

电阻抗成像技术对肺可复张性的评估

崔栋杰¹, 潘纯^{2*}

¹ 青海大学附属医院重症医学科 青海西宁

² 四川省医学科学院·四川省人民医院（电子科技大学附属医院）重症医学中心 四川成都

【摘要】肺可复张性评估在急性呼吸窘迫综合征（ARDS）患者的个体化通气治疗中具有举足轻重的地位。电阻抗断层成像（EIT）作为一项无创且能实时监测的床旁技术，通过对肺组织阻抗变化的监测，可提供复张/过度膨胀权衡比（R/D Ratio）、呼气末肺阻抗（EELI）等关键量化指标，从而实现对肺复张过程的动态可视化呈现。EIT 能够精确评估肺可复张性，鉴别高复张表型与低复张表型，并为最佳呼气末正压（PEEP）的个体化滴定提供指导，在复张肺泡与避免肺过度膨胀之间达成最佳平衡。尽管 EIT 存在空间分辨率有限等局限，但其凭借独特优势，显著提高了肺保护性通气的精准度，具备广阔的临床应用前景。

【关键词】肺可复张性；电阻抗断层扫描（EIT）；急性呼吸窘迫综合征（ARDS）；呼气末正压（PEEP）；机械通气

【收稿日期】2025 年 12 月 27 日

【出刊日期】2026 年 1 月 26 日

【DOI】10.12208/j.ijcr.20260004

Assessment of lung recruitability using electrical impedance tomography

Dongjie Cui¹, Chun Pan^{2*}

¹Department of Critical Care Medicine, Affiliated Hospital of Qinghai University, Xining, Qinghai

²Center of Critical Care Medicine, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu, Sichuan

【Abstract】The assessment of lung recruitability plays a critical role in the individualized ventilation management of patients with acute respiratory distress syndrome (ARDS). As a non-invasive and real-time bedside monitoring technique, electrical impedance tomography (EIT) can detect changes in lung tissue impedance, providing key quantitative indicators such as the recruitment-to-overdistension ratio (R/D Ratio) and end-expiratory lung impedance (EELI). This allows for dynamic and visual representation of the lung recruitment process. EIT enables precise evaluation of lung recruitability, distinguishes between high- and low-recruitability phenotypes, and offers guidance for the individualized titration of optimal positive end-expiratory pressure (PEEP), thereby achieving the best balance between alveolar recruitment and avoidance of lung overdistension. Despite limitations such as limited spatial resolution, EIT, with its unique advantages, significantly enhances the precision of lung-protective ventilation and holds broad prospects for clinical application.

【Keywords】Lung recruitability; Electrical impedance tomography (EIT); Acute respiratory distress syndrome (ARDS); Positive end-expiratory pressure (PEEP); Mechanical ventilation

1 肺可复张性的重要性

肺的可复张性指的是在特定条件下，原本塌陷或不张的肺组织能够重新恢复复张和通气的功能，这一特性在肺部疾病的诊断和治疗过程中具有重要的作用^[1]。尤其是对急性呼吸窘迫综合征（acute respiratory distress syndrome, ARDS），按照 ARDS 的肺可复张性，可以分为高可复张性和低可复张性的临床亚型，高可

复张性是指在增加气道压力时，肺泡能够复张，并且改善氧合、肺顺应性、通气/血流比例并降低肺泡死腔等；低可复张性是指在增加气道压力时，不能复张塌陷的肺泡，反而导致正常通气肺组织过度膨胀，进而引起死腔增加、肺顺应性下降、通气/血流比例恶化并且导致氧合的恶化，甚至影响血流动力学^[2,3]。临床研究发现，肺泡塌陷量多的早期 ARDS 临床预后往往不佳，然而给予

第一作者简介：崔栋杰（1997-）男，山西省阳泉市人，汉族，研究生，住院医师，研究方向：急性呼吸窘迫综合征；

*通讯作者：潘纯

患者高 PEEP 往往能够改善其临床预后; 但对于低可复张性 ARDS, 在给予高 PEEP 后往往会导致气压伤的发生, 并且影响临床预后^[4]。因此, 评价肺可复张性能够指导临床 PEEP 的设定, 进而优化机械通气治疗。

肺可复张性评价的传统指标包括肺超声评分变化、氧合反应、肺顺应性变化、应力指数及 R/I 比值等, 随着临床研究的不断深入, EIT 成为近年来重症呼吸监测领域评估肺可复张性的一项革命性床旁技术。

2 EIT 对可复张性的评价

2.1 EIT 评估肺可复张的机制

利用肺组织中气体、血液和软组织之间的电阻抗差异 (其中气体的阻抗最高, 而血液和组织的阻抗较低), EIT 技术通过胸部体表电极阵列注入微弱的交流电, 并采集体表电压。通过反演算法, 重建出肺部的电阻抗分布图像。在呼吸过程中, 肺泡的充气与萎陷导致肺内气体含量的变化, 这一变化进而引起电阻抗的改变, 从而反映出肺部的通气状态^[5]。当塌陷肺泡复张时, 肺内通气量增加, 相应区域电阻抗升高; 反之, 过度充气或肺泡塌陷导致肺内通气量减少, 电阻抗降低。通过量化这些变化, EIT 可评估肺可复张性及复张效果^[4]。

2.2 EIT 评价肺可复张性的临床指标

(1) 复张/过度膨胀权衡比 (R/D Ratio)

复张/过度膨胀权衡比 (R/D Ratio) 可定量分析复张与过度膨胀的平衡关系, 成为选择最佳 PEEP 的关键依据^[2]。基于这些指标, 可分为高可复张性和低可复张性两种临床类型: 前者表现为依赖区通气显著改善、 Δ EELI 大幅增加且 R/D Ratio 大于 1, 适合采用较高 PEEP 和积极复张策略; 后者增加 PEEP 后 R/D Ratio 小于 1, 应避免采用低 PEEP 的通气策略^[6,7]。

(2) 通气中心的变化

通气中心 (center of ventilation, COV) 是指在呼吸过程中, 通过评价肺部通气量分布的位置, 能够有效量化腹背侧垂直方向上的通气变化分布。在健康个体中, COV 处于肺部中间相对稳定的位置, 反映了肺部整体通气的均衡性。但在肺部疾病状态下, COV 会发生偏移。以 ARDS 患者为例, 由于重力依赖区肺泡更容易发生塌陷, 通气量减少, 使得 COV 向非重力依赖区移动。Spinelli E 等人的研究表明, 通过 EIT 监测 COV 的变化, 可辅助判断肺部病变的进展及肺可复张性情况^[8]。在肺复张治疗后, 若 COV 逐渐向正常位置回归, 表明重力依赖区塌陷肺泡得以复张, 通气量增加, 肺部整体通气分布趋于均衡, 提示肺可复张性良好, 治疗措施有效; 反之, 若 COV 持续偏移, 可能说明肺复张效

果不理想, 存在部分肺泡难以复张, 需要进一步优化治疗方案。

(3) 呼气末肺阻抗 (EELI) 变化

呼气末肺阻抗变化 (End-Expiratory Lung Impedance, EELI) 反映了肺容积的变化, 并能够监测肺复张和塌陷的动态过程。EELI 的变化与肺的气体容量及其顺应性密切相关, EIT 技术能够在呼吸周期内实时捕捉这些变化。通过对 EELI 的监测, 研究发现, PEEP 的调整可以显著影响 EELI 的数值, 进而影响肺的通气和氧合状态, 从而可以用来评估肺可复张性。EELI 在临床中可用于评估肺可复张性, 尤其是在急性呼吸窘迫综合征 (ARDS) 患者中, EELI 大于 10-15% 提示复张潜力大, 小于 5% 提示复张潜力小, 实时监测 EELI 变化可以帮助医生判断通气策略的有效性及其调整的必要性^[9]。

(4) 肺部依赖 (DSS) 和非依赖静默空间 (NSS)

肺部静默空间被定义为通气不良的肺部区域, 其阻抗变化小于最大呼气末至吸气末阻抗变化的 10%, 该变化基于肺部感兴趣区域 (ROI) 的测量。沉默空间可以根据穿过通气中心 (CoV) 的水平线分为依赖沉默空间 (DSS) 和非依赖沉默空间 (NSS)^[10]。NSS 可能提示过度膨胀, 而 DSS 的变化已证实与全局压力-容积 (P-V) 曲线所测得的肺容量再扩张和去扩张变化存在关联, 这种关联体现在递增和递减呼气末正压 (PEEP) 步骤中^[11]。

(5) 阻抗比

阻抗比是 EIT 技术的核心和前提, 它通过将腹侧区域的通气阻抗除以功能性 EIT 图像中背侧通气阻抗得出, 可能同时反映肺部的通气与复张情况。正常情况下, 阻抗比通常 >1.2 , 甚至更高; 当阻抗比 <1.0 时, 表示通气绝大部分都在非重力依赖区, 重力依赖区几乎无通气, 这是重度 ARDS 的典型表现, 若随着 PEEP 增加, 阻抗比显著升高, 并逐渐趋近于 1, 则提示患者的肺有很高的复张的潜力^[12]。

3 基于电阻抗断层成像 (EIT) 的肺可复张性评价与个体化 PEEP 滴定

3.1 EIT 能够精准量化并均衡肺泡复张与过度膨胀

传统的呼吸机参数, 例如气道平台压与顺应性, 所反映的是全肺的整合性信息, 难以揭示急性呼吸窘迫综合征 (ARDS) 肺内固有的异质性, 即塌陷区域、正常通气区域和过度膨胀区域并存的状态^[13]。这种异质性致使任何基于全局指标的设置都可能成为一种折衷方案, 在使一部分肺泡复张的同时, 引发另一部分肺泡

的过度膨胀。电阻抗断层成像(EIT)借助监测肺组织阻抗的改变,达成了对区域性通气的可视化与量化^[14]。其最具代表性的功能指标为“复张-过度膨胀权衡比”。该指标在呼气末正压(PEEP)变动(如递增或递减)过程中,动态计算新复张的肺泡单位(阻抗由无到有)与新产生的过度膨胀单位(阻抗从正常变为极高)的比例,为临床决策提供了直接依据。较高的权衡比表明,增加PEEP可带来显著的复张效益,且过度膨胀风险较低,属于理想操作。反之,较低的权衡比则发出警示,提示当前设置正造成净损伤^[15]。这使得临床医生能够突破对单一压力的依赖,转而探寻一个最佳的生理学平衡点,即在该PEEP水平下,肺复张获益达到最大化,同时过度膨胀代价降至最小化^[16]。EIT使通气管理从依赖推测迈入基于实时可视化数据的精准权衡阶段。

3.2 EIT 导向的肺可复张性评价能够排除气道闭合压(AOP)的影响

气道闭合压(AOP)是指在呼气末维持肺泡开放所需的最低压力。当气道压力低于这个值时,肺泡和小气道就会发生塌陷闭合^[17,18]。通常可以通过分析低流速法描记的压力-容积曲线的呼气支来识别,表现为曲线偏离直线的拐点^[19]。在临床上,AOP被认为是为防止呼气末肺泡塌陷所需设置的最低PEEP,但它有一个主要缺陷,它是一个“整体肺”的指标。AOP代表的是整个肺加权平均后的气道闭合压力^[20]。在肺部病变不均一的患者(如ARDS)中,不同区域的AOP是不同的。因此,仅凭全局AOP无法告诉我们,在某个PEEP水平下,到底是哪些区域的肺泡被复张^[21]。EIT的核心优势在于区域性评估。它不关心那个单一的、全局的AOP数值,而是直接观察在不同PEEP下,各个区域肺组织的实际情况^[22]。EIT可以通过监测区域呼气末肺阻抗来反映区域呼气末肺容积,当PEEP增加时,如果一个区域的EELI显著增加,这直接证明该区域之前是处于塌陷状态,而现在被复张了,这就绕过了对全局AOP的依赖,直接给出了“可复张性”的答案;此外,EIT还可以可视化通气分布,在低PEEP时,通气可能只集中在非依赖区,随着PEEP升高并超过依赖区的区域性AOP,通气会重新分布到依赖区。EIT可以实时显示这一过程,并通过阻抗比等参数进行量化。阻抗比从远小于1向1靠近的趋势,本身就是肺可复张性的最强证据,与全局AOP数值无关^[23]。

3.3 EIT 导向的 PEEP 能够依据肺可复张性实现个体化设置

传统设置 PEEP 的方法(如基于氧合或全局顺应性)存在一个根本缺陷,它们将肺视为一个均质的整体,但在 ARDS 当中,肺是高度不均质的,它包括塌陷但可复张的肺组织(主要位于重力依赖区)、健康的肺组织、实变或纤维化的肺组织、还有过度扩张风险的肺组织(主要位于非重力依赖区)^[24]。EIT 导向的 PEEP 设置正是通过实时、床旁可视化肺的可复张性来实现真正意义上的个体化 PEEP 滴定^[25]。EIT 通过监测区域阻抗的变化,能够将这些区域区分开,通过阻抗比、 Δ EELI 等参数,客观评估患者的肺复张潜力,指导医生选择一个能最大限度复张的塌陷肺泡,同时最小化健康肺泡过度扩张的 PEEP 水平^[26]。

4 EIT 评估肺可复张性的局限性

电阻抗断层成像(EIT)在评估肺可复张性方面虽具有无创、实时监测等优势,但仍存在多方面的局限性。首先,其空间分辨率不足,仅能监测电极带所在平面(通常为第4-6肋间)的局部肺区,无法覆盖全肺三维结构,可能导致上腹侧或下背侧塌陷或过度膨胀的漏诊,北京协和医院的研究显示2D-EIT的漏诊率可达30%^[27]。其次,EIT对体位和操作依赖性较强,仰卧位时可能低估重力依赖区塌陷,且电极带放置位置及患者体型(如肥胖)会显著影响成像准确性^[28]。最后,目前尚缺乏大规模随机对照试验证实EIT指导的PEEP滴定对患者长期预后的改善作用,其临床价值仍需进一步验证^[29]。

5 总结与展望

肺可复张性评估作为ARDS患者机械通气治疗的重要依据,其临床应用价值已得到广泛认可。通过实时监测区域顺应性变化、呼气末肺阻抗(EELI)和塌陷比例等关键指标,EIT实现了对肺复张过程的动态可视化,为个体化PEEP滴定提供了客观依据,虽然目前仍存在一定局限性,但其无创、实时、动态的独特优势使其具有广阔的临床应用前景和发展潜力。

参考文献

- [1] Chioma R, Amabili L, Ciarmoli E, et al. The importance of lung recruitability: A novel ultrasound pattern to guide lung recruitment in neonates. *J Neonatal Perinatal Med.* 2022; 15(4):767-776.
- [2] Wendel Garcia PD, Caccioppola A, Coppola S, et al. Latent class analysis to predict intensive care outcomes in Acute Respiratory Distress Syndrome: a proposal of two pulmonary phenotypes. *Crit Care.* 2021 Apr 22;25(1):154.

- [3] Dalla Corte F, Mauri T, Spinelli E, et al. Dynamic bedside assessment of the physiologic effects of prone position in acute respiratory distress syndrome patients by electrical impedance tomography. *Minerva Anesthesiol.* 2020 Oct;86(10):1057-1064.
- [4] Writing Group for the Alveolar Recruitment for Acute Respiratory Distress Syndrome Trial (ART) Investigators; Cavalcanti AB, Suzumura ÉA, Laranjeira LN, et al. Effect of Lung Recruitment and Titrated Positive End-Expiratory Pressure (PEEP) vs Low PEEP on Mortality in Patients with Acute Respiratory Distress Syndrome: A Randomized Clinical Trial. *JAMA.* 2017 Oct 10;318(14):1335-1345.
- [5] Chiumello D, Arnal JM, Umbrello M, et al. Hysteresis and Lung Recruitment in Acute Respiratory Distress Syndrome Patients: A CT Scan Study. *Crit Care Med.* 2020 Oct;48(10):1494-1502. doi: 10.1097/CCM.0000000000004518IF: 6.0 Q1. Erratum in: *Crit Care Med.* 2022 Mar 1;50(3): e339.
- [6] Vasques F, Sanderson B, Barrett NA, et al. Monitoring of regional lung ventilation using electrical impedance tomography. *Minerva Anesthesiol.* 2019 Nov;85(11):1231-1241.
- [7] Scaramuzza G, Spadaro S, Dalla Corte F, et al. Personalized Positive End-Expiratory Pressure in Acute Respiratory Distress Syndrome: Comparison Between Optimal Distribution of Regional Ventilation and Positive Transpulmonary Pressure. *Crit Care Med.* 2020 Aug;48(8):1148-1156.
- [8] Spinelli E, Perez J, Chiavieri V, Leali M, Mansour N, Madotto F, Rosso L, Panigada M, Grasselli G, Vaira V, Mauri T. Pathophysiological Markers of Acute Respiratory Distress Syndrome Severity Are Correlated With Ventilation-Perfusion Mismatch Measured by Electrical Impedance Tomography. *Crit Care Med.* 2025 Jan 1;53(1):e42-e53.
- [9] Zhang R, He H, Yun L, et al. Effect of postextubation high-flow nasal cannula therapy on lung recruitment and overdistension in high-risk patient. *Crit Care.* 2020 Mar 6;24(1):82.
- [10] Ukere A., März A., Wodack K.H., et al. Perioperative assessment of regional ventilation during changing body positions and ventilation conditions by electrical impedance tomography. *Br. J. Anaesth.* 2016; 117:228-235.
- [11] Spadaro S., Mauri T., Böhm S.H., et al. Variation of poorly ventilated lung units (silent spaces) measured by electrical impedance tomography to dynamically assess recruitment. *Crit. Care.* 2018; 22:26.
- [12] Putensen C, Hentze B, Muenster S, et al. Electrical Impedance Tomography for Cardio-Pulmonary Monitoring. *J Clin Med.* 2019 Aug 7;8(8):1176.
- [13] Gattinoni L, Caironi P, Pelosi P, Goodman LR. What has computed tomography taught us about the acute respiratory distress syndrome? *Am J Respir Crit Care Med.* 2001 Nov 1;164(9):1701-11.
- [14] Frerichs I, Amato MB, van Kaam AH, Tingay DG, Zhao Z, Grychtol B, Bodenstein M, Gagnon H, Böhm SH, Teschner E, Stenqvist O, Mauri T, Torsani V, Camporota L, Schibler A, Wolf GK, Gommers D, Leonhardt S, Adler A; TREND study group. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDY group. *Thorax.* 2017 Jan;72(1):83-93.
- [15] Costa EL, Borges JB, Melo A, Suarez-Sipmann F, Toufen C Jr, Bohm SH, Amato MB. Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography. *Intensive Care Med.* 2009 Jun;35(6):1132-7.
- [16] Pereira SM, Tucci MR, Morais CCA, Simões CM, Tonelotto BFF, Pompeo MS, Kay FU, Pelosi P, Vieira JE, Amato MBP. Individual Positive End-expiratory Pressure Settings Optimize Intraoperative Mechanical Ventilation and Reduce Postoperative Atelectasis. *Anesthesiology.* 2018 Dec;129(6):1070-1081.
- [17] Borges, J. B., Costa, E. L. V., & Amato, M. B. P. Electrical impedance tomography for titration of positive end-expiratory pressure in acute respiratory distress syndrome. *Annals of Translational Medicine,* 10(4), 218.
- [18] Jonkman AH, Alcala GC, Pavlovsky B, et al. Lung Recruitment Assessed by Electrical Impedance Tomography (RECRUIT): A Multicenter Study of COVID-19 Acute Respiratory Distress Syndrome. *Am J Respir Crit Care Med.* 2023 Jul 1;208(1):25-38.
- [19] Costa, E. L. V., Borges, J. B., Melo, A., Suarez-Sipmann, F.,

- Toufen, C., Bohm, S. H., & Amato, M. B. Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography. *Intensive Care Medicine*, 35(6), 1132–1137.
- [20] Frerichs, I., Amato, M. B., van Kaam, A. H., Tingay, D. G., Zhao, Z., Grychtol, B., Bodenstein, M., Gagnon, H., Böhm, S. H., Teschner, E., Stenqvist, O., Lundin, S., & Hedensiterna, G. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDy group. *Thorax*, 72(1), 83–93.
- [21] Spinelli, E., Mauri, T., & Beitler, J. R. What the ICU can learn from EIT. *Intensive Care Medicine*, 48(5), 594–596.
- [22] Zhao, Z., Chang, M. Y., Gow, C. H., Zhang, J. H., Hsu, Y. L., Frerichs, I., Chang, H. T., & Möller, K. The 'PEEP trial' in ARDS: using electrical impedance tomography to find the balance between recruitment and overdistension. *Critical Care*, 24(1), 678.
- [23] Mauri, T., Spinelli, E., & Pesenti, A. Electrically sensed patient–ventilator interactions. *Intensive Care Medicine Experimental*, 8(1), 31.
- [24] Costa EL, Borges JB, Melo A, Suarez-Sipmann F, Toufen C Jr, Bohm SH, Amato MB. Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography. *Intensive Care Med*. 2009 Jun;35(6):1132–7.
- [25] Borges, J. B., Costa, E. L. V., & Amato, M. B. P. Electrical impedance tomography for titration of positive end-expiratory pressure in acute respiratory distress syndrome. *Annals of Translational Medicine*, 10(4), 218.
- [26] Zhao Z, Chang MY, Chang MY, Gow CH, Zhang JH, Hsu YL, Frerichs I, Chang HT, Möller K. Positive end-expiratory pressure titration with electrical impedance tomography and pressure-volume curve in severe acute respiratory distress syndrome. *Ann Intensive Care*. 2019 Jan 17;9(1):7.
- [27] 刘文佳,周润爽,李尊柱,等.应用 EIT 技术监测 ICU 心外科术后患者肺部通气情况及其价值初探[J].协和医学杂志,2024,15(03):573-579.
- [28] LoboB, HermosaC, AbellaA,et al. Electrical impedance tomography[J].*Ann Transl Med*,2018,6(2): 26.
- [29] Sanchez-Piedra C, Rodríguez-Ortiz-de-Salazar B, Roca O, et al. Electrical impedance tomography for PEEP titration in ARDS patients: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Monit Comput*. 2025 Feb 26.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心（OAJRC）所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS