

呼吸机容量控制通气模式的潮气量准确性评价方法

周娟 严勇 曹德森

【摘要】目的 研究容量控制通气中,如何保证进入患者肺内的有效潮气量接近医生的设置值。**方法** 呼吸机通气模式选择容量控制通气模式。模拟肺选择主动模肺 ASL 5000 或密歇根模拟肺 1601,气阻、气容和肺类型等参数在模拟肺中设置。潮气量数值从呼吸机测试仪 PF 300 上读取。在同一潮气量设置情况下,改变模拟肺类型、管路顺应性、泄漏状态、气体类型等设置,测量 E5、Servo i、Evital 4、Evital XL 呼吸机中的潮气量,对结果进行分析、比较。**结果** 在呼吸机潮气量设置值不变的情况下,不同肺类型、呼吸机泄漏、呼吸机管路顺应性和气体类型的设置都会对实际进入患者体内的潮气量带来很大的影响。患者肺顺应性的降低和阻力的增加将引起较高的气道峰压,从而使得在管路中损失的潮气量增加,进入患者肺内的有效潮气量减少。当回路存在泄漏而呼吸机又不能提供泄漏补偿功能时,进入患者肺内的有效潮气量也会减少。当呼吸机的气体类型设置和患者吸入气体类型不一致时,也可能使进入患者体内的有效潮气量和呼吸机的设置值存在很大差别。**结论** 如希望进入患者肺内的有效潮气量接近医生的设置值,至少应对管路顺应性、泄漏状态、气体类型等可控因素进行精确控制和有效补偿。

【关键词】 机械通气; 容量控制通气; 肺类型; 气体类型; 泄漏; 潮气量

Evaluation of tidal volume delivered by ventilators during volume-controlled ventilation Zhou Juan, Yan Yong, Cao Desen. Medical Support Division, PLA General Hospital, Beijing 100853, China
Corresponding author: Cao Desen, Email: caodesen2012@126.com

【Abstract】Objective To study the ways which ensure the delivery of enough tidal volume to patients under various conditions close to the demand of the physician. **Methods** The volume control ventilation model was chosen, and the simulation lung type was active servo lung ASL 5000 or Michigan lung 1601. The air resistance, air compliance and lung type in simulation lungs were set. The tidal volume was obtained from flow analyzer PF 300. At the same tidal volume, the displaying values of tidal volume of E5, Servo i, Evital 4, and Evital XL ventilators with different lung types of patient, compliance of gas piping, leakage, gas types, etc. were evaluated. **Results** With the same setting tidal volume of a same ventilator, the tidal volume delivered to patients was different with different lung types of patient, compliance of gas piping, leakage, gas types, etc. Reducing compliance and increasing resistance of the patient lungs caused high peak airway pressure, the tidal volume was lost in gas piping, and the tidal volume be delivered to the patient lungs was decreased. If the ventilator did not compensate to leakage, the tidal volume delivered to the patient lungs was decreased. When the setting gas type of ventilator did not coincide with that applying to the patient, the tidal volume be delivered to the patient lungs might be different with the setting tidal volume of ventilator. **Conclusion** To ensure the delivery of enough tidal volume to patients close to the demand of the physician, containable factors such as the compliance of gas piping, leakage, and gas types should be controlled.

【Key words】 Mechanical ventilation; Volume-controlled ventilation; Lung model; Air type; Leakage; Tidal volume

临床危重患者的抢救过程中通常要使用机械通气。理论上,与压力控制通气相比,具有恒定吸气流量的容量控制通气能使气体在阻性相同而容性不同的肺单元中分布更均衡。当对有极小呼吸驱动的患者保持分钟通气量或血气参数的精确控制并达到人机同步时,容量控制通气是个很好的选择^[1-9]。容量

控制通气时,呼吸机送气达预设容量后,依靠肺、胸廓的弹性回缩力被动呼气。容量控制通气能够保证潮气量的恒定,从而保证分钟通气量^[1]。容量控制通气下,潮气量由分钟呼出通气量、通气频率或分钟吸气流量、吸气时间决定^[1]。影响潮气量输送有效性的因素有患者肺类型、管路顺应性、泄漏状态、气体类型等^[10-11]。

本研究的主要目的是在不同影响因素条件下,对 E5、Servo i、Evital 4、Evital XL 呼吸机容量控制通气中潮气量设置的准确性进行测评。

DOI: 10.3760/ema.j.issn.2095-4352.2014.12.006

基金项目:总装备部军事计量科研项目(JDZY20111)

作者单位:100853 北京,解放军总医院医学保障部

通信作者:曹德森, Email: caodesen2012@126.com

1 仪器及方法^[10,12]

1.1 仪器: 模拟肺装置 ASL 5000 由美国 ingMar 医疗公司生产, 版本为 SW 3.2; 密歇根模拟肺 1601 由深圳迈瑞公司生产。测量中, ASL 5000 肺模型选择脉冲式自主吸气形式, 持续时间为 50 ms。呼吸机测试仪 PF 300 由瑞士 Imtmedical 公司生产, 版本为 1.3。评测呼吸机为深圳迈瑞公司生产的 E5、瑞典 Maquet 公司生产的 Servo i、德国 Dräger 公司生产的 Evital 4 和 Evital XL。

1.2 方法: 根据《美国专家临床方案》的设置, 本测试方案中, 术后恢复患者(正常成人)肺的气阻(R)值为 5 cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹、气容(C)值为 50 mL/cmH₂O; 正常小儿肺的 R 值为 50 cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹, C 值为 10 mL/cmH₂O; 急性呼吸窘迫综合征(ARDS)成年患者肺的 R 值为 20 cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹, C 值为 20 mL/cmH₂O; 慢性阻塞性肺疾病(COPD)成年患者肺的 R 值为 20 cmH₂O·L⁻¹·s⁻¹, C 值为 100 mL/cmH₂O。

测量呼吸机潮气量时的仪器连接如图 1 所示。测量中, 呼吸机通气模式选择容量控制通气模式; 模拟肺选择 ASL 5000 或密歇根模拟肺 1601, R、C 值和肺类型等参数在模拟肺中设置。潮气量数值从呼吸机测试仪 PF 300 上读取。

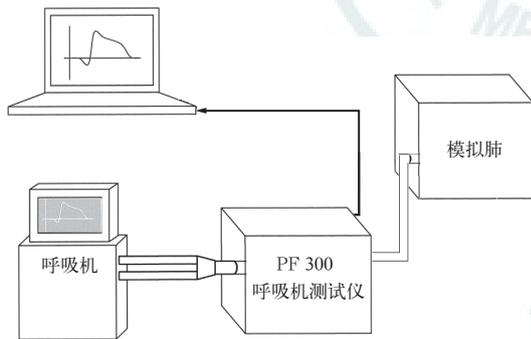


图 1 呼吸机潮气量测量仪器连接图

2 结果

2.1 不同类型肺状况对潮气量测量误差的影响(图 2): 模拟肺选择 ASL 5000 且无泄漏, 通过改变 ASL 5000 的 R 值和 C 值, 模拟正常成人、正常小儿、ARDS 患者、COPD 患者的肺状况, 气体类型为室温下的干燥气体(ATPD), 呼吸机吸气时间为 2 s, 分别将 E5、Servo i 呼吸机的潮气量设置为 200、600、1 000 mL 时, PF 300 所测潮气量误差显示, 不同类型肺对潮气量的影响并不明显。这是因为管路潮气量损失与气道峰压(P_{peak})、呼气末正压(PEEP)、管道顺应性有关。

容量控制通气中, 患者肺类型的改变导致了气道压的改变^[13]。肺顺应性降低和阻力增加将引起较高的 P_{peak}。一般而言, 通过已知的管路顺应性、测量的 P_{peak} 或平台压以及 PEEP, 可以用公式简单估算在管路中损失的潮气量。

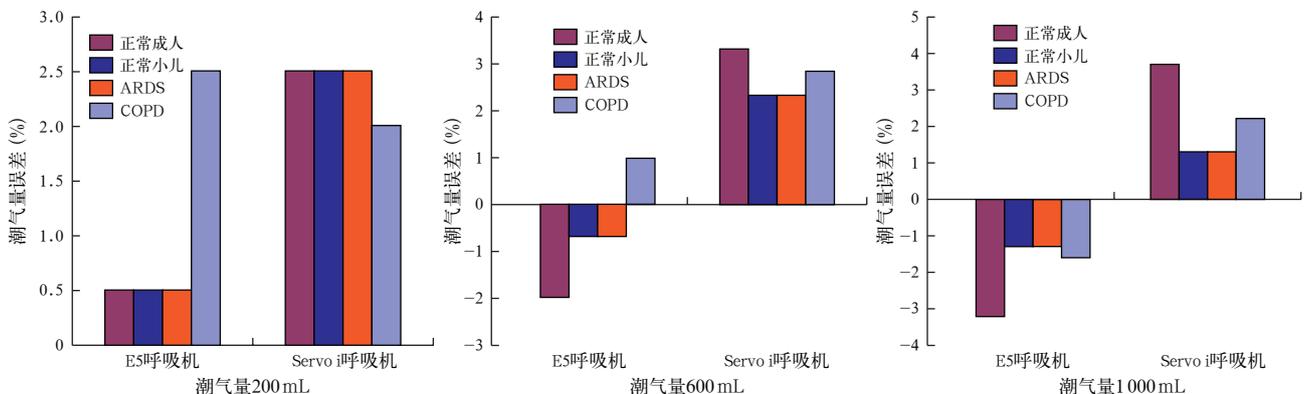
$$V_{T(Tubeloss)} = (P_{peak/plat} - PEEP) \times C_{Tube}$$

式中, V_{T(Tubeloss)} 为管路潮气量损失值, P_{peak/plat} 为气道峰压或平台压, C_{Tube} 为管道顺应性。

应注意流量设置范围不要超出患者需求。假设患者正在进行吸气努力, 若设置超过患者需求时, 吸气会缩短; 流量不足时则会导致呼吸功增加, 并伴随氧消耗增加, 在波形监视器上可看到气道压降到基线以下。当患者吸气努力引起气道压力降到基线以下时, 一些呼吸机会通过软件的流量增加特性, 在设置值以上增加流量来避免此问题^[1]。

2.2 泄漏量对潮气量测量误差的影响: 模拟肺选择 ASL 5000, 采用脉冲式自主吸气形式, 在 10 cmH₂O (1 cmH₂O=0.098 kPa) 压力下, 泄漏量为 8 L/min。泄漏情况下, E5 呼吸机选择无创通气(NIV)测试, Servo i 呼吸机没有 NIV 模式。

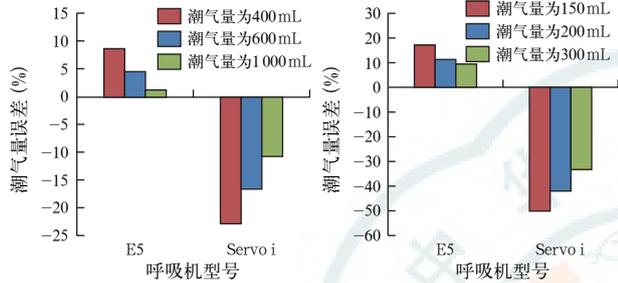
设置 ASL 5000 的 R 值和 C 值, 分别模拟成人肺、



注: ATPD 为室温下的干燥气体, ARDS 为急性呼吸窘迫综合征, COPD 为慢性阻塞性肺疾病

图 2 ASL 5000 模拟肺装置下, 应用 PF 300 呼吸机测试仪测量不同肺状况时呼吸机的潮气量误差 (气体类型为 ATPD)

小儿肺状况, 气体类型为 ATPD, 呼吸机潮气量设置为 400、600、1 000 mL 时, E5、Servo i 呼吸机存在漏气情况下, PF300 所测潮气量误差显示 (图 3): Servo i 呼吸机潮气量明显降低, 潮气量误差为负值; 而 E5 呼吸机潮气量误差为正值。因为 Servo i 呼吸机开机时有自检程序, 可检查出是否漏气。建议所有呼吸机在使用前均应按说明书等进行自检, 以保证潮气量等参数的正确性。



注: ATPD 为室温下的干燥气体
图 3 PF 300 呼吸机测试仪测量 ASL 5000 模拟肺装置模拟成人肺状况 (左) 和小儿肺状况 (右) 时, 存在呼吸机泄漏情况下的潮气量误差 (气体类型为 ATPD)

2.3 不同气体类型对潮气量误差的影响: E5 呼吸机气体类型可选择为 ATPD 或体温下湿润气体 (BTPS); Evital 4、Evital XL 呼吸机气体类型选择只有 BTPS; Servo i 呼吸机气体类型选择只有 ATPD。

2.3.1 选择模拟肺 ASL 5000, 脉冲式自主吸气形式, 无泄漏。在成人肺、小儿肺状况, 气体类型为 ATPD 和 BTPS 时, 测量 E5、Servo i、Evital 4、Evital XL 呼吸机潮气量误差显示 (图 4), 同一台呼吸机, 在其他条件相同的情况下, 仅由于气体类型的不同, 潮气量会发生很大误差。

测量中, 呼吸机气体类型设为 BTPS 时, 加湿器内不放水, 加湿器不接电源。

从呼吸机输出的是 ATPD, 而从患者肺中呼出的是 BTPS, 温度和湿度的变化会影响潮气量的测量结果。两种气体类型之间一般按照公式换算:

$$V_{T(BTPS)} = V_{T(ATPD)} \times \left[\frac{(P_{amb} - P_{H_2O})}{(P_{amb} - 47)} \right] \times \left[\frac{(273 + 37)}{(273 + T)} \right]$$

式中, P_{amb} 为环境大气压, P_{H_2O} 为气体水分压, T 为气体温度。

2.3.2 模拟肺选择密歇根肺, 成人肺状况, 呼吸机潮气量设置为 1 000 mL、1 500 mL 时, E5、Servo i、Evital XL 呼吸机潮气量误差显示 (图 5): 同一台呼吸机, 仅由于气体类型设置不同, 潮气量误差很大。呼吸机潮气量设置为 100 mL, 气体类型不同、模拟肺不同、肺状况不同时, E5 呼吸机潮气量误差显示 (图 6): 在不同模拟肺、肺状况下, 同一台呼吸机由于气体类型不同可引起非常明显的潮气量误差。

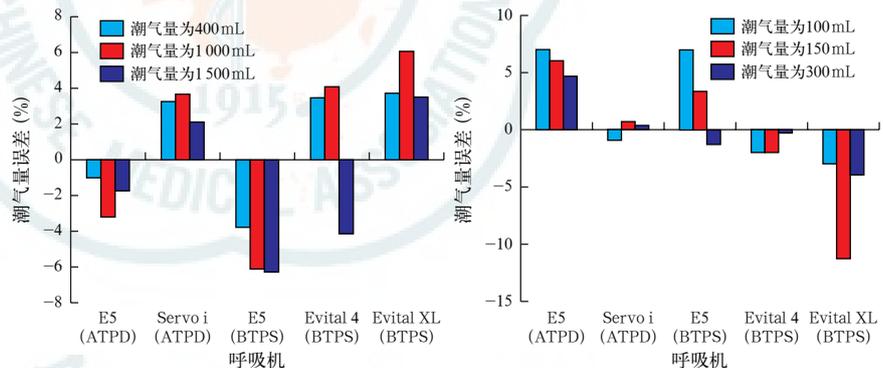
3 结束语

容量控制通气模式下, 潮气量估算公式为^[1]:

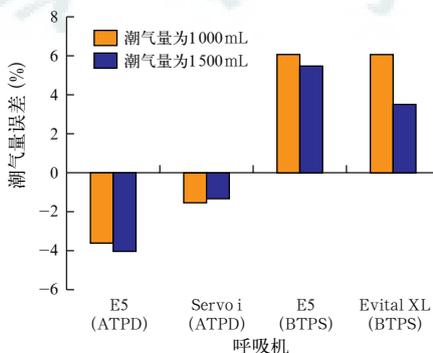
$$V_T = \dot{V}_E \times f = \bar{V}_I \times T_I$$

式中, V_T 为潮气量, \dot{V}_E 为分钟呼出通气量, f 为呼吸频率, \bar{V}_I 为分钟吸气流量, T_I 为吸气时间。

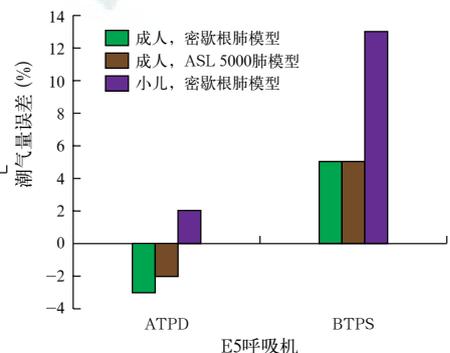
临床上, 一般依据患者体质量选择 5 ~ 12 mL/kg



注: ATPD 为室温下的干燥气体, BTPS 为体温下的湿润气体
图 4 PF 300 呼吸机测试仪测量 ASL 5000 模拟肺装置模拟成人肺状况 (左) 和小儿肺状况 (右) 时, 呼吸机设置不同气体类型情况下的潮气量误差



注: ATPD 为室温下的干燥气体, BTPS 为体温下的湿润气体
图 5 PF 300 呼吸机测试仪测量密歇根肺模拟成人肺状况时, 呼吸机设置不同气体类型情况下的潮气量误差



注: ATPD 为室温下的干燥气体, BTPS 为体温下的湿润气体
图 6 PF 300 呼吸机测试仪测量两种模拟肺装置模拟不同肺状况, E5 呼吸机潮气量设置为 100 mL 时的潮气量误差

的潮气量;呼吸频率的设置成人为 12~20 次/min, 新生儿及儿童为 20~30 次/min;吸气流速设置为 40~60 L/min;吸气时间为 0.8~1.2 s 或吸呼比为 1:1.5~1:2^[14]。医生均可根据患者病情及监测指标的变化对上述指标设置进行调节。为了减少对患者的肺损伤,潮气量和 PEEP 值设置应适当^[15-30]。

有效潮气量是呼吸周期内潮气量和 Bohr 死区之差的平均值。实际输送给患者的潮气量误差一般控制在 ±10%。

从本组测量数据可以看出,各类呼吸机设置的潮气量和患者得到的有效潮气量之间都存在一定偏差,产生偏差的原因有很多,主要就是本文中论证的肺状况、泄漏、气体类型等。患者肺状况的改变将导致 Ppeak 变化^[31-33],肺顺应性降低和阻力增加将引起较高的 Ppeak,从而使得在管路中损失的潮气量增加,进入患者肺内的有效潮气量减少。呼吸机应对此种情况的措施是进行管路顺应性损失的补偿。此外,当回路存在泄漏时,也会对患者获得的有效潮气量造成影响。通常,泄漏量的大小同气道压力成正比,平均气道压越高,泄漏的潮气量也就越大。针对泄漏现象,有些呼吸机具有泄漏补偿功能,可以估算机械通过程中的泄漏量,由呼吸机补足这部分损失,从而使患者获得医生预期的有效潮气量。气体类型对有效潮气量的影响也不可忽略。

综上,若要求进入患者肺里的有效潮气量接近医生的设置值,则呼吸机应对管路顺应性、泄漏状态、气体类型等可控因素进行精细控制和有效补偿。

参考文献

- [1] Robert LC. Fundamentals of Mechanical Ventilation [M]. Cleveland: Mandu Press Ltd, 2003.
- [2] Donn SM, Boon W. Mechanical ventilation of the neonate: should we target volume or pressure? [J]. Respir Care, 2009, 54 (9): 1236-1243.
- [3] Draeger. Neonatologists recommend volume-targeted ventilation for premature babies [EB/OL]. www.draeger.com.
- [4] Mireles-Cabodevila E, Diaz-Guzman E, Heresi GA, et al. Alternative modes of mechanical ventilation: a review for the hospitalist [J]. Cleve Clin J Med, 2009, 76 (7): 417-430.
- [5] Khemani RG, Newth CJ. The design of future pediatric mechanical ventilation trials for acute lung injury [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2010, 182 (12): 1465-1474.
- [6] 刘方,解水本,赖莉芬,等. 心外科术后机械通气治疗效果观察 [J]. 中国医药导报, 2013, 10 (21): 166-168.
- [7] 孔英. 压力调节容量控制通气模式对婴幼儿复杂先天性心脏病术后心肺功能的影响 [J]. 中国实用医药, 2012, 7 (30): 126-127.
- [8] 祖丽皮·亚加帕尔. 压力调节容量控制通气治疗小儿急性呼吸衰竭 34 例的临床观察 [J]. 中国保健营养, 2013, 23 (3): 1150.
- [9] 周咏,贾小军,胡继宽,等. 压力调节容量控制通气治疗外科术后呼吸功能不全对呼吸力学及血液动力学的影响 [J]. 健康大视野, 2013, 21 (13): 668-669.
- [10] Lyazidi A, Thille AW, Carteaux G, et al. Bench test evaluation of volume delivered by modern ICU ventilators during volume-controlled ventilation [J]. Intensive Care Med, 2010, 36 (12): 2074-2080.
- [11] Loring SH, Garcia-Jacques M, Malhotra A. Pulmonary characteristics in COPD and mechanisms of increased work of breathing [J]. J Appl Physiol (1985), 2009, 107 (1): 309-314.
- [12] Terado M, Ichiba S, Nagano O, et al. Evaluation of pressure support ventilation with seven different ventilators using Active Servo Lung 5000 [J]. Acta Med Okayama, 2008, 62 (2): 127-133.
- [13] Jaecklin T, Morel DR, Rimensberger PC. Volume-targeted modes of modern neonatal ventilators: how stable is the delivered tidal volume? [J]. Intensive Care Med, 2007, 33 (2): 326-335.
- [14] 中华人民共和国卫生部. WS 392-2012 呼吸机临床应用 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [15] Halter JM, Steinberg JM, Gatto LA, et al. Effect of positive end-expiratory pressure and tidal volume on lung injury induced by alveolar instability [J]. Crit Care, 2007, 11 (1): R20.
- [16] Suh GY, Kwon OJ, Yoon JW, et al. A practical protocol for titrating "optimal" PEEP in acute lung injury: recruitment maneuver and PEEP decrement [J]. J Korean Med Sci, 2003, 18 (3): 349-354.
- [17] Jill MA, Rhida MB, Dela-Cruz KI, et al. Effects of increasing tidal volume during positive pressure ventilation on lung mechanics and hemodynamics [J]. Acta Med Philipp, 1997, 33 (3): 111-119.
- [18] Esteban A, Anzueto A, Frutos F, et al. Characteristics and outcomes in adult patients receiving mechanical ventilation: a 28-day international study [J]. JAMA, 2002, 287 (3): 345-355.
- [19] Silva DC, Shibata AR, Farias JA, et al. How is mechanical ventilation employed in a pediatric intensive care unit in Brazil? [J]. Clinics (Sao Paulo), 2009, 64 (12): 1161-1166.
- [20] Kallet RH, Campbell AR, Alonso JA, et al. The effects of pressure control versus volume control assisted ventilation on patient work of breathing in acute lung injury and acute respiratory distress syndrome [J]. Respir Care, 2000, 45 (9): 1085-1096.
- [21] Badet M, Bayle F, Richard JC, et al. Comparison of optimal positive end-expiratory pressure and recruitment maneuvers during lung-protective mechanical ventilation in patients with acute lung injury/acute respiratory distress syndrome [J]. Respir Care, 2009, 54 (7): 847-854.
- [22] 林梵,肖军,张琛涛. 不同潮气量机械通气对大鼠肺小窝蛋白-1 及其相关信号链酶表达的影响 [J]. 中国危重病急救医学, 2013, 25 (3): 154-158.
- [23] 宋俊杰,李海波. 小潮气量保护性机械通气的进展 [J]. 中华危重病急救医学, 2013, 25 (10): 633-636.
- [24] 陈德昌. 从“铁肺”到机械通气 [J]. 中国危重病急救医学, 2012, 24 (10): 577-578.
- [25] 马玲,姜利,席修明. 机械通气治疗策略变化的单中心研究 [J]. 中国危重病急救医学, 2011, 23 (9): 524-529.
- [26] 杨国辉,王春艳,宁睿. 高呼气末正压加肺复张治疗急性呼吸窘迫综合征 [J]. 中国危重病急救医学, 2011, 23 (1): 28-31.
- [27] 杨君,刘飞,朱曦. 高呼气末正压通气结合小潮气量对急性肺损伤/急性呼吸窘迫综合征患者预后影响的荟萃分析 [J]. 中国危重病急救医学, 2011, 23 (1): 5-9.
- [28] 王亚妹. 急性呼吸窘迫综合征机械通气策略的新进展 [J]. 中国当代儿科杂志, 2013, 15 (6): 496-500, 封 3.
- [29] 朱蕾. 正确理解和实施危重症患者气道和肺泡的引流 [J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2012, 11 (5): 381-384.
- [30] 于海洋,冷传礼. 高 PEEP 在机械通气的重症哮喘患者中的应用 [J]. 中国医药导刊, 2012 (z1): 69.
- [31] 葛颖,万勇,王大庆,等. 压力和容量控制通气在 ARDS 肺保护通气策略中的比较 [J]. 中国危重病急救医学, 2004, 16 (7): 424-427.
- [32] 郑平,郭宇红,孙先军,等. 呼吸机正压通气致急性肺损伤的实验研究 [J]. 中国危重病急救医学, 2007, 19 (9): 554-555.
- [33] 周明华. 慢性阻塞性肺疾病治疗进展 [J]. 中国中西医结合急救杂志, 2010, 17 (2): 124-125.

(收稿日期: 2014-01-16) (本文编辑: 李银平)