

腹腔镜手术个体化肺保护通气策略的研究进展*

王梦瑞 综述 刘畅 韩永正** 郭向阳 审校

(北京大学第三医院麻醉科, 北京 100191)

文献标识: A 文章编号: 1009-6604(2024)07-0498-06

doi: 10.3969/j.issn.1009-6604.2024.07.007

全球每年外科手术超过 3 亿例, 术后肺部并发症 (postoperative pulmonary complications, PPCs) 是导致患者预后不良、住院时间延长、病死率升高及医疗卫生机构负担加重的主要原因^[1]。PPCs 发生率因手术类型而异, 为 5% ~ 33%^[2], 主要包括肺不张、支气管痉挛、肺炎、急性上呼吸道阻塞、急性呼吸窘迫综合征、肺水肿等^[3]。因此, 实施围术期肺保护通气策略 (lung protective ventilation strategy, LPVS) 防治 PPCs 具有重要的临床意义。

目前, 腹腔镜手术具有创伤小、术后疼痛轻、住院时间短等优点, 但术中气腹和特殊体位会显著改变呼吸力学、降低肺和胸壁顺应性、增加气道压和驱动压 (driving pressure, ΔP)^[4]。传统 LPVS 包括使用小潮气量 (tidal volume, VT) (6 ~ 8 ml/kg)、呼气末正压 (positive end expiratory pressure, PEEP) 和肺复张手法 (recruitment maneuvers, RM), 气腹和特殊体位的存在使传统 LPVS 中小 VT 及 PEEP 对机体的影响更加复杂, 从而增加呼吸机诱发的肺损伤风险^[2]。本文对腹腔镜手术个体化 LPVS 的研究进展进行文献总结。

1 腹腔镜手术中相关肺损伤

肺损伤的机制主要包括大 VT 导致的容量伤、高气道压导致的压力伤、肺不张导致的萎陷伤和生物伤这 4 个方面^[5]。腹腔镜手术中气腹导致腹内压增加, 抬升膈肌, 压缩胸腔内体积, 导致顺应性差的肺单位陷闭, 引发肺不张; 腹内压增加限制胸壁肌肉的活动, 胸壁顺应性下降, 膈肌上移使肺组织变形,

胸腔压力升高, 气道压上升容易产生压力伤^[6]。正压通气时, 肺通气分布从背侧重新分布到腹侧, 导致重力依赖性区域肺泡塌陷和重力非依赖性区域过度扩张, 此时实际肺扩张压力是跨肺压, 跨肺压 = 气道压 - 扩张胸壁所需压力 (即胸膜压, 临床上通过测量食管内压代替)^[7]。在腹腔镜手术中, 气腹导致胸壁顺应性降低, 在相同 VT 情况下, 胸壁承受压力升高, 从而导致跨肺压降低。跨肺压的降低引起肺泡塌陷, 进而增加腹腔镜手术患者肺不张和 PPCs 的风险^[8]。一项 91 例机器人辅助腹腔镜手术的横断面研究^[4]显示, 相对仰卧位基线水平, 气腹后患者肺 ΔP 增加 [(2.8 ± 0.7) cm H₂O, $P < 0.001$], 同时呼气末跨肺压降低 [(-3.4 ± 1.3) cm H₂O, $P = 0.002$], 胸廓弹性阻力和肺阻力均增加, 肺顺应性下降。气腹导致膈肌向头侧移位, 降低功能残气量和呼气末肺容积, 从而导致气体交换受损, 造成肺不张。术中如果使用 Trendelenburg 体位, 会进一步加重这一影响。Rustagi 等^[9]使用超声对 90 例麻醉诱导前和气管拔管后 10 min 膈肌的吸气振幅进行观察, Trendelenburg 体位腹腔镜手术后膈肌吸气振幅显著降低 (均值: 1.912 cm vs. 1.207 cm, $P < 0.001$), 提示肺换气功能受限, 肺不张风险增加。针对上述问题, 近年来研究提倡针对腹腔镜手术患者术中施行个体化 LPVS。

2 个体化 LPVS

2.1 小 VT 与 PEEP 结合

Karalapillai 等^[10]对 1236 例手术时间 > 2 h 的研

* 基金项目: 首都卫生发展科研专项 (首发 2024-2-40912); 吴阶平医学基金会 (320.6750.2023-08-5)

** 通讯作者, E-mail: hanyongzheng@bjmu.edu.cn

究结果显示,小 VT(6 ml/kg)与常规 VT(10 ml/kg)术后 7 d 内 PPCs 差异无显著性[38% (231/608) vs. 39% (232/590), $P = 0.64$, $RR = 0.97$, 95% CI : 0.84 ~ 1.11]。Yang 等^[11]研究表明,单纯应用小 VT(6 ~ 8 ml/kg)机械通气与传统 VT(9 ml/kg)相比,不能降低术后肺不张发生率($OR = 0.86$, 95% CI : 0.26 ~ 2.81, $P = 0.80$),且住院时间无差异,提示单纯小 VT 不能预防 PPCs 的发生。Östberg 等^[12]采用 CT 评估患者肺不张面积,16 例接受 7 ~ 9 cm H₂O PEEP 与 14 例不接受 PEEP 术后肺不张面积无明显差异(中位数差值 = 0.7 cm², 95% CI : -0.8 ~ 2.9, $P = 0.400$),且患者术后氧合水平均未改变,提示仅对 LPVS 的单一因素进行研究不能完全诠释该策略的保护作用,后续关注多因素协同的相关研究。一项纳入 34 项研究共 5273 例的网状 meta 分析^[13]显示,小 VT 联合中高水平 PEEP(≥ 5 cm H₂O, 伴或不伴 RM)可降低 PPCs 的风险,联合中等水平 PEEP(5 ~ 8 cm H₂O)术后发生肺炎的风险较低($OR = 0.58$, 95% CI : 0.35 ~ 0.94)。Wang 等^[14]对 120 例腹腔镜手术进行回顾性分析,小 VT(6 ml/kg)联合 5 cm H₂O PEEP 更有利于改善胸内压和右心房压,降低左心室跨壁压和压力梯度,改善心功能并缓解肺水肿,且可以抑制 IL-6 和 TNF- α 等促炎介质的释放。目前,虽对术中使用小 VT 应联合适当 PEEP 水平达成共识^[2],但仍无法确定腹腔镜手术中降低 PPCs 的 VT 与 PEEP 的最佳组合。

2.2 个体化 PEEP

PEEP 是肺保护性通气中的重要组成部分,尽管 CT 被认为是评估 PEEP 试验对肺通气影响的金标准,但在手术室尚不可行^[15],目前常用超声进行评估。De Meyer 等^[16]在 23 例腹腔镜手术中分别进行 5、10、15 cm H₂O PEEP 机械通气,与低 PEEP 组(5 cm H₂O)相比,高 PEEP(15 cm H₂O)使肺部超声评分明显降低[$M(P_{25}, P_{75})$: 53(42, 61)分 vs. 11(0, 22)分, $P < 0.001$],且不会增加生理死腔或过度膨胀。一项纳入 849 例的 meta 分析^[17]显示,个体化 PEEP 术后 PPCs 发生率降低($RR = 0.52$, 95% CI : 0.37 ~ 0.73, $P = 0.0001$),氧合指数显著提高(均数差 = 49.07 mm Hg, 95% CI : 27.21 ~ 70.92, $P < 0.0001$),同时减少炎症因子释放。腹腔镜手术中最佳 PEEP 可能因体重指数和手术阶段而不同,

BMI 大、气腹和 Trendelenburg 体位需要更高水平的 PEEP,有助于减少术中肺损伤^[4]。2019 年国际专家建议术中给予基础 PEEP 后进行个体化调整^[2],同时个体化 PEEP 滴定也受到越来越多的关注,主要包括 ΔP 法、肺顺应性法、超声引导及电阻抗断层扫描(electrical impedance tomography, EIT)法等。

2.2.1 ΔP 法 ΔP 是平台压和 PEEP 的差值。肺过度膨胀或通气不足会增加 ΔP ,高 ΔP 表明肺部状况不佳、肺顺应性下降。高 ΔP 与低呼吸系统顺应性是导致 ARDS 患者死亡率增加的主要原因^[18]。 ΔP 是 LPVS 对 PPCs 发生影响的唯一重要因素,术中高 ΔP 和导致 ΔP 升高的 PEEP 压力与 PPCs 增加相关($OR = 3.11$, 95% CI : 1.39 ~ 6.96, $P = 0.006$)^[19]。Xu 等^[20]在腹腔镜手术中将 PEEP 滴定至最低 ΔP 且每小时重新评估,与恒定 PEEP(6 cm H₂O)和零 PEEP 相比, ΔP 法滴定 PEEP 可减少术后早期肺不张并改善肺静态顺应性。一项包含 16 项随机对照研究共 4993 例的 meta 分析^[21]显示,PEEP 滴定至最低 ΔP 时联合小 VT 使 PPCs 发生率显著降低($OR = 0.358$, 95% CI : 0.187 ~ 0.684, $P = 0.002$),同时改善肺重力依赖区域的通气,高 PEEP(≥ 6 cm H₂O)使术中心血管并发症发生率增加。另一项纳入 384 例腹腔镜手术的随机对照研究^[7]显示, ΔP 滴定的个体化 PEEP 与固定 PEEP(5 cm H₂O)相比,尽管改善术中氧合情况,但术后 7 d 内 PPCs 无明显差异[14% (25/178) vs. 19.5% (36/185), $P = 0.215$, $RR = 0.72$, 95% CI : 0.45 ~ 1.16],分析可能为研究纳入大量中低风险患者导致结果差异不明显。综上, ΔP 导向的个体化 PEEP 能在一定程度上减轻 PPCs 并改善术后早期肺功能,但由于 ΔP 受整个呼吸系统顺应性的影响,腹腔镜术中气腹和特殊体位导致胸壁顺应性下降,无法充分反应肺部应激状态,若术中出现 ΔP 升高,应深入分析原因并及时干预。

2.2.2 肺顺应性法 肺组织在外力作用下扩张的难易程度称为肺顺应性,代表胸腔压力改变时对肺容积的影响。顺应性又可分为肺静态顺应性和肺动态顺应性(dynamic lung compliance, C_{dyn}), $C_{dyn} = VT \div (\text{平台压} - PEEP)$,因 C_{dyn} 法简单易行、安全便捷,且能够实时反映通气肺泡的数量变化,在临床上应用较为广泛。Li 等^[22]在腹腔镜手术中先将

PEEP 升至 25 cm H₂O 后,再以每 30 s 降低 2 cm H₂O PEEP 进行 Cdyn 引导的 PEEP 滴定,直到 Cdyn 达到最大值,同时为避免气腹增加胸壁顺应性而可能低估最佳 PEEP 值,以 Cdyn 达到最大值后 PEEP+2 cm H₂O 作为最终 PEEP,拔管后进行 CT 扫描,Cdyn 滴定 PEEP 比固定 PEEP(8 cm H₂O)肺不张发生率低[(9.5±4.3)% vs. (13.1±5.3)%, $P=0.025$, 95% CI : 0.5~6.8%]且术中氧合指数更高,但拔管后氧合无差异。周建伟等^[23]在腹腔镜结直肠癌手术中使用 Cdyn 法来滴定 PEEP,不仅可以改善术中氧合,还可以降低血清 CC16 升高程度,减轻肺部炎症反应,改善肺功能。L 等^[24]在腹腔镜手术中使用肺静态顺应性法滴定最佳 PEEP,同时使用改良肺部超声评分评估患者术后肺不张情况,个体化 PEEP 组气腹后肺部超声评分更低 [$M(P_{25}, P_{75})$: 3(2,3)分 vs. 1(1,2)分, $P=0.0001$],说明肺不张发生率降低,且术后 24 h 内需要吸氧的患者减少 [95% (39/41) vs. 73% (30/41), $P=0.007$],同时吸氧时间更短 [$M(P_{25}, P_{75})$: 25 (20, 30) min vs. 10 (0, 15) min, $P=0.0000$]。肺顺应性反映患者肺组织弹性、气道阻力和胸廓内压等因素对肺功能的影响,根据肺顺应性滴定的个体化 PEEP 水平可改善腹腔镜手术中因体位变动和气腹引起的生理改变,可根据手术进程及时调整 PEEP 水平。

2.2.3 EIT 法 EIT 作为一种无创、无辐射的临床成像技术,近年来得到广泛应用。EIT 可实现床旁实时监测肺通气分布的动态信息^[25],通过重建被电极包围的肺部二维切片图像,从而动态观察通气分布及局部肺灌注^[26]。相对于 Cdyn 及平均动脉压引导, EIT 引导的最佳 PEEP 值相对较高^[27]。通过图像对比, EIT 法可提供更好背侧肺野的通气,表明 PEEP 升高与肺泡通气从腹侧肺区转移到背侧肺区有关,且 EIT 法滴定 PEEP 在不同程度的 Trendelenburg 体位下变异系数最低^[27]。一项纳入 272 例的 meta 分析^[28]显示,与固定 PEEP(4~5 cm H₂O)与 Cdyn 引导的个体化 PEEP 相比, EIT 引导的 PEEP 滴定使术中氧合和肺顺应性更高,提示塌陷的肺泡较少,同时术中血流动力学稳定性无显著差异。Girrbach 等^[29]报道腹腔镜前列腺手术中采用 EIT 法滴定 PEEP 比标准 PEEP(5 cm H₂O)呼气末肺容积增加 1.49 L(95% CI : 1.09~1.89,

$P<0.001$),通气均匀性更好,且氧合指数更高。目前, EIT 作为一种有效措施评估来肺泡塌陷和膨胀过度,已被提议用于指导患者治疗期间的“最佳 PEEP”水平滴定^[30],可改患者术中的通气及氧合,是腹腔镜手术中可用的个体化 PEEP 滴定方法。

2.3 超声引导 RM

RM 是指间隔一定时间使用安全范围内的较高气道压扩张肺部,并维持一定的时间后恢复正常水平,目的是将闭合的小气道重新开放、肺泡重新扩张。RM 可以提高肺顺应性,改善组织缺氧,同时对血流动力学影响短暂^[31]。Yang 等^[32]一项随机双盲腹腔镜手术研究显示,手术行机械通气后肺不张发生率为 100%, RM 后肺不张的发生率降至 50%。肺部超声(lung ultrasound, LUS)是一种便携、无创、无放射的技术,已广泛应用于临床监测和诊断,可以指示肺不张区域,并允许实时监测肺复张。Yu 等^[33]的前瞻性研究显示,以肺部 CT 为金标准, LUS 在诊断术后肺不张具备较好表现,敏感性 87.7% (150/171),特异性 92.1% (351/381),诊断准确率 90.8% (501/552),在仰卧位患者中, LUS 评分与 CT 的肺不张体积高度相关。多项研究^[34,35]显示,腹腔镜手术中使用 LUS 引导 RM,不仅可使肺部超声评分降低、术后肺不张发生率降低且在 PACU 停留时间更短。LUS 引导 RM 亦有局限性,如不能预测肺过度扩张^[25],肥胖和皮下气肿可能阻碍超声波传导而对结果造成影响。相较于传统 RM, LUS 引导下 RM 在有效可视化下进行,可以最大程度做到个体化 RM,改善围术期肺部氧合,使患者受益更多。

2.4 肺开放通气(open lung ventilation, OLV)

RM 后结合 PEEP 可恢复肺不张并稳定肺单位,这种策略通常与保护性小 VT 相结合,称为 OLV^[36]。Ferrando 等^[37]纳入 1308 例多中心随机对照研究显示,术中每 40 min 评估 1 次是否需要重新进行 PEEP 滴定与 RM,达到最高 Cdyn 的 OLV 组,与实施标准化 LPVS 组(恒定 4 cm H₂O PEEP 与单次 RM)相比,术后 7 d [16% (104/670) vs. 27% (175/638), $RR=0.57$, 95% CI : 0.46~0.70, $P<0.0001$]与术后 30 d [17% (111/670) vs. 29% (184/638), $RR=0.57$, 95% CI : 0.47~0.71, $P<0.0001$]发生 PPCs 的风险均降低。Wang 等^[38]对 23 项随机对照研究共 3364 例肥胖患者进行 meta 分

析,结果显示个体化 PEEP 滴定与 RM 相结合的容控通气是改善肺顺应性和氧合指数的最佳 PPCs,高 PEEP (≥ 10 cm H₂O) + RM + 容控通气可减少炎症因子释放,降低术后肺不张发生率。值得一提的是,相较于开腹手术,OLV 策略在腹腔镜手术中可能受益更明显,因为气腹会导致胸内压升高,并使肺顺应性和功能残气量下降,RM 后进行 PEEP 在保持依赖性肺单位开放方面比单独 PEEP 更有效^[13]。李宏等^[39]对 96 例腹腔镜结直肠癌进行分析,使用 OLV 的患者(8 cm H₂O PEEP + 间歇 RM)氧合障碍发生率更低[35.4% (17/48) vs. 14.6% (7/48), $\chi^2 = 5.556$, $RR = 0.31$, 95% $CI: 0.12 \sim 0.84$, $P = 0.033$],同时肺内分流减少。综上,OLV 可增加跨肺压差,降低胸壁弹性阻力并提高患者氧合指数,是腹腔镜术中可用的 LPVS。

2.5 基于压力 - 容积 (pressure-volume, P-V) 曲线的 LPVS

P-V 曲线描述呼吸系统在充气和放气过程中的机械行为。P-V 曲线上、下拐点提示肺顺应性开始增加,塌陷肺泡开放。上拐点提示肺顺应性开始减弱,肺过度膨胀^[40]。P-V 曲线可以用于确定机械通气最佳气道压范围,识别个体肺复张的潜力,同时可以评估持续通气造成肺损伤的可能性^[41]。董兰等^[42]在妇科腹腔镜手术中根据 P-V 曲线下拐点对应的压力 + 2 cm H₂O 设定 PEEP,根据 P-V 曲线上拐点 80% 对应的容积设定 VT,根据 P-V 曲线行 LPVS 的患者在气腹后有更高的氧合指数[(323 ± 18) mm Hg vs. (310 ± 17) mm Hg, $P < 0.05$],同时改善 Cdyn。Weber 等^[43]使用 EIT 评估 P-V 曲线分析指导的个体化 PEEP 滴定对局部通气的影响,根据 P-V 曲线进行滴定的 PEEP 值高于固定组(均值:5.8 cm H₂O vs. 5.0 cm H₂O, $P < 0.001$),在不对阻抗分布和血流动力学产生负面影响的同时改善局部通气。P-V 曲线不仅可作为一种确定 PEEP 值的方法,也可指导 RM。Chiumello 等^[44]使用低流量法获得 25 例 P-V 环路,迟滞(P-V 曲线吸气相和呼气相不重合,两者的分离被称为迟滞效应)被计算为由 P-V 环路包围的面积,在气道压为 5 cm H₂O 和 RM(45 cm H₂O 持续 30 s) 时进行 CT 扫描,迟滞与在气道压为 5 cm H₂O 时计算的呼吸系统顺应性和在 P-V 曲线吸气相期间进入肺内的气体体积显著相关($R^2 =$

0.749, $P < 0.001$ 和 $R^2 = 0.851$, $P < 0.001$),表明 P-V 曲线在预测肺复张方面具有一定准确性。P-V 曲线可以帮助麻醉医生确定肺泡开始塌陷的压力,在避免肺过度膨胀的前提下进行连续的 PEEP 调整,是一种有效评估呼吸力学和肺复张效果的床边工具。

3 小结

随着术后快速康复理念的提出和发展,围术期麻醉的管理对麻醉医生提出更高要求。对于腹腔镜手术,术中气腹压力、特殊体位等因素因手术进程而不同,肺泡塌陷程度、对 LPVS 反应等也因人而异,故 LPVS 中某种方法单一应用已不足以满足肺保护的要求,将各影响因素协同,各个措施做到精准个体化,同时借助超声等实时监测设备可直观地了解患者生理功能的变化,帮助麻醉科医师早期实施个体化 LPVS,改善患者预后。

参考文献

- 1 Holmer H, Bekele A, Hagander L, et al. Evaluating the collection, comparability and findings of six global surgery indicators. *Br J Surg*, 2019, 106(2): e138 - e150.
- 2 Young CC, Harris EM, Vacchiano C, et al. Lung-protective ventilation for the surgical patient: international expert panel-based consensus recommendations. *Br J Anaesth*, 2019, 123(6): 898 - 913.
- 3 Li XF, Jin L, Yang JM, et al. Effect of ventilation mode on postoperative pulmonary complications following lung resection surgery: a randomised controlled trial. *Anaesthesia*, 2022, 77(11): 1219 - 1227.
- 4 Tharp WG, Murphy S, Breidenstein MW, et al. Body habitus and dynamic surgical conditions independently impair pulmonary mechanics during robotic-assisted laparoscopic surgery. *Anesthesiology*, 2020, 133(4): 750 - 763.
- 5 Katira BH. Ventilator-induced lung injury: classic and novel concepts. *Respir Care*, 2019, 64(6): 629 - 637.
- 6 Mazzinari G, Serpa Neto A, Hemmes SNT, et al. The association of intraoperative driving pressure with postoperative pulmonary complications in open versus closed abdominal surgery patients-a posthoc propensity score-weighted cohort analysis of the LAS VEGAS study. *BMC Anesthesiol*, 2021, 21(1): 84.
- 7 Kim YJ, Kim BR, Kim HW, et al. Effect of driving pressure-guided positive end-expiratory pressure on postoperative pulmonary complications in patients undergoing laparoscopic or robotic surgery:

- a randomised controlled trial. *Br J Anaesth*, 2023, 131 (5) : 955 – 965.
- 8 Fogagnolo A, Montanaro F, Al-Husinat L, et al. Management of intraoperative mechanical ventilation to prevent postoperative complications after general anesthesia; a narrative review. *J Clin Med*, 2021, 10 (12) : 2656.
- 9 Rustagi PS, Yadav A, Nellore SS. Ultrasonographic evaluation of diaphragmatic excursion changes after major laparoscopic surgeries in the Trendelenburg position under general anaesthesia; a prospective observational study. *Indian J Anaesth*, 2023, 67 (Suppl 4) : S274 – S280.
- 10 Karalapillai D, Weinberg L, Peyton P, et al. Effect of intraoperative low tidal volume vs conventional tidal volume on postoperative pulmonary complications in patients undergoing major surgery; a randomized clinical trial. *JAMA*, 2020, 324 (9) : 848 – 858.
- 11 Yang D, Grant MC, Stone A, et al. A meta-analysis of intraoperative ventilation strategies to prevent pulmonary complications; is low tidal volume alone sufficient to protect healthy lungs? *Ann Surg*, 2016, 263 (5) : 881 – 887.
- 12 Östberg E, Thorisson A, Enlund M, et al. Positive end-expiratory pressure and postoperative atelectasis; a randomized controlled trial. *Anesthesiology*, 2019, 131 (4) : 809 – 817.
- 13 Deng QW, Tan WC, Zhao BC, et al. Intraoperative ventilation strategies to prevent postoperative pulmonary complications; a network meta-analysis of randomised controlled trials. *Br J Anaesth*, 2020, 124 (3) : 324 – 335.
- 14 Wang Y, Yang Y, Wang DM, et al. Different positive end expiratory pressure and tidal volume controls on lung protection and inflammatory factors during surgical anesthesia. *World J Clin Cases*, 2022, 10 (33) : 12146 – 12155.
- 15 Soulé C, Crognier L, Puel F, et al. Assessment of electrical impedance tomography to set optimal positive end-expiratory pressure for venoarterial extracorporeal membrane oxygenation-treated patients. *Crit Care Med*, 2021, 49 (6) : 923 – 933.
- 16 De Meyer GRA, Morrison SG, Saldien V, et al. Minimizing lung injury during laparoscopy in head-down tilt; a physiological cohort study. *Anesth Analg*, 2023, 137 (4) : 841 – 849.
- 17 Li P, Kang X, Miao M, et al. Individualized positive end-expiratory pressure (PEEP) during one-lung ventilation for prevention of postoperative pulmonary complications in patients undergoing thoracic surgery; a meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100 (28) : e26638.
- 18 Millington SJ, Cardinal P, Brochard L. Setting and titrating positive end-expiratory pressure. *Chest*, 2022, 161 (6) : 1566 – 1575.
- 19 Neto AS, Hemmes SN, Barbas CS, et al. Association between driving pressure and development of postoperative pulmonary complications in patients undergoing mechanical ventilation for general anaesthesia; a meta-analysis of individual patient data. *Lancet Respir Med*, 2016, 4 (4) : 272 – 280.
- 20 Xu Q, Guo X, Liu J, et al. Effects of dynamic individualized PEEP guided by driving pressure in laparoscopic surgery on postoperative atelectasis in elderly patients; a prospective randomized controlled trial. *BMC Anesthesiol*, 2022, 22 (1) : 72.
- 21 Buonanno P, Marra A, Iacovazzo C, et al. Impact of ventilation strategies on pulmonary and cardiovascular complications in patients undergoing general anaesthesia for elective surgery; a systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth*, 2023, 131 (6) : 1093 – 1101.
- 22 Li X, Liu H, Wang J, et al. Individualized positive end-expiratory pressure on postoperative atelectasis in patients with obesity; a randomized controlled clinical trial. *Anesthesiology*, 2023, 139 (3) : 262 – 273.
- 23 周建伟, 王传光, 黄 燕, 等. 最佳呼吸末正压肺保护通气策略对腹腔镜下结直肠癌根治术患者氧合功能的影响. *临床麻醉学杂志*, 2020, 36 (6) : 548 – 551.
- 24 L D, Kumar R, Patel N, et al. Effect of lung compliance-based optimum pressure versus fixed positive end-expiratory pressure on lung atelectasis assessed by modified lung ultrasound score in laparoscopic gynecological surgery; a prospective randomized controlled trial. *Cureus*, 2023, 15 (6) : e40278.
- 25 Jonkman AH, Ranieri VM, Brochard L. Lung recruitment. *Intensive Care Med*, 2022, 48 (7) : 936 – 938.
- 26 Sella N, Pettenuzzo T, Zarantonello F, et al. Electrical impedance tomography; a compass for the safe route to optimal PEEP. *Respir Med*, 2021, 187 : 106555.
- 27 Shu B, Zhang Y, Ren Q, et al. Optimal positive end-expiratory pressure titration of intraoperative mechanical ventilation in different operative positions of female patients under general anesthesia. *Heliyon*, 2023, 9 (10) : e20552.
- 28 Jiang L, Deng Y, Xu F, et al. Individualized PEEP guided by EIT in patients undergoing general anesthesia; a systematic review and meta-analysis. *J Clin Anesth*, 2024, 94 : 111397.
- 29 Gırbach F, Petroff D, Schulz S, et al. Individualised positive end-expiratory pressure guided by electrical impedance tomography for robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy; a prospective, randomised controlled clinical trial. *Br J Anaesth*, 2020, 125 (3) : 373 – 382.
- 30 Frerichs I, Schädler D, Becher T. Setting positive end-expiratory pressure by using electrical impedance tomography. *Curr Opin Crit Care*, 2024, 30 (1) : 43 – 52.
- 31 钱 敏, 傅元豪, 凌云鹏, 等. 呼气末正压递增法肺复张对左胸微创冠状动脉旁路移植术患者血流动力学及呼吸力学的影响. *中国微创外科杂志*, 2021, 21 (8) : 710 – 715.
- 32 Yang Y, Geng Y, Zhang D, et al. Effect of lung recruitment maneuvers on reduction of atelectasis determined by lung ultrasound

in patients more than 60 years old undergoing laparoscopic surgery for colorectal carcinoma: a prospective study at a single center. *Med Sci Monit*,2021 ,27:e926748.

33 Yu X, Zhai Z, Zhao Y, et al. Performance of lung ultrasound in detecting peri-operative atelectasis after general anesthesia. *Ultrasound Med Biol*,2016,42(12):2775 – 2784.

34 Liu Y, Wang J, Geng Y, et al. The effect of ultrasound-guided lung recruitment maneuvers on atelectasis in lung-healthy patients undergoing laparoscopic gynecologic surgery: a randomized controlled trial. *BMC Anesthesiol*,2022,22(1):200.

35 Wu XZ, Xia HM, Zhang P, et al. Effects of ultrasound-guided alveolar recruitment manoeuvres compared with sustained inflation or no recruitment manoeuvres on atelectasis in laparoscopic gynaecological surgery as assessed by ultrasonography: a randomized clinical trial. *BMC Anesthesiol*,2022,22(1):261.

36 Gama De Abreu M, Schultz MJ, Serpa Neto A, et al. Open-lung ventilation strategy during general anesthesia. *Anesthesiology*,2020, 133(5):982 – 984.

37 Ferrando C, Carramiñana A, Piñeiro P, et al. Individualised, perioperative open-lung ventilation strategy during one-lung ventilation (iPROVE-OLV): a multicentre, randomised, controlled clinical trial. *Lancet Respir Med*,2024,12(3):195 – 206.

38 Wang J, Zeng J, Zhang C, et al. Optimized ventilation strategy for surgery on patients with obesity from the perspective of lung protection: a network meta-analysis. *Front Immunol*, 2022, 13: 1032783.

39 李 宏,郭 婧,王 凯,等. 肺开放通气策略对腹腔镜结直肠癌手术中氧合障碍的影响. *中华胃肠外科杂志*, 2020, 23(11): 1081 – 1087.

40 Rackley CR. Monitoring during mechanical ventilation. *Respiratory Care*,2020,65(6):832 – 846.

41 Mojoli F, Pozzi M, Arisi E. Setting positive end-expiratory pressure: using the pressure-volume curve. *Curr Opin Crit Care*, 2024,30(1):35 – 42.

42 董 兰,刘晓梅,李占军,等. 基于压力 – 容积曲线的个体化肺保护性通气策略在肥胖患者妇科腹腔镜手术中的应用. *国际麻醉学与复苏杂志*,2021,42(5):467 – 470.

43 Weber J, Gutjahr J, Schmidt J, et al. Effect of individualized PEEP titration guided by intratidal compliance profile analysis on regional ventilation assessed by electrical impedance tomography – a randomized controlled trial. *BMC Anesthesiol*,2020,20(1):42.

44 Chiumello D, Arnal JM, Umbrello M, et al. Hysteresis and lung recruitment in acute respiratory distress syndrome patients: a CT scan study. *Crit Care Med*,2020,48(10):1494 – 1502.

(收稿日期:2024 – 04 – 21)

(修回日期:2024 – 06 – 07)

(责任编辑:李贺琼)