

# 电阻抗断层成像技术在肥胖患者麻醉中的应用进展

彭卓, 王昊\*

暨南大学附属第一医院麻醉科, 广东 广州

收稿日期: 2026年1月10日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月11日

## 摘要

肥胖患者因其呼吸生理的特殊性, 成为术后肺部并发症的高危人群。传统的呼吸监测手段难以实时、可视化地评估肺通气的空间异质性。电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)作为一种无创、无辐射的床旁功能成像技术, 能够动态地监测肺通气分布, 辅助实施个体化肺保护通气策略。本文重点阐述了EIT在术前评估(量化通气基线异质性)、术中管理(核心为基于塌陷/过度膨胀权衡法指导个体化PEEP滴定与肺复张操作)以及术后复苏(评估拔管风险与指导呼吸支持)中的具体应用, 同时分析了EIT在技术标准化、临床解读等方面面临的挑战, 并展望了其与人工智能、多模态监测融合的未来发展方向。结论认为, EIT是实现肥胖患者麻醉与围术期中精准肺保护性通气的管理的新兴技术, 具有广阔的临床应用前景。

## 关键词

电阻抗断层成像, 肥胖, 麻醉与围术期, 个体化通气

# Advances in the Application of Electrical Impedance Tomography in Anesthesia for Obese Patients

Zhuo Peng, Hao Wang\*

Department of Anesthesiology, The First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou Guangdong

Received: January 10, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 11, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 彭卓, 王昊. 电阻抗断层成像技术在肥胖患者麻醉中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(2): 2303-2311.  
DOI: 10.12677/acm.2026.162632

## Abstract

Due to their unique respiratory physiology, obese patients are at high risk for postoperative pulmonary complications. Traditional respiratory monitoring methods struggle to assess the spatial heterogeneity of lung ventilation in real-time and visually. Electrical impedance tomography (EIT), a non-invasive, radiation-free bedside functional imaging technique, enables dynamic monitoring of lung ventilation distribution, assisting in the implementation of individualized lung-protective ventilation strategies. This article focuses on the specific applications of EIT in preoperative assessment (quantifying baseline ventilation heterogeneity), intraoperative management (centered on guiding individualized positive end-expiratory pressure (PEEP) titration and recruitment maneuvers based on the collapse/overdistension trade-off method), and postoperative recovery (assessing extubation risk and guiding respiratory support). It also analyzes the challenges EIT faces in terms of technical standardization and clinical interpretation, and discusses its future development direction involving integration with artificial intelligence and multimodal monitoring. The conclusion is that EIT is an emerging technology for achieving precise, lung-protective ventilation management in the anesthesia and perioperative period for obese patients, with broad prospects for clinical application.

## Keywords

Electrical Impedance Tomography, Obesity, Anesthesia and Perioperative Period, Individualized Ventilation

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. 引言

随着全球肥胖(身体质量指数  $BMI \geq 30 \text{ kg/m}^2$ )患病率的持续升高,肥胖患者成为了外科手术人群中日益庞大的亚组[1]。这类患者面临着独特的围术期挑战,尤其是呼吸系统并发症风险显著增高[2][3]。其根本原因在于肥胖引起的相关病理生理改变:腹部脂肪堆积导致膈肌上移、胸壁顺应性降低,两者共同引起功能残气量(FRC)显著下降[4][5],当FRC低于闭合容积时,小气道在潮气呼吸期间即发生闭合,这使得肥胖患者在全身麻醉诱导之后,依赖区(背侧)肺组织迅速发生弥漫性肺不张[6]。术后肺不张是导致低氧血症、肺炎、呼吸衰竭等术后肺部并发症(PPCs)发生的主要因素,严重影响患者预后并延长住院时间[7]。

围术期呼吸管理的目标在于维持充分的氧合与通气,同时最大程度减少呼吸机相关肺损伤(VILI)。传统的监测手段,如脉搏血氧饱和度( $SpO_2$ )、气道压力波形和间歇动脉血气分析,主要提供整体性信息,无法揭示肺部通气分布的高度区域性与异质性[8]。胸部计算机断层扫描(CT)是评估肺形态和肺不张的“金标准”,但因其辐射暴露、危重患者转运风险高及无法进行床旁实时动态监测的特性,限制了其在指导术中实时通气调整的应用[9]。

电阻抗断层成像(EIT)技术的出现,为上述困境提供了突破性的解决方案。EIT通过环绕在胸廓的电极阵列,无创、无辐射地测量了胸腔内电阻抗的分布与动态变化,从而重建出反映区域肺通气分布的功能图像[10][11]。它能够实现床旁、实时、连续的肺通气监测,对于呼吸管理极具困难性的肥胖患者,EIT

的作用价值尤为突出。本文旨在梳理并整合现有文献证据, 系统阐述 EIT 技术在肥胖患者围术期管理中的应用现状、现存挑战及未来展望, 为临床实践使用提供有力的参考。

## 2. 肥胖患者的围术期呼吸挑战与 EIT 监测原理

### 2.1. 肥胖相关的呼吸系统病理生理特点

由于肥胖对呼吸系统的多方面影响, 构成了围术期中呼吸管理的复杂基础。肥胖是术后肺部并发症的独立危险因素[12] [13], 如何通过优化术中通气策略来预防这些并发症, 是麻醉管理的核心目标。

**肺容量与力学改变:** 肥胖患者腹部内容物体积增加使膈肌上抬, 胸壁脂肪负荷加重, 导致 FRC、肺总量和肺顺应性下降, 而气道阻力增加[5]。同时仰卧位和麻醉诱导会进一步加剧 FRC 的下降, 使 FRC 极易低于闭合容积, 从而引发广泛性气道闭合和肺不张[6] [14]。

**通气/血流(V/Q)比例失调:** 仰卧时通气分布主要流向非依赖区(腹侧), 而血流灌注仍部分保留在依赖区(背侧), 导致 V/Q 比例失调, 这是术中发生低氧血症的核心机制之一[5]。肥胖严重者可发展为肥胖低通气综合征(OHS), 其特征为清醒状态下高碳酸血症和呼吸睡眠障碍, 进一步增加了围术期麻醉风险[15]。

### 2.2. EIT 技术的基本原理与核心参数

EIT 技术的基础原理利用了不同生物组织具有不同的电阻抗特性。通常在患者胸廓第 4~6 肋间水平放置一个包含 16 或 32 个电极的带状阵列, 系统采用相邻驱动模式, 依次向一对电极注入安全的高频低幅交变电流, 并同步测量其余所有相邻电极对间的体表电压差, 通过求解复杂的电磁场“逆问题”, 利用边界电压数据反推出监测横断面内电阻抗的相对变化分布图[10] [11]。在临床呼吸监测中, 主要关注与呼吸周期同步的阻抗变化( $\Delta Z$ ), 由于骨骼、肌肉等组织的阻抗在短期内相对稳定, 它直接反映了局部肺泡内气体含量的变化, 即区域通气分布情况[16]。

EIT 不仅能提供直观的通气分布模拟图像, 还衍生出了一系列定量功能参数, 为精准管理提供客观、量化的依据:

**区域潮气阻抗变化(tidal impedance variation, TIV):** TIV 是呼吸过程中产生的电阻抗变化, 它能反映全局或特定区域(如依赖区与非依赖区)的通气量相对变化[8]。

**通气中心(CoV):** CoV 通过计算通气的加权平均位置, 描述了肺内气体沿重力轴由腹侧至背侧的垂直分布。数值小于 50%, 表示通气中心偏向腹侧, 通气以非依赖区为主, 是评估通气不均的敏感指标[17]。

**整体不均匀指数(global inhomogeneity index, GI):** GI 反映所有像素点潮气阻抗变化与该区域平均值的偏差, 量化了整个监测断面内通气分布的不均匀程度, 数值越高表明通气分布越不均[18]。

**区域通气延迟(RVD):** RVD 通过计算不同肺区域达到吸气峰值阻抗的时间差, 来评估区域通气的同步性。延迟增加提示区域气道阻力增高或肺时间常数不一致, 可用于评估气道病变或早期肺不张[19]。

**肺复张与过度膨胀百分比:** 通过分析 PEEP 变化时各像素点阻抗的变化趋势, EIT 软件可以识别并计算出新复张的肺泡区域和可能发生过度膨胀的区域所占百分比, 这是指导个体化 PEEP 滴定的核心指标[20] [21]。该滴定方法即“塌陷与过度膨胀权衡法”(或交叉点法), 由 Costa 等人确立, 旨在寻找使肺复张收益最大而过度膨胀风险最小的 PEEP 范围[22]。

## 3. EIT 在术前评估与麻醉诱导期的应用

### 3.1. 术前基线通气状态评估

EIT 可用于在患者清醒、仰卧位下评估其基础肺通气分布情况。一项利用 EIT 评估肺功能的研究[23]发现, EIT 参数与常规肺功能测定指标具有良好的相关性, 提示 EIT 可作为肥胖患者术前肺功能评估的

潜在工具, 尤其适用于难以完成标准肺功能测试的患者。该研究提出, 即使在术前清醒状态下, 肥胖患者已存在明显的通气异质性, 依赖区通气比例往往低于非肥胖者。这为识别高风险患者、制定个体化术中通气方案提供了基线参考。

### 3.2. 监测麻醉诱导期肺不张的动态形成

EIT 的高时间分辨率使其能够精准捕捉肥胖患者麻醉诱导后肺不张的快速形成过程。Nothofer 等人[24]针对 102 例病态肥胖患者的研究证实, 全麻诱导后, 非依赖区(腹侧)潮气量分布比例中位数从 58.3% 迅速增加至 71.5%, 而 GI 值显著上升, 清晰可视化了通气迅速向腹侧重新分布、背侧肺不张形成的过程。该研究利用 EIT 量化发现, 病态肥胖患者麻醉诱导后肺不张面积比例显著高于非肥胖者, 且这一过程在插管后即刻发生。这加强了医生对于肥胖患者需要更积极预防肺不张的临床认知。

## 4. EIT 在术中机械通气管理中的核心作用

术中机械通气管理是 EIT 在肥胖患者中应用价值最突出、潜力最大的部分, 其核心目标是实施个体化的肺保护性通气策略。

### 4.1. 个体化呼气末正压滴定

固定低水平 PEEP (如 4~5 cmH<sub>2</sub>O)对肥胖患者常不足以对抗胸腹压力, 难以维持肺泡开放; 而过高的 PEEP 则可能导致非依赖区过度膨胀, 并可能影响血流动力学[12] [25]。EIT 指导的个体化 PEEP 滴定, 旨在为每位患者找到其相对合适的最佳平衡点(表 1)。

**Table 1.** Comparison of PEEP titration methods based on EIT

**表 1.** 基于 EIT 的 PEEP 滴定方法比较

方法	原理	优点	缺点
塌陷/过度膨胀权衡法	逐步降低 PEEP, 利用 EIT 计算每个 PEEP 水平下新产生的肺组织塌陷与过度膨胀的像素比例, 两条曲线相交点定为最佳 PEEP	可视化并量化 PEEP 调整的收益(复张)与风险(过度膨胀), 个体化程度高	操作相对复杂, 未直接考虑对心脏功能及血流动力学的影响
最佳呼吸系统顺应性法	PEEP 滴定过程中, 计算全局或区域性的动态顺应性(EIT 潮汐阻抗变化/驱动压), 将顺应性最高点设为最佳 PEEP	操作简便直观, 最佳顺应性常对应最低驱动压	可能忽略局部过度膨胀或塌陷
通气分布最均一法	通过计算 EIT 相关参数, 如 GI、CoV 或 RVD, 调整使全肺通气分布最均匀时的 PEEP	优化通气异质性, 更有利于气体交换, 对早期肺不张更敏感	不一定对应最佳的氧合或总体顺应性
肺复张增量评估法	逐步增高 PEEP, 利用 EIT 监测每次增加时肺的复张量, 当复张量无明显增加时, 前一个 PEEP 可视为最佳 PEEP	与肺复张操作结合紧密, 可直接评估肺复张效果	需要短暂使用较高 PEEP, 可能带来一定风险
局部通气延迟法	分析不同肺区域达到吸气峰值阻抗的时间差 (RVD), 滴定过程中 RVD 最小时为最佳 PEEP	能反映气道阻力的区域性差异和小气道闭合情况	数据解读复杂

目前基于 EIT 的 PEEP 滴定方法中(见表 1), 最常用且证据最充分的是基于 EIT 的塌陷/过度膨胀权衡法[26], 该方法是通过逐步降低 PEEP 的“降阶梯法”, 利用 EIT 计算出每个 PEEP 水平下新产生的肺组织塌陷与过度膨胀的像素比例, 将两者之和最小化即两条曲线相交点对应的 PEEP 定为最佳 PEEP。

EIT 在 PEEP 滴定中的应用, 为多项高质量研究提供了有力支持。Fernandez-Bustamante 等人[27]的 RCT 证实, 在腹部手术中个体化 PEEP 管理能降低术中驱动压, 这是与术后肺部并发症密切相关的关键力学指标, 而研究中观察到的广泛 PEEP 范围表明, 需要个体化方法来优化 PEEP 设定。Pereira 等人[28]的随机对照试验显示, 在肥胖患者腹部手术中, 与传统固定 PEEP (5 cmH<sub>2</sub>O)相比, EIT 指导的个体化 PEEP

(中位数 12 cmH<sub>2</sub>O)显著改善了术中氧合、肺顺应性, 并减少了术后早期 CT 评估的肺不张面积。一项针对肥胖患者腹腔镜手术的前瞻性生理研究发现, 基于 EIT 设定的最佳 PEEP 在麻醉诱导后、气腹体位建立后等不同阶段会发生动态变化, 平均增加约 3 cmH<sub>2</sub>O, 且个体差异巨大(变异系数达 60.8%), 这强有力地证明了在整个麻醉过程中重复评估和调整 PEEP 的必要性[29]。在一项二次分析中, 综合了多个试验数据, 直接比较了个体化 PEEP 与两种固定 PEEP (4~5 cmH<sub>2</sub>O 和 12 cmH<sub>2</sub>O)的效果, 结果显示个体化 PEEP 组在拔管前氧合、术中依赖区潮气量比例和驱动压方面均显著优于两个固定 PEEP 组[30]。

## 4.2. 术中实时可视化

肺复张操作(RM)是术中打开萎陷肺泡的重要手段之一, EIT 能实时可视化 RM 的效果, 避免盲目、无效甚至有害的高压力操作。它可以在 RM 过程中动态显示肺部背侧是否随压力增加而逐渐复张, 以及腹侧是否出现过度膨胀迹象。当继续增加压力而背侧复张不再明显、腹侧过度膨胀加剧时, 即提示达到最大复张潜力, 应终止操作[31]。一项研究表明, 在肥胖患者中, 将 RM 与 EIT 指导的个体化 PEEP 结合使用, 可进一步改善术中氧合和呼吸力学, 但需注意 RM 可能带来短暂的血流动力学影响, 如血管加压药使用增加[32]。

监测潮气量分布: 在肥胖患者机械通气中, 即使采用基于理想体重的低潮气量(如 6~8 mL/kg), 也无法避免可能存在的肺内分布不均, 利用 EIT 能显示气体实际在肺内的分布, 快速评估病态肥胖患者的肺容量变化, 警惕区域性过度膨胀[33]。

## 4.3. 在特殊手术中的应用

在腹腔镜手术中, 由于气腹和特殊体位的影响, 肥胖患者肺不张发生率进一步升高, EIT 能直观显示气腹和头低脚高(Trendelenburg)体位对通气分布的负面影响, 并指导个体化提高 PEEP 以部分代偿这种效应[29]。

在胸科手术中, 常需要进行单肺通气确保术侧形成肺萎陷, EIT 可实现床旁实时监测肺通气及灌注情况, 在指导 PEEP 设置以优化氧合的同时, 降低过度膨胀风险, 降低术后肺部并发症的发生[34] [35]。

## 5. EIT 在术后复苏与监测中的价值

### 5.1. 拔管前评估

自主呼吸试验(SBT)是评估拔管指征的常用方法, EIT 为 SBT 提供了新的视角。研究显示, 在 SBT 期间, EIT 可以监测呼气末肺阻抗(反映呼气末肺容积)的变化和通气不均质性的改变[36]。一项观察性研究发现, 与 SBT 成功的患者相比, SBT 失败的患者在 SBT 开始时即表现出更显著的呼气末肺阻抗下降和更高的 GI 指数, 提示其肺组织通气分布不均且更容易发生肺不张[37], 这为早期识别拔管高风险患者提供了可参考指标。然而, 该研究也指出, 拔管后短期内的 EIT 参数在拔管成功与失败患者间差异不显著, 提示拔管失败可能涉及更复杂的因素, 如上气道梗阻或呼吸肌疲劳, EIT 的预测需要结合患者其他体征进一步加强。

### 5.2. 拔管后呼吸支持指导

对于拔管后存在低氧血症或呼吸衰竭风险的患者, EIT 可以联合无创通气(NIV)或经鼻高流量氧疗(HFNC)使用, 实时监测这些支持手段对改善区域通气、促进肺复张的效果, 从而实现目标导向的、个体化的参数调整[38]。在一项病例报告中, 展示了 EIT 如何指导一例重度肺炎的肥胖呼吸机依赖患者, 通过评估体位改变(如俯卧位)对通气分布的影响, 最终成功脱机[39]。

### 5.3. 术后持续监测与管理

危重肥胖患者术后转入 ICU 是不可避免的, 其呼吸监测往往降级为间歇性的生命体征观察和血气分析。一项前瞻性研究对 128 名术后入住 ICU 的高危患者进行了 EIT 监测, 研究发现, 与通气均匀的表型 2 患者相比, 通气不均质的表型 1 (腹侧优势) 和表型 3 (背侧优势) 患者具有更高的术后肺部并发症评分、更长的机械通气时间、更长的氧疗时间以及更长的 ICU 住院时间[40]。该研究证明 EIT 可用于识别与预后不良相关的不均质通气表型, 满足了对此类患者进行持续、功能性肺监测的需求, 能够早期发现隐匿性的肺不张或通气恶化。

## 6. EIT 的当前挑战与未来展望

### 6.1. 技术与临床实践的挑战

尽管 EIT 在功能监测上优势显著, 但其局限性需被充分认识以客观评估其价值。首先, EIT 图像分辨率远低于 CT, 无法显示精细的解剖结构, 其优势在于功能评估而非形态学诊断[10]。其次, 对肥胖体型的适应性略差, 目前尚缺乏针对此人群的大规模研究验证 EIT 参数与 CT “金标准”的相关性, 其敏感性与特异性有待进一步确认, 极度肥胖可能因胸壁厚度和几何形状改变而影响电流场分布, 增加图像重建的不确定性, 对电极接触质量也提出更高要求[23]。

重度肥胖常常对 EIT 造成伪影干扰, 在 BMI > 40 kg/m<sup>2</sup> 的患者中, 脂肪组织的异常增厚直接改变了 EIT 成像所依赖的电磁场环境, 皮下脂肪层电导率显著低于肌肉组织, 形成了一个高阻抗的“绝缘层”, 这导致注入的电流更多地被限制在体表周围分流, 而深入肺组织的电流密度衰减, 降低了对深部肺区域 (尤其是依赖区) 通气变化的检测灵敏度[23]。对比该区域在深呼吸、咳嗽或不同 PEEP 水平下的阻抗变化, 该区域基本无任何动态变化, 且与患者解剖特征吻合。

尽管已发布专家共识和建议[8] [41], 但对于 EIT 参数(如过度膨胀百分比、GI 指数)的临床意义阈值、针对肥胖人群的最佳 PEEP 选择标准流程等, 尚未形成统一的、标准性的操作指南, 这导致了临床研究和实践中方法学的异质性。且设备购置、维护成本及临床医生所需掌握的图像解读技能, 是限制其大规模普及的主要障碍, 目前相关成本效益分析研究几乎空白[35]。

### 6.2. 未来发展方向

在当前发展趋势下, EIT 可与人工智能/机器学习深度融合, 利用 AI 算法自动识别通气异常模式(如自动划分塌陷、过度膨胀区域)、预测肺不张风险或自动推荐通气参数, 可大幅降低临床使用门槛, 提高解读的一致性和效率[42]。并且开发更便携、可穿戴、无线的 EIT 系统, 便于在术后病房进行长时间连续监测[43], 同时探索三维 EIT 和更高通道数的系统, 以提升图像质量和信息维度。

将 EIT 与肺部超声、气道压监测、膈肌超声等技术多模态融合, 可提供互补的形态、功能和力学等信息, 实现对呼吸状态更全面、立体的评估[38] [43]。例如, 肺部超声擅长识别胸膜下线、B 线等征象, 而 EIT 善于评估整体通气的动态分布, 两者结合相得益彰。

未来研究不仅应继续验证 EIT 对生理指标(氧合、顺应性)的改善, 更需开展大规模、多中心随机对照试验, 以明确 EIT 指导的通气策略能否确凿降低肥胖患者术后肺部并发症发生率、ICU 住院时间、医疗成本及死亡率等结局指标。此外, EIT 在围术期肺灌注监测、指导液体治疗等方面的应用也值得探索。

## 7. 小结

综上所述, 电阻抗断层成像(EIT)技术为肥胖患者这一围术期呼吸高风险群体的管理带来了根本性改变。它通过提供床旁、实时、可视化的区域肺通气信息, 使麻醉医生能够实现从经验性到“可视化、生理

导向”的精准肺保护通气策略的跨越。大量证据,尤其是多项随机对照试验,强有力地证实了 EIT 在指导个体化 PEEP 滴定、优化肺复张操作和术中通气参数方面的核心价值,能够有效改善肥胖患者的术中氧合、呼吸力学,并有望减少术后肺部并发症。

尽管在技术标准化、临床解读和成本效益方面仍面临挑战,但这些挑战正随着技术进步和临床经验的积累而被逐步攻克。展望未来,通过与人工智能的融合、多模态监测的整合,以及聚焦于患者重要结局的高级别临床研究, EIT 不仅将巩固其作为肥胖患者围术期呼吸管理关键工具的地位,更有可能发展成为整个围术期医学中更精准、更个体化的重要工具。

## 参考文献

- [1] Blüher, M. (2019) Obesity: Global Epidemiology and Pathogenesis. *Nature Reviews Endocrinology*, **15**, 288-298. <https://doi.org/10.1038/s41574-019-0176-8>
- [2] Hardt, K. and Wappler, F. (2023) Anesthesia for Morbidly Obese Patients. *Deutsches Ärzteblatt International*, **120**, 779-785. <https://doi.org/10.3238/arztebl.m2023.0216>
- [3] Huschak, G., Busch, T. and Kaisers, U.X. (2013) Obesity in Anesthesia and Intensive Care. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*, **27**, 247-260. <https://doi.org/10.1016/j.beem.2013.02.001>
- [4] Pelosi, P., Croci, M., Ravagnan, I., Tredici, S., Pedoto, A., Lissoni, A., et al. (1998) The Effects of Body Mass on Lung Volumes, Respiratory Mechanics, and Gas Exchange during General Anesthesia. *Anesthesia & Analgesia*, **87**, 654-660. <https://doi.org/10.1213/00000539-199809000-00031>
- [5] Rabec, C., Janssens, J. and Murphy, P.B. (2025) Ventilation in the Obese: Physiological Insights and Management. *European Respiratory Review*, **34**, Article ID: 240190. <https://doi.org/10.1183/16000617.0190-2024>
- [6] Reinius, H., Jonsson, L., Gustafsson, S., Sundbom, M., Duvernoy, O., Pelosi, P., et al. (2009) Prevention of Atelectasis in Morbidly Obese Patients during General Anesthesia and Paralysis: A Computerized Tomography Study. *Anesthesiology*, **111**, 979-987. <https://doi.org/10.1097/aln.0b013e3181b87edb>
- [7] 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>
- [8] Scaramuzzo, G., Pavlovsky, B., Adler, A., Baccinelli, W., Bodor, D.L., Damiani, L.F., et al. (2024) Electrical Impedance Tomography Monitoring in Adult ICU Patients: State-of-the-Art, Recommendations for Standardized Acquisition, Processing, and Clinical Use, and Future Directions. *Critical Care*, **28**, Article No. 377. <https://doi.org/10.1186/s13054-024-05173-x>
- [9] Gattinoni, L., Caironi, P., Pelosi, P. and Goodman, L.R. (2001) What Has Computed Tomography Taught Us about the Acute Respiratory Distress Syndrome? *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **164**, 1701-1711. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.164.9.2103121>
- [10] Bodenstein, M., David, M. and Markstaller, K. (2009) Principles of Electrical Impedance Tomography and Its Clinical Application. *Critical Care Medicine*, **37**, 713-724. <https://doi.org/10.1097/ccm.0b013e3181958d2f>
- [11] Cui, Z., Liu, X., Qu, H. and Wang, H. (2024) Technical Principles and Clinical Applications of Electrical Impedance Tomography in Pulmonary Monitoring. *Sensors*, **24**, Article 4539. <https://doi.org/10.3390/s24144539>
- [12] Choi, J.Y., Al-Saedy, M.A. and Carlson, B. (2023) Positive End-Expiratory Pressure and Postoperative Complications in Patients with Obesity: A Review and Meta-Analysis. *Obesity*, **31**, 955-964. <https://doi.org/10.1002/oby.23675>
- [13] 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. *Journal of the American Medical Association*, **321**, 2292-2305. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.7505>
- [14] Duggan, M., Kavanagh, B.P. and Warltier, D.C. (2005) Pulmonary Atelectasis: A Pathogenic Perioperative Entity. *Anesthesiology*, **102**, 838-854. <https://doi.org/10.1097/00000542-200504000-00021>
- [15] Masa, J.F., Pépin, J., Borel, J., Mokhlesi, B., Murphy, P.B. and Sánchez-Quiroga, M.Á. (2019) Obesity Hypoventilation Syndrome. *European Respiratory Review*, **28**, Article ID: 180097. <https://doi.org/10.1183/16000617.0097-2018>
- [16] Victorino, J.A., Borges, J.B., Okamoto, V.N., Matos, G.F.J., Tucci, M.R., Carames, M.P.R., et al. (2004) Imbalances in Regional Lung Ventilation: A Validation Study on Electrical Impedance Tomography. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **169**, 791-800. <https://doi.org/10.1164/rccm.200301-133oc>

- [17] 马效禹, 范得慧, 王威威. 电阻抗断层成像技术用于呼气末正压滴定的研究进展[J]. 临床麻醉学杂志, 2024, 40(2): 185-189.
- [18] Zhao, Z., Möller, K., Steinmann, D., Frerichs, I. and Guttmann, J. (2009) Evaluation of an Electrical Impedance Tomography-Based Global Inhomogeneity Index for Pulmonary Ventilation Distribution. *Intensive Care Medicine*, **35**, 1900-1906. <https://doi.org/10.1007/s00134-009-1589-y>
- [19] Chen, R., Guy, E.F.S., Clifton, J.A., Chase, J.G., Rupitsch, S.J. and Moeller, K. (2025) An EIT-Based Assessment of Regional Ventilation Delay under Incremental PEEP: Influence of Sex, Smoking, Vaping, Asthma, and BMI. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **271**, Article ID: 108992. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2025.108992>
- [20] Songsangvorn, N., Xu, Y., Lu, C., Rotstein, O., Brochard, L., Slutsky, A.S., et al. (2024) Electrical Impedance Tomography-Guided Positive End-Expiratory Pressure Titration in ARDS: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Intensive Care Medicine*, **50**, 617-631. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07362-2>
- [21] Sella, N., Pettenuzzo, T., Zaronello, F., Andreatta, G., De Cassai, A., Schiavolin, C., et al. (2021) Electrical Impedance Tomography: A Compass for the Safe Route to Optimal Peep. *Respiratory Medicine*, **187**, Article ID: 106555. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2021.106555>
- [22] 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>
- [23] Kwok, W.C., Touboul, A., Chow, W.S., et al. (2025) Lung Function Assessment by Electrical Impedance Tomography among Obese Patients. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 45337.
- [24] Nothofer, S., Steckler, A., Lange, M., Hézel, 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 7736. <https://doi.org/10.3390/jcm13247736>
- [25] Selpien, H., Penon, J., Thuncke, D., Schädler, D., Lautenschläger, I., Ohnesorge, H., et al. (2025) Adjustment of Positive End-Expiratory Pressure Based on Body Mass Index during General Anaesthesia: A Randomised Controlled Trial. *Anaesthesia*, **80**, 1322-1332. <https://doi.org/10.1111/anae.16656>
- [26] Francovich, J.E., Katira, B.H. and Jonkman, A.H. (2025) Electrical Impedance Tomography to Set Positive End-Expiratory Pressure. *Current Opinion in Critical Care*, **31**, 319-327. <https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000001255>
- [27] Fernandez-Bustamante, A., Sprung, J., Parker, R.A., Bartels, K., Weingarten, T.N., Kosour, C., et al. (2020) Individualized PEEP to Optimise Respiratory Mechanics during Abdominal Surgery: A Pilot Randomised Controlled Trial. *British Journal of Anaesthesia*, **125**, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2020.06.030>
- [28] Pereira, S.M., Tucci, M.R., Morais, C.C.A., Simões, C.M., Tonelotto, B.F.F., Pompeo, M.S., et al. (2018) Individual Positive End-Expiratory Pressure Settings Optimize Intraoperative Mechanical Ventilation and Reduce Postoperative Atelectasis. *Anesthesiology*, **129**, 1070-1081. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000002435>
- [29] 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>
- [30] Simon, P., Girrbach, F., Petroff, D., Schlieve, N., Hempel, G., Lange, M., et al. (2021) Individualized versus Fixed Positive End-Expiratory Pressure for Intraoperative Mechanical Ventilation in Obese Patients: A Secondary Analysis. *Anesthesiology*, **134**, 887-900. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000003762>
- [31] Jonkman, A.H., Alcalá, G.C., Pavlovsky, B., Roca, O., Spadaro, S., Scaramuzzo, G., et al. (2023) Lung Recruitment Assessed by Electrical Impedance Tomography (RECRUIT): A Multicenter Study of COVID-19 Acute Respiratory Distress Syndrome. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **208**, 25-38. <https://doi.org/10.1164/rccm.202212-2300oc>
- [32] Wang, Z.Y., Ye, S.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>
- [33] Erlandsson, K., Odenstedt, H., Lundin, S. and Stenqvist, O. (2006) Positive End-Expiratory Pressure Optimization Using Electric Impedance Tomography in Morbidly Obese Patients during Laparoscopic Gastric Bypass Surgery. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, **50**, 833-839. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.2006.01079.x>
- [34] Raueo, M., Spinelli, E., Sella, N., Slobod, D., Spadaro, S., Longhini, F., et al. (2022) Expert Opinion Document: "Electrical Impedance Tomography: Applications from the Intensive Care Unit and Beyond". *Journal of Anesthesia, Analgesia and Critical Care*, **2**, Article No. 28. <https://doi.org/10.1186/s44158-022-00055-6>
- [35] 钟芊, 符园园, 王昊. 电阻抗成像技术在围手术期肺保护中的应用与前景[J]. 实用医学杂志, 2025, 41(10): 1433-1438.

- 
- [36] Wisse, J.J., Goos, T.G., Jonkman, A.H., Somhorst, P., Reiss, I.K.M., Endeman, H., *et al.* (2024) Electrical Impedance Tomography as a Monitoring Tool during Weaning from Mechanical Ventilation: An Observational Study during the Spontaneous Breathing Trial. *Respiratory Research*, **25**, Article No. 179. <https://doi.org/10.1186/s12931-024-02801-6>
- [37] Longhini, F., Maugeri, J., Andreoni, C., Ronco, C., Bruni, A., Garofalo, E., *et al.* (2019) Electrical Impedance Tomography during Spontaneous Breathing Trials and after Extubation in Critically Ill Patients at High Risk for Extubation Failure: A Multicenter Observational Study. *Annals of Intensive Care*, **9**, Article No. 88. <https://doi.org/10.1186/s13613-019-0565-0>
- [38] Joussellin, V., Bonny, V., Spadaro, S., Clerc, S., Parfait, M., Ferioli, M., *et al.* (2023) Lung Aeration Estimated by Chest Electrical Impedance Tomography and Lung Ultrasound during Extubation. *Annals of Intensive Care*, **13**, Article No. 91. <https://doi.org/10.1186/s13613-023-01180-3>
- [39] Liu, Y., Liu, R., Li, B., Cai, L., Hou, J. and Zhao, W. (2025) Case Report: Electrical Impedance Tomography-Guided Ventilator Weaning in an Obese Patient with Severe Pneumonia. *Frontiers in Medicine*, **11**, Article 1505114. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1505114>
- [40] Iwata, H., Yoshida, T., Hoshino, T., Aiyama, Y., Maezawa, T., Hashimoto, H., *et al.* (2024) Electrical Impedance Tomography-Based Ventilation Patterns in Patients after Major Surgery. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **209**, 1328-1337. <https://doi.org/10.1164/rccm.202309-1658oc>
- [41] He, H., Zhao, Z., Becher, T., Bellani, G., Yoshida, T., Amato, M.B.P., *et al.* (2025) Recommendations for Lung Ventilation and Perfusion Assessment with Chest Electrical Impedance Tomography in Critically Ill Adult Patients: An International Evidence-Based and Expert Delphi Consensus Study. *E Clinical Medicine*, **89**, Article ID: 103575. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2025.103575>
- [42] Zhang, T., Tian, X., Liu, X., Ye, J., Fu, F., Shi, X., *et al.* (2022) Advances of Deep Learning in Electrical Impedance Tomography Image Reconstruction. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article 1019531. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1019531>
- [43] Xu, Y., Yang, L., Lu, S., Qin, S., Tang, R., Zhao, Z., *et al.* (2022) Emerging Trends and Hot Spots on Electrical Impedance Tomography Extrapulmonary Applications. *Heliyon*, **8**, e12458. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12458>