

经皮跨瓣膜左心室辅助系统引导下高危复杂 经皮冠状动脉介入治疗的围术期护理

陆永豪 徐冰晨 李钰浩 韦昌林 朱丽[△]

(复旦大学附属中山医院心内科 上海 200032)

【摘要】 **目的** 总结经皮跨瓣膜左心室辅助系统(SynFlow 3.0)支持下高危复杂经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)患者的围手术期护理经验,探讨护理措施对提升手术成功率与促进患者康复的作用。**方法** 回顾性分析2022年8月至2024年7月在复旦大学附属中山医院接受SynFlow 3.0辅助高危复杂PCI的26例患者的临床资料。围手术期实施分阶段综合护理干预:术前针对营养风险(NRS \geq 3分)、低白蛋白血症(Alb $<$ 30 g/L)及早期预警评分 \geq 4分的患者实施个体化营养支持与心功能优化;术中规范SynFlow 3.0操作流程,强化无菌技术与血流动力学监测;术后转入ICU,持续监测循环指标(血压、中心静脉压、尿量等)及溶血相关指标,积极预防血管并发症、迷走反射及血栓事件。**结果** 26例患者手术成功率100%,无严重并发症发生。护理干预有效维持术中平均动脉压 \geq 60 mmHg,术后循环指标稳定(收缩压90~130 mmHg,尿量 $>$ 50 mL/h),未发生血栓或溶血事件。术后30天左室射血分数由术前的 $32.44\% \pm 4.46\%$ 提升至 $38.55\% \pm 5.42\%$,差异具有统计学意义($t=16.065, P<0.001$)。**结论** 针对SynFlow 3.0辅助高危复杂PCI患者实施的全流程综合护理策略,能够有效稳定围术期血流动力学,降低并发症风险,保障手术安全并促进心功能恢复。

【关键词】 经皮跨瓣膜左心室辅助系统; 高危; 经皮冠状动脉介入治疗(PCI); 围术期护理; 护理特异性

【中图分类号】 R473.5 **【文献标志码】** A **doi:**10.3969/j.issn.1672-8467.2025.06.011

Percutaneous transvalvular left-ventricular assist system for high-risk complex coronary intervention: perioperative nursing experience

LU Yong-hao, XU Bing-chen, LI Yu-hao, WEI Chang-lin, ZHU Li[△]

(Department of Cardiology, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China)

【Abstract】 **Objective** To summarize the perioperative nursing experience for patients undergoing high-risk complex percutaneous coronary intervention (PCI) with the support of the percutaneous transvalvular left-ventricular assist system (SynFlow 3.0), and to explore the role of nursing interventions in improving procedural success and promoting patient recovery. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 26 patients who underwent SynFlow 3.0-assisted high-risk complex PCI in Zhongshan Hospital, Fudan University between Aug 2022 and Jul 2024. Stage-specific comprehensive nursing interventions were implemented throughout the perioperative period: Preoperatively, personalized nutritional support and cardiac function optimization were provided for patients with nutritional risk (NRS \geq 3), hypoalbuminemia (Alb $<$ 30 g/L), or an early warning score \geq 4. Intraoperatively, the SynFlow 3.0 operational procedures were standardized, with reinforcement of aseptic techniques and hemodynamic monitoring. Postoperatively, patients were transferred to the ICU for continuous monitoring of circulatory parameters (blood pressure, central venous pressure, urine output, etc.) and hemolysis-related indicators,

[△]Corresponding author E-mail: zhu.li@zs-hospital.sh.cn

网络首发时间:2025-11-04 15:13:36 网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/31.1885.R.20251103.1600.008

alongside active prevention of vascular complications, vagal reflex, and thrombotic events. **Results** The procedural success rate was 100% in all 26 patients, with no severe complications occurring. Nursing interventions effectively maintained an intraoperative mean arterial pressure ≥ 60 mmHg. Postoperative circulatory parameters remained stable (systolic blood pressure 90–130 mmHg, urine output > 50 mL/h), and no thrombotic or hemolytic events were reported. The left ventricular ejection fraction significantly increased from $32.44\% \pm 4.46\%$ preoperatively to $38.55\% \pm 5.42\%$ at 30 days postoperatively, and the difference was statistically significant ($t=16.065$, $P<0.001$). **Conclusion** The implementation of a full-process comprehensive nursing strategy for patients undergoing SynFlow 3.0-assisted high-risk complex PCI effectively stabilizes perioperative hemodynamics, reduces the risk of complications, ensures procedural safety, and promotes cardiac function recovery.

【Key words】 percutaneous transvalvular ventricular assist system; high risk; percutaneous coronary intervention (PCI); perioperative nursing; nursing specificity

高危复杂经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)是冠心病介入治疗领域的一大挑战,同时也是研究的热点。为了确保治疗的安全性,临床实践中常推荐使用经皮机械循环辅助装置(percutaneous mechanical circulatory support device, pMCS)来提供循环支持。这些装置包括主动脉内球囊反搏(intra-aortic balloon pump, IABP)、轴流泵(如Impella)、体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)以及体外离心泵(TandemHeart)等^[1]。它们通过有效提升心输出量,确保心脏和大脑等关键器官的血液供应,从而显著降低围手术期的风险^[2-4]。在众多pMCS中,Impella因其在高危PCI中的广泛应用而备受关注,其安全性、操作便捷性以及显著的血流动力学改善效果已得到多项研究的证实^[5-6]。然而,Impella的高昂成本(平均售价约为2~2.5万美元)限制了其在临床上的广泛应用^[7-8]。此外,Impella使用过程中的灌注液完全进入体内,可能会引发相关的灌注问题。为了解决这些问题,中国研发了一种新型的微轴流泵——SynFlow 3.0经皮跨瓣膜心室辅助系统。该系统将电机从体内转移到体外,实现了从一次性使用到可重复使用的转变,有效降低了成本。同时,它还增加了灌注液排出功能,能够将废液排出到体外,减少了导管管路中废液进入体内的可能性。目前,国内尚未有经皮心室辅助系统正式上市。复旦大学附属中山医院心内科率先开展了一项新技术研究,采用SynFlow 3.0系统为高危复杂PCI患者提供术中循环支持。我们对接受该系统支持的高危复杂PCI患

者的临床护理经验进行总结,报告如下。

资料和方法

病例资料 2022年8月至2024年7月,我院对26例患者开展了经皮跨瓣膜左心室辅助装置引导下高危复杂PCI术,其中男性21例(80.77%),女性5例(19.23%)。年龄36~83(63.25 ± 12.09)岁。严重钙化病变5例,三支病变20例,双支病变1例,单支病变1例,左主干病变4例,术前左室射血分数平均为 $32.44\% \pm 4.46\%$, Syntax II评分为(43.19 ± 10.14)分,均为冠脉介入的高危复杂的冠心病患者。26例患者均顺利置入SynFlow 3.0系统,并完成介入治疗。研究获得复旦大学附属中山医院医学伦理委员会审批[批件号:2023-060(2)],所有患者术前均签署知情同意书。

手术方法 患者全身麻醉后,消毒桡动脉及股动脉区域,经桡动脉行冠状动脉造影评估病变。穿刺股动脉并置入6F鞘管,预置血管缝合器后扩张至16F撕开鞘。在导丝引导下植入SynFlow 3.0导管,确保流入端位于左心室中部,显影环骑跨主动脉瓣,流出端置于主动脉窦部。启动装置提供循环支持(流量 ≥ 3.5 L/min,压力60 mmHg, 1 mmHg=0.133 kPa,下同),随后实施高危PCI操作。术中持续监测血流动力学及抗凝状态[活化凝血时间(activated clotting time, ACT) 250~350 s],术后撤出导管并缝合穿刺点。该技术通过体外电机设计及废液排出功能,优化了循环支持的安全性与成本效益。

术前护理

心功能监测 对高危患者进行24 h心电图监护,调整心功能至可手术状态。对改良早期预警MEWS评分^[9]≥4分的患者行床旁24 h心电图监护,此类患者有病情随时加重的风险。如果患者术前有下肢凹陷性水肿或者呼吸困难等心力衰竭症状,为减轻症状,患者以卧床休息为主,床头抬高30°,如果氧饱和度低于92%,予鼻导管低流量吸氧^[10],确保氧饱和度位于92%~95%。如果尿量<30 mL/h或24 h液体正平衡超过1 000 mL,应及时通知医师处理。如果患者血压偏低(收缩压<80 mmHg)伴呼吸急促,须协助患者取端坐位,遵医嘱给予强心、升压、利尿药物,并予BiPAP呼吸机无创通气。经以上处理,症状逐渐缓解后,且心功能分级至少降至Ⅲ级后,可尽快安排介入治疗。

强调血型鉴定、交叉配血及营养支持 尽管心内科患者中需要输血的情况较为罕见,但仍需强调血型鉴定和交叉配血的重要性。良好的营养支持是高危患者手术成功的关键,在营养风险筛查中,对于营养风险(≥3分)^[11]的患者,给予含高蛋白饮食进行营养支持。血清白蛋白<30 g/L者,遵医嘱予白蛋白静脉滴注。

患者教育与心理支持 责任护士与主治医师应用基于证据的思维导图的方式^[12],向患者及家属讲解手术方式,对于患者和家属的疑虑进行答疑并安慰,减轻术前紧张情绪,必要时使用镇静药物。

术中护理

预见性准备 导管室护士需要有预见性地做好手术准备,包括4F微穿刺针、6F股动脉鞘、16F长鞘、血管缝合器、5F/6FPIG导管、SynFlow 3.0左室辅助装置系统等;一旦术中启动该流程,应协调好人力、物力,有效布置仪器位置;左室辅助装置有较多管路,使用无菌尾线套等过程中以及任何时候都要确保无菌操作。

严密监测 术中密切监测患者心率、血压及血氧等生命体征的变化,防止血流动力学崩溃和恶性心律失常的发生。与常规PCI相比,术中尤其应注意血压的变化。如果术中血压下降,应提醒医师,协助调整左室辅助装置参数以维持患者血供,避免术中出现患者平均动脉压降低至60 mmHg以下。

导管室内术后护理阶段 在稳定的情况下撤出SynFlow 3.0系统,利用预置的血管缝合器缝合

股动脉穿刺点。术后与重症监护室做好转运沟通,转运过程中持续心电图监测,随时评估循环是否稳定。

术后护理

循环功能监测 遵循如下原则:收缩压90~130 mmHg,平均动脉压60~90 mmHg,心率50~90次/分,中心静脉压(central venous pressure, CVP)5~12 cmH₂O(1 cmH₂O=0.098 kPa,下同),心输出量>4.2 L/min。尿量应维持在50 mL/h以上,其反映了重要器官是否有充足的血液灌注。对患者的血容量和心功能进行严格的评估和控制,配合正性肌力药物的使用,可以保证有效的血液循环同时预防右心力衰竭的发生^[13]。此外,护士若发现以上指标异常须及时通知医师并协助处理。同时需要检测血红蛋白和乳酸脱氢酶,并观察尿液颜色,以评估是否有溶血发生。

并发症管理

血管并发症的预防与护理 血管并发症如伤口渗血、水肿和下肢青紫等,是术后需要密切监测的问题。术中置入左室辅助装置时,常规穿刺动脉后,尽管使用了血管缝合器无需加压包扎,我们仍采用沙袋轻度加压,并在6 h后撤除。在此期间,医护人员需加强巡视,密切关注伤口的恢复情况,并指导患者及家属注意制动,以减少伤口出血的风险。同时,应检查下肢是否有青紫现象和足背动脉搏动的存在。

迷走反射的预防与护理 迷走神经反射可能表现为心率减慢、出冷汗和恶心等症状,其诱因包括术前焦虑、穿刺部位疼痛、介入过程中的低血容量以及导管操作的刺激等。术前,护理人员应积极与患者沟通,以缓解其紧张情绪。术后,应注意患者是否有不适感,必要时根据医嘱使用阿托品以对抗迷走反射^[14]。

血栓形成的预防与护理 血栓形成可能导致动脉血压波形异常、造影时可见血栓影、导丝或导管带出血栓,以及患者出现视觉模糊等症状。术中应持续抗凝治疗,保持ACT在250~350 s,并每小时检测1次ACT指标^[15]。若患者主诉不适,应立即查找原因。一旦发现血栓,应检测ACT并按医嘱追加肝素。肝素不敏感的患者,可考虑静脉应用比伐卢定0.75 mg/kg,其后1.75 mg·kg⁻¹·12 h⁻¹维持^[15]。导管内出现血栓时,应打开Y阀尽量排出;

血管内出现血栓时,可尝试抽吸。

急性心肌梗死的预防与护理 术后患者若出现胸闷、胸痛、烦躁、出冷汗等症状,以及心电图显示心肌缺血的变化,如ST段抬高或压低,T波高尖或倒置,应警惕急性心肌梗死的发生。这些症状可能与术中操作不当导致的血管夹层有关。一旦发现上述情况,应立即通知医师进行处理。

脑血管意外的预防与护理 介入治疗后,患者可能面临脑梗塞或脑出血的风险。术后患者处于全身抗凝状态,抗凝过度可能导致脑出血,抗凝不足则可能引起血栓形成和远端脏器栓塞。医护人员须根据患者的症状和体征及时判断脑血管意外的可能性,并在必要时进行头颅CT或MRI检查^[16]。

结 果

26例患者手术均顺利完成,手术成功率100%。围手术期护理措施有效落实,各阶段目标达成良好。

术前阶段,对存在营养风险(NRS \geq 3分)或低白蛋白血症(Alb $<$ 30 g/L)的患者实施个体化营养支持,术后白蛋白水平维持在(35.2 \pm 3.8)g/L,无一例因营养问题影响康复;早期预警评分 \geq 4分者经积极干预,术前期未发生急性心力衰竭。

术中阶段,在SynFlow 3.0辅助下血流动力学维持稳定,平均动脉压均维持在60 mmHg以上。术中发生一例旋磨磨头嵌顿,经团队配合及时拔除;一例出现冠状动脉无复流,经冠脉内给药后缓解,未对后续操作造成影响。

术后阶段,患者转入ICU监护,循环指标稳定,收缩压维持在90~130 mmHg,尿量均 $>$ 50 mL/h。穿刺部位血肿发生3例,经及时调整沙袋加压位置后缓解;1例出现下肢水肿,未予特殊处理自行消退。全组未发生迷走反射、系统相关性血栓或溶血事件。

术后30天随访显示,左室射血分数由术前的32.44% \pm 4.46%提升至38.55% \pm 5.42%,差异具有统计学意义($t=16.065, P<0.001$)。

讨 论

经皮跨瓣膜左心室辅助装置引导下高危复杂

PCI的手术特征 国外研究证实,机械循环辅助装置效果最理想的应该是Impella^[17-19],但其尚未在中国上市,此外,其在运行过程中所有灌注液均直接进入血液循环,存在引发容量负荷过重或相关并发症的潜在风险^[7-8]。目前国内可以使用的机械循环辅助装置只有IABP^[20]和ECMO。国家发改委多次发文支持高端器械创新^[21]。在此背景下,中国自主研发的SynFlow 3.0经皮心室辅助系统(2015年启动研发,2022年投入临床)已积累近百例应用经验。SynFlow 3.0与Impella功能相似,但创新性增加灌注液体外排出功能,减少废液体内残留,优于Impella。该装置经股动脉植入,跨主动脉瓣进入左心室,轴流泵可在60 mmHg压力下提供3.5 L/min流量,减轻心脏负荷,增加冠脉血流,适用于高危PCI患者。然而,该系统在以下情况中禁忌使用:中至重度主动脉瓣关闭不全(经超声心动图评估,分级达到或超过+2级)、因严重外周血管疾病导致无法成功置入泵血导管、严重右心衰竭、室间隔缺损或房间隔缺损、易于引发溶血的血液系统疾病、对抗凝药物存在严重不耐受、左心室破裂、心包填塞以及心肺功能衰竭等情形。在临床应用中,应严格把握适应证和禁忌证,确保治疗的安全性和有效性。

与传统手术方式的比较 相比传统装置, SynFlow3.0在护理上确实展现出了其独特的特异性。(1)操作复杂性与专业培训要求: SynFlow 3.0的植入和运行涉及精细的导管定位(如确保流入道位于左心室中部,显影环准确骑跨主动脉瓣),护理人员需熟悉其结构原理及操作流程,知晓每个环节所涉及的耗材传递、生命体征监测、可能出现的抢救情况及应对措施。(2)术中感染控制与管理: 由于该装置与患者体内直接相连,无菌管理成为了护理过程的重中之重,任何一丝疏忽都可能引发严重的感染风险。护士不仅要考虑自身操作是否符合感控要求,同时需要提醒与监督医师、麻醉师、技师等各类相关人员遵守感控规定。(3)灌注液排出系统的管理: 护理人员需密切监测灌注液的排出功能并及时处理,以确保患者体内的液体平衡,避免相关并发症的发生。(4)凝血功能监测: 术中需持续进行抗凝治疗,以维持患者的ACT在250~350 s安全范围内,肝素剂量根据ACT动态调整,这是预防血栓形成和保障手术成功的关键。(5)并发症的早期识别

与处理:每小时观察下肢动脉搏动(如足背动脉)、皮肤温度及颜色,警惕肢体缺血,持续监测有创动脉压、CVP,发现异常及时通知团队。为确保手术的顺利进行和患者的安全,护士需熟悉这些特异性。

作为一种新技术,SynFlow 3.0辅助下的高危复杂PCI在护理上带来了诸多挑战。首先,由于该装置在国内尚未广泛应用,护理人员对其了解不足,需要不断加强学习和培训。其次,该装置的使用增加了手术的风险和复杂性,对护理人员的应急处理能力提出了更高的要求。因此,基于循证的团队管理^[22]、预警评估、体位管理、氧疗、用药管理、容量管理、机械辅助、并发症观察^[23-25]、心理护理、患者教育^[26]等措施的应用是保证新技术有效进行、患者主动参与疾病康复的保障。未来护理实践的发展方向将更加注重个性化、精准化和智能化。为了应对这些挑战,我们采取了以下措施:(1)加强护理人员对新技术的学习和培训,提高其专业知识和技能水平;(2)建立完善的护理流程和应急预案,确保能够迅速、准确地应对各种紧急情况;(3)加强与其他医疗团队的沟通与协作,形成多学科协作的护理模式。未来希望引入智能监测设备和技术手段,为护理人员提供更多实时监测数据;制定实施个性化护理方案,满足不同患者的需求;加强沟通与协作,形成更加紧密的多学科协作护理模式,共同提高患者的治疗效果和生活质量。

作者贡献声明 陆永豪 研究设计,论文撰写和修订。徐冰晨,李钰浩 数据收集。韦昌林 论文撰写。朱丽 研究设计,论文撰写和修订。

利益冲突声明 所有作者均声明不存在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] 管翔,王宇,张成糕,等.经皮心室辅助装置在复杂高危冠状动脉介入治疗中的应用进展[J].心血管病学进展,2022,43(5):394-398.
- [2] 中华医学会心血管病学分会.经皮机械循环辅助临床应用及管理中国专家共识[J].中华心血管病杂志,2020,48(6):433-440.
- [3] 王宏宇,胡大一.植入式左室辅助装置治疗终末期心力衰竭[J].中国医药导刊,2004,6(6):416.
- [4] PHILIPSON DJ, COHEN DJ, FONAROW GC, *et al.* Analysis of adverse events related to impella® usage (from the manufacturer and user facility device experience and national inpatient sample databases) [J]. *Am J Cardiol*, 2021,140:91-94.
- [5] 何国祥.左室辅助装置[C].2014中国心电学论坛论文集,2014:650-668.
- [6] 崔玲.左室辅助装置在心脏移植前的应用现状与进展[J].心血管病学进展,2014,35(2):157-160.
- [7] 健康界.机械循环辅助市场的中国机遇,Impella的国产替代[EB/OL].(2021-05-04)[2024-06-20].<https://www.cn-healthcare.com/articlewm/20210514/content-1220119.html>.
- [8] 田峰,陈韵岱.中国冠心病介入治疗发展现状:循环辅助[J].中国医学前沿杂志(电子版),2021,13(3):28-30.
- [9] 高胜男.基于MEWS分级护理配合身心综合护理在CCU冠心病重症心力衰竭中的应用[J].心血管病防治知识,2024,14(3):119-123.
- [10] 王岩,余云,管艳,等.成人心脏病患者住院期间氧疗管理的最佳证据总结[J].护士进修杂志,2025,40(13):1426-1433.
- [11] 宋溢,祁玮,刘亚利.营养风险筛查2002与预后营养指数对老年局部晚期肺癌鳞状细胞癌放疗患者预后的影响[J].中国临床医生杂志,2024,52(6):670-673.
- [12] 汪小宇,祝秋萍.急性心梗经皮冠状动脉介入治疗术后患者运动康复教育思维导图的设计与制作[J].护士进修杂志,2021,36(16):1500-1504.
- [13] 岳明叶.6例终末期心力衰竭病人左室辅助装置人工心脏植入术后护理与装置管理[J].全科护理,2021,19(20):2822-2826.
- [14] 徐敏,宋新,李琼.预警性护理干预对降低PCI术诱发血管迷走神经反射的影响[J].中西医结合心血管病电子杂志,2020,8(14):3-4.
- [15] 韩雅玲.中国经皮冠状动脉介入治疗指南2012(简本)[J].中国医学前沿杂志(电子版),2012,4(12):50-59.
- [16] 陈蓉,姜建新,张洁.1例左心辅助装置安置术病人的护理[J].中华护理杂志,2002,37(8):618-619.
- [17] DIXON SR, HENRIQUES JPS, MAURI L, *et al.* A Prospective feasibility trial investigating the use of the Impella 2.5 system in patients undergoing high-risk percutaneous coronary intervention (The PROTECT I Trial) initial US experience [J]. *JACC: Cardiovascular Interventions*, 2009,2(2):91-96.
- [18] 苏丰鸣,吴晓光,张凯,等.Impella保护经皮冠状动脉介入治疗术治疗危重冠心病患者临床分析[J].中华实用诊断与治疗杂志,2020,34(8):840-843.
- [19] KONSTANTINOU K, KEEBLE TR, KELLY PA, *et al.* Protected percutaneous coronary intervention with Impella CP in a patient with left main disease, severe left ventricular systolic dysfunction and established hemolysis

- [J].*Cardiovasc Diagn Ther*, 2019, 9(2): 194-199.
- [20] O'NEILL WW, KLEIMAN NS, MOSES J, *et al.* A prospective, randomized clinical trial of hemodynamic support with Impella 2.5 versus intra-aortic balloon pump in patients undergoing high-risk percutaneous coronary intervention: the PROTECT II study [J]. *Circulation*, 2012, 126(14): 1717-1727.
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会令[EB/OL]. (2021-05-04) [2024-06-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/fzggwl/202312/t20231229_1362999.html.
- [22] 赵冰楠,徐志勇,姜亦凡,等.住院患者急性心力衰竭急救护理最佳证据总结[J].*齐鲁护理杂志*, 2024, 30(7): 106-110.
- [23] GOTTULA AL, SHAW CR, MILLIGAN J, *et al.* Impella in transport: physiology, mechanics, complications, and transport considerations[J].*Air Med J*, 2022, 41(1): 114-127.
- [24] 马东明.左室辅助装置的临床应用[J].*基层医学论坛*, 2015(2): 248-250.
- [25] 林鑫,范春雨.Impella或主动脉内球囊反搏对高危经皮冠状动脉介入治疗及心源性休克支持治疗的Meta分析[J].*中西医结合心脑血管病杂志*, 2023, 21(22): 4068-4076, 4084.
- [26] 陈洁,孟庆童,刘惊今,等.基于指南的慢性心力衰竭患者运动康复科普手册研制[J].*护理学报*, 2024, 31(9): 36-41.

(收稿日期:2024-09-10; 编辑:王蔚)

(上接第 836 页)

- [16] GOELLER M, ACHENBACH S, CADET S, *et al.* Pericoronary adipose tissue computed tomography attenuation and high-risk plaque characteristics in acute coronary syndrome compared with stable coronary artery disease[J].*JAMA Cardiol*, 2018, 3(9): 858-863.
- [17] LAWTON JS, TAMIS-HOLLAND JE, BANGALORE S, *et al.* 2021 ACC/AHA/SCAI Guideline for coronary artery revascularization: executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines [J].*Circulation*, 2022, 145(3): e4-e17.
- [18] HAUSLEITER J, MEYER T, HERMANN F, *et al.* Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography[J].*JAMA*, 2009, 301(5): 500-507.
- [19] YU M, DAI X, DENG J, *et al.* Diagnostic performance of perivascular fat attenuation index to predict hemodynamic significance of coronary stenosis: a preliminary coronary computed tomography angiography study[J].*Eur Radiol*, 2020, 30(2): 673-681.
- [20] TONINO PA, FEARON WF, DE BRUYNE B, *et al.* Angiographic versus functional severity of coronary artery stenoses in the FAME study: fractional flow reserve versus angiography in multivessel evaluation [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2010, 55(25): 2816-2821.
- [21] PATEL MR, DAI D, HERNANDEZ AF, *et al.* Prevalence and predictors of nonobstructive coronary artery disease identified with coronary angiography in contemporary clinical practice [J]. *Am Heart J*, 2014, 167(6): 846-852.e2.
- [22] LIU Y, SUN Y, LIN X, *et al.* Perivascular adipose-derived exosomes reduce macrophage foam cell formation through miR-382-5p and the BMP4-PPAR γ -ABCA1/ABCG1 pathways[J].*Vascul Pharmacol*, 2022, 143: 106968.
- [23] DIGIROLAMO M, OWENS JL. Water content of rat adipose tissue and isolated adipocytes in relation to cell size [J].*Am J Physiol*, 1976, 231(5 Pt.1): 1568-1572.
- [24] ARAKI M, SUGIYAMA T, NAKAJIMA A, *et al.* Level of vascular inflammation is higher in acute coronary syndromes compared with chronic coronary disease [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(11): e014191.
- [25] HOSHINO M, YANG S, SUGIYAMA T, *et al.* Pericoronary inflammation is associated with findings on coronary computed tomography angiography and fractional flow reserve [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2020, 14(6): 483-489.
- [26] TABAS I. Macrophage death and defective inflammation resolution in atherosclerosis [J]. *Nat Rev Immunol*, 2010, 10(1): 36-46.
- [27] KATAOKA Y, WOLSKI K, UNO K, *et al.* Spotty calcification as a marker of accelerated progression of coronary atherosclerosis: insights from serial intravascular ultrasound [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2012, 59(18): 1592-1597.
- [28] VENGRENYUK Y, CARLIER S, XANTHOS S, *et al.* A hypothesis for vulnerable plaque rupture due to stress-induced debonding around cellular microcalcifications in thin fibrous caps [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2006, 103(40): 14678-14683.
- [29] SHAH PK. Inflammation and plaque vulnerability [J]. *Cardiovasc Drugs Ther*, 2009, 23(1): 31-40.

(收稿日期:2024-02-27; 编辑:段佳)