

• 论 著 • DOI:10.3969/j.issn.1672-9455.2026.10.002

# 低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略对成年患者手术后肺部并发症影响的 Meta 分析\*

李百松<sup>1</sup>, 刘培慧<sup>2</sup>, 姜 珊<sup>3△</sup>, 赵胜利<sup>4</sup>

1. 黑龙江省大庆市人民医院麻醉科, 黑龙江大庆 163000; 2. 辽宁省葫芦岛市中心医院神经介入科, 辽宁葫芦岛 125000; 3. 黑龙江省大庆油田总医院麻醉科, 黑龙江大庆 163001; 4. 中国医科大学健康生命研究院, 辽宁沈阳 110012

**摘要:**目的 系统评价低潮气量联合适度呼气末正压(PEEP)的肺保护性通气策略对成年患者手术后肺部并发症及其他临床结局的影响。方法 计算机检索 PubMed、Embase、Cochrane Library、Web of Science 及中国知网、万方、维普和中国生物医学文献数据库, 检索时限为建库至 2025 年 6 月, 纳入比较低潮气量( $\leq 6\sim 8$  mL·kg<sup>-1</sup>)联合适度 PEEP 与常规容量通气的随机对照试验(RCT), 将术后肺部并发症设为主要结局, 住院期间病死率、住院总日数设为次要结局。采用 RevMan 5.4 和 Stata 18.0 进行 Meta 分析。二分类结局采用相对危险度(RR)及其 95%CI 作为效应量指标, 连续性结局采用均数差(MD)及其 95%CI 作为效应量指标。采用逐一剔除法进行敏感性分析, 并用 Begg 检验和 Egger 检验评估发表偏倚。结果 共纳入 9 项 RCT, 合计 7 592 例患者。主要结局分析显示, 低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略可降低术后肺部并发症发生风险, 合并效应量为  $RR=0.92(95\%CI:0.86\sim 0.99, P=0.020)$ , 研究间异质性较低( $I^2=0.0\%, P=0.622$ )。逐一剔除单项研究进行敏感性分析后, 合并效应量 RR 为  $0.91\sim 0.93$ , 95%CI 均未跨越或仅轻微接近 1.00。Begg 检验( $P=0.929$ )和 Egger 检验( $P=0.841$ )均未见明显发表偏倚。次要结局分析显示, 低潮气量联合适度 PEEP 组与对照组住院期间病死率比较, 差异无统计学意义( $RR=1.27, 95\%CI:0.70\sim 2.31, Z=0.78, P=0.433$ ), 研究间异质性较低( $I^2=0.0\%, P=0.417$ ); 2 组间住院总日数比较, 差异无统计学意义( $MD=0.01, 95\%CI:-0.07\sim 0.08, Z=0.26, P=0.794$ ), 研究间存在较高异质性( $I^2=71.9\%, P=0.014$ )。结论 现有 RCT 证据表明, 低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略可降低成年患者手术后肺部并发症发生风险, 但对住院期间病死率和住院总日数未显示明确影响。未来仍需更大样本、多中心、高质量 RCT 进一步验证其临床价值。

**关键词:**低潮气量; 呼气末正压; 肺保护性通气; 手术后肺部并发症; Meta 分析

中图分类号:R614

文献标志码:A

文章编号:1672-9455(2026)10-1306-08

## Impact of low tidal volume plus moderate PEEP lung-protective ventilation strategy on postoperative pulmonary complications in adult patients: a Meta-analysis\*

LI Baisong<sup>1</sup>, LIU Peihui<sup>2</sup>, JIANG Shan<sup>3△</sup>, ZHAO Shengli<sup>4</sup>

1. Department of Anesthesiology, Daqing Municipal People's Hospital, Daqing, Heilongjiang 163000, China; 2. Department of Neuro-Intervention, Huludao Municipal Central Hospital, Huludao, Liaoning 125000, China; 3. Department of Anesthesiology, Daqing Oilfield General Hospital, Daqing, Heilongjiang 163001, China; 4. Institute of Health and Life Sciences, China Medical University, Shenyang, Liaoning 110012, China

**Abstract: Objective** To systematically evaluate the impact of low tidal volume combined with moderate positive end-expiratory pressure (PEEP) lung-protective ventilation strategy on postoperative pulmonary complications and other clinical outcomes in adult surgical patients. **Methods** The computerized retrieval was conducted in PubMed, Embase, Cochrane Library, Web of Science and Chinese databases (CNKI, Wanfang, VIP, and CBM) from the establishment of the databases to June 2025. The randomized controlled trials (RCTs) of the comparisons between the low tidal volume ( $\leq 6\sim 8$  mL·kg<sup>-1</sup>) combined with moderate PEEP and conventional volume ventilation were included. The postoperative pulmonary complications were set as the

\* 基金项目:辽宁省教育厅课题(ZF2021012)。

作者简介:李百松,男,主治医师,主要从事临床麻醉的相关研究。△ 通信作者, E-mail: diio74294@163.com。

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1167.R.20260427.1130.004\(2026-04-28\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1167.R.20260427.1130.004(2026-04-28))

引用格式:李百松,刘培慧,姜珊,等.低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略对成年患者手术后肺部并发症影响的 Meta 分析[J].

primary outcome, and the in-hospital mortality and total length of hospital stay were set as the secondary outcomes. The Meta analysis was performed by using RevMan 5.4 and Stata 18.0. The binary outcomes adopted the relative risk (RR) and its 95%CI as the effect size indicator, and the continuous outcome adopted the mean difference (MD) and its 95%CI as the effect size indicator. The sensitivity analysis was conducted by adopting the one by one elimination method, and the publication bias was assessed by using the Begg's test and Egger's test. **Results** A total of 9 RCTs involving 7 592 patients were included. The primary outcome analysis showed that the lung-protective ventilation strategy of low tidal volume combined with moderate PEEP could reduce the risk of postoperative pulmonary complications, with a combined effect size of  $RR=0.92$  (95%CI: 0.86–0.99,  $P=0.020$ ), and low heterogeneity among studies ( $I^2=0.0\%$ ,  $P=0.622$ ). After sensitivity analysis by sequentially excluding individual studies, the combined effect size RR ranged 0.91–0.93, and the 95%CI did not cross or only slightly approach 1.00. Neither Begg's test ( $P=0.929$ ) nor Egger's test ( $P=0.841$ ) indicated significant publication bias. The secondary outcome analysis showed that there was no statistically significant difference in in-hospital mortality between the low tidal volume combined with moderate PEEP group and the control group ( $RR=1.27$ , 95%CI: 0.70–2.31,  $Z=0.78$ ,  $P=0.433$ ), with low heterogeneity among studies ( $I^2=0.0\%$ ,  $P=0.417$ ); there was no statistically significant difference in total length of hospital stay between the two groups ( $MD=0.01$ , 95%CI: -0.07–0.08,  $Z=0.26$ ,  $P=0.794$ ), but there was high heterogeneity among studies ( $I^2=71.9\%$ ,  $P=0.014$ ). **Conclusion** The current RCT evidence indicates that the lung-protective ventilation strategy of low tidal volume combined with moderate PEEP could reduce the risk of postoperative pulmonary complications in adult surgical patients, but it has no clear impact on in-hospital mortality and total length of hospital stay. Further validation through larger sample, multi-center and high-quality RCTs is still needed to confirm its clinical value.

**Key words:** low tidal volume; positive end-expiratory pressure; lung-protective ventilation; postoperative pulmonary complications; Meta-analysis

术中机械通气既是维持氧合与通气的必要手段,也可能成为术后肺部并发症的重要诱因<sup>[1-2]</sup>。最新的流行病学资料显示,术后肺部并发症的总体发生率为5%~33%,与住院时间延长、医疗费用增加及围术期病死率升高密切相关<sup>[3]</sup>。气道压力反复改变与潮气量过大可在正常肺组织内激活机械牵张诱导的炎症信号放大通路,引发呼吸机诱导性相关性肺炎(VILI),从而削弱术后肺储备并加重低氧血症<sup>[4]</sup>。

过去二十余年,急性呼吸窘迫综合征(ARDS)领域的随机对照试验(RCT)已明确低潮气量( $6\text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}$ 理想体重)策略能够显著改善患者预后,但该证据是否可无缝迁移至手术期仍存在争议<sup>[5-6]</sup>:围术期机械通气对象多为术前无明确肺实质损伤的患者,过低潮气量可能导致肺泡塌陷而增加肺内分流;而适当的呼气末正压(PEEP)虽有助于维持肺泡复张,却也可能因过度膨胀而引起循环不稳定。近年来,RCT对于低潮气量联合 PEEP 策略能否降低术后肺部并发症的结论并不一致。部分研究显示该策略具有保护作用,而部分研究未观察到显著获益;同时,各研究在样本量、手术类型及通气方案方面存在差异<sup>[7]</sup>。

围术期肺保护通气的核心是在保证氧合与通气的前提下,降低机械功与驱动压,从而减少容量相关性和不张/复张相关肺损伤;既往在腹部手术患者中的随机试验提示,低潮气量联合适度 PEEP 可降低术后肺部并发症发生风险并改善肺功能结局,提示该策

略在术前无明确肺实质损伤患者的手术场景中亦具有一定的可迁移性证据基础<sup>[8]</sup>。同时,驱动压作为综合反映肺顺应性与通气设置安全窗口的指标,与术后肺部并发症独立相关,已成为近年来优化个体化 PEEP 和通气设置的重要生理学指标。基于此,本研究系统整合 RCT 证据,量化“低潮气量+适度或个体化 PEEP”的总体效应,并在次要结局与稳健性分析基础上,为临床提出可执行的围术期通气建议。

本研究拟通过系统检索并严格筛选 RCT 证据,对低潮气量联合适度或个体化 PEEP 的肺保护通气策略在成人患者手术中的有效性与安全性进行荟萃分析,旨在:(1)量化其对术后肺部并发症的总体影响;(2)评估其对住院期间病死率及住院总日数等次要结局的影响;(3)结合纳入研究特征,以纳入研究所在国家所属地理区域、发表年份等因素为分组变量,对术后肺部并发症的异质性来源进行亚组分析,为麻醉科及围术期管理提供循证参考,并为未来高质量研究指明方向。

## 1 资料与方法

### 1.1 文献检索

检索 PubMed、Embase、Cochrane Library、Web of Science 及中国知网、万方、维普、中国生物医学文献数据库,检索时限为建库至 2025 年 6 月 1 日,检索策略采用主题词结合自由词的形式,并根据具体数据库调整检索式。英文检索词:lung protective ventilation、protective ventilation、protective

lung ventilation、protective mechanical ventilation、low、reduced、tidal volume、ventilat \*、respirat \*、low tidal volume ventilation、surgical procedures、postoperative pulmonary complication \*、PPC、pulmonary complication \*、respiratory function、oxygenat \*、gas exchange、randomized controlled trial、randomized、randomised、randomly、controlled clinical trial。中文检索词：低潮气量、肺保护通气、潮气量  $6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、呼气末正压、PEEP、个体化 PEEP、手术、围术期。根据不同数据库的检索语法规则，对检索词进行同义扩展，并采用布尔逻辑运算符进行组配。

**1.2 纳入标准** 纳入满足以下全部条件的 RCT：(1) 研究对象  $\geq 18$  岁、在全身麻醉+气管插管下实施手术的患者；(2) 干预措施为低潮气量 ( $\leq 6 \sim 8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$  预测体质量) + 适度 PEEP ( $\geq 5 \text{ cmH}_2\text{O}$ ) 的肺保护通气策略，并与常规容量通气比较；(3) 报告术后肺部并发症(主要判定窗以术后 7 d 为主，如设 30 d 随访亦记录)；(4) 能获取主要效应量所需的原始或可换算数据；(5) 全文为中文或英文。为统一组别命名，本文将干预措施“低潮气量 ( $\leq 6 \sim 8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 联合适度 PEEP ( $\geq 5 \text{ cmH}_2\text{O}$ ) 的肺保护性通气策略”简称为“低潮气量联合适度 PEEP 组”，将常规容量通气策略简称为“对照组”。

**1.3 排除标准** (1) 关键共同干预不均衡：除潮气量/PEEP 外，2 组存在系统性不同且无法分层/校正的呼吸策略(如仅一组常规实施高强度复张并被设计为核心干预)，可能干扰疗效判定；(2) 术前三组存在重度呼吸状态异常：明确 ARDS/急性呼吸衰竭或术前机械通气(非诱导气管插管所致)，其高基线风险会掩盖/放大围术期通气设置的影响；(3) 结局或方法学信息不足：无法获得术后肺部并发症构成/判定窗或主要效应量计算所需的关键数据；(4) 样本重叠或重复发表：与已纳入研究存在人群重叠且无法区分的重复报道，保留数据最完整/质量最高者；(5) 存在伦理或重大偏倚风险：存在重大伦理瑕疵或经偏倚风险评估为高风险且对主要结论有决定性影响。

**1.4 文献筛选和资料提取** 由 2 名经过培训的研究员独立进行文献的筛选、提取资料，并对内容进行核对，如有分歧，交给第 3 位独立研究员进行审查是否纳入。资料的提取内容包括第一作者、发表时间、干预措施、样本量、结局指标。

**1.5 纳入文献的质量评价** 采用 Cochrane 协作网的偏倚风险评价工具进行评价<sup>[9]</sup>。(1) 随机序列生成：评价随机化方法是否真正随机，以减少选择偏倚；(2) 分配隐藏：评价随机序列在分配前是否得到充分隐藏，以避免研究者对分组产生影响；(3) 受试者与研究人员盲法：评估结局评价者对受试者分组情况的知晓程度，以判断是否存在测量偏倚；(4) 结局评价者盲法：评估结局评价人员是否知晓分组情况，以降低测

量偏倚；(5) 不完整结局数据：评价各组随访完整性及缺失数据处理是否恰当，以减少失访偏倚；(6) 选择性结果报告：评价研究是否完整报告预设结局指标，以减少选择性报告偏倚；(7) 其他偏倚：评价是否存在基线不平衡、利益冲突或提前终止试验等其他可能影响结果的偏倚来源。

**1.6 主要结局** 研究将术后肺部并发症设为主要结局，纳入的事件包括肺炎、肺不张、胸腔积液、气胸、支气管痉挛/喘鸣、呼吸困难/低氧血症、呼吸衰竭(需无创或有创通气)及误吸相关肺炎等；主要判定时间窗为术后 7 d 内(若原研究报告 30 d 随访，则予以记录并用于敏感性分析)。

**1.7 次要结局** 除将术后肺部并发症设为主要结局外，预先设定的次要结局包括住院期间病死率(若原研究仅报告 30 d 病死率，则记录并在敏感性分析中说明)、住院总日数。

**1.8 统计学处理** 本文主要采用 Revman5.4 软件完成纳入文献的质量评价图绘制，利用 STATA18.0 软件进行数据分析。二分类结局采用相对危险度 (RR) 及其 95% CI 作为效应量指标；连续性结局采用均数差 (MD) 及其 95% CI 作为效应量指标；对于原始研究以  $M(P_{25}, P_{75})$  表示的连续变量，按常用方法换算为均数和标准差后纳入分析；采用  $\chi^2$  检验进行异质性检测，若  $P > 0.05$ 、 $I^2 < 50\%$  则采用固定效应模型，反之采用随机效应模型，并分析异质性来源，同时利用逐一剔除法进行敏感性分析，并以漏斗图及 Begg、Egger 检验评估发表偏倚。根据预设研究特征(研究所在地理区域、发表年份)对主要结局指标术后肺部并发症进行亚组分析：分类变量采用交互作用检验评估组间差异；针对发表年份采用趋势检验或 Meta 回归分析效应量随时间的变化趋势。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 文献检索结果** 经数据库检索共获得相关文献 870 篇，其中 PubMed 207 篇、Embase 208 篇、Cochrane Library 12 篇、Web of Science 349 篇、中国知网 16 篇、万方 21 篇、维普 47 篇、中国生物医学文献数据库 10 篇，未通过其他途径补充文献。去重后剩余 567 篇，阅读题目和摘要后排除 550 篇，剩余 17 篇进入全文评估。进一步阅读全文后排除 8 篇，其中临床注册方案 3 篇、综述 3 篇、二次分析文章 2 篇，最终纳入 9 项 RCT<sup>[10-18]</sup> 进入 Meta 分析。9 项 RCT 发表年份为 2014—2025 年，总样本量为 7 592 例，其中低潮气量联合适度 PEEP 组 3 789 例，对照组 3 803 例。研究涉及体外循环心脏手术、肺切除手术、开腹手术、腹腔镜/机器人手术及妇科肿瘤手术等。各研究均报告了术后肺部并发症，其中部分研究同时报告了住院期间病死率和住院总日数。纳入文献的基本特征见表 1。针对主要结局指标术后肺部并发症，根据纳入

研究所在国家所属地理区域,将研究分为亚洲组和欧美组;根据文献发表年份,分为 2014 年、2019 年、2023 年和 2025 年亚组。本研究的偏倚风险总体可接受:随机序列生成与分配隐藏多为低风险,少数因报告不足判为不明确;研究对象和研究人員盲法受干预特性

限制,较多研究为高风险;结局评价盲法总体良好,仅少数为高风险;结局数据完整性与选择性报告大多为低风险,偶见高风险;其他偏倚未见明确影响总体结论的问题,整体偏倚风险总体可接受。

表 1 纳入文献的基本特征

作者	发表时间	手术方式	低潮气量联合 适度 PEEP 组 (n)	对照组 (n)	国家	通气策略(PEEP 设置)	观察 结局
LI 等 <sup>[10]</sup>	2023 年	体外循环心脏手术	347	347	中国	个体化 PEEP 滴定(中位数 8 cmH <sub>2</sub> O)/固定 PEEP 5 cmH <sub>2</sub> O	①② ③④
YU 等 <sup>[11]</sup>	2023 年	肺切除术(单肺通气)	104	103	中国	PEEP 滴定至最低驱动压[M(P <sub>25</sub> , P <sub>75</sub> )为 7 (6~8)cmH <sub>2</sub> O]/固定 PEEP 4 cmH <sub>2</sub> O	①③
BLUTH 等 <sup>[12]</sup>	2019 年	肥胖患者非心胸/神经手术	989	987	美国	PEEP 12 cmH <sub>2</sub> O+肺复张/PEEP 4 cmH <sub>2</sub> O	①②
AKYOL 等 <sup>[13]</sup>	2025 年	妇科肿瘤开腹手术	20	20	土耳其	PEEP 8 cmH <sub>2</sub> O+肺泡复张(复张时最高 20 cmH <sub>2</sub> O)/PEEP 8 cmH <sub>2</sub> O	①
HEMMES 等 <sup>[14]</sup>	2014 年	开腹手术	457	443	荷兰	PEEP 12 cmH <sub>2</sub> O+肺复张/PEEP ≤2 cmH <sub>2</sub> O	①②
PARK 等 <sup>[15]</sup>	2023 年	胸外科肺切除术	576	594	韩国	个体化 PEEP 滴定(以最低驱动压为目标)/固定 PEEP 5 cmH <sub>2</sub> O	①
KIM 等 <sup>[16]</sup>	2023 年	腹腔镜/机器人下腹部手术	178	185	韩国	驱动压引导个体化 PEEP(平均 13.6 cmH <sub>2</sub> O)/固定 PEEP 5 cmH <sub>2</sub> O	①③
PICCIONI 等 <sup>[17]</sup>	2023 年	肺叶/肺段切除术	438	442	意大利	PEEP 5 cmH <sub>2</sub> O+肺复张/无 PEEP	①②
TADIÉ 等 <sup>[18]</sup>	2025 年	体外循环心脏手术	680	682	法国	PEEP 5~7 cmH <sub>2</sub> O/不通气(PEEP 0 cmH <sub>2</sub> O)	①③

注:①为术后肺部并发症;②为住院期间病死率;③为住院总日数;④为 30 d 病死率;术后肺部并发症包括肺炎、肺不张、胸腔积液、气胸、支气管痉挛/喘鸣、呼吸困难或低氧血症、呼吸衰竭及误吸相关肺炎等,具体以原始研究定义为准。

**2.2 主要结局指标术后肺部并发症的 Meta 分析** 9 项 RCT 合并分析显示,低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略可降低术后肺部并发症发生风险,合并效应量为  $RR = 0.92, 95\%CI: 0.86 \sim 0.99, Z = 2.32, P = 0.020$ 。研究间异质性较低( $I^2 = 0.0\%, P = 0.622$ )。见表 2。逐一剔除单项研究进行敏感性分析后,合并效应量  $RR$  为  $0.91 \sim 0.93, 95\%CI$  均未跨越或仅轻微接近 1.00,见表 3。

表 2 术后肺部并发症效应量 Meta 分析结果

项目	RR(95%CI)	Z	P	权重(%)
LI 等 <sup>[10]</sup>	0.99(0.82~1.18)	0.11	0.914	12.54
YU 等 <sup>[11]</sup>	0.73(0.54~1.00)	2.00	0.045	4.79
BLUTH 等 <sup>[12]</sup>	0.90(0.77~1.06)	1.29	0.196	20.59
AKYOL 等 <sup>[13]</sup>	0.55(0.25~1.19)	1.50	0.133	0.97
HEMMES 等 <sup>[14]</sup>	0.98(0.83~1.16)	0.24	0.813	15.42
PARK 等 <sup>[15]</sup>	0.95(0.83~1.08)	0.76	0.445	22.08
KIM 等 <sup>[16]</sup>	0.72(0.45~1.15)	1.37	0.170	3.12
PICCIONI 等 <sup>[17]</sup>	0.93(0.76~1.14)	0.70	0.483	11.95
TADIÉ 等 <sup>[18]</sup>	0.93(0.71~1.21)	0.53	0.594	8.55
总体效应	0.92(0.86~0.99)	2.32	0.020	100.00

注:异质性检验  $I^2 = 0.0\%, P = 0.622$ 。

表 3 术后肺部并发症逐一剔除敏感性分析结果

剔除研究	合并效应			异质性检验	
	RR	95%CI	P	I <sup>2</sup> (%)	P
剔除 LI 等 <sup>[10]</sup>	0.91	0.85~0.99	0.018	0.0	0.591
剔除 YU 等 <sup>[11]</sup>	0.93	0.86~1.00	0.060	0.0	0.694
剔除 BLUTH 等 <sup>[12]</sup>	0.92	0.85~1.01	0.071	0.0	0.613
剔除 AKYOL 等 <sup>[13]</sup>	0.92	0.86~0.99	0.019	0.0	0.650
剔除 HEMMES 等 <sup>[14]</sup>	0.92	0.85~1.00	0.047	0.0	0.653
剔除 PARK 等 <sup>[15]</sup>	0.91	0.83~0.99	0.024	0.0	0.603
剔除 KIM 等 <sup>[16]</sup>	0.92	0.86~0.99	0.023	0.0	0.648
剔除 PICCIONI 等 <sup>[17]</sup>	0.92	0.85~0.99	0.026	0.0	0.600
剔除 TADIÉ 等 <sup>[18]</sup>	0.92	0.86~0.99	0.024	0.0	0.653

注:合并效应的  $P$  为逐一剔除相应研究后剩余研究合并效应的检验  $P$ ;异质性检验  $I^2$  及  $P$  为对应敏感性分析模型的异质性指标。

**2.3 本研究主要结局指标的发表偏倚分析** 在 Begg 检验结果为  $Z = 0.090, P = 0.929$ ,未发现显著偏倚迹象;Egger 检验(截距)中  $bias = -0.145, 95\%CI: -1.749 \sim 1.460, P = 0.841$ ,提示截距并未显著偏离 0,未发现小样本效应导致的发表偏倚;漏斗图基本对称,本研究主要结局指标的合并效应未见明显发表偏倚。见图 1。

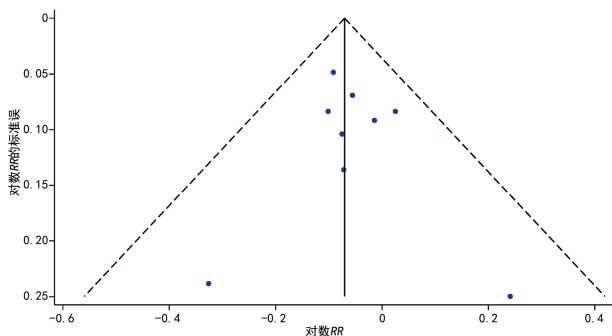


图 1 纳入的 9 篇文献主要结局指标的漏斗图

**2.4 主要结局指标术后肺部并发症的亚组分析** 按纳入研究所在国家所属地理区域分层的亚组分析:亚洲组的合并效应量为  $RR = 0.92$  (95%  $CI: 0.83 \sim 1.01, I^2 = 22.9\%, P = 0.090$ ), 欧美组的合并效应量为  $RR = 0.93$  (95%  $CI: 0.84 \sim 1.02, I^2 = 0.0\%, P = 0.115$ ), 2 个亚组间交互作用检验, 差异无统计学意义 ( $P = 0.877$ )。按发表年份分层的亚组分析: 2014 年、2019 年、2023 年和 2025 年亚组的合并效应量分别为  $RR = 0.98$  (95%  $CI: 0.83 \sim 1.16, P = 0.813$ )、 $RR = 0.90$  (95%  $CI: 0.77 \sim 1.06, P = 0.196$ )、 $RR = 0.94$  (95%  $CI: 0.85 \sim 1.03, P = 0.207$ ) 和  $RR = 0.89$  (95%  $CI: 0.69 \sim 1.15, P = 0.371$ )。年份趋势检验结果差异无统计学意义 ( $P = 0.628$ )。

**2.5 次要结局指标的合并效应分析** 4 项研究报告了住院期间病死率, 合并分析显示, 低潮气量联合适度 PEEP 组与对照组住院期间病死率比较, 差异无统计学意义 ( $RR = 1.27, 95\% CI: 0.70 \sim 2.31, Z = 0.78, P = 0.433$ ), 研究间异质性较低 ( $I^2 = 0.0\%, P = 0.417$ ), 见表 4。

4 项研究报告了住院总日数, 合并分析显示, 低潮气量联合适度 PEEP 组与对照组住院总日数比较, 差异无统计学意义 ( $MD = 0.01, 95\% CI: -0.07 \sim 0.08, Z = 0.26, P = 0.794$ ), 研究间存在较高异质性 ( $I^2 = 71.9\%, P = 0.014$ ), 见表 5。

表 4 住院期间病死率效应量的 Meta 分析结果

项目	RR (95%CI)	Z	P	权重 (%)
LI 等 <sup>[10]</sup>	1.00 (0.20~4.92)	0.00	1.000	15.84
BLUTH 等 <sup>[12]</sup>	2.40 (0.85~6.77)	1.65	0.098	26.43
HEMMES 等 <sup>[14]</sup>	1.01 (0.36~2.87)	0.02	0.985	36.71
PICCIONI 等 <sup>[17]</sup>	0.50 (0.09~2.74)	0.80	0.426	21.02
总体效应	1.27 (0.70~2.31)	0.78	0.433	100.00

注: 异质性检验  $I^2 = 0.0\%, P = 0.417$ 。

表 5 住院总日数效应量的 Meta 分析结果

项目	MD (95%CI)	Z	P	权重 (%)
LI 等 <sup>[10]</sup>	0.17 (0.03~0.32)	2.30	0.022	26.38
YU 等 <sup>[11]</sup>	-0.07 (-0.34~0.20)	0.51	0.611	7.89

续表 5 住院总日数效应量的 Meta 分析结果

项目	MD (95%CI)	Z	P	权重 (%)
KIM 等 <sup>[16]</sup>	-0.24 (-0.45~-0.03)	2.24	0.025	13.75
TADIÉ 等 <sup>[18]</sup>	0.00 (-0.11~0.11)	0.00	1.000	51.98
总体效应	0.01 (-0.07~0.08)	0.26	0.794	100.00

注: 异质性检验  $I^2 = 71.9\%, P = 0.014$ 。

### 3 讨论

围术期机械通气是全身麻醉手术患者维持氧合和二氧化碳排出的重要支持措施, 但不恰当的通气参数设置可能增加术后肺部并发症的发生风险<sup>[19]</sup>。既往研究提示, 术后肺部并发症可导致住院时间延长、医疗负担增加, 并与围术期不良结局相关。因此, 围术期如何优化通气策略、在保证气体交换的同时减少肺损伤, 一直是麻醉与围术期管理关注的重点。

本研究共纳入 9 项 RCT, 合计 7 592 例患者。Meta 分析结果显示, 低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略可降低术后肺部并发症发生风险, 合并效应量为  $RR = 0.92$  (95%  $CI: 0.86 \sim 0.99, P = 0.020$ ), 且研究间异质性较低 ( $I^2 = 0.0\%$ )。敏感性分析显示, 逐一剔除任一研究后, 合并效应量变化不大, 提示主要结局结果较为稳健。Begg 检验和 Egger 检验均未见明显发表偏倚。上述结果提示, 在成人手术患者中, 低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略与术后肺部并发症风险降低相关。

在次要结局方面, Meta 分析结果显示, 低潮气量联合适度 PEEP 组与对照组住院期间病死率比较, 差异无统计学意义 ( $RR = 1.27, 95\% CI: 0.70 \sim 2.31, P = 0.433$ ), 未显示出明确的病死率获益; 2 组住院总日数比较, 差异亦无统计学意义 ( $MD = 0.01, 95\% CI: -0.07 \sim 0.08, P = 0.794$ ), 但该结局存在较高异质性 ( $I^2 = 71.9\%$ )。这一结果提示, 肺保护性通气对短期肺部并发症的影响较为明确, 而对住院总日数等更易受围术期综合管理、术式差异及出院标准影响的结局, 其作用尚不稳定。

从机制上看, 低潮气量联合适度 PEEP 可能通过减少肺泡过度牵张和降低反复塌陷/复张所致的剪切应力, 减轻围术期机械通气相关肺损伤, 从而降低术后肺部并发症发生风险<sup>[20-22]</sup>。既往研究认为, 潮气量、PEEP 及驱动压共同影响肺应力和肺应变水平, 其中适度 PEEP 有助于维持肺泡开放, 而过高 PEEP 则可能增加肺过度膨胀及循环负担<sup>[23-24]</sup>。因此, 本研究结果更支持“低潮气量+适度 PEEP”的组合策略, 而不支持将更高 PEEP 或更激进肺复张简单视为普遍更优方案。

本研究结果与近年来关于围术期肺保护性通气的循证证据总体方向一致。早期 Meta 分析提示, 肺保护性通气可降低术后肺部并发症发生风险<sup>[25]</sup>; 后续网络 Meta 分析和系统评价进一步表明, 不同通气策

略的获益程度可能受术式、人群特征及 PEEP 设置方式影响<sup>[26-28]</sup>。本研究纳入的 9 项 RCT 覆盖体外循环心脏手术、肺切除术、开腹手术、腹腔镜/机器人手术及妇科肿瘤手术等多种术式,结果显示主要结局异质性较低,提示该策略在不同手术场景下具有一定的一致性。不过,亚组分析中亚洲组与欧美组的交互作用检验差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),按发表年份分层后的趋势检验差异亦无统计学意义( $P > 0.05$ ),说明目前尚无证据支持地理区域或发表年份对术后肺部并发症发生风险产生明确影响。

值得注意的是,本研究纳入的部分试验采用固定 PEEP 策略,部分则采用个体化 PEEP 或驱动压引导通气策略<sup>[10-18]</sup>。近年来研究认为,驱动压是反映肺顺应性与通气安全窗口的重要指标,与术后肺部并发症发生风险密切相关<sup>[29-32]</sup>。因此,低潮气量联合适度 PEEP 可能并非单一固定参数组合,而更应理解为在控制肺泡过度牵张的基础上,结合肺力学状态选择相对合适的 PEEP 水平。今后仍需更多高质量研究进一步明确不同术式、不同肺力学状态及不同 PEEP 设定方式下的最佳通气参数组合。

基于上述结果,本研究可为围术期肺保护性通气策略的临床应用提供一定参考。对于接受全身麻醉和气管插管的成年手术患者,围术期采用低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略,有助于降低术后肺部并发症发生风险,而未见住院期间病死率增加。这提示该策略在围术期具有较好的安全性和可行性。但对于住院总日数等结局,现有证据尚不一致,临床应用时仍需结合患者基础状况、手术类型、血流动力学状态及围术期综合管理措施进行个体化决策。

本研究也存在一定局限性。第一,纳入研究的手术类型较多,尽管主要结局异质性较低,但不同术式、体位和围术期管理路径仍可能影响通气策略的实际效果。第二,纳入研究中 PEEP 设置并不完全一致,包括固定 PEEP、较高 PEEP、个体化 PEEP 及驱动压引导 PEEP 等不同方式,可能增加结果解释的复杂性。第三,次要结局中住院总日数的异质性较高,提示该结局可能受非通气因素影响较大。第四,部分研究样本量相对有限,且部分结局报告不够全面,这可能限制对某些次要结局的判断。

综上所述,现有 RCT 证据表明,低潮气量联合适度 PEEP 的肺保护性通气策略可降低成年患者手术后肺部并发症发生风险,但对住院期间病死率和住院总日数未显示明确影响。未来仍需开展更大样本、多中心、高质量 RCT,以进一步明确不同术式和不同个体化通气方案下的最佳围术期肺保护策略。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突。

**作者贡献** 李百松:研究构思,研究设计,数据统计,论文撰写,论文定稿;刘培慧:论文修改与审校;姜珊:研究设计,论文定稿;赵胜利:文献查阅,资料

汇总。

## 参考文献

- [1] LI X F, JIN L, YANG J M, et al. Effect of ventilation mode on postoperative pulmonary complications following lung resection surgery: a randomised controlled trial [J]. *Anaesthesia*, 2022, 77(11): 1219-1227.
- [2] FISCHER M O, BROTONS F, BRIANT A R, et al. Postoperative pulmonary complications after cardiac surgery: the venice international cohort study [J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2022, 36(8 Pt A): 2344-2351.
- [3] NIHR Global Health Research Unit on Global Surgery, COLLABORATIVE S. A prognostic model for use before elective surgery to estimate the risk of postoperative pulmonary complications (GSU-Pulmonary Score): a development and validation study in three international cohorts [J]. *Lancet Digit Health*, 2024, 6(7): e507-e519.
- [4] LI P Y, GAO S A, WANG Y Q, et al. Utilising intraoperative respiratory dynamic features for developing and validating an explainable machine learning model for postoperative pulmonary complications [J]. *Br J Anaesth*, 2024, 132(6): 1315-1326.
- [5] STIVI T, PADAWER D, DIRINI N, et al. Using artificial intelligence to predict mechanical ventilation weaning success in patients with respiratory failure, including those with acute respiratory distress syndrome [J]. *J Clin Med*, 2024, 13(5): 1505.
- [6] BATTAGLINI D, LASSOLA S, SCHULTZ M J, et al. Innovations in protective mechanical ventilation for acute respiratory distress syndrome management [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2024, 21(9): 789-792.
- [7] SINNIGE J S, SMIT M R, GHOSE A, et al. Personalized mechanical ventilation guided by ultrasound in patients with acute respiratory distress syndrome (Pegasus): study protocol for an international randomized clinical trial [J]. *Trials*, 2024, 25(1): 308.
- [8] FERNÁNDEZ-SARMIENTO J, BEJARANO-QUINTERO A M, TIBADUIZA J D, et al. Time course of mechanical ventilation driving pressure levels in pediatric acute respiratory distress syndrome: outcomes in a prospective, multicenter cohort study from Colombia, 2018 —

- 2022[J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2024, 25(9): 848-857.
- [9] HIGGINS J P T, ALTMAN D G, GÖTZ-SCHE P C, et al. The cochrane collaboration's tool for assessing risk of bias in randomised trials[J]. *BMJ*, 2011, 343: d5928.
- [10] LI X F, JIANG R J, MAO W J, et al. The effect of driving pressure-guided versus conventional mechanical ventilation strategy on pulmonary complications following on-pump cardiac surgery: a randomized clinical trial [J]. *J Clin Anesth*, 2023, 89: 111150.
- [11] YU J J, WU Z J, AN R, et al. Association between driving pressure and postoperative pulmonary complications in patients undergoing lung resection surgery: a randomised clinical trial[J]. *Anaesth Crit Care Pain Med*, 2023, 42(1): 101160.
- [12] BLUTH T, SERPA NETO A, SCHULTZ M J, et al. Effect of intraoperative high positive End-Expiratory pressure (PEEP) with recruitment maneuvers vs low PEEP on postoperative pulmonary complications in obese patients: a randomized clinical trial [J]. *JAMA*, 2019, 321(23): 2292-2305.
- [13] AKYOL D, ÖZCAN F G. The impact of alveolar recruitment strategies on perioperative outcomes in obese patients undergoing major gynecologic cancer surgeries: a prospective randomized controlled trial [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2025, 15(11): 1428.
- [14] HEMMES S N T, GAMA DE ABREU M, PELOSI P, et al. High versus low positive end-expiratory pressure during general anaesthesia for open abdominal surgery (PROVHILO trial): a multicentre randomised controlled trial [J]. *Lancet*, 2014, 384(9942): 495-503.
- [15] PARK M H, YOON S, NAM J S, et al. Driving pressure-guided ventilation and postoperative pulmonary complications in thoracic surgery: a multicentre randomised clinical trial [J]. *Br J Anaesth*, 2023, 130(1): e106-e118.
- [16] KIM Y J, KIM B R, KIM H W, 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 [J]. *Br J Anaesth*, 2023, 131(5): 955-965.
- [17] 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.
- [18] TADIÉ J M, OUATTARA A, LAVIOLLE B, et al. Maintaining ventilation with very low tidal volume and positive-end expiratory pressure versus no ventilation during cardiopulmonary bypass for cardiac surgery in adults: a randomized clinical trial [J]. *Intensive Care Med*, 2025, 51(5): 849-860.
- [19] FERRANDO C, VALLVERDU J, ZATTERA L, et al. Improving lung protective mechanical ventilation: the individualised intraoperative open-lung approach [J]. *Br J Anaesth*, 2025, 134(2): 281-287.
- [20] ZIACA M, EXADAKTYLOS A. Acute respiratory distress syndrome: pathophysiological insights, subphenotypes, and clinical implications: a comprehensive review [J]. *J Clin Med*, 2025, 14(15): 5184.
- [21] BATTAGLINI D, ROCA O, FERRER R. Positive end-expiratory pressure optimization in ARDS: physiological evidence, bedside methods and clinical applications [J]. *Intensive Care Med*, 2024, 50(5): 762-765.
- [22] HAUDEBOURG A F, TUFFET S, PERIER F, et al. Driving pressure-guided ventilation decreases the mechanical power compared to predicted body weight-guided ventilation in the acute respiratory distress syndrome [J]. *Crit Care*, 2022, 26(1): 185.
- [23] TSUMURA H, HARRIS E, BRANDON D, et al. Review of the mechanisms of ventilator induced lung injury and the principles of intraoperative lung protective ventilation [J]. *AANA J*, 2021, 89(3): 227-233.
- [24] YOUNG C C, HARRIS E M, VACCHIANO C, et al. Lung-protective ventilation for the surgical patient: international expert panel-based consensus recommendations [J]. *Br J Anaesth*, 2019, 123(6): 898-913.
- [25] TAO T Z, BO L L, CHEN F, et al. Effect of protective ventilation on postoperative pulmonary complications in patients undergoing general anaesthesia: a Meta-analysis of randomised controlled trials [J]. *BMJ Open*, 2014, 4(6): e005208.

· 论 著 · DOI:10.3969/j.issn.1672-9455.2026.10.003

# 冠心病患者 PCI 术前血清 CgA、GDF11、FDX1 水平与术后 MACE 的关系\*

严 昕<sup>1</sup>, 郑宏超<sup>1△</sup>, 缪培智<sup>2</sup>

上海市徐汇区中心医院:1. 心内科;2. 心血管内科, 上海 200237

**摘要:**目的 探讨冠心病(CHD)患者经皮冠状动脉介入治疗(PCI)术前血清嗜铬粒蛋白 A(CgA)、生长分化因子 11(GDF11)、铁氧还蛋白 1(FDX1)水平与术后主要不良心血管事件(MACE)的关系。方法 选取 2021 年 10 月至 2023 年 10 月该院收治的 153 例 CHD 患者为研究对象。PCI 术后对患者进行 6 个月随访,依据随访期间 MACE 发生情况,将患者分为 MACE 组和非 MACE 组。采用酶联免疫吸附试验(ELISA)检测血清 CgA、GDF11、FDX1 水平;采用多因素 Logistic 回归分析 CHD 患者 PCI 术后发生 MACE 的影响因素;绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析血清 CgA、GDF11、FDX1 单独及 3 项联合对 CHD 患者 PCI 术后发生 MACE 的预测效能。结果 与非 MACE 组相比,MACE 组纽约心脏病协会(NYHA)心功能分级 II~III 级比例、多支血管病变比例及血清 CgA 水平较高,血清 GDF11、FDX1 水平较低,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。多因素 Logistic 回归分析结果显示,血清 CgA 水平升高、NYHA 心功能分级 II~III 级、多支血管病变均是 CHD 患者 PCI 术后发生 MACE 的危险因素( $P < 0.05$ );血清 GDF11、FDX1 水平升高均是 CHD 患者 PCI 术后发生 MACE 的保护因素( $P < 0.05$ )。血清 CgA、GDF11、FDX1 单独及 3 项联合预测 CHD 患者术后发生 MACE 的曲线下面积(AUC)分别为 0.863、0.872、0.757、0.962,3 项联合预测的 AUC 大于血清 CgA( $Z = 3.619, P < 0.001$ )、GDF11( $Z = 3.209, P = 0.001$ )、FDX1( $Z = 4.978, P < 0.001$ )单独预测。结论 CHD 患者 PCI 术后发生 MACE 的 CHD 患者术前血清 CgA 水平升高,而血清 GDF11、FDX1 水平降低;血清 CgA、GDF11、FDX1 联合检测对 PCI 术后 MACE 的预测价值更高,可为临床早期筛查高危人群提供参考。

**关键词:**冠心病; 嗜铬粒蛋白 A; 生长分化因子 11; 铁氧还蛋白 1; 主要不良心血管事件; 经皮冠状动脉介入治疗

中图分类号:R541.4;R446.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9455(2026)10-1313-07

## Relationship between serum CgA, GDF11 and FDX1 levels before PCI and postoperative major adverse cardiovascular events in patients with coronary heart disease\*

YAN Xin<sup>1</sup>, ZHENG Hongchao<sup>1△</sup>, MIAO Peizhi<sup>2</sup>

1. Department of Cardiology; 2. Department of Cardiovascular Medicine, Xuhui District Central Hospital, Shanghai 200237, China

**Abstract: Objective** To explore the relationship between preoperative serum chromogranin A (CgA), growth differentiation factor 11 (GDF11) and ferredoxin 1 (FDX1) levels with postoperative major adverse cardiovascular events (MACE) in the patients with coronary heart disease (CHD) undergoing percutaneous coronary intervention (PCI). **Methods** A total of 153 patients with CHD admitted and treated in this hospital from October 2021 to October 2023 were selected as the research subjects. The patients were followed up for 6 months after PCI. Based on the occurrence of MACE during the follow-up period, the patients were divided into the MACE group and non-MACE group. Serum CgA, GDF11 and FDX1 levels were detected by the enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). The multivariate Logistic regression was used to analyze the influencing factors of MACE occurrence after PCI in CHD patients. The receiver operating characteristic (ROC) curve was drawn to analyze the predictive efficiency of serum CgA, GDF11 and FDX1 alone and 3-item combination for the MACE occurrence after PCI in CHD patients. **Results** Compared with the non-MACE group,

\* 基金项目:上海市徐汇区卫生健康委员会项目(SHXHZDXK202305)。

作者简介:严昕,女,主治医师,主要从事冠心病、起搏器、高血压方向的研究。△ 通信作者, E-mail:ckscs6@163.com。

引用格式:严昕,郑宏超,缪培智.冠心病患者 PCI 术前血清 CgA、GDF11、FDX1 水平与术后 MACE 的关系[J]. 检验医学与临床, 2026, 23