如抗血小板药物、 β 受体阻滞剂、硝酸酯类药物等) 联合应用, 发挥协同作用, 提高疗效。例如, 在西医治疗基础上加用通心络胶囊, 可进一步改善心肌微循环, 减少心绞痛发作。中医药可减轻西药的不良反应, 如阿司匹林引起的胃肠道不适、他汀类药物引起的肝功能异常等^[82]。复方丹参滴丸联合替罗非班可明显改善冠心病 PCI 治疗术后的冠状动脉慢血流现象, 改善病人冠脉和心肌微循环灌注^[83]。

4.4 个体化防治

微创技术的应用为改善微循环提供了新的思路。例如, 在急性心肌梗死患者中, 通过在冠状动脉内置入微导管实现低剂量溶栓药物的持续灌注, 为血流再灌注提供了创新方案^[84]。此方法有助于改善微血管的血流状态, 减少微循环障碍的发生。

药物干预在个体化治疗中扮演着重要角色。前列腺素 E1 (PGE1) 在急诊 PCI 中展现出对微循环障碍的疗效与安全性, 显示药物补充可以有效改善微血管功能^[85]。此外, 硝酸酯类药物在冠状动脉痉挛检测中的应用, 为个体化诊疗提供了基础^[86]。而在药物选择方面, 三甲基天冬氨酸在 PCI 后反复

发作的心绞痛患者中表现出预防作用^[87], 强调了药物个体化的重要性。

诊断手段的不断进步也为微循环障碍的个体化管理提供了支持。冠状动脉血管反应性测试 (如阿司匹林刺激试验) 在识别血管运动障碍中的作用^[88], 为制定个体化治疗方案提供了依据。利用 AI 技术分析多模态生物数据, 如血液分析、影像学和细胞测序结果, 有助于早期识别 CMD 高风险人群, 制定个体化治疗方案^[89]。

此外, 个体化治疗还涉及到药物的个体化管理策略。例如, 针对糖尿病患者的研究表明, 个体化血糖管理有助于预防心血管事件^[90], 而在抗血小板治疗方面, 指南建议根据患者具体情况制定个体化方案^[91]。中医药在此领域也展现出一定优势, 基于辨证施治的原则, 个体化中药治疗在改善微血管功能方面具有潜力。

5 小结与展望

CMD 是 PCI 术后预后评估的关键指标, 其病理机制复杂, 涉及多环节。有创评估指标如 IMR 和 MRR 为 CMD 的诊断提供了精准手段, 而非侵入性方法如 SPECT 和心肌声学造影则更利于临床推广。药物治疗如尼可地尔、替罗非班、他汀类药物、ACEI/ARB 和 PCSK9 抑制剂等在改善 CMD 方面展现出显著疗效, 而非药物治疗如远端保护装置和血栓抽吸等技术的疗效尚存争议。未来研究应进一步探索 CMD 的病理机制, 优化诊断方法, 并开发更有效的治疗策略, 以改善 PCI 术后患者的预后。

参考文献

- [1] 玄昌波, 王显. 冠状动脉微循环障碍研究进展[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2016, 8(10): 1275-1278.
- [2] 宋雨晴, 符德玉, 周训杰, 等. 中医药防治 PCI 术后冠状动脉微循环障碍的研究进展[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2025, 23(2): 233-237.
- [3] 沐露霞, 孙震, 乐扬, 等. 急性 ST 段抬高型心肌梗死急诊 PCI 术后联用补肾通脉方的疗效观察及机制探讨[J]. 四川中医, 2024, 42(9): 107-112.
- [4] 曹伟, 莫云秋. PCI 术后冠状动脉微循环障碍的机制及诊断新进展[J]. 大众科技, 2023, 25(5): 71-74, 187.
- [5] 李同乐, 许祖建. 基于“久病入络”理论论治冠心病 PCI 术后冠脉微循环障碍[J]. 云南中医中药杂志, 2025, 46(5): 105-109.
- [6] Chen C, Wei J, Albadri A, et al. Coronary microvascular dysfunction—epidemiology, pathogenesis, prognosis, diagnosis, risk factors and therapy[J]. Circulation Journal,

- 2016, 81(1): 3-11.
- [7] 中华医学会心血管病学分会, 中华心血管病杂志编辑委员会. ST段抬高型心肌梗死患者急诊PCI微循环保护策略中国专家共识[J]. 中华心血管病杂志, 2022, 50(3): 221-230.
- [8] Buono MGD, Tassell BWV, Abbate A. Clarification regarding the lack of heart failure events in the ASSAIL-MI trial[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2021, 78(6): 637.
- [9] 赵普, 李牧蔚, 沈玉祥. 经皮冠状动脉介入治疗术后血管痉挛性心绞痛的病因及诊断方法的研究进展[J]. 中国心血管病研究, 2022, 20(3): 231-235.
- [10] 廖慧, 周淑妮, 谭田芳. 温阳活血解毒方对急性心肌梗死PCI术后患者心功能及血浆MDA、NO、ET-1的影响[J]. 四川中医, 2022, 40(2): 69-72.
- [11] David CT, Robert W, Andrew M, *et al.* High-sensitivity C-reactive protein is a predictor of coronary microvascular dysfunction in patients with ischemic heart disease[J]. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 2018, 4: 81.
- [12] Nishi T, Murai T, Ciccarelli G, *et al.* Prognostic value of coronary microvascular function measured immediately after percutaneous coronary intervention in stable coronary artery disease: An international multicenter study[J]. *Circulation. Cardiovascular Interventions*, 2019, 12(9): e007889.
- [13] Yang HM, Yoon MH, Lim HS, *et al.* Lipid-core plaque assessed by near-infrared spectroscopy and procedure related microvascular injury[J]. *Korean Circulation Journal*, 2019, 49(11): 1010-1018.
- [14] Buono MGD, Montone RA, Camilli M, *et al.* Coronary microvascular dysfunction across the spectrum of cardiovascular diseases[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2021, 78(13): 1352-1371.
- [15] 高桂英, 胡阳, 张世益, 等. 运动康复改善冠状动脉微循环障碍的相关机制研究进展[J]. 中国全科医学, 2025, 28(20): 2570-2576.
- [16] Godo S, Takahashi J, Yasuda S, *et al.* Role of inflammation in coronary epicardial and microvascular dysfunction[J]. *European Cardiology*, 2021, 16: e13.
- [17] Candreva A, Gotschy A, Stehli J, *et al.* Microcirculatory resistance after primary percutaneous coronary intervention predicts residual myocardial damage: A post hoc analysis from the CLEVER-ACS trial[J]. *European Heart Journal*, 2025, 14(4): e036033.
- [18] 毛幼林. 急性心梗患者无复流治疗的临床研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- [19] Yeung K, Singh K, Dautov RF, *et al.* Coronary "microvascular dysfunction": Evolving understanding of pathophysiology, clinical implications, and potential therapeutics[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(14): 21.
- [20] Taqueti VR, Di CMF. Coronary microvascular disease pathogenic mechanisms and therapeutic options: JACC state-of-the-art review[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2018, 72(21): 2625-2641.
- [21] Konst RE, Guzik TJ, Kaski J, *et al.* The pathogenic role of coronary microvascular dysfunction in the setting of other cardiac or systemic conditions[J]. *Cardiovascular Research*, 2020, 116(4): 817-828.
- [22] Xu T, Li Y, Zhao LD, *et al.* Predictors of recurrent angina in patients with no need for secondary revascularization[J]. *World Journal of Emergency Medicine*, 2021, 12(1): 42-47.
- [23] Kwon S. Mechanical and pharmacological revascularization strategies for prevention of microvascular dysfunction in ST-segment elevation myocardial infarction: Analysis from index of microcirculatory resistance registry data[J]. *Journal of Interventional Cardiology*, 2020, 2020: 5036396.
- [24] Rabea A, Andrew P, Nina SL, *et al.* Haptoglobin phenotype is associated with high-density lipoprotein-bound hemoglobin content and coronary endothelial dysfunction in patients with mild nonobstructive coronary artery disease[J]. *Arteriosclerosis, Thrombosis and Vascular Biology*, 2019, 39(4): 774-786.
- [25] Vuorio A, Kovanen P, Raal F. Coronary microcirculatory dysfunction in hypercholesterolemic patients with COVID-19: Potential benefit from cholesterol-lowering treatment[J]. *Annals of Medicine*, 2023, 55(1): 2199218.
- [26] Bardri AA, Wei J, Quesada O, *et al.* Coronary vascular function and cardiomyocyte injury: A report WISE-CVD[J]. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2020, 40(12): 3015-3021.
- [27] Godo S, Shimokawa H. Gender differences in endothelial function and coronary vasomotion abnormalities[J]. *Gender and the Genome*, 2020, 42470289720957012-2470289720957012.
- [28] 张运, 陈韵岱, 傅向华, 等. 冠状动脉微血管疾病诊断和治疗的专家共识[J]. 中国循环杂志, 2017, 32(5): 421-430.
- [29] 杨尹. 心声学造影评估急性心梗患者PCI术后冠状动脉微循环障碍的应用及影响因素[D]. 大理白族自治州: 大理大学, 2023.
- [30] Sati H, Sellke FW, Bourque JM, *et al.* Coronary microvascular dysfunction: A guide for clinicians[J]. *The American Journal of Medicine*, 2024, 137(9): 810-817.

- [31] 贾硕,程功,关蕾,等. 单电子发射计算机断层成像技术在经皮冠状动脉支架植入术后患者冠脉微循环障碍中的诊断性能研究[J]. 中国全科医学, 2025, 28(9): 1122-1127.
- [32] T W, T H, K T, *et al.* Impact of transcatheter aortic valve implantation on coronary flow reserve by transthoracic Doppler echocardiography 1-year after the intervention in severe aortic stenosis patients[J]. *European Heart Journal*, 2021, 42(Supplement1).
- [33] 刘辉,张楠,张惠敏,等. 无创心肌做功超声成像联合血清标志物评估冠心病PCI手术前后心功能的差异性研究[J]. 医学影像学杂志, 2022, 32(7): 1139-1143.
- [34] 张盈. 急性心肌梗死急诊介入治疗术后心电图ST-T演变的临床意义[J]. 心血管病防治知识, 2024, 14(15): 24-27.
- [35] Fearon WF, Kobayashi Y. Invasive assessment of the coronary microvasculature: The index of microcirculatory resistance[J]. *Circulation. Cardiovascular Interventions*, 2017, 10(12): e005361-e005361.
- [36] Wang JP, Li CG, Zhang MY, *et al.* The performance of angiography-derived index of microcirculatory resistance for ischemia in angina with non-obstructive coronary artery disease: Validated by wire-based IMR and SPECT-MPI[J]. *International Journal of Cardiology*, 2025, 431: 133236.
- [37] 杨勇江,靳春荣. 冠状动脉血流储备临床应用进展[J]. 医学研究杂志, 2022, 51(6): 184-186, 172.
- [38] Dimitriadis K, Pырpyris N, Sakalidis A, *et al.* The prognostic role of microvascular resistance reserve: A systematic review and meta-analysis[J]. *Cardiovascular Revascularization Medicine: Including Molecular Interventions*, 2025, S1553-8389(25)00167-8.
- [39] Gonzalo JM, Yong ASC, Fearon WF, *et al.* The index of microcirculatory resistance in the physiologic assessment of the coronary microcirculation. [J]. *Coronary Artery Disease*, 2015, 26 Suppl 1: e15-26.
- [40] Haseeb R, Scannell CM, Demir OM, *et al.* High-resolution cardiac magnetic resonance imaging techniques for the identification of coronary microvascular dysfunction[J]. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 2020, 14(5): 978-986.
- [41] Lyu WY, Qin CY, Wang XT, *et al.* The application of myocardial contrast echocardiography in assessing microcirculation perfusion in patients with acute myocardial infarction after PCI[J]. *BMC Cardiovascular Disorders*, 2022, 22(1): 233-233.
- [42] 刘洁良,董豪坚. 尼可地尔对冠状动脉微循环障碍防治的研究进展[J]. 岭南心血管病杂志, 2022, 28(4): 375-378.
- [43] Marco V, Enrico F, Sergio L, *et al.* Bivalirudin or unfractionated heparin in acute coronary syndromes[J]. *New England Journal of Medicine*, 2015, 373(11): 997-1009.
- [44] Rutishauser J. Statins in clinical medicine[J]. *Swiss Medical Weekly*, 2020, 141: 28-35.
- [45] Akintunde OA, Lawler PR, Chu AY, *et al.* Group IIA secretory phospholipase A2, vascular inflammation, and incident cardiovascular disease[J]. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2019, 39(6): 1182-1190.
- [46] 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes[J]. *Revista Española de Cardiología (English Edition)*, 2020, 73(6): 495-495.
- [47] Shimokawa H. RhoA/Rho-kinase in the cardiovascular system[J]. *Proceedings for Annual Meeting of The Japanese Pharmacological Society*, 2018, WCP2018: SY84-5.
- [48] Taro N, Jun T, Kiyotaka H, *et al.* Prognostic impacts of Rho-kinase activity in circulating leucocytes in patients with vasospastic angina[J]. *European Heart Journal*, 2018, 39(11): 952-959.
- [49] 王涵,苏立. 冠状动脉微循环障碍治疗进展[J]. 临床医学进展, 2022, 12(8): 7734-7744.
- [50] Caldwell RW, Rodriguez PC, Toque HA, *et al.* Arginase: A multifaceted enzyme important in health and disease[J]. *Physiological Reviews*, 2018, 98(2): 641-665.
- [51] Heuser SK, Li J, Pudewell S, *et al.* Biochemistry, pharmacology and in vivo function of arginases. [J]. *Pharmacological Reviews*, 2024, 77(1): 100015-100015.
- [52] Eftekhari A, Van de Hoef TP, Hoshino M, *et al.* Changes in microvascular resistance following percutaneous coronary intervention - From the ILIAS global registry[J]. *International Journal of Cardiology*, 2023, 392: 131296-131296.
- [53] Camici P G, Crea F. Coronary microvascular dysfunction[J]. *New England Journal of Medicine*, 2007, 356(8): 830-840.
- [54] 王澳龙,卫靖靖,于瑞,等. 经皮冠状动脉介入术后冠脉微循环障碍的中医药治疗研究概述[J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(2): 136-141.
- [55] Sharp RP, Patatianian E, Sirajuddin R. Use of ranolazine for the treatment of coronary microvascular dysfunction[J]. *American Journal of Cardiovascular Drugs*, 2021, 21(5): 513-521.
- [56] 刘晖,吕政. 通心络胶囊辅助治疗对急性心肌梗死患者PCI术后心肌微循环和左室重构的改善分析[J]. 世界中西医结合杂志, 2020, 15(10): 1926-1930.
- [57] 金颂峰,宫丽鸿,邸静鑫. 基于网络药理学的“陈皮一半夏”药对治疗冠脉微循环障碍的作用机制研究[J]. 海南医学院, 2021, 27(23): 1822-1829.
- [58] 王苑,王广东,吴茂林,等. 抗阻运动康复训练联合增强型

- 体外反搏对高血压冠心病PCI术后血流动力学及心肺功能的影响[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2025, 17(1): 43-46.
- [59] 张锦. 基于多学科的运动处方联合多元化宣教干预对急性心肌梗死PCI术后患者生活方式及运动耐力的影响[J]. 反射疗法与康复医学, 2025, 6(7): 62-65.
- [60] 王依阳, 程功, 李兆, 等. 冠状动脉微循环障碍治疗策略[J]. 实用心脑血管病杂志, 2022, 30(6): 7-12.
- [61] Gupta D, Saradava N, Patel A, *et al.* Optimization of percutaneous coronary intervention using optical coherence tomography[J]. *Indian Heart Journal*, 2020, 72: S13.
- [62] 刘涛, 李浪. 栓子保护装置预防冠状动脉远端栓塞的研究进展[J]. 实用医学杂志, 2014, 30(19): 3039-3041.
- [63] 张利花, 吕建华, 宋颖飞. 经皮冠状动脉介入治疗联合主动脉内球囊反搏术治疗急性心肌梗死伴心源性休克患者的效果[J]. 中国民康医学, 2025, 37(9): 46-48, 52.
- [64] 单海滨. 低对比剂用量、智能低辐射剂量CT技术在冠状动脉CTA检查中的价值[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(2): 68-70.
- [65] 张旭军, 王清平. 急性ST段抬高型心肌梗死直接介入治疗中高血栓负荷处理策略及进展[J]. 中国临床研究, 2015, 28(8): 1094-1098.
- [66] 彤云鹏, 陈豫贤, 代聚平, 等. 血栓抽吸术联合冠状动脉内注射尼可地尔治疗NSTEMI患者PCI术中慢血流/无复流的效果及对心肌微灌注、近期预后的影响[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43(16): 3841-3845.
- [67] 夏成雨, 鄢华, 宋丹, 等. 准分子激光冠状动脉消融术在复杂冠状动脉病变治疗中的安全性和有效性[J]. 临床心血管病杂志, 2025, 41(2): 115-119.
- [68] 仇俊玲, 马艳萍. 不同PCI术后支架植入时机对急性心肌梗死患者疗效及远期预后的影响[J]. 临床医学研究与实践, 2021, 6(27): 54-56.
- [69] 陈聪, 张小丽, 王瑞琪. 基于心率和肌氧监测的心脏康复运动指导模式在PCI术后 I 期心脏康复患者中的应用价值[J]. 医学理论与实践, 2024, 37(20): 3569-3572.
- [70] 邵明璐, 任敏, 庄燕, 等. 基于心肺功能监测的个体化运动配合针刺夹脊穴对PCI术后患者氧化应激相关指标的影响[J]. 保健医学研究与实践, 2024, 21(7): 83-89.
- [71] Severino P, D'Amato A, Prospero S, *et al.* Coronary microcirculation in myocardial ischemia: A genetic perspective[J]. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, 2025, 203: 67-75.
- [72] 段天兵, 向定成. 急性心肌梗死后冠状动脉微循环障碍发生机制和诊治方法的研究进展[J]. 中国循环杂志, 2019, 34(7): 722-725.
- [73] Gutierrez E, Piña J M, Palacios I, *et al.* Evolution and structural correlation of subacute coronary microcirculatory changes after administration of allogeneic cardiac stem cells for treating myocardial infarction[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2019, 73(9): 1300.
- [74] Calligaris M, Aleksova A, Fluca AL, *et al.* Protective role of the longevity-associated BPIFB4 gene on cardiac microvascular cells and cardiac aging[J]. *Vascular Pharmacology*, 2025, 158: 107470.
- [75] Salvoitore T, Galiero R, Caturano A, *et al.* Coronary microvascular dysfunction in diabetes mellitus: Pathogenetic mechanisms and potential therapeutic options[J]. *Biomedicine*, 2022, 10(9): 2274-2274.
- [76] Tang N, Li MK, Li RH, *et al.* Advances in the diagnosis and management of post-percutaneous coronary intervention coronary microvascular dysfunction: Insights into pathophysiology and metabolic risk interactions[J]. *World Journal of Cardiology*, 2025, 17(2): 103950.
- [77] Kensuke N, Akira S, Kento F, *et al.* Prognostic links between OCT-delineated coronary morphologies and coronary functional abnormalities in patients with INOCA[J]. *JACC. Cardiovascular Interventions*, 2021, 14(6): 606-618.
- [78] Hernán M, Lin W, Gonzales CD, *et al.* Angiography-derived assessment of coronary microcirculatory resistance in patients with suspected myocardial ischaemia and non-obstructive coronary arteries[J]. *EuroIntervention: Journal of EuroPCR in Collaboration with the Working Group on Interventional Cardiology of the European Society of Cardiology*, 2022, 18(16): e1348-e1356.
- [79] Ballesteros L, Riou L, Marliere S, *et al.* Coronary physiology: Delivering precision medicine?[J]. *Reviews in Cardiovascular Medicine*, 2022, 23(5): 158.
- [80] 湛武逸, 何安霞. 中医药治疗冠状动脉微血管疾病研究进展[J]. 云南中医中药杂志, 2024, 45(9): 90-93.
- [81] 陈滢如, 王震, 王咏, 等. 中药干预非阻塞性冠状动脉疾病患者冠状动脉微循环功能障碍的研究进展[J]. 中国医刊, 2024, 59(6): 590-593.
- [82] 葛昭, 杨志华, 任思霖, 等. 肠道微生态: 中医药治疗冠脉微循环障碍的潜在靶点[J]. 世界中医药, 2024, 19(20): 3162-3166.
- [83] 张远恒, 陈绪江. 复方丹参滴丸联合替罗非班改善经皮冠状动脉介入术后冠状动脉慢血流及心肌局部微循环障碍62例效果分析[J]. 安徽医药, 2020, 24(8): 1639-1642.
- [84] Chen YZ, Liu Y, Li XH, *et al.* Intracoronary microcatheter indwelling for continuous pumping of low-dose thrombolytic drugs: A new approach to reperfusion in acute myocardial infarction[J]. *Medicine*, 2024, 103(14): e37692.

- [85] Chen Y, Wang MD, Yang YL, *et al.* Efficacy and safety of alprostadil in microcirculatory disturbances during emergency PCI: A meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *American Journal of Cardiovascular Drugs*, 2024, 24(4): 547-556.
- [86] Gurgoglione FL, Vignali L, Montone RA, *et al.* Coronary spasm testing with acetylcholine: A powerful tool for a personalized therapy of coronary vasomotor disorders[J]. *Life*, 2024, 14(3): 292.
- [87] De Luca L, Leonardo DL, Rosano GMC, *et al.* Post-percutaneous coronary intervention angina: From pathophysiological mechanisms to individualized treatment[J]. *Cardiology Journal*, 2021, 29(5): 850-857.
- [88] Kurabayashi M, Asano M, Shimura T, *et al.* Comparison of basal coronary artery tone and coronary vasospastic response to acetylcholine between morning and afternoon testing[J]. *International Journal of Cardiology*, 2016, 202: 144-145.
- [89] 陈豫. 基于人工智能技术的冠状动脉CTA在冠状动脉疾病诊断中的应用效能及与医师经验的关系[J]. *中国医疗器械信息*, 2025, 31(8): 34-36.
- [90] Ma CX, Ma XN, Guan CH, *et al.* Cardiovascular disease in type 2 diabetes mellitus: progress toward personalized management[J]. *Cardiovascular Diabetology*, 2022, 21(1):74.
- [91] Virani SS, Newby LK, Arnold SV, *et al.* 2023 AHA/ACC/ACCP/ASPC/NLA/PCNA guideline for the management of patients with chronic coronary disease: A report of the American Heart Association/American College of Cardiology Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2023, 82(9): 833-955.

(收稿日期: 2025-06-16; 本文编辑: 汪怡婷)