

## 经鼻高流量氧疗在患儿麻醉中的应用进展

耿鹤 姚翠翠 吴立新 陈芳

**【摘要】** 经鼻高流量氧疗(HFNC)是一种无创的呼吸支持技术。在国外, HFNC 作为持续气道正压通气系统(CPAP)的替代治疗方法, 最早被应用于重症监护室的患儿中, 以改善患儿肺部功能, 治疗呼吸系统疾病。近年来 HFNC 逐渐被应用于患儿麻醉领域中。HFNC 能够增加呼吸暂停时间, 用于患儿麻醉围插管期, 可以保证患儿的氧合, 提高插管成功率。HFNC 可以持续高流量供氧, 且不占用患儿气道, 在气道操作手术中应用时可以为术者提供充足的操作空间, 同时缓解麻醉科医师在患儿缺氧时的紧张焦虑。HFNC 可以提供持续的气道正压, 应用于患儿麻醉围拔管期, 能够有效地促进肺复张, 预防和治疗拔管后肺部并发症。然而 HFNC 应用时有其自身的局限性, 如何更充分有效地应用 HFNC 仍需大量临床随机对照研究来论证。

**【关键词】** 经鼻高流量氧疗; 正压通气; 氧吸入疗法; 小儿麻醉

**Progress in the application of high flow nasal cannula oxygen therapy in pediatric anesthesia** GENG He, YAO Cuicui, WU Lixin, CHEN Fang. Department of Anesthesiology, Shenzhen Children's Hospital, China Medical University. Shenzhen, 518038, China  
Corresponding author: CHEN Fang, Email: 18938690929@163.com

**【Abstract】** High flow nasal cannula (HFNC) oxygen therapy is a new noninvasive respiratory support technology. In foreign countries, HFNC was first applied to children in intensive care unit to improve their lung function and treat respiratory diseases as an alternative treatment of continuous positive airway pressure ventilation (CPAP). In recent years, HFNC has been gradually applied in the field of anesthesia for children. HFNC can be used during pre-intubation to increase the time of safe asphyxia, in order to ensure the oxygenation and improve the success rate of intubation in children. HFNC supplied continuous high flow oxygen without occupying the airway of children and provided sufficient operation space for the operator. Anesthesiologists could reduce the tension and anxiety during children's hypoxia. HFNC was used during peri-operative to promote lung recruitment, and prevent or treat pulmonary complications after extubation because of providing continuous positive airway pressure. However, the application of HFNC has its own limitations. How to fully and effectively apply HFNC still needs a large number of clinical randomized controlled trials to provide demonstration.

**【Key words】** High flow nasal cannula; Positive pressure ventilation; Oxygen inhalation therapy; Pediatric anesthesia

经鼻高流量氧疗 (high flow nasal cannula, HFNC) 是一种新的无创呼吸支持技术, 最早作为持续气道正压通气 (continuous positive airway pressure, CPAP) 的替代氧疗方法被用于呼吸重症监护室, 适用于早产儿以及患有呼吸窘迫综合征、气管支气管炎及呼吸衰竭等肺部疾病的患儿。HFNC 具有减少生理无效腔、产生呼吸道正压、减少呼吸做功及维持纤毛系统黏液清除功能等特点<sup>[1-3]</sup>。近年来, HFNC 在围术期的应用逐渐增加。在麻醉领域中,

HFNC 的应用可以减少患儿麻醉诱导插管阶段低氧血症的发生率, 降低患儿全麻拔管术后肺部并发症 (postoperative pulmonary complications, PPCs), 保证气道操作手术中患儿的氧合, 缓解麻醉科医师因患儿缺氧产生的紧张焦虑。本文将 HFNC 在患儿麻醉围插管期、气道手术和拔管后的应用和其局限性作一综述。

### HFNC 在患儿围插管期的应用

与成年患者比较, 患儿功能残气量小、自身氧储备低、氧耗量大, 因此在全麻诱导期, 停止辅助通气行气管插管操作时常易发生低氧血症<sup>[4]</sup>。Besnier 等<sup>[5]</sup> 分别用 HFNC 和无创通气对急性呼吸

DOI: 10.12089/jca.2022.07.016

基金项目: 深圳市科创委基础研究项目 (JCY20180228175338115)

作者单位: 518038 中国医科大学深圳儿童医院麻醉科 (耿鹤、陈芳); 深圳市儿童医院麻醉科 (姚翠翠、吴立新)

通信作者: 陈芳, Email: 18938690929@163.com

衰竭患者进行预氧合,虽然无创通气可以提供更高的呼气末正压,但由于 HFNC 不需要移除面罩,更易于操作且安全性好。Humphreys 等<sup>[6]</sup>对 48 例接受全身麻醉的儿童(0~10 岁)均通过球囊、面罩预充给氧后,提下颌开放气道,HFNC 处理组根据儿童年龄予以相应的流量支持,0~15 kg 的患儿,最佳氧流速为  $2 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;15~30 kg 为 35 L/min;30~50 kg 为 40 L/min;>50 kg 为 50 L/min,对照组不做特殊处理。与对照组比较,HFNC 处理组的儿童呼吸暂停时间明显延长,在 2~5 岁和 6~10 岁年龄段中其延长更为明显。2~5 岁儿童中,HFNC 组的呼吸暂停时间为 320 s,对照组为 190.5 s;6~10 岁儿童中,HFNC 组的呼吸暂停时间为 430 s,对照组为 260.8 s。

**困难气道患儿** 对于困难气道的患儿,麻醉科医师常常由于患儿发生缺氧而中断插管操作,而多次反复插管操作易导致口咽部的损伤。延长插管阶段的安全窒息时间可以减少困难气道患儿麻醉诱导插管期低氧血症的发生,提高一次性插管成功率<sup>[7]</sup>。Riva 等<sup>[8]</sup>研究关于早产儿在全麻下行声门狭窄扩张的报道表明,即使 HFNC 吸入氧浓度小于 100%,仍可以明显延长呼吸暂停时间。在 Riva 等的研究中,使用 HFNC 后呼吸暂停时间增加了一倍,这为麻醉科医师进行长时间的困难气道插管操作提供了相对充足的时间。然而 Riva 等<sup>[9]</sup>的另一项研究显示,在 60 例 1~6 岁,体重为 10~20 kg 的全麻患儿中,使用  $2 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  流量的 HFNC 组对比  $0.2 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  的传统鼻导管吸氧组并没有明显延长麻醉插管阶段的呼吸暂停时间,两者呼吸暂停中位时间分别为 6.9 min 和 7.6 min。因此,HFNC 是否可以作为困难气道患儿的首选预充氧方式仍有待大量多中心的随机对照研究来论证。

**复杂先天性心脏病患儿** 对于复杂先天性心脏病患儿,肺循环血量( $Q_p$ )和体循环血量( $Q_s$ )的平衡易受到细微生理变化和治疗操作的影响,并且极易发生快速缺氧和心力衰竭。Lee 等<sup>[10]</sup>研究表明 HFNC 是单功能心室患儿气道管理期间氧气供给的理想选择。研究利用 HFNC 成功完成了一例 5 岁 7 个月患有单功能心室合并困难气道患儿的心导管检查。此例患儿在检查前有多次气管插管失败史,并诊断为困难气道。在检查前室内空气下  $\text{SpO}_2$  范围在 70%~80%,给予 HFNC 治疗 4 min 后  $\text{SpO}_2$  从 76%上升至 98%,之后在静脉麻醉下于 80 s 内成功建立人工气道。

由于气道的解剖和生理特点,患儿气道评估和管理难度较成年患者更大。患儿困难气道多,术前应结合影像学检查结果制定个体化方案和备选方案<sup>[11-12]</sup>。但不论何种方案,插管操作期间的充足氧气供给是至关重要的<sup>[13]</sup>。HFNC 的窒息给氧技术可以延长窒息时间,增加患儿氧合,可为麻醉科医师处理患儿困难气道提供全新思路。

### HFNC 在患儿气道操作手术中的应用

气道操作手术包括诊断性喉镜、球囊扩张、声门上成形术、喉裂修复、注射性喉成形术、乳头状瘤切除和声门下囊肿切除等。气道操作手术中由于缺少气管插管使得术中维持氧合极具挑战性。对于患儿而言,由于患儿年龄小,肺泡发育不完善,氧储备少而氧耗量大,操作过程中极易出现低氧血症,因此在气道操作手术中保持有效氧供至关重要。

Riva 等<sup>[14]</sup>报道了 6 例因上呼吸道狭窄在全麻下行内窥镜治疗的患儿(2 个月~14 岁),在这些使用 HFNC 的患儿中,并未出现喉痉挛、胃胀气等并发症,表明 HFNC 应用在保留自主呼吸气道操作手术中是安全的。Ji 等<sup>[15]</sup>对 45 例年龄在 1 个月至 17 岁行气道手术的患儿进行了回顾性分析,结果表明 HFNC 是一种有效可行的呼吸支持方案,它提供了通畅的手术视野,保证了患儿的氧合。在气道操作手术中,接受 3 级声门下狭窄球囊扩张术和喉裂修复术的患儿最常出现因无法保证充足的氧供而需转行气管插管的情况,然而这些患儿自身存在不同程度的插管困难,反复插管极易加重喉损伤。短时间(<60 min)气道手术应用 HFNC 可能有助于维持患儿术中氧合。Humphreys 等<sup>[16]</sup>研究观察了 HFNC 在 20 例患儿(5 d~11 岁)上气道手术中的应用,其结果表明应用 HFNC 时这些患儿的平均  $\text{SpO}_2$  为 96%,但在该研究中,整体手术时间较短,最长为 61 min,因此对于需要保留自主呼吸的长时间气道手术来说,HFNC 能否达到同样的维持氧合效果尚未可知。

低龄低体重患儿的气道操作风险高,术中气道管理及维持氧供是难点。Caruso 等<sup>[17]</sup>报道了 3 例年龄在 6 周~11 个月,体重最低为 3.95 kg,使用 HFNC 行显微喉镜和支气管镜(microdirect laryngoscopy and bronchoscopy, MDLB)治疗的患儿,在治疗过程中,3 例患儿的氧合、经皮二氧化碳分压均保持平稳,未出现不良反应,表明 HFNC 在低龄低体重患儿的气道操作中可以维持氧合,为此类患儿的气

道管理提供了新的方法。

HFNC 可用于各年龄段的患儿气道操作手术,有助于减少因缺氧而中断手术进行处理的次数,为手术医师提供充足的手术时间,同时可以降低因低氧血症而行气管插管所带来的咽喉部等损伤的发生率。患儿手术以短小手术居多,可以采用保留自主呼吸的非气管插管全身麻醉,以减少气管插管相关并发症的发生<sup>[18]</sup>。HFNC 在患儿气道操作中的成功应用也为患儿其他非插管全麻操作手术(如患儿无痛胃镜检查、患儿烧伤换药等)的气道管理提供了新方案,但目前此方面的前瞻性研究较少,其应用的安全性和有效性还有待进一步探讨。

### HFNC 在患儿拔管后的应用

**气道正压** HFNC 可以通过持续高流量的氧气供给提供持续的气道正压,进而作为 CPAP 的替代氧疗方法,以减少患儿插管及需要使用呼吸机的时间。Jayashankar 等<sup>[19]</sup>比较了经鼻双水平气道正压通气(N/BiPAP)和 HFNC 用于新生儿、婴儿心脏手术拔管后氧疗效果的差异, HFNC 在预防拔管后呼吸衰竭的出现、减少再插管发生率和维持气体交换方面与 N/BiPAP 的疗效相当,并发症较 N/BiPAP 少。该研究中接受 N/BiPAP 治疗的患儿年龄较小[(2.68±2.97)个月]、术后通气时间较长[(106.98±79.02)h],而接受 HFNC 治疗组的患儿年龄稍大[(6.94±4.04)个月]、术后通气时间较短[(62.72±46.14)h]。拔管后两组血中二氧化碳分压值、氧分压值无明显差异,但接受 N/BiPAP 治疗的患儿腹胀发生率较 HFNC 治疗患儿高。Sreenan 等<sup>[20]</sup>表明 HFNC 在早产儿中应用时,设置为:流速(L/min)=0.92+0.68 X(X 为公斤体重,公式的相关系数 r 等于 0.72)时可以与鼻腔持续性气道正压(nasal continuous positive airway pressure, NCPAP)产生同等效用。Milési 等<sup>[21]</sup>在测量 21 例急性病毒性支气管炎患儿的咽部压力时发现,当 HFNC 的氧流量达到 2 L·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>或更高时,患儿的咽部平均压力可达到 4 cmH<sub>2</sub>O 以上。

**呼吸末正压** 除了作为 CPAP 的替代氧疗方法外,一些学者发现当 HFNC 的流速设置达到一定数值后可产生呼吸末正压(positive end expiratory pressure, PEEP)的作用,进而增加呼吸末肺容积,促进患儿肺复张。Luo 等<sup>[22]</sup>评估了 3 种不同的 HFNC 设备,表明 HFNC 产生的 PEEP 与 HFNC 流速设置呈二次曲线关系。Hough 等<sup>[23]</sup>研究表明在患有毛细

支气管炎的患儿(<12 个月)中,当 HFNC 的流速为 8 L/min 可以明显增加肺呼吸末容积、明显降低呼吸频率并使 SpO<sub>2</sub> 升高。

**预防 PPCs** Shioji 等<sup>[24]</sup>对 <4 岁行心脏手术的患儿的研究表明,使用 HFNC 可能与心脏手术后 PPCs 的发生减少有关。王晓宇等<sup>[25]</sup>研究也表明, HFNC 可以降低全麻患儿 PPCs 的发生率,该研究选择实施先天性心脏病矫治术的患儿 248 例(年龄 <1 岁),在这些心脏手术后拔管的患儿中,复杂性先天性心脏病和合并肺动脉高压的患儿其拔管后 HFNC 氧疗的效果更明显。

**治疗呼吸衰竭** Shioji 等<sup>[26]</sup>对 2014—2015 年心脏手术后接受 HFNC 治疗急性呼吸衰竭(acute respiratory failure, ARF)的 35 例患儿及 2009—2012 年心脏手术后接受无创通气(noninvasive ventilation, NIV)治疗 ARF 的 35 例患儿进行了回顾性分析,结果表明,与 NIV 组比较, HFNC 组 28 d 内的再插管率明显降低, ICU 停留时间明显缩短,这表明 HFNC 可能有助于治疗患儿拔管后出现的呼吸衰竭等并发症,同时减轻再次插管对患儿的损伤,缩短住院时间,减轻家庭经济负担。

HFNC 用于拔管后呼吸支持治疗是安全可行的。对于心脏手术后的患儿, HFNC 氧疗可以治疗拔管后呼吸衰竭、预防拔管后肺部并发症的产生。复杂性先天性心脏病或合并肺动脉高压的患儿更易从 HFNC 中受益。但 HFNC 在拔管后的应用中存在很多局限,对于危重症患儿或存在禁忌证的患儿仍应早期行 CPAP 等其他方式的呼吸支持治疗,以免延误治疗时机。

### HFNC 的局限性

**压力不恒定** HFNC 产生的类似 CPAP 及 PEEP 的压力并不恒定,受多种因素的影响。Sivieri 等<sup>[27]</sup>的一系列体外测试研究发现, HFNC 所产生的气道压力与 HFNC 设置的流速、鼻导管与鼻孔的直径比率成正比关系,且受开口和闭口模式影响。当鼻导管与鼻孔的直径比率在 0.9 以下、流速 6 L/min 时,开口模式下 HFNC 产生的气道压力 < 1.7 cmH<sub>2</sub>O,闭口模式下产生的气道压力 < 10 cmH<sub>2</sub>O。Urbano 等<sup>[28]</sup>通过体外试验研究发现闭口模式下, HFNC 在咽部、气道中产生的压力与其流速设置呈线性关系(咽部压力 = -0.375 + 0.138 × 流速,气道压力 = -0.375 + 0.158 × 流速)。Nielsen 等<sup>[29]</sup>研究指出开口模式时 HFNC 产生的 PEEP 较闭口模式时降低

了约 50%。因此 HFNC 并不能完全取代压力恒定可控的 CPAP 或 PEEP 在临床中的应用。

**不良反应** HFNC 作用于气道的压力无法确定和精确调节,使其在患儿中应用会产生一些并发症。HFNC 可能会对患儿造成鼻出血、鼻黏膜损伤和溃疡等损伤<sup>[30]</sup>。Testa 等<sup>[31]</sup>研究中有 2 例心脏术后使用 HFNC 的患儿出现了腹胀,2 例患儿使用 HFNC 的时间分别为 12 h 和 24 h。在 Hegde 等<sup>[32]</sup>的报道中,有 3 例患儿在使用 HFNC 过程中出现气胸和纵隔气肿,其中 2 例出现气胸的患儿(22 个月和 2 个月)HFNC 的流速设置分别为 6 L/min 和 8 L/min,另 1 例出现纵隔气肿的患儿(12 岁)流速设置为 20 L/min。目前尚未见进一步研究论证 HFNC 使用中并发症的发生率与使用时间、流速设置之间的关系。

**相对禁忌证** 麻醉科医师在面对一些特殊患儿时应慎重选择 HFNC。(1) Sivieri 等<sup>[27]</sup>对患儿的观察表明,当鼻导管与鼻孔直径比率大于 0.9 时,即使使用减压阀,HFNC 在流速为 2 L/min 时,可使气道压力快速上升到 16 cmH<sub>2</sub>O;而当流速为 6 L/min 时,气道压力高达 24 cmH<sub>2</sub>O。因此,对于鼻部解剖结构异常(存在鼻中隔偏曲、鼻骨骨折等)、严重鼻阻塞的患儿,由于流经鼻腔的气流量不足以达到预期治疗效果,反而容易导致损伤,HFNC 并不适用。(2)对于有腹腔内疾病、气道保护能力差、存在反流误吸风险的患儿,由于过长时间应用 HFNC 可能会引起腹胀、腹压增加,加重患儿病情,HFNC 应慎用。(3)对于本身已存在气胸或存在气胸潜在风险的患儿,为避免出现严重并发症,HFNC 应慎用。

### 小 结

HFNC 在使用中无法精确调节气道压力,可能造成患儿腹胀、气胸等不良反应,其在麻醉领域中的应用有一定的局限性,但 HFNC 的效果及安全性正在被麻醉科医师逐渐认可。HFNC 的窒息给氧技术可以为麻醉科医师提供充足的插管时间,为困难气道患儿提供新的处理方案。在气道操作手术中, HFNC 作为氧疗方式,可以提供无呼吸氧合,维持机体的氧供。在拔管后 HFNC 可用于预防及治疗患儿肺部并发症。目前 HFNC 在患儿围术期的应用仍未见相关指南可遵循,还需要大量临床随机对照研究提供使用依据。但 HFNC 为困难气道患儿、非插管全麻患儿的气道管理提供了新的思路。

### 参 考 文 献

- [1] Möller W, Feng S, Domanski U, et al. Nasal high flow reduces dead space. *J Appl Physiol* (1985), 2017, 122(1): 191-197.
- [2] Hough JL, Shearman AD, Jardine L, et al. Nasal high flow in preterm infants: a dose-finding study. *Pediatr Pulmonol*, 2020, 55(3): 616-623.
- [3] 李文芝. 加温加湿高流量吸氧在重症儿童气道管理中的应用研究. *中外医疗*, 2019, 38(17): 123-125.
- [4] Jagannathan N, Burjek N. Transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange (THRIVE) in children: a step forward in apnoeic oxygenation, paradigm-shift in ventilation, or both? *Br J Anaesth*, 2017, 118(2): 150-152.
- [5] Besnier E, Guernon K, Bubenheim M, et al. Pre-oxygenation with high-flow nasal cannula oxygen therapy and non-invasive ventilation for intubation in the intensive care unit. *Intensive Care Med*, 2016, 42(8): 1291-1292.
- [6] Humphreys S, Lee-Archer P, Reyne G, et al. Transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange (THRIVE) in children: a randomized controlled trial. *Br J Anaesth*, 2017, 118(2): 232-238.
- [7] Lee JH, Turner DA, Kamat P, et al. The number of tracheal intubation attempts matters! A prospective multi-institutional pediatric observational study. *BMC Pediatr*, 2016, 16: 58.
- [8] Riva T, Seiler S, Stucki F, et al. High-flow nasal cannula therapy and apnea time in laryngeal surgery. *Paediatr Anaesth*, 2016, 26(12): 1206-1208.
- [9] Riva T, Pedersen TH, Seiler S, et al. Transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange for oxygenation of children during apnoea: a prospective randomised controlled trial. *Br J Anaesth*, 2018, 120(3): 592-599.
- [10] Lee BA, Shin WJ, Jeong D, et al. Use of a high-flow nasal cannula in a child with a functional single ventricle and difficult airway. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2021, 35(7): 2128-2131.
- [11] 高铮铮, 张建敏, 滑蕾, 等. 超声在预测患儿困难气管插管中的应用. *临床麻醉学杂志*, 2019, 35(2): 141-143.
- [12] 彭志勇, 陈晨, 许强, 等. 多发性气管狭窄患儿非气道手术麻醉一例. *临床麻醉学杂志*, 2021, 37(9): 1006-1007.
- [13] Fiadjoe JE, Litman RS. Oxygen supplementation during prolonged tracheal intubation should be the standard of care. *Br J Anaesth*, 2016, 117(4): 417-418.
- [14] Riva T, Theiler L, Jaquet Y, et al. Early experience with high-flow nasal oxygen therapy (HFNOT) in pediatric endoscopic airway surgery. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2018, 108: 151-154.
- [15] Ji JY, Kim EH, Lee JH, et al. Pediatric airway surgery under spontaneous respiration using high-flow nasal oxygen. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2020, 134: 110042.
- [16] Humphreys S, Rosen D, Housden T, et al. Nasal high-flow oxygen delivery in children with abnormal airways. *Paediatr Anaesth*, 2017, 27(6): 616-620.
- [17] Caruso TJ, Gupta A, Sidell DR, et al. The successful application

- of high flow nasal oxygen during microdirect laryngoscopy and bronchoscopy in patients under 7 kg. *J Clin Anesth*, 2019, 52: 27-28.
- [18] 孙强, 余伊, 刘莉, 等. 不插管全凭吸入七氟醚麻醉在患儿口腔日间手术的应用. *临床麻醉学杂志*, 2019, 35(8): 773-775.
- [19] Jayashankar JP, Rajan P, Kottayil BP, et al. Comparison of nasal bi-level positive airway pressure versus high-flow nasal cannula as a means of noninvasive respiratory support in pediatric cardiac surgery. *Anesth Essays Res*, 2020, 14(2): 283-287.
- [20] Sreenan C, Lemke RP, Hudson-Mason A, et al. High-flow nasal cannulae in the management of apnea of prematurity: a comparison with conventional nasal continuous positive airway pressure. *Pediatrics*, 2001, 107(5): 1081-1083.
- [21] Milési C, Baleine J, Matecki S, et al. Is treatment with a high flow nasal cannula effective in acute viral bronchiolitis? A physiologic study. *Intensive Care Med*, 2013, 39(6): 1088-1094.
- [22] Luo JC, Lu MS, Zhao ZH, et al. Positive end-expiratory pressure effect of 3 high-flow nasal cannula devices. *Respir Care*, 2017, 62(7): 888-895.
- [23] Hough JL, Pham TM, Schibler A. Physiologic effect of high-flow nasal cannula in infants with bronchiolitis. *Pediatr Crit Care Med*, 2014, 15(5): e214-e219.
- [24] Shioji N, Kanazawa T, Iwasaki T, et al. Incidence of pulmonary complications with the prophylactic use of high-flow nasal cannula after pediatric cardiac surgery: prophylactic HFNC study protocol. *Acta Med Okayama*, 2018, 72(2): 193-196.
- [25] 王晓宇, 李青, 张琦, 等. 婴儿先天性心脏病术后撤机后续贯高流量吸氧的疗效观察. *中国医药指南*, 2020, 18(30): 25-26.
- [26] Shioji N, Kanazawa T, Iwasaki T, et al. High-flow nasal cannula versus noninvasive ventilation for postextubation acute respiratory failure after pediatric cardiac surgery. *Acta Med Okayama*, 2019, 73(1): 15-20.
- [27] Sivieri EM, Gerdes JS, Abbasi S. Effect of HFNC flow rate, cannula size, and nares diameter on generated airway pressures: an in vitro study. *Pediatr Pulmonol*, 2013, 48(5): 506-514.
- [28] Urbano J, del Castillo J, López-Herce J, et al. High-flow oxygen therapy: pressure analysis in a pediatric airway model. *Respir Care*, 2012, 57(5): 721-726.
- [29] Nielsen KR, Ellington LE, Gray AJ, et al. Effect of high-flow nasal cannula on expiratory pressure and ventilation in infant, pediatric, and adult models. *Respir Care*, 2018, 63(2): 147-157.
- [30] ten Brink F, Duke T, Evans J. High-flow nasal prong oxygen therapy or nasopharyngeal continuous positive airway pressure for children with moderate-to-severe respiratory distress? *Pediatr Crit Care Med*, 2013, 14(7): e326-e331.
- [31] Testa G, Iodice F, Ricci Z, et al. Comparative evaluation of high-flow nasal cannula and conventional oxygen therapy in paediatric cardiac surgical patients: a randomized controlled trial. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2014, 19(3): 456-461.
- [32] Hegde S, Prodhon P. Serious air leak syndrome complicating high-flow nasal cannula therapy: a report of 3 cases. *Pediatrics*, 2013, 131(3): e939-e944.

(收稿日期: 2021-09-24)