

烈性呼吸系统传染病引起的 ARDS: 维持人工气道密闭性的临床意义及解决方案

张君怡¹ 李一青² 李宏亮^{3,4} 周建新^{3,4}

¹首都医科大学附属北京天坛医院重症医学科, 北京 100070; ²陕西省西安电力中心医院重症医学科, 西安 710032; ³首都医科大学附属北京世纪坛医院重症医学科, 北京 100038; ⁴首都医科大学附属北京世纪坛医院急危重症医学中心, 北京 100038

通信作者: 李宏亮, Email: arnold_lhl@126.com

【摘要】 自 21 世纪以来, 全球范围内的烈性呼吸系统传染病[诸如重症急性呼吸综合征(SARS)、中东呼吸综合征(MERS)、甲型 H1N1 流感及新型冠状病毒感染]以其超强的致病性和传播力引起了社会各界的广泛关注。近年来多项研究表明, 携带病原体的气溶胶是以上多种烈性呼吸系统传染病的主要传播途径, 可导致感染者出现严重的呼吸衰竭甚至急性呼吸窘迫综合征(ARDS)。机械通气是 ARDS 的主要治疗手段, 以小潮气量和适当水平呼气末正压为主的肺保护性通气可有效降低呼吸机相关性肺损伤(VILI)的发生率。但在临床治疗过程中, 有时需要短暂断开人工气道与呼吸机管路之间的连接, 这不但会引起呼吸系统内存留的气溶胶外溢污染周边环境, 增加包括医务人员在内的院内感染风险, 还会干扰保护性肺通气策略的实施, 加重 VILI。另外, 烈性呼吸系统传染病相关研究均显示, 大量医务人员出现院内感染, 尤其是涉及气管插管、拔管等与气道相关操作的工作人员, 除了需加强自身防护以外, 在气道管理时, 保护医务人员免受气溶胶的污染, 将风险降至最低同样至关重要, 相关人员需予以重视。目前关于气道管路和呼吸机系统暂时性密闭的研究较少, 缺乏明确的指导意见。本文旨在对相关领域的研究现状进行总结, 以期对对应的解决措施及方案提供参考思路。

【关键词】 呼吸系统传染病; 急性呼吸窘迫综合征; 气溶胶; 机械通气; 人工气道

基金项目: 北京市重大疫情防控救治重点专科建设类项目(ZDYQFZZDZK)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20240506-00404

Acute respiratory distress syndrome caused by severe respiratory infectious diseases: clinical significance and solution of maintaining artificial airway closure

Zhang Junyi¹, Li Yiqing², Li Hongliang^{3,4}, Zhou Jianxin^{3,4}

¹Department of Critical Care Medicine, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China;

²Department of Critical Care Medicine, Xi'an Electric Power Central Hospital, Xi'an 710032, Shaanxi, China; ³Department of Intensive Care Unit, Beijing Shijitan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100038, China; ⁴Emergency and Critical Care Medical Center, Beijing Shijitan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100038, China

Corresponding author: Li Hongliang, Email: arnold_lhl@126.com

【Abstract】 Since the beginning of the 21st century, the severe respiratory infectious diseases worldwide [such as severe acute respiratory syndrome (SARS), Middle East respiratory syndrome (MERS), influenza A H1N1 and novel coronavirus infection] have attracted wide attention from all walks of life due to their superior pathogenicity and transmissibility. Aerosols-carrying pathogens are the main transmission route of many severe respiratory infectious diseases, which can lead to severe respiratory failure and even acute respiratory distress syndrome (ARDS) in infected individuals. Mechanical ventilation is the primary treatment for ARDS, and the small tidal volume, appropriate level of positive end-expiratory pressure based lung protective ventilation strategy can effectively reduce the incidence of ventilator-induced lung injury (VILI). However, in the process of clinical treatment, it is sometimes necessary to briefly disconnect the connection between the artificial airway and the ventilator circuit, which will not only cause the residual aerosol in the respiratory system to spill out and pollute the surrounding environment, increase the risk of nosocomial infection including medical staff, but also interfere with the implementation of lung protective ventilation strategy and aggravate ventilator-induced lung injury. In addition, studies have shown that a lot of medical staff have nosocomial infections, especially staff involved in tracheal intubation, extubation and other airway related operations. In addition to enhancing personal protective measures, it is crucial to safeguard healthcare workers from aerosol contamination and minimize associated risks during airway management. At present, there are few researches on the temporary sealing of airway lines and ventilator system, and there is a lack of clear guidance. This review summarizes the research status in related fields to provide a reference for corresponding solutions and programs.

【Key words】 Respiratory infectious disease; Acute respiratory distress syndrome; Aerosol; Mechanical ventilation; Artificial airway

Fund program: Key Specialized Construction Projects for Major Epidemic Prevention and Control in Beijing (ZDYQFZZDZK)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20240506-00404

以气溶胶为主要传播途径的各种烈性呼吸系统传染病往往会引起急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS),并具有极高的病死率^[1-2]。机械通气通过提供一定水平的气道内正压,在吸气相减少呼吸肌肉做功,减轻呼吸负荷;在呼气相维持肺泡开放,避免肺泡塌陷及肺不张的发生,是 ARDS 最重要的治疗手段,且同时实施肺保护性通气策略可以最大限度地避免呼吸机相关性肺损伤(ventilator-induced lung injury, VILI),从而降低 ARDS 患者的病死率^[3]。但在临床治疗过程中,有时需要暂时断开患者人工气道与呼吸机管路之间的连接,例如更换呼吸机管路或呼吸过滤器,或者因外出检查或跨院转运而更换呼吸机,这一操作会使持续进行中的正压机械通气骤然被打断,从而带来两个方面的问题:①患者人工气道与外界空气直接相通,存留在患者气道内携带有病原体的气溶胶在压力梯度差下外溢到周边环境,增加包括医务人员在内的院内感染风险;②患者气道内压力在断开及恢复连接前后的短时间内剧烈波动,会严重干扰肺保护性通气策略的正常实施。

上述问题虽然具有很大的危害性,但由于具有较强的隐匿性,目前鲜少引起提供呼吸治疗的相关医务工作者的重视。现通过梳理近年来国内外发表的文献,对呼吸系统传染病相关 ARDS 的研究现状进行系统性归纳整理,以期提高临床认知水平,为今后设计并验证有效的解决方案提供参考。

1 烈性呼吸系统传染病与 ARDS

进入 21 世纪以来,多种烈性呼吸系统传染病[诸如重症急性呼吸综合征(severe acute respiratory syndrome, SARS)、中东呼吸综合征(Middle East respiratory syndrome, MERS)、甲型 H1N1 流感及新型冠状病毒感染等]以其超强的致病性和传播力肆虐全球^[4-8],给世界经济发展及公共卫生健康带来巨大的冲击。

严重呼吸衰竭乃至 ARDS 是上述各类烈性呼吸系统传染病在大流行期间占用医疗资源及导致患者死亡的主要原因,其典型特征是顽固性低氧血症,而正压机械通气是挽救患者生命最重要的治疗措施^[9]。来自 5 项队列研究的数据汇总显示, SARS 患者的重症监护病房(intensive care unit, ICU)入住率为 20%~38%,其中 59%~100% 需要机械通气支持,病死率为 5%~67%^[10]。纽约单中心的数据显示,约 1/4 的住院患者需要机械通气治疗,病死率高达 60.4%^[11]。意大利的回顾性病例研究显示,88% 的新型冠状病毒感染患者需要行有创机械通气,11% 的患者接受无创通气治疗,ICU 病死率为 26%^[12]。随着各国防疫政策的提出和疫情的控制,目前新型冠状病毒在大多数人群中仅引起轻度的呼吸系统疾

病,不需要住院治疗,但仍有约 5% 的患者会进展为 ARDS^[13]。

2 烈性呼吸系统传染病的气溶胶传播途径

虽然传统观点认为,暴露于感染者咳嗽、打喷嚏时产生的飞沫或接触被飞沫污染的物体表面是呼吸道病原体的主要传播方式,但在新型冠状病毒感染大流行期间观察到的大量超级传播事件以及室内外环境之间的传播差异并不能单靠飞沫和接触传播解释^[14]。越来越多的证据表明,烈性呼吸系统传染病的主要传播媒介是气溶胶而非飞沫,因为其颗粒直径仅为 0.01~100.00 μm ,重量更轻,可在空气中长时间悬浮,并且能够扩散到非常远的距离,其中病毒等病原体主要附着在直径 $<5 \mu\text{m}$ 的气溶胶颗粒上^[14-15]。

加强手卫生和对物体表面进行化学消毒等措施可有效切断接触传播途径,与感染者保持一定的距离也能降低飞沫传播的风险,但气溶胶则难以控制,因为其在空气中的悬浮时间可长达数月甚至数年之久。研究显示,附着在气溶胶颗粒上的冠状病毒可在离体情况下保持活力至少 3 h 以上^[16],这也可以解释为何各种烈性呼吸系统传染病有如此之高的院内感染率,尤其是医务工作者。在 SARS 爆发过程中,院内获得性感染率在加拿大多伦多地区为 77%^[17],在中国香港特别行政区为 28%~54%^[10]; MERS 的院内感染率为 42%,其中 70% 为医务工作者,22% 为住院患者^[18]。只有对烈性呼吸系统传染病的气溶胶传播途径予以高度重视,才能在达成共识的基础上采取更精准的预防策略,降低其爆发与流行的概率,减少对人类生产及生活造成的严重影响。

3 ARDS 患者机械通气过程中气溶胶的环境暴露

如前所述,携带有各种病原体的气溶胶是烈性呼吸系统传染病的主要传播途径,在每次疫情的爆发过程中,均有大量的医疗专业人员(特别是涉及呼吸道管理相关操作的人员)被感染^[19]。现已证实,通过气管导管排放的气溶胶是一种严重的病毒暴露形式^[20]。目前在临床上,已经对呼吸治疗过程中因雾化、氧疗、经鼻高流量氧疗、球囊面罩通气、无创通气、气管内插管/拔管、气管切开、气道内吸引、支气管镜检查、支气管肺泡灌洗、心肺复苏术等会引起额外的气溶胶播散的操作(aerosol generating procedure, AGP)予以高度重视,并提出了一系列预防措施^[21]。

除上述常见的 AGP 外,在接受有创机械通气的患者中,由于更换呼吸机管路或呼吸过滤器以及切换为另一台呼吸机(例如外出检查、跨院转运)的需要,有时不得不暂时断开患者人工气道与呼吸机管路之间的连接。这一操作不可避免地会导致患者呼

吸系统内的气体在压力梯度差下经人工气道呼出到大气中,而存留于其内的携带有各种病原体的气溶胶也会随之外泄并污染周边环境。对于接受高水平正压通气的 ARDS 患者而言,这一现象尤为严重,但鉴于其气溶胶排放方式的隐匿性极强,目前仅引起少数研究者的关注^[22]。

4 ARDS 的肺保护性通气与干扰因素

经人工气道(经口/经鼻气管插管、气管切开)实施的有创正压机械通气是 ARDS 患者最重要的治疗手段^[23]。但不恰当的机械通气模式选择及参数设置也可能导致肺损伤,即 VILI。目前认为 VILI 的发生机制主要包括容积伤、气压伤、萎陷伤和生物伤^[24],而以小潮气量、限制平台压来防止肺泡过度膨胀,设置合适的呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)防止肺泡周期性塌陷-复张为核心的肺保护性通气策略有助于减轻 VILI,防止 ARDS 患者在机械通气过程中的医源性损伤^[25]。

断开呼吸机管路与患者人工气道之间的连接,除了引起气溶胶的环境暴露之外,还会造成患者气道内压力急剧下降,引起或加重肺泡的塌陷、实变,降低呼气末肺容积,从而加重低氧血症^[26]。虽然 Engström 等^[27]在平均耗时 3.5 s 的更换呼吸机过滤器过程中未观察到氧合及呼吸系统顺应性的恶化,但 Neumann 等^[28]进行的动物实验表明,当断开气管导管与呼吸机回路的连接时,气道正压消失后数秒内就会发生肺泡萎陷,氧合水平下降。且 Katira 等^[29]在大鼠模型上也证实了持续通气后气道压力突然下降可引起肺损伤以及急性肺功能衰竭。理论上,即使重新恢复呼吸机管路与人工气道之间的连接,位于非重力依赖区、顺应性较好的肺泡能够较快地重新复张,但位于重力依赖区、顺应性较差的肺泡在相同的气道内压力下仍将保持塌陷、不张的状态,除非呼吸机能够提供更高水平的气道正压,而后者又会造成非重力依赖区肺泡的过度膨胀,增加气胸的风险。除此以外,肺泡反复发生的塌陷-复张也会对气道及肺泡上皮细胞产生剪切性损伤,引起或加重 VILI,同样会对患者预后产生不良影响甚至增加病死率^[30]。因此,在 ARDS 患者的机械通气过程中,应该尽量减少正压通气的中断,即使仅仅是短暂的操作。

5 ARDS 机械通气过程中维持气道密闭性的解决方案

目前虽然对 ARDS 患者在高水平正压机械通气过程中因突然断开呼吸机管路与人工气道连接带来的气溶胶环境暴露及破坏肺保护性通气等危害的认识不足,学术界长期忽视对此细分领域的基础及临床研究,但我们可以从对比开放式与密闭式人工气道内吸引的一系列研究中借鉴相关数据。例如,开

放式人工气道吸引可以导致气道内压力显著下降,对于需要高水平 PEEP 的 ARDS 患者来说,肺容积甚至可减少 58%,进而带来肺顺应性降低、氧合恶化等临床不良后果^[31]。动物实验也证实了突然中断的高水平 PEEP 及随后的复张过程可导致肺水肿的发生并加重 VILI^[32]。相比较而言,目前临床上推荐使用的密闭式人工气道内吸引除了能解决气道分泌物污染环境的问题,也更适用于吸入氧浓度较高、使用高水平 PEEP 以及有肺萎陷风险的患者^[33-34]。

直到新型冠状病毒在全球的爆发及短时间内大量需要机械通气的 ARDS 患者挤兑医疗资源,因气溶胶环境暴露导致包括医务人员在内的大量院内感染以及居高不下的病死率才引起临床上的高度重视。在断开人工气道与呼吸机管路连接前,有医务人员采用传统的血管钳直接钳夹气管导管的方式来密闭气道^[35],但密闭性无法得到保证。Jacob 等^[36]尝试使用 3D 打印技术制作一种塑料材质的气管导管夹,该装置在插管前安装到气管导管上,在断开呼吸机管路前手动夹闭以便减少气溶胶的产生,但在多次使用和消毒后其密闭性会下降。Turbil 等^[37]通过实验室的体外模拟,对不同类型夹闭钳(塑料钳、金属钳、体外膜肺氧合钳)在切换呼吸机期间维持 PEEP、避免肺泡塌陷的性能进行比较,结果证实,只有体外膜肺氧合钳能在短时间内有效夹闭气管导管并维持气管内压力。然而,无论使用哪种材质或类型的管钳进行夹闭,都存在导致管路破损的风险,如果因此而被迫更换导管,会显著增加医务人员的工作负荷以及医疗风险。此外,管钳钳夹的方式也不适用于带有加强丝的气管导管或气管切开的患者。

针对上述问题,我们设计了一种新型人工气道密闭器,旨在解决断开呼吸机管路与人工气道(气管插管、气管切开)连接过程中气溶胶环境暴露、肺容积丢失、恢复连接后加重 VILI 的问题,并获得了国家实用新型专利(专利号:ZL 2019 2 0379605.4)^[38]。由于其不会对人工气道管路造成损伤,也适用于有加强丝的导管及气管切开管,且操作简单,可反复使用,因此具有较高的临床应用价值,目前围绕其有效性及安全性的动物实验研究正在开展中。

6 结论及展望

在各种烈性呼吸系统传染病层出不穷,并导致依赖正压机械通气的 ARDS 患者数量爆发式增长从而严重挤兑医疗资源的背景下,对于提供呼吸功能支持的医疗专业技术人员来说,如何规范、安全、有效地提供呼吸治疗和管理显得尤为重要。我们必须充分认识到,即使短暂断开呼吸机管路与人工气道之间的连接,也会导致携带有各种病原体的气溶胶外溢并污染周边环境,增加包括医务人员在内的院

内感染风险,并且严重干扰肺保护性通气策略的正常实施。全世界范围内,多种能够快速密闭人工气道的技术手段都在积极地探索及开发中,我国也应在相关的基础理论及临床应用领域进行深入研究,以期在未来更好地应对此类公共卫生突发事件。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Meyer NJ, Gattinoni L, Calfee CS. Acute respiratory distress syndrome [J]. *Lancet*, 2021, 398 (10300): 622–637. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)00439-6.
- [2] Reddy MP, Subramaniam A, Chua C, et al. Respiratory system mechanics, gas exchange, and outcomes in mechanically ventilated patients with COVID-19-related acute respiratory distress syndrome: a systematic review and meta-analysis [J]. *Lancet Respir Med*, 2022, 10 (12): 1178–1188. DOI: 10.1016/S2213-2600(22)00393-9.
- [3] Qadir N, Sahetya S, Munshi L, et al. An update on management of adult patients with acute respiratory distress syndrome: an official American Thoracic Society clinical practice guideline [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2024, 209 (1): 24–36. DOI: 10.1164/rccm.202311-2011ST.
- [4] World Health Organization. Summary of probable SARS cases with onset of illness from 1 November 2002 to 31 July 2003 [EB/OL]. [2024-05-06]. <https://www.who.int/publications/m/item/summary-of-probable-sars-cases-with-onset-of-illness-from-1-november-2002-to-31-july-2003>.
- [5] 王春丽, 李子艳, 毛艳艳, 等. 重大传染性疾病的流行病学回顾 [J]. *中国抗生素杂志*, 2021, 46 (6): 493–500. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8689.2021.06.001.
- [6] World Health Organization. The burden of influenza [EB/OL]. [2024-05-06]. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/the-burden-of-influenza>.
- [7] World Health Organization. Middle East respiratory syndrome: global summary and assessment of risk [EB/OL]. [2024-05-06]. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-MERS-RA-2022.1>.
- [8] World Health Organization. Number of COVID-19 cases reported to WHO [EB/OL]. [2024-05-06]. <https://data.who.int/dashboards/covid19/cases?n=c>.
- [9] Zumla A, Hui DS, Perlman S. Middle East respiratory syndrome [J]. *Lancet*, 2015, 386 (9997): 995–1007. DOI: 10.1016/S0140-6736(15)60454-8.
- [10] Manocha S, Walley KR, Russell JA. Severe acute respiratory distress syndrome (SARS): a critical care perspective [J]. *Crit Care Med*, 2003, 31 (11): 2684–2692. DOI: 10.1097/01.CCM.0000091929.51288.5F.
- [11] Petrilli CM, Jones SA, Yang J, et al. Factors associated with hospital admission and critical illness among 5 279 people with coronavirus disease 2019 in New York City: prospective cohort study [J]. *BMJ*, 2020, 369: m1966. DOI: 10.1136/bmj.m1966.
- [12] COVID-19 Lombardy ICU Network. Baseline characteristics and outcomes of 1 591 patients infected with SARS-CoV-2 admitted to ICUs of the Lombardy region, Italy [J]. *JAMA*, 2020, 323 (16): 1574–1581. DOI: 10.1001/jama.2020.5394. Erratum in: *JAMA*, 2021, 325 (20): 2120. DOI: 10.1001/jama.2021.5060.
- [13] Bime C, Casanova NG, Nikolich-Zugich J, et al. Strategies to DAMPen COVID-19-mediated lung and systemic inflammation and vascular injury [J]. *Transl Res*, 2021, 232: 37–48. DOI: 10.1016/j.trsl.2020.12.008.
- [14] Wang CC, Prather KA, Sznitman J, et al. Airborne transmission of respiratory viruses [J]. *Science*, 2021, 373 (6558): eabd9149. DOI: 10.1126/science.abd9149.
- [15] Tellier R. Aerosol transmission of influenza A virus: a review of new studies [J]. *J R Soc Interface*, 2009, 6 Suppl 6 (Suppl 6): S783–S790. DOI: 10.1098/rsif.2009.0302.focus.
- [16] van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1 [J]. *N Engl J Med*, 2020, 382 (16): 1564–1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973.
- [17] Booth CM, Matukas LM, Tomlinson GA, et al. Clinical features and short-term outcomes of 144 patients with SARS in the greater Toronto area [J]. *JAMA*, 2003, 289 (21): 2801–2809. DOI: 10.1001/jama.289.21.JOC30885. Erratum in: *JAMA*, 2003, 290 (3): 334.
- [18] Hunter JC, Nguyen D, Aden B, et al. Transmission of Middle East respiratory syndrome coronavirus infections in healthcare settings, Abu Dhabi [J]. *Emerg Infect Dis*, 2016, 22 (4): 647–656. DOI: 10.3201/eid2204.151615.
- [19] Caputo KM, Byrick R, Chapman MG, et al. Intubation of SARS patients: infection and perspectives of healthcare workers [J]. *Can J Anaesth*, 2006, 53 (2): 122–129. DOI: 10.1007/BF03021815.
- [20] Cook TM, El-Boghdady K, McGuire B, et al. Consensus guidelines for managing the airway in patients with COVID-19: guidelines from the Difficult Airway Society, the Association of Anaesthetists the Intensive Care Society, the Faculty of Intensive Care Medicine and the Royal College of Anaesthetists [J]. *Anaesthesia*, 2020, 75 (6): 785–799. DOI: 10.1111/anae.15054.
- [21] Tran K, Cimon K, Severn M, et al. Aerosol generating procedures and risk of transmission of acute respiratory infections to healthcare workers: a systematic review [J]. *PLoS One*, 2012, 7 (4): e35797. DOI: 10.1371/journal.pone.0035797.
- [22] Heinzerling A, Stuckey MJ, Scheuer T, et al. Transmission of COVID-19 to health care personnel during exposures to a hospitalized patient—Solano County, California, February 2020 [J]. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep*, 2020, 69 (15): 472–476. DOI: 10.15585/mmwr.mm6915e5.
- [23] 陈小淮, 史加海, 徐梦瑶, 等. ICU 医护人员 ARDS 肺保护通气策略依从性的现状调查 [J]. *中国中西医结合急救杂志*, 2023, 30 (3): 267–270. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2023.03.003.
- [24] 贾佳, 李娜, 李国福, 等. 呼吸机相关性肺损伤早期生物伤的发病机制探讨 [J]. *中华危重病急救医学*, 2018, 30 (9): 861–866. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2018.09.008.
- [25] Petrucci N, De Feo C. Lung protective ventilation strategy for the acute respiratory distress syndrome [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2013, 2013 (2): CD003844. DOI: 10.1002/14651858.CD003844.pub4.
- [26] Park HY, Ha SY, Lee SH, et al. Repeated derecruitments accentuate lung injury during mechanical ventilation [J]. *Crit Care Med*, 2013, 41 (12): e423–e430. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3182986268.
- [27] Engström J, Reinius H, Fröjd C, et al. Maintenance of airway pressure during filter exchange due to auto-triggering [J]. *Respir Care*, 2014, 59 (8): 1210–1217. DOI: 10.4187/respcare.02892.
- [28] Neumann P, Berglund JE, Fernández Mondéjar E, et al. Dynamics of lung collapse and recruitment during prolonged breathing in porcine lung injury [J]. *J Appl Physiol* (1985), 1998, 85 (4): 1533–1543. DOI: 10.1152/jappl.1998.85.4.1533.
- [29] Katirä BH, Engelberts D, Otulakowski J, et al. Abrupt deflation after sustained inflation causes lung injury [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 198 (9): 1165–1176. DOI: 10.1164/rccm.201801-0178OC.
- [30] Chu EK, Whitehead T, Slutsky AS. Effects of cyclic opening and closing at low- and high-volume ventilation on bronchoalveolar lavage cytokines [J]. *Crit Care Med*, 2004, 32 (1): 168–174. DOI: 10.1097/01.CCM.0000104203.20830.AE.
- [31] Lindgren S, Odenstedt H, Ölegård C, et al. Regional lung derecruitment after endotracheal suction during volume- or pressure-controlled ventilation: a study using electric impedance tomography [J]. *Intensive Care Med*, 2007, 33 (1): 172–180. DOI: 10.1007/s00134-006-0425-x.
- [32] Katirä BH, Engelberts D, Bouch S, et al. Repeated endo-tracheal tube disconnection generates pulmonary edema in a model of volume overload: an experimental study [J]. *Crit Care*, 2022, 26 (1): 47. DOI: 10.1186/s13054-022-03924-2.
- [33] Maggiore SM, Lellouche F, Pignataro C, et al. Decreasing the adverse effects of endotracheal suctioning during mechanical ventilation by changing practice [J]. *Respir Care*, 2013, 58 (10): 1588–1597. DOI: 10.4187/respcare.02265. Erratum in: *Respir Care*, 2013, 58 (12): e173.
- [34] 许嵩翔, 郁慧杰, 孙辉, 等. 新型防喷溅呼吸回路管对机械通气患者 VAP 及气道多重耐药菌定植的预防作用: 一项 318 例患者前瞻性随机对照干预研究 [J]. *中华危重病急救医学*, 2017, 29 (1): 16–20. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2017.01.004.
- [35] McCormick T. Clamp to prevent collapse [J]. *Anaesthesia*, 2010, 65 (8): 861–862. DOI: 10.1111/j.1365-2044.2010.06436.x.
- [36] Jacob M, Ruivo E, Portela I, et al. An innovative endotracheal tube clamp for use in COVID-19 [J]. *Can J Anaesth*, 2020, 67 (10): 1468–1470. DOI: 10.1007/s12630-020-01703-7.
- [37] Turbil E, Terzi N, Schwebel C, et al. Does endo-tracheal tube clamping prevent air leaks and maintain positive end-expiratory pressure during the switching of a ventilator in a patient in an intensive care unit? A bench study [J]. *PLoS One*, 2020, 15 (3): e0230147. DOI: 10.1371/journal.pone.0230147.
- [38] 张君怡, 李宏亮. 一种用于人工气道与呼吸机管路间的新型人工气道密闭器 [J]. *中华危重病急救医学*, 2023, 35 (9): 991–994. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20230310-00168.

(收稿日期: 2024-05-06)
(责任编辑: 保健媛 李银平)