

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.04.001

电阻抗断层成像在急危重症医学研究热点与发展方向

宋雨佳, 崔馨月, 王静, 张瑛琪

(河北医科大学第一医院 急诊科, 河北 石家庄 050030)

摘要:目前急危重症患者的抢救和治疗一直是医学界的关注焦点。电阻抗断层成像技术提供了一种非侵入性的监测方法,可用于评估肺通气和肺灌注情况。介绍了目前电阻抗断层成像技术在急危重症患者应用的研究热点;展望未来,电阻抗断层成像技术将在急危重症患者的救治、改善治疗效果、提高患者的生存率和生活质量中发挥更大的作用。

关键词:急危重症;电阻抗断层成像技术;应用

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)04-0001-06

Research Hotspot and Development Direction of Electrical Impedance Tomography in Emergency and Critical Care Medicine

SONG Yujia, CUI Xinyue, WANG Jing, ZHANG Yingqi

(Emergency Department, 1st Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050030, China)

Abstract: The rescue and treatment of critical patients have always been the focus of medical attention, and electrical impedance tomography provides hospitals with a non-invasive monitoring method for assessing lung ventilation and perfusion. This paper introduces the current research focus on the application of electrical impedance tomography technology in critical patients. It is prospected that electrical impedance tomography technology will play a greater role in the treatment of acute patients and improvement in treatment effect and the survival rate and quality life of patients.

Keywords: acute and critical illness; electrical impedance tomography; application

0 引言

急危重症^[1]是医学领域中的一大挑战,与高病死率和巨大经济负担密切相关。为了促进发展,急诊医学需要不断进行转化,引入新的技术和方法来改善诊断和治疗。在这方面,电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)具备潜力^[2]。EIT作为一种无创且实时的监测技术,为急危重症患者的诊断和治疗提供了新的思路和机会。通过实时监测病理、生理变化,EIT能够提供及时反馈和个体化的治疗策略。这不仅有助于及时调整治疗方案,而且可以优化资源利用,降低病死率并减轻经济负担。因此,进一步推动EIT的研究和应用,促进其在急危重症领域的发展,对于提高急诊医学转化水平具有重要意义。

本研究旨在以电阻抗断层成像为关键检索词,在Web of Science数据库上广泛检索相关文

献,时间范围为2013年9月23日—2023年9月23日,涵盖3703篇论文。经过筛选,排除了与临床医学无关的文献,保留了1146篇与研究主题高度相关的文献。进一步结合WordCloud库生成了信息丰富的词云图。该词云图是一种高度可视化的工具,用于呈现急危重症研究领域的关键主题和词汇,探寻未来急危重症医学结合EIT的研究热点和发展方向,可为急危重症医学科的研究人员提供参考。

1 EIT介绍

EIT技术是一种用于监测和成像人体内部电阻抗分布的无创生物医学成像技术。在急危重症领域,EIT技术可以提供对患者肺功能状态的实时监测和评估,对于呼吸机调节以及急性呼吸衰竭的治疗和管理具有重要意义。通过在患者胸部或腹部周围放置多个电极并通过这些电极传递微

基金项目:2023年中央引导地方科技发展基金项目(236Z7731G)

第一作者简介:宋雨佳(1997—),女,满族,河北承德人,硕士研究生,研究方向为电阻抗断层成像技术在急危重症领域诊治的应用, songyujia0531@163.com。

通信作者简介:张瑛琪(1970—),女,达斡尔族,内蒙古呼伦贝尔人,教授,硕士,研究方向为急危重症救治, zhangyingqi@hebm.u.edu.cn。

弱的电流,EIT 技术就可以测量到体内不同区域的电阻抗变化。根据这些测量数据,利用数学算法可以重建出体内不同区域的电阻抗分布图像,从而实现对肺部结构和功能的监测和成像^[3]。

2 EIT 在急危重症医学研究热点

当前电阻抗断层成像技术在急危重症医学研究领域前 9 位高频词汇分别为电阻抗断层成像、肺通气、肺灌注、急性呼吸窘迫综合征、COVID-19、急性呼吸衰竭、肺栓塞、COPD、脑,如图 1 所示。

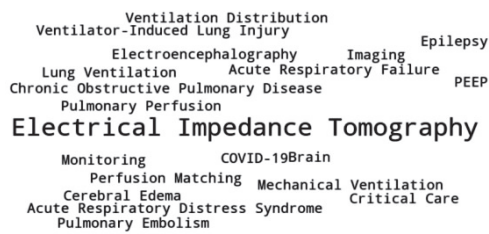


图 1 EIT 在急危重症医学研究热点

2.1 肺通气

肺通气^[4]相关研究前 8 位热词为成像、肺功能测试、急性呼吸窘迫综合征、PEEP 滴定、肺保护性通气、区域通气、机械通气、潮气量,如图 2 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在评估和管理急危重症患者的呼吸功能方面的重要应用。通过 EIT 技术的成像功能,医生可以实时观察和评估患者肺部的通气情况并获得肺功能的图像化呈现,提供直观的信息支持。EIT 技术在肺功能测试方面发挥着关键作用。它可以进行非侵入性的肺部检测,实时监测 PEEP 滴定,用于调整和优化呼吸机参数,以改善患者的通气情况。LOWHAGEN 等^[5]在研究中发现,当 PEEP 从 6 cmH₂O 增加到 16 cmH₂O 时,通过 EIT 监测呼气末肺容量的区域性增加分布在腹侧和腹中部,与 CT 扫描结果大致一致。BLANKMAN 等^[6]通过 EIT 评估通气区域分布来比较不同通气模式(压力控制模式和神经调节通气模式)下依赖区域和非依赖区域的通气情况。对于急性呼吸窘迫综合征患者,EIT 技术可帮助医生评估肺部病理变化并指导肺保护性通气策略的制定。通过实时监测区域通气状态,医生可以避免过度通气或低通气区域的发生,减少肺损伤风险。此外,EIT 技术在机械通气中的应用也非常重要。它可以帮助医生监测患者的潮气量,确保患者接受到适当的通气支持并防止过度通气或低通气的发生^[7]。

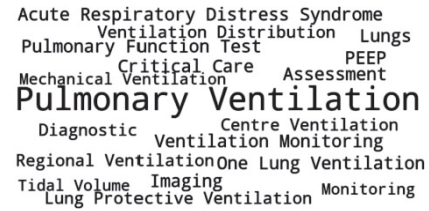


图 2 肺通气研究热点

2.2 肺灌注

肺灌注^[8]相关研究前 8 位热词为肺栓塞、急性呼吸窘迫综合征、呼吸衰竭、肺血流、通气/血流比、COVID-19、床旁、呼吸机相关肺损伤,如图 3 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在评估和管理肺血流与气体交换方面的重要应用。EIT 技术在肺栓塞方面具有潜力。肺栓塞是一种严重的疾病,可导致肺部血流受阻。通过监测肺血流分布情况,EIT 技术可以帮助医生进行早期检测和评估并指导治疗策略的制定^[9]。对于急性呼吸窘迫综合征(ARDS)和呼吸衰竭患者,EIT 技术可以提供肺血流情况的实时监测^[10]。这对于了解肺血流动力学的变化以及调整通气/血流比具有重要意义,有助于制定个体化的治疗方案。肺血流的监测还可以帮助评估 COVID-19 患者的病情。在 COVID-19 引发的肺部炎症中,EIT 技术可以提供对肺血流分布的客观评估,指导治疗和监测疾病进展^[11]。此外,EIT 技术在床旁使用具有很大的优势。由于其非侵入性和实时性的特点,EIT 技术可以在床旁方便地进行肺灌注监测,为临床决策提供即时的数据支持。此外,EIT 技术在呼吸机相关肺损伤的研究中也有广泛应用。通过实时监测患者的通气/血流比,EIT 技术能够帮助医生调整呼吸机参数,减少通气过度或低通气区域的发生,减少呼吸机相关肺损伤的风险。



图 3 肺灌注研究热点

2.3 急性呼吸窘迫综合征

急性呼吸窘迫综合征相关研究前 8 位热词为机械通气、PEEP 滴定、呼吸机相关肺损伤、COVID-19、俯卧位、重症监护、保护性通气、通气,如图 4 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在 ARDS 管理

中的重要领域。机械通气是 ARDS 患者管理中常用的治疗策略之一。通过 EIT 技术,医生可以实时监测患者的肺通气情况,帮助调整呼吸机参数以达到最佳通气效果。PEEP 滴定是一种调整呼气末正压水平的方法,用于改善肺泡开放性和氧合^[12]。EIT 技术可监测患者的肺通气情况,辅助医生进行 PEEP 滴定,个体化地优化通气支持。LONG 等^[13]纳入协和医院重症医学科 18 例机械通气下 ARDS 患者,在肺复张操作后,通过 PEEP 递减并用 EIT 监测肺复张,显示所有患者肺复张的像素随着 PEEP 的减少明显下降,过多扩张的像素 PEEP 在 14~20 cmH₂O 时较稳定,PEEP 在 8~14 cmH₂O 时逐渐下降。结果显示肺复张后,PEEP 滴定显著影响肺局部气体分布,EIT 可监测肺局部气体分布,且 EIT 具有优化 PEEP 滴定的潜力。

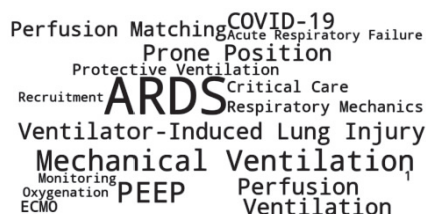


图 4 急性呼吸窘迫综合征研究热点

呼吸机相关肺损伤是机械通气中的常见并发症之一。通过 EIT 技术,可以监测肺泡的过度膨胀和低通气区域的发生,帮助医生调整呼吸机参数,降低呼吸机相关肺损伤的风险^[14]。在 COVID-19 流行期间,ARDS 的管理显得尤为重要。EIT 技术可以实时监测患者的肺通气情况,指导个体化治疗策略的制定,优化通气支持方案。俯卧位是 ARDS 患者中常用的体位支持方法。EIT 技术可实时监测患者在俯卧位时的肺通气分布和肺血流情况,辅助医生确定最佳体位,改善通气和氧合。重症监护是 ARDS 患者管理中不可或缺的环节。EIT 技术可在重症监护病房中进行即时的肺通气监测,为医生提供有关通气情况的实时数据以指导治疗决策。保护性通气是 ARDS 管理的重要目标之一。通过 EIT 技术,医生可以监测肺部的通气分布情况,调整呼吸机参数,采取保护性通气策略,减少肺损伤的发生风险^[15]。

2.4 COVID-19

COVID-19 相关研究前 8 位热词为急性呼吸窘迫综合征、机械通气、PEEP 滴定、呼吸机相关肺损伤、个体化通气策略、呼吸衰竭、俯卧位、通

气,如图 5 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在 COVID-19 患者管理中的重要应用。COVID-19 引发的 ARDS 是该疾病的严重并发症之一。EIT 技术可以实时监测 ARDS 患者肺部的通气情况,提供关键信息以指导治疗和监测疾病进展。机械通气是 COVID-19 严重病例中常用的治疗手段。通过 EIT 技术,医生可以实时调整呼吸机参数并监测患者的通气情况,以确保有效的气体交换和通气支持。PEEP 滴定是为确保肺泡的开放性和氧合而调整呼气末正压(PEEP)水平的过程。在 COVID-19 患者中,EIT 技术可以帮助医生评估和优化 PEEP 水平,以改善氧合状况和防止呼吸机相关肺损伤^[16]。个体化通气策略是 COVID-19 患者管理的关键之一。通过使用 EIT 技术,医生可以根据患者的肺部情况和需要,制定个体化的通气策略,优化通气支持并减少呼吸机相关并发症的风险^[17]。俯卧位是 COVID-19 重症患者中常用的体位支持方法。EIT 技术可以实时监测患者在俯卧位时的通气分布和肺血流分布情况,以指导体位选择和优化通气效果。最后,EIT 技术在 COVID-19 呼吸衰竭患者管理中的应用也十分重要。通过实时监测肺部通气状态和肺血流情况,EIT 技术可以帮助医生评估疾病的严重程度,并及时调整治疗方案^[18]。

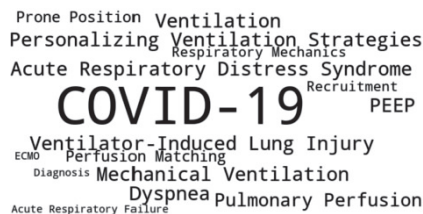


图 5 COVID-19 研究热点

2.5 急性呼吸衰竭

急性呼吸衰竭相关研究前 8 位热词为机械通气、经鼻高流量吸氧(HFNC)、重症监护、急性呼吸窘迫综合征、呼吸机相关损伤、肺通气、个体化医疗,如图 6 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在急性呼吸衰竭管理中的关键内容。机械通气是治疗急性呼吸衰竭的主要手段之一^[19]。通过呼吸机提供通气支持,可以改善患者的气道通畅和肺功能。在机械通气过程中,EIT 技术可以实时监测患者肺部的通气情况,为调整呼吸机参数提供指导。经鼻高流量吸氧是一种非侵入性的辅助通气支持方法,适用于某些急性呼吸衰竭患者。EIT 技术可以帮助监测和评估经鼻高流量吸氧对

患者通气效果的影响,从而指导治疗的选择。ZHANG 等^[20]通过 EIT 识别 HFNC 对肺区域通气的不同影响进而识别肺复张、肺非复张和过度扩张来进一步指导 HFNC 参数设置。重症监护是急性呼吸衰竭患者管理中的重要环节。EIT 技术可以在重症监护病房中实时监测和评估患者的肺通气情况,帮助医生及时调整治疗方案和呼吸支持策略。急性呼吸窘迫综合征(ARDS)是急性呼吸衰竭的严重并发症之一。EIT 技术可以提供对 ARDS 患者肺部通气状态的实时监测和评估,为个体化治疗提供重要参考。呼吸机相关损伤是机械通气中常见的并发症之一。通过 EIT 技术,医生可以实时监测肺泡的过度膨胀和低通气区域的发生,从而减少呼吸机相关损伤的风险。肺通气是急性呼吸衰竭患者管理中的关键指标之一。EIT 技术可以实时监测不同区域的肺通气情况,包括通气分布的均匀性和变化情况,帮助医生了解肺功能状态并做出相应调整。个体化医疗是急性呼吸衰竭管理的趋势之一^[21]。通过 EIT 技术,医生可以根据患者的特点和需求,制定个体化的治疗方案,包括调整呼吸机参数、选择适当的通气支持方式等。在新型冠状病毒肺炎大流行期间,通过应用 EIT 实时监测患者俯卧位后肺后部通气情况,在避免插管上起到了至关重要的作用。俯卧位通过优化通气灌注比,从而在灌注基本不变的情况下整体氧合改善。

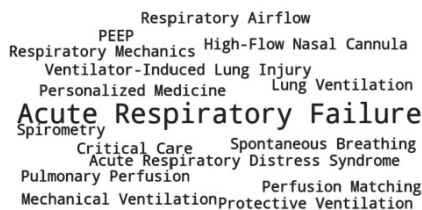


图 6 急性呼吸衰竭研究热点

2.6 肺栓塞

肺栓塞相关研究前 8 位热词为肺灌注、肺通气、通气/血流比、床旁、评估、生理盐水造影剂、呼吸衰竭、诊断,如图 7 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在肺栓塞管理中的关键方面。首先,肺灌注是肺栓塞研究中的重要指标之一^[22]。EIT 技术可以实时监测患者肺部的血流分布情况,为评估肺循环状态提供有价值的信息。肺通气是肺栓塞研究中另一个重要指标。通过 EIT 技术,医生可以实时监测患者不同区域的肺通气情况,包括通气分布的均匀性和变化情况,为评估通气功能

提供有效工具。通气/血流比是肺栓塞研究中的核心参数之一。通过结合肺灌注和肺通气的数据,EIT 技术可以计算并评估患者的通气/血流比,帮助医生了解肺功能状态,指导治疗策略的制定。床旁监测是肺栓塞管理中的重要环节。EIT 技术可以在床旁进行非侵入式的肺灌注和肺通气监测,为临床医生提供即时的数据支持。评估是肺栓塞研究中的重要任务之一。通过 EIT 技术,医生可以对患者的肺功能状态进行全面评估,包括肺灌注、肺通气和通气/血流比等方面,为诊治提供科学依据。生理盐水造影剂是一种常用于肺栓塞诊断的方法。EIT 技术可以结合生理盐水造影剂的使用,帮助医生检测肺灌注和通气情况,辅助肺栓塞的诊断^[23]。隆云团队通过 1 例病历报道的形式,报道 1 位 68 岁的男性在部分纵隔肿瘤切除术后的第 1 天,在床外运动时突然出现的呼吸困难和心脏骤停,怀疑肺栓塞,通过 EIT 进行区域肺灌注检查,双肺灌注大量缺损,通气灌注不匹配,经肺动脉 CTPA 后确诊左、右肺主动脉及分支栓塞,给予抗凝治疗后,通过 EIT 监测通气与灌注逐渐匹配,复查肺动脉 CTPA,栓塞部位减少。本病历提示 EIT 可能具有评估和监测区域灌注以快速诊断致命的肺栓塞的潜力。呼吸衰竭是肺栓塞的严重并发症之一。EIT 技术可以实时监测患者的肺功能状态,包括通气和灌注情况,帮助医生及时评估呼吸衰竭的程度并采取相应的治疗措施。

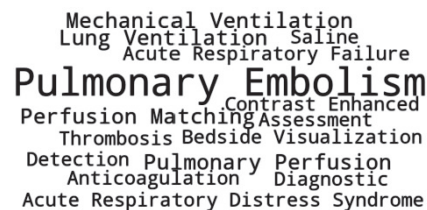


图 7 肺栓塞研究热点

2.7 慢性阻塞性肺疾病

慢性阻塞性肺疾病(COPD)相关研究前 8 位热词为肺功能测试、肺通气、无创通气、肺康复、肺气肿、肺活量、成像、治疗,如图 8 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在慢性阻塞性肺疾病管理中的关键方面。肺功能测试是评估慢性阻塞性肺疾病患者肺功能状态的重要手段。通过 EIT 技术,医生可以实时监测患者的肺通气情况,包括通气分布的均匀性和变化情况,提供客观的肺功能评估,肺康复是慢性阻塞性肺疾病治疗中的重要环节。通过 EIT 技术,医生可以实时监测患者参与肺康

复训练的效果,帮助调整方案,提高肺功能^[24]。无创通气是慢性阻塞性肺疾病患者管理中常用的治疗方法之一。EIT 技术可以帮助监测患者在无创通气过程中的肺通气情况,指导呼吸机参数调整,优化通气支持效果。肺气肿是慢性阻塞性肺疾病的常见特征之一。通过 EIT 技术,可以非侵入性地检测和监测患者的肺气肿情况,为治疗方案的制定提供重要参考。肺活量是评估肺功能的指标之一。通过 EIT 技术,可以实时监测患者的肺通气容量变化,包括呼气末正压(PEEP)水平的调整等,为优化肺功能提供专业的数据支持。KOSTAKOU 等^[25]在 1 例应用 EIT 监测 COPD 患者进行 PEEP 递减操作过程中证明 EIT 有助于评估局部通气和最佳 PEEP,EIT 还可以指导通气策略以减少过度充气,减少死腔,从而减少不同步和呼吸功。成像是 EIT 技术的核心功能之一。通过 EIT 技术,可以实时获取肺部结构和功能的图像化呈现,帮助医生对慢性阻塞性肺疾病进行评估和分析。治疗是慢性阻塞性肺疾病管理中的关键目标。通过 EIT 技术,可以实时监测患者的肺通气情况,指导个体化的治疗策略,包括药物治疗、物理治疗和肺康复等。



图 8 慢性阻塞性肺疾病研究热点

2.8 脑

脑相关研究前 8 位热词为脑成像、阻抗、脑卒中、癫痫、脑出血、脑灌注、脑水肿、颅内压^[26],如图 9 所示。这些关键词涵盖了 EIT 技术在脑功能和脑疾病管理中的关键内容。脑成像是研究和评估脑部结构和功能的重要手段之一。阻抗是 EIT 技术的基础概念。通过测量电阻抗的变化,EIT 技术可以定量地描绘脑部的电阻抗分布情况,从而提供对脑部组织结构和功能的信息^[27]。脑卒中是一种常见的脑血管疾病。EIT 技术可以用于监测脑部血流灌注情况并提供实时的脑灌注图像,有助于早期诊断和治疗决策。癫痫是脑部神经元异常放电导致的一种慢性脑疾病。通过 EIT 技术,可以监测癫痫发作时脑部电阻抗的变化,为癫痫的诊断和治疗提供辅助信息。HANNAN 等^[28]研究证明 EIT

在大鼠癫痫模型中可以快速成像大脑皮质与癫痫相关的脑电活动。此外,进一步研究大鼠大脑深部的癫痫灶,结果显示 EIT 在成像大脑皮质下的神经活动方面也表现出很好的能力。脑出血是指脑血管破裂导致的出血。EIT 技术可以用于实时监测脑出血区域的电阻抗变化,有助于评估和监测脑出血的情况。脑灌注是脑功能的关键指标之一。通过 EIT 技术,可以实时监测脑部的血液供应情况,评估脑灌注状态以及脑功能是否受损或缺血。脑水肿是脑组织充血、水肿和膨胀的一种情况。EIT 技术可以帮助医生监测脑水肿引起的电阻抗变化,提供实时的脑水肿评估和监测。FU 等^[29]对重度脑水肿患者进行了甘露醇脱水治疗并通过监测脑电阻抗的变化来评估治疗效果。结果显示,在脱水治疗后,患者的脑总电阻抗显著增加,而且脱水药物在脑内不同区域引起的电阻抗变化也有明显差异。颅内压是反映脑内压力状态的指标。通过 EIT 技术,可以实时监测脑部区域的电阻抗,帮助评估颅内压的变化和脑部组织的受压情况。



图 9 脑研究热点

3 展望

本文简要介绍了电阻抗断层成像技术在急危重症领域相关研究热点及发展方向。EIT 是一种新型、无创、无辐射的床旁成像和监测工具。它主要用于研究,但最近已越来越多地被证明在临床上可用。目前正在积极探索 EIT 的更广泛应用。随着其作用变得更加清晰,EIT 有可能成为急危重症医学领域无处不在的补充^[30]。

参考文献:

- [1] 何小军,张国强,马岳峰. 急危重症医学研究热点与发展方向[J]. 中华急诊医学杂志,2023,32(8): 1020-1023.
- [2] LOBO B, HERMOSA C, ABELLA A, et al. Electrical impedance tomography [J]. Annals of Translational Medicine,2018,6(2):26.
- [3] SHI Y, YANG Z G, XIE F, et al. The research progress of electrical impedance tomography for lung monitoring[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,2021,9: 726652.

- [4] WALSH B K, SMALLWOOD C D. Electrical impedance tomography during mechanical ventilation [J]. *Respiratory Care*, 2016, 61(10):1417-1424.
- [5] LOWHAGEN K, LUNDIN S, STENQVIST O. Regional intratidal gas distribution in acute lung injury and acute respiratory distress syndrome assessed by electric impedance tomography [J]. *Minerva Anestesiologica*, 2010, 76(12):1024-1035.
- [6] BLANKMAN P, HASAN D, VAN MOURIK M S, et al. Ventilation distribution measured with EIT at varying levels of pressure support and neurally adjusted ventilatory assist in patients with ALI [J]. *Intensive Care Medicine*, 2013, 39(6):1057-1062.
- [7] KOBYLIANSKII J, MURRAY A, BRACE D, et al. Electrical impedance tomography in adult patients undergoing mechanical ventilation: a systematic review [J]. *Journal of Critical Care*, 2016, 35:33-50.
- [8] XU M R, HE H W, LONG Y. Lung perfusion assessment by bedside electrical impedance tomography in critically ill patients [J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12:748724.
- [9] NGUYEN D T, BHASKARAN A, CHIK W, et al. Perfusion redistribution after a pulmonary-embolism-like event with contrast enhanced EIT [J]. *Physiological Measurement*, 2015, 36(6):1297-1309.
- [10] PUTENSEN C, HENTZE B, MUENSTER S, et al. Electrical impedance tomography for cardio-pulmonary monitoring [J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2019, 8(8):1176.
- [11] SAFAEE FAKHR B, ARAUJO MORAIS C C, DE SANTIS SANTIAGO R R, et al. Bedside monitoring of lung perfusion by electrical impedance tomography in the time of COVID-19 [J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2020, 125(5):e434-e436.
- [12] SELLA N, PETTENUZZO T, ZARANTONELLO F, et al. Electrical impedance tomography: a compass for the safe route to optimal PEEP [J]. *Respiratory Medicine*, 2021, 187:106555.
- [13] LONG Y, LIU D W, HE H W, et al. Positive end-expiratory pressure titration after alveolar recruitment directed by electrical impedance tomography [J]. *Chinese Medical Journal*, 2015, 128(11):1421-1427.
- [14] LI R T, WU Y R, ZHANG H L, et al. Effects of airway pressure release ventilation on lung physiology assessed by electrical impedance tomography in patients with early moderate- to -severe ARDS [J]. *Critical Care*, 2023, 27(1):178.
- [15] BITKER L, TALMOR D, RICHARD J C. Imaging the acute respiratory distress syndrome: past, present and future [J]. *Intensive Care Medicine*, 2022, 48(8):995-1008.
- [16] PERIER F, TUFFET S, MARAFFI T, et al. Electrical impedance tomography to titrate positive end-expiratory pressure in COVID-19 acute respiratory distress syndrome [J]. *Critical Care*, 2020, 24(1):678.
- [17] ZHAO Z Q, ZHANG J S, CHEN Y T, et al. The use of electrical impedance tomography for individualized ventilation strategy in COVID-19: a case report [J]. *BMC Pulmonary Medicine*, 2021, 21(1):38.
- [18] SELLA N, ZARANTONELLO F, ANDREATTA G, et al. Positive end-expiratory pressure titration in COVID-19 acute respiratory failure: electrical impedance tomography vs. PEEP/FiO₂ tables [J]. *Critical Care*, 2020, 24(1):540.
- [19] MACIEJEWSKI D, PUTOWSKI Z, CZOK M, et al. Electrical impedance tomography as a tool for monitoring mechanical ventilation. An introduction to the technique [J]. *Advances in Medical Sciences*, 2021, 66(2):388-395.
- [20] ZHANG R, HE H W, YUN L, et al. Effect of postextubation high-flow nasal cannula therapy on lung recruitment and overdistension in high-risk patient [J]. *Critical Care*, 2020, 24(1):82.
- [21] HE H W, CHI Y, LONG Y, et al. Three broad classifications of acute respiratory failure etiologies based on regional ventilation and perfusion by electrical impedance tomography: a hypothesis-generating study [J]. *Annals of Intensive Care*, 2021, 11(1):134.
- [22] YUAN S Y, HE H W, LONG Y, et al. Rapid dynamic bedside assessment of pulmonary perfusion defect by electrical impedance tomography in a patient with acute massive pulmonary embolism [J]. *Pulmonary Circulation*, 2021, 11(1):1-3.
- [23] 何怀武, 隆云, 池熠, 等. 床旁高渗盐水造影肺灌注电阻抗断层成像的技术规范与临床应用 [J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(15):1097-1101.
- [24] MA H M, DAI M, WU S, et al. Pulmonary rehabilitation ameliorates regional lung function in chronic obstructive pulmonary disease: a prospective single-arm clinical trial [J]. *Annals of Translational Medicine*, 2022, 10(16):891.
- [25] KOSTAKOU E, BARRETT N, CAMPOROTA L. Electrical impedance tomography to determine optimal positive end-expiratory pressure in severe chronic obstructive pulmonary disease [J]. *Critical Care*, 2016, 20(1):295.
- [26] 胡旺露, 闫伟, 张建民. 脑部电阻抗断层成像及其临床应用研究进展 [J]. *中华神经外科杂志*, 2021, 37(4):425-428.
- [27] KE X Y, HOU W, HUANG Q, et al. Advances in electrical impedance tomography-based brain imaging [J]. *Military Medical Research*, 2022, 9(1):10.
- [28] HANNAN S, FAULKNER M, ARISTOVICH K, et al. Imaging fast electrical activity in the brain during ictal epileptiform discharges with electrical impedance tomography [J]. *NeuroImage: Clinical*, 2018, 20:674-684.
- [29] FU F, LI B, DAI M, et al. Use of electrical impedance tomography to monitor regional cerebral edema during clinical dehydration treatment [J]. *PLoS One*, 2014, 9(12):e113202.
- [30] RUBIN J, BERRA L. Electrical impedance tomography in the adult intensive care unit: clinical applications and future directions [J]. *Current Opinion in Critical Care*, 2022, 28(3):292-301.

收稿日期:2023-12-20