

基于计算流体力学分析腺样体大小 对儿童上气道气流的影响

郭宇峰¹, 苏丽君², 蔡惠坤², 高兴强¹, 薛豪洋², 吴晓慧¹

(1. 厦门市儿童医院 耳鼻咽喉头颈外科, 福建 厦门 361000; 2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361000)

摘要: **目的** 通过构建同一气道中腺样体大小依次递减的8种上气道有限元数值模型, 分析腺样体大小对上气道流场特性的影响, 帮助临床医生进一步认识腺样体在小儿鼾症中的发病机制及规范腺样体手术适应证。**方法** 基于上气道CT扫描图, 通过三维重建软件Amira构造相同气道中腺样体大小依次递减的8种上气道三维模型; 采用计算流体力学(CFD)模拟各上气道吸气气流; 从气流流速、流动方式、气流压强和通气量等方面分析腺样体大小对上气道流场特性的影响。**结果** 当腺样体肥大阻塞后鼻孔55%以内时, 平静吸气气流流速和压强变化趋势与正常气道基本一致, 气流流线规则, 通气量为77.812~74.854 mL/s。当阻塞度达64%以上时, 鼻咽部的气流流速和压降急剧增加, 流线紊乱, 平静吸气时上气道通气量显著减少。**结论** 腺样体肥大阻塞后鼻孔达2/3以上时, 可严重影响儿童正常吸气。腺样体越大, 患儿夜眠憋气、打鼾、呼吸暂停等症状越明显。腺样体肥大是造成儿童阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征(OSAHS)的重要因素。

关键词: 阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征; 腺样体肥大; 上气道; 计算流体力学
中图分类号: R766.5

Analysis of the effect of adenoid size on upper airway flow in children based on computational fluid dynamics

GUO Yufeng¹, SU Lijun², CAI Huikun², GAO Xingqiang¹, XUE Haoyang², WU Xiaohui¹

(1. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, Xiamen Children's Hospital, Xiamen 361000, China;
2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China)

Abstract: **Objective** To analyze the effect of adenoid size on the upper airway flow by constructing 8 different upper airway finite element numerical models with the adenoid size decreasing successively in the same airway, so as to help clinicians to further understand the pathogenesis of adenoid in children with snoring disease and to regulate the indications for adenoid surgery. **Methods** Based on the computed tomography (CT) of the upper airway, 8 different upper airway three-dimensional (3D) models with decreasing adenoid size in the same airway were constructed by 3D reconstruction software Amira. Computational fluid dynamics (CFD) was used to simulate the inspiratory airflow in each upper airway. The influences of the size of adenoids on the flow field characteristics of the upper airway were analyzed from the aspects of flow velocity, flow pattern, flow pressure and ventilation volume. **Results** When the adenoid was enlarged and blocked nostril within 55%, the flow velocity and pressure during quiet inspiratory period were basically consistent with the normal airway, the flow line was regular, and the ventilation volume was between 77.812 to 74.854 mL/s. When the degree of obstruction reached more than 64%, the nasopharyngeal airflow velocity and pressure drop sharply increased, with disrupted streamline and significant reduction of upper airway ventilation volume during quiet inspiratory period. **Conclusions** Adenoid hypertrophy can affect the normal inspiration of children seriously when obstruction of nostril up to 2/3. The larger the adenoids, the more obvious the symptoms of suffocation, snoring, and apnea at night sleep. Adenoid hypertrophy is an important factor that causes obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome in children.

Keywords: Obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome; Adenoid hypertrophy; Upper airway; Computational fluid dynamics

基金项目:福建省卫生教育联合攻关计划项目(2019-WJ-33);福建省自然科学基金面上项目(2018D0018)。
第一作者简介:郭宇峰,女,硕士,副主任医师。
通信作者:高兴强, Email:gaoxqxm@163.com;吴晓慧, Email:alley-wu@163.com。高兴强与吴晓慧对本文有同等贡献。

阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征 (obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome, OSAHS) 是指睡眠时反复出现的呼吸暂停和通气不足^[1]。腺样体又称咽扁桃体,是一个类三角形的块状淋巴组织,位于鼻咽顶后壁中线处,出生即存在,2~6岁增生最为显著^[2]。长期反复的炎症刺激腺样体会导致其病理性肥大,腺样体肥大是儿童 OSAHS 最主要的病因^[3-4]。以往研究表明腺样体大小与儿童 OSAHS 疾病的严重程度具有正相关性^[5-6];临床经验也认为腺样体阻塞后鼻孔达 2/3 以上,具有腺样体切除指征^[7]。因此,本文构建同一气道中不同腺样体大小的上气道模型,采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟各上气道模型的吸气气流,从气流流速、流动方式、气流压强和通气量等方面分析腺样体大小对上气道流场特性的影响,为进一步认识腺样体在小儿鼾症中的发病机制及规范腺样体手术适应证提供理论依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

从厦门市儿童医院放射影像科 CT 库中选取 5 例 5~7 岁儿童的 CT 图。据资料记载,样本均为因寰枢椎半脱位至厦门市儿童医院骨科行颈椎 CT 检查,此疾病未对气道结构产生影响。CT 扫描是以听眶线为扫描基线,范围甲状软骨下缘至鼻顶,在平静呼吸的吸气末屏气,完成上气道的水平位扫描,扫描层距 1.25 mm。已告知监护人 CT 的使用方式和范围,征得其同意,并通过厦门市儿童医院伦理委员会审核。经监护人及伦理委员同意下,邀请志愿者至厦门市儿童医院耳鼻咽喉科进行常规耳鼻咽喉体检、睡眠呼吸监测 (polysomnography, PSG) 及鼻内镜

检查。根据检查结果,选取 1 例 6 岁重度 OSAHS 患儿,男,身高 115 cm,体重 19 kg,PSG 监测结果示呼吸暂停低通气指数 (apnea hypopnea index, AHI) 27 次/h,最低血氧饱和度为 70%;鼻内镜检查示腺样体阻塞后鼻孔 90%,双侧扁桃体 III° 肥大,提示患儿为重度呼吸暂停及低通气。

1.2 方法

1.2.1 三维重建和网格划分 将 CT 图导入三维重建 Amira 软件,如图 1 所示,红色区域为软组织腺样体,导致鼻咽部重度狭窄。在 CT 矢状图上逐层模拟切除腺样体,每次约切除 1 mm 组织,识别上气道边界,依次构建 8 种腺样体体积逐渐递减的上气道三维模型,类型 1 为腺样体肥大的上气道 (重度 OSAHS 患儿原始模型),类型 8 为全部腺样体模拟切除后的上气道。

将重建后的模型导入网格划分软件 ICEM CFD,上气道内部划分为四面体非结构化网格,近壁面处划分为 10 层棱柱层网格,8 种上气道的网格数范围为 211.474~259.120 万。

将上气道划分为 13 个截面,具体见图 2。截面 8 到截面 10 鼻咽部,截面 10 到截面 12 为口咽部,截面 12 以下为喉咽部,截面 13 为气管起始端。

1.2.2 CFD 方法 应用商业软件 Fluent 19.0 求解控制方程。将前鼻孔处设为大气压进口,气管起始端为 -20 Pa 出口,壁面为无滑移边界条件^[8];二阶迎风格式对控制方程进行离散化;standard k- ω 模型求解控制方程^[9];SIMPLE 算法耦合速度场和压强场;视空气为不可压缩气体,密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$,动力黏度 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ^[10];残差值为 10^{-5} ,运行计算直到达到所设定的残差值或残差值趋于稳定,同时监测出口速度、压强等物理量达到稳定值。

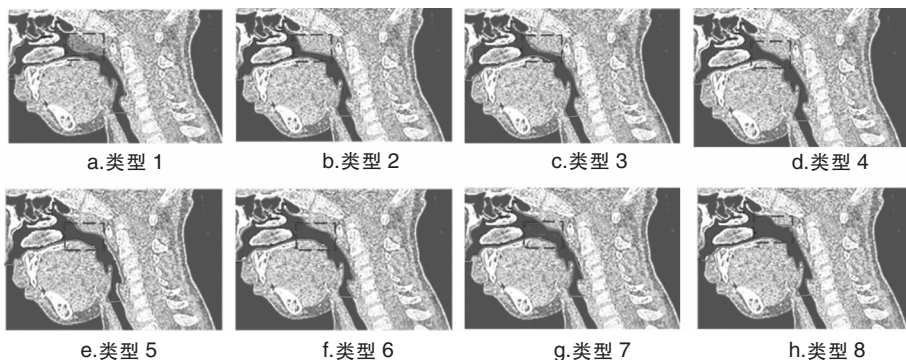


图 1 不同腺样体大小的上气道 CT 图

2 结果

2.1 横截面积

腺样体位于上气道鼻咽部顶后壁,与鼻咽气道的形态关系密切,如图 2、3 所示,腺样体越大,鼻咽气道即截面 8~9 面积越小,尤其是截面 9(腺样体区)。腺样体肥大造成上气道鼻咽部的狭窄,本实验选取截面 9(腺样体凸入鼻咽部最大处截面)作为讨论的对象,定义鼻咽部狭窄度公式为:

狭窄度 = $\left(1 - \frac{A_i}{A_8}\right) \times 100\%$

其中,A8 为类型 8 的截面 9 面积,i 为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7。

如表 1 所示,8 种不同腺样体大小的上气道截面 9 的面积和狭窄度。类型 1 截面 9 面积最小,为 11.958 mm²,鼻咽部狭窄度为 89%;类型 8 为全部腺样体切除后的上气道,鼻咽部狭窄度为 0%;作为耳鼻咽喉科医生的临床共识,当儿童腺样体阻塞气道达 2/3 以上时,腺样体为病理性肥大,具有腺样体切除术的手术指征^[7],类型 4 的鼻咽部狭窄度为 64%,基本接近 2/3。

表 1 鼻咽部狭窄度		
类型	截面 9 面积(mm ²)	狭窄度(%)
1	11.958	89
2	19.611	81
3	23.510	77
4	37.732	64
5	47.197	55
6	54.183	48
7	72.024	31
8	104.792	0

2.2 吸气状态下上气道气流流线及速度分布

当鼻咽部狭窄度为 0%~89% 时,鼻腔内吸气气流流线分布基本一致,差异主要体现在鼻咽部,如图 4 所示。结果表明气流加速进入鼻前庭,流过狭窄的鼻阈后,大部分气流流入总鼻道的中部和下部,小部分气流向上偏转通过上鼻道及嗅裂处并形成涡流,随后气流逐渐减速,呈平流形式流出后鼻孔,向下偏转至鼻咽。当鼻咽部狭窄度为 0%~55% 时,鼻咽部气流流速较小,从鼻咽部至气管起始处流速逐渐增加,狭窄的声门处流速最大,流线较为规则。而当上气道狭窄度为 64% 以上时,鼻咽部气流流速明显增大,流线紊乱,鼻咽部下游处气流分离,不再紧贴壁面,形成较大的涡流,尤其当狭窄度达 81% 以上时,鼻咽部气流流速迅速增大,为气道内最大流速,形成一股高速射流。

当鼻咽部狭窄度为 0%~89% 时,鼻腔(截面 1~7)各截面气流流速变化趋势无明显差异,差异主要发生在鼻咽部腺样体区(截面 9),如图 5 所示。从前鼻孔至鼻阈(截面 1~2)气流流速增加,为鼻腔内最大流速,从鼻阈至中鼻甲前端(截面 2~4)气流流速迅速减小,中鼻甲前端至后鼻孔(截面 4~7)气流流速基本一致。而在咽部,当狭窄度为 0%~55% 时,气流流速变化较为平缓,腺样体区气流流速由 0.828 m/s 增至 1.772 m/s,狭窄度每增加 1%,流速平均增加 0.017 m/s。而当鼻咽部狭窄度达 64% 以上,腺样体区气流流速激增,狭窄度由 64% 增至 89% 时,流速由 2.143 m/s 增至 4.197 m/s,狭窄度每增加 1%,流速平均增加 0.082 m/s,是狭窄度 55% 以下的 4.779 倍。

2.3 吸气状态下上气道气流压强分布

当鼻咽部狭窄度为 0%~89% 时,鼻腔(截面

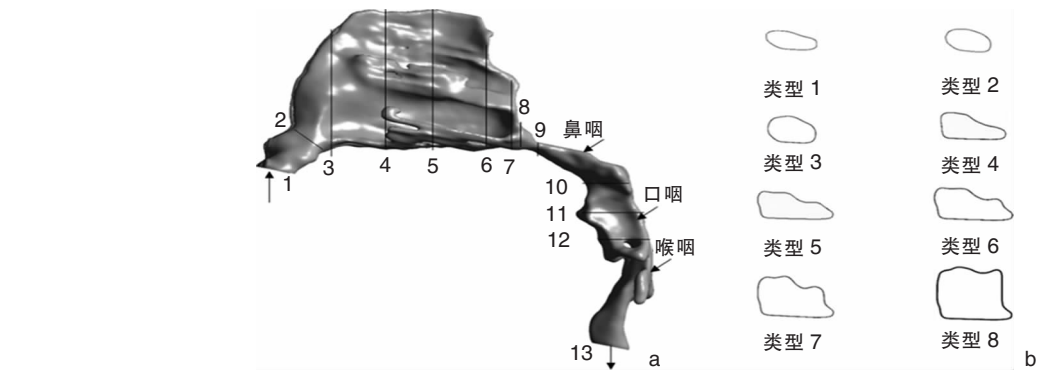


图 2 上气道横截面 a:类型 1;b:8 种类型的横截面 注:①鼻孔进口;②鼻阈;③下鼻甲前端;④中鼻甲前端;⑤下鼻甲中段;⑥下鼻甲后端;⑦后鼻孔;⑧鼻咽部;⑨腺样体区;⑩鼻咽部;⑪扁桃体中段;⑫口咽部;⑬气管起始端。

1~7)各截面气流压强变化趋势无明显差异,差异主要发生在鼻咽部腺样体区(截面9),如图6所示。从前鼻孔至鼻阈(截面1~2)压强小幅度下降,为鼻腔内最大压降,接着从鼻阈至中鼻甲前端(截面2~4)压强缓慢下降,随后从中鼻甲前端至后鼻孔(截面4~7)压强平稳。从鼻咽至喉咽(截面8~13),狭窄度为0%~55%时,鼻咽部(截面8~10)压强值变化较为平缓,狭窄度每增加1%,压降平均增加0.03 Pa。而在狭窄度为64%以上时,变化趋势发生显著改变。随着狭窄度的增加,腺样体区压强急剧下降,形成较大的压降,狭窄度每增加1%,压降平均增加0.427 Pa,是狭窄度55%以下的14倍左右,尤其当狭窄度为89%时,腺样体区压降高达13.839 Pa,占整个上气道总压降的69.2%。

2.4 吸气状态下上气道通气量变化

在吸气压差为20 Pa条件下,图7和表2表明,当鼻咽部狭窄度为0%~48%时,通气量基本保持

在76 mL/s。当鼻咽部气道狭窄度为55%时,通气量减少2 mL/s;当鼻咽部气道狭窄度为64%以上时,通气量开始迅速减少;64%时减少量为9.27 mL/s,减少率为11.913%;80%以上时,通气量急剧下降;狭窄度为81%时,减少量为14.728 mL/s,减少率为18.927%;狭窄度为89%时,减少量为30.757 mL/s,减少率高达39.527%。

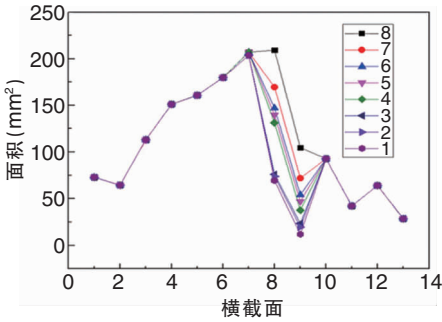


图3 不同腺样体大小的上气道横截面面积

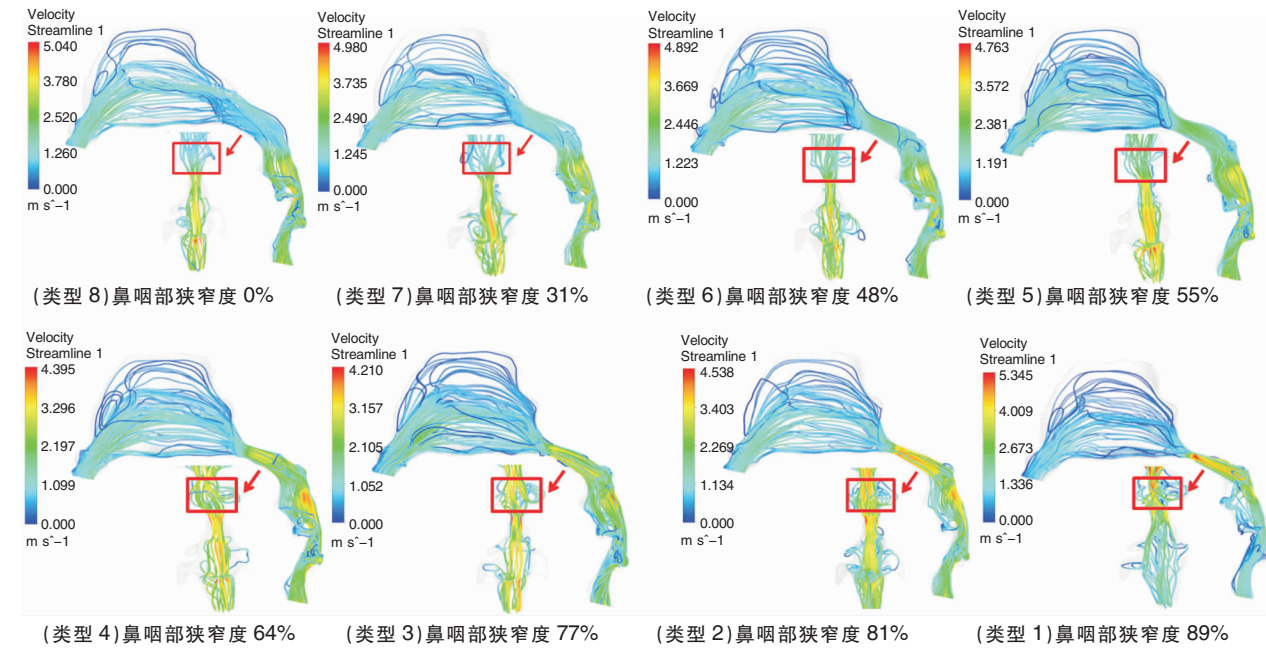


图4 不同鼻咽部狭窄度的上气道气流流线分布图

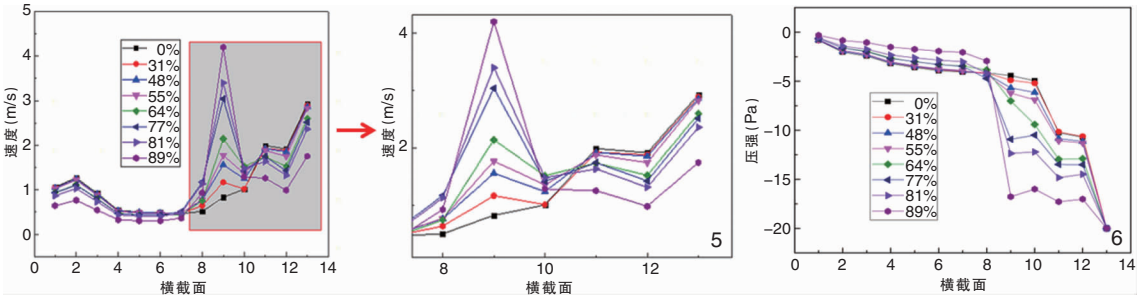


图5 不同鼻咽部狭窄度的上气道横截面气流速度值

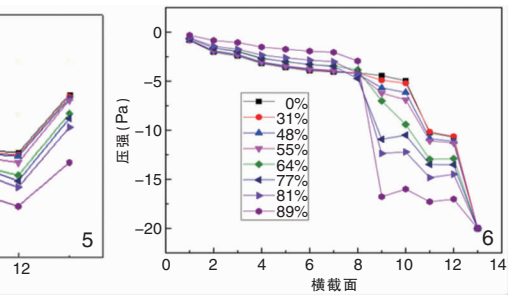


图6 不同狭窄度的上气道横截面气流压强值

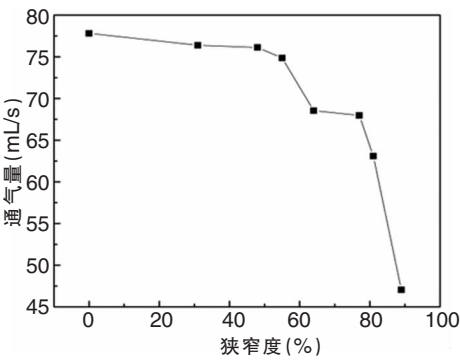


图7 不同狭窄度的上气道通气量

表2 不同狭窄度的上气道通气量 (mL/s)

狭窄度 (%)	0	31	48	55	64	77	81	89
通气量	77.812	76.385	76.130	74.854	68.542	67.970	63.084	47.055

3 讨论

3.1 上气道模型的精确性及流体力学数值模拟的可靠性研究

通过在同一志愿者上气道 CT 图上修改腺样体的大小,精确识别修改腺样体后的上气道边界,构建出了除鼻咽部气道形态不同而其他部位形态一致的 8 种上气道模型。腺样体大小影响鼻咽部截面大小。Oh 等^[11]将鼻咽气道分为宽长型和窄平型两种类型,表明中度至重度腺样体肥大的鼻咽部气道狭窄平坦,如图 2b 所示,随着腺样体的增大,本文所建的鼻咽气道横截面也越窄平,鼻咽截面面积也越小。

在建模过程中,尤其是复杂的鼻腔模型,尚未简化,基本能够反映真实上气道模型。为了排除网格造成的计算误差,划分了 5 种不同尺度的网格验证网格无关性,8 种上气道的网格数均在 200 万以上,超出了既往研究所采用网格数^[8],能够详细捕获气流的细微变化。在前期研究中,我们也已做过关于此计算方法可靠性的研究,数值模拟结果、体外实验和临床鼻阻力测量结果能够较好的吻合。

3.2 CFD 结果分析

从气流流速、流动方式、压强、通气量等方面分别讨论 8 种上气道的流场差异,探讨腺样体大小对儿童呼吸的影响。

3.2.1 气流流速及流动方式的分析 腺样体大小对鼻腔吸气气流流速及流动方式无明显影响,影响主要发生在鼻咽部腺样体区。当鼻咽部狭窄度为 55% 以内时,上气道吸气气流流速及流动方式与正常气道差别较小。当鼻咽部狭窄度为 64% 以上时,腺样体区气流流速急剧增加。高速流动的流体附近

会产生低压,从而产生吸附作用,因此当鼻咽部腺样体区气流流速激增时,气道内产生低压,对腺样体区周围的软组织产生吸附作用。而此区域前方为软腭游离缘、双侧为鼻咽部圆枕,后方为腺样体软组织,均无骨性结构支撑,顺应性高,吸附作用易使狭窄度进一步加重,甚至闭锁。同时腺样体区下游处气流分离,形成较大的涡流,有效气流(往声门方向的气流)较少;随着狭窄度的进一步增加,达 81% 以上时,腺样体区下游处形成一股高速射流,会对气道壁产生较强的冲击性,使周围软组织高频扑动,可能形成鼾声。据此,当鼻咽气道狭窄度达 64% 以上时,鼻咽部气道(腺样体区域)容易塌陷,患儿表现出呼吸不畅、打鼾等症状。

3.2.2 气流压强的分析 腺样体大小对上气道气流压强分布的影响也主要发生在鼻咽部腺样体区。当鼻咽部狭窄度为 55% 以内,气流压强与正常气道无明显差别。当鼻咽部狭窄度达 64% 以上时,腺样体区压降骤增,狭窄度每增加 1%,压降平均增加 0.427 Pa,是狭窄度 55% 以下的 14 倍左右。鼻咽部腺样体区压强骤降,可产生较大的跨壁压,而鼻咽部周围的软组织无骨性支撑,软组织则容易向内塌陷。因此,当鼻咽部狭窄度达 64% 以上时,随着狭窄度的增加,压降越大,气道内低压越明显,气道越容易塌陷。

3.2.3 通气量的分析 在吸气压差为 20 Pa 条件下,当鼻咽部狭窄度达 64% 以上时,通气量开始迅速减少,当狭窄度达 81% 以上时,通气量急剧下降,特别是当狭窄度为 89% 时,相对于狭窄度 81%,通气量大幅降低,呈指数状态变化。通气量减少,引起有效通气不足,一方面会造成患儿低通气、缺氧等一系列临床症状;另一方面,为代偿吸入氧气量的不足,患儿进行强呼吸,使吸气气流流速增快。由伯努利原理可知,通过鼻咽部的气流流速越快,压强越小,鼻咽部越容易塌陷,若鼻咽部软组织塌陷,机体为维持呼吸,口气道必然开放。长期口呼吸可导致腺样体面容等不良后果。曾祥龙等^[12]也认为腺样体肥大到一定程度,狭窄的鼻咽使正常通气困难,患儿用口呼吸。其次,长期的强快呼吸增加了胸膈肌等呼吸辅助肌群和心脏的负担,可导致胸廓发育畸形,出现鸡胸、漏斗胸,甚至引起肺源性心脏病。

综上,腺样体大小对上气道吸气气流的影响主要发生在鼻咽部。当鼻咽部狭窄度在 55% 以内时,各个模型吸气气流流速和压强变化趋势相差较小;当鼻咽部狭窄度达 64% 以上时,腺样体区气流流速

明显上升,压强显著减小,流线不规则,通气量减少;尤其当狭窄度达 89% 时,鼻咽部腺样体区气流流速最大,压强最小,上气道通气量降至正常气道的一半左右。耳鼻咽喉科医生临床经验表明对于腺样体肥大的儿童,当腺样体阻塞后鼻孔 2/3 以内时,儿童基本无明显睡眠呼吸障碍,一般无需手术治疗;阻塞 2/3 以上时,开始出现呼吸暂停及低通气^[7];完全阻塞后鼻孔时,可出现严重的睡觉呼吸暂停及低通气、张口呼吸、夜眠打鼾等症状。以往研究沈翎等^[13]探讨儿童 OSAHS 与腺样体和扁桃体大小的关系时,认为阻塞后鼻孔 51% ~ 75% 的腺样体发生 OSAHS 的危险性较高,阻塞后鼻孔 76% ~ 100% 的腺样体发生 OSAHS 的风险比 51% ~ 75% 高 64 倍。娄凡等^[14]也认为中重度 OSAHS 患儿的最小鼻气流量随腺样体体积的增大而减少。本实验结果与临床研究结果和临床经验基本相符,为帮助临床医生进一步认识腺样体在小儿鼾症中的发病机制及规范腺样体手术适应证提供了理论依据。

参考文献:

[1] Iannella G, Vicini C, Colizza A, et al. Aging effect on sleepiness and apneas severity in patients with obstructive sleep apnea syndrome: a meta-analysis study [J]. Eur Arch Otorhinolaryngol, 2019, 276 (12) :3549 – 3556.

[2] 郑莉,吴云肖,许志飞. 学龄前和学龄期阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征患儿呼吸事件特点及影响因素分析[J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2021, 27 (1) :85 – 89.

[3] 叶京英, 李京京. 浅谈儿童腺样体和扁桃体肥大[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2016, 30 (6) :449 – 451.

[4] Shen L, Lin Z, Lin X, et al. Risk factors associated with obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome in Chinese children: A single center retrospective case-control study [J]. PLoS One, 2018, 13 (9) :e0203695.

[5] Tagaya M, Nakata S, Yasuma F, et al. Relationship between adenoid size and severity of obstructive sleep apnea in preschool children [J]. Int J Pediatr Otorhinolaryngol, 2012, 76 (12) :1827 –

1830.

[6] 蔡谦, 苏振忠, 文卫平, 等. 儿童阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征扁桃体腺样体评价 [J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2006, 13 (7) :437 – 440.

[7] 黎景佳, 陈伟雄, 邓学泉, 等. 日间手术模式下内镜辅助低温等离子腺样体消融术的临床探讨 [J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2021, 27 (5) :513 – 516.

[8] Slaats M, Vos W, Van Holsbeke C, et al. Predicting the effect of treatment in paediatric OSA by clinical examination and functional respiratory imaging [J]. Pediatr Pulmonol, 2017, 52 (6) :799 – 805.

[9] Liu Y, Mitchell J, Chen Y, et al. Study of the upper airway of obstructive sleep apnea patient using fluid structure interaction [J]. Respir Physiol Neurobiol, 2018, 249 :54 – 61.

[10] 郭宇峰, 单雅敏, 蔡惠坤, 等. 计算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.

[11] Oh KM, Kim MA, Youn JK, et al. Three-dimensional evaluation of the relationship between nasopharyngeal airway shape and adenoid size in children [J]. Korean J Orthod, 2013, 43 (4) :160 – 167.

[12] 曾祥龙, 高雪梅. 儿童口呼吸的诊断与处理 [J]. 中华口腔医学杂志, 2020, 55 (1) :3 – 8.

[13] 沈翎, 林宗通, 许杨杨, 等. 儿童 OSAHS 与腺样体和扁桃体大小的关系探讨 [J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2014, 28 (6) :381 – 385.

[14] 娄凡, 马静, 江茹, 等. 阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征儿童的鼻气流变化及影响因素分析 [J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2019, 26 (1) :57 – 59.

(收稿日期:2022 – 06 – 09)

本文引用格式:郭宇峰, 苏丽君, 蔡惠坤, 等. 基于计算流体力学分析腺样体大小对儿童上气道气流的影响 [J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2023, 29 (4) :75 – 80. DOI: 10. 11798/j. issn. 1007 – 1520. 202322256

Cite this article as:GUO Yufeng, SU Lijun, CAI Huikun, et al. Analysis of the effect of adenoid size on upper airway flow in children based on computational fluid dynamics [J]. Chin J Otorhinolaryngol Skull Base Surg, 2023, 29 (4) :75 – 80. DOI: 10. 11798/j. issn. 1007 – 1520. 202322256