

电阻抗成像技术在机械通气患者撤机中的研究进展

廖成良, 向振武, 吴元玉, 樊麦英*

湖南师范大学附属第一医院(湖南省人民医院)急诊科, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年4月16日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月20日

摘要

机械通气是救治急危重症患者的一种重要生命支持手段, 然而随着机械通气时间的增加, 患者将出现呼吸机相关性肺损伤、呼吸机相关性膈肌功能障碍等并发症, 故机械通气撤机是医护人员面临的重要挑战之一。最佳的撤机时机不仅可以促进原发病的恢复, 而且还可以减少呼吸机相关性并发症、缩短患者住院时间。电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)是一种无创、无辐射的床旁成像技术, 可实时动态观察肺通气情况, 评估撤机时机。本文从EIT的工作原理、EIT在撤机方面的应用等几个方面进行综述, 为机械通气患者的撤机提供帮助。

关键词

机械通气, 电阻抗成像技术, 撤机, 呼吸机相关性肺损伤

Research Progress of Electrical Impedance Imaging Technology in Ventilator Weaning Patients with Mechanical Ventilation

Chengliang Liao, Zhenwu Xiang, Yuanyu Wu, Maiying Fan*

Emergency Department of the First Affiliated Hospital of Hunan Normal University (Hunan Provincial People's Hospital), Changsha Hunan

Received: Apr. 16th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 20th, 2025

Abstract

Mechanical ventilation is an important means of life support for critically ill patients. However, with

*通讯作者。

文章引用: 廖成良, 向振武, 吴元玉, 樊麦英. 电阻抗成像技术在机械通气患者撤机中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 946-952. DOI: 10.12677/acm.2025.1551454

the increase of mechanical ventilation time, patients will have complications such as ventilator-induced lung injury and ventilator-associated diaphragm dysfunction, so ventilator weaning from mechanical ventilation is one of the important challenges faced by medical staff. Optimal timing of ventilator weaning can not only promote the recovery of the primary disease, but also reduce the ventilator-related complications and shorten the hospitalization time of patients. Electrical impedance tomography (EIT) is a non-invasive and non-radiation bedside imaging technology, which can dynamically observe the pulmonary ventilation in real time and evaluate the opportunity of ventilator weaning. In this paper, the working principle of EIT and its application in ventilator weaning are reviewed to provide help for ventilator weaning patients with mechanical ventilation.

Keywords

Mechanical Ventilation, Electrical Impedance Imaging Technology, Ventilator Weaning, Ventilator-Induced Lung Injury

Copyright © 2025 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

机械通气患者的撤机一直是重症监护领域的重要问题，随着机械通气时间的延长，相关并发症风险呈显著增高趋势，包括呼吸机相关性肺损伤(ventilator-induced lung injury, VILI)、膈肌收缩功能抑制以及气压伤等病理改变，这些因素可能导致病情恶化、呼吸困难加重甚至呼吸停止[1]。长时间机械通气易引发呼吸机依赖现象，而持续性人工气道介入可导致气道黏膜受损及炎性水肿等结构性损伤。但如果撤机过早，患者又可能因气道廓清能力未恢复或氧代谢供需失衡，面临撤机后呼吸衰竭复发风险，进而增加重症死亡率。因此，撤机时机的合理把握是机械通气患者治疗过程中的重要一环。撤机失败涉及气道和肺功能障碍(airway and lung dysfunction, A)、中枢神经系统功能障碍(brain dysfunction, B)、心功能不全(cardiac dysfunction, C)、膈肌功能障碍(diaphragm dysfunction, D)、内分泌功能及代谢障碍(endocrine and metabolic dysfunction, E)五个方面[2]。因此，及时发现这些危险因素并尽早干预是缩短机械通气时间、提高撤机成功率的关键。EIT (electrical impedance tomography, EIT)是一项新兴的床旁无创、连续、动态、无辐射的肺通气监测技术，能监测肺区域通气、肺灌注、肺功能[3]。EIT 用于肺功能评估简便、准确、无辐射且可动态连续监测，是评估撤机时机的有效手段。故本文从 EIT 的工作原理出发，对其在机械通气患者撤机中的应用展开论述，为机械通气患者的撤机提供帮助。

2. EIT 的成像原理

人体的每个组织对电流都表现出某种类型的电阻，这种电阻称为阻抗。阻抗值取决于许多变量，包括组织中的水、电解质和大量细胞连接等能够降低阻抗的变量，以及骨组织、脂肪组织和气体等能够增加阻抗的变量。EIT 是根据人体内不同组织具有不同电阻率这一物理原理，通过给人体注入安全电流，测量相应体表的电位信息，来重建人体内部的电阻率分布或其变化图像的技术。在呼吸系统中，因肺内气体与组织介电特性差异显著，且其阻抗值随呼吸周期呈规律性波动，EIT 可无创捕获肺通气时空异质性信息。

在实施 EIT 检测时，需采用可调节电极带，配置 16 或 32 个电极单元，将其精准定位在胸廓第 4~5 肋间水平。在选定电极施加安全电流，同步采集相邻电极的边界电位差信号。使用特定算法将原始阻抗

数据进行图像重建,实现肺通气分布的动态可视化,进而观察肺部通气的变化情况。同时,依据胸腹解剖梯度将成像区域从腹侧至背侧划分为四个感兴趣区域(region of interest, ROI),其中非重力依赖区(ROI1-2)对应前胸壁区域,主要反映腹侧肺组织通气状态;重力依赖区(ROI3-4)则映射后背区域,主要反映背侧肺组织的力学特征[4]。相较于全区域阻抗波形图像反映的整体性肺电导特性,区域阻抗波形图像聚焦于预设 ROI 的整合性阻抗变量,由此可以比较肺部不同区域内的阻抗变化,实现肺部通气血流分布特性的空间特异性分析。

3. EIT 在临床上的应用

EIT 在 20 世纪 80 年代初被引入医学界。由于其具有非侵入性、零电离辐射、床旁实时监测的优点而用于临床,涵盖胃动力评估、脑功能成像、肿瘤定位诊断及肺功能定量分析等关键领域[5]。结合大量研究结果[6],EIT 技术在呼吸系统疾病诊疗中展现出独特技术优势,其突出临床应用价值体现在重症监护环境下区域性肺功能动态监测,通过同步解析局部通气异质性及血流灌注分布特征,实现了肺通气-灌注匹配状态的无创可视化评估。

3.1. EIT 监测肺通气

在重症监护病房的呼吸支持管理中,实施肺保护性通气策略以预防或减少呼吸机相关肺损伤已成为重症医学共识。在急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)的临床管理中,EIT 可以通过动态评估区域性肺通气特征,调整呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)对肺泡复张的效应,为肺保护性通气策略的优化提供量化依据[7]。临床研究证实,EIT 可以持续监测肺组织对肺复张操作、体位疗法及呼吸道管理措施等治疗的区域反应[8]。同时,EIT 还可以监测机械通气相关并发症(如气压伤)的早期征象,有利于早期治疗干预。EIT 测量的通气不对称分布可以协助临床医生诊断单侧肺部病变,对气胸、肺不张及人工气道位置异常等病理状态具有显著识别价值。Steinmann 等[9]将 EIT 应用于双腔气管导管定位评估,并与支气管镜检查方法进行比较,虽然 EIT 不能检测放置错误的支气管套囊,但利用 EIT 可立即发现放置不当的双腔支气管导管,使 EIT 成为双腔气管导管正确放置的无创检测手段。Costa 等[10]开发了用 EIT 监测气胸的独特算法,即使在微量气胸的情况下,仍保持 100%的敏感性。这些肺通气的监测功能使 EIT 逐步从实验研究向临床常规诊疗手段转化。

3.2. EIT 监测肺灌注

近年来,EIT 在肺血流动力学评估领域展现出突破性进展,特别是在区域性肺灌注异常检测方面获得学界高度关注[11]。传统方法监测肺灌注,如 CT 灌注成像[12]通过 X 射线衰减定量血流分布,可定位微小栓塞,但其静态成像特性、辐射暴露及无法床旁监测的缺陷限制了其在危重症动态管理中的应用;肺部超声依赖微泡造影剂增强回声信号[13],虽能半实时评估局部血流且无辐射,但对操作者经验要求高,且难以同步评估通气血流匹配。相比之下,EIT 利用右心室收缩期肺动脉系统充盈导致局部阻抗降低,舒张期毛细血管床血容量减少则引起阻抗增加这一原理,可在床旁、无辐射、连续监测肺灌注情况,同时,EIT 能够通过阻抗动态变化呈现可视化区域肺灌注和通气/灌注(Ventilation/Perfusion, V/Q)比例图像使其在 ARDS 俯卧位通气优化、肺栓塞快速筛查及机械通气患者实时管理中不可替代。Bluth 等[14]在动物身上通过 EIT 进行了肺灌注的监测和评估,结果表明 EIT 可以检测肺灌注信号。MAURI 等[15]发现,可以通过 EIT 技术检测盐水造影法中 ARDS 患者灌注受损通气区域不平衡的 V/Q 匹配情况。Lan 等[16]进一步通过 EIT 动态监测证实,俯卧位通气联合 PEEP 的调节可使得 ARDS 患者的 V/Q 匹配更好。这些研究表明,肺功能 EIT 应用于肺灌注评估中,能够发现 V/Q 分布不匹配的情况并进行调整,对于危重症患者

的呼吸管理具有重要临床决策价值。

4. EIT 在撤机方面的应用

EIT 作为观察肺通气、监测肺功能的有效工具, 可以应用 EIT 从预测自主呼吸实验结果和个体化设定机械通气病人的呼气末正压来缩短机械通气时间, 增加撤机成功率。

4.1. EIT 预测撤机风险

自主呼吸试验(spontaneous breathing trial, SBT)是目前临床上最常用的撤机方法, 但数据显示, 即便通过 SBT 的患者中, 仍有 10%~20%因撤机失败而需要重新插管[17], 这表明 SBT 在评估撤机方面存在一定的局限性, 这可能与 SBT 持续时间较短、不能精准反映患者肺功能有关。EIT 可以通过持续、动态监测肺通气变化, 为肺功能的综合评估提供量化指标, 其中包括: 区域顺应性(regional compliance, Creg)、潮汐阻抗变化(tidal impedance variation, TIV)、肺不均一指数(global inhomogeneity, GI)、肺泡过度膨胀和塌陷(overdistension and collapse, OD/CL)、吸气相气体分布(regional intratidal gas distribution, RIGD)等。

有研究发现, 当 T 管撤机失败时, 患者的呼气末肺电阻变化(delta end-expiratory lung impedance, dEELI)显著下降[18], 因其敏感性低, 特异性不足, 适用于监测肺复张而非独立预测撤机失败。此外, GI 作为一种评估肺通气异质性的指标, 对于那些已经历多次撤机失败的患者, 是否能够耐受下一次 SBT, 也具有一定的预测价值。在另一项研究中[19], 研究人员使用 EIT 监测延迟撤机患者的局部肺通气, 在脱机前后进行 EIT 记录, SBT 成功作为研究的终点, 其结果显示, GI 指数高的患者更难通过 SBT, 因其敏感性较高, 特异性中等, 是撤机失败的有效预警指标。这些研究表明, EIT 有可能作为一个新的指标加入到呼吸机撤离的临床评估系统中。

4.2. EIT 指导设定个体化呼吸机参数

EIT 通过动态监测肺部不同区域的电阻抗变化, 可以帮助识别通气不良区域, 如局部肺不张或过度通气, 从而指导医生根据患者的实际肺部状态调整呼气末正压和潮气量(Tidal Volume, TV), 以最大限度地改善通气效果, 避免肺损伤和撤机后的并发症。

呼气末正压有利于呼气末小气道开放的同时也利于 CO₂ 排出和氧合改善, 在呼吸危重症中广泛运用。合理应用呼气末正压, 能够提高机械通气效率使撤机时间提前, 然而不合理的应用呼气末正压, 反而加重肺过度充气引起气压伤[20]。多项研究表明应用基于局部顺应性变化的 OD/CL 法对 ARDS 患者进行 PEEP 滴定是安全可行的[21]。Costa 等[22]研究在两例接受气管插管治疗的重症肺炎患者中, 首次设计出 EIT 滴定 PEEP 法。在呼气末正压(PEEP)阶梯式递减试验中, EIT 通过记录动态监测 OD/CL 引起的肺顺应性下降累计百分比, 根据得到的数据通过特定的算法得出 OD/CL 平衡, 该值对应的 PEEP 被定义为最佳 PEEP, 表示该 PEEP 水平下肺组织的顺应性最佳。该研究通过与计算机断层扫描(computed tomography, CT)对比, 表明 EIT 技术能够精确监测肺部肺泡 OD/CL 区域的位置, 所测量的结果与 CT 高度一致。Zhao 等[23]通过前瞻性队列研究对比分析了 EIT 引导 PEEP 滴定与传统静态压力-容积(P-V)曲线法的临床效能差异, 研究显示, 在 PEEP 滴定的 2 小时后, EIT 滴定法的患者其肺静态顺应性以及驱动压均显著优于使用 PV 曲线法的患者。此外, 一项单中心随机交叉试验表明[24], 相较于 ARDSnet 高 PEEP-FiO₂表格, EIT 滴定法可显著降低中度至重度 ARDS 患者的机械功能, 有效降低 VILI 风险。

潮气量(Tidal Volume, TV)的设定对于保持有效通气和防止肺损伤至关重要。传统的潮气量设定通常基于患者的理想体重[25], 但这种方式可能忽略了肺部功能的个体差异。EIT 能够实时显示每次呼吸时肺部容积的变化, 帮助确定最佳的潮气量设定。

4.3. EIT 评估肺灌注情况

在撤机过程中,通过肺灌注的监测可以提供关于肺功能恢复程度的血流信息,帮助判断患者是否具备从有创呼吸机撤机的条件[26]。EIT 能够监测和计算肺部不同区域的通气和灌注情况,提供通气/血流比(Ventilation/Perfusion Ratio, V/Q Ratio)数据。理想的 V/Q 比为 0.84,表示通气和灌注匹配良好。当 V/Q 比异常时,表明存在通气不均或灌注不足的问题,这种情况可能需要延迟撤机或调整支持措施以改善肺功能[27]。同时,通过 EIT 识别出肺部灌注不足的区域,这些区域可能无法正常交换氧气,提示肺部功能尚未完全恢复。对这些区域可以采取适当的调整,如增加支持通气、改善循环等,从而促进肺部情况的改善。

4.4. EIT 联合其他指标指导呼吸机撤机

在机械通气患者的撤机过程中,EIT 能够为肺部的通气和功能状态提供重要的实时信息。将 EIT 与其他临床指标结合使用,可以更全面地评估患者的撤机准备情况,优化撤机决策,降低撤机失败的风险。

血气分析是评估患者氧合和二氧化碳清除能力的标准方法之一[28]。血气分析提供氧合、通气及酸碱平衡的量化数据,是撤机前呼吸功能评估的“金标准”。但其无法反映通气分布的局部异常,如重力依赖区塌陷或非重力依赖区过度通气,而 EIT 可以动态观察肺部氧合和通气分布的变化。将 EIT 与血气分析结合分析,EIT 弥补血气分析的空间盲区,而血气验证 EIT 监测的生理意义,两者结合可全面评估撤机条件,可以更全面地评估撤机时的肺功能。例如,当血气分析显示低氧合时,EIT 可以帮助识别是肺出现低效通气的部位。同时,EIT 能够评估二氧化碳的清除效率,与血气分析中的二氧化碳分压结合,有助于判断患者是否有足够的通气功能来维持二氧化碳的正常排出,指导撤机时机。

肺部超声能够实时评估肺复张情况以及撤机过程中是否存在肺不张。此外,肺部超声在检测肺水肿和评估液体负荷状态方面也非常有效,通过肺部超声,医生可以判断是否存在过多的肺水肿[29]。将 EIT 与肺部超声结合使用,可以更全面地评估患者的撤机准备情况,优化撤机决策,降低撤机失败的风险。Joussellin [30]等在一项前瞻性研究中表明,EIT 联合肺部超声有助于识别撤机风险极高的患者。同时,EIT 可以间接反映肺血流的变化,提供动态通气分布,结合肺部超声评估局部肺水肿或实变,可全面分析撤机过程中肺的病理生理变化,降低再插管风险。

膈肌功能是机械通气患者成功撤机的关键因素。膈肌超声可以通过测量膈肌活动度、厚度和增厚率(Diaphragm Thickening Fraction, DTF),来评估其功能状态[31]。而 EIT 能够反映膈肌收缩对肺部容积和通气的影响,联合使用这两项技术,可以在撤机前更准确地评估患者的呼吸肌力量和肺功能,能够优化撤机策略,减少撤机失败的风险。此外,通过 EIT 实时观察肺部通气的变化,可以帮助早期识别膈肌疲劳的征兆。若在撤机试验中发现肺通气不均与膈肌活动不足相关,则可延迟撤机或采取相应的呼吸支持措施。

在撤机评估过程中,心脏功能是一个重要的考虑因素[32]。通过监测心脏的泵血能力,可以了解心脏是否能够支持患者的循环需求:左心室射血分数代表着左心室的泵血效率,是评估心脏收缩功能的重要指标;右心室的收缩和舒张功能反映了心脏的循环血流状况;心肌缺血标志物,如心肌酶、心肌肌钙蛋白等,可以帮助判断是否存在心肌缺血或损伤。联合使用 EIT 和心肌功能指标评估撤机,尤其适用于具有心脏疾病或心脏负荷过重的重症患者。通过综合评估心脏和肺部的功能,减少撤机失败的风险,提高患者的预后。

呼吸浅快指数(Rapid Shallow Breathing Index, RSBI)是评估自主呼吸能力的经典指标之一,反映了患者的呼吸频率与潮气量的比值。RSBI 较高意味着患者的呼吸方式更为浅快,可能表明呼吸系统未能充分恢复,存在呼吸肌疲劳的风险不适合撤机[33]。联合 EIT 和 RSBI 评估撤机尤其适用于长期机械通气依赖的重症患者,能够更精准地评估患者的肺部恢复情况及呼吸肌功能,这种联合评估方法不仅能提高撤机

成功率, 还能减少患者出现呼吸衰竭或其他并发症的风险。

5. 结语

相较于 CT、磁共振成像等传统影像技术, EIT 利用生物阻抗原理, 可实现床旁、无创、连续监测的功能性成像。目前 EIT 已在机械通气可视化监测、撤机前呼吸力学评估等多个方面应用。虽然 EIT 技术已经相对成熟, 但其在判断改变阻抗的病因上缺乏特异性, 如肺炎性渗出、肺栓塞及间质纤维化等异质性疾病可能呈现相似的区域性图像, 仍需进一步深入探索研究, 以分析不同病理机制下 EIT 阻抗的变化有无差异。未来可以通过多根电极带阻抗分析、AI 辅助诊断等技术突破, 同时结合大规模临床研究, 建立 EIT 驱动的个体化撤机评估标准。随着 EIT 技术的不断研究与循证证据的积累, EIT 在机械通气的治疗中必将占据越来越重要的地位。

参考文献

- [1] Xu, B., Si, Q., Feng, Y., Guo, J. and Jiang, L. (2024) Research Progress in Pulmonary Rehabilitation in Patients Who Have Been Weaned off Mechanical Ventilation: A Review Article. *Technology and Health Care*, **32**, 2859-2864. <https://doi.org/10.3233/thc-231562>
- [2] Heunks, L.M. and van der Hoeven, J.G. (2010) Clinical Review: The ABC of Weaning Failure—A Structured Approach. *Critical Care*, **14**, Article No. 245. <https://doi.org/10.1186/cc9296>
- [3] Li, Z., Qin, S., Chen, C., Mei, S., Yao, Y., Zhao, Z., et al. (2022) Emerging Trends and Hot Spots of Electrical Impedance Tomography Applications in Clinical Lung Monitoring. *Frontiers in Medicine*, **8**, Article 813640. <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.813640>
- [4] 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>
- [5] Bayford, R. and Tizzard, A. (2012) Bioimpedance Imaging: An Overview of Potential Clinical Applications. *The Analyst*, **137**, 4635-4643. <https://doi.org/10.1039/c2an35874c>
- [6] Tomicic, V. and Cornejo, R. (2019) Lung Monitoring with Electrical Impedance Tomography: Technical Considerations and Clinical Applications. *Journal of Thoracic Disease*, **11**, 3122-3135. <https://doi.org/10.21037/jtd.2019.06.27>
- [7] Rauseo, 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>
- [8] Rahmel, T., Koniusch, A., Schwertner, M., Oprea, G., Adamzik, M. and Nowak, H. (2019) Evaluation of Inhaled Salbutamol Effectiveness under Supportive Use of Electrical Impedance Tomography in Ventilated ICU Patients: Study Protocol for a Randomised Controlled Clinical Trial. *BMJ Open*, **9**, e026038. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-026038>
- [9] Steinmann, D., Stahl, C.A., Minner, J., Schumann, S., Loop, T., Kirschbaum, A., et al. (2008) Electrical Impedance Tomography to Confirm Correct Placement of Double-Lumen Tube: A Feasibility Study. *British Journal of Anaesthesia*, **101**, 411-418. <https://doi.org/10.1093/bja/aen166>
- [10] Costa, E.L.V., Chaves, C.N., Gomes, S., Beraldo, M.A., Volpe, M.S., Tucci, M.R., et al. (2008) Real-Time Detection of Pneumothorax Using Electrical Impedance Tomography. *Critical Care Medicine*, **36**, 1230-1238. <https://doi.org/10.1097/ccm.0b013e31816a0380>
- [11] Xu, M., He, H. and Long, Y. (2021) Lung Perfusion Assessment by Bedside Electrical Impedance Tomography in Critically Ill Patients. *Frontiers in Physiology*, **12**, Article 748724. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.748724>
- [12] Jakubowski, B.R., Griffiths, M. and Goss, K.N. (2025) The Role of Imaging in Pulmonary Vascular Disease: The Clinician's Perspective. *Radiologic Clinics of North America*, **63**, 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.rcl.2024.07.008>
- [13] Schultz, H.H.L. and Davidsen, J.R. (2023) Thoracic Ultrasound in Lung Transplantation—Insights in the Field. *Life*, **13**, Article 695. <https://doi.org/10.3390/life13030695>
- [14] Bluth, T., Kiss, T., Kircher, M., Braune, A., Bozsak, C., Huhle, R., et al. (2019) Measurement of Relative Lung Perfusion with Electrical Impedance and Positron Emission Tomography: An Experimental Comparative Study in Pigs. *British Journal of Anaesthesia*, **123**, 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2019.04.056>
- [15] Spinelli, E., Perez, J., Chiavieri, V., Leali, M., Mansour, N., Madotto, F., et al. (2024) Pathophysiological Markers of Acute Respiratory Distress Syndrome Severity Are Correlated with Ventilation-Perfusion Mismatch Measured by

- Electrical Impedance Tomography. *Critical Care Medicine*, **53**, e42-e53. <https://doi.org/10.1097/ccm.00000000000006458>
- [16] Lan, L., Ni, Y., Zhou, Y., Fu, L., Wu, W., Li, P., *et al.* (2024) Peep-Induced Lung Recruitment Maneuver Combined with Prone Position for ARDS: A Single-Center, Prospective, Randomized Clinical Trial. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article 853. <https://doi.org/10.3390/jcm13030853>
- [17] Torrini, F., Gendreau, S., Morel, J., Carteaux, G., Thille, A.W., Antonelli, M., *et al.* (2021) Prediction of Extubation Outcome in Critically Ill Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Critical Care*, **25**, Article No. 391. <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03802-3>
- [18] Lima, J.N.G., Fontes, M.S., Szmuszkowicz, T., Isola, A.M. and Maciel, A.T. (2019) Electrical Impedance Tomography Monitoring during Spontaneous Breathing Trial: Physiological Description and Potential Clinical Utility. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, **63**, 1019-1027. <https://doi.org/10.1111/aas.13383>
- [19] 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>
- [20] Bello, G., Giammatteo, V., Bisanti, A., Delle Cese, L., Rosà, T., Menga, L.S., *et al.* (2024) High vs Low PEEP in Patients with ARDS Exhibiting Intense Inspiratory Effort during Assisted Ventilation: A Randomized Crossover Trial. *Chest*, **165**, 1392-1405. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2024.01.040>
- [21] 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>
- [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] Hsu, H., Chang, H., Zhao, Z., Wang, P., Zhang, J., Chen, Y., *et al.* (2021) Positive End-Expiratory Pressure Titration with Electrical Impedance Tomography and Pressure-Volume Curve: A Randomized Trial in Moderate to Severe Ards. *Physiological Measurement*, **42**, Article ID: 014002. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/abd679>
- [24] Jimenez, J.V., Munroe, E., Weirauch, A.J., Fiorino, K., Culter, C.A., Nelson, K., *et al.* (2023) Electric Impedance Tomography-Guided PEEP Titration Reduces Mechanical Power in ARDS: A Randomized Crossover Pilot Trial. *Critical Care*, **27**, Article No. 21. <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04315-x>
- [25] Arnal, J. and Daoud, E. (2021) Guidelines on Setting the Target Minute Ventilation in Adaptive Support Ventilation. *Journal of Mechanical Ventilation*, **2**, 80-85. <https://doi.org/10.53097/jmv.10029>
- [26] 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>
- [27] Busana, M., Giosa, L., Cressoni, M., Gasperetti, A., Di Girolamo, L., Martinelli, A., *et al.* (2021) The Impact of Ventilation-Perfusion Inequality in COVID-19: A Computational Model. *Journal of Applied Physiology*, **130**, 865-876. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00871.2020>
- [28] Chandrakar, S. and Gupta, N. (2021) Arterial Blood Gas as a Predictor of Mortality in COVID Pneumonia Patients Initiated on Noninvasive Mechanical Ventilation: A Retrospective Analysis. *Indian Journal of Critical Care Medicine*, **25**, 866-871. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10071-23917>
- [29] García-de-Acilu, M., Santafé, M. and Roca, O. (2023) Use of Thoracic Ultrasound in Acute Respiratory Distress Syndrome. *Annals of Translational Medicine*, **11**, 320-320. <https://doi.org/10.21037/atm-22-4576>
- [30] 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>
- [31] Turton, P., ALAidarous, S. and Welters, I. (2019) A Narrative Review of Diaphragm Ultrasound to Predict Weaning from Mechanical Ventilation: Where Are We and Where Are We Heading? *The Ultrasound Journal*, **11**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s13089-019-0117-8>
- [32] Vignon, P. (2018) Cardiovascular Failure and Weaning. *Annals of Translational Medicine*, **6**, 354-354. <https://doi.org/10.21037/atm.2018.05.46>
- [33] Jia, D., Wang, H., Wang, Q., Li, W., Lan, X., Zhou, H., *et al.* (2024) Rapid Shallow Breathing Index Predicting Extubation Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Intensive and Critical Care Nursing*, **80**, Article ID: 103551. <https://doi.org/10.1016/j.iccn.2023.103551>