

• 综 述 General review •

经皮球囊肺动脉成形术在治疗慢性血栓栓塞性肺动脉高压中的进展

卢志辉, 张 臣, 马晓海

【摘要】 慢性血栓栓塞性肺动脉高压(CTEPH)是一种可能危及生命的肺血管疾病,属于 2022 年欧洲心脏病学会指南中定义的第四大类肺动脉高压。经皮球囊肺动脉成形术(BPA)是一种在肺动脉造影引导下对狭窄部位进行连续及阶段性扩张的介入技术,为无法完成外科治疗或外科术后残余肺动脉高压的患者提供了全新的诊疗方法。该文将从 BPA 发展过程、适应证演进、操作技术发展等方面来介绍 BPA 这一介入技术及其在治疗 CTEPH 中的进展。

【关键词】 经皮球囊肺动脉成形术;慢性血栓栓塞性肺动脉高压;介入治疗

中图分类号:R654.3 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2025)-003-0324-05

Advances in percutaneous balloon pulmonary angioplasty for the treatment of chronic thromboembolic pulmonary hypertension LU Zhihui, ZHANG Chen, MA Xiaohai. *Department of Interventional Diagnosis and Treatment, Beijing Anzhen Hospital, Capital Medical University, Beijing 100029, China*

Corresponding author: MA Xiaohai, E-mail: maxi8238@yahoo.com

【Abstract】 Chronic thromboembolic pulmonary hypertension (CTEPH) is a potentially life-threatening pulmonary vascular disease, which belongs to the fourth largest category of pulmonary hypertension as defined in the 2022 European Society of Cardiology guidelines. Percutaneous balloon pulmonary angioplasty (BPA) is an interventional technique, which uses continuous and phased balloon expansion to treat the narrowed site under pulmonary angiography guidance, providing a completely new therapeutic method for CTEPH patients who are unable to receive surgical treatment and for CTEPH patients who have post-surgical residual pulmonary hypertension. This paper comprehensively introduces the interventional therapeutic technology of BPA, focusing on the development history, the clinical indications and the development of operative technique of BPA, meanwhile, the latest development of BPA in the treatment of CTEPH is also introduced.

【Key words】 percutaneous balloon pulmonary angioplasty; chronic thromboembolic pulmonary hypertension; interventional therapy

慢性血栓栓塞性肺动脉高压(chronic thromboembolic pulmonary hypertension, CTEPH)通常由急性肺栓塞(acute pulmonary embolism, PE)转化而来。虽然大部分 PE 患者接受抗凝药物治疗后症状迅速消失,但在数月至数年后肺动脉仍可因狭窄或闭塞病变阻碍血管内正常的血液流动,逐步发展为肺动脉高压(pulmonary hypertension, PH)。

CTEPH 的肺动脉循环病理生理学改变包括近端血管的阻塞性改变和远端血管的血管重塑^[1]。由于大多数 PE 患者不进行常规的肺动脉压力随访评估,故 CTEPH 的发病率很难确定^[2]。目前,CTEPH 治疗方式包括:肺动脉内膜剥脱术(pulmonary endarterectomy, PEA)、靶向药物治疗及经皮球囊肺动脉成形术(balloon pulmonary angioplasty,

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2025.03.019

基金项目:国家自然科学基金资助项目(82071875)

作者单位:100029 北京 首都医科大学附属北京安贞医院介入诊疗科

通讯作者:马晓海 E-mail: maxi8238@yahoo.com

BPA)。PEA 和靶向药物是治疗 CTEPH 的重要方法,但由于 CTEPH 疾病特殊的病理生理学变化,以上两种治疗方法并不能适用于全部病变。而 BPA 是无法接受外科手术的 CTEPH 患者的首选治疗方式^[3],采用分阶段扩张狭窄病变的介入手术方案,不仅可逐步扩张狭窄节段,对狭窄远端血管亦有较好的疗效。本文将从 BPA 发展过程、适应证演进及手术技术发展等方面简要梳理 BPA 这一技术及其在治疗 CTEPH 中的进展。

1 BPA 的发展历程和现状

2001 年 Feinstein 等^[4]第一次发表关于 BPA 治疗 CTEPH 患者的研究,报道了 18 例无法手术的 CTEPH 患者经 BPA 治疗后,平均肺动脉压、WHO 功能分级与 6 min 步行距离测试(6MWD)结果均得到改善,结果表明 BPA 对重度 CTEPH 患者具有较好的疗效。但 11 例患者发生了严重的再灌注肺水肿(reperfusion pulmonary edema, RPE),其中 3 例需要机械通气,30 d 死亡率为 5.5%。早期开展 BPA 治疗时因经验有限,较高的并发症发生率限制了其广泛的临床应用。2012 年 Mizoguchi 等^[5]对 68 例远端型且无法手术治疗的 CTEPH 患者采取多次分期方法进行 BPA 治疗,并首选较小的球囊,在解除狭窄的同时最大限度减少了肺血管损伤。随后几年,BPA 技术经过一系列的改进,并发症发生率显著降低。在接受多次分期 BPA 治疗后,患者存活率高达 97%,血流动力学明显改善的同时,RPE 的发生率明显降低。为评估 BPA 对 CTEPH 的疗效,Kennedy 等^[6]纳入 40 项研究对 1 763 例患者进行荟萃分析,结果显示,接受 BPA 治疗的 CTEPH 患者的各项指标(6MWD、平均肺动脉压力及肺血管阻力等)均得到了显著改善。2022 年欧洲心脏病学会(ESC)肺动脉高压诊治指南正式将 BPA 纳入 CTEPH 治疗的 I 级推荐^[7]。利奥西呱是目前无法手术的 CTEPH 患者的首选靶向药物,BPA 与其的有效性和安全性对比研究结果表明^[8-9]:与利奥西呱相比,BPA 可解除血管梗阻,故经 BPA 治疗后的平均肺动脉压降低更为显著。

综上所述,随着技术进步与治疗策略的完善,在保持低并发症发生率的同时,BPA 的安全性和有效性逐步得到了提高^[10]。BPA 正逐渐成为 CTEPH 领域的一种安全可靠的新兴介入治疗方法,可提高无法手术的 CTEPH 患者的生存率。

2 BPA 患者的选择

CTEPH 是 PH 的主要类型之一^[7-9,11],是唯一可通过手术治愈的 PH 亚型。对于 PE 患者,应仔细评估其发展为 CTEPH 的可能性。2022 年 ESC 的肺动脉高压诊治指南提出,PE 患者出现以下情况应考虑 CTEPH:①PE 患者的肺动脉 CT 血管成像出现 CTEPH 相关的放射学征象和(或)超声心动图估测肺动脉收缩压大于 60 mmHg;②PE 患者持续存在呼吸困难或功能限制;③具有 CTEPH 危险因素或高 CTEPH 预测评分的无症状患者^[9]。

所有 CTEPH 患者都应进行专业评估和管理,首先评估 PEA 的可行性^[9]。对于技术上无法手术或 PEA 风险/获益比高的患者,可考虑行 BPA 治疗(I 级推荐,证据水平 B)^[3,9]。建议 BPA 尽量在有经验的中心进行(同 PEA)。目前缺乏有效证据证明从 BPA 中获益最多的患者类型,建议可行 BPA 的患者包括:①由于栓子分布于血管的远端而手术无法触及的 CTEPH 患者;②PEA 的风险/获益比不理想的患者(例如病变少但血流动力学受损严重,或因合并症而有极高的手术风险等);③PEA 术后持续/复发肺动脉高压患者;④PEA 手术失败后需行 BPA 进行抢救的患者;⑤PEA 术后仍有残留病灶的患者;⑥对药物治疗反应不佳的患者。

3 BPA 手术方式的进展

3.1 BPA 术前准备

选择性肺动脉造影为实施 BPA 的第一步。行肺动脉造影术的目的包括:①确定 BPA 的靶血管;②根据管腔大小选择合适的球囊导管型号。肺动脉造影可为术者提供肺动脉解剖结构,良好的造影图像为术中选择导管和球囊提供参考。研究表明,肺动脉造影围手术期死亡率为 0.2%,即使对严重 PH 患者也是安全可行的^[12]。

3.2 BPA 手术策略

BPA 手术治疗目的是扩张肺动脉狭窄病变,改善肺循环血流灌注,减少右心室后负荷,从而预防右心衰竭。BPA 手术流程为:①确定可治疗的肺动脉病变;②导丝穿过狭窄或闭塞病变;③球囊扩张靶病变以恢复肺血管血流。一般首选肺灌注显像所确定的灌注最差的肺叶进行治疗,优选血流丰富的双肺下叶病变,因其血流丰富,经治疗后血流动力学改善更为明显^[13-15]。为获得最佳的血流动力学结果,需进行多次分期手术^[3]。

CTEPH 患者肺血管病变类型包括环状病变(A 型)、网状病变(B 型)、次全闭塞病变(C 型)、完全闭塞病变(D 型)和迂曲病变(E 型)^[9]。病变类型与成功率和并发症风险相关^[9,16]。Kawakami 等^[17]回顾分析了 97 例 CTEPH 患者的 500 次手术疗程(共计 1 936 个病灶),结果显示 A-D 型病变位于亚段肺动脉近端,E 型病变位于亚段肺动脉以远水平,A 型和 B 型病变的 BPA 成功率更高,并发症发生率较低,D 型和 E 型病变的成功率明显低于其他病变类型。另外,既往研究将病灶位于主肺动脉及左/右肺动脉干的患者定义为中心型 CTEPH,将病灶位于肺段动脉以下分支的患者定义为周围型 CTEPH^[18]。同时比较了两组患者的各项参数,结果显示,中心型 CTEPH 患者具有更高的肺动脉平均压及心脏指数。这提示针对此类患者首要任务是解决位于主干的病变,这对患者的预后极大的益处。

对于 BPA 术者来说,完全闭塞是最具挑战性的病变,尤其是肺动脉细小分支的闭塞病变。2015 年,Kawakami 团队成功经侧支循环引导导丝逆向穿过闭塞病变^[19];2022 年,Marukyan 等^[20]首次报道了一项开通肺动脉亚段分支完全闭塞病变的案例;2023 年,国内学者进一步将闭塞病变根据血管造影形态进行分类^[21]:A 型,头端闭塞型;B 型,圆头闭塞型;C 型,孔口闭塞型;闭塞的类型与 BPA 的治疗成功率相关,是预测成功率的独立预测因素。以上研究表明,目前球囊扩张已能到达肺亚段动脉的分支动脉水平,同时闭塞病变这一难题也逐渐被破解。未来通过图像融合技术,还原肺动脉靶血管的 3D 形态,或可使术者能更快捷且安全地选择靶血管。

3.3 BPA 疗程

经 BPA 治疗的肺动脉的管径并不会在手术后即刻恢复并维持在正常状态,而是在随访阶段管径逐渐扩张。为获得最佳治疗效果,需多阶段、多次进行 BPA 治疗^[4,22]。治疗所需的次数取决于 CTEPH 患者的病变特征、血流动力学状况以及术者的经验。通常,每个患者需要 3~10 次疗程^[3]。

3.4 CTEPH 的杂交治疗

PEA 术后残余 PH 仍是临床亟待解决的问题。Yanaka 等^[23]的回顾性研究初步证明了 PEA 术后追加 BPA 治疗作为 CTEPH 的序贯治疗是一种有效且安全的策略,可改善残余 PH 和运动能力。另外,项前瞻性研究连续入组了 36 例不能接受外科手术的 CTEPH 患者,在 BPA 术前至少接受 3 个月的

利奥西呱治疗,以此验证 BPA 与利奥西呱贯序治疗的安全性及有效性^[8]。研究结果表明,各项指标(包括肺动脉压力、肺血管阻力及 6MWD 等)在 BPA 治疗后进一步改善,患者从利奥西呱和 BPA 序贯治疗的联合应用中实现了进一步的获益。目前对于 CTEPH 的杂交治疗仅有少量小样本的研究,缺乏更多大型的 RCT 研究来进一步证明杂交治疗的有效性与安全性。

4 BPA 疗效评估的进展

在开展 BPA 的初期,各个中心将血流动力学及运动耐量的改善视为主要的有效指标。近几年随着国内外对 CTEPH 研究的进一步深入,发现许多新的指标都可以独立预测患者 BPA 预后情况。Inami 等^[16]回顾性纳入 54 例患者,共计 525 支靶血管,将 BPA 术前与术后的肺血流分级评分纳入评估,研究结果显示肺血流分级评分的总变化能有效预测随访时的治疗效果。另外,经研究 CTPA 及 MRI 等影像学评估方式也可通过评估右心室内径或功能来有效评价 BPA 疗效^[24]。

完全治疗的靶血管数量越多,患者的血流动力学及运动耐量改善越明显^[25]。同时,靶病变所处的肺动脉分支水平可能也与疗效有关。Suruga 等^[26]针对完全闭塞病变展开研究,发现治疗完全闭塞病变的成功率已高达 88%,且相对于治疗肺段水平的闭塞病变,亚段动脉水平的闭塞病变经治疗后,靶血管具有较好通畅性的同时,肺血流分级也可恢复至较高水平,甚至完全恢复。结合中心型 CTEPH 与周围型 CTEPH 的比较,从肺动脉分级分支这一角度分析,BPA 首先针对位于主干的病灶进行治疗有利于显著改善患者肺动脉压力,提高心脏指数;其次优先治疗位于亚段甚至更细小的分支,血流动力学的改善可对亚段以上的动脉产生正向作用^[3]。

5 BPA 手术器械的进展

5.1 BPA 球囊

带有防滑元件的刻痕球囊(non-slip element percutaneous transluminalangioplasty scoring balloons,NSE PTA)是一种由 3 个尼龙元件组成的球囊,可以防止球囊在扩张血管时发生滑动^[27]。刻痕球囊最初用于经皮冠状动脉介入治疗,并且研究表明其在治疗冠心病时有较好的疗效^[28]。Takigami 等^[27]首次将 NSE PTA 球囊用于 BPA。在 BPA 治疗中,与普通球囊相比,NSE PTA 球囊

在改善肺动脉压力方面并无显著差异。但当球囊直径与血管管径之比大于 1 时, NSE PTA 球囊更显著改善患者的血流动力学。然而, 较高的肺动脉压和灌注压容易导致再灌注肺损伤^[4]。因此, NSE PTA 可能适用于经 BPA 治疗后的巩固治疗, 而不适用于完全闭塞或严重狭窄病变伴中、重度 PH 的初始扩张。该研究的样本量有限, 且治疗后肺动脉需要时间才能充分扩张, 未来需要更多研究确认刻痕球囊的安全性和有效性。

5.2 BPA 腔内影像

尽管术前的肺动脉造影可以显示病灶的位置和类型, 但对管腔直径的测量仍会存在误差。光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)作为新兴的光学成像技术, 具有实时、动态腔内成像和高分辨率等特点^[29], 同时还具有区分不同类型血栓的能力, 有望为 BPA 提供重要信息。国内一项单中心研究对 12 例周围型肺动脉血栓患者的 61 支周围肺动脉均行造影和 OCT 检查, 结果显示 OCT 能清晰显示周围肺动脉管腔及管壁的结构, 对于直径 <2 mm 的周围型血栓, 诊断敏感性高于造影检查, OCT 能够检测出造影漏诊的血栓^[30]。未来需要进一步扩大样本量验证 OCT 在 BPA 术中应用的安全性和准确性。血管内超声(intravascular ultrasound, IVUS)成像是利用安装在心导管前端的微型超声换能器(即探头), 从血管内部成像来检测管腔大小和管壁结构的介入超声诊断技术。其可提供有关血管直径的信息, 并可用于选择合适的球囊大小, 而虚拟组织学 IVUS 则可以通过提供有关病变组成的重要信息来提示容易进行 BPA 的狭窄节段^[31]。

5.3 BPA 与血流储备分数(functional flow rate, FFR)

近几年, 得益于包括 FFR 在内的新技术的应用, BPA 得到了极大的发展。Bashir 等^[32]研究发现, 常规操作步骤推荐纳入: 在 BPA 术中使用 300 cm 长的 Radi 压力导丝(pressure line, MN)穿过病变, 以此监测病变远端压力波形。该研究发现了 BPA 手术相关并发症低可能与压力导丝的使用有关, BPA 术中使用压力导丝的依据: ①对比肺动脉压力波形, 准确地确定病变的位置; ②先前的研究证实: 对于肺动脉压力 >35 mmHg 的患者, 将病变远端肺动脉平均压控制在 35 mmHg 以下, 可以有效减少 RPE 的发生^[16]; ③压力导丝可以带着球囊通过病变, 从而简化交换导丝步骤。研究证实, 这种改良的 BPA 技术安全, 耐受性好, 并发症发生率低。

对于不能手术的 CTEPH / CTEPD 和 PTE 后反复或持续的 PH, BPA 联合药物治疗可作为一种可行的治疗选择。

6 展望

BPA 可降低无法完成外科手术的 CTEPH 患者的肺动脉压力和肺血管阻力。BPA 治疗需严格把握手术适应证、规范操作, 采取多次分期的方法, 根据病变类型选择 BPA 手术策略。同时各种新成像手段如 IVUS、OCT 等为 BPA 的治疗提供了更好的指引, 未来需进一步研究验证腔内影像对 BPA 手术的指导价值。BPA 的进一步发展需要对肺动脉病变部位有更精确的描述。动脉内病变的分布、病变类型、闭塞的数量、病变的近端或远端及肺动脉分支的直径等信息是进行细化治疗选择的基础: 如确定 BPA 治疗策略主要针对亚节段及远端血管的病变, 或结合病情联合使用或顺序使用 PEA、BPA 和靶向药物治疗等。BPA 已显现出良好的疗效和安全性, 但还需进行更多的大规模、前瞻性、多中心、随机对照研究来进一步阐明 BPA 在 CTEPH 的最佳治疗策略及并发症的处理方案等临床问题。

[参考文献]

- [1] Kim NH, Delcroix M, Jenkins DP, et al. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. J Am Coll Cardiol, 2013, 62: D92-D99.
- [2] Mullin CJ, Klinger JR. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension[J]. Heart Fail Clin, 2018, 14: 339-351.
- [3] Lang I, Meyer BC, Ogo T, et al. Balloon pulmonary angioplasty in chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. Eur Respir Rev, 2017; 160119.
- [4] Feinstein JA, Goldhaber SZ, Lock JE, et al. Balloon pulmonary angioplasty for treatment of chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. Circulation, 2001, 103: 10-13.
- [5] Mizoguchi H, Ogawa A, Munemasa M, et al. Refined balloon pulmonary angioplasty for inoperable patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. Circ Cardiovasc Interv, 2012, 5: 748-755.
- [6] Kennedy MK, Kennedy SA, Tan KT, et al. Balloon pulmonary angioplasty for chronic thromboembolic pulmonary hypertension: a systematic review and meta-analysis [J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2023, 46: 5-18.
- [7] Humbert M, Kovacs G, Hoeper MM, et al. ESC/ERS scientific document group. 2022 ESC/ERS guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension [J]. Eur Heart J,

- 2022,43:3618-3731.
- [8] Kawakami T, Matsubara H, Shinke T, et al. Balloon pulmonary angioplasty versus riociguat in inoperable chronic thromboembolic pulmonary hypertension (MR BPA): an open-label, randomised controlled trial [J]. *Lancet Respir Med*, 2022, 10: 949-960.
 - [9] Jais X, Brenot P, Bouvaist H, et al. Balloon pulmonary angioplasty versus riociguat for the treatment of inoperable chronic thromboembolic pulmonary hypertension (RACE): a multicentre, phase 3, open-label, randomised controlled trial and ancillary follow-up study [J]. *Lancet Respir Med*, 2022, 10: 961-971.
 - [10] 王金志,陶新曹,谢万木,等.球囊肺动脉成形术治疗近端慢性血栓栓塞性肺动脉高压的安全性和有效性[J]. *介入放射学杂志*, 2023, 32: 746-749.
 - [11] Pang W, Zhang Z, Wang Z, et al. Higher incidence of chronic thromboembolic pulmonary hypertension after acute pulmonary embolism in asians than in europeans: a meta-analysis [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8: 721294.
 - [12] Velázquez M, Maneiro N, Lareo A, et al. Selective segmental pulmonary angiography: anatomical, technical and safety aspects of a must-learn technique in times of balloon pulmonary angioplasty for chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. *J Clin Med*, 2021, 10: 3358.
 - [13] 杜发旺,张萍,吴强,等.经皮球囊肺血管成形术治疗慢性血栓栓塞性肺动脉高压患者 2 例 [J]. *介入放射学杂志*, 2022, 31: 627-629.
 - [14] Karyofyllis P, Demerouti E, Giannakoulas G, et al. Balloon pulmonary angioplasty in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension in Greece: data from the Hellenic pulmonary hypertension registry [J]. *J Clin Med*, 2022, 11: 2211.
 - [15] Kataoka M, Inami T, Kawakami T, et al. Balloon pulmonary angioplasty (percutaneous transluminal pulmonary angioplasty) for chronic thromboembolic pulmonary hypertension: a Japanese perspective [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2019, 12: 1382-1388.
 - [16] Inami T, Kataoka M, Shimura N, et al. Pulmonary edema predictive scoring index (Pepsi), a new index to predict risk of reperfusion pulmonary edema and improvement of hemodynamics in percutaneous transluminal pulmonary angioplasty [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2013, 6: 725-736.
 - [17] Kawakami T, Ogawa A, Miyaji K, et al. Novel angiographic classification of each vascular lesion in chronic thromboembolic pulmonary hypertension based on selective angiogram and results of balloon pulmonary angioplasty [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2016, 9: e003318.
 - [18] Kaldararova M, Simkova I, Bohacekova M, et al. Central versus Peripheral CTEPH-Clinical and Hemodynamic Specifications [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58: 1538.
 - [19] Kawakami T, Kataoka M, Arai T, et al. Retrograde approach in balloon pulmonary angioplasty: useful novel strategy for chronic total occlusion lesions in pulmonary arteries [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2016, 9: e19-e20.
 - [20] Marukyan N, Simakova M, Moiseeva O, et al. Transbronchial guidance for balloon pulmonary angioplasty in CTEPH: the safe guidewire passage through the occlusion [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2022, 15: e25-e26.
 - [21] Yang T, Li X, Luo Q, et al. Angiographic classification of total occlusion and its implication on balloon pulmonary angioplasty [J]. *ESC Heart Fail*, 2024, 11: 795-804.
 - [22] Ghofrani HA, Kim NH. Medical and interventional therapies for inoperable CTEPH: a necessary combination? [J]. *Lancet Respir Med*, 2022, 10: 926-927.
 - [23] Yanaka K, Nakayama K, Shinke T, et al. Sequential hybrid therapy with pulmonary endarterectomy and additional balloon pulmonary angioplasty for chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. *J Am Heart Assoc*, 2018, 7: e008838.
 - [24] Tsukada J, Yamada Y, Kawakami T, et al. Treatment effect prediction using CT after balloon pulmonary angioplasty in chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31: 5524-5532.
 - [25] 汪薇,龚娟妮,王剑锋,等.逐步肺动脉球囊扩张成形术治疗慢性血栓栓塞性肺动脉高压血流动力学变化的研究 [J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2024, 47: 120-125.
 - [26] Suruga K, Shimokawahara H, Miyagi A, et al. Flow grade-based success rates, complication rates, and balloon pulmonary angioplasty patency for total occlusions [J]. *Can J Cardiol*, 2023; S0828-282X(23)01974.
 - [27] Takigami M, Tsubata H, Nakanishi N, et al. The effectiveness of scoring balloon angioplasty in the treatment of chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. *PLoS One*, 2022, 17: e0263244.
 - [28] Matsukawa R, Kozai T, Tokutome M, et al. Plaque modification using a cutting balloon is more effective for stenting of heavily calcified lesion than other scoring balloons [J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2019, 34: 325-334.
 - [29] Souteyrand G, Amabile N, Mangin L, et al. Mechanisms of stent thrombosis analysed by optical coherence tomography: insights from the National PESTO French registry [J]. *Eur Heart J*, 2016, 37: 1208-1216.
 - [30] Hong C, Luo FQ, Liu CL, et al. Clinical study of optical coherence tomography in the diagnosis of peripheral pulmonary artery thrombus [J]. *Thromb Res*, 2018, 161: 52-59.
 - [31] Gall H, Hoepfer MM, Richter MJ, et al. An epidemiological analysis of the burden of chronic thromboembolic pulmonary hypertension in the USA, Europe and Japan [J]. *Eur Respir Rev*, 2017, 26: 160121.
 - [32] Bashir R, Noory A, Oliveros E, et al. Refined balloon pulmonary angioplasty in chronic thromboembolic pulmonary hypertension: initial results of U. S. regional program [J]. *JACC Adv*, 2023, 2: 100291.

(收稿日期: 2024-02-20)

(本文编辑: 茹实)