

电阻抗成像技术肺灌注的研究进展

向振武, 吴元玉, 汤淑媛, 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: 2026年3月21日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月22日

摘要

肺泡通气 - 血流灌注(V/Q)匹配失调是急性呼吸衰竭的核心病理生理机制, 其精准评估是重症呼吸疾病诊疗的关键环节。现有V/Q评估的影像学方法例如多惰性气体清除技术、核素显像和CT等, 存在辐射暴露、无法床旁连续监测等局限, 难以满足重症监护室床旁实时诊疗需求。电阻抗成像技术(Electrical Impedance Imaging Technology, EIT)作为无创、无辐射的床旁功能成像技术, 可动态追踪肺通气与灌注的时空分布, 检测效能已获多项临床前与临床研究验证, 为重症患者V/Q匹配的床旁评估提供了全新方案。本文系统梳理EIT肺灌注成像原理与方法, 重点阐述其在急性肺栓塞诊疗、急性呼吸窘迫综合征个体化管理、肺移植术后功能评估等领域的最新研究进展, 客观分析技术现存局限性并展望未来发展方向, 旨在为该技术的临床标准化应用与重症呼吸精准诊疗提供循证依据。

关键词

电阻抗成像技术, 急性呼吸衰竭, 肺通气灌注

Research Progress of Electrical Impedance Tomography in Lung Perfusion

Zhenwu Xiang, Yuanyu Wu, Shuyuan Tang, Maiying Fan*

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

Received: March 21, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 22, 2026

Abstract

Alveolar ventilation-perfusion (V/Q) mismatch is the core pathophysiological mechanism of acute respiratory failure (ARF), and its accurate assessment serves as a critical link in the diagnosis and management of critical respiratory diseases. Existing modalities for V/Q assessment, including the

*通讯作者。

文章引用: 向振武, 吴元玉, 汤淑媛, 樊麦英. 电阻抗成像技术肺灌注的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 4150-4159. DOI: 10.12677/acm.2026.1641684

multiple inert gas elimination technique (MIGET), as well as imaging methods such as radionuclide imaging and computed tomography (CT), have inherent limitations including ionizing radiation exposure and the inability to perform continuous bedside monitoring, which renders them difficult to meet the requirements of real-time bedside diagnosis and treatment in the intensive care unit (ICU). Electrical Impedance Tomography (EIT), as a non-invasive, radiation-free bedside functional imaging modality, can dynamically track the spatiotemporal distribution of pulmonary ventilation and perfusion. Its detection performance has been validated by numerous preclinical and clinical studies, providing a novel solution for the bedside assessment of V/Q matching in critically ill patients. This review systematically summarizes the principles and methodologies of EIT-based lung perfusion imaging, and focuses on the latest research advances in its clinical applications, including the diagnosis and treatment of acute pulmonary embolism (APE), individualized management of acute respiratory distress syndrome (ARDS), and postoperative functional evaluation after lung transplantation. It also objectively analyzes the existing limitations of the technology and prospects its future development directions, aiming to provide evidence-based references for the standardized clinical application of this technology and the precise diagnosis and management of critical respiratory diseases.

Keywords

Electrical Impedance Imaging Technology, Acute Respiratory Failure, Pulmonary Ventilation-Perfusion

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. 前言

随着重症医学的发展,肺泡通气与肺毛细血管灌注(V/Q)的精准评估在急性呼吸衰竭(Acute Respiratory Failure, ARF)等疾病的救治中受到广泛关注。病理状态下的 V/Q 失调是导致严重低氧血症的核心机制。传统的 V/Q 评估方法主要包括多惰性气体清除技术(MMIMS-MIGET)与核素肺通气/灌注显像等。MMIMS-MIGET 利用微孔膜进样质谱技术,是目前医学界公认的评估 V/Q 匹配情况的生理学“金标准”,但由于其高度依赖外源性气体溶液的持续输注及频繁的有创采血,操作门槛极高,仅限于高质量的基础科研,缺乏临床普适性[1]。另一方面,核素通气/灌注显像(如 SPECT)虽能直观显示气体与微粒的分布情况,但高度依赖核医学科专业设备,不仅涉及电离辐射、还增加危重患者的院内转运风险,且无法提供指导呼吸机参数调整的连续动态反馈,难以满足重症监护室(ICU)瞬息万变的抢救需求[2]。

在床旁影像学方面,肺部超声(Lung Ultrasound, LUS)作为一种可以快速且可靠的床旁影像学工具,可以识别肺部实变、胸腔积液等肺部病变。LUS 凭借其高空间分辨率,通过观察 A 线、B 线、实变及肺点等征象,能够敏锐地捕捉胸膜下的解剖学病变,为临床提供即时的肺部结构。LUS 虽操作极便但存在骨骼遮挡、气体阻断、操作者的体位依赖的难题,且难以观察到深部肺组织以及肺部血流变化。

面对上述临床监测盲点,胸部电阻抗成像(Electrical Impedance Tomography, EIT)技术在过去十五年间迅速崛起。作为一种新兴的无创、无辐射床旁功能性成像工具, EIT 以其极高的时间分辨率,能够实时、动态地追踪全肺通气与血流灌注的空间分布及其演变。这种连续监测区域 V/Q 匹配的能力,不仅加深了临床医师对呼吸衰竭微观病理生理的理解,更极大地增强了床旁评估肺部对各类干预措施反应的效能。更重要的是, EIT 有效弥补了 LUS 在展现全肺全局通气分布及深部组织演变上的局限。将两者结合,医

生既能通过 LUS 识别“肺结构损毁”的性质与部位,又能通过 EIT 精准调整治疗方案以优化“肺生理功能”,从而在床旁实现对危重症患者呼吸循环状态的全面掌控。多项研究显示, EIT 肺灌注成像其准确性已经得到了广泛的认可。相关的动物实验中指出,在分别采用 10%和 5%生理盐水浓度进行 EIT 肺灌注中, EIT 与 PET 之间的相对灌注差异均小于 9%, EIT 与 PET 在测量和追踪相对肺灌注变化方面具有一致性,对临床应用来说令人满意[3]。还有文章指出,通过盐水灌洗或内毒素注入诱导的实验区域亚叶急性呼吸窘迫症(ARDS)中, EIT 可估算区域灌注。其背腹侧($r = 0.92$)和左右方向($r = 0.85$)均有强相关性, EIT 检测到的灌注分布与碘对比增强多排螺旋 CT (MDCT)在八个肺段的一致度为 8.74% [4]。此外,有文章指出三名先天性心脏病患者存在心脏解剖的异常会对肺部血流产生影响,但是在床旁行 EIT 肺灌注的结果与临床无法获得的传统影像方式(如 CT、磁共振成像、血管造影)结果一致,这同样也证明了 EIT 肺灌注的可靠性和准确性[5]。

本文将重点梳理 EIT 肺通气与灌注成像的原理,并深度剖析近年来 EIT 监测肺灌注的最新临床应用与前沿突破,旨在为未来的基础医学研究与重症临床个性化治疗提供详细真实的循证依据与全新思路。

2. EIT 的成像原理

2.1. EIT 肺通气成像的基本原理

EIT 肺通气是通过测量胸部表面电极阵列产生的微弱电位差,重建内部组织的电导率分布,从而反映由于呼吸(通气)和心动周期(灌注)引起的肺部阻抗变化[6]。临床常规操作中,将配置 16 或 32 个电极的柔性电极带固定于患者胸廓第 4~5 肋间水平,通过电极阵列施加安全低频交变激励电流,同步采集胸廓边界电压信号,利用图像重建算法求解电磁场逆问题,最终实现胸腔电阻抗分布的动态可视化。

2.2. EIT 肺灌注成像的基本原理

EIT 肺灌注成像广泛定义为:一种利用胸部表面电极阵列,通过测量高频微弱交流电在胸腔内产生的生物阻抗变化,实时重建并可视化肺循环血流分布的非侵入性、无辐射床旁功能成像技术。从物理学的基础上来看, EIT 肺灌注是基于人体组织导电性(Conductivity)差异的成像。人体中血液富含电解质(如钠离子、氯离子),是良好的导体,其阻抗远低于充满空气的肺组织(绝缘体)。当血液流经肺血管系统时,由于血容量的搏动(内源性变化)或高导电性指示剂的通过(外源性变化),肺部局部的电导率会发生动态波动。EIT 设备通过高频(通常为 50~100 kHz)和低强度(5~10 mA)的交流电循环刺激,捕捉这些极微小的阻抗变化(通常仅为呼吸信号幅度的 3%~5%),利用重建算法生成二维或三维的灌注分布图。

在肺灌注信号的提取上,当前临床主要发展出肺血管搏动法与高渗对比剂造影法两大路径(见表 1)。肺血管搏动法通过分析肺血管搏动的阻抗变化来反映肺灌注,但搏动的电阻并不是直接反映局部肺灌注血流,容易受到血液流速以及器官的机械变形和运动等影响[7]。随着技术的进步,搏动法在不断革新。虽然肺血管搏动法在早期面临着可靠性的质疑,但近些年来越来越多的研究指出其临床性能有实质性的提升[8]。高渗氯化钠液造影法是最常用的 EIT 肺灌注方法,其基于首次通过成像原理,在呼吸暂停期间通过“弹丸”式注射高渗氯化钠液引起胸腔电阻抗变化来反映区域肺灌注情况,机械通气患者通过吸气或呼气暂停,自主呼吸患者需经过屏气试验(呼吸末屏 ≥ 8 秒) [9]。目前多项动物实验和临床研究已证明高渗氯化钠液作为造影剂评估肺血流灌注具有良好的可靠性,但氯化钠浓度与呼吸暂停具体时间在不同研究中尚有争议。最近在一项研究中,20 例患者 ARDS 患者被分为对照组(apnea 组,传统屏气法)和实验组(non-apnea 组,持续机械通气无需屏气)进行随机交叉比较,发现屏气与非屏气方法间的像素级灌注相关性总体一致性良好(中位 $r = 0.94$, IQR 0.90~0.97),80%患者(16/20)达到强相关($r \geq 0.9$),虽然实验样本量较少,但扩展了不耐受屏气患者的适用性。此外,为降低反复高频推注 0.9%或 10%氯化钠溶液带来的

医源性高氯血症负荷，近期有研究创新性地引入了重症常用药 5%碳酸氢钠(NaHCO_3)作为 EIT 对比剂。并在 16 名机械通气患者中进行对比，Bland-Altman 分析显示，在 80 对测量指标中，两者在区域灌注分布评估上的平均偏倚极小(仅为 0.09%，95% CI: -0.91%~1.09%)，完全满足临床一致性界限要求[10]。

Table 1. Comparison between pulmonary vascular pulsation method and hyperosmolar contrast agent imaging method
表 1. 肺血管搏动法与高渗对比剂造影法对比

	肺血管搏动法	高渗对比剂造影法
生理学基础	血液的电导率高于含气肺泡。心脏收缩时，右心室将血液泵入肺血管床，导致肺部局部血容量增加，整体电阻抗在心动周期内发生微小且节律性的下降。	通过中心静脉或大静脉快速推注高电导率液体(通常为 10%氯化钠溶液)。高渗盐水流经右心并进入肺循环时，会引起极其显著的局部电阻抗下降。
信号处理方法	1) 频域滤波法：利用呼吸与心跳在时间频率上的差异，将两者从混合的原始阻抗信号中分离出来的一种处理技术 2) 心电门控：同心电图(ECG)的 R 波为触发信号，对多个心动周期内的 EIT 阻抗数据进行同步截取和叠加平均的方法。 3) 主成分分析：EIT 图像序列中随时间变化的像素数据，分解为一系列互相正交(不相关)的数学分量。	注射 15~20 mL 冷盐水作为导电造影剂，暂时改变组织阻抗分布，增强灌注区与周围组织的图像对比。
优点	无创且连续： 不需要注射任何物质，适合长时间、实时的床旁连续监测。 操作简便： 只要佩戴好 EIT 胸带并连接心电图即可进行。	信噪比极高(SNR)： 阻抗变化幅度远大于心脏搏动信号，图像对比度极佳。 血流动力学量化： 可利用经典的指示剂稀释理论，更准确地反映真实的组织血流灌注(而非仅仅是容积波动)。
缺点	信噪比极低： 心源性阻抗变化幅度远远小于呼吸引起的阻抗变化。 易受干扰： 极易被胸腔积液、机械通气的胸腔内压变化掩盖。	有创且不连续： 必须进行静脉推注，且只能提供注射瞬间的“快照”，无法进行实时连续监测。 容量负荷风险： 多次注射高渗盐水可能增加患者的钠负荷和循环容量负荷。
临床适用场景	适用于清醒患者和机械通气患者	接受机械通气并插管和镇静的患者
关键技术挑战	呼吸与心搏信号的完美分离： 尤其是在患者心率和呼吸频率接近或存在心律失常时。	标准化与可重复性： 注射速度、剂量、导管位置对曲线影响巨大。

2.3. EIT 肺灌注评估方法

肺灌注测量通常使用两种方法，其一是注射导电对比剂进行测量(即 Bolus 技术)，另一种是过滤 EIT 信号中的脉动心跳成分(即 Pulsatility 技术)。有研究表明，Bolus 技术与 SPECT 和 PET 的结果更为一致，目前被认为是基于 EIT 的 V/Q 评估的参考标准[11]。在最新的一项研究中，将通气与灌注的区域进行定义，若满足 $V_k > 20\% \times \max(V_k)$ ， $K \in [1, 1024]$ 则定义区域 K 为通气区，同理，若满足 $V_g > 20\% \times \max(V_g)$ ， $K \in [1, 1024]$ 则定义区域 g 为灌注区。通过确认通气区和灌注区的具体范围，再次定义了仅通气区(A_V)、仅灌注区(A_P)和通气和灌注区(A_{V+P})。根据定义可以计算出 $VQ_{\text{match}}\% = A_{V+P}/(A_V + A_P + A_{V+P}) \times 100\%$ [12]。

3. 临床应用研究进展

EIT 肺灌注作为一种新型的成像技术,其最大临床贡献在于提供了床旁实时量化通气/灌注(V/Q)匹配的能力。通过使用 EIT 肺灌注监测 V/Q 匹配已在诸多临床研究中体现。例如何怀武等人通过 EIT 配盐水推注测量的区域肺通气和灌注数据,已经能够能力在床旁实时的识别出三种 ARF 病因(PED, DLD, FLD) [13]。Gaetano Scaramuzzo 的文章指出 EIT 已经可以用于无创监测区域通气和灌注分布,并提供实时和连续数据,极大提升我们对各种呼吸和循环疾病的理解和管理。其应用对重症机械通气患者尤其有益,能提供指导通气支持优化、评估治疗效果并改善潜在疗效[11]。目前, EIT 在肺灌注监测中的前沿临床应用包括急性肺栓塞(PE)的床旁筛查与疗效评估、肺可复张性的急性呼吸窘迫综合征(ARDS)个体化呼气末正压(PEEP)精准滴定、ARDS 的表型分类,以及肺移植治疗评估等核心领域。

3.1. 急性肺栓塞的床旁快速筛查与疗效监测

肺栓塞是由于血栓或其他物质进入肺循环并阻塞肺动脉系统。其病理生理大致包括肺血流动力学的改变及呼吸功能与气体交换的障碍。在临床实践过程中,肺栓塞在 ICU 中极易被误诊,且危重患者转运至计算机断层扫描(CTPA)进行确诊的风险巨大。而 EIT 肺灌注成像提供了一种实时、可重复的床旁筛查手段。在发生肺栓塞时, EIT 图像表现为典型的“通气/灌注缺失”。即在通气影像显示正常或近乎正常的肺段区域,灌注信号(无论是盐水增强信号还是搏动信号)显著消失或衰减。Huaiwu He 等人通过对 68 名 ARF 患者进行 EIT 监测区域通气和灌注措施,可以区分急性肺栓塞患者与其他 ARF 患者,肺栓塞诊断的敏感性为 90.9%,特异性为 98.6% [14]。Jia Xu 等人通过使用 EIT 对 50 名进行肺灌注分析,结合静脉血栓栓塞(VTE)病史、D-二聚体、相应区域通气/灌注比最大值(V/Qmax)、区域灌注最大值与最小值之间的范围(P-Range)以及通气/灌注匹配面积百分比(VQMatch)构建的慢性血栓性肺动脉高压(CTEPH)诊断模型,并且在测试组的诊断中表现良好[15],同样也证明了 EIT 在诊断 PE 中表现良好。肺动脉内膜切除术(PEA)是治疗慢性血栓性肺动脉高压的一种治疗方法,但病人在恢复期可能存在血流动力学不稳定的情况,需要一种安全方便的观察方法。Qianlin Wang 等人的病例分享一例患者,这份病例中 EIT 成功地识别 PEA 术后原位血栓,并计划二次手术[16]。

EIT 除了可以应用于肺栓塞诊断中,同时也可以运用于能够实时监测溶栓或抗凝治疗的效果。有案例指出,在对疑似肺栓塞且无法行 CTPA 检查的患者,使用 EIT 进行监测,不仅仅可以明显观察到肺部灌注与通气的缺失,同时也可以观察到在抗凝治疗过程后相关指标的恢复,这有助于在 CTPA 不可用时帮助 ICU 医务人员治疗肺栓塞[17]。Susanne A Prins 的文章中指出一位可能患有肺血栓栓塞的患者,在治疗前后均使用 EIT 进行了灌注扫描,灌注扫描显示溶栓治疗后有所改善,也证明了这一点[18]。

根据指南,放射影像学检查是肺栓塞诊断的金标准,但对于 ICU 中血流动力学异常或禁忌症患者而言并不适用。在这种情况下,对于在临床上疑似肺栓塞且无法行 CTPA 检查患者,使用 EIT 监测是相对安全可行的。因此,在无法进行常规监测时, EIT 可作为一种替代手段,辅助诊断肺栓塞和对治疗后的评估。

3.2. ARDS 个体化机械通气指导

3.2.1. 最佳 PEEP 的设置

PEEP 的设定犹如一把双刃剑。过高的 PEEP 虽然能最大程度地复张肺泡,但也极易导致正常的肺组织或已开放的肺泡发生过度扩张(Overdistension),这不仅会增加气压伤和容量伤的风险,还会通过压迫肺毛细血管增加肺循环阻力,进而影响右心功能和体循环稳定性。相反,过低的 PEEP 则无法有效克服肺组织的弹性回缩力和重力压迫,导致肺泡在每个呼吸周期中发生反复的开启与关闭,产生所谓的“塌陷

伤”或“剪切伤”(Atelectotrauma),进一步加剧炎症反应[19][20]。所以寻找最佳 PEEP (Optimal PEEP)是重症呼吸管理的基石。最佳 peep 不仅仅可以平衡肺泡塌陷与过度扩张,同样可以改善 V/Q 匹配,改善呼吸力学与生理功能[21]。传统的 PEEP 滴定方法,如 ARDS Net 推荐的对应表,虽然操作简便且具有良好的标准化流程,但其本质是基于氧合需求的经验性调节,未能充分考虑患者之间巨大的肺部力学差异和异质性。在这种背景下,如何通过一种实时、无创且能反映局部肺生理变化的工具来实现“个体化”的 PEEP 滴定,成为了近五年呼吸治疗研究的核心方向。EIT 是从整体化向更加精细的区域化的转变的“金钥匙”。

近年来多项研究及专家共识,利用 EIT 引导的 peep 滴定应采用“减压滴定法”而非升压滴定法。减压滴定法可以避免压力快速下降,而导致肺泡塌陷。如果用递增法滴定 PEEP,可能存在部分肺泡没有充分打开。这一选择与肺部滞后效应生理学逻辑相关。

EIT 引导的 PEEP 滴定是通过“减压滴定法”实时监测塌陷(Collapse)和过度扩张(Overdistension)的动态变化获得,更符合肺部的生理情况。Nickjaree Songsangvorn 的文章中总结了 13 项研究(3 项随机,10 项非随机),共涉及了 623 名 ARDS 患者,发现 EIT 引导的 PEEP 显著改善了肺部顺应性($n = 941$ 例,平均差(MD) = 4.33, 95%置信区间(CI) [2.94, 5.71])、降低了机械功率($n = 148$, MD = -1.99, 95% CI [-3.51, -0.47])并降低了驱动压力($n = 903$, MD = -1.20, 95% CI [-2.33, -0.07]) [22]。同样有研究显示,在肺可复张性高的(R/I 比 ≥ 0.5)患者中,EIT 引导的 PEEP 滴定较对照组(低 PEEP/FiO₂ 表格组)显著降低了 28 天死亡率(35.6% vs 60.0%, HR 0.49, P = 0.024),并显著改善了呼吸系统的驱动压和机械功[23]。Mayson L A Sousa 等人指出猪急性肺损伤模型中,通过 EIT,在基于呼吸力学的个体化 PEEP 水平下,可以同时获得最佳通气和血流动力学[24]。EIT 在机械通气的患者中个性化设置个性化 PEEP 是非常有前景的技术[25]。

3.2.2. EIT 监测肺灌注联合肺通气对 ARDS 的分类

ARDS 的形态学分类通常分为局灶型(Focal)和弥漫型(Diffuse)。传统上依赖于计算机断层扫描(CT)的主观判断,而 EIT 通过监测不同压力梯度下各区域顺应性的演变,提供了一种客观的“功能性”分类方法。局灶型 ARDS 通常表现为通气损失集中在基底段和背侧区域,而腹侧区域顺应性相对较好;弥漫型则表现为全肺范围内的顺应性普遍下降及斑片状通气丧失[26]。更有文章利用 EIT 定义的非对称指数(AI)和通气中心(COV)将 ARDS 患者细分为更具体的表型,非对称性(Asymmetric)和对称型(Symmetric),非对称型可以细分为右侧和左侧亚型,对称型可以分为腹侧和非腹侧的亚型。通过分析 217 名 peep 滴定期间的 ARDS 患者,发现: 1) 腹侧亚型通常具有更高的 BMI、更高的肺外 ARDS 比例以及更好的肺复张性, 2) 在非对称型 ARDS 中, PEEP 增加后仍保持非对称表型的患者, 28 天无呼吸机天数比从非对称转为对称表型的患者少。这表明 ARDS 的不对称性可能是肺损伤的潜在靶点[27]。在 Shuhe Yang 等文章中,根据基线形态学,把 25 名 ARDS 患者分为局灶性 ARDS 患者和非局灶性 ARDS 患者,又根据 D-二聚体水平分为高 D-二聚体组和低 D-二聚体组,研究俯卧位(PP)对不同亚表型 ARDS 的影响。在研究中发现对于中重度 ARDS 患者,非局灶性和高 D-二聚体 ARDS 患者需要更长的 PP 时间以改善血氧和 VQ 匹配,而非局灶性和低 D-二聚体患者[26]。在 Rui Wang 的研究中,通过将纳入的 77 名患者分为反应组(V/Q 匹配在首次 PP 后 4 小时内改善 $\geq 10\%$)和无反应组(V/Q 匹配在首次 PP 后 4 小时内改善 $< 10\%$),发现反应组显示 ICU 死亡率显著较低(28.3%对 51.6%; P = 0.038),同时也通过多变量分析确认增加的 V/Q 匹配是独立的死亡保护因子(比值 0.790; 95%置信区间, 0.681~0.917; P = 0.002) [28]。鉴于 ARDS 高度的临床异质性,对其进行系统分类是开展精准医疗的核心环节。针对特定亚群实施个体化诊疗方案,不仅有助于及时识别目标患者同时也可以保护潜在的高危个体,更能通过优化资源配置与治疗路径,最终实现预后的实质性改善。

3.2.3. EIT 检测肺灌注评估 ARDS 的预后和疗效

评估 ARDS 患者预后一直以来是困扰医务人员的难题,但随着 EIT 肺灌注技术的进步,有人指出未匹配的 V/Q 单位可能代表 ARDS 严重程度的综合标志,在 Elena Spinelli 等的研究中发现,在 25 名 ARDS 患者中,未匹配的 V/Q 单位与肺上皮和内皮功能障碍、肺应激增加及肺水肿的病理生理标志相关[29]。

EIT 肺灌注技术的进展不仅仅可以评估 ARDS 的预后,也可以评估治疗效果。有文章指出,虽然俯卧位(Prone Position, PP)已经证明可以改善 ARDS 患者氧合[30], Yuxian Wang 的文章通过分析 18 名机械通气的 ARDS 患者,观察患者在 PP 开始前仰卧状态、PP 后 1 小时、PP 后 3 小时、PP 16 小时以及恢复仰卧后 3 小时的对肺通气和肺灌注的影响。结果提示 PP 显著改善了氧合,并在 PP 结束后 16 小时达到峰值,并且指出 V/Q 匹配在整个 PP 持续时间内持续。值得注意的是灌注分布在恢复仰卧位后趋向 SP 状态,但通气分布却与 SP 显著不同[31]。此外也有文章指出,一氧化氮(NO)可以改善患者 V/Q 匹配,在 Jing Xu 的文章指出 EIT 实时监测 V/Q 匹配,可以动态评估患者使用吸入一氧化氮(iNO)后改善 V/Q 匹配的情况,揭示了 EIT 在评估多种处理策略下 V/Q 匹配较传统策略时的具有实施、方便、安全的优势[32]。

3.3. 肺移植术后评估

在肺移植的核心治疗过程中,对移植肺功能的持续监测是保障患者预后的关键。然而,临床上一直迫切需要一种既安全可靠,又能避免反复创伤的动态评估手段。EIT 技术的应用为这一难题提供了理想的解决方案,它不仅实现了安全和可重复的床边检测,还能精准评估移植肺的 V/Q 分布,从而为临床决策提供了极其重要的实时依据。这种评估能力在复杂临床场景中具有重要意义。例如,在 Vittorio Scaravilli 的文章中描述了一位单肺移植(LUTX)的患者进行 EIT 联合技术整合评估,实现了区域后续分流分数和肺泡死腔的计算,记录了单肺移植的多种病理生理结局,表明 EIT 肺灌注可以监测肺移植术的预后[33]。此外, Hui Jiang 等研究表明,利用 EIT 结合盐水注射法可动态评价 V/Q 匹配程度及钟摆效应(Pendelluft)。在肺移植后气道狭窄切除的病例中, EIT 明确记录了手术前后 V/Q 匹配及钟摆效应的显著改善,直观地反映了手术疗效[34]。

4. 局限性

EIT 虽然在床旁实时监测方面具有独特优势,但在临床推广中仍面临着临床实施、证据质量及安全性风险的多重限制。在实际操作与临床实施方面:目前临床公认的 EIT 肺灌注评估金标准仍是高渗盐水法,这要求患者必须具备中心静脉导管(CVC)。对于寻常患者而言,无需使用中心静脉导管,加用中心静脉导管可能会增加经济负担和导管相关性感染。再者,传统的盐水造影 EIT 肺灌注成像依赖于呼吸暂停。然而,多项研究表明,在自主呼吸驱动强、血流动力学不稳定的重症患者中,强制屏气存在显著局限。一方面,呼吸暂停可能导致呼气末肺泡塌陷或因胸腔内压骤变加剧血流动力学波动。另一方面,患者因呼吸困难极易产生自主吸气对抗,其产生的巨大通气阻抗信号会完全掩盖微弱的灌注信号,最终导致数据采集失败且无法反映真实的自然灌注状态[35]。其次 EIT 的使用对干扰极其敏感,电极和皮肤的干扰容易影响成像的质量,如有胸腔引流管、辅料、伤口或者严重烧伤,这些因素均会阻碍电极,直接影响到图片重建的质量;在质量方面:由于 EIT 的空间分辨率较 CT 或 MRI 低[36],这就意味着它难以识别微小的肺部病变,图片边缘往往存在模糊效应,而且目前主流的 EIT 设备仅提供单一横截面(通常是第 4~5 肋)的通气分布图,无法还原全肺情况,容易漏其他部位如肺尖和肺底的病情变化;在安全性风险方面:患者实施操作时需反复推注高渗氯化钠溶液(通常为 5%~10%),这就有可能导致患者高钠、高氯血症的风险,并有潜在急性肾损伤风险[37]。再者,患者反复推注高渗氯化钠溶液,对严重心脏疾病患者,容易引起容量负荷过重。

5. 结语

近十年来, EIT 技术完成了从“科研监测”到“床旁精准诊断与个体化治疗决策”的转变。2025 年国际专家共识的发布标志着该技术进入了标准化临床应用的新阶段[38]。未来的研究方向可能将聚焦于: 1) 多模态融合。EIT 与肺部超声、MRI 的联合应用, 实现解剖与功能的完美对齐, 更全面地评估患者通气和肺灌注。2) 更全面的模型, 可以通过大数据统计分析建立撤机、诊断的模型, 通过模型可以更方便、更快捷地处理临床问题, 帮助临床减负。EIT 肺灌注成像不仅是一种影像技术, 更是一种实时的床旁监护, 在未来精准医疗时代发挥核心作用。

参考文献

- [1] Kretzschmar, M., Schilling, T., Vogt, A., Rothen, H.U., Borges, J.B., Hachenberg, T., *et al.* (2013) Multiple Inert Gas Elimination Technique by Micropore Membrane Inlet Mass Spectrometry—A Comparison with Reference Gas Chromatography. *Journal of Applied Physiology*, **115**, 1107-1118. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00072.2013>
- [2] Bajc, M., Schümichen, C., Grüning, T., Lindqvist, A., Le Roux, P., Alatri, A., *et al.* (2019) EANM Guideline for Ventilation/Perfusion Single-Photon Emission Computed Tomography (SPECT) for Diagnosis of Pulmonary Embolism and Beyond. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **46**, 2429-2451. <https://doi.org/10.1007/s00259-019-04450-0>
- [3] 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>
- [4] Kircher, M., Elke, G., Stender, B., Hernandez Mesa, M., Schuderer, F., Dossel, O., *et al.* (2021) Regional Lung Perfusion Analysis in Experimental ARDS by Electrical Impedance and Computed Tomography. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **40**, 251-261. <https://doi.org/10.1109/tmi.2020.3025080>
- [5] Bronco, A., Fazzi, F., Amendolagine, L., Garberi, R., Cattaneo, S., Ferrari, F., *et al.* (2025) Electrical Impedance Tomography in Congenital Heart Disease: Advancing Non-Invasive Pulmonary Perfusion Assessment at Bedside. *Intensive Care Medicine Experimental*, **13**, Article No. 75. <https://doi.org/10.1186/s40635-025-00783-3>
- [6] She, L., Zhou, R., Pan, P., *et al.* (2023) Research Progress on Electrical Impedance Tomography in Pulmonary Perfusion. *Journal of Biomedical Engineering*, **40**, 1249-1254. (In Chinese)
- [7] Putensen, C., Hentze, B., Muenster, S. and Muders, T. (2019) Electrical Impedance Tomography for Cardio-Pulmonary Monitoring. *Journal of Clinical Medicine*, **8**, Article No. 1176. <https://doi.org/10.3390/jcm8081176>
- [8] Xu, J., Wang, L., Tong, L., Li, H., Wu, X., Wang, Y., *et al.* (2025) Novel Three-Dimensional Electrical Impedance Tomography for Noninvasive Detection of Lung Perfusion. *Journal of Thoracic Disease*, **17**, 4837-4848. <https://doi.org/10.21037/jtd-2025-275>
- [9] He, H.W., Long, Y., Chi, Y., *et al.* (2021) Technology Specification of Bedside Hypertonic Saline-Contrast Electrical Impedance Tomography of Lung Perfusion and Clinical Application. *Chinese Medical Journal*, **101**, 1097-1101. (In Chinese)
- [10] Gao, Y., He, Y., Chi, Y., Yuan, S., Wu, S., Long, Y., *et al.* (2025) Comparison of 5% Sodium Bicarbonate and 10% Sodium Chloride as Contrast Agents for Lung Perfusion with Electrical Impedance Tomography: A Prospective Clinical Study. *BMC Pulmonary Medicine*, **25**, Article No. 190. <https://doi.org/10.1186/s12890-025-03665-2>
- [11] 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>
- [12] He, H., Chi, Y., Long, Y., Yuan, S., Frerichs, I., Möller, K., *et al.* (2020) Influence of Overdistension/recruitment Induced by High Positive End-Expiratory Pressure on Ventilation-Perfusion Matching Assessed by Electrical Impedance Tomography with Saline Bolus. *Critical Care*, **24**, Article No. 586. <https://doi.org/10.1186/s13054-020-03301-x>
- [13] He, H., Chi, Y., Long, Y., Yuan, S., Zhang, R., Yang, Y., *et al.* (2021) Three Broad Classifications of Acute Respiratory Failure Etiologies Based on Regional Ventilation and Perfusion by Electrical Impedance Tomography: A Hypothesis-Generating Study. *Annals of Intensive Care*, **11**, Article No. 134. <https://doi.org/10.1186/s13613-021-00921-6>
- [14] He, H., Chi, Y., Long, Y., Yuan, S., Zhang, R., Frerichs, I., *et al.* (2020) Bedside Evaluation of Pulmonary Embolism by Saline Contrast Electrical Impedance Tomography Method: A Prospective Observational Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **202**, 1464-1468. <https://doi.org/10.1164/rccm.202005-1780le>
- [15] Xu, J., Wang, Y., Gong, Y., Wang, L., Song, Y. and Wu, X. (2025) A Nomogram Model Based on Clinical and 3D-EIT

- Parameters for CTEPH Diagnosis. *Respiratory Research*, **26**, Article No. 137. <https://doi.org/10.1186/s12931-025-03206-9>
- [16] Wang, Q., He, H., Yuan, S., Jiang, J., Chi, Y., Long, Y., *et al.* (2024) Early Bedside Detection of Pulmonary Perfusion Defect by Electrical Impedance Tomography after Pulmonary Endarterectomy. *Pulmonary Circulation*, **14**, e12372. <https://doi.org/10.1002/pul2.12372>
- [17] Ding, C., Zhu, Y., Zhang, S., Zhao, Z., Gao, Y. and Li, Z. (2024) Bedside Electrical Impedance Tomography to Assist the Management of Pulmonary Embolism: A Case Report. *Heliyon*, **10**, e25159. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25159>
- [18] Prins, S.A., Weller, D., Labout, J.A.M. and den Uil, C.A. (2023) Electrical Impedance Tomography as a Bedside Diagnostic Tool for Pulmonary Embolism. *Critical Care Explorations*, **5**, e0843. <https://doi.org/10.1097/ccx.0000000000000843>
- [19] Slutsky, A.S. (2015) History of Mechanical Ventilation. from Vesalius to Ventilator-Induced Lung Injury. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **191**, 1106-1115. <https://doi.org/10.1164/rccm.201503-0421pp>
- [20] Merola, R., Vargas, M. and Battaglini, D. (2025) Ventilator-Induced Lung Injury: The Unseen Challenge in Acute Respiratory Distress Syndrome Management. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article No. 3910. <https://doi.org/10.3390/jcm14113910>
- [21] Eronia, N., Mauri, T., Maffezzini, E., Gatti, S., Bronco, A., Alban, L., *et al.* (2017) Bedside Selection of Positive End-Expiratory Pressure by Electrical Impedance Tomography in Hypoxemic Patients: A Feasibility Study. *Annals of Intensive Care*, **7**, Article No. 76. <https://doi.org/10.1186/s13613-017-0299-9>
- [22] 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>
- [23] Yuan, X., Zhong, M., Li, Z., Sang, L., Huang, X., Zhang, R., *et al.* (2026) Electrical Impedance Tomography-Guided PEEP and Mortality of Patients with the Acute Respiratory Distress Syndrome: The EITVent Randomized Clinical Trial. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **212**, 440-451. <https://doi.org/10.1093/ajrccm/aamaf125>
- [24] Sousa, M.L.A., Menga, L.S., Schreiber, A., Docci, M., Vieira, F., Katira, B.H., *et al.* (2025) Individualized PEEP Can Improve both Pulmonary Hemodynamics and Lung Function in Acute Lung Injury. *Critical Care*, **29**, Article No. 107. <https://doi.org/10.1186/s13054-025-05325-7>
- [25] Sella, N., Pettenuzzo, T., Zarbonello, 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>
- [26] Yang, S., Sun, Q., Yuan, X., Wang, J., Wang, H., Hu, W., *et al.* (2025) Effect of Prone Position on Ventilation-Perfusion Matching in Patients with Moderate to Severe ARDS with Different Clinical Phenotypes. *Respiratory Research*, **26**, Article No. 70. <https://doi.org/10.1186/s12931-025-03154-4>
- [27] Sun, X., Chi, Y., Yuan, S., Zhao, Z., Jiang, J., Zhao, Y., *et al.* (2026) Eit-Based Ventilation Phenotypes of Left-to-Right Asymmetry and Ventral-to-Dorsal Center in PEEP Titration in ARDS. *Respiratory Research*, **27**, Article No. 68. <https://doi.org/10.1186/s12931-026-03514-8>
- [28] Wang, R., Wang, W., Tang, X., Qi, Z., Li, T., Liu, Y., *et al.* (2025) Association between Ventilation-Perfusion Matching Improvement during Initial Prone Positioning and ICU Mortality in Patients with Moderate to Severe ARDS: A Prospective Two-Center Study. *Annals of Intensive Care*, **15**, Article No. 69. <https://doi.org/10.1186/s13613-025-01489-1>
- [29] Spinelli, E., Perez, J., Chiavieri, V., Leali, M., Mansour, N., Madotto, F., *et al.* (2025) 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>
- [30] Wang, Y., Zhong, M., Dong, M., Song, J., Zheng, Y., Wu, W., *et al.* (2022) Prone Positioning Improves Ventilation-perfusion Matching Assessed by Electrical Impedance Tomography in Patients with ARDS: A Prospective Physiological Study. *Critical Care*, **26**, Article No. 154. <https://doi.org/10.1186/s13054-022-04021-0>
- [31] Wang, Y., Song, J., Lin, S., Zheng, X., Zhao, Z. and Zhong, M. (2025) Influence of Prone Position on Regional Ventilation/Perfusion Matching in Patients with ARDS over Time. *Respiratory Care*, **70**, 821-829. <https://doi.org/10.1089/respcare.12247>
- [32] Xu, J., Zhong, M., Liu, D., Guan, J., Qi, X., Tan, R., *et al.* (2025) A Modified Co-Related EIT Parameter Was Used to Evaluate Pulmonary Ventilation-Perfusion Ratio during Prone Position and Inhaled Nitric Oxide Therapy: A Case Report. *Frontiers in Medicine*, **12**, Article ID: 1598248. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1598248>
- [33] Scaravilli, V., Colombo, S.M., Fumagalli, J., Mauri, T., Zanella, A., Rosso, L., *et al.* (2024) Regional Ventilation-Perfusion Matching by Electrical Impedance Tomography after Single Lung Transplant. *ASAIO Journal*, **70**, e49-e52. <https://doi.org/10.1097/mat.00000000000002055>

-
- [34] Jiang, H., Han, Y., He, G., Cui, W., Cheng, F., Fang, Q., *et al.* (2023) Evaluating Bronchial Anastomotic Stenosis Dynamically by Electrical Impedance Tomography in a Lung Transplant Recipient: A Case Report. *Annals of Translational Medicine*, **11**, Article No. 222. <https://doi.org/10.21037/atm-22-4659>
- [35] Victor, M., Xin, Y., Alcalá, G., Gaulton, T., Costa, E., Winkler, T., *et al.* (2024) First-Pass Kinetics Model to Estimate Pulmonary Perfusion by Electrical Impedance Tomography during Uninterrupted Breathing. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **209**, 1263-1265. <https://doi.org/10.1164/rccm.202310-1919le>
- [36] Schullcke, B., Gong, B., Krueger-Ziolek, S., Soleimani, M., Mueller-Lisse, U. and Moeller, K. (2016) Structural-Functional Lung Imaging Using a Combined CT-EIT and a Discrete Cosine Transformation Reconstruction Method. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 25951. <https://doi.org/10.1038/srep25951>
- [37] Rein, J.L. and Coca, S.G. (2019) “I Don’t Get No Respect”: The Role of Chloride in Acute Kidney Injury. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, **316**, F587-F605. <https://doi.org/10.1152/ajprenal.00130.2018>
- [38] 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. *eClinicalMedicine*, **89**, Article ID: 103575. <https://doi.org/10.1016/j.eclim.2025.103575>