

# 个体化肺开放通气策略对行机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术的老年患者术后肺不张的影响

胡学涛, 王启兵, 李云\*

安徽医科大学第二附属医院麻醉与围术期医学科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月22日; 发布日期: 2026年2月28日

## 摘要

目的: 探讨对行机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术的老年患者, 应用个体化肺开放通气策略对其术后肺不张的影响。方法: 前瞻性纳入2025年3月至2025年9月在安徽医科大学第二附属医院行机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术的老年患者72例。患者经随机数字表法被随机分配至个体化肺开放通气策略组(O组)或对照组(C组)。C组施加5 cm H<sub>2</sub>O PEEP, O组采用PEEP递增法实施肺复张、然后以驱动压为导向滴定个体化PEEP。比较两组患者于麻醉诱导前(T0)、手术结束时(T5)、拔管后30 min (T6)、拔管后2 h (T7)的肺不张发生率及肺超声评分(LUS), 于麻醉诱导前(T0)、气腹-Trendelenburg体位建立后即刻(T1)、PEEP滴定完成后30 min (T2)、滴定完成后1 h (T3)、2 h (T4)、拔管后30 min (T6)的动脉血氧分压(PaO<sub>2</sub>)、氧合指数(OI)、动脉血二氧化碳分压(PaCO<sub>2</sub>)以及HR、MAP, T1~T4时的肺动态顺应性(Cdyn)、气道峰压(Ppeak)、气道平台压(Pplat)、驱动压( $\Delta$ P), 术后1 d (D1)、3 d (D2)、7 d (D3)的肺功能指标。结果: O组36例, 年龄(72.4  $\pm$  4.3)岁, C组36例, 年龄(71.3  $\pm$  3.6)岁, 两组年龄差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。O组T6、T7时肺不张发生率均低于C组[分别为19.4% (7/36)比41.7% (15/36)、5.6% (2/36)比25% (9/36), 均 $P < 0.05$ ]。O组T5~T7时肺超声评分均低于C组, T2~T4时PaCO<sub>2</sub>、Ppeak、Pplat、Cdyn均高于C组, T2~T4、T6时PaO<sub>2</sub>和OI均高于C组, T2~T4时 $\Delta$ P均低于C组, D1、D2时FEV1、FVC、FEV1/FVC、PEF均高于C组, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$ )。两组术中补液量、血管活性药使用比例差异均无统计学差异(均 $P > 0.05$ )。结论: 对于行机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术的老年患者, 个体化肺开放通气策略的应用能明显降低其术后肺不张发生率, 且有效改善术后早期肺功能。

## 关键词

肺开放通气策略, 肺超声, 老年, 前列腺癌, 肺不张

\*通讯作者。

# Effect of Individualized Open-Lung Ventilation Strategy on Postoperative Atelectasis among Elderly Patients Receiving Robot-Assisted Radical Prostatectomy

Xuetao Hu, Qibing Wang, Yun Li\*

Department of Anesthesiology, The Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: January 27, 2026; accepted: February 22, 2026; published: February 28, 2026

## Abstract

**Objective:** To explore the impact of an individualized open-lung ventilation strategy on atelectasis after surgery among elderly patients following robot-assisted radical prostatectomy. **Methods:** A total of 72 elderly patients scheduled for robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy at the Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University from March 2025 to September 2025 were prospectively enrolled. Patients were randomly assigned using a random number table to either the individualized open-lung ventilation strategy group (group O) or the control group (group C). Group O was given the PEEP increment method for lung recruitment and individualized PEEP guided by driving pressure, while Group C was given 5 cm H<sub>2</sub>O PEEP. The following parameters were compared between the two groups: the incidence of atelectasis and lung ultrasound score (LUS) before anesthesia induction (T0), at the end of surgery (T5), 30 minutes (T6) and 2 hours (T7) after extubation; arterial oxygen partial pressure (PaO<sub>2</sub>), oxygenation index (OI), arterial carbon dioxide partial pressure (PaCO<sub>2</sub>), heart rate (HR), and mean arterial pressure (MAP) before anesthesia induction (T0), immediately after establishing pneumoperitoneum-Trendelenburg position (T1), 30 minutes after PEEP titration completion (T2), 1 hour (T3), 2 hours (T4), and 30 minutes after extubation (T6); lung dynamic compliance (C<sub>dyn</sub>), peak airway pressure (P<sub>peak</sub>), plateau airway pressure (P<sub>plat</sub>), and driving pressure ( $\Delta P$ ) at T1 to T4; and pulmonary function indices on postoperative day 1 (D1), day 3 (D2), and day 7 (D3). **Results** There were 36 patients in Group O with an average age of (72.4  $\pm$  4.3) years, while Group C included 36 patients aged (71.3  $\pm$  3.6) years. There was no statistically significant difference in age between the two groups ( $P > 0.05$ ). The incidence of atelectasis in Group O was lower than that in Group C at both T6 and T7 [19.4% (7/36) vs 41.7% (15/36) and 5.6% (2/36) vs 25% (9/36), respectively, all  $P < 0.05$ ]. The lung ultrasound scores in Group O were lower than those in Group C at T5~T7. PaCO<sub>2</sub>, P<sub>peak</sub>, P<sub>plat</sub>, and C<sub>dyn</sub> were higher in Group O than in Group C at T2~T4. PaO<sub>2</sub> and OI were higher in Group O than in Group C at T2~T4 and T6.  $\Delta P$  was lower in Group O than in Group C at T2~T4. The forced expiratory volume in the first second (FEV1), forced vital capacity (FVC), peak expiratory flow (PEF), and FEV1/FVC were higher in Group O than in Group C on D1 and D2. All these differences were statistically significant (all  $P < 0.05$ ). There were no significant differences in intraoperative fluid volume or the proportion of vasoactive drug use between the two groups (all  $P > 0.05$ ). **Conclusion:** In elderly patients undergoing robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy, the use of an individualized open-lung ventilation strategy was associated with a marked decrease in postoperative atelectasis and enhanced early pulmonary function.

## Keywords

### Open-Lung Ventilation Strategy, Lung Ultrasound, Elderly, Prostatic Cancer, Atelectasis

Copyright © 2026 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. 研究背景

老年患者全麻后易出现肺不张, 复杂高危患者术后肺不张甚至可持续存在[1]。由于出血量少、术后恢复快等[2]优势, 机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术已广泛应用于临床。然而功能残气量(functional residual capacity, FRC)降低、通气/血流比失调、肺换气功能降低等弊端, 是术中采用的气腹-Trendelenbur 体位无法避免的, 最终会导致肺不张的发生[3]。肺不张是术后肺部并发症(postoperative pulmonary complications, PPCs)发生的重要诱因[4], 而 PPCs 的发展与围术期死亡率增加相关[5]。在改善患者肺顺应性和氧合功能等方面肺开放通气策略(open lung ventilation strategy, OLVS)具有明显优势, 或可降低术后肺不张和 PPCs 的发生率[6]。OLVS 由两阶段构成: 先实施肺复张(lung recruitment maneuver, LRM)使塌陷的肺泡打开, 然后给予呼气末正压(positive end expiratory pressure, PEEP)维持肺泡复张[7]。个体化 OLVS 将 LRM 策略与最佳个体化 PEEP 结合起来, 在改善患者通气氧合功能的基础上, 同时降低对患者循环功能的影响。驱动压(driving pressure,  $\Delta P$ )导向的个体化 PEEP 可通过降低  $\Delta P$ , 增加肺顺应性, 从而改善老年患者术后肺功能, 降低 PPCs 发生率[8]。 $\Delta P$  是指潮气量/呼吸系统顺应性, 也可表示为  $P_{plat}$ -PEEP。肺超声(lung ultrasound, LUS)是评估围术期肺部并发症的有效工具[9], 已在重症医学及麻醉学领域广泛应用。本研究拟通过床旁肺超声, 评估对行机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术的老年患者, 应用个体化肺开放通气策略对其术后肺不张的影响。

## 2. 研究对象

本研究是随机对照研究, 前瞻性纳入 2025 年 3 月至 2025 年 9 月在安徽医科大学第二附属医院行机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术的老年患者。本研究经医院医学伦理委员会批准, 并在中国临床试验注册中心注册, 患者知情同意书均签署。

### 2.1. 纳入标准

(1) 年龄超过 65 岁; (2) 体重指数(body mass index, BMI) 18~30 kg/m<sup>2</sup>; (3) 美国麻醉医师协会(American Society of Anesthesiologists, ASA) II或III级; (4) 加泰罗尼亚手术患者呼吸风险评估(Assess Respiratory Risk in Surgical Patients in Catalonia, ARISCAT)评分  $\geq 26$  分; (5) 择期行前列腺癌根治术。

### 2.2. 排除标准

(1) 肺部手术史; (2) 手术时长  $< 2$  h; (3) 合并肝肾疾病或心脑血管疾病; (4) 胸腔积液; (5) 胸廓存在畸形。

### 2.3. 剔除标准

(1) 患者不愿意继续参加研究; (2) 麻醉诱导前肺超声提示肺不张; (3) 术后存在严重二氧化碳蓄积无法立即拔管。

## 2.4. 样本量计算

采用 PASS 15.0 软件计算。根据预试验, 手术结束时 O 组肺超声评分为 $(7.5 \pm 2.4)$ 分, C 组肺超声评分为 $(9.3 \pm 2.7)$ 分, 假设检验标准  $\alpha = 0.05$ , 检验效能  $1 - \beta = 0.8$ , 考虑 10% 的脱落率, 采用 1:1 平行设计, 总样本量需要 72 例, 每组 36 例。

## 2.5. 分组

由一名麻醉科医师根据是否使用个体化肺开放通气策略, 经随机数字表法将患者随机分为个体化肺开放通气策略组(O 组)和对照组(C 组)。

## 3. 麻醉与通气方案

### 3.1. 麻醉前准备与麻醉方法

患者术前均禁食 6~8 h、禁饮 4~6 h。入室完成常规监测(ECG, BP, SpO<sub>2</sub>)及外周静脉开放后, 予以预充氧并静脉麻醉诱导(舒芬太尼 0.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、依托咪酯 0.3  $\text{mg}/\text{kg}$ 、顺式阿曲库铵 0.15  $\text{mg}/\text{kg}$ )。气管插管后行右侧颈内静脉和桡动脉穿刺以监测 CVP 和 IBP。麻醉维持采用吸入 0.8%~1%七氟醚, 持续泵注丙泊酚 3~5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、瑞芬太尼 0.05~0.1  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、顺式阿曲库铵 0.1~0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 将 BIS 控制在 40~60。术中血压通过调整麻醉用药和应用血管升压药来维持。

### 3.2. 通气方案

一开始两组均接受容量控制通气, 具体参数设定为: VT 7 ml/kg, I:E 为 1:2, RR 12~18 次/分, 起始 PEEP 为 5 cm H<sub>2</sub>O, 吸入氧浓度为 60%, 吸入氧气流量为 2 L/min。分组后, O 组的通气方案[10]为, 在气腹-Trendelenburg 体位建立后立即进行压力控制通气模式下 PEEP 递增法肺复张, 随后进行  $\Delta\text{P}$  导向 PEEP 滴定试验。将呼吸机模式由容控通气改为压控通气, 驱动压力为 20 cm H<sub>2</sub>O, 呼吸频率为 15 次/min, 吸气呼气比为 1:1, FiO<sub>2</sub>:0.6, PEEP 为 5 cm H<sub>2</sub>O。在肺复张阶段, 每 5 个呼吸周期增加 5 cm H<sub>2</sub>O 的 PEEP 水平, 直至 15 cm H<sub>2</sub>O 的 PEEP, 最终达到气道开放压力 35 cm H<sub>2</sub>O, 并维持 10 个呼吸周期。通过递减 PEEP 试验来滴定最佳 PEEP。在最后一个肺复张步骤结束时, 当 PEEP 为 15 cm H<sub>2</sub>O 时, 切换回容量控制通气模式, 潮气量为 6 mL/kg, 呼吸频率为 15 次/min, 吸气呼气比为 1:2, FiO<sub>2</sub> 为 0.6。然后, 每隔 15 秒以 2 cm H<sub>2</sub>O 的步幅降低 PEEP, 直到观察到最低驱动压。一旦确定最佳 PEEP 值, 就进行新的肺复张操作, 然后根据最佳 PEEP 值术中维持。如果术中驱动压增加了 20%, 则进行新的肺复张和 PEEP 滴定操作重新确定最佳 PEEP。C 组在插管后以 5 cm H<sub>2</sub>O 固定 PEEP 维持至手术结束, 在建立气腹-Trendelenburg 体位后实施一次压控模式下 PEEP 递增法肺复张。

## 4. 肺超声评估

采用 12 分区法进行评估[11], 使用改良肺超声评分系统[12]: 3 分定义为白肺或胸膜下实变超过 1 cm  $\times$  2 cm; 2 分定义为多条融合 B 线或多发胸膜下小实变; 1 分定义为  $\geq 3$  条 B 线或局灶性胸膜下小实变; 0 分定义为 A 线征或少于 3 条 B 线。肺超声总评分范围是 0~36 分, 评分越高表示肺通气功能越差。LUS 评估由两名对分组情况不知情的麻醉科医生完成。

## 5. 资料收集及观察指标

### 5.1. 资料收集

于以下时间点进行数据采集: 麻醉诱导前(T0)、气腹-Trendelenburg 体位建立后即刻(T1)、PEEP 滴定

后 30 分钟(T2)、1 小时(T3)、2 小时(T4)及拔管后 30 分钟(T6)。采集指标包括血流动力学参数(HR, MAP)、血气参数如 PaCO<sub>2</sub>、PaO<sub>2</sub>、氧合指数(oxygenation index, OI)。动态肺顺应性(dynamic lung compliance, Cdyn)、气道峰压(peak airway pressure, Ppeak)、平台压(airway plateau pressure, Pplat)、 $\Delta P$  等呼吸力学指标在 T1~T4 时分别记录。肺超声评分和肺不张发生率在麻醉诱导前(T0)、手术结束时(T5)、拔管后 30 min (T6)、2 h (T7)分别记录。记录患者一般情况、麻醉与手术时间、术中输液量、血管升压药使用例数等。呼气流量峰值(peak expiratory flow, PEF)、用力肺活量(forced vital capacity, FVC)、第 1 秒用力呼气容积(forced expiratory volume in the first second, FEV1)、1 秒率(FEV1/FVC)于术前 1 d (D0)、术后 1 d (D1)、3 d (D2)、7 d (D3)用肺功能仪分别测量。

术中数据收集以及术后随访由对分组情况不知情的麻醉科医生完成。

## 5.2. 观察指标

主要观察指标：术后肺不张发生率和肺超声评分。次要观察指标：术中各时间点的血流动力学参数、血气参数以及呼吸力学参数；术中输液量和血管活性药使用情况；术后 1 天、3 天、7 天肺功能指标。

## 6. 统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件分析。呈正态分布的计量资料以均数  $\pm$  标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示, 组间与组内比较分别采用独立样本 *t* 检验与重复测量方差分析; 非正态分布计量资料以中位数(M)和四分位数间距(IQR)表示, 采用非参数检验组间比较。计数资料以例(%)表示, 采用  $\chi^2$  检验组间比较。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。双侧检验, 检验水准  $\alpha = 0.05$ 。

## 7. 结果

### 7.1. 临床资料的比较

O 组 36 例, 年龄( $72.4 \pm 4.3$ )岁, C 组 36 例, 年龄( $71.3 \pm 3.6$ )岁, O 组患者术中未出现因心律失常、血压过低或者气道压过高而终止肺复张和 PEEP 滴定操作的情况。两组患者基线资料(年龄、BMI、ARISCAT 评分、ASA 分级)差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。两组术中麻醉与手术时间、血管活性药使用比例、补液量差异也均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )，见表 1。

### 7.2. 肺不张发生率和肺超声评分的比较

两组患者麻醉诱导前(T0)的肺不张发生率和肺超声评分差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。O 组手术结束时(T5)、拔管后 30 min (T6)、拔管后 2 h (T7)的肺不张发生率和肺超声评分均低于 C 组, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。采用重复测量方差分析组内比较: 与 T0 时比较, C 组中肺不张发生率在 T5~T7 时明显升高, O 组中肺不张发生率在 T5 时明显升高, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。T5~T7 时两组肺超声评分较 T0 时均明显升高, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )，见表 2。

### 7.3. 不同时间点 HR、MAP 以及血气参数的比较

任何时间点两组 HR、MAP 组间差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。O 组 T2~T4、T6 时 PaO<sub>2</sub> 和 OI 均高于 C 组, T2~T4 时 PaCO<sub>2</sub> 均高于 C 组, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。组内比较: 与 T0 时比较, T2~T4 时两组 MAP 明显降低、PaCO<sub>2</sub> 明显升高, T1~T4 时两组 PaO<sub>2</sub> 较 T0 时明显升高, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )，见表 3。

#### 7.4. 不同时间点呼吸力学参数的比较

O 组在 T2~T4 时 Ppeak、Pplat、Cdyn 均高于 C 组、 $\Delta P$  均低于 C 组, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。组内比较: 与 T1 时比较, T2~T4 时两组 Ppeak、Pplat、 $\Delta P$  明显升高, Cdyn 明显降低, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ ), 见表 4。

#### 7.5. 术后肺功能指标的比较

O 组在 D1、D2 时 FEV1、FVC、FEV1/FVC、PEF 均高于 C 组, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。D3 时两组各项指标组间差异无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。组内比较: 与 D0 时比较, C 组 D1~D3 时 FEV1、FVC、PEF 明显降低, D1、D2 时 FEV1/FVC 明显降低; O 组 D1 时 FEV1、FVC、FEV1/FVC、PEF 较 D0 时明显降低, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ ), 见表 5。

**Table 1.** Comparison of general conditions between two patient groups

**表 1.** 两组患者一般情况的比较

指标	C 组(n = 36)	O 组(n = 36)	t/ $\chi^2$ 值	P 值
年龄(岁) <sup>a</sup>	71.3 ± 3.6	72.4 ± 4.3	-1.177	0.243
BMI (kg/m <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	22.3 ± 2.1	22.4 ± 1.9	-0.212	0.833
ARISCAT 评分(分) <sup>a</sup>	36 ± 7	34 ± 6	1.302	0.197
ASAII/III级(例)	28/8	26/10	0.296	0.586
手术时间(min) <sup>a</sup>	205.5 ± 12.7	202.6 ± 11.4	1.020	0.311
麻醉时间(min) <sup>a</sup>	241.6 ± 13.5	239.2 ± 12.7	0.777	0.440
补液量(ml) <sup>a</sup>	1378.3 ± 328.2	1482.5 ± 375.3	-1.254	0.214
血管活性药使用[例(%)]	16 (44.4)	15 (41.7)	0.057	0.812

注: <sup>a</sup> $\bar{x} \pm s$ ; BMI 为体质指数; ARISCAT 为加泰罗尼亚手术患者呼吸风险评估; ASA 为美国麻醉医师协会; C 组为对照组; O 组为个体化肺开放通气策略组。

**Table 2.** Comparison of LUS scores and atelectasis incidence at different time points between the two patient groups

**表 2.** 两组患者不同时点 LUS 评分和肺不张发生率的比较

指标	组别	例数	T0	T5	T6	T7
LUS 评分[M (IQR)]	C 组	36	1 (0~1)	9 (7~11) <sup>a</sup>	6 (4~7) <sup>a</sup>	3 (2.25~4) <sup>a</sup>
	O 组	36	1 (0~1.75)	6 (5~8) <sup>a</sup>	4 (3~5.75) <sup>a</sup>	2 (1.25~3) <sup>a</sup>
	Z 值		-1.131	-4.838	-2.383	-3.395
	P 值		0.258	<0.001	0.017	<0.001
肺不张[例(%)]	C 组	36	0 (0)	21 (58.3) <sup>a</sup>	15 (41.7) <sup>a</sup>	9 (25) <sup>a</sup>
	O 组	36	0 (0)	12 (33.3) <sup>a</sup>	7 (19.4)	2 (5.6)
	$\chi^2$ 值		<0.001	4.531	4.189	5.258
	P 值		1.000	0.033	0.041	0.022

注: 与 T0 比较, <sup>a</sup> $P < 0.05$ ; C 组为对照组; O 组为个体化肺开放通气策略组。

**Table 3.** Comparison of HR, MAP, PaO<sub>2</sub>, PaCO<sub>2</sub>, and OI at different time points between the two patient groups ( $\bar{x} \pm s$ )  
**表 3.** 两组患者不同时点 HR、MAP、PaO<sub>2</sub>、PaCO<sub>2</sub> 和 OI 的比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

指标	组别	例数	T0	T1	T2	T3	T4	T6
HR (次/分)	C 组	36	70.3 ± 8.7	71.3 ± 12.8	69.2 ± 12.3	66.4 ± 7.6	66.7 ± 6.1	77.2 ± 13.2
	O 组	36	69.2 ± 12.5	70.5 ± 13.6	68.1 ± 11.9	64.7 ± 11.7	65.3 ± 8.5	75.8 ± 9.3
MAP (mmHg)	C 组	36	88.5 ± 9.1	88.9 ± 9.3	77.5 ± 7.9 <sup>a</sup>	74.8 ± 7.3 <sup>a</sup>	72.6 ± 6.5 <sup>a</sup>	93.2 ± 11.9
	O 组	36	88.2 ± 8.6	89.2 ± 9.7	79.6 ± 8.5 <sup>a</sup>	76.3 ± 8.2 <sup>a</sup>	73.5 ± 7.3 <sup>a</sup>	93.6 ± 10.2
PaO <sub>2</sub> (mmHg)	C 组	36	84.5 ± 9.5	255.2 ± 32.6 <sup>a</sup>	261.2 ± 38.3 <sup>a</sup>	248.7 ± 32.3 <sup>a</sup>	242.6 ± 31.5 <sup>a</sup>	86.9 ± 8.7
	O 组	36	83.7 ± 8.3	261.3 ± 46.5 <sup>a</sup>	280.3 ± 39.5 <sup>ab</sup>	265.4 ± 34.5 <sup>ab</sup>	260.5 ± 37.2 <sup>ab</sup>	92.4 ± 9.3 <sup>b</sup>
PaCO <sub>2</sub> (mmHg)	C 组	36	39.3 ± 4.2	41.9 ± 4.5	51.6 ± 6.2 <sup>a</sup>	53.1 ± 6.5 <sup>a</sup>	54.3 ± 6.3 <sup>a</sup>	43.2 ± 4.7
	O 组	36	38.7 ± 3.9	42.3 ± 5.7	57.3 ± 7.5 <sup>ab</sup>	58.8 ± 7.3 <sup>ab</sup>	60.2 ± 7.8 <sup>ab</sup>	44.3 ± 6.2
OI (mmHg)	C 组	36	402.3 ± 45.2	425.3 ± 54.3	435.3 ± 63.8	413.6 ± 53.8	404.3 ± 52.5	413.8 ± 41.4
	O 组	36	398.6 ± 39.5	435.5 ± 77.5	467.2 ± 65.8 <sup>b</sup>	442.3 ± 57.5 <sup>b</sup>	433.2 ± 61.8 <sup>b</sup>	442.6 ± 44.3 <sup>b</sup>

注：与 T0 比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与 C 组比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；C 组为对照组；O 组为个体化肺开放通气策略组。

**Table 4.** Comparison of respiratory parameters at different time points between the two groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ )  
**表 4.** 两组患者不同时点呼吸参数的比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

指标	组别	例数	T1	T2	T3	T4
Ppeak (cm H <sub>2</sub> O)	C 组	36	18.2 ± 3.8	24.2 ± 3.6 <sup>a</sup>	25.3 ± 3.5 <sup>a</sup>	25.7 ± 4.1 <sup>a</sup>
	O 组	36	17.6 ± 2.7	26.3 ± 2.5 <sup>ab</sup>	27.2 ± 2.6 <sup>ab</sup>	29.2 ± 3.1 <sup>ab</sup>
Pplat (cm H <sub>2</sub> O)	C 组	36	16.1 ± 3.4	23.3 ± 3.6 <sup>a</sup>	24.2 ± 3.3 <sup>a</sup>	24.5 ± 3.9 <sup>a</sup>
	O 组	36	15.9 ± 2.7	25.4 ± 2.7 <sup>ab</sup>	26.3 ± 2.4 <sup>ab</sup>	28.3 ± 3.2 <sup>ab</sup>
Cdyn (L/cm H <sub>2</sub> O)	C 组	36	56.5 ± 11.3	33.2 ± 6.2 <sup>a</sup>	30.6 ± 6.3 <sup>a</sup>	31.5 ± 6.5 <sup>a</sup>
	O 组	36	57.8 ± 12.6	37.1 ± 7.1 <sup>ab</sup>	34.4 ± 6.1 <sup>ab</sup>	35.2 ± 7.3 <sup>ab</sup>
驱动压 (cm H <sub>2</sub> O)	C 组	36	11.1 ± 3.4	18.3 ± 3.6 <sup>a</sup>	19.2 ± 3.3 <sup>a</sup>	19.3 ± 3.9 <sup>a</sup>
	O 组	36	10.8 ± 2.7	16.3 ± 2.7 <sup>ab</sup>	17.1 ± 2.5 <sup>ab</sup>	16.9 ± 3.1 <sup>ab</sup>

注：与 T0 比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与 C 组比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；C 组为对照组；O 组为个体化肺开放通气策略组。

**Table 5.** Comparison of pulmonary function indicators at different time points between the two groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ )  
**表 5.** 两组患者不同时点肺功能指标的比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

指标	组别	例数	D0	D1	D2	D3
FEV1 (L)	C 组	36	2.7 ± 0.6	1.0 ± 0.5 <sup>a</sup>	1.8 ± 0.6 <sup>a</sup>	2.2 ± 0.5 <sup>a</sup>
	O 组	36	2.5 ± 0.5	1.6 ± 0.5 <sup>ab</sup>	2.3 ± 0.7 <sup>b</sup>	2.4 ± 0.6
FVC (L)	C 组	36	3.4 ± 0.5	1.5 ± 0.6 <sup>a</sup>	2.4 ± 0.7 <sup>a</sup>	2.9 ± 0.7 <sup>a</sup>
	O 组	36	3.2 ± 0.6	2.2 ± 0.6 <sup>ab</sup>	3.0 ± 0.5 <sup>b</sup>	3.1 ± 0.6
FEV1/FVC (%)	C 组	36	80.2 ± 9.6	64.3 ± 8.5 <sup>a</sup>	71.5 ± 6.2 <sup>a</sup>	76.6 ± 7.3
	O 组	36	78.5 ± 7.8	73.2 ± 6.3 <sup>ab</sup>	76.7 ± 9.2 <sup>b</sup>	77.5 ± 9.6
PEF (L/min)	C 组	36	5.8 ± 1.5	2.3 ± 1.3 <sup>a</sup>	3.2 ± 1.5 <sup>a</sup>	4.7 ± 1.6 <sup>a</sup>
	O 组	36	5.4 ± 1.2	3.5 ± 1.6 <sup>ab</sup>	4.9 ± 1.3 <sup>b</sup>	5.1 ± 1.7

注：与 T0 比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与 C 组比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；C 组为对照组；O 组为个体化肺开放通气策略组。

## 8. 讨论

机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术中通常采用气腹-trendelenburg 体位, 导致膈肌向头侧偏移, 从而降低肺顺应性和 FRC; 同时气道压增高和肺不张的加重会使肺内分流增加, 导致通气/血流比失调, 最终损害氧合功能[13]。此外, 老年患者是该疾病的高发人群, 老年患者的胸廓活动度降低、肺弹性回缩力减弱和有效气体交换面积减少等肺部增龄性改变, 最终会导致呼吸功能储备下降, PPCs 发生风险增加[14]。其中引起术中低氧血症以及 PPCs 的重要因素之一是肺不张的发生[15]。OLVS 可以改善患者肺顺应性, 降低肺不张和术后 PPCs 的发生率[16]。个体化 OLVS 包括使用 LRM 打开塌陷的肺泡, 然后使用个体化 PEEP 维持肺扩张两阶段。其中 LRM 策略和 PEEP 滴定策略均有多种, 肺复张策略包括手法肺复张, 肺活量法、PCV 法、PEEP 递增/递减法等, 肺顺应性法、P-V 曲线、电阻抗断层扫描法和驱动压法等则是常用的个体化 PEEP 滴定方法[17]。当肺泡压高于肺泡临界开放压(抵消肺不张区域效应所需的最小肺泡压)时, 肺单位将扩张。与此对应的是肺泡临界闭合压, 即肺泡压低于该值时开放肺单位将塌陷。在一些全身麻醉机械通气患者中测得的平均闭合压力为 5 cm H<sub>2</sub>O, 这一数值与本研究对照组 PEEP 设置值 5 cm H<sub>2</sub>O 相比具有一定参考意义。使用 PEEP 的原理正是源于这一概念, 其最终目标是在呼气末将肺泡压力维持在临界闭合压力之上, 以防止肺泡萎陷。

本研究采用 PEEP 递增法进行肺复张, 驱动压导向 PEEP 递减法进行个体化 PEEP 滴定; 结果显示对于行机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术的老年患者, 应用个体化 OLVS 可以降低术中及术后 LUS 评分和肺不张发生率, 并且患者氧合功能以及术后早期肺功能均得到改善。尽管已经描述了多种肺复张策略, 但最被广泛接受的是在压力控制通气模式下的 PEEP 递增法。因为这种模式保留了正常的吸气-呼气周期[18], 并且比其他肺复张策略具有更好的血流动力学耐受性[19]。一项国际多中心队列研究[20]表明, 小潮气量和 PEEP 的肺保护性效应由驱动压调控, 因此降低术后肺不张的有效策略或许可以通过滴定 PEEP 获取最低驱动压的方法来实现。

肺复张的基本原则是在足够有效的时间内施加足够高的跨肺压, 称为肺开放压。本研究由于跨肺压没有监测, 气道压被用作替代指标, 因为气道压的增加会导致跨肺压的成比例增加。一项关于心脏手术患者的 meta 分析[21]显示, 肺复张可以在保证血流动力学稳定的前提下提高氧合, 从而降低术后肺不张、术后低氧血症的发生率。过高或过低 PEEP 可损害血流动力学, 影响心输出量, 并可增加呼吸机诱导肺损伤的风险。过高的 PEEP 可导致肺泡过度膨胀, 而 PEEP 过低则不能防止肺塌陷[18]。最佳的个体化 PEEP 应在肺过度膨胀和肺塌陷之间达到良好的平衡[22]。Lee 等[23]研究表明, 与 5 cm H<sub>2</sub>O 或 12 cm H<sub>2</sub>O PEEP 比较, C<sub>dyn</sub> 在 8 cm H<sub>2</sub>O PEEP 时最高, 且可能是防止患者全麻后肺塌陷或过度膨胀的最佳压力值。本研究 O 组中最佳个体化 PEEP 值的中位数是 8 cm H<sub>2</sub>O, 与之一致。不同的是, 本研究采用驱动压导向的个体化 PEEP 滴定方法。李雪飞等[24]研究表明较高的  $\Delta P$  与 PPCs 的发生有关。一项纳入 322 例患者的随机对照试验[25]同样显示, 与固定 PEEP 相比, 驱动压引导个体化 PEEP 在术后 3 天内减少了术后 PPCs 的综合发生率。

由于 PEEP 过高可能会引起低血压、心率失常等不良事件的发生, 本研究术中密切监测两组患者的 HR、MAP 并记录补液量、血管活性药使用情况。结果显示两组患者术中补液量、血管活性药使用比例以及不同时点 HR、MAP 组间均无统计学差异, 并且术中采用个体化肺开放通气策略的患者未出现因心率失常、血压过度下降或气道压过高而终止操作的情况, 这提示了在机器人辅助腹腔镜下前列腺癌根治术中应用 OLVS 具有一定的安全性。本研究显示与对照组相比, 个体化肺开放通气策略组患者在 PEEP 滴定完成后各个时间点的 PaO<sub>2</sub>、OI、C<sub>dyn</sub> 均得到明显改善, 且驱动压显著降低; 提示个体化 OLVS 提高了患者呼吸系统顺应性和氧合能力并使呼吸力学得到改善。使用了 OLVS 的患者术后第 1、3 天的 FEV1、

FVC、FEV1/FVC、PEF 的值均高于未使用的患者,提示个体化 OLVS 可以改善患者术后早期肺功能,有利于患者预后。研究表明[26] [27],与固定 PEEP 设置的方法相比,结合了肺复张操作和使用呼吸力学(如驱动压或顺应性)导向个体化 PEEP 的 OLVS 增强了肺保护的作用。围术期肺不张的发生与机械通气、手术时间、术中体位等密切相关[28],是 PPCs 进展的关键因素[29]。由于非重力依赖肺组织和其他纵隔结构的重量会压迫依赖肺,肺不张容易发生在重力依赖区域(肺背侧和基底区域) [30]。本研究显示个体化肺开放通气策略组术后即刻、拔管后 30 min 和拔管后 2 h 的 LUS 评分、肺不张发生率低于对照组,提示应用个体化 OLVS 的患者肺通气功能得到改善,术后肺不张发生率明显降低。Ferrando 等[10]研究同样显示,与标准肺保护性通气管理相比,在围术期使用 OLVS,包括术中肺复张、个体化 PEEP 和术后个体化呼吸支持,降低了术后肺不张和严重 PPCs 的风险,与之一致。

## 9. 局限性

尽管本研究结果显示:与应用 5 cm H<sub>2</sub>O 固定 PEEP 相比,OLVS 可降低术后 LUS 评分和肺不张发生率,改善患者术后早期肺功能。但本研究仍存在以下局限:首先,本研究由于跨肺压没有检测,在肺复张过程中的以 35 cm H<sub>2</sub>O 的气道压代替作为最终的肺开放压,然而在机器人和 trendelenburg 体位手术中肺开放压可能会更高,理想情况下肺开放压力也应该个体化。其次,本研究样本量较少、疾病种类单一且均为老年患者,无法推广到所有手术患者。本研究两组患者术后氧疗策略相同,未进一步探究术后呼吸支持策略对肺不张发生率的影响。尽管本研究在肺超声评估时严格设盲,但仍存在一定主观性,未采用金标准术后 CT 辅助诊断。

## 10. 结论

综上所述,对于行机器人辅助前列腺癌根治术的老年患者,个体化 OLVS 的应用可以明显降低其术后 LUS 评分和肺不张发生率,并改善术后早期肺功能。

## 参考文献

- [1] Duan, Y. and Zhang, R. (2024) Risk Factors and Prediction Model of Delirium in Elderly Patients after Hip Arthroplasty. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, **40**, 1077-1082. <https://doi.org/10.12669/pjms.40.6.9306>
- [2] Haney, C.M., Kowalewski, K., Westhoff, N., Holze, S., Checcuci, E., Neuberger, M., et al. (2023) Robot-Assisted versus Conventional Laparoscopic Radical Prostatectomy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomised Controlled Trials. *European Urology Focus*, **9**, 930-937. <https://doi.org/10.1016/j.euf.2023.05.007>
- [3] Yoon, H., Kim, B.R., Yoon, S., Jeong, Y.H., Ku, J.H. and Kim, W.H. (2021) The Effect of Ventilation with Individualized Positive End-Expiratory Pressure on Postoperative Atelectasis in Patients Undergoing Robot-Assisted Radical Prostatectomy: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Clinical Medicine*, **10**, Article 850. <https://doi.org/10.3390/jcm10040850>
- [4] 施伶俐, 赵龙德, 张莉, 等. 肺动态顺应性指导个体化 PEEP 滴定对颅面重建术患儿术后肺不张的影响[J]. 临床麻醉学杂志, 2024, 40(7): 683-687.
- [5] Campos, N.S., Bluth, T., Hemmes, S.N.T., Librero, J., Pozo, N., Ferrando, C., et al. (2022) Intraoperative Positive End-Expiratory Pressure and Postoperative Pulmonary Complications: A Patient-Level Meta-Analysis of Three Randomised Clinical Trials. *British Journal of Anaesthesia*, **128**, 1040-1051. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2022.02.039>
- [6] 郝伟, 录亚鹏, 张荣智, 等. 肺开放通气策略在患儿围术期肺不张的应用进展[J]. 临床麻醉学杂志, 2023, 39(5): 524-527.
- [7] Song, I.K., Kim, E.H., Lee, J.H., Ro, S., Kim, H.S. and Kim, J.T. (2016) Effects of an Alveolar Recruitment Manoeuvre Guided by Lung Ultrasound on Anaesthesia-induced Atelectasis in Infants: A Randomised, Controlled Trial. *Anaesthesia*, **72**, 214-222. <https://doi.org/10.1111/anae.13713>
- [8] 张倩倩, 孙高悦, 钟晓倩, 等. 驱动压导向呼气末正压通气对老年患者腹腔镜前列腺癌根治术后肺功能的影响[J]. 临床麻醉学杂志, 2023, 39(4): 351-356.
- [9] Xie, C., Sun, K., You, Y., Ming, Y., Yu, X., Yu, L., et al. (2020) Feasibility and Efficacy of Lung Ultrasound to

- Investigate Pulmonary Complications in Patients Who Developed Postoperative Hypoxaemia—A Prospective Study. *BMC Anesthesiology*, **20**, Article No. 220. <https://doi.org/10.1186/s12871-020-01123-6>
- [10] Ferrando, C., Carramiñana, A., Piñeiro, P., Mirabella, L., Spadaro, S., Librero, J., *et al.* (2024) Individualised, Perioperative Open-Lung Ventilation Strategy during One-Lung Ventilation (iPROVE-OLV): A Multicentre, Randomised, Controlled Clinical Trial. *The Lancet Respiratory Medicine*, **12**, 195-206. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(23\)00346-6](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(23)00346-6)
- [11] 王亮, 孙仁波, 胡许平, 等. 驱动压导向呼气末正压个体化滴定对老年患者腹腔镜结直肠癌根治术后肺不张的影响[J]. *临床麻醉学杂志*, 2023, 39(4): 357-362.
- [12] Park, S., Yang, H., Yoo, S., Kim, W.H., Lim, Y., Bahk, J., *et al.* (2021) Ultrasound-Guided versus Conventional Lung Recruitment Manoeuvres in Laparoscopic Gynaecological Surgery: A Randomised Controlled Trial. *European Journal of Anaesthesiology*, **38**, 275-284. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000001435>
- [13] Cheng, M., Ni, L., Huang, L., Zhou, Y. and Wang, K. (2022) Effect of Positive End-Expiratory Pressure on Pulmonary Compliance and Pulmonary Complications in Patients Undergoing Robot-Assisted Laparoscopic Radical Prostatectomy: A Randomized Control Trial. *BMC Anesthesiology*, **22**, Article No. 347. <https://doi.org/10.1186/s12871-022-01869-1>
- [14] Grrrbach, F., Petroff, D., Schulz, S., Hempel, G., Lange, M., Klotz, C., *et al.* (2020) Individualised Positive End-Expiratory Pressure Guided by Electrical Impedance Tomography for Robot-Assisted Laparoscopic Radical Prostatectomy: A Prospective, Randomised Controlled Clinical Trial. *British Journal of Anaesthesia*, **125**, 373-382. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2020.05.041>
- [15] Jang, Y., Ji, S., Kim, E., Lee, J., Kim, J. and Kim, H. (2020) Effect of Regular Alveolar Recruitment on Intraoperative Atelectasis in Paediatric Patients Ventilated in the Prone Position: A Randomised Controlled Trial. *British Journal of Anaesthesia*, **124**, 648-655. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2020.01.022>
- [16] Zhu, C., Zhang, S., Dong, J. and Wei, R. (2021) Effects of Positive End-Expiratory Pressure/Recruitment Manoeuvres Compared with Zero End-Expiratory Pressure on Atelectasis in Children: A Randomised Clinical Trial. *European Journal of Anaesthesiology*, **38**, 1026-1033. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000001451>
- [17] Li, X., Liu, H., Wang, J., Ni, Z., Liu, Z., Jiao, J., *et al.* (2023) Individualized Positive End-Expiratory Pressure on Postoperative Atelectasis in Patients with Obesity: A Randomized Controlled Clinical Trial. *Anesthesiology*, **139**, 262-273. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000004603>
- [18] Hess, D.R. (2015) Recruitment Maneuvers and PEEP Titration. *Respiratory Care*, **60**, 1688-1704. <https://doi.org/10.4187/respcare.04409>
- [19] 熊胜男, 肖继来, 沈晓, 等. 腹腔负压肺复张策略与呼气末正压递增法治疗心脏外科手术术后肺不张的临床疗效对比研究[J]. *实用心脑血管病杂志*, 2025, 33(9): 105-110.
- [20] Mazzinari, G., Serpa Neto, A., Hemmes, S.N.T., Hedenstierna, G., Jaber, S., Hiesmayr, M., *et al.* (2021) 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 Anesthesiology*, **21**, Article No. 84. <https://doi.org/10.1186/s12871-021-01268-y>
- [21] Hu, M., Yang, Y., Chen, T., Lee, C. and Tam, K. (2022) Recruitment Maneuvers to Reduce Pulmonary Atelectasis after Cardiac Surgery: A Meta-Analysis of Randomized Trials. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **164**, 171-181.e4. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2020.10.142>
- [22] Ferrando, C., Vallverdú, J., Zattera, L., Tusman, G. and Suárez-Sipmann, F. (2025) Improving Lung Protective Mechanical Ventilation: The Individualised Intraoperative Open-Lung Approach. *British Journal of Anaesthesia*, **134**, 281-287. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2024.10.007>
- [23] Lee, J., Ji, S., Lee, H., Jang, Y., Kim, E., Kim, H., *et al.* (2020) Evaluation of the Intratidal Compliance Profile at Different PEEP Levels in Children with Healthy Lungs: A Prospective, Crossover Study. *British Journal of Anaesthesia*, **125**, 818-825. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2020.06.046>
- [24] Li, X., Jiang, R., Mao, W., Yu, H., Xin, J. and Yu, H. (2023) The Effect of Driving Pressure-Guided versus Conventional Mechanical Ventilation Strategy on Pulmonary Complications Following On-Pump Cardiac Surgery: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Clinical Anesthesia*, **89**, Article ID: 111150. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2023.111150>
- [25] Park, M., Ahn, H.J., Kim, J.A., Yang, M., Heo, B.Y., Choi, J.W., *et al.* (2019) Driving Pressure during Thoracic Surgery: A Randomized Clinical Trial. *Anesthesiology*, **130**, 385-393. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000002600>
- [26] Zhou, L., Li, H., Li, M. and Liu, L. (2023) Individualized Positive End-Expiratory Pressure Guided by Respiratory Mechanics during Anesthesia for the Prevention of Postoperative Pulmonary Complications: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, **37**, 365-377. <https://doi.org/10.1007/s10877-022-00960-9>
- [27] Li, P., Kang, X., Miao, M. and Zhang, J. (2021) 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*, **100**, e26638. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000026638>
- [28] Formenti, P., Ruzza, F., Pederzoli Giovanazzi, G., Sabbatini, G., Galimberti, A., Gotti, M., *et al.* (2024) Exploring Ultrasonographic Diaphragmatic Function in Perioperative Anesthesia Setting: A Comprehensive Narrative Review. *Journal of Clinical Anesthesia*, **97**, Article ID: 111530. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2024.111530>
- [29] Jeong, H., Tanatporn, P., Ahn, H.J., Yang, M., Kim, J.A., Yeo, H., *et al.* (2021) Pressure Support versus Spontaneous Ventilation during Anesthetic Emergence—Effect on Postoperative Atelectasis: A Randomized Controlled Trial. *Anesthesiology*, **135**, 1004-1014. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000003997>
- [30] Sagar, A.S., Sabath, B.F., Eapen, G.A., Song, J., Marcoux, M., Sarkiss, M., *et al.* (2020) Incidence and Location of Atelectasis Developed during Bronchoscopy under General Anesthesia: The I-LOCATE Trial. *Chest*, **158**, 2658-2666. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2020.05.565>