

·综述·

基于计算流体力学对阻塞性睡眠呼吸暂停患者治疗前后上气道流场对比分析的研究进展

黄云大^{1,2} 周琪^{1,2} 何冬慧^{1,2} 黄敏方²

¹右江民族医学院,百色 533000; ²广西壮族自治区人民医院口腔正畸科,南宁 530016

通信作者:黄敏方,Email:mfhmf@sina.com

【摘要】 阻塞性睡眠呼吸暂停(OSA)是一种在睡眠过程中上气道反复塌陷,引起患者通气功能障碍和睡眠结构紊乱的睡眠呼吸疾病。随着医学影像学 and 计算机仿真技术的发展,计算流体力学(CFD)逐步成为研究OSA上呼吸道流体动力学特征的重要方法,尤其在CFD仿真模拟不同治疗方法对OSA患者的上气道流场变化和预测治疗有效性方面,显示出良好的应用前景。本文综述了基于计算流体力学对OSA患者治疗前后上气道流场对比分析的研究进展,以期对OSA患者的治疗方案选择提供参考。

【关键词】 阻塞性睡眠呼吸暂停; 上气道; 计算流体力学; 正畸治疗; 持续正压通气治疗

基金项目:广西医疗卫生适宜技术开发与推广应用项目(S2019088)

引用著录格式:黄云大,周琪,何冬慧,等. 基于计算流体力学对阻塞性睡眠呼吸暂停患者治疗前后上气道流场对比分析的研究进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2025, 19(2): 139-144.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.02.009

Advance in comparative analysis of upper airway flow field in obstructive sleep apnea patients before and after treatment based on computational fluid dynamics

Huang Yunda^{1,2}, Zhou Qi^{1,2}, He Donghui^{1,2}, Huang Minfang²

¹Youjiang Medical University for Nationalities, Baise 533000, China; ²Department of Orthodontics, The People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530016, China
Corresponding author: Huang Minfang, Email:mfhmf@sina.com

【Abstract】 Obstructive sleep apnea (OSA) is a sleep-disordered breathing condition characterized by the recurrent collapse of the upper airway during sleep, resulting in ventilation dysfunction and disruption of sleep architecture. Advances in medical imaging and computational technologies have facilitated the application of computational fluid dynamics (CFD) as a critical tool for investigating the fluid dynamics of the upper airway in OSA patients. CFD is particularly valuable for simulating changes in upper airway flow fields under different treatment modalities and for predicting treatment efficacy, demonstrating significant potential in clinical applications.

This review summarizes the research progress in CFD-based comparative analysis of upper airway flow fields in OSA patients before and after treatment, so as to provide a reference for the management and therapeutic optimization of OSA.

【Key words】 Obstructive sleep apnea; Upper airway; Computational fluid dynamics; Orthodontic treatment; Continuous positive airway pressure

Fund program: Guangxi Medical and Health Appropriate Technology Development, Promotion and Application (S2019088)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.02.009

阻塞性睡眠呼吸暂停(obstructive sleep apnea, OSA)是一种复杂的睡眠呼吸疾病,其发生机制涉及上气道解剖结构狭窄、神经肌肉功能障碍、呼吸唤醒阈值降低及环路增益异常等多个因素^[1-2]。从力学角度来看,上气道的塌陷与开放主要受气道内流场特征和气道壁顺应性的影响。当上气道内压低于外压且气道壁顺应性较高时,气道更易发生塌陷。因此,深入分析气道流场特征对于揭示OSA的病理生理机制具有重要意义。目前,分析上气道流场特征的研究方法主要有临床实验观测和数值模拟法,临床实验观察对气流运动可视化较为困难,而数值模拟基于医学影像和计算机技术,能够对上气道气流运动进行可视化及量化研究^[3]。上气道计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术通过计算机断层摄影术(CT)、磁共振成像(MRI)等影像学检查获取上气道几何数据,完成三维重建和网格划分后,运用数值模拟进行流体力学计算,从而获得流速、压力、壁面剪切力及阻力等上气道CFD参数的分布情况^[4]。CFD技术能够直观分析OSA患者在正畸治疗、手术治疗及持续正压通气治疗前后的上气道流场特征变化,并已被广泛应用于评估各种治疗方法的疗效与模拟预测研究中。以下是计算流体力学在OSA患者治疗前后上气道流场对比分析的研究进展概述。

一、阻塞性睡眠呼吸暂停患者正畸治疗前后上气道流场变化

1. OSA患者上颌扩弓治疗前后上气道流场对比分析

(1)儿童OSA患者上颌扩弓治疗:对于合并上颌骨横向发育不足的OSA患儿,正畸扩弓治疗,如快速上颌扩弓

(rapid maxillary expansion, RME)和前方牵引联合快速上颌扩弓(protraction headgear and rapid maxillary expansion, PE), 可以通过扩张腭中缝显著改善鼻腔和鼻咽的通气功能^[5]。鼻腔CFD分析研究显示,正常人的鼻阈区域是鼻阻力的主要来源,气流在此区域的流速和压降最大^[6-7]。而在上颌骨发育不足的OSA患儿中,鼻阈压降比例较低,其他鼻腔狭窄区域(如下鼻甲和中鼻甲前端)流速和压降显著升高,流线紊乱明显,鼻腔通气功能受损。Valerian Corda等^[8]通过CFD分析发现,REM治疗后鼻腔黏膜表面积增加5.1%、鼻腔通气容积增加16.5%,而鼻腔黏膜表面积与鼻腔通气容积比率降低,表明鼻腔通气阻力明显改善。同时,鼻腔狭窄区域的气流流速降低85%,下鼻甲和中鼻甲前端的流线紊乱程度减弱,鼻腔阻力和压降平均减小50%。此外,RME治疗后鼻腔整体压力分布更加均匀,鼻阈区域的压降占比相对升高,这表明治疗后鼻腔气流流场特征更接近于正常状态。

PE治疗后,鼻腔和上气道的流场改善更加明显。OSA患儿PE治疗前后CFD分析表明,PE治疗前上气道吸气和呼气相的压力云图和速度矢量图显示上气道各层面气流流速梯度与压力梯度高,上气道最狭窄区域位于腭咽处,吸气流经鼻腔到达鼻咽时流速、负压绝对值迅速增大,在呼吸周期中,吸气时鼻腔和咽部的通气阻力比呼气高;PE治疗后,吸气时鼻腔平均阻力降低57.3%,咽部阻力下降42.06%,鼻咽狭窄区域的横截面积显著增大,腭咽狭窄区域的气流速度和负压绝对值均大幅降低,各层面压力分布更加均匀。同时,吸气与呼气的通气阻力差距缩小,通气功能得到显著改善^[9]。研究还发现,RME和PE治疗后,OSA患儿口咽容积随着腭部空间增大和舌位上抬而增加,吸气相的压力绝对值较治疗前显著减小,咽部压力与鼻腔阻力呈正弦变化,腭咽和口咽的塌陷程度显著降低^[10]。

(2)成人OSA患者上颌扩弓治疗:对于成人OSA患者,由于上颌骨横向发育不足和骨缝闭合的影响,上颌骨性扩弓(maxillary skeletal expansion, MSE)是其主要治疗手段。通过微种植体直接扩张腭中缝,MSE能够改善鼻腔和咽腔的通气功能,并缓解OSA症状。研究表明,MSE治疗后,鼻腔平均阻力降低39.47%,咽腔阻力减少21.54%^[9]。鼻腔与咽腔的压力分布更加均匀,吸气相的流速和负压梯度显著降低,腭咽狭窄区域横截面积增大,鼻腔与咽腔流场特征均有所改善。Li等^[11]对25例上颌复合体发育成熟的患者进行研究,这些患者先前接受了RME治疗,但仍存在OSA残余症状。在进一步行MSE治疗前后CFD研究中,发现患者呼吸暂停低通气指数(apnea hypopnea index, AHI)从 (6.72 ± 4.34) 次/h降低至 (3.59 ± 5.11) 次/h。治疗后鼻腔气流流速和负压绝对值分别降低76%和50%以上,同时下游咽腔的流场也趋于正常。这些研究表明,在上颌骨发育高峰期之前进行RME治疗能够显著改善气道流场特征,而在发育成熟后选择MSE治疗仍可获得良好的治疗效果。

2. OSA患者下颌前移治疗前后上气道流场对比分析

(1)儿童OSA患者下颌前移治疗:OSA合并下颌后缩患

儿通过下颌前导装置(mandibular advancement device, MAD)治疗,可以引导下颌向前生长,牵拉舌骨和周围软组织向前移位以防止气道塌陷,起到改善下颌后缩面型和缓解睡眠呼吸障碍的作用^[12-13]。此类患儿通常伴有腺样体和扁桃体肥大,导致上气道堵塞,并迫使患儿张口呼吸。因此,患儿MAD治疗前后上气道流场变化还受到口呼吸的影响。在一项20例OSA患儿下颌前导联合上颌扩弓治疗前后的CFD研究中发现,鼻呼吸患儿治疗后平均鼻呼吸流量升高,AHI改善与腭咽压降、阻力及壁面剪切力降低呈正相关;存在口呼吸的患儿,治疗前口腔与舌咽交接处狭窄,吸气时在此处产生射流而形成高负压区,加剧了舌咽塌陷的可能,此时上气道在腭咽下游与舌咽区的流速、压力梯度均较高,而当患儿主要使用口呼吸时,舌咽压降和通气阻力进一步升高,加上此类患儿舌及舌骨后移的解剖特点,更容易导致舌根后坠阻塞气道,治疗后患儿经口呼吸流量减少、经鼻呼吸流量升高,AHI改善与舌咽压降、阻力及壁面剪切力降低呈正相关^[14]。

(2)成人OSA患者下颌前移治疗:OSA患者睡眠时佩戴MAD可以使下颌前伸并稳定下颌骨与舌的位置,防止舌后坠,从而起到改善睡眠呼吸功能的作用。OSA患者在MAD治疗前后的CFD分析显示,OSA治疗前上气道气流最大流速和负压位于口咽,口咽气流流速、压力梯度、呼吸阻力高于鼻咽、喉咽,当气流通过腭咽最狭窄区域时,气流主要在其下游气道前壁产生射流,并冲击附近气道壁使软组织发生高频扑动而形成鼾声,同时在狭窄区域下游的气流分离、回流,造成流线紊乱产生湍流,这一气流特征进一步导致气道负压升高而加重口咽的软组织塌陷^[15-17]。

AHI改善也与气道流场变化紧密相关。Song等^[16]发现,OSA患者MAD治疗后腭咽最狭窄区域流速由11.55 m/s降低至8.81 m/s、平均负压由-84.75 Pa降至-60.87 Pa,咽部阻力由290.63 Pa/L降至186.25 Pa/L,平均AHI由20.75次/h改善至5.48次/h,说明OSA患者佩戴MAD后上气道扩大,改变了气流动力学,降低了上气道狭窄区域的负压和阻力,通气功能得到改善。Zhao等^[18]选取7例戴用MAD后不同治疗效果的患者进行CFD研究,结果表明鼻咽上界至喉咽下界的最大压力变化与治疗效果有关,即OSA患者戴用MAD前后,咽部压降平方根($\Delta\sqrt{\Delta P_{\max}}$)百分比变化与AHI变化(ΔAHI)百分比显著相关($r=0.976\ 2, P=0.000\ 167$)。提示,通过获取患者辅助下颌前伸定位下的气道几何数据建立CFD模型,可以预测MAD的治疗效果。Pugachev等^[19]也在基于上气道气流与软组织相互作用的流固耦合技术CFD仿真模拟研究中,通过调整OSA患者治疗前上气道CFD特征参数,获取患者戴用不同下颌前伸定位MAD后的上气道流场模拟数值,来预测MAD治疗效果及其最佳下颌前伸位置,研究发现模拟MAD治疗与实际治疗后的上气道流场特征具有较强的一致性。这些研究提示,通过上气道流场对比分析,可以评估OSA患者戴用MAD后的通气功能改善情况,也可以预测MAD的治疗效果,以帮助患者选择合适的治疗方案。

二、阻塞性睡眠呼吸暂停患者手术前后上气道流场对比分析

1. OSA患者腺样体扁桃体切除术前术后上气道流场对比分析

OSA患儿主要病因是腺样体和扁桃体肥大,因此通过手术切除腺样体扁桃体(adenotonsillectomy, AT)解除气道阻塞,是儿童OSA的一线治疗方案。然而,AT治疗成功率仅为59.8%~82.9%,相当一部分患儿在术后仍残留OSA^[20-21]。为了评估和预测AT的疗效,国内外学者进行了大量研究。Iwasaki等^[22]对27例患有腺样体扁桃体肥大的OSA患儿进行上气道CFD分析,发现OSA的严重程度与腺样体和扁桃体的绝对大小关系较弱,而与上气道最大负压($P_{\max}$)及压降显著相关。当腺样体和扁桃体肥大导致上气道最小横截面积($CSA_{\min}$)小于50 mm²时, $P_{\max}$ 、压降及AHI均显著升高,此类患者需考虑AT治疗。AT治疗儿童OSA前后上气道CFD分析显示,治疗前上气道高流速和压降集中于腭咽,腺样体、扁桃体狭窄区域下游流线紊乱,气道平均横截面积与通气阻力成反比;治疗后鼻咽和口咽横截面积增大,压降和流速降低,通气阻力改善,AHI改善明显。此外,患者的改善程度与腺样体和扁桃体对应的上气道狭窄区气流最大压降变化及最大压降-流速比值变化呈显著正相关,当上气道其他区域的气流流速和压力梯度变化比例较大时,OSA患儿的AT治疗成功率较低^[23-25]。儿童OSA腺样体扁桃体肥大多伴颅颌面发育异常。对伴下颌后缩和腺样体肥大的OSA患儿,MAD治疗结合CFD分析的研究表明,治疗前高流速区和高压降区域集中于鼻咽至腭咽之间,MAD治疗后上气道吸气压降仅由176.0 Pa降至155.3 Pa,鼻咽气流流速、负压未发生明显变化,而通过虚拟腺样体切除模拟,吸气压降进一步降至34.8 Pa,鼻咽与口咽流速和负压显著降低,通气阻力明显改善^[26]。综上所述,通过CFD分析评估AT治疗前后的上气道流场特征,不仅能预测治疗效果,还可为术后优化提供科学依据。

2. OSA患者鼻腔、咽腔手术前后上气道流场对比分析

(1)鼻腔手术:鼻腔手术主要通过矫正鼻中隔偏曲、切除肥厚鼻甲或其他阻塞性组织,来增大鼻腔横截面积,从而改善鼻腔通气以减轻睡眠时的上气道阻塞。Li等^[14,27]通过对30例OSA患者进行鼻腔扩容术前后的CFD分析发现,治疗前鼻腔和咽腔的气流流速大、压力分布不均、流线紊乱,治疗后鼻腔和咽腔的气流流速变化趋于平缓、压力分布较术前均匀,腭咽腔塌陷的风险降低。治疗后前鼻腔峰值气流速度由(21.07±1.07) m/s降低至(15.81±1.52) m/s;鼻腔压降由(582.60±8.70) Pa降至(403.87±13.46) Pa;腭咽压降由(505.76±13.70) Pa降低至(409.54±42.39) Pa;上气道阻力由(0.64±0.15) kPa·s/L降至(0.48±0.08) kPa·s/L。说明鼻腔手术改善了鼻腔和咽腔的流体力学特性,使得气流变得均匀,减少了负压和阻力。然而,其中5例OSA患者治疗后虽然鼻腔阻力下降,但上气道总阻力却升高,进一步研究后发现,该5例患者治疗前上气道最大阻力部位位于鼻咽下游,鼻腔扩容术后鼻腔通气容积扩大反而导致下游阻塞部位通

气阻力增大,导致上气道总阻力升高,这提示鼻腔扩容术可以降低OSA患者鼻腔和咽腔流速和压力梯度变化,减轻患者鼻阻力、增大有效通气容积、降低咽腔塌陷性,但对于主要气道阻力位于鼻腔以外区域的患者,治疗效果有限。此外,鼻腔扩容术量化虚拟手术的CFD研究显示,通过调整上气道模型的几何数据,模拟不同术式和手术范围,发现鼻腔双侧非对称手术可能导致鼻腔气流和压力分布不对称,增加咽腔负压及塌陷风险^[28]。这一研究为优化鼻腔扩容术设计和术式选择提供了量化依据。

(2)咽腔手术:悬雍垂腭咽成形术(uvulopalatopharyngoplasty, UPPP)是咽部阻塞的主要手术方式,其原理是通过切除或重塑悬雍垂、软腭及咽后壁的软组织,从而扩大咽部气道。对OSA患者UPPP治疗前后进行上气道CFD分析显示,治疗前上气道压力分布以鼻咽上界为明显分界线,上游压力显著高于下游,术前气道高流速区、负压区均位于腭咽末端,气流通过腭咽末端时流速骤升并形成高速射流冲击舌咽后壁,同时鼻咽和口咽气流压降占据上气道总压降80%以上,并且气流可在上气道鼻前庭、腭咽末端、舌咽狭窄区、会厌及声门附近等多处形成涡流区;UPPP治疗后,腭咽和舌咽的平均横截面积显著增大,气道高流速区和负压区向上移至鼻咽中下段和腭咽上段,气流涡流区减少,上气道吸气阻力显著降低,通气功能改善^[29]。同时,研究发现患者AHI和最低血氧饱和度的改善与腭咽和口咽压降变化密切相关,尤其腭咽气流压降降低越大,治疗效果越显著^[30]。然而,部分患者术后出现舌根后移现象,导致舌咽流场改善不明显,严重情况下甚至影响治疗效果。这提示在选择UPPP手术方案时需综合考虑患者的具体解剖特征,以减少不良后果并优化疗效。

(3)上呼吸道一期成形术:对于上气道存在多平面阻塞的OSA患者,单独行鼻腔扩容术或UPPP的治疗效果有限,往往需要同期行鼻腔扩容术、UPPP手术、舌骨悬吊术和喉咽部消融术等多平面联合上呼吸道一期成形术,才能改善患者的睡眠呼吸障碍^[31]。在一项分别对OSA患者行上呼吸道一期成形术、鼻腔扩容术和UPPP治疗前后的CFD分析中,发现3组患者术前软腭对应上气道湍流强度为202%,术后软腭对应上气道湍流强度分别为136%、157%和266%,上呼吸道一期成形术后上气道流场湍流强度下降比鼻腔扩容术更显著,而UPPP治疗后软腭对应上气道湍流强度反而上升^[32]。根据能量守恒,气流在上气道流动的动能,遇见阻力会变成湍流的动能,气道阻力越大则湍流越强,说明对于上气道存在多层阻塞平面时,单独术式降低上气道阻力有限,甚至还可能会加重,而多平面联合上气道一期成形术能有效降低患者上气道流场湍流强度,通气功能改善。

3. OSA患者双颌前徙术前后上气道流场对比分析

双颌前徙术(maxillomandibular advancement, MMA)是通过前移上、下颌骨,将附着于颌骨上的软腭、舌根及咽喉软组织向前拉伸并固定,从而扩展全段咽腔的正颌外科治疗方法。术后颌骨的空间位置与咽腔扩展程度是影响MMA疗效的关键因素。目前,颌骨空间位置的定位方法主要有头影测

量图裁剪拼接、石膏模型切割拼对以及计算机辅助数字化预测技术等^[33]。然而,这些传统方法难以直接评估术后上气道通气功能的改善。近年来,基于上气道CFD分析的研究逐渐成为评估MMA手术疗效的重要工具。

CFD分析研究表明,MMA手术治疗前后的气流流线分布和壁面剪切力分布显示,术后流线平稳,随着狭窄区域扩大,气流流经此区域时发生分离和回流现象减少,术后上气道壁面剪切力和静壁负压均减小,咽腔各层面压降低,口咽塌陷临界闭合压力降低,其中以舌根后区流场特征变化最为显著,患者术后AHI改善与咽腔横截面积增大及压降低显著相关^[34-35]。在一项对18例OSA患者MMA治疗前后CFD研究中,患者术后平均气道容积增加43.75%,上气道最大流速降低40.3%,AHI改善程度与咽腔横截面积的增加及压降低密切相关。该研究还发现,术前气道最大气流流速小于7.2 m/s的OSA患者,手术失败率高达43%,这提示术前的气流流场特征可作为评估MMA术后疗效的潜在指标^[36]。为了进一步评估MMA手术的疗效,Yamagata等^[37]分别对OSA患者治疗前、MMA模拟术后及实际MMA术后的上气道三维模型进行CFD分析,结果显示模拟与实际术后趋势一致,均表现为气道横截面积增加、流速及压力梯度降低、气道阻力改善。然而,由于CFD模型通常假设气道壁为刚性且光滑,忽略了上气道流场与咽腔软组织之间的动态耦合作用,模拟分析结果低估了实际术后气道形态及流场变化的幅度。这一结果提示,未来需要进一步优化CFD模型的边界条件设置,以提高其在术后疗效预测中的准确性。

三、阻塞性睡眠呼吸暂停患者持续正压通气治疗前后上气道流场对比分析

1. 持续正压通气治疗静态气道壁面CFD分析

持续性正压通气治疗(continuous positive airway pressure, CPAP)是通过维持上气道开放来缓解OSA患者的呼吸暂停和低通气,并纠正机体的炎症和氧化应激反应^[38]。研究表明,OSA患者的上气道解剖结构异常以及CPAP压力滴定不当等原因,可能导致患者CPAP治疗依从性降低^[39]。深入了解OSA患者在CPAP治疗前后上气道的形态、流体力学特性及阻力变化,有助于提高患者的治疗依从性。Saha等^[40]研究发现,OSA患者在CPAP治疗前的呼吸周期中,上气道壁面压力范围为-20~20 Pa。吸气阶段,上气道壁面几乎完全处于负压状态,咽腔狭窄区域的顺应性较高,咽咽区域湍流动能显著增加。进一步分析显示,吸气时上气道内外跨壁压对气道壁产生的作用力中,最大值出现在鼻咽区(-0.014 N),最小值出现在喉咽区(-0.22 N),上气道趋于向内塌陷。由于咽咽缺乏软组织支撑,其塌陷程度更加显著;在9 cmH₂O(1 cmH₂O=0.098 kPa) CPAP的CPAP治疗下,患者的上气道壁面压力提升至850~900 Pa,湍流动能显著减少,最大作用力出现在鼻腔(13.82 N),最小作用力出现在鼻咽(1.71 N),上气道趋于扩张状态。尽管,CPAP治疗增加了上气道壁面压力,但上气道流速、压力梯度及壁面剪切力并未明显增加。这一结果表明,CPAP治疗能够有效提高OSA患者的上气道

壁面压力,而不会因壁面剪切力的增加而对黏膜组织造成损伤。Wakayama等^[41]在有无鼻塞OSA患者经鼻CPAP治疗后的鼻腔、鼻咽CFD分析中发现,在10 cmH₂O CPAP治疗下,鼻塞组吸气时平均最大气流流速达17.6 m/s,鼻咽相对于入口处平均压降为2.44 cmH₂O,而无鼻塞组分别为11.8 m/s和1.17 cmH₂O,并且在鼻塞组中,狭窄侧鼻腔气流流速远高于通畅侧鼻腔,在OSA患者CPAP治疗过程,鼻腔气流流速升高,可能会激活鼻腔黏膜上的机械或感觉受体,当受体刺激超过一定阈值时,中枢神经系统会通过三叉神经传入信号触发唤醒或觉醒,从而引起患者睡眠不适,最终可能导致患者无法耐受CPAP治疗。

2. 持续正压通气治疗动态气道壁面CFD分析

在持续CPAP治疗中,由于流固耦合作用及神经肌肉调控等因素,上气道形态呈动态变化,基于静态刚性边界的CFD模拟可能无法获取真实呼吸周期内气道流场特征。Li等^[42]利用简化的三维软腭模型,通过流固耦合研究不同呼吸条件下软腭振动与气流动力学的关系。结果表明,在安静呼吸(每秒钟总呼吸流量为0.36 L)时,软腭变形幅度和压降较小,流场平稳;而在强烈呼吸(每秒钟总呼吸流量为2.2 L)时,软腭变形幅度是安静呼吸的5倍,压降增大至10倍。此外,口呼吸流量比例增加会进一步加剧软腭压降和湍流。这表明,呼吸流速和方式对软腭变形及流场稳定性有显著影响,静态模拟可能低估或高估CPAP治疗效果,影响疗效预测的准确性。动态CFD模拟研究进一步发现,与呼吸周期的不同阶段(峰值吸气、末吸气、峰值呼气和末呼气)静态气道壁CFD模拟相比,动态气道壁CFD模拟上气道横截面积在呼吸周期中波动明显,动态模拟与各阶段静态模拟各气道层面压降存在明显差异,最高差异可达400%;同时,动态模拟气流流速、阻力及壁面剪切力分布处于动态变化中,由于气道壁运动,动态模拟气流经过狭窄区域的喷射位置和狭窄区域下游湍流位置也处于动态变化中^[43]。这表明静态气道壁CFD研究无法捕捉气道解剖学与气流动力学之间复杂的动态关系,动态流固耦合CFD技术在评估OSA患者治疗方案中的应用精度更高。

四、总结与展望

上气道CFD作为一种模拟气流运动的技术,在OSA的研究与临床应用中发挥重要作用。CFD可提供气流速度、压力分布、流线分布和壁面剪切力等临床无法直接测量的指标,为深入理解OSA病理机制及优化治疗策略提供数据支持。在临床应用中,CFD可用于辅助诊断,通过定位气道狭窄部位和评估气流特性,帮助分级OSA严重程度;用于优化治疗方案,如评估手术、口腔矫治器或CPAP的效果,并为个性化治疗方案提供依据。此外,CFD还可通过模拟治疗前后的物理参数变化预测治疗有效性。尽管CFD在OSA研究中展现出潜力,但仍面临诸多挑战。目前,多数模型将上气道壁面设定为刚性、光滑边界,未将呼吸过程气流与上气道软组织的耦合作用纳入分析,且多采用稳态气流模拟,无法准确反映动态呼吸过程。加之模型构建过程复杂,研究样本量

小,限制了其临床普及和推广。在未来研究中,应引入动态流固耦合模型,综合考虑气道壁的弹性和动态特性;优化湍流模型,采用更适合气道复杂流动特性的高精度模型[如大涡模拟(large eddy simulation,LES)];结合大数据和机器学习技术,通过分析大样本量数据提升个体化模型的预测能力;开发高效的算法和云计算平台,降低计算成本并提高模拟效率;以及加强CFD模型与临床数据的关联性,通过更多大样本量数据和临床试验验证模型的预测精度和临床相关性。随着技术的发展,CFD有望在OSA个性化诊疗中广泛应用,为患者提供精准治疗。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 张子奇,王舒泽,张斌,等. 上气道形态评估与阻塞性睡眠呼吸暂停关系的研究进展[J]. 实用临床医药杂志, 2022,26(6): 139-144. DOI:10.7619/jcmp.20214708.
- [2] Suzuki M. Obstructive sleep apnea-consideration of its pathogenesis [J]. *Auris Nasus Larynx*, 2022,49(3):313-321. DOI:10.1016/j.anl.2021.10.007.
- [3] 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. DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105627.
- [4] 刘小涵,雷齐鸣,张小兵. 计算流体力学在鼻腔疾病临床应用中的进展[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2021,56(5):528-531. DOI:10.3760/cma.j.cn115330-20200519-00423.
- [5] 贺红.《阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征与口腔正畸:美国口腔正畸医师协会白皮书》解读[J]. 中华口腔医学杂志, 2020,55(9):667-672. DOI:10.3760/cma.j.cn112144-20191224-00465.
- [6] Naughton JP, Lee AY, Ramos E, et al. Effect of nasal valve shape on downstream volume, airflow, and pressure drop: Importance of the nasal valve revisited [J]. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 2018,127(11):745-753. DOI:10.1177/0003489418791597.
- [7] 何建乔,金峰,苏英锋,等. 单一或多重阻塞平面阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征患者上气道气流场数值模拟研究[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2021,28(11):716-719. DOI:10.16066/j.1672-7002.2021.11.014.
- [8] Valerian Corda J, Emmanuel J, Nambiar S, et al. Airflow patterns and particle deposition in a pediatric nasal upper airway following a rapid maxillary expansion: Computational fluid dynamics study [J]. *Cogent Eng*, 2023, 10(1): null. DOI: 10.1080/23311916. 2022.2158614.
- [9] 张因. 阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征患者治疗前后的流动特性研究[D]. 济南:山东大学, 2022. DOI:10.27272/d.cnki.gshdu. 2022.006052.
- [10] Xie B, Zhang L, Lu Y. The role of rapid maxillary expansion in pediatric obstructive sleep apnea: Efficacy, mechanism and multidisciplinary collaboration [J]. *Sleep Med Rev*, 2023, 67: 101733. DOI:10.1016/j.smrv.2022.101733.
- [11] Li K, Iwasaki T, Quo S, et al. Persistent pediatric obstructive sleep apnea treated with skeletally anchored transpalatal distraction [J]. *Orthod Fr*, 2022, 93 (Suppl 1): 47-60. DOI: 10.1684/orthodfr. 2022.86.
- [12] 赵婷婷,贺红. OSA儿童错颌畸形矫治临床路径[J]. 口腔医学, 2024,44(8):561-564. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2024.08.001.
- [13] 张明欣,马艳宁,金作林. 隐形功能矫治在青少年骨性Ⅱ类下颌后缩患者治疗中的研究进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2024,18(1):61-64. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.01.010.
- [14] 陈帅. 下颌后缩患者Twin Block矫治后上呼吸道流体力学仿真模拟及功能评价[D]. 济南:山东大学, 2022. DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2022.006242.
- [15] Martinez A, Muniz AL, Soudah E, et al. Physiological and geometrical effects in the upper airways with and without mandibular advance device for sleep apnea treatment [J]. *Sci Rep*, 2020,10(1):5322. DOI:10.1038/s41598-020-61467-4.
- [16] Song B, Li Y, Sun J, et al. Computational fluid dynamics simulation of changes in the morphology and airflow dynamics of the upper airways in OSAHS patients after treatment with oral appliances [J]. *PLoS One*, 2019, 14 (11): e219642. DOI: 10.1371/journal.pone.0219642.
- [17] 吴伟,杨晓京,袁锐波,等. OSAHS患者经止鼾器治疗前后上呼吸道流体动力学变化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(10): 342-348. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2023.10.040.
- [18] Zhao M, Barber T, Cistulli P, et al. Computational fluid dynamics for the assessment of upper airway response to oral appliance treatment in obstructive sleep apnea [J]. *J Biomech*, 2013, 46 (1):142-150. DOI:10.1016/j.jbiomech.2012.10.033.
- [19] Pugachev A, Arnold M, Burgmann S, et al. Application of patient-specific simulation workflow for obstructive sleep apnea diagnosis and treatment with a mandibular advancement device [J]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2020,36(8):e3350. DOI:10.1002/cnm.3350.
- [20] Mitchell RB, Archer SM, Ishman SL, et al. Clinical practice guideline:Tonsillectomy in children(update)-executive summary [J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2019,160(2):187-205. DOI: 10.1177/0194599818807917.
- [21] 中国儿童OSA诊断与治疗指南制订工作组,中华医学会耳鼻咽喉头颈外科学分会小儿学组,中华医学会儿科学分会呼吸学组,等. 中国儿童阻塞性睡眠呼吸暂停诊断与治疗指南(2020)[J]. 中国循证医学杂志, 2020,20(8):883-900. DOI: 10.7507/1672-2531.202005147.
- [22] Iwasaki T, Sugiyama T, Yanagisawa-Minami A, et al. Effect of adenoids and tonsil tissue on pediatric obstructive sleep apnea severity determined by computational fluid dynamics [J]. *J Clin Sleep Med*, 2020,16(12):2021-2028. DOI:10.5664/jcsm.8736.
- [23] Luo H, Sin S, McDonough JM, et al. Computational fluid

- dynamics endpoints for assessment of adenotonsillectomy outcome in obese children with obstructive sleep apnea syndrome [J]. *J Biomech*, 2014, 47 (10) : 2498 - 2503. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.03.023.
- [24] Slaats M, Loterman D, van Holsbeke C, et al. The role of functional respiratory imaging in treatment selection of children with obstructive sleep apnea and down syndrome [J]. *J Clin Sleep Med*, 2018, 14(4):651-659. DOI:10.5664/jcsm.7064.
- [25] Kimbell JS, Basu S, Garcia G, et al. Upper airway reconstruction using long-range optical coherence tomography: Effects of airway curvature on airflow resistance [J]. *Lasers Surg Med*, 2019, 51 (2):150-160. DOI:10.1002/lsm.23005.
- [26] 赵西宁. 儿童OSAHS口腔正畸后上气道气流场数值模拟及特征分析[D]. 大连:大连医科大学, 2017.
- [27] Li L, Han D, Zang H, et al. Aerodynamics analysis of the impact of nasal surgery on patients with obstructive sleep apnea and nasal obstruction [J]. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*, 2022, 84(1):62-69. DOI:10.1159/000516243.
- [28] 暴继敏, 孟大为, 李哲, 等. 鼻腔扩容术量化虚拟手术的气流动力学研究[J]. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2020, 27(3):153-157. DOI:10.16066/j.1672-7002.2020.03.011.
- [29] Jin J, Tang Z, Zhao F, et al. Establishment of upper respiratory tract model of patients with obstructive sleep apnoea hypopnoea syndrome before and after surgical treatment and its hydrodynamics analysis [J]. *J Pak Med Assoc*, 2020, 70(9):64-70.
- [30] Zhu L, Liu H, Fu Z, et al. Computational fluid dynamics analysis of H - uvulopalatopharyngoplasty in obstructive sleep apnea syndrome [J]. *Am J Otolaryngol*, 2019, 40(2):197-204. DOI:10.1016/j.amjoto.2018.12.001.
- [31] Rahavi-Ezabadi S, Su YY, Wang YH, et al. Minimally invasive, single-stage, multilevel surgery for obstructive sleep apnoea: A systematic review and meta-analysis [J]. *Clin Otolaryngol*, 2023, 48(6):828-840. DOI:10.1111/coa.14098.
- [32] 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. DOI:CNKI:SUN:XDFY.0.2011-05-065.
- [33] 王旭东, 魏弘朴, 李彪. 从“经验外科”到“精准外科”——精准正颌外科体系的建立与临床应用 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2023, 41(5):491-501. DOI:10.7518/hxkq.2023.2023152.
- [34] Sittitavornwong S, Waite PD, Shih AM, et al. Computational fluid dynamic analysis of the posterior airway space after maxillomandibular advancement for obstructive sleep apnea syndrome [J]. *J Oral Maxil Surg*, 2013, 71(8):1397-1405. DOI:10.1016/j.joms.2013.02.022.
- [35] Yu CC, Hsiao HD, Lee LC, et al. Computational fluid dynamic study on obstructive sleep apnea syndrome treated with maxillomandibular advancement [J]. *J Craniofac Surg*, 2009, 20 (2):426-430. DOI:10.1097/SCS.0b013e31819b9671.
- [36] Furundarena-Padrones L, Cabriada-Nuno V, Brunso-Casellas J, et al. Correlation between polysomnographic parameters and volumetric changes generated by maxillomandibular advancement surgery in patients with obstructive sleep apnea: A fluid dynamics study [J]. *J Clin Sleep Med*, 2024, 20(3):371-379. DOI:10.5664/jcsm.10874.
- [37] Yamagata K, Shinozuka K, Ogisawa S, et al. A preoperative predictive study of advantages of airway changes after maxillomandibular advancement surgery using computational fluid dynamics analysis [J]. *PLoS One*, 2021, 16(8):e255973. DOI:10.1371/journal.pone.0255973.
- [38] 岳铁刚, 丁兰萍, 方亚莉. 连续正压通气治疗对阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征患者炎症反应和氧化应激标记物的影响 [J]. *世界睡眠医学杂志*, 2020, 7(1):112-114. DOI:10.3969/j.issn.2095-7130.2020.01.045.
- [39] 卢雨, 舒兰, 张晓晴. 持续正压通气治疗阻塞性睡眠呼吸暂停理想压力值的分析与预测 [J]. *现代预防医学*, 2023, 50(10):1916-1920. DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202210590.
- [40] Saha SC, Huang X, Francis I, et al. Airway stability in sleep apnea: Assessing continuous positive airway pressure efficiency [J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2024, 325:104265. DOI:10.1016/j.resp.2024.104265.
- [41] Wakayama T, Suzuki M, Tanuma T. Effect of nasal obstruction on continuous positive airway pressure treatment: Computational fluid dynamics analyses [J]. *PLoS One*, 2016, 11(3):e150951. DOI:10.1371/journal.pone.0150951.
- [42] Li P, Laudato M, Mihaescu M. Time-dependent fluid-structure interaction simulations of a simplified human soft palate [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(11):1313. DOI:10.3390/bioengineering10111313.
- [43] Xiao Q, Gunatilaka C, McConnell K, et al. The effect of including dynamic imaging derived airway wall motion in CFD simulations of respiratory airflow in patients with OSA [J]. *Sci Rep*, 2024, 14 (1):17242. DOI:10.1038/s41598-024-68180-6.

(收稿日期:2024-11-29)

(本文编辑:王嫚)