

DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202423123

· 鼻-鼻窦疾病专栏 ·

# 计算流体力学在鼻科临床诊治中的应用进展

李亚奇, 薛涛

(空军军医大学第一附属医院耳鼻咽喉头颈外科, 陕西 西安 710032)

**摘要:**鼻腔鼻窦由于结构性变化导致的气流场改变会影响鼻的生理功能,然而对鼻腔气流场的定量研究一直存在困难。计算流体力学(CFD)的发展为研究鼻腔气流变化提供了可行的途径。基于数字化鼻腔模型的CFD技术已在正常鼻腔生理功能的研究、异常鼻腔结构的气流特征分析、手术疗效评估和虚拟手术以及鼻用药物研究等方面取得诸多成果,具有非常显著的优势。尽管CFD技术的临床应用还面临许多困难,随着计算机技术、人工智能的快速发展,其在鼻科临床诊疗领域将有广阔的发展空间。

**关键词:**鼻科疾病;计算流体力学;计算机模拟

**中图分类号:**R765.04

## Progress in the application of computational fluid dynamics in clinical diagnosis and treatment of rhinology

LI Yaqi, XUE Tao

(Department of Otolaryngology Head and Neck Surgery, the First Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** The change of airflow field caused by structural changes in nasal cavity and paranasal sinuses will affect the physiological function of nose. However, it is always difficult to quantitatively study the airflow field in nasal cavity. The development of computational fluid dynamics (CFD) provides a feasible way to study the changes of nasal airflow. CFD technology based on digital nasal model has a very significant advantage, which has achieved many achievements in the study of normal nasal physiological function, the analysis of airflow characteristics of abnormal nasal structure, the evaluation of surgical curative effect, virtual surgery, and the research of nasal drugs. With the rapid development of computer technology and artificial intelligence, although the clinical application of CFD technology still faces many difficulties, it will have great development potential in nasal clinical application.

**Keywords:** Nasal diseases; Computational fluid dynamics; Computer simulation

鼻腔作为呼吸道的首要门户,在机体与外界环境的接触过程中起着重要的作用。气流场在鼻腔内的分布情况对鼻腔通气、加温加湿、清洁过滤、免疫防御以及嗅觉、共鸣等生理功能关系密切<sup>[1]</sup>。正常人两侧下鼻甲黏膜血管的交替性充血形成生理性鼻周期,促使睡眠时反复翻身,有助于解除疲劳<sup>[2]</sup>。这些生理功能的正常发挥均依靠气流通过鼻腔来实现。由于生理性变异或病理性因素以及手术干预等各种原因导致的鼻腔鼻窦解剖结构改变,会直接影响鼻腔内气流场的分布,从而影响鼻腔生理功能的

正常发挥<sup>[3]</sup>。

研究鼻腔结构变化对气流场分布的影响,从解剖结构和生理功能进行深入的相关性研究,探索疾病演变规律,对于临床鼻面部功能性疾病的诊断、个性化干预以及手术效果评估均有着积极意义<sup>[4]</sup>。由于鼻腔解剖结构复杂,各种生理及病理因素可能导致鼻通道的自由面积显著改变,加之气流具有复杂的三维特性,使得研究鼻腔内气流场的分布规律显得尤为困难。探测鼻腔内不同位置的气流流速也是不可能的,因为将探头伸入鼻腔势必会扰乱气流

基金项目:空军军医大学军事医学专题项目(2022ZZXM005)。

第一作者简介:李亚奇,男,在读硕士研究生,医师。

通信作者:薛涛,Email:xuetao@fmmu.edu.cn

的流动<sup>[5]</sup>。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)是随着计算机的发展而产生的一个介于数学、流体力学和计算机之间的交叉学科,通过数值方法和计算机算法来解决和评估涉及流体流动的问题。由于其在复杂流体模型研究中的强大能力,CFD已被用作医学领域的重要研究工具,尤其为人呼吸过程中气体流动的研究提供了切实可行的手段<sup>[6]</sup>。本文主要对CFD在鼻气流研究中的应用进展进行综述。

## 1 鼻腔气流的测量方法

### 1.1 目前常用的客观评估工具

目前常用的鼻通气功能检查方法有鼻测压法(rhinomanometry, RMN)、鼻声反射法(acoustic rhinometry, AR)和鼻吸气峰值流量(peak nasal inspiratory flow, PNIF)等<sup>[7]</sup>。RMN是将测量的经鼻压力和鼻气流的比值作为鼻腔的阻力。鼻阻力在客观评价鼻腔阻塞程度中具有一定意义,但是无法具体分析鼻腔内部解剖结构对气流阻力的影响。AR是根据超声波的反射原理得出鼻腔内最小横截面积以及离前鼻孔的距离、鼻腔容积等参数,数据客观,但属于静态数据,无法动态、直观地反应出鼻腔气流场的变化情况<sup>[8]</sup>。PNIF相对简便、迅速,但是仅用来检测鼻腔通畅性。尽管这些客观评估方法已经成为指南推荐的鼻塞评估工具<sup>[7]</sup>,但是由于检查依赖于患者的肺功能、体位和配合程度,并且其结果与视觉模拟量表、症状评分、标准化问卷等患者主观评估结果的一致性并不高<sup>[9-11]</sup>,因此在临床工作中并没有得到广泛应用。

### 1.2 CFD在鼻气流研究中的发展

上世纪50年代,已有学者开始在体外鼻腔模型中利用烟雾进行可视化气流观察。随着信息技术和生物力学的迅速发展,CFD开始应用于医学领域。1993年Elad等<sup>[12]</sup>最早用数字化模拟的方法在体外鼻腔模型中开展气流运动特征的研究。1995年Keyhani等<sup>[13]</sup>首次利用CT三维重建的鼻腔数字化模型进行CFD研究。此后,利用影像学三维重建的数字化鼻腔结构模型开展CFD研究逐步成为鼻气流研究的主要方法。CFD可以直观地反映鼻腔气流流速、压力、气流场的变化,还可以评估气流温度、湿度变化之间的复杂相关性,以及这些变量如何影响空气动力学<sup>[14]</sup>,具有其他客观检查方法无法替代

的优势。

## 2 鼻腔CFD模拟的步骤

CFD模拟是一个相对复杂的过程,目前还缺少集成化、智能化的鼻腔CFD分析软件,研究人员需要具备一定的流体力学知识和计算机操作技能<sup>[15]</sup>。基于数字化鼻腔模型的CFD分析大致包括以下几个主要步骤:建立数学物理模型(前处理)、数值算法求解、结果可视化(后处理)。

### 2.1 建立数字化鼻腔模型

使用CT或MRI扫描图像进行三维重建的技术已相当成熟。出于成本考虑,目前普遍使用鼻窦高分辨CT的扫描图像进行鼻腔鼻窦的三维重建<sup>[16]</sup>。基于Mimics等专业医用3D建模软件可以对公认的医学图像文件格式DICOM文件进行查看、测量、分割和完整分析,快速创建鼻腔数字模型。建立的模型是否准确,是否还原真实的鼻腔形态对后续CFD模拟结果的准确性至关重要<sup>[6]</sup>。有研究比较不同的三维重建程序对鼻腔的重建效果<sup>[17]</sup>,结果差异并不大,选择合适的分割阈值准确地将气体空腔和实体组织区分开才是关键所在。

近年来,锥形束CT(cone beam CT, CBCT)技术由于其低放射剂量而逐渐应用于鼻外科。有研究使用CBCT进行鼻腔模型的三维重建<sup>[18]</sup>,但其显著缺点是高噪比和低对比度使图像质量下降,需要更多的人工手动分割来保证模型的准确性。在医学研究中,有时可以使用CBCT仅建立简化的鼻腔模型,则可以减少手动分割的程序,并减少受试者所遭受的辐射剂量<sup>[19]</sup>。

### 2.2 数值算法求解

2.2.1 网格划分 在模拟分析之前首先需要对模型进行网格划分。目前通用成熟的技术为边界拟合网格法,可以通过Gambit等专业软件来实现CFD的前处理。网格划分质量直接影响到求解的精度和稳定性。网格数量越多,计算精度越高,但同时计算机性能要求较高,计算规模和耗时也相应增加<sup>[15]</sup>。最新的研究有使用基于体素(即3D空间的立体像素)的方法进行网格划分<sup>[20]</sup>,效率更高且成本更低,但是划分效果取决于像素颗粒的大小,且该方法还需要进行更大样本量的研究,以确保其通用性。

2.2.2 流体力学计算 目前CFD的主流算法还是有限元法、有限体积法。利用ANSYS Fluent等流体

力学软件,人为设置三维模型的边界定义、气体密度、进出口压强等参数,选择合适的算法,可由计算机自动生成模拟结果。同样,流体力学计算需要高性能的计算机并且计算过程相当耗时<sup>[16]</sup>。

格子玻尔兹曼法(lattice boltzmann method, LBM)是一种新的CFD算法,具有算法简单、可以处理复杂边界等优点,特别是在气动声学等对湍流计算准确性要求较高的领域应用呈上升态势。Berger等<sup>[21]</sup>分别用LBM和有限体积法进行CFD模拟,证明LBM速度更快,效率更高,并在后续研究<sup>[22]</sup>中将其用于鼻腔模拟手术预测手术结果。LBM对于提高CFD模拟分析的效率具有显著作用。

### 2.3 计算结果的后处理

计算机CFD模拟结果可以直接通过软件生成,并且以图形的形式进行可视化处理<sup>[15]</sup>。一旦耗时的数值模拟结束,要解决的主要问题是如何将产生的大量数据提炼为真正有用的临床信息,评估各种物理量(速度、压力、温度、湿度等)如何与患者的健康状况相关<sup>[16]</sup>。这是使用CFD生成的信息来实现理解生理病理过程、帮助临床决策的最终目标。

## 3 CFD在鼻科临床的应用

### 3.1 正常鼻腔生理功能研究

CFD为探索正常鼻腔生理功能开创了新的方法,国内外学者开展了大量研究<sup>[8,23-29]</sup>,重点围绕重建正常人鼻腔数字模型,利用CFD定性、定量地分析鼻腔流场特征,与体外模型以及与传统客观检查方法相比较,对鼻腔气流动力学有了进一步的认识,同时也验证了CFD模拟方法的可靠性。

近年来,有学者利用CFD方法对鼻腔黏膜纤毛清除功能开展研究。Shang等<sup>[30]</sup>构建了鼻腔黏膜表面的数字化二维和三维模型,通过在前下鼻甲引入颗粒进行了“虚拟糖精试验”,其中三维模型的糖精清除时间与健康成人真实糖精试验结果有较好的一致性。这将为预测不同条件下鼻腔壁黏液流速、鼻内给药的药物吸收等研究提供新的方向。

CFD方法还为鼻腔空调特性的研究提供了有效手段<sup>[31-33]</sup>,解决了既往对鼻腔气流温度、湿度测量困难的难题。2021年,Issakhov等<sup>[34]</sup>进一步使用CFD模拟了不同外部环境下,鼻腔对气流加温加湿的能力,证明鼻腔可以承受各种极端条件,复杂的几何形状增加热量和水分的局部传递速率,将吸入空气加热和湿润到固定的范围,进一步说明正常鼻腔

结构在呼吸生理中的重要作用。

### 3.2 鼻腔结构异常及疾病状态的气流特征分析

通过分析异常或疾病状态下鼻腔结构的气流特征,可以进一步探索异常结构影响鼻腔通气功能的规律及原理,从而为临床疾病筛查、诊断、治疗等提供新的参考手段。

唐媛媛等<sup>[35]</sup>对35例腺样体肥大患儿进行CFD模拟分析,并与鼻声反射结果结合从三维立体角度分析患儿上气道的阻塞因素,对腺样体肥大患儿的筛查、手术方案的制定以及术后评估具有参考意义。Patel等<sup>[36]</sup>首次将CFD分析应用于新生儿,发现先天性鼻梨状孔狭窄新生儿的气道体积和表面积均小于正常气道,总鼻阻力大约是正常气道的8倍。可用作量化气道异常总体严重程度的指标,为天性鼻梨状孔狭窄的诊断、风险分层和手术效果评估提供了一种新方法。

Shcherbakov等<sup>[37]</sup>使用CFD模拟分析进行了一项鼻中隔穿孔患者吸入空气加温加湿的研究。汪涛等<sup>[38]</sup>通过不同部位和大小组合的16个鼻中隔穿孔数值模型,用CFD模拟压强、速度、壁面剪切力、温度、气流的分配和涡流等参数,研究穿孔部位和大小对鼻腔内气流的影响,发现偏前端和较大的鼻中隔穿孔对鼻腔功能影响更大。这些结果解释了为什么前端间隔穿孔更易导致鼻出血、黏膜干燥和结痂,从气流动力学角度为临床治疗提供了有价值的参考。

### 3.3 手术疗效评估及虚拟手术

功能性内镜鼻窦手术、鼻中隔成形术、鼻甲切除术等鼻科干预措施对患者鼻部症状改善的成功率通常很低<sup>[39-40]</sup>。有相当多的学者通过CFD方法针对个体解剖结构变化在手术前后不同呼吸条件下模拟鼻腔的气流特征,分析鼻腔内压力、流速的变化<sup>[41-42]</sup>。一方面可以评价手术效果,另一方面可以提出改进手术计划的标准,提高手术干预效果<sup>[43]</sup>。

近年来,通过CFD虚拟手术在术前预测鼻腔几何形状的改变对通气功能的影响,甚至对气流温湿度、颗粒沉积的影响等<sup>[16]</sup>,将CFD方法的临床应用提上了新的高度。郭宇峰等<sup>[44]</sup>使用CFD模拟两种下鼻甲切除术式的术后气流场改变,但仅基于计算机模拟的仿真,未进行手术结局的验证。Tao等<sup>[45]</sup>基于CFD模拟结合虚拟手术评估鼻中隔偏曲的手术方案,并预测术后两侧鼻腔的气流分配和颗粒沉积。经设计的优化手术方案可以将一侧的吸入流速比提高17%,但同样的是优化手术方案并没有实际验证。

有一项针对外科医生对于虚拟手术接受程度的研究<sup>[46]</sup>,9名权威的鼻科医生对鼻气道阻塞患者基于CFD模拟的虚拟手术方案进行选择,总的来说,外科医生对使用虚拟手术方案持积极态度。主要限制在于CFD模拟结果的真实性以及CFD模拟过程的可操作性。Burgos等<sup>[47]</sup>开发了一个集成CFD的虚拟手术软件工具——DigBody<sup>®</sup>,其有效性已在2例患者的真实手术中得到证实,具有广阔的临床应用前景。

### 3.4 鼻腔给药的相关研究

鼻腔黏膜具有丰富的血管分布,鼻腔局部及某些全身性疾病的治疗药物可以经过鼻腔途径给药。可以通过CFD模拟不同剂型、颗粒大小、吸收速率的药物在鼻腔内的颗粒沉积、分布位置以及清除时间<sup>[30]</sup>。已有此方面的相关研究,其研究结果可以用于研究不同的鼻窦开放手术对不同尺寸的颗粒输送到鼻窦的影响<sup>[48]</sup>;也可以帮助制药行业改进鼻腔给药装置的设计,并最终通过优化药物输送使更多的患者受益<sup>[49-50]</sup>。

## 4 CFD的局限性

虽然CFD具有诸多好处,但目前大多停留在试验研究阶段,未在临床工作中大量应用,其中最大的障碍是模型创建和数值模拟所需的时间和成本<sup>[6]</sup>。CFD是一个要求很高的过程,1名专业工程师和1台高性能计算机需要几个小时的工作才能执行一次模拟<sup>[15]</sup>。即使Berger等<sup>[21]</sup>用LBM方法优化后的CFD算法仍需要1.5h,仍然很难满足临床使用要求。另外三维建模及CFD分析均需要专业且昂贵的商业软件,同时需要投入大量的人力成本。Tretiakow等<sup>[18]</sup>试验了开源的免费软件进行CFD模拟分析的效果,对降低成本具有一定意义。

另外一个限制在于CFD模拟数据的有效性以及结果是否可以通过其他测量来验证。三维模型的准确程度、CFD模拟的算法选择等都会影响计算结果。既往的研究往往将鼻腔边界定义为刚性的,即默认为平静呼吸下鼻腔壁是非形变的,实际上呼吸过程中压力变化会对鼻腔壁软组织产生轻微形变,尤其是非平静呼吸条件下形变会更明显,这些形变会对气流产生影响<sup>[51]</sup>。Pirnar等<sup>[52]</sup>认为流固耦合技术进行顺应性模型分析比CFD刚性模型分析更符合真实情况,但需要更多的研究来验证,且其计算过程复杂而耗时<sup>[16]</sup>。既往研究多拿CFD模拟结果

与RMN、AR、PNIF等客观检查结果进行对比<sup>[8,11,27,35]</sup>,最近有研究人员用更加精确的粒子图像测速仪对体外模型的测量结果来验证CFD模拟结果<sup>[15]</sup>。总之,CFD结果须在临床推广前进行彻底评估,需要有更高的循证医学证据来支持其结果的有效性。

同既往客观评估工具一样,虽然CFD模拟的气流是动态的,但是一开始创建的数字化鼻腔模型仍然是静态的,仅仅代表CT或MRI检查当时的状态。如何将鼻腔的周期性变化、局部血流、黏液分泌变化等动态生理过程融入CFD模拟分析是需要克服的难题<sup>[15]</sup>。

## 5 总结与展望

CFD技术的发展已经允许模拟和可视化健康或疾病状态下鼻腔和鼻窦中的气流场,比传统气流动力学研究方法具有显著的优点。CFD提供了高度精确的可视化模型,大大提高了人们对呼吸系统生理学和病理生理学的临床理解<sup>[15]</sup>。同时,其避免了在动物和人类身上直接试验,最大限度地降低侵入性伤害,更加符合生物伦理。

目前CFD技术还相对复杂和昂贵,其结果的真实性和可靠性还有待于更多的研究来验证。今后需要考虑的是如何将CFD结果与患者的真实症状及临床干预效果有效联系起来将使其更加具有应用价值。随着人工智能等新技术的快速发展以及与临床应用的相结合<sup>[53]</sup>,开发出自动、智能、友好的工具软件以降低CFD应用成本将加速其临床应用步伐<sup>[18]</sup>。预计未来的CFD研究,加上深度机器学习、人工智能的集成,个体化CFD技术可能在不久的将来成为一种可行的鼻科临床应用工具,将有助于改善人类呼吸健康。

### 参考文献:

- [1] Patel R. Nasal Anatomy and Function[J]. *Facial Plast Surg*, 2017, 33(1): 3-8.
- [2] Letzel J, Darbinjan A, Hummel T. The nasal cycle before and after nasal septoplasty[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2022, 279(10): 4961-4968.
- [3] Ogle OE, Weinstock RJ, Friedman E. Surgical Anatomy of the Nasal Cavity and Paranasal Sinuses[J]. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*, 2012, 24(2): 155-166.
- [4] Skansing DB, Mandø M, Holte MB, et al. Assessment of nasal function by computational fluid dynamics[J]. *Ugeskr Laeger*,

- 2022, 184(5): V06210516.
- [5] Fomin VM, Vetlutsky VN, Ganimedov VL, et al. Air flow in the human nasal cavity[J]. *J Appl Mech Tech Phy*, 2010, 51(2): 233–240.
- [6] Faizal WM, Ghazali NNN, Khor CY, et al. Computational fluid dynamics modelling of human upper airway: A review[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2020, 196: 105627.
- [7] Valero A. Position paper on nasal obstruction: Evaluation and treatment[J]. *J Investig Allergol Clin Immunol*, 2018, 28(2): 67–90.
- [8] Weinhold I, Mlynski G. Numerical simulation of airflow in the human nose[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2004, 261(8): 452–455.
- [9] Ottaviano G, Pendolino AL, Scarpa B, et al. Correlations between peak nasal inspiratory flow, acoustic rhinometry, 4-phase rhinomanometry and reported nasal symptoms[J]. *J Pers Med*, 2022, 12(9): 1513.
- [10] Clement PAR, Halewyck S, Gordts F, et al. Critical evaluation of different objective techniques of nasal airway assessment: a clinical review[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2014, 271(10): 2617–2625.
- [11] Spataro E, Most SP. Measuring nasal obstruction outcomes[J]. *Otolaryngol Clin North Am*, 2018, 51(5): 883–895.
- [12] Elad D, Liebenthal R, Wenig BL, et al. Analysis of air flow patterns in the human nose[J]. *Med Biol Eng Comput*, 1993, 31(6): 585–592.
- [13] Keyhani K, Scherer PW, Mozell MM. Numerical simulation of airflow in the human nasal cavity[J]. *J Biomech Eng*, 1995, 117(4): 429–441.
- [14] Leong SC, Chen XB, Lee HP, et al. A review of the implications of computational fluid dynamic studies on nasal airflow and physiology[J]. *Rhinology*, 2010, 48(2): 139–145.
- [15] Leite SHP, Jain R, Douglas RG. The clinical implications of computerised fluid dynamic modelling in rhinology[J]. *Rhinology*, 2019, 57(1): 2–9.
- [16] Quadrio M, Pipolo C, Corti S, et al. Review of computational fluid dynamics in the assessment of nasal air flow and analysis of its limitations[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2014, 271(9): 2349–2354.
- [17] El H, Palomo JM. Measuring the airway in 3 dimensions: A reliability and accuracy study[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2010, 137(4): S50.e1–S50.e9.
- [18] Tretiakow D, Tesch K, Meyer-Szary J, et al. Three-dimensional modeling and automatic analysis of the human nasal cavity and paranasal sinuses using the computational fluid dynamics method[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2021, 278(5): 1443–1453.
- [19] Aljawad H, Rüttgers M, Lintermann A, et al. Effects of the nasal cavity complexity on the pharyngeal airway fluid mechanics: A computational study[J]. *J Digit Imaging*, 2021, 34(5): 1120–1133.
- [20] Kimura S, Sakamoto T, Sera T, et al. Voxel-based modeling of airflow in the human nasal cavity[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2019, 22(3): 331–339.
- [21] Berger M, Pillei M, Mehrle A, et al. Nasal cavity airflow: Comparing laser doppler anemometry and computational fluid dynamic simulations[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2021, 283: 103533.
- [22] Berger M, Pillei M, Giotakis A, et al. Pre-surgery planning tool for estimation of resection volume to improve nasal breathing based on lattice Boltzmann fluid flow simulations[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2021, 16(4): 567–578.
- [23] Yu S, Liu Y, Sun X, et al. Influence of nasal structure on the distribution of airflow in nasal cavity[J]. *Rhinology*, 2008, 46(2): 137–143.
- [24] Tan J, Han D, Wang J, et al. Numerical simulation of normal nasal cavity airflow in Chinese adult: a computational flow dynamics model[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2012, 269(3): 881–889.
- [25] 臧洪瑞, 刘迎曦, 张罗, 等. 健康成人60名鼻腔流体力学分析[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2013, 48(10): 814–817.
- [26] Dohare P, Bhondekar AP, Sharma A, et al. Influence of airflow dynamics on vortices in the human nasal cavity[J]. *Eng Comput (Swansea)*, 2019, 36(9): 3164–3179.
- [27] Cherobin GB, Voegels RL, Pinna FR, et al. Rhinomanometry versus computational fluid dynamics: Correlated, but different techniques[J]. *Am J Rhinol Allergy*, 2021, 35(2): 245–255.
- [28] Hebbink RHJ, Wessels BJ, Hagmeijer R, et al. Computational analysis of human upper airway aerodynamics[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2023, 61(2): 541–553.
- [29] 喜扬扬, 詹杰民, 史剑波, 等. 基于3D打印和CT三维重构数值模拟上呼吸道气流状态的研究方法[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(3): 289–295.
- [30] Shang Y, Inthavong K, Tu J. Development of a computational fluid dynamics model for mucociliary clearance in the nasal cavity[J]. *J Biomech*, 2019, 85: 74–83.
- [31] Elad D, Wolf M, Keck T. Air-conditioning in the human nasal cavity[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2008, 163(1–3): 121–127.
- [32] Kim DW, Chung SK, Na Y. Numerical study on the air conditioning characteristics of the human nasal cavity[J]. *Comput Biol Med*, 2017, 86: 18–30.
- [33] Lintermann A, Meinke M, Schröder W. Fluid mechanics based classification of the respiratory efficiency of several nasal cavities[J]. *Comput Biol Med*, 2013, 43(11): 1833–1852.
- [34] Issakhov A, Zhandaulet Y, Abylkassymova A, et al. A numerical simulation of air flow in the human respiratory system for various environmental conditions[J]. *Theor Biol Med Model*, 2021, 18(1): 2.
- [35] 唐媛媛, 孙秀珍, 刘迎曦, 等. 腺样体肥大患儿鼻声反射联合上气道气流场生物力学数值模型的特征分析[J]. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2014, 21(8): 398–402.
- [36] Patel TR, Li C, Krebs J, et al. Modeling congenital nasal pyriform aperture stenosis using computational fluid dynamics[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2018, 109: 180–184.

- [37] Shcherbakov DA, Kokareva VV, Cheremnykh NI, et al. CFD simulation study of aerodynamics in nasal cavity in a case of septal perforation[J]. *Vestn Otorinolaringol*, 2020, 85(1): 64–67.
- [38] 汪涛, 王珮华, 陈东, 等. 不同部位和大小的鼻中隔穿孔对鼻腔气流影响的数值模拟分析[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2020, 55(3): 209–216.
- [39] Smith TL, Schlosser RJ, Mace JC, et al. Long-term outcomes of endoscopic sinus surgery in the management of adult chronic rhinosinusitis[J]. *Int Forum Allergy Rhinol*, 2019, 9(8): 831–841.
- [40] Yamasaki A, Levesque PA, Bleier BS, et al. Improvement in nasal obstruction and quality of life after septorhinoplasty and turbinate surgery[J]. *Laryngoscope*, 2019, 129(7): 1554–1560.
- [41] Wang T, Chen D, Wang PH, et al. Investigation on the nasal airflow characteristics of anterior nasal cavity stenosis[J]. *Braz J Med Biol Res*, 2016, 49(9): e5182.
- [42] 王凯, 董明敏. 流体力学评估上呼吸道一期成形术治疗阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征[J]. *现代预防医学*, 2011, 38(5): 956–958, 960.
- [43] Lintermann A, Schröder W. A hierarchical numerical journey through the nasal cavity: From nose-like models to real anatomies[J]. *Flow Turbul Combust*, 2019, 102(1): 89–116.
- [44] 郭宇峰, 单雅敏, 蔡惠坤, 等. 计算机流体力学在模拟下鼻甲手术中的应用[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2017, 31(4): 257–261, 266.
- [45] Tao F, Feng Y, Sun B, et al. Septoplasty effect on the enhancement of airflow distribution and particle deposition in nasal cavity: A numerical study[J]. *Healthcare (Basel)*, 2022, 10(9): 1702.
- [46] Vanhille DL, Garcia GJM, Asan O, et al. Virtual surgery for the nasal airway[J]. *JAMA Facial Plast Surg*, 2018, 20(1): 63–69.
- [47] Burgos MA, Sanmiguel-Rojas E, Singh N, et al. DigBody®: A new 3D modeling tool for nasal virtual surgery[J]. *Comput Biol Med*, 2018, 98: 118–125.
- [48] Wofford MR, Kimbell JS, Frank-Ito DO, et al. A computational study of functional endoscopic sinus surgery and maxillary sinus drug delivery[J]. *Rhinology*, 2015, 53(1): 41–48.
- [49] Farzal Z, Basu S, Burke A, et al. Comparative study of simulated nebulized and spray particle deposition in chronic rhinosinusitis patients[J]. *Int Forum Allergy Rhinol*, 2019, 9(7): 746–758.
- [50] Popper C, Martin H, Shah R, et al. Intranasal spray characteristics for best drug delivery in patients with chronic rhinosinusitis[J]. *Laryngoscope*, 2023, 133(5): 1036–1043.
- [51] Radulesco T, Meister L, Perrier P, et al. Computational fluid dynamics modeling of nasal obstruction and associations with patient-reported outcomes[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2022, 150(5): 1112e–1113e.
- [52] Pirnar J, Dolenc-Grošelj L, Fajdiga I, et al. Computational fluid-structure interaction simulation of airflow in the human upper airway[J]. *J Biomech*, 2015, 48(13): 3685–3691.
- [53] 刘秋蕊, 赵宇. 人工智能技术在喉癌诊疗领域中的应用[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2021, 27(5): 530–533.

(收稿日期:2023-04-17)

**本文引用格式:**李亚奇,薛涛. 计算流体力学在鼻科临床诊治中的应用进展[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2024,30(4):38–43. DOI:10.11798/j.issn.1007–1520.202423123

**Cite this article as:**LI Yaqi, XUE Tao. Progress in the application of computational fluid dynamics in clinical diagnosis and treatment of rhinology[J]. *Chin J Otorhinolaryngol Skull Base Surg*, 2024,30(4):38–43. DOI:10.11798/j.issn.1007–1520.202423123

(上接第33页)

- [13] von Stebut E, Boehncke WH, Ghoreschi K, et al. IL-17A in psoriasis and beyond: Cardiovascular and metabolic implications[J]. *Front Immunol*, 2020, 10:3096.
- [14] Liew PX, Kubes P. The neutrophil's role during health and disease[J]. *Physiol Rev*, 2019, 99(2):1223–1248.
- [15] Menson KE, Mank MM, Reed LF, et al. Therapeutic efficacy of IL-17A neutralization with corticosteroid treatment in a model of antigen-driven mixed-granulocytic asthma[J]. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2020, 319(4):L693–L709.
- [16] Radajewski K, Wierchowska M, Grzanka D, et al. Tissue remodeling in chronic rhinosinusitis-review of literature[J]. *Otolaryngol*

Pol, 2019, 73(5):1–4.

(收稿日期:2023-11-08)

**本文引用格式:**张容,彭益,谭钰思,等. 白细胞介素-17A 在慢性鼻窦炎发病机制中的作用研究[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2024,30(4):29–33,43. DOI:10.11798/j.issn.1007–1520.202423386

**Cite this article as:**ZHANG Rong, PENG Yi, TAN Yusi, et al. Role of IL-17A in the pathogenesis of chronic rhinosinusitis[J]. *Chin J Otorhinolaryngol Skull Base Surg*, 2024,30(4):29–33,43. DOI:10.11798/j.issn.1007–1520.202423386