

俯卧位通气对 ARDS 患者呼吸力学和氧合参数及血流动力学指标的影响研究*

徐明华¹ 纪树武² 郑文涛¹ 赵小敏¹ 蒋晓侠²

[摘要] 目的:探讨俯卧位通气对急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)患者呼吸力学、氧合参数及血流动力学指标的影响。方法:选择 2018 年 1 月—2022 年 12 月我院收治的 100 例 ARDS 患者,回顾性收集患者临床资料,按照通气方式将其分为观察组(俯卧位通气, $n=62$)和对照组(仰卧位通气, $n=38$)。对比 2 组治疗前后呼吸力学指标(肺顺应性、气道平均压、气道平台压)、通气前(T0)及通气 12 h(T1)时氧合参数[动脉血氧分压(PaO_2)、动脉氧合指数($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$)]及血流动力学指标[心率(HR)、平均动脉压(MAP)、中心静脉压(CVP)];分析 2 组预后指标[APACHEII 评分、多器官功能障碍综合征(multiple organ dysfunction syndrome, MODS)评分、机械通气时间、ICU 时间及 28 d 病死率]及并发症发生率差异。结果:观察组治疗后气道平均压和平台压较对照组更低,肺顺应性、 PaO_2 及 $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 均较对照组高($P<0.05$);观察组治疗后 HR、MAP 及 CVP 与对照组比较均差异无统计学意义($P>0.05$);观察组 APACHEII 评分、MODS 评分及 28 d 病死率均较对照组低($P<0.05$),机械通气时间及 ICU 时间均较对照组短($P<0.05$);2 组并发症发生率差异无统计学意义($P>0.05$)。结论:ARDS 患者采用俯卧位通气有利于改善呼吸功能,对患者血流动力学影响轻微,具有临床推广价值。

[关键词] 急性呼吸窘迫综合征;俯卧位;机械通气;呼吸力学;血流动力学

DOI:10.13201/j.issn.1009-5918.2023.06.001

[中图分类号] R563.8 [文献标志码] A

Effects of prone position ventilation on respiratory mechanics, oxygenation parameters and hemodynamics in patients with ARDS

XU Minghua¹ JI Shuwu² ZHENG Wentao¹ ZHAO Xiaomin¹ JIANG Xiaoxia²

(¹Department of Intensive Care Unit, Punan Branch of Renji Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai, 200125, China; ²Department of Thoracic Surgery, Punan Branch of Renji Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine)

Corresponding author: JIANG Xiaoxia, E-mail: 8516194@qq.com

Abstract Objective: To investigate the effects of prone position ventilation on respiratory mechanics, oxygenation parameters and hemodynamics in patients with acute respiratory distress syndrome(ARDS). **Methods:** Select 100 patients with ARDS admitted to our hospital from January 2018 to December 2022, and retrospectively collect clinical data. They were divided into the observation group(prone position ventilation, $n=62$) and the control group(supine position ventilation, $n=38$) according to the ventilation method. The respiratory mechanics indexes(pulmonary compliance, mean airway pressure, airway plateau pressure), oxygenation parameters(arterial partial pressure of oxygen[PaO_2], arterial oxygenation index[$\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$]) and hemodynamic indexes(heart rate [HR], mean arterial pressure[MAP], central venous pressure[CVP]) before and after treatment were compared between the two groups; The differences in prognostic indicators(APACHE II score, multiple organ dysfunction syndrome[MODS] score, mechanical ventilation time, ICU time, and 28-day mortality) and complications between the two groups were analyzed. **Results:** After treatment, the average airway pressure and airway plateau pressure in the observation group were lower than those in the control group, and the lung compliance, PaO_2 and $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ were higher than those in the control group($P<0.05$); After treatment, there was no difference in HR, MAP, and CVP between the observation group and the control group($P>0.05$); The APACHE II score, MODS score, and 28-day mortality rate in the observation group were lower than those in the control group($P<$

*基金项目:上海市浦东新区卫生健康委员会临床高原学科(No:PWYgy2021-11)

¹上海交通大学医学院附属仁济医院浦南分院重症监护室(上海,200125)

²上海交通大学医学院附属仁济医院浦南分院胸外科

通信作者:蒋晓侠, E-mail:8516194@qq.com

0.05), and the mechanical ventilation time and ICU time were shorter than those in the control group ($P < 0.05$); There was no significant difference in the incidence of complications between the two groups ($P > 0.05$). **Conclusion:** The use of prone position ventilation in ARDS patients is beneficial for improving respiratory function, with minimal hemodynamic impact, and has clinical promotion value.

Key words acute respiratory distress syndrome; prone position; mechanical ventilation; respiratory mechanics; hemodynamics

急性呼吸窘迫综合征 (acute respiratory distress syndrome, ARDS) 是一种快速进展的非心源性肺水肿, 主要是由于肺本身以及肺外等诸多因素引起的以进行性呼吸困难和顽固性低氧血症为主要特征的一种临床综合征, 患者最初表现为呼吸困难、呼吸急促和低氧血症, 然后迅速演变为呼吸衰竭^[1-2]。普通吸氧难以纠正 ARDS 患者出现的低氧血症症状, 必须依靠机械通气给氧治疗。机械通气时不同摆放体位会影响患者腹腔压力分布及动静脉分流情况从而影响到机械通气的治疗效果, 有研究发现俯卧位更有利于 ARDS 患者氧合功能改善^[3], 但目前对于患者循环功能的影响报道较少, 本研究通过对 ARDS 患者在不同体位下进行机械通气治疗, 观察两种体位对患者的呼吸力学、氧合参数及血流动力学指标的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

将我院 2018 年 1 月—2022 年 12 月收治的 100 例 ARDS 患者列为研究对象。依据机械通气体位进行分组: 62 例观察组 (俯卧位机械通气) 和 38 例对照组 (仰卧位机械通气)。观察组男 36 例 (58.06%), 女 26 例 (41.94%); 年龄 46~73 岁, 平均 (55.12±7.18) 岁; 急性生理学及慢性健康状况评分 (acute physiology and chronic health status scores, APACHE II) 11~26 分, 平均 (17.61±3.54) 分。对照组男 21 例 (55.26%), 女 17 例 (44.74%); 年龄 44~75 岁, 平均 (57.08±6.64) 岁; APACHE II 评分 11~27 分, 平均 (16.33±3.77) 分。2 组的一般资料 (年龄、APACHE II 评分等) 经统计学检验差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 组间具有可比性。

1.2 纳排标准

纳入标准: ①出现呼吸困难、咳嗽等呼吸道症状, 被我院诊断为 ARDS; ②耐受机械通气治疗; ③对研究知情同意, 配合提供临床资料。排除标准: ①合并颅内高压; ②合并脊柱疾病; ③合并急性出血。

1.3 治疗方法

2 组均在我院接受基础治疗 (常规抗感染、补液等营养支持治疗)。在此基础上, 对照组采用仰卧位机械通气, 仪器采用德尔格呼吸机, 设置参数: 潮气量、吸氧浓度、呼气末正压及通气模式分别为 6 mL/kg、60%~100%、10~14 cmH₂O (1 cmH₂O = 0.098 kPa)、容量控制通气。将床头抬高 30~

45°, 通气体位采取仰卧位, 持续机械性通气。观察组采用俯卧位机械通气, 仪器及通气相关参数均与对照组同, 另准备辅助支撑用品, 将软垫分别置于患者双肩、额部、下腹部、膝部, 将患者头部偏向一侧, 同时使用减压枕支撑面部, 持续机械性通气。

1.4 观察指标

呼吸力学: 于通气前 (T₀) 及通气 12 h 时 (T₁) 测定 2 组肺顺应性、气道平均压和气道平台压。氧合参数: 于通气前 (T₀) 及通气 12 h 时 (T₁) 使用血气分析仪测定 2 组动脉血氧分压 (PaO₂)、动脉血二氧化碳分压 (PaCO₂), 计算动脉氧合指数 (PaO₂/FiO₂)。血流动力学: 于通气前 (T₀) 及通气 12 h 时 (T₁) 使用血流动力学监测仪测定 2 组的心率 (HR)、平均动脉压 (MAP)、中心静脉压 (CVP)。预后: 于治疗 3 d 后评估 2 组 APACHE II 评分及多器官功能障碍综合征 (multiple organ dysfunction syndrome, MODS) 评分, 并统计 2 组机械通气时间、ICU 时间及 28 d 病死率。观察并发症发生率。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 22.0 分析数据, 计数资料以百分比 (%) 描述, 使用 χ^2 检验分析组间差异; 计量资料以 $\bar{X} \pm S$ 描述, 使用 t 检验分析组间差异。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 呼吸力学

治疗前, 2 组肺顺应性、气道平均压和气道平台压均差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 治疗后, 2 组肺顺应性较治疗前增高, 气道平均压和气道平台压均较治疗前降低 ($P < 0.05$), 且观察组治疗后肺顺应性较对照组更高, 气道平均压和气道平台压较对照组更低 ($P < 0.05$)。见表 1。

2.2 氧合参数

治疗前, 2 组 PaO₂、PaO₂/FiO₂ 均差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 治疗后, 2 组 PaO₂ 及 PaO₂/FiO₂ 均较治疗前增加 ($P < 0.05$), 且观察组治疗后 PaO₂、PaO₂/FiO₂ 较对照组更高 ($P < 0.05$)。见表 2。

2.3 血流动力学

治疗前, 2 组 HR、MAP 及 CVP 均差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 治疗后, 2 组 HR、MAP 及 CVP 与治疗前比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 且观察组治疗后 HR、MAP 及 CVP 与对照组比较亦差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 3。

2.4 预后

观察组 APACHE II 评分及 MODS 评分均较对照组低 ($P < 0.05$), 机械通气时间及 ICU 时间均较对照组短 ($P < 0.05$), 28 d 病死率较对照组低 ($P < 0.05$)。见表 4。

2.5 并发症发生率

观察组心律失常、气道阻塞等并发症总发生率与对照组比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 5。

表 1 2 组呼吸力学指标比较

$\bar{X} \pm S$

组别	肺顺应性/(L/cmH ₂ O)		气道平均压/cmH ₂ O		气道平台压/cmH ₂ O	
	T0	T1	T0	T1	T0	T1
观察组 (n=62)	28.53±4.36	42.46±5.28 ¹⁾	19.91±1.81	15.06±1.36 ¹⁾	20.35±1.73	14.66±2.72 ¹⁾
对照组 (n=38)	28.87±3.41	34.38±6.25 ¹⁾	20.27±1.69	17.44±1.35 ¹⁾	20.72±2.56	16.38±2.84 ¹⁾
t	0.410	6.922	0.990	8.518	0.862	3.018
P	0.683	<0.001	0.325	<0.001	0.391	0.003

与同组 T0 比较, ¹⁾ $P < 0.05$ 。

表 2 2 组氧合参数比较

$\bar{X} \pm S$

组别	PaO ₂ /mmHg ^{a)}		PaO ₂ /FiO ₂ /mmHg	
	T0	T1	T0	T1
观察组 (n=62)	55.68±8.18	87.43±9.07 ¹⁾	143.98±13.41	218.44±18.03 ¹⁾
对照组 (n=38)	57.22±9.26	80.52±8.96 ¹⁾	145.25±13.65	202.67±11.78 ¹⁾
t	0.869	3.715	0.457	4.796
P	0.387	<0.001	0.649	<0.001

注: ^{a)} 1 mmHg=0.133 kPa; 与同组 T0 比较, ¹⁾ $P < 0.05$ 。

表 3 2 组血流动力学指标比较

$\bar{X} \pm S$

组别	HR/(次/min)		MAP/mmHg		CVP/cmH ₂ O	
	T0	T1	T0	T1	T0	T1
观察组 (n=62)	86.67±11.21	85.33±9.75	88.57±6.87	89.09±5.99	7.29±2.13	6.88±2.35
对照组 (n=38)	87.53±10.34	84.88±10.05	87.38±6.34	90.91±7.46	7.43±2.07	6.64±3.54
t	0.383	0.221	0.865	1.342	0.322	0.408
P	0.702	0.825	0.389	0.183	0.748	0.684

表 4 2 组预后比较

$\bar{X} \pm S$

组别	APACHE II 评分/分	MODS 评分/分	机械通气时间/d	ICU 时间/d	28 d 病死率/%
观察组 (n=62)	11.37±2.64	5.75±1.33	6.41±3.73	8.34±2.26	6.45(4/62)
对照组 (n=38)	15.81±3.52	6.82±1.26	12.90±4.28	11.52±3.24	21.05(8/38)
t/ χ^2	7.177	3.983	7.982	5.775	4.065
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.029

表 5 2 组并发症发生率比较

例(%)

组别	心律失常	气道阻塞	气压伤	导管脱落	总发生率
观察组 (n=62)	1(1.61)	1(1.61)	2(3.23)	3(4.84)	7(11.29)
对照组 (n=38)	0(0)	2(5.26)	2(5.26)	1(2.63)	5(13.16)
χ^2					0.001
P					0.970

3 讨论

机体受到损伤后, 炎症介质释放, 炎症细胞损伤血管内皮和肺泡上皮, 导致肺水肿并发透明膜形成、肺顺应性下降和气体交换减少, 而 ARDS 即为

炎症细胞在肺泡和肺微循环中积聚时发生^[4-5]。严重感染、严重创伤、休克、大手术、心肺复苏后等均可能引起急性肺损伤, 从而诱发 ARDS^[6]。一项统计学研究报道, 在 459 个重症监护病房的样本中,

轻度 ARDS 患者的住院病死率为 34.9%，中度 ARDS 患者住院病死率为 40.3%，而重度 ARDS 患者住院病死率为 46.1%^[7]；除病死率外，ARDS 幸存患者的健康相关生活质量大幅下降以及不同程度的身心功能障碍均会给患者带来不良影响。有研究表明，即使 ARDS 幸存患者可能会恢复正常或接近正常的肺生理，但这部分患者仍会表现出持续性肌无力，且多发性神经病、气管狭窄、抑郁焦虑和创伤后应激障碍发生率更高，执行功能、记忆力和注意力亦存在显著认知障碍^[8]。

机械通气为重症呼吸衰竭患者临床支持治疗的手段之一，其通过机械装置代替、控制或辅助患者自主呼吸运动来保持呼吸道通畅，帮助患者平稳度过治疗期。俯卧位机械通气于 1970 年首次报道提出，已被作为在急性呼吸衰竭中增强氧合作用和肺复张的一种治疗策略^[9]。Guérin 等^[10] 研究指出，俯卧位机械通气治疗 ARDS 的机制包括改善通气-灌注、增加呼气末肺容积、通过肺复张和胸壁力学改变潮气量分布以预防呼吸机引起的肺损伤。早期研究证实了俯卧位机械通气可改善 ARDS 患者的氧合功能^[11]。也有相关研究表明，俯卧位机械通气可使动脉氧分压与吸入氧分率 ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$) 的平均比率增加 35 mmHg，并降低中度至重度 ARDS 患者的病死率^[12]。本次研究发现，治疗后观察组肺顺应性较对照组更高，气道平均压和气道平台压较对照组更低，另外，观察组治疗后 PaO_2 、 $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 相比对照组更高，提示俯卧位通气可显著改善 ARDS 患者的肺部功能。分析其原因：当 ARDS 患者机体处于仰卧位时，受到重力影响，腹侧肺、心脏和腹部内脏的重量会增加背侧胸膜压力，进而降低背侧肺部区域的跨肺压，导致背侧轴的通气严重不均。另外，肺部水肿也会进一步增加腹侧-背侧胸膜压力梯度，减少背侧区域的局部通气量。将患者置于俯卧位可通过重力效应降低从非依赖区域到依赖区域的胸膜压力梯度，肺拉伸相应减少，使 ARDS 患者通气更为均匀。邱合信等^[13] 指出，与仰卧位相比，俯卧位的胸腔压力重力梯度、区域呼气末和吸气末肺容量、区域通气量和通气-灌注比都更加均匀。目前对于俯卧位对血流动力学的影响尚存争议，有研究发现俯卧位机械通气对 ARDS 患者的氧合能力具有改善效应，但对血流动力学的影响有限^[14]；一项临床研究表明，ARDS 患者的心排量在处于仰卧位、俯卧位时无明显变化，据此指出 ARDS 患者俯卧位后氧合改善是由分流分数减少而非血流动力学变化驱动^[15]。也有研究指出，俯卧位有可能通过降低低氧血症的平台压改善右心室功能和血流动力学^[16]。本研究探索不同体位机械通气对患者血气指标的影响，发现治疗前后，2 组 HR、MAP 及

CVP 均未有显著变化，且观察组与对照组 T0、T1 时的 HR、MAP 及 CVP 均差异无统计学意义，提示两种通气方式对 ARDS 患者的血流动力学无明显影响。考虑原因为：仰卧位和俯卧位时，正常肺和受伤肺的肺血流都指向背侧，因此仰卧位对肺血流的区域分布并无重大影响。不同于体位对背侧肺部通气的影响，肺部区域灌注分布在很大程度上取决于非重力因素（肺/心脏几何结构、血管空间压缩、腹侧区域缺氧性血管收缩减少等）^[17]。比较 2 组预后指标，发现观察组 APACHE II 评分及 MODS 评分更低，机械通气时间及 ICU 时间更短，28 d 病死率更低，提示俯卧位通气有利于 ARDS 患者预后。研究还发现 2 组术后并发症发生率差异无统计学意义，提示两种通气方式的安全性相当，但也可能与样本量不足导致发生率这一计数资料未能得出统计学差异有关。本研究属回顾性研究，虽易为采用，但不可避免存在回忆偏移等情况，后期可在现有基础上开展前瞻性随机对照试验，并收集更多指标信息，探索两种通气方式对 ARDS 患者治疗效果的影响机制。

4 结论

俯卧位通气能显著提升 ARDS 患者呼吸功能，并能改善患者预后情况，但对患者血流动力学指标无明显影响。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 唐敏,李娜.急性呼吸窘迫综合征发病机制及相关生物标志物的研究进展[J].中国现代医学杂志,2022,32(5):1-6.
- [2] 袁雪燕,邱海波,刘玲.急性呼吸窘迫综合征患者气体交换功能的评估及临床意义[J].中华医学杂志,2022,102(36):2834-2838.
- [3] 吕菊梅,黄永芳,黄艳,等.俯卧位联合反 Trendelenburg 位对改善 ARDS 患者氧合功能作用的研究[J].中华现代护理杂志,2019,25(11):1413-1416.
- [4] Banavasi H,Nguyen P,Osman H,et al. Management of ARDS-What works and what does not[J]. Am J Med Sci,2021,362(1):13-23.
- [5] Yıldırım F,Karaman İ,Kaya A. Current situation in ARDS in the light of recent studies:classification, epidemiology and pharmacotherapeutics [J]. Tuberk Toraks,2021,69(4):535-546.
- [6] Chinh LQ,Manabe T,Son DN,et al. Clinical epidemiology and mortality on patients with acute respiratory distress syndrome(ARDS)in Vietnam[J]. PLoS One,2019,14(8):e0221114.
- [7] Bein T,Weber-Carstens S,Apfelbacher C. Long-term outcome after the acute respiratory distress syndrome: different from general critical illness? [J]. Curr Opin Crit Care,2018,24(1):35-40.

- [8] R K, Tandup C, Reddy D, et al. Prospective validation and comparison of laboratory risk indicator for necrotizing fasciitis (LRINEC) and site other than lower limb, immunosuppression, age, renal impairment, and inflammatory markers (SIARI) scoring systems for necrotizing fasciitis[J]. J Surg Res, 2023, 283: 719-725.
- [9] Harasawa T, Kawai-Kowase K, Tamura J, et al. Accuracy and quick predictor of necrotizing soft tissue infection: usefulness of the LRINEC score and NSTI assessment score[J]. J Infect Chemother, 2020, 26(4): 331-334.
- [10] Preseau T, Devriendt J, Duttman R, et al. *Clostridium perfringens* in gas gangrene: still a smoked Gun! [J]. J Transl Int Med, 2020, 8(1): 54-56.
- [11] 孙旭, 米萌, 朱仕文, 等. 开放骨折并发气性坏疽的诊治[J]. 骨科临床与研究杂志, 2018, 3(4): 230-234.
- [12] Srivastava I, Aldape MJ, Bryant AE, et al. Spontaneous *C. septicum* gas gangrene: a literature review[J]. Anaerobe, 2017, 48: 165-171.
- [13] Abu El Hawa AA, Dekker PK, Mishu MD, et al. Early diagnosis and surgical management of necrotizing fasciitis of the lower extremities: risk factors for mortality and amputation[J]. Adv Wound Care (New Rochelle), 2022, 11(5): 217-225.
- [14] 肖光夏. 气性坏疽[M]//吴在德, 吴肇汉. 外科学. 7版. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 162-163.
- [15] Cheung JK, Adams V, D'Souza D, et al. The EngCP endo α -N-acetylgalactosaminidase is a virulence factor involved in *Clostridium perfringens* gas gangrene infections[J]. Int J Med Microbiol, 2020, 310(2): 151398.
- [16] Liu S, Yang XF, Zhang H, et al. Amentoflavone attenuates *Clostridium perfringens* gas gangrene by targeting alpha-toxin and perfringolysin O[J]. Front Pharmacol, 2020, 11: 179.
- [17] Kanaujia R, Dahiya D, Banda AR, et al. Non-traumatic gas gangrene due to *Clostridium sporogenes* [J]. Lancet Infect Dis, 2020, 20(6): 754.
- [18] Stevens DL, Bisno AL, Chambers HF, et al. Practice guidelines for the diagnosis and management of skin and soft tissue infections: 2014 update by the Infectious Diseases Society of America[J]. Clin Infect Dis, 2014, 59(2): e10-e52.

(收稿日期: 2023-03-06)

(上接第 280 页)

- [8] Huppert LA, Matthay MA, Ware LB. Pathogenesis of acute respiratory distress syndrome[J]. Semin Respir Crit Care Med, 2019, 40(1): 31-39.
- [9] 杨唯奕, 石梦竹, 刘海林, 等. 机械通气中驱动压与肺保护通气策略的关系研究进展[J]. 山东医药, 2023, 63(5): 96-99.
- [10] Guérin C, Albert RK, Beitler J, et al. Prone position in ARDS patients: why, when, how and for whom[J]. Intensive Care Med, 2020, 46(12): 2385-2396.
- [11] 雷光锋, 张雪晴, 张素霞. ALI/ARDS 患者俯卧位与仰卧位通气的 Meta 分析[J]. 护理学杂志, 2016, 31(22): 87-92.
- [12] Fazzini B, Page A, Pearse R, et al. Prone positioning for non-intubated spontaneously breathing patients with acute hypoxaemic respiratory failure: a systematic review and meta-analysis[J]. Br J Anaesth, 2022, 128(2): 352-362.
- [13] 邱合信, 邢疆波, 李东风, 等. 不同体位机械通气对 ARDS 患者呼吸参数指标、血液流变学和胸部 CT 影像学的影响[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2018, 16(8): 61-63, 89.
- [14] 刘莹, 袁伟峰. 俯卧位通气对急性呼吸窘迫综合征患者氧合能力及血流动力学的影响[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2017, 9(8): 114-117.
- [15] Baka M, Bagka D, Tsolaki V, et al. Hemodynamic and respiratory changes following prone position in acute respiratory distress syndrome patients: a clinical study[J]. J Clin Med, 2023, 12(3): 760.
- [16] Jozwiak M, Teboul JL, Anguel N, et al. Beneficial hemodynamic effects of prone positioning in patients with acute respiratory distress syndrome[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2013, 188(12): 1428-1433.
- [17] Prisk GK, Yamada K, Henderson AC, et al. Pulmonary perfusion in the prone and supine postures in the normal human lung[J]. J Appl Physiol, 2007, 103(3): 883-894.

(收稿日期: 2023-04-17)