

电阻抗成像技术在重症呼吸康复中的应用

潘化平^{1,2*}

1 南京医科大学附属江宁医院, 江苏 南京 211100;

2 泰康之家康复医院(燕园总院), 北京 102200

* 通信作者: 潘化平, E-mail: panhp007@hotmail.com

收稿日期: 2024-02-27; 接受日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175014); 江苏省重点研发(社会发展)计划项目(BE2021618);

南京市卫生科技发展专项资金医学重点科技发展项目(ZKX23062)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.06002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



潘化平, 教授, 主任医师, 硕士生导师。现任泰康之家康复医院(燕园总院)副院长, 曾任南京医科大学附属江宁医院康复医学中心主任、分院党支部书记、医工融合联合实验室主任, 兼任中华医学会物理医学与康复学分会心肺康复学组委员, 中国康复医学会重症康复专业委员会、吞咽障碍康复专业委员会副主任委员, 江苏省医学会物理医学与康复学分会、运动医疗分会副主任委员。主持和参与国家自然科学基金项目3项, 江苏省及南京市重点研发计划项目2项; 荣获中国康复医学会科学技术进步奖二等奖1项, 三等奖1项; 发表SCI/中文核心期刊论文50余篇, 主编译著作4部。荣获发明专利1项, 实用新型专利16项。曾获中国康复医学会“优秀共产党员”“优秀康复医师”“科普先进个人”等荣誉称号。

摘要 电阻抗成像(EIT)技术由于能够在床旁进行无创、实时、动态、无辐射的肺通气检测, 被广泛应用于重症呼吸管理。本研究从EIT技术基本原理(物理原理、数学原理和医学原理)、临床常用的EIT监测功能、EIT在重症呼吸系统疾病康复中的应用以及存在的不足和展望等方面进行阐述, 以期EIT技术的临床康复应用提供参考。其中, 临床常用的EIT监测功能主要包括EIT肺通气功能监测(与空间相关的参数和与时间相关的参数)、EIT灌注分布监测; EIT在重症呼吸系统疾病康复中的应用主要包括康复早期活动安全性评估, 指导呼吸康复方案制订和动态评估呼吸康复疗效(精确指导肺复张、气道廓清治疗、呼吸肌训练、个性化通气设置和评价呼吸康复干预效果); EIT在重症呼吸系统疾病康复应用的不足主要包括图像稳定性不足与信号重建影响监测效果、个性化调整EIT设置尚未形成共识、有效性和安全性有待进一步验证、参数解读与检查报告缺乏标准和规范; 未来还需要进一步优化EIT技术, 推进数据融合, 并建立EIT使用的国际标准和指导原则, 以实现基于EIT的个体化、精细化重症康复全流程管理。

关键词 重症康复; 电阻抗成像; 呼吸支持; 肺通气功能; 呼吸管理; 气道廓清

重症医学的发展催生了重症康复。传统康复服务往往需要等到患者临床病情稳定后, 康复医学才介入, 而重症康复更倾向于做到临床救治与康复服务同步。重症患者具有病情危重和卧床制动2个

主要特征。长期卧床可能会导致ICU获得性肌无力和谵妄发生率增加、机械通气持续时间延长、关节僵硬、功能活动能力受损以及体力活动不足等问题^[1]。这可能会导致患者运动功能及认知功能障

引用格式: 潘化平. 电阻抗成像技术在重症呼吸康复中的应用[J]. 康复学报, 2024, 34(6): 536-543.

PAN H P. Application of electrical impedance tomography technology in critical respiratory rehabilitation [J]. Rehabil Med, 2024, 34(6): 536-543.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.06002

©《康复学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 4.0 协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

碍,即使患者从ICU转出后这些问题仍可能持续存在。重症康复在重症患者救治每一个环节的渗透,可以很好地解决这一临床困局。

重症康复服务对象为保持相对稳定的生命体征常常需要依赖于特别的支持,保证治疗安全性是治疗开始的前提,也是临床限制重症康复开展的原因之一。早期活动、呼吸治疗、体位治疗、被动活动等是重症康复的常见措施^[2-3],但对于治疗疗效的评估仍缺乏有效手段,治疗方案选择主观性也较大。电阻抗成像(electrical impedance tomography, EIT)技术由于能够在患者床旁直接进行无创、无辐射的肺通气检测,越来越被重症医学、呼吸与危重病学、急诊医学、麻醉学等临床学科接受,广泛应用于重症呼吸管理,如呼气末正压(positive end expiratory pressure, PEEP)设置、围手术期肺通气监测、指导肺部物理治疗等。随着重症康复临床工作的发展,EIT技术也逐渐进入康复医学病房,为康复医师在

重症监护患者临床治疗决策和物理治疗师在重症监护患者治疗中评估通气功能提供重要支持。本研究对EIT技术在重症呼吸康复中的应用进行阐述,以期对EIT技术的临床康复应用提供参考。

1 EIT技术基本原理

1.1 EIT技术的物理原理和数学原理

EIT技术基本原理是通过体表的电极测量得到的电压或电流信号重建出物体内部的电阻抗或电阻抗变化的分布图像。

EIT设备包括电极带(电极阵列)、控制台(控制与数据采集系统,最多有32个电极连接)和监视器(图像重建)3个部分。见图1。在肺成像时电极带围绕患者胸部均匀排列并在身体周围的电极施加轻微的电流,采集呼吸运动导致的电阻变化,在呼吸周期中,随着肺泡拉伸和变薄,电阻率下降,使用特定的图形算法而产生成像^[4],每秒最高可获得50张图像,可实时追踪肺内通气情况。

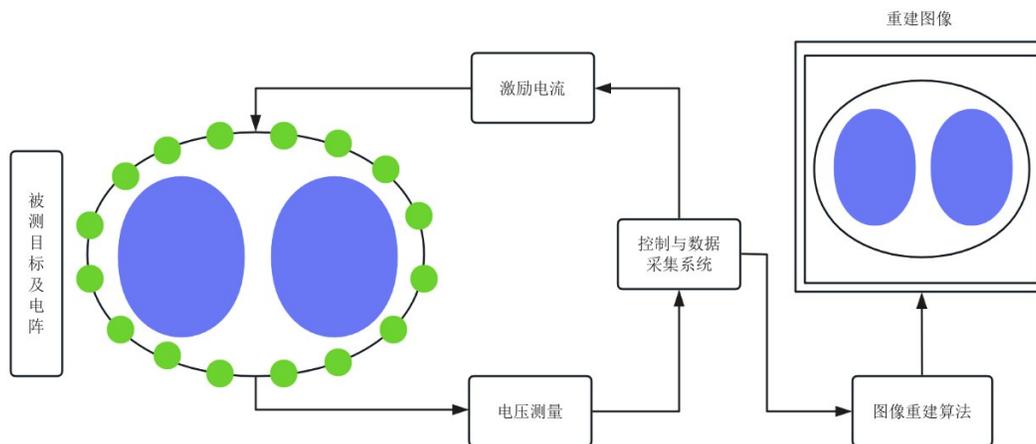


图1 EIT测量系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of EIT measurement system

根据成像方式的不同,EIT技术可以分为静态EIT、动态EIT和多频EIT。①静态EIT:是直接对物体进行边界测量,只需要进行单次测量即可还原内部的阻抗分布。但因为干扰因素较多,获得绝对准确的EIT图像还是比较困难。②动态EIT:分为时间差分EIT(时分EIT)和频率差分EIT(频分EIT),时分EIT是时差EIT图像重建计算基线(参考)测量框架和当前框架之间组织特性变化的图像,非常适合追踪时变的生理现象。频分EIT是通过施加不同频率的激励电流,测量出对应的电压数据,从而重构出2个频率点间的电导率变化,对电导率变化实施成像。③多频EIT:是根据同一时刻不同频率的

数据重建被测体内部的阻抗分布情况,以此研究人体生理功能。

1.2 EIT监测的医学原理

在生物组织中,特定组成(如脂肪、水、细胞外液中的电解质)会影响生物阻抗。若细胞外含水量多、电解质浓度高或血液和肌肉间隙存在大量细胞连接,生物阻抗会减少,而脂肪堆积、骨骼和空气则会增加区域生物阻抗。

电流在肺部不能通过肺泡,只能通过肺泡隔在肺泡周围流动。肺组织生物阻抗的动态变化主要受通气和灌注2种循环机制的影响。吸气时,肺泡体积增加、拉伸并延长了平均电流通路,整体组织

电阻升高;呼气时,电流通路更短,整体组织电阻降低。吸气过程(从残气量到总肺活量)区域阻抗会扩大约300%。此外,一些病理、生理改变也会影响区域阻抗变化,包括肺血管外积水(如肺水肿)、胸内血容量改变、腔内积液(胸腔积液、心包积液、支气管积液和肺泡积液)、异物(胸腔引流)、肺纤维化[如急性呼吸窘迫综合征后或特发性肺纤维化(idiopathic pulmonary fibrosis, IPF)]等。

2 临床常用的EIT监测功能

2.1 EIT肺通气功能监测

EIT肺通气功能监测可分为与空间相关的参数和与时间相关的参数。

2.1.1 与空间相关的参数 包括潮汐阻抗变化、区域通气分布、肺过度膨胀和肺塌陷(overdistension and collapse, OD/CL)、通气中心(center of ventilation, COV)和总不均一指数(global inhomogeneity index, GI)等。

2.1.1.1 OD/CL 在EIT图像的每个PEEP水平上标记降低顺应性的像素,不仅可以显示出过度扩张或塌陷的区域,还可以进行定量评估。

2.1.1.2 COV 通过计算各像素点电阻变化值在空间位置上的加权平均而获得的,可以量化地反映不同的呼吸康复治疗措施引起的腹背侧垂直方向上的通气分布变化,COV越高,表示通气向背侧移动。

2.1.1.3 GI 基于各像素点电阻变化值离散程度计算的通气均匀性指标,是区域肺通气分布的不均一性的可靠指标。GI值越大,肺部通气不均一性越大,在调整EIT参数时应使GI降低。

2.1.2 与时间相关的参数 包含区域性通气延迟(regional ventilation delay, RVD)和内部气体分布等。RVD是通过计算局部区域吸气相电阻-时间曲线开始上升的时刻较整体电阻-时间曲线的延迟而获得的,可以反映局部滞后特性,与计算机断层扫描(computed tomography, CT)观察到的区域肺泡复张存在相关性^[5]。胸廓形态、皮肤与电极间的电阻、胸壁伤口、导管等会以不同方式影响肺脏绝对电阻的测定。因此,根据肺的电阻抗成像区域图,研究者人为设置4个平行层次或象限区域,即定制兴趣区(regions of interest, ROI)。肺通气/灌注电阻抗断层图像按“自腹侧到背侧的4个层次分布”“以图像中心为原点的4个象限分布”进行区域划分。在4层模式中,ROI1和ROI2为上部非重力依赖区,ROI3和ROI4则被分为下部重力依赖区^[6]。各ROI

覆盖区域有不同的区域阻抗波形,表示特定的ROI内阻抗变化,反映肺部通气分布情况^[7]。随着患者体位发生变化,肺重力依赖区也在改变,从而影响肺部不同区域通气的分布^[8]。见图2。

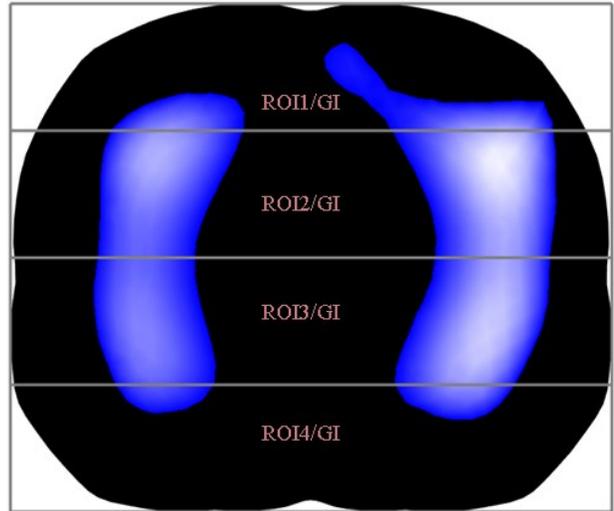


图2 EIT检测肺通气状态分区示意图

Figure 2 Schematic diagram of lung ventilation status detected by EIT

2.2 EIT灌注分布监测

EIT评估灌注分布需要在呼气末暂停期间注射约10 mL高渗盐水并进行电阻抗测量。有研究对68例低氧血症ICU患者[其中11例为肺栓塞(pulmonary embolism, PE)患者]进行EIT检查,使用最大值的20%阻抗截止值定义通气和灌注,确定纯分流(无通气灌注)、死腔通气(无灌注通气)和灌注通气区域。研究结果显示,弥漫性肺病患者在局部通气和灌注方面没有缺陷,与其他患者比较,肺栓塞患者的死腔通气更多,通气灌注比(ventilation/perfusion, V/Q)更小,肺内分流更少,证实EIT可以检测已知PE区域的V/Q不匹配^[9]。

3 EIT在重症呼吸系统疾病康复中的应用

早期康复介入可有效改善ICU危重症患者(特别是重症呼吸系统疾病患者)临床结局,但是受个体差异、并发症风险以及认知功能障碍等因素影响,在早期康复介入过程中需要谨慎考虑个案基础条件(如年龄)、活动限制和诱发创伤性脑损伤等问题^[10-11]。EIT技术可为重症呼吸系统疾病患者早期康复介入安全性评估、呼吸康复指导、康复方案制订、治疗效果评价和患者自主呼吸监测等提供参考依据。

3.1 EIT在重症呼吸系统疾病患者康复早期活动安全性评估中的应用

重症呼吸系统疾病患者康复治疗中的不良反应事件主要包括气管插管移位、低血压、心率增加、心律失常、血氧饱和度下降等。被动活动可能导致下肢深静脉血栓脱落,造成肺栓塞、肺灌注不足、血氧饱和度下降、严重低氧血症。EIT技术可实现床边肺部血流成像检查,这为肺栓塞的即时检测提供了可能性。目前,EIT技术主要采用心脏相关信号同步触发和造影剂增强信号2种监测和评估肺血流灌注情况^[12-14]。当EIT提示死腔面积比例明显增加时,可以早期提示大面积肺栓塞可能,体现EIT床旁早期快速筛查肺栓塞的潜力。多项实验研究结果也表明,EIT结合高渗盐溶液的肺部血流成像与CT肺动脉血管成像(CT pulmonary angiography,CTPA)或单光子发射计算机化断层显像(single photon emission computed tomography,SPECT)检测肺血流情况,具有较高的相关性和一致性^[13-16]。

早期离床活动是重症康复的核心,可改善肺背侧通气,促进肺复张,缓慢增加呼吸末肺容积^[17-18]。但过量的运动可引起血流动力学变化并增加呼吸功,甚至可能导致左心室充盈压升高和诱发肺水肿^[19]。因此,在重症康复临床实践中,通过无创设备实时监测液体负荷对于预防、治疗肺水肿及提高早期活动的安全性至关重要。EIT通过监测肺部阻抗变化,可反映肺内液体的累积情况。有研究发现,EIT通过监测急性肺损伤(acute lung injury,ALI)猪模型不同体位(仰卧位、45°左侧卧位、45°右侧卧位)的肺功能显像,计算获得肺水比,与处死后血管外肺水的质量分析法所得的结果呈高度相关性,从而实现无创性ALI猪模型肺水肿程度的测量。EIT有望成为临床监测肺水肿与指导治疗的工具^[20]。

3.2 EIT可指导制订呼吸康复方案,动态评估呼吸康复疗效

呼吸衰竭是危重症患者最常见的并发症。早期康复治疗可使呼吸重症监护病房的患者平均住院日降低3 d,气管切开率下降24%,脱机失败率下降9%^[21]。呼吸治疗包括肺复张治疗和胸部物理治疗。肺复张治疗是通过复张塌陷的肺泡,纠正低氧血症和保证呼气末正压效应的一种干预措施。胸部物理治疗包括廓清手法、体位引流、高频胸壁振动、正压呼气治疗/震荡正压呼气治疗等,可帮助患者恢复气道纤毛功能,改善肺容量和通气血流比,减少肺内分流和肺炎进展风险。

3.2.1 EIT可精确指导肺复张 在机械通气患者中,通过PEEP滴定法可达到肺复张的目的。ERONIA等^[22]研究发现,利用EIT设备可以精确反映区域肺通气的异质性,提示通过EIT指导个性化PEEP滴定是可行的。目前基于EIT指导个性化PEEP滴定方法包括过度膨胀与塌陷OD/CL法、呼气末肺电阻抗(end-expiratory electrical lung impedance,EELI)法、GI法和RVD法,PEEP滴定法选择尚无统一标准。与传统方法(如应用压力/容积曲线)比较,采用EIT监测急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome,ARDS)患者的生理变化,个性化调整PEEP,能够实现更好的顺应性和氧合指数。BLANKMAN等^[23]研究发现,与对照组(使用动态顺应性方法)比较,心脏术后机械通气的患者采用PEEP滴定(GI、COV和EELI法)PEEP值差异无统计学意义。HAHN等^[24]通过比对CT图像和EIT图像的高亮区域与死腔,发现EIT可在肺复张过程中监测气胸的存在,提高肺复张的安全性。COSTA等^[25-26]研究发现EIT与CT图像估测呼气末气体和潮气量具有较好的一致性。有研究使用EIT对ARDS患者气道压力进行监测,发现EIT监测灵敏度为96.0%,特异性为97.6%,EIT和呼吸机测量的呼吸系统顺应性相关系数为0.80,可有效指导肺复张^[27]。

3.2.2 EIT指导气道廓清治疗 气道廓清技术是指通过人工、药物或机械等方法清除气道淤积分泌物、维持气道通畅的治疗手段^[28]。气道廓清技术包括改善纤毛黏液系统、气道阻力、咳嗽功能的机械气道廓清技术、主动气道廓清技术及吸痰技术,临床上选择个性化的气道廓清治疗可以起到事半功倍的效果。

3.2.2.1 EIT指导气道廓清体位选择 俯卧位引流是常用的气道廓清体位,EIT技术可用于评估俯卧位治疗的作用效应,也可作为停止俯卧位通气的评估方法。在俯卧位过程中,如果出现腹侧通气持续减少,说明俯卧位通气的获益不佳,这是缩短或停止俯卧位通气的信号^[29-30]。

3.2.2.2 EIT指导机械气道廓清技术选择 高频胸壁振荡(high frequency chest wall oscillation,HFCWO)是通过病变肺段处胸壁施加温和、高频压力时上肢的持续共同收缩传递产生振动力的机械气道廓清技术。LONGHINI等^[31]采用EIT观察气道高分泌的有创机械通气患者时发现,HFCWO不仅可以改善背侧区域肺通气,还可明显提高EELI。王玉光等^[32]研究发现,EIT不仅能帮助定位病灶区域,还

能指导患者在HFCWO时结合体位改变以改善中、重度ARDS患者肺重力依赖区的肺通气状况及吻合状况。机械性吸-呼技术(mechanical insufflator-exsufflator, MI-E)是改善咳嗽功能的机械气道廓清技术。操作时推荐选择(吸气压力-呼气压力)±40 cm H₂O(1 cm H₂O≈0.098 kPa),认为是最舒适和最有效的。但是,临床实践发现,部分接受机械通气的患者可能需要60~70 cm H₂O的吸气/呼气压力才能确保有效的峰值呼气流量。个性化的MI-E设置治疗方案对患者的预后具有重要影响,MI-E时的负压所产生模拟咳嗽流速如果太小,无法有效地排痰,而负压太高,则有可能产生气道或者肺泡陷闭^[33]。DAVIES等^[34-35]在婴幼儿MI-E的应用过程中,通过EIT及时发现负压所导致的塌陷和通气缺失,为廓清后的复张手法提供参考^[36-37]。

3.2.2.3 EIT指导吸痰技术选择和支气管肺泡灌洗 吸痰技术分为开放式和封闭式。CORLEY等^[38]应用EIT技术比较开放式吸痰(open suction, OS)与封闭式吸痰(closed suction, CS)对肺容量的影响,发现CS能有效降低肺容量的损失,但呼吸末容积(end-expiratory lung volume, EELV)恢复却明显减慢,故不能认为CS可保护吸引后的肺容量。不管采用何种吸痰方法均应考虑肺复张手法(recruitment maneuver, RM)来恢复EELV。

EIT还可应用于指导和评价支气管肺泡灌洗(bronchoalveolar lavage, BAL)。AKHAVAN和HASHEMIAN^[36]在对1例ICU肺栓塞合并肺炎患者进行BAL时发现,使用EIT可以无创监测、实时评估患者肺部通气状况变化以达到精准治疗的目的,缩短机械通气时间和ICU住院时长,提高患者存活率。但也有学者通过EIT发现BAL对部分ARDS患者肺部通气功能评估可能存在负面影响:①氧合指数≥200 mm Hg(1 mm Hg≈0.133 kPa)患者会出现部分区域肺塌陷,且肺静态顺应性显著降低;②氧合指数<200 mm Hg的中、重度ARDS患者BAL的影响较小^[39]。这提示BAL的效果可能与ARDS病情严重程度相关,需要依靠EIT实时提供信息以调整灌洗后的治疗方案。

3.2.3 EIT指导呼吸肌训练 利用EIT可以较好地指导患者进行呼吸肌训练,患者用力地自主呼吸可能会导致通气的分布不均匀,先进气的背侧出现钟摆呼吸现象,通过可靠的视觉反馈能帮助实现呼吸肌训练期间更大的潮气量和锻炼效果^[37]。治疗师也可通过EIT图像确定患者单次抗阻吸气时的做

功,指导患者进行有效训练^[40]。

3.2.4 EIT指导个性化通气设置 对于需要长时间机械通气支持的患者,鉴别肺部的通气与灌注非常重要,肺部通气和灌注区域不匹配会造成气体交换障碍,使用EIT可以帮助临床医生评估气体交换情况并制订个性化的治疗计划,确定最佳的PEEP水平,保证足够的肺部开放,避免不必要的肺压高,减少肺部损伤并优化气体交换。

3.2.5 EIT评价呼吸康复干预效果 应用EIT可动态评估慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)和哮喘患者呼气流速受限的严重程度和对支气管扩张剂的疗效^[41],以指导用药治疗。

高流量氧疗(high-flow nasal cannula, HFNC)为重症监护病房中的呼吸衰竭患者提供了一种新型的辅助呼吸手段^[42]。相对于无创呼吸机,重症患者对HFNC感觉更为舒适且易于接受。但尚缺乏明确评价指标判断HFNC治疗的实际效果^[43]。有研究表明,利用EIT监测发现高流量氧疗可以增加EELI和功能残气量(functional residual capacity, FRC),并减少呼吸频率^[18]。BASILE等^[44]研究发现,重症患者经HFNC治疗后,肺通气异质性降低、EELV增加、呼吸频率下降。这提示EIT可实时观察肺通气变化以评估HFNC治疗效果。对接受静脉体外膜氧合(veno-venous extracorporeal membrane oxygenation, VV-ECMO)治疗的危重症患者,基于氧合情况进行肺复张性评价和呼吸末正压滴定不易执行,且评价较为困难^[45-46]。EIT作为无创、床旁可实时监测的技术手段,可以评估ECMO联合俯卧位通气对局部通气及最佳PEEP的影响,有助于在ECMO治疗的同时进行肺保护^[47]。

4 EIT在重症康复应用中的不足和展望

4.1 存在不足

虽然EIT在重症康复临床应用中具有较大的潜力,但还存在很多挑战。

4.1.1 图像稳定性不足与信号重建影响监测效果 由于电极的数量和排列方式有限,EIT重建的图像分辨率通常不及其他医学成像技术。周围环境的电磁干扰可能会影响电阻抗的测量,信号处理依赖复杂的算法,可能导致重建图像的时间延迟,影响实时监测的效果。

4.1.2 个性化调整EIT设置尚未形成共识 不同患者的胸部大小、形状和组织成分的差异可能影响电

极放置和电阻抗测量,需要个性化调整EIT设置。但目前学者们尚未就个性化应用EIT形成统一共识。

4.1.3 有效性和安全性有待进一步验证 目前关于通气和血流区域阈值的确定、灌注成像方法(最大斜率、曲线下面积、基线确定等)以及分钟通气量和心输出量校正计算区域V/Q的阈值等分析标准尚未达成统一^[48]。EIT有效性和安全性仍需要通过更多的临床随机对照试验来验证,各种疾病所涉及的相关阈值和诊断标准也需要更多数据进一步证实^[49]。

4.1.4 参数解读与检查报告缺乏标准和规范 目前,EIT技术的操作主要依赖EIT设备厂商的培训,提供的分析内容相对单一。还需要制订标准化的操作培训流程、参数分析规范及报告体系,完善EIT技术培训、参数解读标准和检查报告制度,提高临床应用安全性和有效性。

4.2 应用展望

随着技术的进步,EIT图像的时间和空间分辨率会得到明显提升,有望更精确地监测肺部的微小变化。将EIT数据与其他生理监测数据(如血气分析和脉搏血氧饱和度)、CT或MRI的数据融合,并应用人工智能技术深度学习,提供个性化的诊断和治疗方案,以支持临床决策和提高治疗效果。此外,无线电极和数据传输系统的研发迭代,EIT越来越灵活和舒适,更容易应用于不同的临床环境,增加患者的舒适度,减少移位的风险。EIT设备的小型化、低成本,使其更适合在急诊、康复和家庭护理环境中使用,同时结合远程医疗技术,方便对危重症患者进行长期监测。

随着技术发展和临床应用扩展,EIT技术在重症康复中应用将更加成熟。进一步建立EIT使用的国际标准和指导原则,实现基于EIT的个体化、精细化重症康复全流程管理,将在未来的医疗实践中起到越来越重要的作用。

致谢:感谢南京医科大学附属江宁医院康复医学中心陈方煜同志参与本研究文献收集与整理工作。

参考文献

- [1] 田翠杰,王海播,张文平,等.电阻抗断层成像技术在呼吸系统疾病中的临床应用[J].中国呼吸与危重监护杂志,2020,19(6):617-620.
TIAN C J, WANG H B, ZHANG W P, et al. Clinical application of electrical impedance tomography technology in respiratory system diseases [J]. Chin J Respir Crit Care Med, 2020, 19(6): 617-620.
- [2] KARSTEN J, STUEBER T, VOIGT N, et al. Influence of different

- electrode belt positions on electrical impedance tomography imaging of regional ventilation: a prospective observational study [J]. Crit Care, 2016, 20: 3.
- [3] 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]. Ann Intensive Care, 2021, 11(1): 134.
- [4] PFURTSCHELLER K, RING S, BERAN E, et al. Effect of body position on ventilation distribution during PEEP titration in a porcine model of acute lung injury using advanced respiratory monitoring and electrical impedance tomography [J]. Intensive Care Med Exp, 2015, 3(1): 38.
- [5] 徐佳世,罗艳.电阻抗断层成像技术指导个体化呼气末正压通气的研究进展[J].临床麻醉学杂志,2020,36(12):1229-1231.
XU J S, LUO Y. Research progress of individualized positive end-expiratory pressure ventilation guided by electrical impedance tomography [J]. J Clin Anesthesiol, 2020, 36(12): 1229-1231.
- [6] HE H W, LONG Y, FRERICHS I, et al. Detection of acute pulmonary embolism by electrical impedance tomography and saline bolus injection [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 202(6): 881-882.
- [7] RENNER C, JEITZINER M M, ALBERT M, et al. Guideline on multimodal rehabilitation for patients with post-intensive care syndrome [J]. Crit Care, 2023, 27(1): 301.
- [8] HODGSON C L, SCHALLER S J, NYDAHL P, et al. Ten strategies to optimize early mobilization and rehabilitation in intensive care [J]. Crit Care, 2021, 25(1): 324.
- [9] WHITE C, CONNOLLY B, ROWLAND M J. Rehabilitation after critical illness [J]. BMJ, 2021, 373: n910.
- [10] HERNANDEZ S, KITTELTY K, HODGSON C L. Rehabilitating the neurological patient in the ICU: what is important? [J]. Curr Opin Crit Care, 2021, 27(2): 120-130.
- [11] ROCHESTER C L, SPRUIT M A, HOLLAND A E. Pulmonary rehabilitation in 2021 [J]. JAMA, 2021, 326(10): 969-970.
- [12] FAGERBERG A, SÖNDERGAARD S, KARASON S, et al. Electrical impedance tomography and heterogeneity of pulmonary perfusion and ventilation in porcine acute lung injury [J]. Acta Anaesthesiol Scand, 2009, 53(10): 1300-1309.
- [13] BORGES J B, SUAREZ-SIPMANN F, BOHM S H, et al. Regional lung perfusion estimated by electrical impedance tomography in a piglet model of lung collapse [J]. J Appl Physiol, 2012, 112(1): 225-236.
- [14] HENTZE B, MUDERS T, LUEPSCHEN H, et al. Regional lung ventilation and perfusion by electrical impedance tomography compared to single-photon emission computed tomography [J]. Physiol Meas, 2018, 39(6): 65004.
- [15] REINIUS H, BORGES J B, FREDÉN F, et al. Real-time ventilation and perfusion distributions by electrical impedance tomography during one-lung ventilation with capnotherax [J]. Acta Anaesthesiol Scand, 2015, 59(3): 354-368.
- [16] BLUTH T, KISS T, KIRCHER M, et al. Measurement of relative lung perfusion with electrical impedance and positron emission tomography: an experimental comparative study in pigs [J]. Br J

- Anaesth, 2019, 123(2):246–254.
- [17] EIMER C, FREIER K, WEILER N, et al. The effect of physical therapy on regional lung function in critically ill patients [J]. *Front Physiol*, 2021, 12:749542.
- [18] YUAN S Y, CHI Y, LONG Y, et al. Effect of position change from the bed to a wheelchair on the regional ventilation distribution assessed by electrical impedance tomography in patients with respiratory failure [J]. *Front Med*, 2021, 8:744958.
- [19] VIGNON P. Cardiopulmonary interactions during ventilator weaning [J]. *Front Physiol*, 2023, 14:1275100.
- [20] TREPTE C J, PHILLIPS C R, SOLÀ J, et al. Electrical impedance tomography (EIT) for quantification of pulmonary edema in acute lung injury [J]. *Crit Care*, 2016, 20:18.
- [21] YOSEF-BRAUNER O, ADI N, BEN SHAHAR T, et al. Effect of physical therapy on muscle strength, respiratory muscles and functional parameters in patients with intensive care unit-acquired weakness [J]. *Clin Respir J*, 2015, 9(1):1–6.
- [22] ERONIA N, MAURI T, MAFFEZZINI E, et al. Bedside selection of positive end-expiratory pressure by electrical impedance tomography in hypoxemic patients: a feasibility study [J]. *Ann Intensive Care*, 2017, 7(1):76.
- [23] BLANKMAN P, HASAN D, ERIK G, et al. Detection of 'best' positive end-expiratory pressure derived from electrical impedance tomography parameters during a decremental positive end-expiratory pressure trial [J]. *Crit Care*, 2014, 18(3):R95.
- [24] HAHN G, JUST A, DUDYKEYVYCH T, et al. Imaging pathologic pulmonary air and fluid accumulation by functional and absolute EIT [J]. *Physiol Meas*, 2006, 27(5):S187–S198.
- [25] COSTA E L, BORGES J B, MELO A, et al. Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography [J]. *Intensive Care Med*, 2009, 35(6):1132–1137.
- [26] MEIER T, LUEPSCHEN H, KARSTEN J, et al. Assessment of regional lung recruitment and derecruitment during a PEEP trial based on electrical impedance tomography [J]. *Intensive Care Med*, 2008, 34(3):543–550.
- [27] GÓMEZ-LABERGE C, ARNOLD J H, WOLF G K. A unified approach for EIT imaging of regional overdistension and atelectasis in acute lung injury [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2012, 31(3):834–842.
- [28] 中华医学会呼吸病学分会, 中国老年保健医学研究会呼吸病学分会, 中国呼吸医师分会呼吸职业发展委员会呼吸治疗师工作组, 等. 机械气道廓清技术临床应用专家共识[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2023, 46(9):866–879.
- Chinese Thoracic Society, Respiratory Disease Branch of Chinese Association of Geriatric Research, Respiratory Care Group of Chinese Association of Chest Physicians Respiratory Career Development Commit, et al. Expert consensus on clinical application of mechanical airway clearance techniques [J]. *Chin J Tuberc Respir Dis*, 2023, 46(9):866–879.
- [29] TOMASINO S, SASSANELLI R, MARESCALCO C, et al. Electrical impedance tomography and prone position during ventilation in COVID-19 pneumonia: case reports and a brief literature review [J]. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth*, 2020, 24(4):287–292.
- [30] PERIER F, TUFFET S, MARAFFI T, et al. Effect of positive end-expiratory pressure and proning on ventilation and perfusion in COVID-19 acute respiratory distress syndrome [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(12):1713–1717.
- [31] LONGHINI F, BRUNI A, GAROFALO E, et al. Chest physiotherapy improves lung aeration in hypersecretive critically ill patients: a pilot randomized physiological study [J]. *Crit Care*, 2020, 24(1):479.
- [32] 王玉光, 刘丽丽, 贾志杰, 等. EIT技术指导下中重度ARDS患者不同体位振动排痰效果比较[J]. *精准医学杂志*, 2020, 35(4):301–304.
- WANG Y G, LIU L L, JIA Z J, et al. Effect of electrical impedance tomography guided vibration sputum expectoration in different body positions in patients with moderate to severe acute respiratory distress syndrome [J]. *J Precis Med*, 2020, 35(4):301–304.
- [33] LACOMBE M, BORÉ A, AMO CASTRILLO L D, et al. Peak cough flow fails to detect upper airway collapse during negative pressure titration for cough-assist [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2019, 100(12):2346–2353.
- [34] DAVIES P, YASIN S, GATES S, et al. Clinical scenarios of the application of electrical impedance tomography in paediatric intensive care [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):5362.
- [35] RINGER C N, ENGBERG R J, CARLIN K E, et al. Physiologic effects of nasal aspiration and nasopharyngeal suctioning on infants with viral bronchiolitis [J]. *Respir Care*, 2020, 65(7):984–993.
- [36] AKHAVAN S, HASHEMIAN S M. The role of electrical impedance tomography for monitoring during bronchoscopy: a case report [J]. *J Crit Care*, 2018, 48:311–313.
- [37] 中国病理生理危重病学会呼吸治疗学组. 重症患者气道廓清技术专家共识[J]. *中华重症医学电子杂志(网络版)*, 2020, 6(3):272–282.
- Respiratory Therapy Group of Chinese Society of Critical Care Medicine. Expert consensus of airway clearance in critically ill patients [J]. *Chin J Crit Care Intensive Care Med Electron Ed*, 2020, 6(3):272–282.
- [38] CORLEY A, SPOONER A J, BARNETT A G, et al. End-expiratory lung volume recovers more slowly after closed endotracheal suctioning than after open suctioning: a randomized crossover study [J]. *J Crit Care*, 2012, 27(6):742.e1–742.e7.
- [39] FRANCHINEAU G, CHOMMELOUX J, PINETON DE CHAMB-RUN M, et al. Electrical impedance tomography monitoring of bronchoalveolar lavage in patients with acute respiratory distress syndrome [J]. *Crit Care Med*, 2022, 50(3):e231–e240.
- [40] 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 [J]. *Crit Care*, 2018, 22(1):26.
- [41] HE H W, YUAN S Y, YI C, et al. Titration of extra-PEEP against intrinsic-PEEP in severe asthma by electrical impedance tomography: a case report and literature review [J]. *Medicine*, 2020, 99(26):e20891.
- [42] 中国卫生信息与健康医疗大数据学会重症医学分会标准委员

会,北京肿瘤学会重症医学专业委员会,中国重症肺电阻抗工作组.肺电阻抗成像技术在重症呼吸管理中的临床应用中国专家共识[J].中华医学杂志,2022,102(9):615-628.

China Health Information and Healthcare Big Data Society Critical Care Medicine Branch Standards Committee, Beijing Oncology Society Critical Care Medicine Professional Committee, Working Group of China Critical Care Pulmonary Electrical Impedance. Clinical application of pulmonary electrical impedance tomography in severe respiratory management: consensus of experts in China [J]. Natl Med J China, 2022, 102(9): 615-628.

- [43] GRASSI A, FOTI G, LAFFEY J G, et al. Noninvasive mechanical ventilation in early acute respiratory distress syndrome [J]. Pol Arch Intern Med, 2017, 127(9): 614-620.
- [44] BASILE M C, MAURI T, SPINELLI E, et al. Nasal high flow higher than 60 L/min in patients with acute hypoxemic respiratory failure: a physiological study [J]. Crit Care, 2020, 24(1): 654.
- [45] BELLANI G, LAFFEY J G, PHAM T, et al. Epidemiology, patterns of care, and mortality for patients with acute respiratory distress syndrome in intensive care units in 50 countries [J]. JAMA,

2016, 315(8): 788-800.

- [46] FRANCHINEAU G, BRÉCHOT N, HEKIMIAN G, et al. Prone positioning monitored by electrical impedance tomography in patients with severe acute respiratory distress syndrome on venovenous ECMO [J]. Ann Intensive Care, 2020, 10(1): 12.
- [47] FRANCHINEAU G, BRÉCHOT N, LEBRETON G, et al. Bedside contribution of electrical impedance tomography to setting positive end-expiratory pressure for extracorporeal membrane oxygenation-treated patients with severe acute respiratory distress syndrome [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2017, 196(4): 447-457.
- [48] HE H W, LONG Y, CHI Y, et al. Reply to Wang and Zhong: bedside evaluation of pulmonary embolism by saline contrast-enhanced electrical impedance tomography: considerations for future research [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2021, 203(3): 395-397.
- [49] BORGES J B, ALCALA G C, MLČEK M. A Step Forward toward a bedside and timely monitoring of regional ventilation/perfusion matching [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 202(10): 1342-1344.

Application of Electrical Impedance Tomography Technology in Critical Respiratory Rehabilitation

PAN Huaping^{1,2*}

¹ The Affiliated Jiangning Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

² Taikang Rehabilitation Hospital (Yanyuan General Hospital), Beijing 102200, China

*Correspondence: PAN Huaping, E-mail: panhp007@hotmail.com

ABSTRACT Electrical impedance tomography (EIT) is a technology widely used in respiratory management of critical patients that enables noninvasive, real-time, dynamic and radiation-free lung ventilation monitoring at the bedside. This study encompasses the fundamental physical, mathematical and medical principles of EIT, alongside its commonly utilized clinical monitoring functionalities, applications in the rehabilitation of critical respiratory diseases, and the shortcomings and prospects of EIT, in order to provide references for the application of EIT in clinical rehabilitation. The key clinical monitoring functionalities of EIT predominantly entail lung ventilation monitoring, encompassing both spatial and temporal parameters, as well as perfusion distribution monitoring. In the context of critical respiratory disease rehabilitation, EIT finds applications in early rehabilitation activity safety assessment, guiding the formulation of respiratory rehabilitation plans, and dynamically assessing rehabilitation effectiveness. This includes providing precise guidance for lung recruitment, airway clearance therapy, respiratory muscle training, individualized ventilation settings, and evaluating the effects of respiratory rehabilitation interventions. Limitations in the application of EIT for critical respiratory diseases rehabilitation primarily include insufficient image stability and signal reconstruction affecting monitoring effectiveness, alongside the lack of consensus on personalized adjustment of EIT settings, the necessity for further validation of effectiveness and safety, and the absence of standards and norms in parameter interpretation and examination reporting. Future efforts should prioritize optimizing EIT technology, advancing data fusion techniques and establishing international standards and guidelines for its utilization to achieve personalized and refined management throughout the entire critical care rehabilitation process based on EIT.

KEY WORDS critical rehabilitation; electrical impedance tomography; respiratory support; pulmonary ventilation; respiratory management; airway clearance

DOI:10.3724/SP.J.1329.2024.06002