

引用格式:官文飞,姜 鹏,梅 菲.经皮腔内血管成形术治疗下肢动脉硬化闭塞症的前沿进展[J].巴楚医学,2026,9(3):122-128. DOI: 10.3969/j.issn.2096-6113.2026.03.019

Cite as: Guan Wenfei, Jiang Peng, Mei Fei. Research Progress of Percutaneous Transluminal Angioplasty in the Treatment of Lower Extremity Arteriosclerosis Obliterans[J]. Bachu Medical Journal, 2026, 9(3): 122-128. DOI: 10.3969/j.issn.2096-6113.2026.03.019

经皮腔内血管成形术治疗下肢动脉硬化闭塞症的前沿进展

官文飞^{1,2,3} 姜 鹏^{1,2,3} 梅 菲^{1,2,3}

(1. 三峡大学 附属中心人民医院[宜昌市中心人民医院] 血管外科, 湖北 宜昌 443003; 2. 缺血性心血管病湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443003; 3. 湖北省缺血性心血管病临床医学研究中心, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 下肢动脉硬化闭塞症(ASO)是外周动脉疾病中最常见的病理类型,主要由动脉粥样硬化导致下肢动脉内膜增厚、管腔狭窄或闭塞,严重影响肢体存活以及患者的生活质量。经皮腔内血管成形术作为 ASO 治疗的常用手段,已成为血运重建的关键技术。近年来,球囊技术由传统设计逐步演变出多种新型结构,包括药物涂层球囊(DCB)、切割球囊、双导丝球囊、巧克力球囊、冷冻球囊、近距离放射性球囊、冲击波球囊及高压球囊等,为 ASO 的治疗提供了更为丰富的选择。新型球囊在药物递送效率、钙化处理及控制血管壁损伤等方面各具优势。例如,DCB 通过释放局部抗增殖药物有效抑制再狭窄;冲击波球囊则通过声波碎石从根本上改善钙化斑块,显著提高重度钙化病变扩张成功率;切割、双导丝和巧克力球囊可减少血管弹性回缩与夹层发生的风险;高压球囊能提供更高的顺应性和爆破压力,减少弹性回缩和残余狭窄。本文基于最新研究成果,系统综述球囊的分类及其性能特征,旨在为 ASO 的临床诊疗实践提供科学参考。

关键词: 经皮腔内血管成形术; 动脉硬化闭塞症; 球囊; 严重肢体缺血; 血管腔内治疗

中图分类号: R543

文献标志码: A

文章编号: 2096-6113(2026)03-0122-07

Research Progress of Percutaneous Transluminal Angioplasty in the Treatment of Lower Extremity Arteriosclerosis Obliterans

Guan Wenfei^{1,2,3} Jiang Peng^{1,2,3} Mei Fei^{1,2,3}

(1. Department of Vascular Surgery, Yichang Central People's Hospital, Affiliated Central People's Hospital, China Three Gorges University, Yichang 443003, China; 2. Hubei Key Laboratory of Ischemic Cardiovascular Disease, Yichang 443003, China; 3. Hubei Provincial Clinical Research Center for Ischemic Cardiovascular Disease, Yichang 443003, China)

Abstract Arteriosclerosis obliterans (ASO) of the lower extremities is the most common pathological type of peripheral arterial disease. It is mainly caused by atherosclerosis, which leads to thickening of the intimal layer, luminal stenosis, or occlusion of the lower extremity arteries, seriously affecting limb survival and patients' quality of life. Percutaneous transluminal angioplasty, as a commonly used treatment for ASO, has become a key technique for revascularization. In recent years, balloon technology has gradually evolved from traditional designs to various novel structures, including drug-coated balloons (DCB), cutting balloons, dual-wire balloons, chocolate balloons, cryo-balloon, brachytherapy balloons, shockwave balloons, and high-pressure balloons, providing more abundant options for the treatment of ASO. These novel balloons have

基金项目:湖北省卫生健康科技项目(WJ2025M048)

作者简介:官文飞,主治医师,E-mail: guan871106@163.com

通信作者:梅 菲,副主任医师,E-mail: meifeimeifei1986@126.com

their own advantages in terms of drug delivery efficiency, calcification management, and control of vascular wall injury. For example, DCB can effectively inhibit restenosis by releasing local antiproliferative drug. Shockwave balloons can fundamentally improve calcified plaques through acoustic lithotripsy, significantly increasing the success rate of dilation for severely calcified lesions. Cutting balloons, dual-wire balloons and chocolate balloons can reduce the risk of vascular elastic recoil and dissection. High-pressure balloons can provide higher compliance and burst pressure, reducing elastic recoil and residual stenosis. Based on the latest research results, this article systematically reviews the classification and performance characteristics of these balloons, aiming to provide a scientific reference for the clinical diagnosis and treatment practice of ASO.

Keywords percutaneous transluminal angioplasty; arteriosclerosis obliterans (ASO); balloon; critical limb ischemia; endovascular treatment

外周动脉疾病(peripheral arterial disease, PAD)的发病率和死亡率逐年攀升,累及全球已超过 2 亿人,成为全球第三大动脉粥样硬化性心血管疾病,其中最常见的是下肢动脉硬化闭塞症(arteriosclerosis obliterans, ASO)^[1]。自 1977 年 Andreas Gruentzig 初次成功执行经皮腔内血管成形术(percutaneous transluminal angioplasty, PTA)以来,PTA 逐渐成为治疗 PAD 的关键方法,普遍应用于颈动脉、冠状动脉、肾动脉及下肢动脉等多种血管病变的治疗。PTA 通过穿刺股动脉或者桡动脉,将球囊导管送至血管的病变部位,利用球囊的机械压力扩张狭窄或闭塞的血管,使管腔通畅,恢复血流供应。血管弹性回缩被认为是导致 PTA 术后即刻失败的主要因素^[2],尤其在严重钙化病变中,球囊难以产生足够的张力以抵抗血管壁的弹性回缩。血管内夹层作为 PTA 操作中常见的并发症,其发生率高达 20%~40%,严重夹层通常需通过支架植入以维持管腔通畅^[3]。术后再狭窄是限制 PTA 长期疗效的关键因素,其主要机制包括新生内膜增生、血管负性重塑及弹性回缩等^[4]。

近年来,球囊技术取得了革命性进展,从传统的普通球囊(plain old balloon angioplasty, POBA)发展至功能多样的新型球囊,显著提升了手术成功率,有效降低并发症发生率。新型球囊技术涵盖药物涂层球囊(drug-coated balloon, DCB)、切割球囊(cutting balloon, CB)、双导丝球囊、巧克力球囊、冷冻球囊、近距离放射性球囊(brachytherapy balloon, BTB)、冲击波球囊及高压球囊,能够针对不同病变特征提供个性化治疗方案。本研究系统总结了各类球囊在 ASO 治疗中的应用进展。

1 传统普通球囊

POBA 是临床上最常用的技术之一,通过穿刺动

脉将球囊导管送至病变位置,利用球囊的压力扩张狭窄或闭塞的血管,使管腔通畅,恢复血流供应。POBA 技术日趋成熟,其手术时间短,创伤小,恢复快且费用低,尤其适合急诊以及高龄患者或伴随多种基础疾病的患者。相较于支架,球囊无异物残留,能有效减少支架内血栓、移位及断裂等并发症,其反复扩张特性,适用于分叉病变或者小血管(直径<2.5 mm)等支架难以支撑的区域。Duc Tin 等^[5]研究分析发现,采用 POBA 治疗跨大西洋学会共识文件 II A/B 级病变时,技术成功率可达 97.7%,而在髂动脉病变中的临床成功率则相对较低,仅为 62.4%;在短期随访阶段,血管通畅率高达 90.2%,且患者的 Rutherford 分级及踝肱指数(ankle-brachial index, ABI)均有显著改善。这一结果提示,POBA 在部分局限性病变中依然具有一定的短期疗效,然而在应对长段病变、严重钙化或完全闭塞的血管时,POBA 术后再狭窄率较高,往往需要通过支架植入术进行再干预。因此,POBA 更多被视作血管准备的基础扩张手段,而非长期通畅的最佳方案^[6]。

2 新型球囊技术

2.1 药物涂层球囊

DCB 作为经皮腔内血管成形术领域的一项重要创新,通过在球囊表面涂覆抗增殖药物(如紫杉醇或雷帕霉素),在球囊扩张过程中将药物直接输送至病变血管壁,有效抑制新生内膜增生,显著降低血管再狭窄的发生率。DCB 被推荐作为治疗 ASO 支架内再狭窄的 II b 类方案^[7],尤其适用于小血管病变及分叉病变患者。与 POBA 相比,Caradu 等^[8]的研究结果表明,DCB 在维持血管通畅、减少晚期管腔丢失、改善 Rutherford 分级以及促进血流动力学恢复等方面具有显著优势。Kumins 等^[9]的研究亦显示,接受 DCB 治疗的患者在 4 年随访期间,不仅总体生存率

显著提高,而且在大截肢及临床驱动的靶病变血运重建(clinically driven target lesion revascularization, CD-TLR)方面亦优于对照组。Yang^[10]的研究同样印证了这一结果,DCB组患者临床缓解率(97.00% vs 89.00%)和再狭窄率(1.00% vs 7.00%)均显著优于POBA组,且差异具有统计学意义。这一系列数据表明,药物球囊在改善远期疗效方面具有确切优势。然而,Modi等^[11]通过Meta分析发现,DCB相较于POBA,在12个月内可显著降低CD-TLR风险($OR=0.39$, 95%CI:0.04,0.73),但在长达5年随访中,在CD-TLR、截肢率和死亡率方面并未表现出显著差异。这一结果提示DCB在第1年内能有效抑制再狭窄,减少患者再次住院和介入治疗,其技术优势在于通过药物缓释延长血管通畅时间,而非改变终末期慢性肢体威胁性缺血的自然演进过程。与支架植入术相比,DCB在降低主要不良肢体事件风险方面表现突出($OR=0.39$, 95%CI:0.04,0.73),且不会在体内残留异物,从而显著降低了支架再狭窄的发生率和支架内血栓形成的潜在风险^[12]。然而,DCB的疗效高度依赖于血管状态与药物分布的均匀性,若局部释放不充分,其临床效果往往受限。因此,术前精准评估血管条件、开发新型药物以及探索与其他介入手段的联合应用,已逐渐成为推动DCB技术发展的关键方向。

2.2 切割球囊

CB配备3~4枚高精度微型刀片,沿非顺应性球囊的外表面纵向固定。当球囊膨胀时,刀片径向展开,在斑块及血管壁上形成纵向切口,有效裂解钙化斑块,破坏血管壁的内膜和中膜结构,从而降低血管壁的弹性回缩力,减少球囊扩张所需的压力。CB技术尤其适用于高度纤维化且质地坚硬的病变部位,传统的PTA在此类病变中往往难以实现充分扩张,且易导致扩张不均匀。在临床实践中,CB在下肢动脉疾病的治疗中展现出显著疗效。最新的一项研究表明^[13],纵向微切口的血管准备是一种短期而有效的干预措施,在股动脉及腘动脉长段钙化性闭塞或狭窄病变治疗后,12个月的随访结果显示出优异的通畅率与临床改善。在DCB血管成形术之前实施CB处理后,92.7%的患者没有出现限流性夹层,其Rutherford分级从基线时的41.5% $\geq$ 3级转变为12个月时的95% $\leq$ 1级,且12个月时无CD-TLR率为97.5%(39/40),且未发生截肢事件。Baumhäkel等^[14]调查显示,CB联合DCB治疗股腘动脉病变时,12个月随访中未见CD-TLR或截肢事件,超过90%患者的Rutherford分级获得显著改善。这一结果提示,CB

不仅为DCB提供了理想的血管条件,也可能间接提升药物递送的均匀性与穿透深度。然而,并非所有研究均支持上述结论,Dick等^[15]研究显示,CB与POBA相比,在治疗股腘动脉支架内再狭窄方面没有明显差异(65% vs 73%, $P>0.05$),且ABI的改善效果也未见显著优势(0.83 vs 0.75, $P=0.26$)。因此,CB的临床价值优势或许并非在于独立治疗,而在于为后续的血管干预创造一个更稳定、顺应性更好的血管条件。

2.3 双导丝球囊

双导丝球囊作为ASO腔内治疗的一种创新技术,其设计通过整合两根导丝轨道系统,从而显著提升严重钙化或慢性完全闭塞等复杂血管病变的通过率和精准度。该技术的核心优势在于通过双导丝协同作用增强球囊的推送力与稳定性,使其能够在低压下使斑块可控性裂开,显著减少血管弹性回缩与夹层发生的风险^[16-17]。Kato等^[18]研究结果显示,双导丝球囊能达到充分的血管扩张效果,其扩张水平明显优于动脉粥样斑块旋切术,且未出现支架内再狭窄。这一发现展示了双导丝球囊在处理复杂病变时的独特优势,尤其在维持血管长期通畅方面具有巨大潜力。周广法^[19]的研究进一步证明了该发现,在12个月的随访中,双导丝球囊在ABI、再狭窄率、晚期管腔丢失、最小管腔直径方面明显优于POBA,充分证明了其短期疗效明显强于POBA。一项回顾性单中心研究显示,在股腘动脉病变中双导丝球囊的技术成功率显著高于切割球囊,且两组在围术期并发症、术后6个月再狭窄以及CD-TLR方面未见明显差异^[20]。尽管双导丝球囊在部分研究中展现了优异的技术成功率,因其临床应用的广泛性仍需更多证据支持。Kronlage等^[21]的研究共纳入425名中重度钙化的股腘动脉患者,双导丝球囊与POBA相比,在CD-TLR、生存率、截肢率及支架植入率方面均没有显著优势。因此,双导丝球囊无论是作为血管条件的准备还是独立治疗,仍然需要更多的前瞻性大规模研究进一步证实其在下肢动脉疾病中的安全性和有效性,这样才能最终证明其在下肢动脉疾病治疗中的真正潜力与价值。

2.4 巧克力球囊和巧克力药物涂层球囊

巧克力球囊通过结合POBA与镍钛合金支架,当球囊充盈时将其分割为多个凹凸节段的沟槽结构,外观类似巧克力而得名。这种结构使球囊在扩张时形成多个沟槽,增加球囊与血管壁的接触面积,防止血管壁过度拉伸和损伤,有效降低夹层发生率和补救性支架植入的需求。Shirai等^[22]研究表明,巧克力球

囊治疗股腘动脉病变的夹层发生率仅 4.2%，明显低于 POBA 的 25%，补救性支架植入率也显著降低 (2.1% vs 15.9%)。褚云峰等^[23]进一步证明，巧克力球囊与 DCB 的联合应用能显著提升治疗效果，术后 12 个月的一级通畅率以及二级通畅率均达到 98.8%，显示出联合治疗的巨大潜力。最新一项研究显示^[24]，与 POBA 相比，巧克力球囊显著减少了限流性夹层的发生、膝下支架植入以及 CD-TLR，但在大截肢方面没有显著优势。同样，在一项回顾性研究中^[25]，巧克力球囊在降低严重夹层发生率 (5.8% vs 12.7%) 和支架植入率 (9% vs 18.3%) 方面明显优于 POBA。因此，巧克力球囊在下肢动脉疾病中的治疗具有明显优势。

巧克力药物涂层球囊结合了巧克力球囊的机械优势与紫杉醇或雷帕霉素等药物抑制内膜增生的特性，巧妙实现了机械结构与药物涂层的协同作用。李攀峰等^[26]研究表示，巧克力药物涂层球囊能明显缩减术中限流性夹层及补救性支架植入的可能性。一项前瞻性随机对照研究显示^[27]，巧克力药物涂层球囊治疗股腘动脉疾病在技术成功率和不良事件发生率方面显著优于 DCB。巧克力球囊代表了下肢动脉疾病介入治疗的重要技术革新，其结合了机械血运重建与生物学调控的双重优势，为改善患者远期预后提供了新的临床路径。

2.5 冷冻球囊

冷冻球囊技术是在实施 PTA 的同时对血管壁进行低温 (-10°C) 处理，其关键在于球囊扩张时，球囊表面的低温直接作用于狭窄或者闭塞的动脉壁及粥样硬化斑块上，减少血管的弹性回缩，抑制内膜增生以及胶原纤维的合成，最终达到降低再狭窄率的效果。冷冻球囊治疗 ASO 的疗效仍存在争议，Laird 等^[28]研究显示，这种技术的通畅率可达 70.1%，急性期血管造影成功率高，且 CD-TLR 率较低。Diaz 等^[29]研究也显示，冷冻球囊在支架植入率方面显著低于 POBA，但在 3 年随访期间，两种治疗方式的通畅率未见明显差异。Samson 等^[30]的一项随访研究表明，44 个月后冷冻球囊的技术成功率减少到 88%，对于严重钙化病变和支架内狭窄的患者，12 个月以及 24 个月的再狭窄率分别高达 61% 以及 52%。McCaslin 等^[31]的 Meta 分析指出，冷冻球囊相较于 POBA 在通畅率、技术成功率、截肢、再狭窄以及全因死亡方面并未表现出明显优势，但冷冻球囊技术仍为 ASO 治疗提供了更多的选择方案。冷冻球囊通过其独特的低温机制使其在心血管领域展现出巨大潜力，但其在下肢动脉疾病中应用仍处于初步探索阶段，未

来需要进行多中心前瞻性随机对照研究来明确冷冻球囊在下肢动脉疾病中的安全性和有效性^[32]。

2.6 近距离放射性球囊

BTB 是将球囊导管以及近距离放射治疗相结合，通过球囊导管将放射性物质输送到病变部位，进行局部高剂量放疗，抑制血管内膜增生和减缓血管再狭窄^[33]。Pokrajac 等^[34]报道，在 107 例股腘动脉病变患者中平均随访 12 个月，BTB 组没有出现与放射相关的不良反应，且在通畅率 (72% vs 45%) 和再狭窄率 (28% vs 54%) 方面明显优于 POBA。然而，另一项由 Mitchell 等^[35]开展的随机对照研究显示，在 687 名股腘动脉患者中，与 POBA 相比，BTB 在 12 个月时确实降低了再狭窄率 ($OR = 0.50$, 95% CI : 0.301, 0.836)，但这一疗效在随访 24 个月后逐渐消失；此外，BTB 组还显著增加了原发病灶以外其他部位新病变的短期发生风险 ($OR = 8.65$, 95% CI : 2.176, 24.391)。根据现有证据来看，BTB 通过局部精准放疗展现出高效与微创的治疗优势，但因本身技术复杂，可能存在潜在的未知风险，未能够广泛应用于临床。

2.7 冲击波球囊

冲击波球囊是在传统球囊导管上安装脉冲声压发射器，通过声波精准定位并击碎血管内的钙化斑块，保护血管内膜及软组织结构，明显提高中重度钙化病变治疗的安全性和有效性。研究发现^[36]，冲击波球囊与 POBA 相比，手术成功率更高 (65.8% vs 50.4%)，限流性夹层发生率 (1.4% vs 6.8%)、临时支架植入率 (4.6% vs 18.3%)、最大充气压力 (6.3 atm vs 11.3 atm) 和后扩率 (5.2% vs 17.0%) 更低。Adams 等^[37]研究也发现，冲击波球囊治疗下肢动脉钙化病变，术后残余狭窄率和并发症发生率降低。冲击波球囊治疗下肢动脉的优势在多项研究中得到了验证，其中一项 Meta 分析^[38]显示，冲击波球囊治疗严重钙化的下肢动脉疾病，可使血管直径狭窄程度减少 59.3%，且血管并发症极少，仅有 1.25% 的患者发生血流受限或血管夹层，15.89% 的患者需支架植入。Tepe 等^[39]的一项随机对照研究中，306 例中重度钙化股腘动脉病变患者被随机分为冲击波球囊组和 POBA 组，冲击波球囊组 1 年初级通畅率 (80.5% vs 68.0%) 和 2 年初级通畅率 (70.3% vs 51.3%) 均显著高于 POBA 组，且支架植入率 (4.6% vs 18.3%) 显著低于 POBA 组。此外，最近一项大规模前瞻性研究^[40]也评估了冲击波球囊治疗中重度钙化下肢动脉疾病的安全性和有效性，一共纳入了 1 373 例患者，其中严重血管造影并发症发生率仅为 0.9%，残

余狭窄率为 $(23.8 \pm 11.3)\%$,未发生血管突然闭塞、远端栓塞、无血流或血栓事件。

基于目前的研究,冲击波球囊已经被证实对多种外周动脉疾病有效,包括股腘动脉和髂动脉疾病^[41-42]等,尤其对于严重钙化的下肢狭窄病变,可有效改善血管狭窄程度且安全性较高,未来仍需开展更大规模的前瞻性研究,以更好地了解其长期疗效。

2.8 高压球囊

高压球囊通过施加高于常规球囊的压力,能够更有效地扩张钙化或纤维化的病变血管,减少弹性回缩和残余狭窄。这种技术在处理重度钙化病变时尤为有效,因为钙化斑块通常难以通过常规球囊扩张获得满意的管腔扩张效果^[43]。一项620例股腘动脉疾病患者的回顾性研究显示^[44],采用高压球囊治疗下肢动脉疾病具有较高的技术成功率 (86.2%) 和原发性通畅率 (86.7%) ,同时再狭窄率 (18.6%) 与CD-TLR率 (14.8%) 较低,并在 87.4% 的病例中避免了支架植入。Seiler等^[45]的一项研究显示,高压球囊在治疗支架内再狭窄时,1年随访显示靶血管失败率为 15.4% ,主要不良心血管事件发生率为 19.7% ,且 50.5% 的非局灶性支架内狭窄患者通过高压球囊预扩和后扩,仍可获得稳定疗效。高压球囊在下肢动脉疾病治疗中展现出良好的有效性和安全性,尤其适用于钙化病变和支架内狭窄,但目前仍处于探索阶段。

3 小结与展望

目前,多种技术的联合应用表现出巨大潜力。以DCB的药物治为主,其他球囊提供良好的血管准备为辅,联合治疗已逐渐成为ASO的重要治疗手段。其次,准分子激光消融联合DCB治疗ASO也可为后续的治疗提供血管支持^[46]。数字孪生技术以及虚拟现实技术的融合,为球囊与支架的未来发展提供了全新的思路。智能靶向药物球囊的着手点在于提升药物的组织靶向性与滞留时长,新一代DCB正在探索平滑肌细胞外受体的特异性靶向抗体-药物偶联物,以及使用更先进的纳米微粒载体系统,以实现更准确的药物递送与更持久的药物抑制。综上,从联合治疗、数字孪生等新技术的应用,到智能靶向药物球囊的深入研究,PTA技术正不断融合多种创新手段,提升治疗效果,推动ASO治疗向更高效、更精准的方向发展。

参考文献:

- [1] Shah A J, Pavlatos N, Kalra D K. Preventive therapies in peripheral arterial disease[J]. Biomedicines, 2023, 11(12): 3157.
- [2] Tanaka R. Recent update on peripheral arterial endovascular therapy for peripheral arterial occlusive disease[J]. Interv Radiol (Higashimatsuyama), 2020, 5(3): 120-127.
- [3] Armstong W E J, Shammass N W, Wissgott C. Post-PTA dissection: clinical impact, identification, and repair[J]. Endovasc Today, 2018, 17(9): 90-96.
- [4] Dinc R. A review of the current state in neointimal hyperplasia development following endovascular intervention and minor emphasis on new horizons in immunotherapy[J]. Transl Clin Pharmacol, 2023, 31(4): 191.
- [5] Duc Tin L, Van Nut L, Abdalla A S, et al. Outcomes of balloon angioplasty and stent placement for iliac artery lesions classified as TASC II A, B; a single-center study[J]. Front Surg, 2024, 11: 1366338.
- [6] El Khoury R, Brodmann M, Schneider P A. Progress on developing an effective below-the-knee drug-coated balloon[J]. Rev Cardiovasc Med, 2021, 22(3): 585-595.
- [7] Torii S, Kolodgie F D, Virmani R, et al. IN. PACT™ Admiral™ drug-coated balloons in peripheral artery disease: current perspectives[J]. Med Devices, 2019, 12: 53-64.
- [8] Caradu C, Lakhliifi E, Colacchio E C, et al. Systematic review and updated meta-analysis of the use of drug-coated balloon angioplasty versus plain old balloon angioplasty for femoropopliteal arterial disease[J]. J Vasc Surg, 2019, 70(3): 981-995.
- [9] Kumins N H, King A H, Ambani R N, et al. Paclitaxel-coated peripheral arterial devices are associated with improved overall survival and limb salvage in patients with chronic limb-threatening ischemia[J]. J Vasc Surg, 2021, 74(5): 1682-1688.
- [10] Yang Y L. Effects of drug-coated balloon therapy on CT imaging results and levels of vascular inflammatory cytokines in patients with arteriosclerosis obliterans lesions[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2022, 2022: 4793547.
- [11] Modi K, Joseph T, Shah R, et al. Drug-coated balloon angioplasty versus percutaneous transluminal angioplasty for below-the-knee interventions in chronic limb-threatening ischemia patients: systematic review and meta-analysis[J]. Ann Vasc Surg, 2025, 123: 104-

- 118.
- [12] Kobayashi T, Takahara M, Fujimura N, et al. Clinical outcomes in patients with chronic limb-threatening ischemia after femoropopliteal intervention with a drug-coated balloon or stenting[J]. *J Vasc Surg*, 2025, 82(1): 164-1722.
- [13] Demierre A, Pedrazzoli K, Hayoz D, et al. The BEnefit of LONGitudinal micro-incisions prior to paclitaxel-coated balloon angioplasty (BElong study) in patients with lower extremity arterial disease: clinical outcomes at 12 months[J]. *J Endovasc Ther*, 2026, 33(3): 1485-1492.
- [14] Baumhäkel M, Chkhetia S, Kindermann M. Treatment of femoro-popliteal lesions with scoring and drug-coated balloon angioplasty: 12-month results of the DCB-Trak registry[J]. *Diagn Interv Radiol*, 2018, 24(3): 153-157.
- [15] Dick P, Sabeti S, Mlekusch W, et al. Conventional balloon angioplasty versus peripheral cutting balloon angioplasty for treatment of femoropopliteal artery in-stent restenosis: initial experience[J]. *Radiology*, 2008, 248(1): 297-302.
- [16] Pesonen L O, Knol M C, Shelgikar C S, et al. Efficacy and utilization of intravascular ultrasound in office-based lower extremity endovascular interventions for peripheral arterial disease[J]. *Vascular*, 2024, 32(1): 57-64.
- [17] Khan S, Fawaz S, Sajjad U, et al. Invasive physiological assessment of lower limb peripheral arterial disease: a narrative review[J]. *J Cardiovasc Dev Dis*, 2025, 12(2): 77.
- [18] Kato R, Ashikaga T, Sakurai K, et al. Influence of additional ballooning with a dual wire balloon after a rotational atherectomy to expand drug-eluting stent for calcified lesions[J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2012, 27(3): 155-160.
- [19] 周广法. 双导丝球囊与普通球囊治疗股腘动脉硬化闭塞症短期疗效的对比分析[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [20] Haraguchi T, Tsujimoto M, Otake R, et al. Propensity score-matched analysis of six-month outcomes of paclitaxel-coated balloons combined with UltraScore balloons versus conventional scoring balloons for femoropopliteal lesions[J]. *Diagn Interv Radiol*, 2023, 29(3): 535-541.
- [21] Kronlage M, Werner C, Dufner M, et al. Long-term outcome upon treatment of calcified lesions of the lower limb using scoring angioplasty balloon (AngioSculpt™) [J]. *Clin Res Cardiol*, 2020, 109(9): 1177-1185.
- [22] Shirai S, Mori S, Yamaguchi K, et al. Impact of chocolate percutaneous transluminal angioplasty balloon on vessel preparation in drug-coated balloon angioplasty for femoropopliteal lesion[J]. *CVIR Endovasc*, 2022, 5(1): 46.
- [23] 褚云峰, 彭艳斌, 陈仲, 等. 巧克力球囊扩张血管成形术在股腘动脉病变中的临床应用[J]. *血管与腔内血管外科杂志*, 2024(5): 573-577.
- [24] Wu R D, Yang Q Q, Wang M, et al. Safety and efficacy of chocolate balloon in the treatment of infrapopliteal artery disease[J]. *CVIR Endovasc*, 2025, 8(1): 3.
- [25] Zhong H Z, Zhang D W, Zhao B, et al. Application of the chocolate balloon (restrictive dilatation technique) in vascular preparation for arterial angioplasty of the lower limbs[J]. *Front Surg*, 2025, 12: 1528231.
- [26] 李攀峰, 李晓健, 牛浩. 巧克力球囊辅助药物涂层球囊血管成形术治疗 TASC II C/D 型股腘动脉病变的疗效分析[J]. *实用医学杂志*, 2023, 39(23): 3111-3115.
- [27] Shishehbor M H, Zeller T, Werner M, et al. Randomized trial of chocolate touch compared with lutonix drug-coated balloon in femoropopliteal lesions (chocolate touch study) [J]. *Circulation*, 2022, 145(22): 1645-1654.
- [28] Laird J, Jaff M R, Biamino G, et al. Cryoplasty for the treatment of femoropopliteal arterial disease: results of a prospective, multicenter registry [J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2005, 16(8): 1067-1073.
- [29] Diaz M L, Urtasun F, Barberena J, et al. Cryoplasty versus conventional angioplasty in femoropopliteal arterial recanalization: 3-year analysis of reintervention-free survival by treatment received [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2011, 34(5): 911-917.
- [30] Samson R H, Showalter D P, Lepore M, et al. CryoPlasty therapy of the superficial femoral and popliteal arteries: a reappraisal after 44 months' experience[J]. *J Vasc Surg*, 2008, 48(3): 634-637.
- [31] McCaslin J E, Andras A, Stansby G. Cryoplasty for peripheral arterial disease[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2013, 8: CD005507.
- [32] Chen S B, Wang Z L, Xuan F Q, et al. One-year outcomes of wide antral cryoballoon ablation guided by high-density mapping vs. conventional cryoballoon ablation for atrial fibrillation: a propensity score-matched study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2024, 11: 1327639.
- [33] Kearney K E, Wallner K, Kim M, et al. Intravascular coronary brachytherapy combined with a drug-coated balloon[J]. *Brachytherapy*, 2021, 20(6): 1276-1281.
- [34] Pokrajac B, Pötter R, Maca T, et al. Intraarterial

- (192)Ir high-dose-rate brachytherapy for prophylaxis of restenosis after femoropopliteal percutaneous transluminal angioplasty: the prospective randomized Vienna-2-trial radiotherapy parameters and risk factors analysis[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2000, 48(4): 923-931.
- [35] Mitchell D, O'Callaghan A P, Boyle E M, et al. Endovascular brachytherapy and restenosis following lower limb angioplasty: systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials[J]. *Int J Surg*, 2012, 10(3): 124-128.
- [36] Tepe G, Brodmann M, Werner M, et al. Intravascular lithotripsy for peripheral artery calcification: 30-day outcomes from the randomized disrupt PAD III trial[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2021, 14(12): 1352-1361.
- [37] Adams G, Shammass N, Mangalmurti S, et al. Intravascular lithotripsy for treatment of calcified lower extremity arterial stenosis: initial analysis of the disrupt PAD III study[J]. *J Endovasc Ther*, 2020, 27(3): 473-480.
- [38] Wong C P, Chan L P, Au D M, et al. Efficacy and safety of intravascular lithotripsy in lower extremity peripheral artery disease: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2022, 63(3): 446-456.
- [39] Tepe G, Brodmann M, Bachinsky W, et al. Intravascular lithotripsy for peripheral artery calcification: mid-term outcomes from the randomized disrupt PAD III trial[J]. *J Soc Cardiovasc Angiogr Interv*, 2022, 1(4): 100341.
- [40] Armstrong E J, Adams G, Soukas P A, et al. Intravascular lithotripsy for peripheral artery calcification: 30-day outcomes from the disrupt PAD III observational study[J]. *J Endovasc Ther*, 2026, 33(2): 853-862.
- [41] Chong R, Sebastian E, Katib N, et al. Intravascular lithotripsy in infra-popliteal peripheral artery disease[J]. *J Cardiovasc Surg*, 2024, 65(5): 454-459.
- [42] Del Canto Peruyera P, Linares Sánchez M, Álvarez Salgado A, et al. Intravascular lithotripsy for common femoral artery occlusive disease[J]. *Ann Vasc Surg*, 2025, 112: 123-128.
- [43] Pinilla-Echeverri N, Bossard M, Hillani A, et al. Treatment of calcified lesions using a dedicated super-high pressure balloon: multicenter optical coherence tomography registry[J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2023, 52: 49-58.
- [44] Rigatelli G, Palena M, Cardaioli P, et al. Prolonged high-pressure balloon angioplasty of femoropopliteal lesions: impact on stent implantation rate and mid-term outcome[J]. *J Geriatr Cardiol*, 2014, 11(2): 126-130.
- [45] Seiler T, Attinger-Toller A, Cioffi G M, et al. Treatment of in-stent restenosis using a dedicated super high-pressure balloon [J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2023, 46: 29-35.
- [46] Jiang X L, Ju S, Chen B, et al. Safety and effectiveness of excimer laser ablation combined with drug-coated balloon for atherosclerotic obliterans in the lower extremity[J]. *J Endovasc Ther*, 2023, 30(5): 721-729.

[收稿日期 2025-06-16]