

## ·非血管介入 Non-vascular intervention·

气管狭窄及支架置入后气流动力学参数  
改变及意义

张 科, 魏 宁, 徐 浩, 高传举

**【摘要】 目的** 探讨气管狭窄及支架置入术后气流动力学参数的改变及意义。**方法** 收集 20 例气管狭窄并行气管支架置入术患者的临床资料,总结其临床特点及影像学征象。应用计算流体力学分析软件对狭窄气道支架置入前后进行气流动力学模拟,记录感兴趣区气流动力学参数进行统计学分析,定量资料均数间比较采用  $t$  检验,以  $P<0.05$  认为差异具有统计学意义。**结果** 20 例气管狭窄均为恶性狭窄,病因为肿瘤压迫及侵犯。其中狭窄程度 $>50\%$ 者 18 例;狭窄部位以气管中段为主,为 10 例;狭窄范围以节段型为主,为 15 例;狭窄形态以偏心性为主,为 17 例。气管狭窄处支架置入后管腔截面积为 $(2.03\pm 0.32)$   $\text{cm}^2$ ,大于置入前管腔截面积 $(0.96\pm 0.18)$   $\text{cm}^2$ ;气管支架置入前狭窄处流速为 $(1764\pm 1484)$   $\text{cm/s}$ ,大于支架置入后管腔内流速 $(688\pm 434)$   $\text{cm/s}$ ;支架置入前左主支气管入口流速及流量分别为 $(308\pm 209)$   $\text{cm/s}$ 、 $(359\pm 255)$   $\text{ml/s}$ ,均小于右主支气管入口处流速 $(464\pm 246)$   $\text{cm/s}$ 及流量 $(526\pm 283)$   $\text{ml/s}$ ,均  $P<0.05$ 。气管支架置入后左右主支气管入口流速及流量差异无统计学意义。**结论** 气管狭窄气流动力学参数以狭窄处出现气流高流速为特点,同时气管狭窄会对左右主支气管入口流速及流量产生一定影响。气管支架置入后能显著增加狭窄处管腔面积,降低狭窄处高流速使气流平顺,并使两侧支气管气流分布均匀。气管狭窄支架置入前后的气流动力学参数模拟对该症病理生理学研究及疗效评估具有一定的价值。

**【关键词】** 气管狭窄; 支架; 呼吸; 影像学; 气流动力学

中图分类号:R562.12 文献标识码:A 文章编号:1008-794X(2017)-01-0035-05

**The changes of aerodynamic parameters in the tracheal stenosis before and after stent implantation and their clinical significance** ZHANG Ke, WEI Ning, XU Hao, GAO Chuan-ju. Department of Medical Imaging, Jiawang Hospital, Affiliated Hospital Group of Xuzhou Medical University. Xuzhou, Jiangsu Province 221006, China

Corresponding author: WEI Ning, E-mail: weining2006@163.com

**【Abstract】 Objective** To explore the changes of the aerodynamic parameters in tracheal stenosis before and after stent implantation, and to discuss the significance of these changes. **Methods** The clinical data of 20 patients with tracheal stenosis, who were treated with stent implantation, were collected, and the clinical features as well as imaging findings were summarized. Using the computer fluid dynamics analysis software, the airflow dynamics simulation study on tracheal stenosis before and after stent implantation was conducted. The aerodynamic parameters of the region of interest were recorded and statistically analyzed. The mean values of quantitative data were compared by using  $t$ -test, and  $P<0.05$  was considered to be statistically significant. **Results** The nature of tracheal stenosis was malignant in all 20 patients, which was caused by tumor compression and invasion. Stenosis degree  $>50\%$  was seen in 18 patients, the stenosis was located in the middle of trachea in 10 patients, segmental stenosis was observed in 15 patients, and eccentric stenosis was found in 17 patients. After stent implantation, the lumen area at previous tracheal stenosis site became

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2017.01.008

基金项目:江苏省临床医学科技专项项目(新型临床诊疗技术攻关)(BL2013011)、徐州市科技计划项目(KC14SH096)

作者单位:221006 江苏 徐州医科大学附属医院介入科(魏 宁、徐 浩);徐州医科大学附属医院集团贾汪医院影像科(张 科、高传举)

通信作者:魏 宁 E-mail: weining2006@163.com

( $2.03 \pm 0.32$ )  $\text{cm}^2$ , which was larger than ( $0.96 \pm 0.18$ )  $\text{cm}^2$  measured before stent implantation. The pre-stenting velocity at the stenotic site of trachea was ( $1764 \pm 1484$ )  $\text{cm/s}$ , which was higher than ( $688 \pm 434$ )  $\text{cm/s}$  of the post-stenting velocity. The pre-stenting velocity and volume flow measured at the left main bronchus entrance were ( $308 \pm 209$ )  $\text{cm/s}$  and ( $359 \pm 255$ )  $\text{ml/s}$  respectively, both of them were smaller than those measured at the right main bronchus entrance, which were ( $464 \pm 246$ )  $\text{cm/s}$  and ( $526 \pm 283$ )  $\text{ml/s}$  respectively, the differences were statistically significant (both  $P < 0.05$ ). After tracheal stent implantation, the differences in the velocity and volume flow between the left main bronchus entrance and the right main bronchus entrance were not statistically significant. **Conclusion** The aerodynamic parameters in tracheal stenosis are characterized by the presence of a high velocity of air flow at the stenosis site, and the stenosis of trachea has an effect on the velocity and volume flow at both left and right main bronchus entrances. Tracheal stenting can remarkably increase the lumen area at tracheal stenosis site, reduce the high velocity at the stenotic site and make the airflow smoother, and the bronchial airflow of the right and left side can be balanced. The airflow dynamics simulation of tracheal stenosis before and after stent implantation has a certain value for the pathophysiological study of tracheal stenosis and for the evaluation of therapeutic effect. (J Intervent Radiol, 2017, 26: 35-39)

**[Key words]** tracheal stenosis; stent; respiration; imaging; aerodynamics

气管狭窄是多种病因导致的气道管腔变窄,而造成患者气道气流通过量减少、呼吸功能受限的一种病理状态。气管支架置入能够通过扩大狭窄管腔,增大气流通过量的方式来改善患者临床症状。国外有研究表明,计算机流体力学分析能很好地对人体气道气流进行模拟,并可作为评估该症呼吸病理生理和临床治疗决策制定的客观评估手段<sup>[1]</sup>。本研究拟建立气管狭窄及支架置入后气管的气流动力学分析模型进行模拟,定量测定感兴趣区(ROI)气流动力学参数,分析参数变化的特点及临床意义。现报道如下。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象及资料

将 2011—2015 年我院经临床证实为气管狭窄并行气管支架置入术,并有研究所需完整资料,包括临床资料、支架置入前后影像资料及肺功能资料的患者共 20 例,纳为研究对象。其中,影像原始资料为 DICOM 数据,来自影像科工作站气管支架置入前后气管三维 CT 扫描数据,或介入科工作站支架置入前后基于 DSA 的 C 臂 CT 扫描数据<sup>[2]</sup>。肺功能资料主要收集患者潮气量、呼吸频率及吸呼比数据。根据气管狭窄影像学征象总结气管狭窄的病因、部位、程度、形态等进行归纳总结。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 建立气管狭窄支架置入前后的几何模型

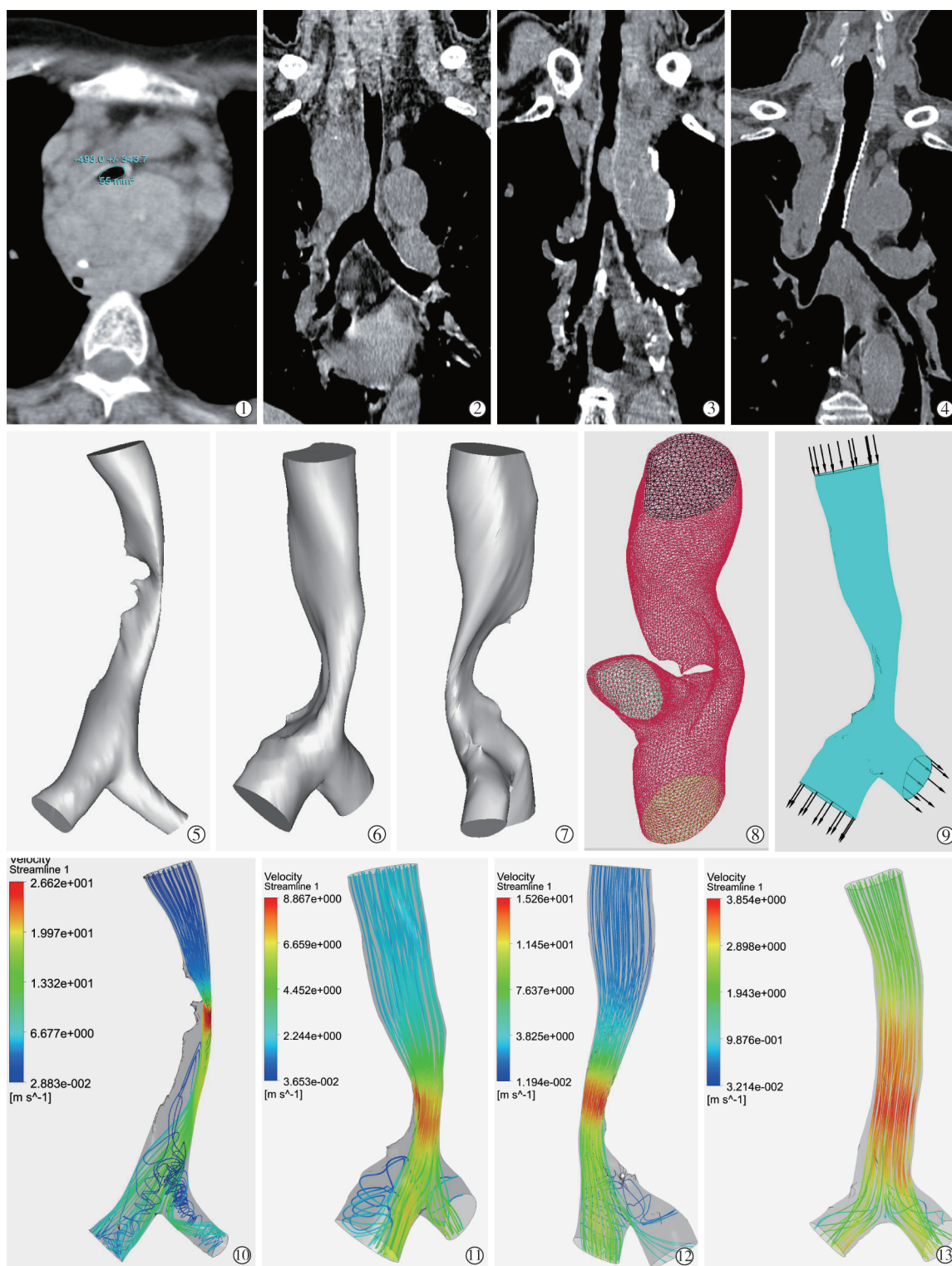
应用 MIMICS 医学图像处理软件对气管狭窄支架置入前后的 DICOM 文件进行三维重建,利用阈值分割技术将 ROI 气管分割出来,然后将气管出入口打

磨平整,建立所有患者气管狭窄支架置入前后的 MIMICS 三维几何模型,以 .stl 格式导出并保存几何模型文件。

**1.2.2 三维几何模型网格划分及优化** 将建立的狭窄气管及支架置入后气管的几何模型文件导入到 ICEM-CFD 专业网格划分软件中进行面网格及体网格划分及自动优化,将网格数据(.cfx5 格式)导出保存。

**1.2.3 气管管腔面积测量及肺功能、气流动力学指标关系换算** 气管管腔截面积可由影像工作站后处理软件直接测量(图 1①),分别记录气管入口、狭窄处及支架置入后气管管腔及左右主支气管入口管腔截面积。由患者肺功能数据吸呼比及呼吸频率计算出每次吸气时间,再根据公式:潮气量=吸气时间×供气体积流量,体积流量=管道横截面积×平均流速,从而可以计算出气管入口处流速,记录所有研究对象支架置入前后气管入口流速数据。

**1.2.4 施加几何模型出入口边界条件及气流动力学模拟** 将网格数据导入 ANSYS 专业流体力学分析软件的下属软件 CFX 中,先在 CFX-pre 中设置气管出入口的简单化边界条件:网格模型的气管入口施加计算出的入口流速,入口处压强设为 1 个标准大气压,气管管壁不滑动,出口设置稳健边界条件—静压为 0Pa。边界条件施加完毕后进入 CFX-solver 中求解,求解完毕后将结果载入到 CFX-post 中进行模拟,在输出的可视化图形模拟结果中应用软件中的探针定量探测并记录 ROI 气管流速参数数值,再根据 ROI 气管管道截面积进行流速与体积流量换算并记录。



①利用影像工作站在 CT 平扫图像上描记狭窄气管管腔面积;②③气管狭窄 MPR 图像(②为腔外压迫型狭窄,③为腔内侵犯局限型狭窄);④气管支架置入后 MPR 图像,气管支架扩张良好,管腔面积增大;⑤~⑦不同形态气管狭窄的三维几何模型图(⑤为气管中段狭窄,⑥为气管下段狭窄,⑦为气管下段及隆突部狭窄,狭窄累及双侧主支气管入口),均为偏心性狭窄;⑧气管狭窄网格化模型图,面网格划分质量较好;⑨施加边界条件后的狭窄气管气流动力学分析前模型;⑩~⑬气管狭窄及支架置入后的可视化流体分析模拟图形(⑩~⑬分别为⑤~⑦气管狭窄几何模型的气流动力学模拟结果图,图中可见气管狭窄处出现红色高流速区,同时两侧主支气管气流流线扭曲,出现了一定的扰流,而且两侧主支气管气流流线分布不均,右侧支气管入口流速及流量稍高,⑬为气管支架置入后气流动力学模拟结果图,可见高流速区基本消失,气管内气流平顺,流速变均匀,同时左右两侧支气管气流分布均匀,扰流减少)

图 1 气管狭窄及支架置入后气流动力学研究过程及可视化图形模拟结果



### 1.3 统计分析

本研究气流动力学参数均为定量资料,气管狭窄支架置入前后气流动力学参数均数间比较采用  $t$  检验。分别将气管支架置入前后气管狭窄处及左右主支气管入口的管腔截面积、流速及体积流量进行比较,以  $P<0.05$  认为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 临床资料及影像学征象整理结果

气管狭窄患者年龄 57~78 岁,其中男 16 例,女 4 例。20 例气管狭窄均为恶性疾病所致,病因为肿瘤压迫和(或)侵犯(图 1②③)。原发病变最常见为肺癌、食管癌及纵隔肿瘤。其中狭窄程度  $>50\%$  者 18 例;狭窄部位以气管中段为主,为 10 例;狭窄范围以节段型为主,为 15 例;狭窄形态以偏心性为主,为 17 例。应用“双管法”气管支架置入技术<sup>[3]</sup>,所有患者均于气管狭窄处安全置入不同规格的气管支架,支架扩张良好(图 1④),患者临床症状均不同程度缓解。

### 2.2 三维几何模型建模结果及网格划分结果

气管狭窄支架置入前后的三维几何模型均成功建立。从几何模型可观察气道狭窄的形态、部位、程度以及气管受压引起的形变等直观结果(图 1⑤⑥⑦)。几何模型网格划分后的面网格模型质量较佳(图 1⑧)。

### 2.3 气流动力学参数模拟结果

气道出入口边界条件成功施加(图 1⑨),进入计算机模拟运行完毕输出可视化气流动力学图形结果(图 1⑩~⑬),记录 ROI 气管流速及流量进行统计分析。由可视化图形结果可直观观测到气管支架置入前气管狭窄处出现红色高流速区,同时两侧主支气管气流流线扭曲,出现了一定的扰流,而且两侧主支气管气流流线分布不均(图 1⑩~⑫);气管支架置入后狭窄管腔扩张,高流速区基本消失,气管内气流平顺,左右两侧支气管气流分布均匀,扰流减少(图 1⑬)。定量测定气流动力学参数结果显示(表 1),气管狭窄处支架置入后管腔面积为  $(2.03\pm 0.32)$   $\text{cm}^2$ ,大于置入前管腔面积  $(0.96\pm 0.18)$   $\text{cm}^2$ ;气管支架置入前狭窄处流速为  $(1764\pm 1484)$   $\text{cm/s}$ ,大于支架置入后管腔内流速  $(688\pm 434)$   $\text{cm/s}$ ;支架置入前左主支气管入口流速及流量分别为  $(308\pm 209)$   $\text{cm/s}$ 、 $(359\pm 255)$   $\text{ml/s}$ ,均小于右主支气管入口处流速  $(464\pm 246)$   $\text{cm/s}$  及流量  $(526\pm 283)$   $\text{ml/s}$ ,均  $P<0.05$ ;气管支架置入后左右主支气管入口流速及流量差

异无统计学意义。

表 1 气管狭窄患者气流动力学参数结果 ( $n=20$ )

检测部位	检测参数		
	管腔截面积/ $\text{cm}^2$	流速/ $(\text{cm/s})$	体积流量/ $(\text{ml/s})$
支架置入前气管管腔狭窄处	$0.86\pm 0.28$	$1\ 764\pm 1484$	$1\ 565\pm 963$
支架置入后气管管腔	$2.03\pm 0.42$	$688\pm 434$	$1\ 356\pm 189$
$t$ 值	13.5 <sup>△</sup>	2.8 <sup>△</sup>	1.4
支架置入前左主支气管入口	$1.13\pm 0.1$	$308\pm 209$	$359\pm 255$
支架置入前右主支气管入口	$1.17\pm 0.07$	$464\pm 246$	$526\pm 283$
$t$ 值	1.3	2.1 <sup>*</sup>	2.0 <sup>*</sup>
支架置入后左主支气管入口	$1.15\pm 0.08$	$144\pm 13$	$166\pm 17$
支架置入后右主支气管入口	$1.16\pm 0.06$	$147\pm 14$	$171\pm 18$
$t$ 值	0.2	1.2	1.2

<sup>△</sup> $P<0.01$ ,<sup>\*</sup> $P<0.05$

## 3 讨论

临床上,气管狭窄被定义由一系列病因导致的气管腔变窄的一种继发性的病理状态或临床并发症<sup>[3-4]</sup>。引起气管狭窄的病因有很多,本组收集的 20 例气管狭窄患者均由恶性肿瘤侵犯或压迫引起,是引起气道狭窄的最常见的病因之一。

气管支架置入术作为治疗恶性气管狭窄的一种手段广泛应用于临床。对于气道狭窄的病情评估及支架置入后的疗效评估,目前主要依靠患者症状及相关辅助检查如气管三维、血气分析、肺功能指标、纤维支气管镜等传统方式来评价<sup>[1,5]</sup>。但对于气道内不同区域的气流走向、气流动力学状态变化这些传统检查方式则具有一定的主观性和间接性。国外有关气道病变研究表明,基于人体临床及影像数据进行计算机气流动力学分析可以作为气管病变病理生理、治疗及预后评估的一种新的手段和评价方式<sup>[1,6-7]</sup>。目前,国内学者已成功利用该法建立起人体血管血流及鼻咽腔气流动力学分析模型进行模拟分析,指出该方法成熟可靠,对研究人体病变部位流体力学改变具有一定价值<sup>[8-9]</sup>。因此本研究亦通过该法分析气道狭窄及支架置入后的气流动力学参数并进行统计分析,初步总结和探讨该症气流病理生理学改变。

该法的技术要点主要分为 3 个部分:①建立三维几何模型;②将几何模型网格进行面网格及体网格划分;③将边界条件施加到网格模型出入口。为了便于研究,我们将 ROI 划分为几个部位。即支架置入前后的气管入口、气管狭窄部以及双侧主支气管

入口处,进行对照研究。经过计算机流体分析软件模拟后在可视化输出结果上定量探测各 ROI 的流速,再利用之前记录的截面积换算出流量后,整理数据进行统计分析。研究结果显示,气管狭窄处均出现了流速增加(图⑩~⑫),这个结果和 Mimouni-Benabu 等<sup>[1]</sup>对先天性气管狭窄的研究结果一致。这说明一定体积的气体经过狭窄处气流会压缩变密集,从而造成引起高流速和湍流,这种现象也和超声多普勒观察到的狭窄血管的高流速情形相类似<sup>[10]</sup>。

同时,通过直观观测气管狭窄左右主支气管入口的流线图,我们发现左右支气管入口处不但出现扰流外,其流速和流量明显分布不均(图 1⑩~⑫)。进一步定量测定显示,右侧主支气管流速及流量要稍高于左侧支气管入口处的流速及流量(表 1)。经过分析,我们认为出现这种结果也是可以解释的。①由于解剖学结构因素,右侧主支气管纵轴与气管纵轴夹角较左侧主支气管纵轴与气管纵轴夹角小,因此,气流首先流向方向更加平坦的右侧支气管;②本研究收集的病例中,原发病变在右侧造成气管右侧偏心性狭窄的病例较多,这些病变压迫气管向对侧即左侧推移。由于这种推移造成狭窄部位以下气管长轴与右侧主支气管长轴夹角更小,导致右侧支气管气流方向更平坦,因而出现右侧支气管入口比左侧气流流速和流量稍高的结果。总之,气管狭窄引起左右主支气管气流分布不均的病理性改变,会造成气流流入少的一侧支气管肺内的气体减少,严重可造成局部肺实变,而气流流入多的一侧支气管肺内可能出现气体通气过度造成局限性肺气肿和局部肺部炎症。我们通过观察气管狭窄患者两肺实质出现的 CT 征象也验证了这种结果。

最后,通过置入气管支架再次进行气流动力学模拟,发现支架不仅能扩大狭窄处管腔面积,同时可以纠正气管狭窄气流动力学参数的病理性改变,使气流通过更加顺畅、平缓,双侧支气管扰流明显减少,气流分布也变得均匀(表 1),因此,从气流动力学角度来讲,气管支架置入治疗气管狭窄是有效的。同理,对于气管狭窄其他方式的治疗疗效评估,

也可以用气流动力学参数进行评价。

综上所述,气管狭窄患者气流动力学参数存在着明显的病理性改变,其原因可被合理解释。气管支架置入能够纠正其气流动力学上的病理状态。基于计算机流体力学模拟气道狭窄性病变立体、直观、准确客观,对该症呼吸病理生理学研究及治疗评估提供了一种新的手段,具有一定的应用价值和意义。

#### [参考文献]

- [1] Mimouni-Benabu O, Meister L, Giordano J, et al. A preliminary study of computer assisted evaluation of congenital tracheal stenosis: a new tool for surgical decision-making[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2012, 76: 1552-1557.
- [2] 张 科, 魏 宁, 徐 浩, 等. 气管狭窄及支架植入术后有限元模型的建立及气流动力学研究初探[J]. *中华放射学杂志*, 2014, 48: 865-866.
- [3] 魏 宁, 徐 浩, 顾玉明, 等. 局麻下支架置入术治疗原发性气管肿瘤性梗阻五例[J]. *介入放射学杂志*, 2013, 22: 570-573.
- [4] Shin JH, Song HY, Shim TS. Management of tracheobronchial strictures[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2004, 27: 314-324.
- [5] 魏 宁, 徐 浩, 祖茂衡, 等. 螺旋 CT 及气管三维重建技术观察气管支架置入术的疗效和并发症的临床应用[J]. *介入放射学杂志*, 2012, 21: 50-53.
- [6] Cebal JR, Summers RM. Tracheal and central bronchial aerodynamics using virtual bronchoscopy and computational fluid dynamics[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2004, 23: 1021-1033.
- [7] Brouns M, Jayaraju ST, Lacor C, et al. Tracheal stenosis: a flow dynamics study[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2007, 102: 1178-1184.
- [8] 孙秀珍, 唐媛媛, 刘迎曦, 等. 鼻中隔偏曲者鼻腔结构自适应改变的特征分析[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2008, 43: 351-354.
- [9] 薛蕴菁, 高培毅, 林 燕, 等. 计算流体力学结合 MR 血管成像分析颈动脉分叉处血管狭窄的血液动力学[J]. *中华放射学杂志*, 2007, 41: 337-340.
- [10] 王茂强, 王志军, 刘凤永, 等. 腹腔动脉狭窄的介入治疗[J]. *介入放射学杂志*, 2005, 14: 27-30.

(收稿日期:2016-03-01)

(本文编辑:俞瑞纲)