

俯卧位手术肺保护性通气策略应用

麦尔哈巴·艾尔肯¹, 王纯洁¹, 张毅^{2*}

¹新疆医科大学第四临床医学院, 新疆 乌鲁木齐

²新疆医科大学附属中医院麻醉科, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2023年10月21日; 录用日期: 2023年11月14日; 发布日期: 2023年11月21日

摘要

机械通气是临床上全身麻醉和危重患者保持气道通畅, 改善通气和氧合的重要手段, 但也可能由于呼吸参数使用不当导致呼吸机相关性肺损伤(ventilator-induced lung injury, VILI)。俯卧位手术机械通气时, 为维持通气, 气道压力有不同程度的升高, 引起肺损伤的可能性随之增加。目前VILI的防治重点仍以肺保护性通气策略为主。现就全身麻醉下俯卧位手术对患者循环呼吸系统的影响以及相关肺保护性通气策略的应用研究进展作一综述。

关键词

保护性肺通气, 俯卧位, 潮气量, 呼气末正压通气, 肺复张

Application of Lung Protective Ventilation Strategy in Prone Position Surgery

Maierhaba·Aierken¹, Chunjie Wang¹, Yi Zhang^{2*}

¹Fourth Clinical Medical School of Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

²Department of Anesthesiology, Affiliated Hospital of Traditional Chinese Medicine of Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

Received: Oct. 21st, 2023; accepted: Nov. 14th, 2023; published: Nov. 21st, 2023

Abstract

Mechanical ventilation is an important means to keep airway unobstructed and improve ventilation and oxygenation in clinical general anesthesia and critical patients. However, improper use of respiratory parameters may also lead to ventilator-induced lung injury (VILI). During mechanical

*通讯作者。

ventilation in prone position surgery, in order to maintain ventilation, the airway pressure increases in varying degrees, which increases the possibility of lung injury. At present, the prevention and treatment of VILI is still focused on lung protective ventilation strategy. This article reviews the effects of prone hand on patients' circulatory and respiratory systems under general anesthesia and the application of relevant lung protective ventilation strategies.

Keywords

Protective Lung Ventilation, Prone Position, Tidal Volume, Positive End-Expiratory Pressure, Recruitment Maneuver

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

俯卧位是胸腰椎后入路, 部分泌尿外科和神经外科手术常采用的体位。俯卧位具有手术视野暴露充分、手术切口不偏离中线、便于手术医生操作, 但此体位属于非生理体位, 胸腹活动受限, 脊柱压迫等对呼吸力学和血流动力学有显著的影响[1]。85%~90%的患者在全身麻醉诱导后, 大约 20%~25%的基底区域肺组织萎陷[2], 麻醉诱导造成的肺不张使肺均一性下降, 小气道随着呼吸反复塌陷及开放, 产生的应力直接导致肺组织受损。机械通气所致肺损伤(VILI)越来越受到重视, 如何预防或有效减轻 VILI 的发生是临床麻醉工作中的重点。近年来为了减少肺组织损伤, 改善机体氧合功能以及减少肺部并发症, 临床上提出了肺保护性通气策略(lung protective ventilation strategy, LPVS)。本文将俯卧位对患者病理生理的改变以及手术患者实施肺保护性通气策略利弊进行综述, 为该策略更加合理、安全地应用于临床提供参考, 同时也为临床麻醉医师提供新的研究思路。

2. 全麻下俯卧位对患者生理的影响

2.1. 呼吸系统的影响

俯卧位时由于胸腹受压、腹腔内容物向头侧移动, 使膈肌位置改变, 胸廓扩张受限。对于肺部无基础病变的患者来说, 由仰卧位变为俯卧位时肺的顺应性会下降, 气道峰值压力以及功能残气量(FRC)相对增加[3]; 近期一项随机对照试验的 Meta 分析表明, 机体在俯卧位时胸壁顺应性的降低, 虽然对肺部的舒张功能产生不利影响, 但却能够使参与通气的肺泡数量增加并均匀分布, 从而使 V/Q 比值增加, 改善氧合[4]。Gordon, A 等认为[5]俯卧位时肺背段的血流优先灌注, 并使通气增加、分流减少以及通气分布更均匀, 从而促进气体交换。俯卧位姿势有利于痰液等分泌物由肺部背侧细小的支气管向腹侧的主支气管、气管的引流, 并且因为俯卧位克服了重力的影响, 促进痰液等分泌物的引流排出[6]。

2.2. 循环系统的影响

俯卧位时下腔静脉的位置改变, 下肢低垂, 由此所致的血液引力作用可使体内静脉系血液重新分布, 减少了回心血量。当患者取俯卧位时, 支撑物会不同程度的压迫胸腔和腹腔, 间接或直接压迫心脏, 胸腔压力增加, 左心室顺应性下降, 这些原因最终可导致每搏量、心输出量减少及心指数显著降低[7]。俯卧位改善氧合, 在一定程度上缓解了低氧对肺血管的收缩作用, 同时减轻了肺过度充气, 减少了扩张的

肺泡对毛细血管网的压力,二者使肺泡血管阻力降低,从而降低肺动脉压力,减轻右心室后负荷,改善右室收缩功能[8]。俯卧位时,腹部受压,腹腔内容物压迫下腔静脉,静脉回流受阻使血液通过替代途径(通常是 Batson 的脊柱静脉丛)返回心脏,这些薄壁静脉丛容量小,很容易导致静脉瘀滞及扩张[3]在脊柱手术期间椎静脉出血在增加,遮挡手术视野并延长手术时间。脊柱手术俯卧位起腰桥后,手术部位较心脏的位置相对较高,因此负压明显增加,空气可以通过破裂的静脉丛进入血液,大量的空气进入血液后可引起空气栓塞,最终导致血流动力学变化。

3. 呼吸机相关肺损伤

据统计,全世界每年的大手术超过 2.34 亿例[9],鉴于不同研究报道采用的定义和标准以及手术类型的不同术后肺部并发症(postoperative pulmonary complication, PPC)发生率约为 28.4% [10],术后 30 天死亡率可高达 20% [11]。术后肺部并发症(PPCs)与外科手术患者术后预后不良、住院时间延长、病死率升高密切相关。PPCs 围术期危险因素可能源于患者自身、手术、麻醉以及机械通气等,其中术中机械通气导致的肺损伤是术后肺部并发症高发的主要原因。

机械通气(MV)长期以来一直被用作使机体度过基础疾病所致的呼吸功能衰竭,为治疗基础疾病创造条件维持生命的方法,然而它改变了正常的呼吸生理,在发挥呼吸支持和治疗作用的同时,也可能导致呼吸机相关性肺损伤(ventilator-induced lung injury, VILI)。

VILI 的发生机制逐渐明确从气压伤,容量伤,肺不张伤到生物伤。通气压力过高导致肺泡与周围血管间隙压力梯度增大,肺泡破裂,气体泄漏引起气压伤,可形成气胸、纵隔气肿、肺水肿等严重并发症[12]。高潮气量引起的肺泡过度膨胀肺泡内皮与肺上皮细胞受到应力的作用而发生变形导致的肺损伤称为容量伤。肺不张伤由小气道周期性开放和闭陷,使终末肺单位的剪切力明显增高,导致上皮细胞损坏和通气不均匀导致正常肺组织过度通气,对相邻不张的肺组织区域产生更高的牵张力而产生[13]。越来越多的研究表明,除机械性损伤之外,生物性损伤也参与了 VILI 的发生发展过程。引起机体生物学应答于促炎细胞因子释放、活性氧产生、补体激活以及机械转导等称为生物伤[14]。VILI 是一个多因素参与并相互影响、相互作用的病理过程,这影响着机械通气患者的预后。随着快速康复外科的实施,PPCs 和 VILI 的防治仍以围术期个体化的肺保护性通气策略为主。

4. 肺保护性机械通气及实施

在围手术期间,优化机械通气方案,合理使用呼吸机,可以改善机体氧和,提高呼吸系统顺应性,减少肺不张及 VILI 的发生。目前比较理想的是肺保护性通气策略,即维持较小的潮气量和气道压,允许一定范围的高碳酸血症,同时给予一定水平的 PEEP 以及肺复张改善肺顺应性和氧合功能。

4.1. 机械通气模式

容量控制通气(VCV):即传统意义上的控制通气,该模式的目的是为患者进行固定的每分钟通气量即潮气量和呼吸频率。VCV 模式下的气道压力可能根据阻力和顺应性而变化;压力控制通气(PCV):呼吸机按照预先设定的吸气压力提供潮气量,并且潮气量可根据肺顺应性而变化。在各种机械通气模式中,与容量控制通气(VCV)模式相比压力控制通气(PCV)模式提供相同的潮气量,其峰值吸气压力(Ppeak)更低,通气气体向整个肺野的分布更均匀,峰值吸气压力较低的 PCV 预计下腔静脉压迫较少,静脉充血较少,手术出血较少[15]。然而并没有研究证明这两种通气模式之间炎症标记物有显著差异,不能证明那种通气方式对降低术后肺部并发症具有优势。近年来出现的压力控制容量保证通气模式(PCV-VG)可以在保证最低气道压力的同时达到预设潮气量,结合了 PCV 和 VCV 的优点。最近 Lee, JM 等在一项前瞻性随机研究中表明,对于腰椎手术中俯卧位患者,与 VCV 相比,PCV-VG 提供了更低的 Ppeak 和改善的动态

肺顺应性(Cdyn), PCV-VG 可能是一种有效的机械通气替代方式[16]。

平台压是吸气后屏气时的压力,反映肺泡内的最大压力。正常值 5~13 cmH₂O。平台压的监测比气道峰压更能反映气压伤的危险性,平台压越高,越容易出现呼吸机相关性肺损伤。一项对脓毒血症患者的回顾性分析研究表明[17]:在保护性肺通气策略中,限制平台压 < 30 cmH₂O 不仅可以提高急性肺损伤(ALI)患者的生存率,而且对没有急性肺损伤但是进行机械通气的患者生存率也有所提高。2019 欧美多中心指南高级别推荐(BJA)建议[18] ARDS 患者潮气量 ≤ 6 ml/kg 或尽量使吸气平台压不超过 30~35 cmH₂O。设置个体化的通气模式及参数,避免过高的平台压,减少 VILI 的发生,提高通气效果。

4.2. 小潮气量通气

小潮气量(Vt) (6~8 mL/kg)通气,是肺保护性通气的基础,有效地避免了大潮气量或高气道压通气下引起的肺泡的过度扩张而导致的 VILI。Determann, RM [19]将择期手术患者随机分为常规组(目标潮气量为预测体重的 10 ml/kg)和干预组(预测体重的潮气量为 6 ml/kg),常规潮气量的机械通气对于无肺部疾病患者呼吸机相关性肺损伤的风险更大。另外一份包含 15 项随机对照试验中 2127 例全麻手术患者进行的个体化荟萃分析表明,术中采用低潮气量通气方式相比于高潮气量可显著降低术后 PPCs 的发生率,缩短住院时间[20]。Futier E [21]等在一项多中心试验中比较采用高潮气量(10~12 mL/kg)和零呼气末正压通气的患者与采用小潮气量(6~8 mL/kg)和 6~8 cmH₂O 呼气末正压通气的患者术后肺内外并发症的发生率,高潮气量零呼气末正压通气组围手术期并发症的发生率明显增高。小潮气量机械通气而无合适的 PEEP,会增加肺不张伤和术后肺部并发症的发生。因此我们需要在应用小潮气量通气同时保证肺泡充分开放时适当的 PEEP 必不可少。

4.3. 呼气末正压通气(PEEP)

呼气末正压通气(PEEP)是指呼吸时呼气末气道压保持一定的正压水平,避免了肺泡早期闭合,使肺泡扩张,功能残气量增加,达到提高氧合功能的目的。研究表明在全身麻醉的患者中肺不张的发生率高达 90% [22],同时肺保护性通气策略中小潮气量通气也会增加相关肺区域的周期性肺泡萎陷,增加肺不张的风险。PEEP 的应用是一种简单的干预措施,可以抵消小潮气量通气的副作用。有一项研究证明小潮气量联合零或低 PEEP 会增加肺部炎症发生率和术后 30 天死亡[23]。低水平 PEEP (<5 cmH₂O)可能无法使萎陷的肺泡复张[24]。Spaeth, J [25]等研究发现仰卧时,几乎所有患者的 PEEP 为 6 cmH₂O 就足够了,而俯卧位时 PEEP 为 9 cmH₂O 或更高可以以最大程度地减少俯卧位的周期性肺泡塌陷。葛叶盈等在一项对老年患者脊柱融合术中应用 10 cmH₂O 的呼气末正压通气,结果表明其能够有效膨胀萎陷的肺泡,改善肺氧合功能,有效减少术后肺部并发症(PPCs)的发生[26]。另一项开腹手术的研究则发现,术中应用 12 cmH₂O PEEP 对术后肺部并发症并无多大改善,反而增加了术中低血压的发生率[27]。过高水平的 PEEP 会引起肺血管阻力增加,右心后负荷增加影响血流动力学。

对于术中 PEEP 的设置一直存在争议,多数研究认为设定最佳 PEEP 是指能达到最佳气体交换和对血流动力学影响最小时的 PEEP。2019 欧美多中心指南高级别推荐(BJA)建议[18],所有全麻患者机械通气时应至少给予 5 cmH₂O 的 PEEP,再依据个体进行调整,推崇个体化滴定 PEEP,实现个体化肺保护性通气。有效的滴定依据包括:动态肺顺应性(Cdyn)、电阻抗断层成像、驱动压、跨肺压等。

2015 年,Amato [28]首次引入驱动压(Driving Pressure, ΔP)的概念。作者认为驱动压可能是与预后联系最密切的通气参数,机械通气过程中呼吸机参数的设置导致的驱动压的下降与 ARDS 患者生存率的提高有紧密的联系,潮气量、PEEP 的改变只有在影响驱动压的情况下才与预后相关。驱动压是驱动整个呼吸系统扩张的直接动力。吸气时,驱动压对抗呼吸系统的弹性阻力,驱动肺组织及胸壁扩张,气体进入

肺内,完成吸气过程[29]。对无自主呼吸的机械通气患者,吸气屏气时驱动压 = 平台压(Pplat) - PEEP。从呼吸力学角度分析,呼吸系统顺应性是单位压力下所发生的肺容积改变,即呼吸系统顺应性 = 潮气量/(平台压 - PEEP) = 潮气量/驱动压,可见驱动压 = 潮气量/呼吸系统顺应性[30]。Park, M [31]等在一项胸外科手术关于驱动压力的随机对照实验中,相同潮气量下,在单肺通气期间采用传统肺保护性通气(PEEP固定为 5 cmH₂O)与驱动压力导向个体化 PEEP 通气相比,应用驱动压力导向个体化 PEEP 通气与术后肺部并发症的发生率较低(12.2%对 5.5%)。

4.4. 允许性高碳酸血症

保护性肺通气策略中小潮气量通气可能会导致分钟通气量降低出现二氧化碳蓄积,继而引起高碳酸血症。最初认为高碳酸血症是保护性通气策略中的不良结局,但后来研究发现机体对二氧化碳有一定的耐受和容许性,允许性高碳酸血症可减少缺血再灌注损伤,降低氧化应激反应,增加心排血量,减轻肺内分流,起到肺保护作用。适当的高碳酸血症还增加肺实质的顺应性,使通气不足而肺 PaCO₂ 高的区域通气增加,从而减轻通气血流比值失调,改善肺部氧合[32]。CO₂ 升高, pH 下降,氧解离曲线右移,血红蛋白对氧气的结合力降低,使其易于释放至组织细胞,提高细胞氧供[33];允许性高碳酸应维持一定限度,多数研究认为控制 PaCO₂ 上升速度 < 10 mmHg/h、PaCO₂ < 65 mmHg、pH 值 > 7.20 对大部分患者是安全有效。

4.5. 氧浓度的选择

在全身麻醉期间吸入高浓度氧通常用于防止紧急情况下的低氧血症,并提高病人对呼吸暂停和低通气的耐受力,还可降低术后恶心呕吐和术后伤口感染的发生率。但长时间吸入较高浓度的氧导致高氧血症,可诱发肺损伤和增加氧化应激,以及与吸收性肺不张的发展有关并增加肺部分流[34]。在一项随机对照试验 meta 分析中[35]表明与吸入低浓度氧相比高浓度氧的吸入对接受非胸科全身麻醉的成年患者的死亡率具有不利影响,肺炎、呼吸衰竭、PPCs、ICU 入院和住院时间的发生率均具有可比性。2016 年开展的随机对照研究发现,术中使用小潮气量进行机械通气时,相较于 80% 的高浓度氧,术中使用 40% 的术后氧合指数更高,呼气末肺容积更大,肺不张发生率明显减少[36]。一项欧美多中心指南推荐[18] (BJA) 气道在通畅的情况下 FIO₂ 应设置为 ≤ 0.4。鉴于这些结果,在机械通气中,为了保证满意的血氧分压和减少肺部损伤,应该在保证机体足够氧合的基础上尽量避免纯氧通气和不必要的高浓度吸氧。

4.6. 肺复张

术中肺复张策略(recruiting maneuvers, RM)通常用作肺保护性通气的一部分,以减少术中肺塌陷,改善氧合,并降低术后肺部并发症(PPC)的发生率。肺复张的两种主要方式为手动肺复张和呼吸机驱动的肺复张。由于手动肺复张切换至呼吸机机械通气模式时,气道正压会短暂丧失,可能导致肺泡的再次塌陷,故目前推荐使用呼吸机驱动的肺复张[15]。呼吸机驱动的肺复张方法包括:1) 肺活量法;2) 压力控制法;3) 容量控制法。熊伟等研究认为[37],在中老年患者俯卧位脊柱手术中小潮气量联合低水平 PEEP 每间隔 30 min 做 1 次肺复张不会增加 CO₂ 潴留风险,降低术中气压伤、肺部炎症反应,改善患者术后氧合功能,并且不影响术中血流动力学稳定。但 RM 具有一定的不足,在压力控制期间容易发生产气伤,采取肺复张手法时,可能有一过性血流动力学的波动。肺复张的最佳方法还有待证实,因此对复张时机、频率以及压力维持时间需根据患者的自身肺功能和手术时间个体化实施。

5. 总结和展望

综上所述,全身麻醉机械通气时使用小潮气量、合适呼气末正压通气和肺复张操作可明显改善肺顺

应性和氧合功能，并减少呼吸机相关肺损伤和术后肺部并发症。其中小潮气量和肺复张操作已被广为接受，但围术期不同手术方式及特定患者中呼气末正压的设置仍存争议。随着驱动压的提出，发现其与潮气量、PEEP、呼吸系统静态顺应性等相关联，驱动压导向的 PEEP 滴定是一个新方法，未来仍需更多相关的研究课题来进一步明确和更深入的了解其安全应用范围，特别是对特殊手术、患者和不同体位中的应用。

参考文献

- [1] 芮建霞. 预防全麻下俯卧位脊柱手术并发症的护理体会[J]. 中国临床研究, 2011, 24(10): 959-960.
- [2] Toshida, K., Minagawa, R., Kayashima, H., *et al.* (2020) The Effect of Prone Positioning as Postoperative Physiotherapy to Prevent Atelectasis after Hepatectomy. *World Journal of Surgery*, **44**, 3893-3900. <https://doi.org/10.1007/s00268-020-05682-0>
- [3] Edgcombe, H., Carter, K. and Yarrow, S. (2008) Anesthesia in the Prone Position. *BJA British Journal of Anaesthesia*, **100**, 165-183. <https://doi.org/10.1093/bja/aem380>
- [4] 李长城, 余旻. 俯卧位通气治疗急性呼吸窘迫综合征患者疗效的 Meta 分析[J]. 海南医学, 2020, 31(4): 529-533.
- [5] Gordon, A., Rabold, E., Thirumala, R., *et al.* (2019) Prone Positioning in ARDS. *Critical Care Nursing Quarterly*, **42**, 371-375. <https://doi.org/10.1097/CNQ.0000000000000277>
- [6] 高丽丽, 吴泰华, 贺环宇. 俯卧位通气在急性呼吸窘迫综合征治疗中的研究进展[J]. 大连医科大学学报, 2021, 43(3): 273-277.
- [7] Jakob, H., Marie, S., Morten, S., *et al.* (2012) Effect of Head Rotation on Cerebral Blood Velocity in the Prone Position. *Anesthesiology Research & Practice*, **2012**, Article ID: 647258. <https://doi.org/10.1155/2012/647258>
- [8] Vieillard-Baron, A., Charron, C., Caille, V., *et al.* (2007) Prone Positioning Unloads the Right Ventricle in Severe ARDS. *Chest*, **132**, 1440-1446. <https://doi.org/10.1378/chest.07-1013>
- [9] Weiser, T.G., Regenbogen, S.E., Thompson, K.D., *et al.* (2008) An Estimation of the Global Volume of Surgery: A Modelling Strategy Based on Available Data. *The Lancet*, **372**, 139-144. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)60878-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)60878-8)
- [10] Pelosi, P. and Martinez-Simon, A. (2017) Epidemiology, Practice of Ventilation and Outcome for Patients at Increased Risk of Postoperative Pulmonary Complications: LAS VEGAS—An Observational Study in 29 Countries. *European Journal of Anaesthesiology*, **34**, 492-507. <https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000000646>
- [11] Canet, J., *et al.* (2010) Prediction of Postoperative Pulmonary Complications in a Population-Based Surgical Cohort. *Anesthesiology*, **113**, 1338-1350. <https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181fc6e0a>
- [12] Curley, G.F., Laffey, J.G., Zhang, H., *et al.* (2016) Biotrauma and Ventilator-Induced Lung Injury: Clinical Implications. *Chest*, **150**, 1109-1117. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2016.07.019>
- [13] 杨依依, 姚尚龙, 尚游. 呼吸机相关性肺损伤发病机制研究新进展[J]. 中华危重病急救医学, 2016, 28(9): 861-864.
- [14] Lin, C., *et al.* (2018) Molecular Mechanisms of Ventilator-Induced Lung Injury. *Chinese Medical Journal*, **131**, 1225-1231. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.226840>
- [15] Kang, W.S., Oh, C.S., Kwon, W.K., *et al.* (2016) Effect of Mechanical Ventilation Mode Type on Intra- and Postoperative Blood Loss in Patients Undergoing Posterior Lumbar Interbody Fusion Surgery: A Randomized Controlled Trial. *Anesthesiology*, **125**, 115-123. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000001131>
- [16] Lee, J.M., Lee, S.K., Kim, K.M., *et al.* (2019) Comparison of Volume-Controlled Ventilation Mode and Pressure-Controlled Ventilation with Volume-Guaranteed Mode in the Prone Position during Lumbar Spine Surgery. *BMC Anesthesiology*, **19**, Article No. 133. <https://doi.org/10.1186/s12871-019-0806-7>
- [17] Martin-Loeches, I., De Haro, C., Dellinger, R.P., *et al.* (2013) Effectiveness of an Inspiratory Pressure-Limited Approach to Mechanical Ventilation in Septic Patients. *European Respiratory Journal*, **41**, 157-164. <https://doi.org/10.1183/09031936.00221611>
- [18] Young, C.C., Harris, E.M., Vacchiano, C., *et al.* (2019) Lung-Protective Ventilation for the Surgical Patient: International Expert Panel-Based Consensus Recommendations. *British Journal of Anaesthesia*, **123**, 898-913. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2019.08.017>
- [19] Determann, R.M., Royakkers, A., Wolthuis, E.K., *et al.* (2010) Ventilation with Lower Tidal Volumes as Compared with Conventional Tidal Volumes for Patients without Acute Lung Injury: A Preventive Randomized Controlled Trial. *Critical Care*, **14**, R1. <https://doi.org/10.1186/cc8230>

- [20] Serpa Neto, A., Hemmes, S.N., Barbas, C.S., *et al.* (2015) Protective versus Conventional Ventilation for Surgery: A Systematic Review and Individual Patient Data Meta-Analysis. *Anesthesiology*, **123**, 66-78. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000000706>
- [21] Futier, E., Constantin, J.M., Paugam-Burtz, C., *et al.* (2013) A Trial of Intraoperative Low-Tidal-Volume Ventilation in Abdominal Surgery. *The New England Journal of Medicine*, **369**, 428-437. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1301082>
- [22] Randtke, M.A., Andrews, B.P. and Mach, W.J. (2015) Pathophysiology and Prevention of Intraoperative Atelectasis: A Review of the Literature. *Journal of Perianesthesia Nursing Official Journal of the American Society of Perianesthesia Nurses*, **30**, 516-527. <https://doi.org/10.1016/j.jopan.2014.03.012>
- [23] Sato, H., Nakamura, K., Baba, Y., *et al.* (2015) Low Tidal Volume Ventilation with Low PEEP during Surgery May Induce Lung Inflammation. *BMC Anesthesiology*, **16**, Article No. 47. <https://doi.org/10.1186/s12871-016-0209-y>
- [24] Deng, Q.W., Tan, W.C., Zhao, B.C., *et al.* (2020) Intraoperative Ventilation Strategies to Prevent Postoperative Pulmonary Complications: A Network Meta-Analysis of Randomised Controlled Trials. *BJA British Journal of Anaesthesia*, **124**, 324-335. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2019.10.024>
- [25] Spaeth, J., Daume, K., Goebel, U., *et al.* (2016) Increasing Positive End-Expiratory Pressure (Re-)improves Intraoperative Respiratory Mechanics and Lung Ventilation after Prone Positioning. *British Journal of Anaesthesia*, **116**, 838-846. <https://doi.org/10.1093/bja/aew115>
- [26] 葛叶盈, 袁力勇, 姜晓红, 等. 保护性通气模式对脊柱融合术老年患者肺功能的影响[J]. 中南大学学报(医学版), 2013, 38(1): 81-85.
- [27] Hemmes, S.N.T., De Abreu, M.G., Pelosi, P., *et al.* (2014) High versus Low Positive End-Expiratory Pressure during General Anaesthesia for Open Abdominal Surgery (PROVHILO Trial): A Multicentre Randomised Controlled Trial. *The Lancet*, **384**, 495-503. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60416-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60416-5)
- [28] Amato, M., Meade, M.O., Slutsky, A.S., *et al.* (2015) Driving Pressure and Survival in the Acute Respiratory Distress Syndrome. *New England Journal of Medicine*, **372**, 747-755. <https://doi.org/10.1056/NEJMsa1410639>
- [29] 王金龙, 黄英姿. 驱动压在急性呼吸窘迫综合征肺保护性通气中的研究进展[J]. 中华内科杂志, 2018, 57(10): 766-768.
- [30] Bugedo, G., Retamal, J. and Bruhn, A. (2017) Driving Pressure: A Marker of Severity, a Safety Limit, or a Goal for Mechanical Ventilation? *Critical Care*, **21**, Article No. 199. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1779-x>
- [31] Park, M., Ahn, H.J., Kim, J.A., *et al.* (2019) Driving Pressure during Thoracic Surgery: A Randomized Clinical Trial. *Anesthesiology*, **130**, 385-393. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000002600>
- [32] 岳建明, 刘斌. 允许性高碳酸血症在预防呼吸机相关性肺损伤中的作用[J]. 华西医学, 2017, 32(6): 940-944.
- [33] 徐志礼, 何先弟. 允许性高碳酸血症的器官保护及应用策略[J]. 临床肺科杂志, 2011, 16(3): 432-434.
- [34] Staehr-Rye, A.K., Meyhoff, C.S., Scheffenbichler, F.T., *et al.* (2017) High Intraoperative Inspiratory Oxygen Fraction and Risk of Major Respiratory Complications. *British Journal of Anaesthesia*, **119**, 140-149. <https://doi.org/10.1093/bja/aex128>
- [35] Lim, C.H., Han, J.Y., Cha, S.H., *et al.* (2021) Effects of High versus Low Inspiratory Oxygen Fraction on Postoperative Clinical Outcomes in Patients Undergoing Surgery under General Anesthesia: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Clinical Anesthesia*, **75**, Article ID: 110461. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2021.110461>
- [36] Koksai, G.M., Dikmen, Y., Erbabacan, E., *et al.* (2016) Hyperoxic Oxidative Stress during Abdominal Surgery: A Randomized Trial. *Journal of Anesthesia*, **30**, 610-619. <https://doi.org/10.1007/s00540-016-2164-7>
- [37] 熊伟, 陈萍, 高进, 袁瑞雪. 肺保护性通气在中老年脊柱俯卧位手术中的应用: 随机对照试验[J]. 南方医科大学学报, 2016, 36(2): 215-219.