

# 肥胖患者术中肺保护性通气的最新进展

任译延<sup>1,2</sup>, 李明慧<sup>1,2</sup>, 朱叶<sup>3</sup>, 吴剑波<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>山东大学齐鲁医学院, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省千佛山医院麻醉科, 山东 济南

<sup>3</sup>山东医药大学第一临床医学院, 山东 滨州

收稿日期: 2026年5月27日; 录用日期: 2026年6月21日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘要

肥胖患者全身麻醉期间因功能残气量下降与胸壁顺应性降低, 极易发生重力依赖区肺泡塌陷与区域通气失衡, 进而增加术后肺部并发症(PPCs)的风险。传统的固定参数肺保护性通气策略难以兼顾肺泡开放、防止过度膨胀与维持血流动力学稳定。近年来, 该人群术中肺保护策略已由“经验性参数设定”向“个体化精准优化”转变。本文结合最新文献, 对小潮气量通气、呼气末正压(PEEP)个体化滴定、肺复张手法以及电阻抗断层成像(EIT)在通气优化中的应用进展进行综述。现有证据表明, 小潮气量仍是该人群通气管管理的基础; 个体化PEEP滴定可显著改善氧合与呼吸力学, 而EIT为识别肺内“塌陷与过度膨胀并存”的区域异质性提供了可视化依据; 肺复张能带来短期生理学获益, 但严重依赖后续PEEP的维持。目前该领域的最大挑战在于, 术中生理学指标的改善尚未稳定转化为PPCs等硬性临床结局的获益。未来研究应聚焦于更精细的人群分层与特定的围术期场景, 以进一步明确个体化通气策略的临床转归价值。

## 关键词

肥胖, 肺保护性通气, 呼气末正压, 电阻抗断层成像, 术后肺部并发症

# Recent Advances in Intraoperative Lung-Protective Ventilation in Obese Patients

Yiyan Ren<sup>1,2</sup>, Minghui Li<sup>1,2</sup>, Ye Zhu<sup>3</sup>, Jianbo Wu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Department of Anesthesiology, Shandong Provincial Qianfoshan Hospital, Jinan Shandong

<sup>3</sup>The First Clinical College of Medicine, Shandong Medical and Pharmaceutical University, Binzhou Shandong

Received: May 27, 2026; accepted: June 21, 2026; published: June 30, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 任译延, 李明慧, 朱叶, 吴剑波. 肥胖患者术中肺保护性通气的最新进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(6): 2413-2422. DOI: 10.12677/acm.2026.1662464

## Abstract

Obese patients undergoing general anesthesia are highly susceptible to gravity-dependent alveolar collapse, regional ventilation heterogeneity, and subsequent postoperative pulmonary complications (PPCs) due to reduced functional residual capacity and decreased chest wall compliance. Conventional lung-protective ventilation strategies utilizing fixed settings often fail to strike an optimal balance among maintaining alveolar recruitment, preventing overdistension, and preserving hemodynamic stability. Recently, the focus of intraoperative ventilatory management in this population has shifted from empiric settings toward individualized precision optimization. This review summarizes the latest advances in low tidal volume ventilation, individualized positive end-expiratory pressure (PEEP) titration, recruitment maneuvers, and the application of electrical impedance tomography (EIT) in ventilatory optimization. Current evidence suggests that low tidal volume remains the cornerstone of ventilatory management in obese patients. Individualized PEEP titration significantly improves oxygenation and respiratory mechanics, while EIT provides a visual basis for identifying regional heterogeneity characterized by the coexistence of alveolar collapse and overdistension. Recruitment maneuvers offer short-term physiological benefits, though their sustained efficacy relies heavily on subsequent PEEP maintenance. The primary challenge in this field is that intraoperative physiological improvements have not yet consistently translated into tangible clinical outcome benefits, such as reduced PPCs. Future studies should focus on more precise patient stratification and specific perioperative scenarios to further elucidate the clinical value of individualized ventilation strategies on patient outcomes.

## Keywords

Obesity, Lung-Protective Ventilation, Positive End-Expiratory Pressure, Electrical Impedance Tomography, Postoperative Pulmonary Complications

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. 绪论

肥胖症已成为当前全球重要的公共卫生问题。NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC)发布的全球趋势分析显示,过去数十年间全球肥胖患病率持续上升,接受外科手术的肥胖患者也随之增加,围术期呼吸管理的重要性进一步凸显[1]。肥胖患者常存在功能残气量下降、胸壁顺应性降低,导致呼气末跨肺压降低、小气道更易闭合,增加肺泡塌陷和肺不张形成风险[2][3]。上述异常在全身麻醉和机械通气条件下可进一步加重,尤其在仰卧位、气腹等因素叠加时,膈肌上移、肺顺应性进一步下降,区域通气不均和重力依赖区肺泡塌陷更为明显[3][4],最终导致术后肺部并发症风险增加,这也构成了肥胖患者术中肺保护性通气策略优化的病理生理基础[4][5]。

传统围术期肺保护性通气通常以小潮气量、适度呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)及必要时肺复张(recruitment maneuver, RM)为基本构成,但对于肥胖患者而言,固定较低 PEEP 常不足以提供足够的呼气末肺泡开放压力,难以有效抵消麻醉诱导后重力依赖区肺泡塌陷及肺不张形成[4]。提高 PEEP 虽有助于改善术中氧合和呼吸系统顺应性,但其临床获益并不稳定。PROBESE 多中心随机对照试验显示,较高 PEEP 联合肺复张虽改善了术中呼吸功能,但并未降低 PPCs 发生率,反而增加了低血压和

血管活性药物使用[6]。这提示在肥胖患者中,单纯依赖经验性固定参数设定存在明显局限。

RM 是围术期对抗肺不张的常用措施,可在短时间内改善氧合和肺顺应性,但其效果持续性高度依赖后续 PEEP 能否维持复张后的肺泡开放[7]。同时,肺复张过程中胸内压短时升高,可能引起静脉回流减少和血流动力学波动。因此,在肥胖患者中,肺复张更适合作为辅助性措施,而难以作为独立完成肺保护的核心手段。总体来看,传统经验性通气策略难以充分应对肥胖患者肺力学异质性及围术期状态变化,这也构成了后续个体化 PEEP 优化研究的现实基础。基于此,本文围绕小潮气量通气、PEEP 优化、肺复张及相关辅助策略的研究进展进行综述,并对现有证据的适用范围及局限性进行分析。

## 2. 肥胖患者术中肺保护性通气策略的研究进展

### 2.1. 小潮气量通气策略

小潮气量通气是肥胖患者术中肺保护性通气的基础策略。现有证据支持潮气量按预测体重(predicted body weight, PBW)而非实际体重设定,推荐范围多为 6~8 mL/kg PBW,因为肥胖患者肺容积并不会随体重增加而相应增大,若按实际体重设定潮气量,易导致肺泡过度牵张并增加机械通气相关肺损伤风险[8][9]。

不过,低潮气量本身并不足以解决肥胖患者围术期全部通气问题。Grieco 等在肥胖患者术中比较保护性通气策略与标准通气策略后发现,前者虽可降低术中气道驱动压和跨肺驱动压,但未改善拔管后早期氧合或术后第 2 天呼吸功能,同时伴随 PaCO<sub>2</sub> 和呼吸频率升高[10]。这提示在肥胖患者,尤其合并气腹和头低位等条件下,低潮气量更适合作为基础性肺保护措施,其应用重点在于按 PBW 合理设定,并与 PEEP、肺复张等策略协同优化,而非作为单独决定临床结局的唯一干预[8]-[10]。

### 2.2. PEEP 策略: 从固定值到个体化滴定

#### 2.2.1. 跨肺压与传统呼吸力学导向的个体化滴定

在固定 PEEP 难以适应肥胖患者明显个体差异的背景下,围术期机械通气研究逐渐转向基于生理参数的个体化滴定思路。其中,基于呼吸力学参数的滴定因操作相对简便、可与常规麻醉监测直接衔接而应用较广。驱动压在急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)患者研究中被认为与肺应力及预后相关[11],围术期个体患者数据分析亦提示其与 PPCs 风险存在关联[12]。因此,临床上常尝试通过递减 PEEP 试验寻找最佳顺应性或最低驱动压对应的 PEEP 水平,以期在增加肺泡开放的同时减轻机械负荷。Elbhairy 等在病态肥胖患者腹腔镜减重手术中的前瞻性随机对照研究显示,标准化肺复张后以最低驱动压为目标调整 PEEP,较固定低 PEEP 策略可改善术中及拔管后氧合,提高顺应性,但相关获益仍局限于呼吸力学方面[13]。Li 等在肥胖患者腹腔镜减重手术随机对照试验中发现,以动态顺应性为导向的个体化 PEEP 较固定 PEEP 8 cmH<sub>2</sub>O 可降低术后计算机断层扫描(computed tomography, CT)评估的肺不张比例,但两组 PPCs 发生率并无差异[14]。

除直接术中研究外,部分非术中生理学研究也支持肥胖患者的最佳 PEEP 往往高于经验设定。Pirrone 等在针对重症监护病房(intensive care unit, ICU)中病态肥胖患者的研究显示,肺复张后结合递减 PEEP 滴定可显著改善肺容积、呼吸系统弹性负荷和氧合,且获得的最佳 PEEP 普遍高于临床经验设定[15]。不过,这类结果更多为理解肥胖患者较高 PEEP 需求提供补充性依据,尚不能直接替代术中临床证据。与此同时,“最佳顺应性”概念本身也并非没有争议。Menga 等指出,顺应性最高并不必然等同于肺保护最优,因为这一指标反映的仍是整个呼吸系统的整体力学表现,可能掩盖塌陷与过度膨胀并存时的区域异质性[16]。这一局限在肥胖患者中尤为突出:胸壁弹性负荷增加、胸腹压升高及体位影响均可改变气道压与肺内真实应力之间的关系,因此,以最低  $\Delta P$  或最佳顺应性作为 PEEP 滴定目标,未必能够真正对应最佳肺

泡开放平衡[17][18]。

从生理学角度看,跨肺压较全肺平均参数更接近肺组织本身的真实承压状态[19]。Thind 等指出,肥胖患者更易出现较高胸膜压,从而增加肺泡塌陷风险,而食管压可作为胸膜压的替代指标,用于辅助 PEEP 滴定[20]。Beloncle 等的前瞻性研究进一步发现,在统一潮气量(tidal volume, VT) 6 mL/kg PBW、PEEP 5 cmH<sub>2</sub>O 条件下,肥胖患者的呼气末食管压高于非肥胖患者,且完全气道关闭发生率明显更高;同时,胸壁对呼吸系统顺应性的贡献在不同患者间差异很大,难以仅凭一般临床特征预测[21]。Liou 等对 II、III 级肥胖患者的回顾性研究也显示,跨肺压引导下 PEEP 滴定可将中位 PEEP 由 12 cmH<sub>2</sub>O 提高至 20 cmH<sub>2</sub>O,同时降低驱动压并改善氧合,但研究同时观察到部分患者对血管活性药物的需求增加,且其证据仍局限于单中心回顾性数据[22]。因此,跨肺压导向滴定虽具有更充分的生理学基础,但受食管压监测的技术要求、体位及纵膈压力分布影响,其在常规围术期麻醉中的推广仍有限[19]。

**Table 1.** Main methods, representative studies, and limitations of individualized PEEP titration strategies in obese patients  
**表 1.** 肥胖患者个体化 PEEP 滴定策略的主要方法、代表性研究及局限性

PEEP 滴定策略	代表文献	滴定依据	主要结局/重要发现	局限性
基于整体呼吸力学参数	Elbehairy 等[13]	最低驱动压	最低驱动压引导的个体化 PEEP 较固定低 PEEP 可改善术中及拔管后氧合,提高动态顺应性;围术期低氧事件和术后呼吸支持需求更少	单中心随机研究,样本量较小;对临床结局评估不充分
	Li 等[14]	最佳动态顺应性	与固定 PEEP 8 cmH <sub>2</sub> O 相比,动态顺应性导向的个体化 PEEP 可降低拔管后早期 CT 评估的肺不张比例,并改善术中氧合	样本量较小;主要结局观察窗口较早,获益主要体现在早期影像学 and 术中氧合指标,对更高等级临床结局的证据仍有限
基于跨肺压	Liou 等[22]	跨肺压估计	跨肺压引导可将 PEEP 由经验设定进一步上调,并伴随氧合改善;多数患者最终设定 PEEP 与经验性高 PEEP 表并不一致	回顾性单中心研究,无随机对照;部分氧合评价以 S/F 比值替代动脉血气,外推性和因果解释均受限
基于 EIT 区域信息	Nestler 等[24]	OD/CL 曲线交点	EIT 引导下基于 OD/CL 曲线交点设定个体化 PEEP,可在术中改善氧合、增加呼气末肺容积并优化区域通气分布,但这些优势未能持续至拔管后	样本量较小,且干预同时包含肺复张与较高个体化 PEEP,难以区分两者各自贡献;目前证据仍主要体现在术中生理学获益
	Girrbach 等[28]	RVD/RVD I	RVDI 法确定的个体化 PEEP 与基于动态顺应性的结果一致性较高,而与 GI 法差异较大,提示其更适合用于比较不同滴定算法间的一致性	该研究为回顾性二次分析,并非直接比较不同方法对临床结局的前瞻性试验;因此更适合提供方法学依据,不足以单独支持临床优效性结论
	Wang 等[26]	GI 最小值	在 GI 指导的个体化 PEEP 基础上,联合规律性肺复张可进一步改善术中氧合并提高动态顺应性;但术后氧合优势未持续,PPCs 发生率未见明显下降	该研究比较的是“个体化 PEEP+规律性肺复张”与“单纯个体化 PEEP”,更适合说明肺复张的附加价值,不能单独证明 GI 法本身优于其他滴定策略

注:代表文献序号与正文参考文献一致。PEEP,呼气末正压;CT,计算机断层扫描;EIT,电阻抗断层成像;OD/CL,过度膨胀-塌陷;RVD,区域通气延迟;RVDI,区域通气延迟指数;GI,全局不均一性指数;PPCs,术后肺部并发症。

总体来看,无论是基于顺应性和驱动压的滴定,还是基于跨肺压的滴定,本质上都属于以生理参数指导 PEEP 个体化设定的尝试。前者更简便、可操作性更强,后者在机制上更接近肺组织本身的真实承压状态,但两者都难以直接呈现肺内区域通气分布,因此对塌陷与过度膨胀空间分布的判断仍存在局限。这也为 EIT 在个体化 PEEP 滴定中的应用提供了方法学基础。肥胖患者个体化 PEEP 滴定的主要依据、代表性研究及局限性见表 1。

### 2.2.2. EIT 在个体化 PEEP 滴定中的应用及局限

电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)是一种无创、实时的床旁功能成像技术。与驱动压、顺应性等全肺平均指标相比, EIT 更强调重力依赖区与非依赖区通气分布的动态变化,可用于评估塌陷与过度膨胀的相对趋势,从而为 PEEP 优化提供区域化依据[23]-[27]。现有系统评价显示, EIT 引导的个体化 PEEP 设定可改善围术期氧合,但对 PPCs 的降低尚缺乏一致证据,因此其价值目前仍主要体现在生理学优化层面[27]。

在现有 EIT 导向 PEEP 滴定研究中,基于过度膨胀—塌陷(overdistension-collapse, OD/CL)平衡的滴定策略在肥胖患者术中应用中的证据相对更为直接。Costa 等最早提出基于区域顺应性变化估算肺泡塌陷与过度膨胀的方法,其核心思路是在肺复张后进行递减 PEEP 试验,比较不同 PEEP 水平下依赖区塌陷与非依赖区过度膨胀的相对比例,并以两者的平衡点或交点对应的 PEEP 作为最优 PEEP [23]。Nestler 等在肥胖患者全麻随机对照研究中发现, EIT 引导下获得的个体化 PEEP 明显高于常规固定 PEEP,并可恢复呼气末肺容积、改善区域通气分布和术中氧合,但这些优势在拔管后并未持续[24]。Scaramuzzo 等在肥胖患者腹腔镜手术中的前瞻性生理研究进一步显示, EIT 确定的最佳 PEEP 并非固定不变,而会随麻醉诱导、气腹建立及手术结束等阶段发生纵向变化,提示肥胖患者术中 PEEP 可能需要动态重评,而非一次滴定后全程沿用[25]。这也说明, OD/CL 法的优势不仅在于识别较高 PEEP 需求,更在于能够利用区域信息动态平衡塌陷与过度膨胀。

除 OD/CL 法外,区域通气延迟(regional ventilation delay, RVD)、区域通气延迟指数(regional ventilation delay index, RVDI)、全局不均一性指数(global inhomogeneity, GI)及呼气末肺阻抗变化(end-expiratory lung impedance, EELI)等指标亦被用于 PEEP 优化评估,但目前其在肥胖患者术中作为主要滴定依据的研究仍相对有限。RVD/RVDI 主要用于表征区域通气时序延迟, GI 用于评价通气分布不均一程度,而 EELI 则更多用于反映呼气末肺容积相关变化及复张维持情况。Girrbach 等在递减 PEEP 试验的二次分析中比较了多种 EIT 算法,发现 RVDI 法确定的个体化 PEEP 与基于动态或准静态顺应性的结果具有较高一致性,而 GI 和潮气量分布法所得 PEEP 略低于 RVDI 法,提示不同算法反映的是 PEEP 优化的不同侧面,并不必然给出相同结果[28]。在肥胖患者围术期研究中, Wang 等采用 GI 最小值选择个体化 PEEP,并比较了是否联合规律性肺复张;结果显示,联合肺复张可进一步改善术中氧合和顺应性,但术后获益并未持续,且血管活性药物使用增加[26]。Nothofer 等则证实,在病态肥胖患者中,麻醉诱导后数分钟内即出现明显的通气向非依赖区转移及 GI 升高,提示 GI 更适合作为识别麻醉早期通气不均和肺不张形成的监测指标,而非单独定义“最佳 PEEP”的唯一依据[17]。对于 EELI,现有肥胖患者研究更多将其用于评价复张后肺容积维持情况,而非直接作为术中 PEEP 滴定的主要算法。部分在麻醉后监护室(post-anesthesia care unit, PACU)观察研究及术后呼吸支持研究显示, EELI 可用于反映肺容积恢复过程及不同支持方式下的通气分布变化[29][30]。因此,这类指标更适合用于围术期延续监测,或从通气时序、不均一性和复张维持等不同角度辅助判断 PEEP 效果,而现阶段尚不足以作为肥胖患者术中 PEEP 滴定的主要高等级依据。

总体来看, EIT 在肥胖患者个体化 PEEP 滴定中的最大优势,在于弥补了全肺平均参数难以呈现区域异质性的缺陷。然而, EIT 导向个体化 PEEP 的获益目前仍主要体现在氧合、区域通气和呼吸力学等生理

学指标上,对 PPCs 等临床结局的改善证据尚不充分[27]。此外,不同算法所得最佳 PEEP 并不完全一致,其临床推广仍受到设备条件、判读经验和操作规范性等方面的限制。因此,EIT 可为肥胖患者个体化 PEEP 滴定提供重要参考,但其应用仍需结合临床情况及其他监测信息综合判断。

### 2.3. 肺复张策略

肺复张(recruitment maneuver, RM)是肥胖患者术中对抗肺不张的常用措施,其基本目的在于通过短时间提高跨肺压,重新开放全身麻醉和机械通气过程中塌陷的肺泡。既往研究表明,RM 可在短时间内改善氧合和肺顺应性,但其效应持续性高度依赖后续 PEEP 能否维持复张后的肺泡开放[7]。在个体化 PEEP 基础上,RM 常作为附加干预进一步用于维持肺泡开放,因此其独立临床价值仍需单独讨论。

PROBESE 研究纳入 2013 例 BMI  $\geq 35$  kg/m<sup>2</sup> 且 PPCs 高风险的非心脏非神经外科手术患者,比较“高 PEEP 联合肺复张”与“低 PEEP 不联合肺复张”两种策略,结果显示前者虽改善了术中呼吸功能,但并未降低术后 5 天内 PPCs 发生率,且增加了低血压事件发生率和血管活性药物使用[6]。随后两项 PROBESE 亚研究进一步提示,这种策略可降低驱动压、减少机械功,并改善依赖区通气分布,但这些生理学优势并未转化为明确的临床结局改善[31][32]。

关于 RM 实施频率及压力水平的优化,现有研究结论仍不一致。Wang 等在减重手术患者中比较了 EIT 指导的个体化 PEEP 联合规律性 RM 与不加 RM 两种策略,发现规律性 RM 可进一步改善术中氧合和动态顺应性,但在 PACU 离室前及术后第 1 天氧合差异消失,PPCs 发生率也无明显差异,同时血管活性药物使用更多[26]。Jo 等在腹腔镜袖状胃切除患者中比较低压和高压 RM 后发现,不同压力水平的 RM 均未改善术后疼痛、24 h 恢复质量或 PPCs 发生[33]。Akyol 等对肥胖妇科肿瘤手术患者的小样本随机研究亦显示,肺复张策略虽改善了术中呼吸力学并降低影像学肺不张评分,但 PPCs 发生率并未下降[34]。

此外,RM 的临床效应还明显受应用场景影响。除术中研究外,Amaru 等在肥胖心胸外科患者术后早期的随机研究中发现,RM 后联合 5 或 10 cmH<sub>2</sub>O PEEP 并未显著降低拔管后呼吸衰竭发生率,且部分患者因严重低血压而提前终止[35]。因此,就目前证据而言,RM 更适合作为与 PEEP 优化配合使用的辅助性措施,而是否常规或反复实施,仍需结合具体手术场景、血流动力学状态及通气目标综合判断。

### 2.4. 通气模式与吸氧策略的辅助作用

在肥胖患者术中肺保护性通气中,通气模式可影响气道压、通气区域分布及分钟通气量,但其作用更多体现为对既定肺保护方案的辅助优化,而非独立决定结局的主要因素。一项 Meta 分析显示,现有证据尚不足以支持某一种机械通气模式在肥胖患者围术期具有稳定优效性[36]。Pournajafian 等在腹腔镜减重手术随机交叉试验中发现,在低潮气量通气前提下,压力控制通气(pressure-controlled ventilation, PCV)与容量控制通气(volume-controlled ventilation, VCV)在气道压、呼吸力学和血气指标方面差异均不显著,提示 PCV 并未表现出稳定的围术期通气优势[37]。相较之下,压力控制容量保证通气(pressure-controlled ventilation-volume guaranteed, PCV-VG)在部分肥胖腹腔镜手术研究中显示出较低气道峰压、较低驱动压及较高动态顺应性,但未改善氧合和临床结局[38]。因此,目前尚无充分证据支持某一种通气模式在肥胖患者围术期具有稳定优效性。

吸氧策略的争议主要在于,较高吸入氧浓度(fraction of inspired oxygen, FiO<sub>2</sub>)如何在维持安全氧合储备与减少吸收性肺泡塌陷风险之间取得平衡。就目前资料而言,肥胖患者术中 FiO<sub>2</sub> 优化的证据总体仍较有限,主要来自前瞻性随机研究和单项随机对照试验。Min 等的前瞻性随机研究显示,在 BMI  $\geq 30$  kg/m<sup>2</sup> 患者中,较高 FiO<sub>2</sub> 与术后肺超声评分增加相关,而这种差异在正常体重患者中并不明显[39]。近年一项随机对照研究显示,在接受传统肺保护性通气的腹腔镜减重手术患者中,相较于 FiO<sub>2</sub> (80%),术中低 FiO<sub>2</sub>

(40%)组的 PPCs 发生率和严重程度均呈下降趋势, 但差异无统计学意义[40]。因此, 现阶段尚无充分证据支持肥胖患者术中采用固定的“最优  $\text{FiO}_2$ ”设定。更合理的做法是在满足氧合目标的前提下避免持续高浓度氧暴露, 并与 PEEP、肺复张及体位管理协同优化。

### 3. 当前争议、方法学局限与展望

肥胖患者术中肺保护性通气的核心目标是在减少麻醉和机械通气相关肺泡塌陷的同时, 尽量避免过度膨胀及循环影响。现有证据对小潮气量通气的认识相对一致, 即应依据预测体重设定潮气量, 并将其作为该人群术中通气管管理的基础策略[8]-[10] [41]。相比之下, PEEP 如何设定、肺复张是否需要常规实施, 以及 EIT 监测结果应如何转化为具体通气决策, 仍是目前研究中尚未完全解决的问题。

驱动压近年来被广泛用于评价机械通气相关肺应力, 并在 ARDS 和围术期研究中显示出与不良结局的相关性[11] [12]。这一指标的优势在于能够综合反映潮气量、顺应性和 PEEP 设定后的力学效应, 且无需额外监测设备, 因而较容易嵌入常规麻醉管理。已有肥胖患者术中研究提示, 以最低驱动压为目标调整 PEEP, 可改善氧合和呼吸系统顺应性[13]。但在肥胖患者中, 气道驱动压的解释并不总是直接。由于胸壁弹性负荷增加、腹内压升高及体位因素影响, 气道压力变化并不能完全代表肺组织本身承受的跨肺压; 即使全肺平均驱动压下降, 局部肺区仍可能同时存在塌陷和过度膨胀。因此, 驱动压更适合作为一种简便、可重复的床旁参考指标, 而不宜被单独作为肥胖患者 PEEP 滴定的唯一依据。

EIT 的价值正体现在对这种局限的补充。与顺应性、驱动压等全肺平均参数不同, EIT 能够连续显示重力依赖区和非依赖区通气分布的变化, 并从区域层面估计肺泡塌陷与过度膨胀的相对趋势[23]-[27]。目前应用较多的 OD/CL 法, 主要通过递减 PEEP 过程中区域顺应性变化, 寻找塌陷与过度膨胀之间的平衡点; RVD/RVDI 更侧重区域通气时序延迟, GI 用于描述通气分布不均一程度, EELI 则常用于反映呼气末肺容积相关变化。不同算法并非简单的优劣关系, 而是从不同角度描述 PEEP 改变后的肺内反应。问题在于, 这些算法得到的“最佳 PEEP”并不完全一致, 且多数研究仍主要以氧合、肺容积、顺应性或区域通气分布为观察终点[24]-[28]。因此, EIT 可以提高 PEEP 滴定的生理学针对性, 但其结果仍需结合血流动力学状态、手术阶段、体位和其他呼吸力学指标综合判断。

现有研究中反复出现的一个现象是, 术中生理学指标的改善并未稳定转化为 PPCs 等临床结局获益。PROBESE 研究及其亚研究显示, 高 PEEP 联合肺复张可改善部分术中呼吸功能、降低驱动压并优化依赖区通气分布, 但并未降低 PPCs 发生率, 且增加了低血压和血管活性药物使用[6] [31] [32]。类似地, 部分个体化 PEEP 或 EIT 导向研究虽然观察到氧合、顺应性、肺不张评分或 EELI 的改善, 但对术后临床结局的影响并不一致[14] [24] [26] [27]。这一结果不能简单解释为个体化通气策略缺乏价值, 更应从研究设计和结局评价方式本身进行分析。PPCs 通常为复合终点, 肺炎、肺不张、胸腔积液、呼吸衰竭和再插管等事件在发生机制、严重程度、诊断标准及对通气干预的敏感性方面并不相同[42]。当不同组成事件被合并为一个总体终点时, 通气策略对某一特定肺部事件的影响可能被稀释。另一方面, 不同研究的随访时间从 PACU、术后第 1 天到术后 5 天或更长时间不等, 干预效应是否能够延续至术后恢复阶段, 也会受到镇痛质量、残余肌松、早期活动、术后呼吸支持和基础疾病等多种因素影响。

替代终点的选择同样需要谨慎。氧合、顺应性、驱动压、LUS 评分和 EIT 参数能够反映肺功能或区域通气状态的变化, 但它们与感染、呼吸衰竭、再插管、ICU 入住或住院时间之间并不存在简单的一一对应关系。对于肥胖患者而言, 术中短期氧合改善可能更多反映肺容积增加或通气血流匹配改善, 而未必意味着术后肺部并发症风险同步下降。由此可见, 未来研究在设计时应明确区分生理学终点、影像学终点和临床终点的作用, 避免将短期生理学优化直接等同于临床获益。

后续研究需要从单纯比较“高 PEEP 与低 PEEP”或“是否实施肺复张”, 转向更精细的分层设计和

连续管理路径。肥胖患者并非均质人群, BMI 水平、腹腔镜气腹、头低位或头高位、阻塞性睡眠呼吸暂停、基础肺功能及术前 PPCs 风险, 均可能影响 PEEP 需求和肺复张反应。若研究对象过于混杂, 即使某一亚组可能获益, 也容易在总体分析中被掩盖。围术期管理也不应局限于术中通气参数本身, 术后镇痛、残余肌松监测、早期活动、无创通气或高流量鼻导管支持等措施, 均可能影响术中肺保护效应能否维持至术后阶段。

在监测技术方面, EIT 仍有进一步发展的空间。未来研究可重点比较不同 EIT 算法在肥胖患者中的稳定性、可重复性和临床可解释性, 并建立更统一的数据采集、分析和报告流程。人工智能辅助 EIT 图像重建、伪差识别、肺轮廓分割和实时决策支持具有一定方法学潜力, 但目前仍处于探索阶段, 尚不能替代前瞻性临床验证[43]。肺损伤和炎症相关生物标志物也可作为多维结局评价的补充, 用于解释机械通气策略与肺损伤反应之间的关系[44]; 不过, 现有证据尚不足以支持其单独预测 PPCs 或指导术中通气决策。肥胖患者术中肺保护性通气的研究方向, 正在由固定参数设定逐步转向个体化、多模态和全围术期管理, 但其临床转归价值仍有待更高质量研究进一步明确。

## 参考文献

- [1] NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC) (2024) Worldwide Trends in Underweight and Obesity from 1990 to 2022: A Pooled Analysis of 3663 Population-Representative Studies with 222 Million Children, Adolescents, and Adults. *The Lancet*, **403**, 1027-1050.
- [2] Dixon, A.E. and Peters, U. (2018) The Effect of Obesity on Lung Function. *Expert Review of Respiratory Medicine*, **12**, 755-767. <https://doi.org/10.1080/17476348.2018.1506331>
- [3] Leonard, K.L., Davies, S.W. and Waibel, B.H. (2015) Perioperative Management of Obese Patients. *Surgical Clinics of North America*, **95**, 379-390. <https://doi.org/10.1016/j.suc.2014.10.008>
- [4] Imber, D.A., Pirrone, M., Zhang, C., Fisher, D.F., Kacmarek, R.M. and Berra, L. (2016) Respiratory Management of Perioperative Obese Patients. *Respiratory Care*, **61**, 1681-1692. <https://doi.org/10.4187/respcare.04732>
- [5] Ball, L., Hemmes, S.N.T., Serpa Neto, A., Bluth, T., Canet, J., Hiesmayr, M., et al. (2018) Intraoperative Ventilation Settings and Their Associations with Postoperative Pulmonary Complications in Obese Patients. *British Journal of Anaesthesia*, **121**, 899-908. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2018.04.021>
- [6] Bluth, T., Serpa Neto, A., Schultz, M.J., Pelosi, P. and Gama de Abreu, M. (2019) 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. *JAMA*, **321**, 2292-2305. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.7505>
- [7] Hartland, B.L., Newell, T.J. and Damico, N. (2015) Alveolar Recruitment Maneuvers under General Anesthesia: A Systematic Review of the Literature. *Respiratory Care*, **60**, 609-620. <https://doi.org/10.4187/respcare.03488>
- [8] Balonov, K. (2022) Intraoperative Protective Lung Ventilation Strategies in Patients with Morbid Obesity. *Saudi Journal of Anaesthesia*, **16**, 327-331. [https://doi.org/10.4103/sja.sja\\_386\\_22](https://doi.org/10.4103/sja.sja_386_22)
- [9] Maia, L.d.A., Silva, P.L., Pelosi, P. and Rocco, P.R.M. (2017) Controlled Invasive Mechanical Ventilation Strategies in Obese Patients Undergoing Surgery. *Expert Review of Respiratory Medicine*, **11**, 443-452. <https://doi.org/10.1080/17476348.2017.1322510>
- [10] Grieco, D.L., Russo, A., Anzellotti, G.M., Romanò, B., Bongiovanni, F., Dell'Anna, A.M., et al. (2023) Lung-Protective Ventilation during Trendelenburg Pneumoperitoneum Surgery: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Clinical Anesthesia*, **85**, Article ID: 111037. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2022.111037>
- [11] Amato, M.B.P., Meade, M.O., Slutsky, A.S., Brochard, L., Costa, E.L.V., Schoenfeld, D.A., et al. (2015) Driving Pressure and Survival in the Acute Respiratory Distress Syndrome. *New England Journal of Medicine*, **372**, 747-755. <https://doi.org/10.1056/nejmsa1410639>
- [12] Neto, A.S., Hemmes, S.N.T., Barbas, C.S.V., Beiderlinden, M., Fernandez-Bustamante, A., Futier, E., et al. (2016) 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. *The Lancet Respiratory Medicine*, **4**, 272-280. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(16\)00057-6](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(16)00057-6)
- [13] Elbehairy, M.S., Eid, G.M., Elzeftawy, A.E., Elsheikh, N.A. and Messbah, W.E. (2025) Driving Pressure Guided Ventilation versus Conventional Lung Protective Strategy in Morbid Obese Patients Undergoing Laparoscopic Bariatric Surgery: A Prospective Randomized Controlled Study. *BMC Anesthesiology*, **25**, Article No. 577.

- <https://doi.org/10.1186/s12871-025-03431-1>
- [14] 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>
- [15] Pirrone, M., Fisher, D., Chipman, D., Imber, D.A.E., Corona, J., Mietto, C., *et al.* (2016) Recruitment Maneuvers and Positive End-Expiratory Pressure Titration in Morbidly Obese ICU Patients. *Critical Care Medicine*, **44**, 300-307. <https://doi.org/10.1097/ccm.0000000000001387>
- [16] Menga, L.S., Subirà, C., Wong, A., Sousa, M. and Brochard, L.J. (2024) Setting Positive End-Expiratory Pressure: Does the “Best Compliance” Concept Really Work? *Current Opinion in Critical Care*, **30**, 20-27. <https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000001121>
- [17] Nothofer, S., Steckler, A., Lange, M., Héžel, A., Dumps, C., Wrigge, H., *et al.* (2024) Electrical Impedance Tomography-Based Evaluation of Anesthesia-Induced Development of Atelectasis in Obese Patients. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article No. 7736. <https://doi.org/10.3390/jcm13247736>
- [18] Ahn, H.J., Park, M., Kim, J.A., Yang, M., Yoon, S., Kim, B.R., *et al.* (2020) Driving Pressure Guided Ventilation. *Korean Journal of Anesthesiology*, **73**, 194-204. <https://doi.org/10.4097/kja.20041>
- [19] Mojoli, F., Chiumello, D., Pozzi, M., *et al.* (2015) Esophageal Pressure Measurements under Different Conditions of Intrathoracic Pressure. An *in Vitro* Study of Second Generation Balloon Catheters. *Minerva Anestesiologica*, **81**, 855-864.
- [20] Singh Thind, G., Mireles-Cabodevila, E., Chatburn, R.L. and Duggal, A. (2022) Evaluation of Esophageal Pressures in Mechanically Ventilated Obese Patients. *Respiratory Care*, **67**, 184-190. <https://doi.org/10.4187/respcare.08978>
- [21] Beloncle, F.M., Richard, J., Merdji, H., Desprez, C., Pavlovsky, B., Yvin, E., *et al.* (2023) Advanced Respiratory Mechanics Assessment in Mechanically Ventilated Obese and Non-Obese Patients with or without Acute Respiratory Distress Syndrome. *Critical Care*, **27**, Article No. 343. <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04623-2>
- [22] Liou, J., Doherty, D., Gillin, T., Emberger, J., Yi, Y., Cardenas, L., *et al.* (2022) Retrospective Review of Transpulmonary Pressure Guided Positive End-Expiratory Pressure Titration for Mechanical Ventilation in Class II and III Obesity. *Critical Care Explorations*, **4**, e0690. <https://doi.org/10.1097/ccc.0000000000000690>
- [23] Costa, E.L.V., Borges, J.B., Melo, A., Suarez-Sipmann, F., Toufen, C., Bohm, S.H., *et al.* (2009) Bedside Estimation of Recrutable Alveolar Collapse and Hyperdistension by Electrical Impedance Tomography. *Intensive Care Medicine*, **35**, 1132-1137. <https://doi.org/10.1007/s00134-009-1447-y>
- [24] Nestler, C., Simon, P., Petroff, D., Hammermüller, S., Kamrath, D., Wolf, S., *et al.* (2017) Individualized Positive End-Expiratory Pressure in Obese Patients during General Anaesthesia: A Randomized Controlled Clinical Trial Using Electrical Impedance Tomography. *British Journal of Anaesthesia*, **119**, 1194-1205. <https://doi.org/10.1093/bja/aex192>
- [25] Scaramuzzo, G., Priani, P., Ferrara, P., Verri, M., Montanaro, F., La Rosa, R., *et al.* (2025) Longitudinal Changes of Electrical Impedance Tomography-Based Best PEEP in Obese Patients Undergoing Laparoscopic Surgery: A Prospective Physiological Study. *Anaesthesia Critical Care & Pain Medicine*, **44**, Article ID: 101569. <https://doi.org/10.1016/j.accpm.2025.101569>
- [26] Wang, Z., Ye, S., Fan, Y., Shi, C., Wu, H., Miao, C., *et al.* (2022) Individualized Positive End-Expiratory Pressure with and without Recruitment Maneuvers in Obese Patients during Bariatric Surgery. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, **38**, 858-868. <https://doi.org/10.1002/kjm2.12576>
- [27] Chen, L., Yu, K., Yang, J., Han, X., Liu, L., Li, T., *et al.* (2024) Electrical Impedance Tomography-Guided Positive End-Expiratory Pressure Titration for Perioperative Oxygenation and Postoperative Pulmonary Complications: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicine*, **103**, e40357. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000040357>
- [28] Girrbach, F., Zeuttschel, F., Schulz, S., Lange, M., Beda, A., Giannella-Neto, A., *et al.* (2022) Methods for Determination of Individual PEEP for Intraoperative Mechanical Ventilation Using a Decremental PEEP Trial. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article No. 3707. <https://doi.org/10.3390/jcm11133707>
- [29] Hochhausen, N., Kapell, T., Dürbaum, M., Follmann, A., Rossaint, R. and Czaplak, M. (2022) Monitoring Postoperative Lung Recovery Using Electrical Impedance Tomography in Post Anesthesia Care Unit: An Observational Study. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, **36**, 1205-1212. <https://doi.org/10.1007/s10877-021-00754-5>
- [30] Lena, E., Comuzzi, L., Ajčević, M., Tarchini, M., Moro, E., Baso, B., *et al.* (2024) Lung Volume and Ventilation Distribution after Bariatric Surgery: High-Flow Nasal Cannula versus CPAP. *Respiratory Care*, **69**, 990-998. <https://doi.org/10.4187/respcare.11356>
- [31] Scharffenberg, M., Mandelli, M., Bluth, T., Simonassi, F., Wittenstein, J., Teichmann, R., *et al.* (2024) Respiratory Mechanics and Mechanical Power during Low vs. High Positive End-Expiratory Pressure in Obese Surgical Patients—A Sub-Study of the PROBESE Randomized Controlled Trial. *Journal of Clinical Anesthesia*, **92**, Article ID: 111242. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2023.111242>

- [32] Ellenberger, C., Pelosi, P., de Abreu, M.G., Wrigge, H., Diaper, J., Hagerman, A., *et al.* (2022) Distribution of Ventilation and Oxygenation in Surgical Obese Patients Ventilated with High versus Low Positive End-Expiratory Pressure: A Substudy of a Randomised Controlled Trial. *European Journal of Anaesthesiology*, **39**, 875-884. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000001741>
- [33] Jo, Y.Y., Kim, S.M., Lee, D., Kim, Y., Cha, J. and Kwak, H. (2022) Effect of Low or High Pressure Alveolar Recruitment Maneuver on Postoperative Pain and Quality of Recovery in Patients with Obesity Undergoing Laparoscopic Sleeve Gastrectomy. *Journal of Personalized Medicine*, **12**, Article No. 1550. <https://doi.org/10.3390/jpm12101550>
- [34] Akyol, D. and Özcan, F.G. (2025) The Impact of Alveolar Recruitment Strategies on Perioperative Outcomes in Obese Patients Undergoing Major Gynecologic Cancer Surgeries: A Prospective Randomized Controlled Trial. *Diagnostics*, **15**, Article No. 1428. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15111428>
- [35] Amaru, P., Delannoy, B., Genty, T., Desebbe, O., Laverdure, F., Rezaiguia-Delclaux, S., *et al.* (2021) Effect of Recruitment Maneuvers and PEEP on Respiratory Failure, after Cardiothoracic Surgery in Obese Subjects: A Randomized Controlled Trial. *Respiratory Care*, **66**, 1306-1314. <https://doi.org/10.4187/respcare.08607>
- [36] Costa Souza, G.M., Santos, G.M., Zimpel, S.A. and Melnik, T. (2020) Intraoperative Ventilation Strategies for Obese Patients Undergoing Bariatric Surgery: Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Anesthesiology*, **20**, Article No. 36. <https://doi.org/10.1186/s12871-020-0936-y>
- [37] Pournajafian, A., Sakhaeyan, E., Rokhtabnak, F., Alimian, M., Ghodrati, A., Jolousi, M., *et al.* (2022) Comparison of Pressure and Volume-Controlled Mechanical Ventilation in Laparoscopic Bariatric Surgery: A Randomized Crossover Trial. *Anesthesiology and Pain Medicine*, **12**, e123270. <https://doi.org/10.5812/aapm-123270>
- [38] Toker, M.K., Altıparmak, B., Uysal, A.İ. and Demirebilek, S.G. (2019) Comparison of Pressure-Controlled Volume-Guaranteed Ventilation and Volume-Controlled Ventilation in Obese Patients during Gynecologic Laparoscopic Surgery in the Trendelenburg Position. *Brazilian Journal of Anesthesiology (English Edition)*, **69**, 553-560. <https://doi.org/10.1016/j.bjane.2019.10.002>
- [39] Min, W.K., Jin, S., Choi, Y.J., Won, Y.J., Lee, K. and Lim, C. (2023) Lung Ultrasound Score-Based Assessment of Postoperative Atelectasis in Obese Patients According to Inspired Oxygen Concentration: A Prospective, Randomized-Controlled Study. *Medicine*, **102**, e32990. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000032990>
- [40] Zhou, X., Liu, J., Zhu, J., Jiang, X. and Zou, Q. (2025) Low vs. High Inspiratory Oxygen Fraction during Mechanical Ventilation in Obese Patients: Impact on Postoperative Pulmonary Outcomes. *Anesthesiology Research and Practice*, **2025**, Article ID: 5336172. <https://doi.org/10.1155/anrp/5336172>
- [41] De Jong, A., Wrigge, H., Hedenstierna, G., Gattinoni, L., Chiumello, D., Frat, J., *et al.* (2020) How to Ventilate Obese Patients in the ICU. *Intensive Care Medicine*, **46**, 2423-2435. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-06286-x>
- [42] Fernandez-Bustamante, A., Frendl, G., Sprung, J., Kor, D.J., Subramaniam, B., Martinez Ruiz, R., *et al.* (2017) Postoperative Pulmonary Complications, Early Mortality, and Hospital Stay Following Noncardiothoracic Surgery: A Multicenter Study by the Perioperative Research Network Investigators. *JAMA Surgery*, **152**, 157-166. <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2016.4065>
- [43] Cappellini, I., Campagnola, L. and Consales, G. (2024) Electrical Impedance Tomography, Artificial Intelligence, and Variable Ventilation: Transforming Respiratory Monitoring and Treatment in Critical Care. *Journal of Personalized Medicine*, **14**, Article No. 677. <https://doi.org/10.3390/jpm14070677>
- [44] Bluth, T., Rivas, E., López-Baamonde, M., Sanahuja, J.M., López-Hernández, A., Balust, J., *et al.* (2025) Association of Plasma Biomarkers of Lung Injury with Positive End Expiratory Pressure and Postoperative Pulmonary Complications in Obese Surgical Patients: A Substudy of the PROBESE Randomised Controlled Trial. *European Journal of Anaesthesiology*, **42**, 840-850. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000002221>