

· 综 述 ·

气道支架在气道疾病中的应用研究进展

陈 波¹综述,李长毅^{2△}审校

(1. 重庆医科大学研究生院,重庆 400010;2. 重庆医科大学附属第二医院呼吸内科,重庆 40010)

[摘要] 气道支架主要用于治疗恶性气道狭窄,同时,也用于良性气道狭窄、软化和瘘管等疾病,能快速恢复和维持气道通畅。但现有商用支架常难以避免引发并发症,针对这一问题,近年来,关于减少支架相关并发症的研究不断开展,其中气道支架的设计成为焦点。为尽量减少支架移位、肉芽形成、黏液阻塞等常见并发症的发生,多种新型气管支架被设计出来,但其仍处于起步阶段,往往只能减少部分并发症的发生,且目前未进入常规临床使用,需要较长周期验证其安全性及实用性。或许将 3D 打印技术与生物可降解材料、放射性物质等结合是一条可行的途径,并有可能成为未来的主要趋势。

[关键词] 气道支架; 气道狭窄; 气道软化; 瘘管; 综述

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2023.15.024 **中图法分类号:**R562.1

文章编号:1009-5519(2023)15-2646-05 **文献标识码:**A

Research progress of airway stents in airway diseases

CHEN Bo¹, LI Changyi^{2△}

(1. Graduate School, Chongqing Medical University, Chongqing 400100, China; 2. Department of Respiratory Medicine, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400100, China)

[Abstract] Airway stents are mainly used in the treatment of malignant airway stenosis, as well as benign airway stenosis, softening and fistula, which can rapidly restore and maintain airway patency. However, the existing commercial stents are often difficult to avoid causing complications. For this problem, studies on reducing stent-related complications have been conducted in recent years, with the design of airway stents becoming the focus. In order to minimize the occurrence of common complications such as stent migration, granuloma formation and mucus plugging, a variety of new airway stents have been created. However, they are still in the initial stage, often only reducing some complications, and are not currently in routine clinical practice, requiring longer cycles to verify safety and utility. Perhaps combining 3D printing technology with biodegradable materials, radioactive substances is a viable pathway and become a significant trend in the future.

[Key words] Airway stents; Airway stenosis; Airway softening; Fistula; Review

气道支架作为呼吸介入技术的重要组成部分,主要由具有生物相容性的医用类硅树脂或镍钛合金为基础构建,是治疗气管、支气管狭窄及瘘管等疾病的重要手段,可迅速重建气道、缓解呼吸困难等症状。自 1965 年 MONTGOMERY^[1]设计用于治疗气道疾病的硅酮“T”形管开始,气道支架逐渐受到关注并达到广泛应用,先后开发出硅酮支架、金属裸支架、部分或完全覆膜的自膨胀金属支架(SEMS)、药物洗脱支架、放射性支架、生物可降解支架、3D 打印支架等多种支架。在众多类型支架中以硅酮支架及金属支架应用最广泛,常见并发症有支架移位、肉芽组织形成、黏液阻塞、感染和再狭窄等,此类并发症也是影响患者预后的重要因素^[2]。因此,近年来,多种新型支架被设计出来以用于解决常见硅酮支架和金属支架的

局限性。但到目前为止,尚无一款支架可完全避免气管支架相关并发症的发生,这就要求呼吸介入医师在进行气管支架置入术时应综合考虑各种因素,选择合适的支架以达到最佳疗效并减少相应并发症的发生。现通过回顾已发表的研究描述气道支架的最新进展,旨在为临床决策和气道支架的进一步研究提供参考依据。

1 硅酮支架

在过去几十年中硅酮支架在临床的应用得到了显著发展,常用的支架包括 Dumon 支架、Hood 支架和 Polyflex 支架(硅酮可膨胀支架),同时为满足不同病变部位的需要,根据形状分为直形和“Y”形。既往研究表明,此类支架对良、恶性气道狭窄的治疗均是安全、可行的^[3-6]。近期 IYODA 等^[7]回顾性分析了

△ 通信作者, E-mail:3071459110@qq.com.

106 例因恶性气道狭窄而接受硅酮支架($n=45$)和金属支架($n=61$)治疗的患者临床资料,结果显示,与金属支架组比较,硅酮支架组患者有更高的生存率,更多的胸部恶性肿瘤额外治疗,包括放化疗和放疗,差异均有统计学意义($P<0.05$)。进一步多变量分析结果显示,额外治疗是有利的预后因素,但金属支架组患者具有更少额外治疗,究其原因可能是金属支架与放疗的不相容所致^[8]。据此,尽管用于恶性气道狭窄的支架治疗主要是姑息性的,但考虑到支架治疗后的额外治疗,或许硅酮支架能带来更长的生存期。但值得注意的是,硅酮支架置入具有需全身麻醉及硬质支气管镜支持的局限性,应结合麻醉风险及设备情况具体选择。且既往研究表明,与金属支架比较,硅酮支架由于具有更厚的壁,导致内径相对较窄,可能更容易导致黏液阻塞,从而引起细菌定植^[9]。

目前,已开发出了多种新型硅酮支架,以弥补与经典硅酮支架相关的缺陷。VEARICK 等^[10]尝试使用包括聚丙烯、聚酰胺、碳纤维等改善硅酮支架的效果,其中碳纤维表现出最佳的机械性能,并将由碳纤维构成的支架置入绵羊的气管中,但置入 1 个月后气管组织表现出明显炎症反应,尚需要更多的研究测试这种新型支架的安全性和实用性。JUNG 等^[11]构建了一种具有抗迁移、减少支架横截面积和射线不可透的新型硅酮支架——GINA 支架,并在猪气管狭窄模型中比较了此类支架与 Dumon 支架 3 周内的机械性能及疗效,结果显示,GINA 支架具有更高抗迁移力、柔韧性和更低扩张力,可降低肉芽组织形成和气道穿孔的风险,归因于将经典硅酮支架的外环转化为直角三角形,但该研究纳入样本量较少,且尚无远期相关研究。

2 金属支架

经典金属支架根据是否覆膜分为金属裸支架、部分覆膜金属支架(Ultraflex 支架)和完全覆膜金属支架(Aero 支架),且现有大部分商用金属支架为 SEMS。与硅酮支架比较,进行金属支架置入时具有可选择软体纤维光学支气管镜的优势^[12],因此,金属支架在早期受到很大关注。尽管如此,因硬质支气管镜能快速处理术中阻塞性或出血性并发症,提供更安全的手术过程,所以,部分医疗机构更倾向于使用硬质支气管镜。然而,对于高度坏死性狭窄,选择金属支架能避免使用硬管通过狭窄,从而降低穿孔的风险^[13]。在恶性气道狭窄治疗中部分覆膜 SEMS 由于未覆膜的部分能引起肉芽反应,往往支架移位的风险也较低,但长时间置入会引起有症状的肉芽肿形成及支架上皮化,导致支架在 3~6 周后很难取出。第 3 代全覆膜 SEMS 由于更大程度地降低了肉芽组织的形成,已被证实更容易移除,但支架移位率相应更高^[14-15]。MENNA 等^[16]对 68 例使用全覆膜 SEMS

治疗的无法手术的良性或恶性气道狭窄或支气管胸膜瘘患者的临床资料进行了分析,logistic 回归模型分析结果显示,不管何种气道病变(狭窄或瘘管)均不影响支架并发症的发生(优势比=0.96,95%可信区间:0.71~1.00, $P=0.13$),且使用此类支架治疗均是安全、有效的。

过去随着 2005 年美国食品和药物管理局在发出一项谨慎在良性气道疾病中使用 SEMS 的警告,原因是支架相关并发症的风险及难以移除支架,SEMS 在良性气道疾病中应用逐渐减少。XIONG 等^[17]评估了覆膜 SEMS 治疗良性气道狭窄的效果,结果显示,116 例良性气道狭窄患者中 98 例(84.48%)患者在支架置入后临床症状明显改善(95%可信区间:77.89~91.07)。未覆膜支架组与覆膜支架组比较,肉芽组织形成、痰潴留和复发性狭窄发生率更高,但针对并发症采用适当的气管内措施后患者均取得了很好的临床改善。由于完全覆膜 SEMS 极大程度地降低了肉芽组织的形成,从而很少嵌入气道黏膜,理论上讲,不会出现移除困难。据此,FORTIN 等^[18]对 30 例良性气道狭窄患者植入完全覆膜 SEMS,平均植入(77.0±96.6)d 后 20 个(50.0%)支架因支架相关并发症被移除,平均(122.0±113.2)d 后 36 个支架(90.0%)被成功取出。表明对复杂的良性气道狭窄完全覆膜 SEMS 是一种安全的治疗选择,但需要移除支架的并发症仍很常见。

为治疗部分复杂气道疾病(如气管隆突附近的瘘管形成)覆膜自膨式“Y”形金属支架被开发出来,MADAN 等^[19]在近期的一项回顾性分析中比较了使用“Y”形硅酮支架或覆膜自膨式“Y”形支架治疗恶性气道狭窄或气管食管瘘患者的长期生存率和并发症,结果显示,2 种类型支架的存活率或并发症发生率并无差异。同时,由于常用金属支架还可能导致某些免疫排斥反应和匹配不良。吴锋杰等^[20]利用纳米技术对 SEMS 表面进行修饰,结果显示,依据组气道狭窄的管腔直径、用力肺活量、用力 1 s 呼气量水平更高,并发症发生率也明显降低,差异有统计学意义($P<0.05$)。然而,部分新型金属支架在移除过程中常伴随着明显并发症,针对这一问题还需要更多的研究来解决。

3 药物洗脱支架

药物洗脱支架除拥有支架本身的机械性能外,选择合适的药物缓慢释放还为抑制肉芽肿组织形成、预防感染及局部化疗等提供了可能性。为研究局部化疗的可能性,XU 等^[21]将紫杉醇加入含有聚二甲氧硅烷的液体硅橡胶中,并在其上培养支气管细胞,以研究药物细胞毒性和炎症标志物的表达,结果显示,肿瘤细胞暴露在紫杉醇下可降低白细胞介素-8(IL-8)水平,而在处理浓度水平的所有细胞中均未观察到细

胞毒性作用。WANG 等^[22]在犬模型上进行了紫杉醇药物洗脱支气管支架的效果研究,结果显示,紫杉醇洗脱支架组肉芽组织增生明显减少,且释放的药物仅能在肺组织中检测到极低水平,血液中的药物浓度未引起不良反应。近期 QIU 等^[23]将紫杉醇聚乳酸-羟基乙酸共聚物洗脱支架用于治疗良性瘢痕性气道狭窄,但其结果与既往动物实验结果不符,在支架植入 1 周后就开始形成肉芽组织,且大部分因肉芽形成而导致支架取出困难,所有支架均在 3 个月内取出,平均 (6.51 ± 4.67) 周。为在感染的气管部位特异性释放治疗药物,ZHAO 等^[24]通过静电纺丝技术开发出负载万古霉素的聚己内酯复合纳米纤维膜,并将其覆盖在 SEMS 上,然后植入兔模型中以修复气管狭窄,结果显示,这种支架可使肉芽组织厚度、肿瘤坏死因子- α 、IL-1、IL-6 表达减少,并可在局部抑制气管狭窄。尽管这些药物洗脱支架具有很好的前景,但基于目前临床试验及应用药物种类较少,该领域仍处于早期阶段,尚需要更多的临床研究证实此类支架的效果。

4 生物可降解支架

由于常用的气管支架与部分复杂气管狭窄的解剖结构不匹配,常导致支架移位发生率高,这种现象尤其是在儿科患者中更明显,常随着患儿生长需要移除或更换支架。生物可降解支架具有随着时间推移进而逐渐解体的特点,可避免移除或更换支架,同时,理论上讲,生物可降解支架与气道组织具有更高的相容性,可降低支架相关并发症发生率,这一特性也在 RODRIGUEZ-ZAPATER 等^[25]的研究中得到证实。其在兔子模型中评估了可生物降解聚二恶烷酮气道支架引起的气道反应,结果显示,支架仅产生轻微反应。近期 MORANTE-VALVERDE 等^[26]也针对可生物降解的聚二恶烷酮支架所引起的潜在生物学效应在兔气管中进行了研究,结果显示,此类支架可在黏膜下层诱导纤维增殖反应,从而在不损害气管腔的情况下增加气管的密实度,可能有利于气管软化症的治疗。目前,此类支架主要由可生物吸收的聚二恶烷酮制成,但近年来有研究表明,高纯度锌和镁具有良好的生物相容性和降解性,可能是未来生物可降解支架的理想材料^[27-30]。然而与药物洗脱支架类似,目前,这类支架并没有进行大量的临床研究,且此类支架降解所需时间及降解过程中支架强度尚不可控,因此,对于临床治疗的价值尚不确定。

5 放射性支架

放射性支架在恶性气道狭窄治疗中的应用具有吸引力的前景。WANG 等^[31]率先在健康比格犬身上置入载有¹²⁵I 粒子的自膨式支架,结果显示,气管损伤评分随着放射性粒子剂量的增加而增加,8 周时达到峰值,16 周时略有回落,邻近组织未见病理组织学改变,且主要为轻度、可逆的超微结构变化,展现了这种

支架的可行性及安全性。之后其随机对 66 例无法手术的恶性气道狭窄患者置入载有¹²⁵I 粒子金属裸支架或经典金属裸支架。2 组患者支架植入后狭窄均立即改善,且并发症发生率相同,然而放射性金属裸支架组患者中位生存期比经典金属裸支架组更长,差异有统计学意义($P < 0.05$)^[32]。同样,JIAO 等^[33]在兔子模型上使用一种装载放射性¹²⁵I 粒子的放射金属支架,提出放疗损伤的病理改变主要发生在黏膜和黏膜下层,且随着照射剂量的累积而增加,但¹²⁵I 近距离放疗可在 8 周内有效抑制支架末端的肉芽组织增生。近期一项 meta 分析结果显示,与常规支架置入治疗恶性气道狭窄比较,放射性支架置入具有较低的支架再狭窄率、较高的 3 个月生存率和较高的总生存率,差异均有统计学意义($P < 0.05$)^[34]。结合现有研究,放射性支架在恶性气道狭窄治疗中具有不错前景,但目前尚需要对辐射剂量进行更多研究,以达到满意的疗效和耐受性。

6 3D 打印支架

为弥补复杂的解剖结构和个体差异带来的不相容性,往往需要更个性化的支架设计,3D 打印技术的出现让根据气道解剖特征及 CT 图像进行个体支架制作成为可能^[35]。GUIBERT 等^[36]报道了第 1 个 3D 打印技术在复杂气道中的应用,术后呼吸困难、生活质量和肺功能立即显著改善。SHAN 等^[37]为 12 例复杂恶性气道狭窄患者植入了基于 CT 的 3D 打印定制的覆膜金属支架,其中 11 例(91.7%)患者在支架置入后呼吸困难得到明显缓解,显示了 3D 打印支架植入治疗涉及隆突或支气管的恶性气道狭窄的可行性。LIU 等^[38]利用 3D 打印设计了一种新型气管支架,这种支架的多孔结构能帮助细胞黏附和防止肉芽组织向内生长,同时,支架内壁上拥有与正常气管相似的纤毛可帮助气道分泌物排出,并在呼吸和颈部运动等生理活动时更有效地防止支架移位。但由于 3D 打印支架的成本较高,目前,全世界能使用 3D 打印支架的区域稀少^[39],导致临床使用受到一定限制,要更好地证实 3D 打印支架的安全性及有效性还需要对更多患者进行临床研究。

7 小 结

近年来,气道支架不仅局限用于气道狭窄患者,同时,在瘘管形成、气管软化等气道疾病中的使用也逐渐增加。对此类气道病变,大部分主张首选手术治疗,但并非所有患者拥有手术机会,此时气道支架植入术作为一种对症处理往往是最佳替代选择。但常用的硅酮支架及金属支架对部分气道病变(如复杂和良性气道病变)的疗效欠佳,伴有并发症的高发生率,大部分最终因并发症导致支架移除及更换。随着科技发展,为改善原有支架的不足,不少的技术及支架被创造出来,让这类病变在治疗方面拥有了更多选

择。然而,很少有新型支架进入常规医疗环境,且距离实现理想支架的设计还有很长的路。在现有商用支架中覆膜 SEMS 和硅酮支架仍然是世界上最常用的支架类型。3D 打印与气道支架制造的联合为未来开辟了新途径,但不管 3D 打印支架有多完美,其对于身体组织来说仍是异物,并发症难以避免。因此,将 3D 打印技术与生物可降解材料、放射性物质等结合可能是未来发展趋势,制造能集支架个体化、治疗、缓解症状、改善预后于一体的理想支架,并成为综合治疗不可或缺的一部分。

参考文献

- [1] MONTGOMERY W W. T-tube tracheal stent [J]. *Arch Otolaryngol*, 1965, 82: 320-321.
- [2] PUMA F, FARABI R, URBANI M, et al. Long-term safety and tolerance of silicone and self-expandable airway stents: An experimental study[J]. *Ann Thorac Surg*, 2000, 69(4): 1030-1034.
- [3] MARTINEZ-BALLARIN J I, DIAZ-JIMENEZ J P, CASTRO M J, et al. Silicone stents in the management of benign tracheobronchial stenoses. Tolerance and early results in 63 patients [J]. *Chest*, 1996, 109(3): 626-629.
- [4] BOLLIGER C T, PROBST R, TSCHOPP K, et al. Silicone stents in the management of inoperable tracheobronchial stenoses. Indications and limitations[J]. *Chest*, 1993, 104(6): 1653-1659.
- [5] DUTAU H, TOUTBLANC B, LAMB C, et al. Use of the dumon Y-stent in the management of malignant disease involving the carina: A retrospective review of 86 patients [J]. *Chest*, 2004, 126(3): 951-958.
- [6] GILDEA T R, MURTHY S C, SAHOO D, et al. Performance of a self-expanding silicone stent in palliation of benign airway conditions [J]. *Chest*, 2006, 130(5): 1419-1423.
- [7] IYODA A, AZUMA Y, SANO A, et al. Long-term survival of airway silicone stents in patients with central airway stenosis or obstruction due to thoracic malignancy[J]. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2021, 69(9): 1303-1307.
- [8] TSUJI Y, YOSHIMURA H, UTO F, et al. Physical and histopathological assessment of the effects of metallic stents on radiation therapy[J]. *J Radiat Res*, 2007, 48(6): 477-483.
- [9] NOPPEN M, PIÉRARD D, MEYSMAN M, et al. Bacterial colonization of central airways after stenting[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 1999, 160(2): 672-677.
- [10] VEARICK S B, DEMÉTRIO K B, XAVIER R G, et al. Fiber-reinforced silicone for tracheobronchial stents: An experimental study[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2018, 77: 494-500.
- [11] JUNG H S, CHAE G, KIM J H, et al. The mechanical characteristics and performance evaluation of a newly developed silicone airway stent (GINA stent)[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 7958.
- [12] DU RAND I A, BARBER P V, GOLDRING J, et al. British thoracic society guideline for advanced diagnostic and therapeutic flexible bronchoscopy in adults[J]. *Thorax*, 2011, 66 Suppl 3: 1-21.
- [13] HÜRTGEN M, HERBER S C A. Treatment of malignant tracheoesophageal fistula[J]. *Thorac Surg Clin*, 2014, 24(1): 117-127.
- [14] ISHIDA A, OKI M, SAKA H. Fully covered self-expandable metallic stents for malignant airway disorders[J]. *Respir Investig*, 2019, 57(1): 49-53.
- [15] MARCHESE R, POIDOMANI G, PAGLINO G, et al. Fully covered self-expandable metal stent in tracheobronchial disorders: Clinical experience[J]. *Respiration*, 2015, 89(1): 49-56.
- [16] MENNA C, POGGI C, IBRAHIM M, et al. Coated expandable metal stents are effective irrespective of airway pathology[J]. *J Thorac Dis*, 2017, 9(11): 4574-4583.
- [17] XIONG X F, XU L, FAN L L, et al. Long-term follow-up of self-expandable metallic stents in benign tracheobronchial stenosis: A retrospective study[J]. *BMC Pulm Med*, 2019, 19(1): 33.
- [18] FORTIN M, LACASSE Y, ELHARRAR X, et al. Safety and efficacy of a fully covered self-expandable metallic stent in benign airway stenosis[J]. *Respiration*, 2017, 93(6): 430-435.
- [19] MADAN K, DHOORIA S, SEHGAL I S, et al. A multicenter experience with the placement of self-expanding metallic tracheobronchial Y stents [J]. *J Bronchology Interv Pulmonol*, 2016, 23(1): 29-38.
- [20] 吴锋杰, 姚扬伟, 陈恩国. 基于纳米技术表面改性气道自扩张金属支架治疗气道狭窄临床研究[J]. *中国现代医生*, 2017, 55(11): 14-18.
- [21] XU J, ONG H X, TRAINI D, et al. Paclitaxel-eluting silicone airway stent for preventing gran-

- ulation tissue growth and lung cancer relapse in central airway pathologies [J]. *Expert Opin Drug Deliv*, 2020, 17(11):1631-1645.
- [22] WANG T, ZHANG J, WANG J, et al. Paclitaxel drug-eluting tracheal stent could reduce granulation tissue formation in a canine model [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2016, 129(22):2708-2713.
- [23] QIU X, LIU Y, ZHANG J, et al. Paclitaxel-loaded PLGA coating stents in the treatment of benign cicatricial airway stenosis [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(3):517.
- [24] ZHAO Y, TIAN C, WU K, et al. Vancomycin-loaded polycaprolactone electrospinning nanofibers modulate the airway interfaces to restrain tracheal stenosis [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9:760395.
- [25] RODRIGUEZ-ZAPATER S, SERRANO-CASORRAN C, GUIROLA J A, et al. Reactivity study of a biodegradable polydioxanone tracheal stent in a rabbit model [J]. *Arch Bronconeumol (Engl Ed)*, 2020, 56(10):643-650.
- [26] MORANTE-VALVERDE R, USATEGUI A, LÓPEZ M, et al. Histological and structural effects of biodegradable polydioxanone stents in the rabbit trachea [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2022, 62(2):ezac380.
- [27] WU J, MADY L J, ROY A, et al. In-vivo efficacy of biodegradable ultrahigh ductility Mg-Li-Zn alloy tracheal stents for pediatric airway obstruction [J]. *Commun Biol*, 2020, 3(1):787.
- [28] XUE B, LIANG B, YUAN G, et al. A pilot study of a novel biodegradable magnesium alloy airway stent in a rabbit model [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2019, 117:88-95.
- [29] WU J, LEE B, SAHA P, et al. A feasibility study of biodegradable magnesium-aluminum-zinc-calcium-manganese (AZXM) alloys for tracheal stent application [J]. *J Biomater Appl*, 2019, 33(8):1080-1093.
- [30] LI Y, YAN J, ZHOU W, et al. In vitro degradation and biocompatibility evaluation of typical biodegradable metals (Mg/Zn/Fe) for the application of tracheobronchial stenosis [J]. *Bioact Mater*, 2019, 4:114-119.
- [31] WANG Y, GUO J H, ZHU G Y, et al. A novel self-expandable, radioactive airway stent loaded with ¹²⁵I seeds: A feasibility and safety study in healthy beagle dog [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2017, 40(7):1086-1093.
- [32] WANG Y, LU J, GUO J H, et al. A novel tracheobronchial stent loaded with ¹²⁵I seeds in patients with malignant airway obstruction compared to a conventional stent: A prospective randomized controlled study [J]. *EBioMedicine*, 2018, 33:269-275.
- [33] JIAO D, LEI Q, XU K, et al. Animal study of a newly designed metal airway brachytherapy stent loaded with radioactive ¹²⁵I seeds [J]. *J Cancer Res Clin Oncol*, 2022, 148(11):3061-3069.
- [34] MENG Q K, YU X Y, LI W, et al. Radioactive and normal stent insertion for the treatment of malignant airway stenosis: A meta-analysis [J]. *Brachytherapy*, 2021, 20(4):883-891.
- [35] GUIBERT N, DIDIER A, MORENO B, et al. Treatment of post-transplant complex airway stenosis with a three-dimensional, computer-assisted customized airway stent [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 195(7):e31-e33.
- [36] GUIBERT N, MHANNA L, DIDIER A, et al. Integration of 3D printing and additive manufacturing in the interventional pulmonologist's toolbox [J]. *Respir Med*, 2018, 134:139-142.
- [37] SHAN Q, HUANG W, SHANG M, et al. Customization of stent design for treating malignant airway stenosis with the aid of three-dimensional printing [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(4):1437-1446.
- [38] LIU J, YAO X, WANG Z, et al. A flexible porous chiral auxetic tracheal stent with ciliated epithelium [J]. *Acta Biomater*, 2021, 124:153-165.
- [39] MATHEW R, HIBARE K, DALAR L, et al. Tracheobronchial stent sizing and deployment practices airway stenting practices around the world: A survey study [J]. *J Thorac Dis*, 2020, 12(10):5495-5504.

(收稿日期:2022-12-16 修回日期:2023-03-11)