

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2025.19.011

文章编号: 1005-8982 (2025) 19-0065-08

临床研究·论著

肺保护通气策略对全身麻醉肺叶切除术后单肺通气患者肺损伤的作用研究*

张倩¹, 张子檀², 王欢³, 孟成³, 李瑞冰⁴

(1. 邢台市中心医院 麻醉科, 河北 邢台 054000; 2. 邢台市人民医院 麻醉科, 河北 邢台 054031; 3. 邢台市中心医院 手麻科, 河北 邢台 054000; 4. 邢台市中心医院 心血管外科, 河北 邢台 054000)

摘要: 目的 探讨肺保护通气策略中不同呼气末正压(PEEP)水平联合小潮气量对全身麻醉肺叶切除术后单肺通气患者肺损伤的作用, 为临床优化通气方案提供依据。 **方法** 选取2022年3月—2025年3月在邢台市中心医院进行肺叶切除术的200例患者, 采用随机数字表法分为对照组与观察组, 各100例。对照组患者接受低水平呼气末正压联合小潮气量治疗, 观察组患者接受高水平呼气末正压联合小潮气量治疗。比较两组患者单肺通气前(T_0)、通气60 min(T_1)、手术结束时(T_2)、术后第1天(T_3)时的平均动脉压、心率、心指数(CI)、血管外肺水指数(EVLWI)。比较 T_0 、 T_3 时的第一秒用力呼气容积(FEV₁)和用力肺活量(FVC)。比较两组患者手术情况、单肺通气情况及围手术期手术相关指标。统计两组患者不良反应发生情况及总住院时间。 **结果** 观察组与对照组 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 的平均动脉压、心率、CI、EVLWI比较, 采用重复测量设计的方差分析, 结果: ①不同时间点的平均动脉压比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$); 不同时间点的心率、CI、EVLWI比较, 差异无统计学意义($P > 0.05$)。②两组的平均动脉压、心率、CI比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 观察组平均动脉压、心率较低, CI较高, 相对镇静效果较好; 两组的EVLWI比较, 差异无统计学意义($P > 0.05$)。③两组平均动脉压、心率、CI、EVLWI变化趋势比较, 差异无统计学意义($P > 0.05$)。观察组与对照组 T_0 、 T_3 的FEV₁、FVC、FEV₁/FVC比较, 采用重复测量设计的方差分析, 结果: ①不同时间点的FEV₁、FVC、FEV₁/FVC比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$); ②两组的FEV₁、FVC、FEV₁/FVC比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 观察组FEV₁、FVC、FEV₁/FVC较高, 相对肺功能情况较好; ③两组FEV₁、FVC、FEV₁/FVC变化趋势比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$)。对照组总住院时间和手术时间均高于观察组, 对照组单肺通气时间低于观察组($P < 0.05$)。对照组潮气量、吸入氧浓度、气道峰压、气道平均压均高于观察组($P < 0.05$)。观察组与对照组 T_1 、 T_3 时的输液量、尿量、胸腔引流量比较, 采用重复测量设计的方差分析, 结果: ①不同时间点的输液量、尿量、胸腔引流量比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$); ②两组的输液量、尿量、胸腔引流量比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 观察组输液量较高, 观察组尿量、胸腔引流量较低, 观察组围手术期恢复情况相对较好; ③两组输液量、尿量变化趋势比较, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 两组胸腔引流量变化趋势比较, 差异无统计学意义($P > 0.05$)。观察组不良反应总发生率低于对照组($P < 0.05$)。 **结论** 高水平呼气末正压联合小潮气量通气可显著降低肺叶切除术患者术后不良反应发生率, 改善氧合功能及肺顺应性, 缩短住院时间, 其机制可能与降低驱动压、减少炎症因子释放及优化通气/血流比例有关。

关键词: 肺叶切除术; 肺保护通气策略; 单肺通气; 呼气末正压; 术后肺损伤

中图分类号: R

文献标识码: A

Effect of lung-protective ventilation strategy on postoperative lung injury in patients undergoing one-lung ventilation for lobectomy under general anesthesia*

收稿日期: 2025-05-26

* 基金项目: 河北省重点研发计划自筹项目(No: 172777200); 邢台市重点研发计划自筹项目(No: 2024ZC101)

Zhang Qian¹, Zhang Zi-tan², Wang huan³, Meng Cheng³, Li Rui-bing⁴

(1. Department of Anesthesiology, Xingtai Central Hospital, Xingtai, Hebei 054000, China; 2. Department of Anesthesiology, Xingtai People's Hospital, Xingtai, Hebei 054031, China; 3. Department of Operation and Anaesthesia, Xingtai Central Hospital, Xingtai, Hebei 054000, China; 4. Department of Cardiovascular surgery, Xingtai Central Hospital, Xingtai, Hebei 054000, China)

Abstract: Objective To investigate the preventive effect of different levels of positive end-expiratory pressure (PEEP) combined with low tidal volume, as part of a lung-protective ventilation strategy, on postoperative lung injury in patients undergoing one-lung ventilation (OLV) for lobectomy under general anesthesia, and to provide a basis for optimizing clinical ventilation protocols. **Methods** This prospective study enrolled 200 patients who underwent lobectomy at Xingtai Central Hospital from March 2022 to March 2025. Patients were randomly assigned to either the control group or the observation group ($n = 100$ per group). The control group received low PEEP combined with low tidal volume ventilation, while the observation group received high PEEP combined with low tidal volume ventilation. Mean arterial pressure (MAP), heart rate (HR), cardiac index (CI), and extravascular lung water index (EVLWI) were recorded at four time points: before OLV (T_0), at 60 minutes of OLV (T_1), at the end of surgery (T_2), and on postoperative day 1 (T_3). Pulmonary function was compared between groups before surgery and on postoperative day 1. Surgical parameters, OLV duration, and perioperative indices were recorded, and the incidence of adverse events and total hospital stay were statistically analyzed. **Results** Comparisons of mean arterial pressure (MAP), heart rate (HR), cardiac index (CI), and extravascular lung water index (EVLWI) at time points T_0 , T_1 , T_2 , and T_3 between the observation group and the control group were performed using repeated - measures analysis of variance (ANOVA). The results were as follows: (1) Regarding MAP, there was a statistically significant difference among different time points ($P < 0.05$); however, no statistically significant differences were observed in HR, CI, or EVLWI among different time points ($P > 0.05$). (2) Statistically significant differences were found in MAP, HR, and CI between the two groups ($P < 0.05$). Specifically, the observation group had lower MAP and HR, as well as a higher CI, indicating a relatively better sedative effect. No statistically significant difference was detected in EVLWI between the two groups ($P > 0.05$). (3) There were no statistically significant differences in the change trends of MAP, HR, CI, or EVLWI between the two groups ($P > 0.05$). The differences in forced expiratory volume in 1 second (FEV₁), forced vital capacity (FVC), and FEV₁/FVC ratio at time points T_0 and T_3 between the observation group and the control group were also analyzed using repeated - measures ANOVA. The results showed: (1) Statistically significant differences were present in FEV₁, FVC, and FEV₁/FVC ratio among different time points ($P < 0.05$). (2) Inter - group comparisons revealed statistically significant differences in FEV₁, FVC, and FEV₁/FVC ratio between the two groups ($P < 0.05$). The observation group exhibited higher values of FEV₁, FVC, and FEV₁/FVC ratio, suggesting relatively better pulmonary function. (3) There were statistically significant differences in the change trends of FEV₁, FVC, and FEV₁/FVC ratio between the two groups ($P < 0.05$). The total hospital stay and operation time in the control group were both longer than those in the observation group, whereas the one - lung ventilation time in the control group was shorter than that in the observation group ($P < 0.05$). The tidal volume, inspired oxygen concentration, peak airway pressure, and mean airway pressure in the control group were all higher than those in the observation group ($P < 0.05$). The differences in fluid infusion volume, urine output, and thoracic drainage volume at time points T_1 and T_3 between the observation group and the control group were analyzed by repeated - measures ANOVA. The results were: (1) Statistically significant differences were found in fluid infusion volume, urine output, and thoracic drainage volume among different time points ($P < 0.05$). (2) Inter - group comparisons showed statistically significant differences in fluid infusion volume, urine output, and thoracic drainage volume between the two groups ($P < 0.05$). Specifically, the observation group had a higher fluid infusion volume, along with lower urine output and thoracic drainage volume, indicating a relatively better perioperative recovery. (3) There were statistically significant differences were observed in the change trends of fluid infusion volume and urine output between the two groups ($P < 0.05$), while no statistically significant difference was found in the change trend of thoracic drainage volume between the two groups ($P > 0.05$). The total incidence of adverse reactions in the observation group was lower than that in the control group ($P < 0.05$). **Conclusion** High PEEP combined with low tidal volume ventilation significantly reduced the incidence of postoperative adverse events in

patients undergoing lobectomy, improved oxygenation and lung compliance, and shortened hospital stay. The underlying mechanisms may include reduced driving pressure, decreased release of inflammatory mediators, and optimized ventilation-perfusion matching.

Keywords: lobectomy; lung-protective ventilation strategy; one-lung ventilation; positive end-expiratory pressure; postoperative lung injury

肺叶切除术是治疗肺部良性及恶性疾病的重要术式,术后肺部并发症发生率为15%~30%,可显著延长患者住院时间并增加病死率^[1]。单肺通气是胸科手术的常规呼吸管理策略,虽能优化术野暴露,但其非生理性通气易诱发肺泡塌陷、局部过度膨胀及炎症因子释放,从而引发机械通气相关肺损伤(如术后肺损伤)^[2]。研究表明,传统高潮气量(>8 mL/kg)联合低呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)的通气策略可能加剧肺泡剪切力损伤,而肺保护性通气策略通过小潮气量(6~8 mL/kg理想体重)和个体化PEEP设置,可有效降低驱动压、改善氧合及肺顺应性^[3],但其对术后远期肺功能的影响仍需进一步验证。目前,肺保护性通气策略在单肺通气中的应用存在争议:一方面,低PEEP(<5 cmH₂O)可能无法维持肺泡稳定性,增加术后肺不张风险;另一方面,过高PEEP(>10 cmH₂O)可能加重循环负荷并导致气压伤。研究显示,基于呼吸力学参数(如动态顺应性、驱动压)的个体化PEEP调节策略可能改善肺保护效果,但尚需更多临床研究验证其实际效益^[4]。此外,术中潮气量与PEEP的协同作用对肺内分流、炎症反应及术后肺功能恢复的具体机制尚未明确。本研究通过前瞻性随机对照试验,比较肺叶切除术单肺通气期间高水平PEEP(7~10 cmH₂O)与低水平PEEP(4~6 cmH₂O)联合低潮气量通气的效果,旨在分析不同PEEP水平对术后肺损伤标志物、氧合功能及炎症因子的影响,为胸科手术肺保护策略的优化提供循证依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2022年3月—2025年3月在邢台市中心医院进行肺叶切除术的200例患者,采用随机数字表法分为对照组与观察组,各100例。纳入标准:①确诊为须行肺叶切除术的肺部疾病(包括原发性肺癌、支气管扩张、炎性假瘤或肺良性肿瘤等),且经影像学(胸部CT)及病理学检查明确诊断;②术前评估符合单肺通气及胸腔镜或开胸肺叶切除术的手术适应证;③年龄>18岁;④美国麻醉医师学会(American Society of Anesthesiologists, ASA)分级为I~Ⅲ级,可耐受全身麻醉及单肺通气。排除标准:①合并严重心功能不全[纽约心脏协会(New York Heart Association, NYHA)分级>Ⅲ级]、肾功能不全[估算肾小球滤过率(estimated glomerular filtration rate, eGFR)<30 mL/min]、未控制的糖尿病或凝血功能障碍;②活动性感染、未控制的哮喘或慢性阻塞性肺疾病[第一秒用力呼气容积(forced expiratory volume in one second, FEV₁)<50%预计值];③既往同侧肺叶切除史或胸膜剥脱术史;④术中因解剖异常(如肺门淋巴结融合固定)或出血须中转开胸。本研究经医院医学伦理委员会审核并批准(2024[093]),患者及其家属均知情同意并签署知情同意书。对照组与观察组的性别构成、年龄、体质质量指数、ASA分级和手术部位构成比较,经 χ^2 /t检验,差异均无统计学意义($P>0.05$),具有可比较性。见表1。

表1 两组一般资料比较 (n=100)

组别	男/女/例	年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$)	体质质量指数/(kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	ASA分级/例			手术部位/例	
				I级	II级	III级	左	右
对照组	63/37	56.48 ± 6.35	23.65 ± 2.48	17	68	15	24	76
观察组	59/41	57.94 ± 7.64	23.22 ± 3.06	13	78	9	20	80
χ^2 /t值	0.336	1.470	1.092		2.718		0.466	
P值	0.562	0.143	0.276		0.257		0.495	

1.2 方法

所有患者术前常规禁食水,入室后行多参数监护[包括12导联心电图、动脉血压监测、心率、血氧饱和度(oxygen saturation, SpO_2)及脑电双频指数(bispectral index, BIS)],开放外周静脉通路,局部麻醉下桡动脉穿刺置管监测有创动脉压。麻醉诱导采用咪达唑仑0.05 mg/kg、舒芬太尼1 μ g/kg、丙泊酚2~4 mg/kg及罗库溴铵0.6 mg/kg静脉注射。双腔支气管导管定位后行机械通气:双肺通气阶段设定潮气量10 mL/kg(基于预测理想体重,男性公式: $50 + 0.91 \times [\text{身高(cm)} - 152.4]$,女性: $45.5 + 0.91 \times [\text{身高(cm)} - 152.4]$),呼吸频率10~12次/分,吸呼比1:2,吸入氧浓度(fraction of inspired oxygen, FiO_2)80%。单肺通气期间根据分组调整通气参数,潮气量按小潮气量策略设定:观察组(6.46 ± 0.38)mL/kg,对照组(7.71 ± 0.69)mL/kg。PEEP水平在单肺通气开始后10 min内设置,通过观察气道平台压(维持<30 cmH₂O)和 SpO_2 >94%确认安全性。以驱动压(ΔP =平台压-PEEP)为核心指标,初始PEEP=5 cmH₂O,每10 min调整1次(± 2 cmH₂O),目标维持 ΔP <15 cmH₂O且平台压(P_{plat})<30 cmH₂O;维持呼气末二氧化碳分压35~45 mmHg, FiO_2 50%~80%。麻醉维持采用丙泊酚2~4 mg/(kg·h)靶控输注联合瑞芬太尼0.25~0.4 μ g/(kg·h)持续泵注,间断静脉注射顺式阿曲库铵,BIS值维持在40~60。术中超声引导下T₄、T₅胸椎旁神经阻滞,注入1%罗哌卡因20 mL。术中每30 min行肺复张手法:维持气道平台压35~40 cmH₂O持续30 s。术后拔管指征为意识清醒、肌力恢复,镇痛采用PCIA模式(配方与给药时间标准化)。针对术中血流动力学波动,按需使用血管活性药物及输血治疗。

1.3 评价指标

1.3.1 血流动力学指标 通过有创动脉血压监测(如桡动脉置管连接压力传感器)或无创血压计连续测量,记录收缩压与舒张压的动态变化。分别计算单肺通气前(T_0)、通气60 min(T_1)、手术结束(T_2)、术后第1天(T_3)时的平均动脉压。平均动脉压=舒张压+1/3(收缩压-舒张压)。心电监护仪连续记录心率,观察术中及术后窦性心律稳定性。通过脉搏指示连续心排出量(pulse indicator continuous cardiac output, PiCCO)监测仪或超声心动图测量心

输出量(cardiac output, CO),结合体表面积(body surface area, BSA)计算心指数(cardiac index, CI), $CI = CO/BSA$ [正常值2.5~4.0 L/(min·m²)].采用PiCCO监测技术,经中心静脉导管注射低温生理盐水(5 mL/kg),通过热稀释法测量大动脉温度变化曲线,计算血管外肺水指数(extravascular lung water index, EVLWI), $EVLWI = \text{血管外肺水(EVLW)}/\text{体重(kg)}$ 。

1.3.2 肺功能指标 分别检测 T_0 、 T_3 时 FEV_1 和用力肺活量(forced vital capacity, FVC)。采用德国耶格Master Screen肺功能仪进行标准用力呼气测试:患者取立位,夹鼻后深吸气至肺总量位,以最大爆发力呼气至残气位,记录 FEV_1 和FVC,计算 FEV_1/FVC 。

1.3.3 手术相关参数 ①总住院时间:记录患者从入院至出院的总天数;②手术时间:记录从手术开始至手术结束的时间;③麻醉时间:记录从麻醉开始至麻醉结束的时间;④单肺通气时间:麻醉记录单标注单肺通气开始与结束时间,精确至分钟;⑤潮气量:呼吸机屏幕实时显示潮气量(mL/kg理想体重);⑥吸入氧浓度:通过呼吸机监测并记录吸入氧浓度;⑦气道压力:呼吸机屏幕实时显示气道峰压、气道平均压。

1.3.4 术中与术后监测指标 ①术中失血量:吸引器收集血量称重法(1 g ≈ 1 mL)或容量法(引流瓶刻度记录);② T_1 、 T_3 时的输液量与尿量:输液泵累计输液量(mL),导尿管记录每小时尿量(mL/h);③ T_1 、 T_3 时的胸腔引流量:胸腔引流瓶刻度测量,术后24 h引流量>500 mL需排查胸腔内出血或肺漏气。

1.4 统计学方法

数据分析采用SPSS 26.0统计软件。计数资料以构成比或率(%)表示,比较用 χ^2 检验;计量资料以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,比较用t检验或重复测量设计的方差分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组不同时间点的平均动脉压、心率、CI、EVLWI比较

观察组与对照组 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 的平均动脉压、心率、CI、EVLWI比较,采用重复测量设计的方差分析,结果:①不同时间点的平均动脉压比较,差异有统计学意义($F = 4.647$, $P = 0.004$);不同时间点的心率、CI、EVLWI比较,差异均无统计学意义

($F=2.405, 1.989, 1.293, P=0.066, 0.117, 0.276$)。②两组的平均动脉压、心率、CI比较,差异均有统计学意义($F=19.974, 4.496, 4.243, P=0.000, 0.035, 0.041$),观察组平均动脉压、心率较低,CI较高,相对镇静效果较好;两组的EVLWI比较,差异无统计

学意义($F=3.259, P=0.073$)。③两组平均动脉压、心率、CI、EVLWI变化趋势比较,差异均无统计学意义($F=1.216, 0.819, 0.142, 1.035, P=0.305, 0.484, 0.935, 0.377$)。见表2。

表2 两组患者不同时间点的平均动脉压、心率、CI、EVLWI比较 ($n=100, \bar{x} \pm s$)

组别	平均动脉压/mmHg				心率/(次/min)			
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
对照组	83.65 ± 8.91	84.88 ± 8.36	86.98 ± 7.21	86.95 ± 6.98	73.25 ± 7.68	74.25 ± 7.83	74.11 ± 7.44	73.98 ± 5.76
观察组	82.01 ± 8.35	83.78 ± 7.66	84.25 ± 6.54	83.29 ± 6.68	71.32 ± 7.87	73.52 ± 8.14	72.21 ± 7.37	73.87 ± 5.12
组别	CI/[L/(min·m ²)]				EVLWI/(mL/kg)			
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
对照组	2.93 ± 0.55	2.98 ± 0.34	2.91 ± 0.36	3.01 ± 0.43	6.14 ± 1.20	6.25 ± 1.13	6.57 ± 1.24	6.33 ± 1.15
观察组	3.02 ± 0.63	3.05 ± 0.32	2.98 ± 0.31	3.04 ± 0.41	6.14 ± 1.19	6.20 ± 1.21	6.18 ± 1.18	6.16 ± 1.33

2.2 两组不同时间点的肺功能比较

观察组与对照组T₀、T₃的FEV₁、FVC、FEV₁/FVC比较,采用重复测量设计的方差分析,结果:①不同时间点的FEV₁、FVC、FEV₁/FVC比较,差异均有统计学意义($F=40.711, 77.542, 34.189, P=0.000, 0.000, 0.000$);②两组的FEV₁、FVC、FEV₁/FVC比

较,差异均有统计学意义($F=9.766, 12.806, 159.673, P=0.002, 0.000, 0.000$),观察组FEV₁、FVC、FEV₁/FVC较高,相对肺功能情况较好;③两组FEV₁、FVC、FEV₁/FVC变化趋势比较,差异均有统计学意义($F=14.705, 3.963, 352.311, P=0.000, 0.048, 0.000$)。见表3。

表3 两组患者不同时间点肺功能比较 ($n=100, \bar{x} \pm s$)

组别	FEV ₁ /L		FVC/L		FEV ₁ /FVC/%	
	T ₀	T ₃	T ₀	T ₃	T ₀	T ₃
对照组	2.19 ± 0.16	2.03 ± 0.14 [†]	2.49 ± 0.21	2.27 ± 0.18 [†]	87.95 ± 2.43	81.53 ± 2.11 [†]
观察组	2.18 ± 0.17	2.14 ± 0.16 [†]	2.53 ± 0.24	2.39 ± 0.22 [†]	86.17 ± 3.15	89.54 ± 2.34 [†]

注:†与同组T₀时比较, $P < 0.05$ 。

2.3 两组手术情况比较

两组总住院时间、手术时间和单肺通气时间比较,经t检验,差异均有统计学意义($P < 0.05$);对照

组总住院时间和手术时间均高于观察组,对照组单肺通气时间低于观察组。两组麻醉时间比较,经t检验,差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表4。

表4 两组患者手术情况比较 ($n=100, \bar{x} \pm s$)

组别	总住院时间/d	手术时间/min	麻醉时间/min	单肺通气时间/min
对照组	11.32 ± 2.45	216.35 ± 28.11	173.35 ± 30.11	110.37 ± 2.56
观察组	10.56 ± 1.63	207.31 ± 25.94	175.32 ± 25.48	118.06 ± 2.51
t值	2.853	2.363	0.499	21.449
P值	0.011	0.019	0.618	0.000

2.4 两组单肺通气情况比较

两组潮气量、吸入氧浓度、气道峰压、气道平均压

比较,经t检验,差异均有统计学意义($P < 0.05$);对照组潮气量、吸入氧浓度、气道峰压、气道平均压

均高于观察组。见表5。

表5 两组患者单肺通气情况比较 (n=100, $\bar{x} \pm s$)

组别	潮气量/(mL/kg)	吸入氧浓度/%	气道峰压/cmH ₂ O	气道平均压/cmH ₂ O
对照组	7.71 ± 0.69	85.67 ± 18.64	24.53 ± 2.11	9.88 ± 1.43
观察组	6.46 ± 0.38	59.33 ± 14.06	20.46 ± 1.86	7.64 ± 0.86
t值	15.869	11.281	14.470	13.424
P值	0.000	0.000	0.000	0.000

2.5 两组围手术期手术相关指标比较

两组术中失血量比较,经t检验,差异有统计学意义($t=7.885, P=0.000$);对照组术中失血量高于观

察组。观察组与对照组T₁、T₃时的输液量、尿量、胸腔引流量比较,采用重复测量设计的方差分析,结果:①不同时间点的输液量、尿量、胸腔引流量比较,差异均有统计学意义($F=2379.200, 7830.068, 937.541$,均 $P=0.000$);②两组的输液量、尿量、胸腔引流量比较,差异均有统计学意义($F=70.289, 738.340, 837.598$,均 $P=0.000$),观察组输液量较高,观察组尿量、胸腔引流量较低,观察组围手术期恢复情况相对较好;③两组输液量、尿量变化趋势比较,差异均有统计学意义($F=402.617$ 和 327.800 ,均 $P=0.000$),两组胸腔引流量变化趋势比较,差异无统计学意义($F=0.883, P=0.348$)。见表6。

表6 两组患者围手术期手术相关指标比较 (n=100, mL, $\bar{x} \pm s$)

组别	术中失血量	输液量		尿量		胸腔引流量	
		T ₁	T ₃	T ₁	T ₃	T ₁	T ₃
对照组	84.03 ± 30.11	1 235.29 ± 255.48	2 045.38 ± 346.84 [†]	307.49 ± 26.37	2 155.34 ± 251.79 [†]	331.49 ± 75.43	565.37 ± 67.54 [†]
观察组	55.67 ± 19.67	436.95 ± 30.11	2 379.31 ± 355.19 [†]	155.37 ± 31.94	1 375.49 ± 231.97 [†]	135.69 ± 38.73	355.64 ± 95.13 [†]

注:†与同组T₀时比较, $P < 0.05$ 。

2.6 两组不良反应比较

对照组与观察组不良反应总发生率比较,经 χ^2 检验,差异有统计学意义($\chi^2=10.010, P=0.002$);观察组不良反应总发生率低于对照组。见表7。

表7 两组不良反应比较 (n=100)

组别	低氧血症/例	肺不张/例	肺部感染/例	总计/例	总发生率/%
对照组	8	6	4	18	18.00
观察组	1	3	0	4	4.00

3 讨论

肺癌是全球范围内发病率及死亡率最高的恶性肿瘤之一,2025年全球肺癌新发病例预计达220万例,其中非小细胞肺癌占比约85%^[5]。早期非小细胞肺癌患者接受肺叶切除术虽为标准治疗,但术后肺部并发症发生率高达15%~30%,显著增加住院时间及医疗负担^[6-7]。传统肺叶切除术需广泛切除肺组织,可能破坏肺功能储备,尤其对合并慢性阻塞性肺疾病或高龄患者风险更高^[8]。近年来,亚肺叶切除术(包括肺段切除及楔形切除)因保留更多肺功能逐渐受到关注,但其局部复发率较高

(约11%)的缺陷限制了临床应用^[9]。针对上述矛盾,肺保护性通气策略通过小潮气量联合PEEP显著降低呼吸机相关性肺损伤,但其对术后远期肺功能的影响仍存争议。最新研究表明,个体化PEEP滴定(如基于驱动压或电阻抗断层成像)可优化肺顺应性,减少炎症因子释放,从而改善氧合及降低术后肺不张风险^[10-12]。此外,胸腔镜微创技术的普及进一步减少了手术创伤,但其单肺通气期间仍面临非生理性通气导致的肺泡塌陷及再灌注损伤。

本研究结果显示,观察组在术后肺功能、氧合效率及安全性方面均显著优于对照组。观察组采用高水平PEEP(7~10 cmH₂O),单肺通气期间,非通气侧肺塌陷导致通气/血流比例失调,而高水平PEEP可维持通气肺泡稳定性,减少肺不张,从而改善氧合指数($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$)并降低肺内分流率^[13-14]。本研究观察组术后T₃时FEV₁/FVC显著高于对照组,提示高水平PEEP可能通过优化肺顺应性减少术后限制性通气障碍^[15]。动物实验表明,PEEP可减少机械通气诱导的炎症因子(如白细胞介素-6、肿瘤坏死因子- α)释放,降低肺泡上皮细胞损伤^[16]。尽管本研究未直接检测炎性标志物,但观察组术中失血量减少及术后胸腔引流量降低,间接提示其可能通过

减轻肺组织炎症反应减少出血风险。两组均采用小潮气量($6 \sim 8 \text{ mL/kg}$),但观察组进一步限制潮气量至 $5.46 \pm 0.38 \text{ mL/kg}$,结合高水平PEEP,形成更严格的肺保护策略^[17]。降低驱动压(ΔP), $\Delta P = \text{潮气量}/\text{动态顺应性}$,观察组潮气量更低且PEEP更高,可能显著降低 ΔP (本研究中观察组气道峰压 $20.46 \text{ cmH}_2\text{O}$ vs 对照组 $24.53 \text{ cmH}_2\text{O}$),从而减少容积伤风险。维持肺泡复张,高水平PEEP可对抗单肺通气期间肺泡周期性塌陷-复张,减少剪切力损伤^[18]。研究显示,PEEP $\geq 7 \text{ cmH}_2\text{O}$ 时,肺泡复张容积增加更显著,且术后肺不张发生率降低^[19]。观察组总住院时间及手术时间更短,可能与更优的氧合状态及更少的术中并发症(如低氧血症)相关。观察组不良反应发生率显著低于对照组,提示高水平PEEP联合小潮气量可降低气道压伤、低血压等风险。但需注意,本研究中对照组采用低PEEP($4 \sim 6 \text{ cmH}_2\text{O}$),而部分研究指出过低PEEP($<5 \text{ cmH}_2\text{O}$)可能增加肺不张风险^[20]。

观察组术中失血量显著减少的核心机制与个体化PEEP对肺血管阻力的动态调节密切相关。适度PEEP可通过维持肺泡募集状态,降低肺血管塌陷区的低氧性肺血管收缩强度,从而均衡双肺血流分布^[21]。当PEEP超过最佳阈值,肺泡过度膨胀将压迫肺泡毛细血管,增加肺血管阻力;而PEEP不足则导致通气肺区域萎缩,同样升高肺血管阻力。本研究中个体化PEEP的精准滴定,使PVR处于“U型曲线”底部(即最低阻力区间),从而减少非通气侧肺血流灌注(类似的肺动脉部分阻断效应),降低手术野渗血^[22-23]。

本研究聚焦于肺叶切除术单肺通气期间高水平PEEP($7 \sim 10 \text{ cmH}_2\text{O}$)联合小潮气量的疗效验证,通过维持较高PEEP水平(较传统肺保护性通气策略提升 $3 \sim 5 \text{ cmH}_2\text{O}$),增强肺泡稳定性,减少周期性塌陷-复张损伤;结合小潮气量($5.46 \pm 0.38 \text{ mL/kg}$),进一步降低驱动压($\Delta P = \text{潮气量}/\text{动态顺应性}$),从机制上抑制容积伤及生物伤;动态监测气道峰压及平均压(均 $<25 \text{ cmH}_2\text{O}$),避免气压伤风险。研究结果显示,观察组 FEV_1/FVC 比值显著优于对照组,提示该策略可有效改善肺功能储备,为术后快速康复提供生理基础^[24-25]。本研究中采用的个体化PEEP滴定策略,相较于传统固定高水平PEEP(如常规设定 $10 \sim$

$15 \text{ cmH}_2\text{O}$),其核心差异在于精准匹配患者呼吸力学特性。固定PEEP虽操作简便,但忽视了个体差异(如胸壁顺应性、腹腔压力及肺可复张性),易导致肺泡过度膨胀(加重炎症)或复张不足(增加肺不张风险)。而个体化PEEP滴定通过动态监测驱动压、肺顺应性或跨肺压等参数,实时优化肺泡开放与血流动力学平衡。本研究的推广价值在于简化操作流程并提升临床可行性。本研究采用的阶梯式递增/递减法(以 $2 \text{ cmH}_2\text{O}$ 为梯度调整,以最佳 C_{dyn} 或最低 ΔP 为目标),仅需常规呼吸机监测参数,无需特殊设备。

综上所述,高水平PEEP联合小潮气量通气通过改善氧合、降低驱动压及炎性损伤,显著减少肺叶切除术患者术后肺损伤发生率,为胸科手术肺保护策略提供了新依据。推荐肺叶切除术单肺通气期间采用PEEP $7 \sim 10 \text{ cmH}_2\text{O}$ 联合潮气量 $5 \sim 6 \text{ mL/kg}$,并维持气道峰压 $<25 \text{ cmH}_2\text{O}$ 。尽管本研究PEEP设置参考了急性呼吸窘迫综合征保护性通气原则($\Delta P < 15 \text{ cmH}_2\text{O}$),但肺叶切除术患者肺顺应性通常高于急性呼吸窘迫综合征患者,因此需个体化调整PEEP以避免过度膨胀。个体化PEEP通过优化肺血管阻力与低氧性肺血管收缩的平衡减少术中失血,但未检测氧合指数及炎症指标限制了机制探讨的深度。未来研究需整合血流动力学-炎症-氧合多维监测,构建更完备的机械通气干预证据链。

参 考 文 献 :

- [1] ZHOU C, SONG S, FU J F, et al. Protecting the non-operative lobe/s of the operative lung can reduce the pneumonia incidence after thoracoscopic lobectomy: a randomised controlled trial[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 9442.
- [2] 孔婧, 张欢欢, 姚晶曼, 等. 单肺通气下肺叶切除术应用气管内右美托咪定给药对肺癌患者肺保护、全身麻醉苏醒期的影响[J]. 临床和实验医学杂志, 2023, 22(6): 662-666.
- [3] WANG Q Y, ZHOU Y, WANG M R, et al. Effects of starting one lung ventilation and applying individualized PEEP right after patients are placed in lateral decubitus position on intraoperative oxygenation for patients undergoing thoracoscopic pulmonary lobectomy: study protocol for a randomized controlled trial[J]. Trials, 2024, 25(1): 500.
- [4] ZHU J Y, WEI B Y, WU L L, et al. Thoracic paravertebral block for perioperative lung preservation during VATS pulmonary surgery: study protocol of a randomized clinical trial[J]. Trials, 2024, 25(1): 74.

- [5] YAO W Y, YANG B, WANG W L, et al. Effect of positive end-expiratory pressure (PEEP) titration in elderly patients undergoing lobectomy[J]. *Med Sci Monit*, 2022, 28: e938225.
- [6] 刘世建, 卢彬, 江倩, 等. 两种胸腔镜肺叶切除术个体化呼气末正压通气方法的比较[J]. *腹腔镜外科杂志*, 2024, 29(9): 652-656.
- [7] 高清贤, 程雪淋, 王青青, 等. 无呼吸性气流通气联合60%吸入氧浓度对单肺通气手术患者的肺保护作用[J]. *中国现代手术学杂志*, 2024, 28(5): 404-410.
- [8] LI S S, SANA S, WANG D. Remimazolam mitigates oxidative stress response in patients undergoing one-lung ventilation[J]. *Front Surg*, 2025, 12: 1456827.
- [9] PICCIONI F, LANGIANO N, BIGNAMI E, et al. One-lung ventilation and postoperative pulmonary complications after major lung resection surgery. a multicenter randomized controlled trial[J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2023, 37(12): 2561-2571.
- [10] SHIRAISHI T, OBARA S, HAKOZAKI T, et al. A case requiring re-thoracotomy due to a significant reduction of tidal volume after commencement of chest tube drainage under pressure control ventilation following lower lobectomy[J]. *J A Clin Rep*, 2022, 8(1): 36.
- [11] 张建友, 孙鲁瑜, 唐苏红, 等. 术前鞘内注射吗啡对老年患者胸腔镜肺叶切除术后心肌损伤的影响[J]. *临床麻醉学杂志*, 2024, 40(11): 1139-1144.
- [12] 常江华, 荣君, 强光辉. 胸腔镜肺段切除与胸腔镜肺叶切除治疗早期肺癌的临床观察[J]. *中国临床研究*, 2023, 36(6): 856-859.
- [13] 李梦婷, 卢静. 个体化呼气末正压对胸外科手术患者肺功能的影响[J]. *中国临床研究*, 2024, 37(12): 1875-1880.
- [14] 赵凯, 王跃斌, 丁志丹, 等. 肺移植术治疗终末期支气管扩张症7例临床分析[J]. *中华实用诊断与治疗杂志*, 2023, 37(5): 433-437.
- [15] 吴益杭, 陈文华, 林芩, 等. 肺静态顺应性导向最适呼气末正压对单肺通气氧合及肺内分流的影响[J]. *福建医科大学学报*, 2022, 56(3): 249-255.
- [16] KURODA S, SHIMIZU N, NISHIKUBO M, et al. Lobar shifting after lobectomy other than left upper lobectomy has a beneficial impact on postoperative pulmonary function[J]. *Surg Today*, 2025, 55(2): 257-264.
- [17] PEREZ HOLGUIN R A, OLECKI E J, WONG W G, et al. Outcomes after sublobar resection versus lobectomy in non-small cell carcinoma in situ[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2023, 165(3): 853-861.e3.
- [18] NAKAO M, SUZUKI A, ICHINOSE J, et al. Risk of death from other diseases in lung cancer patients after sublobar resection versus lobectomy[J]. *J Surg Oncol*, 2025, 131(3): 380-387.
- [19] GIMENEZ S C, CARRILHO M C, MALBOUSSON I M, et al. Effect of PEEP on lung aeration in pediatric patients after cardiac surgery: a CT-based study[J]. *Braz J Anesthesiol*, 2025, 75(4): 844623.
- [20] KARTHIK A R, GUPTA N, GARG R, et al. Comparison of lung aeration loss in open abdominal oncologic surgeries after ventilation with electrical impedance tomography-guided PEEP versus conventional PEEP: a pilot feasibility study[J]. *Korean J Anesthesiol*, 2024, 77(3): 353-363.
- [21] 刘克, 王宁, 陈丹, 等. 竖脊肌平面阻滞在老年胸腔镜肺叶切除术患者中的应用效果[J]. *中国现代医学杂志*, 2024, 34(12): 68-72.
- [22] 马娟, 张扬, 王梓, 等. 基于肺开放策略的个体化PEEP滴定对经尿道前列腺激光切除术老年患者术中胸腔液体水平的影响[J]. *中华麻醉学杂志*, 2024, 44(2): 140-144.
- [23] 孙志明, 张帅帅, 王晓萌, 等. 非气管插管胸腔镜肺叶切除术前TPVB及EB的术后镇痛效果及对血清炎症因子、疼痛介质水平影响[J]. *中国现代医学杂志*, 2024, 34(6): 66-73.
- [24] 黄琦萍, 颜景佳, 林益钦. 肺保护通气策略中应用递增PEEP肺复张法对腹腔镜结直肠癌手术呼吸力学及术后肺部并发症的影响[J]. *中国微创外科杂志*, 2025, 25(5): 268-274.
- [25] 易治国, 李琳, 邓建冬, 等. 基于快速康复外科理念的超声引导胸椎旁阻滞在胸腔镜肺叶切除术中的应用价值评估[J]. *中国现代医学杂志*, 2022, 32(14): 89-94.

(张蕾 编辑)

本文引用格式: 张倩, 张子檀, 王欢, 等. 肺保护通气策略对全身麻醉肺叶切除术后单肺通气患者肺损伤的作用研究[J]. *中国现代医学杂志*, 2025, 35(19): 65-72.

Cite this article as: ZHANG Q, ZHANG Z T, WANG H, et al. Effect of lung-protective ventilation strategy on postoperative lung injury in patients undergoing one-lung ventilation for lobectomy under general anesthesia[J]. *China Journal of Modern Medicine*, 2025, 35(19): 65-72.