

电阻抗断层成像技术指导的集束化呼吸康复干预在重症有创机械通气患者中的应用

吴元浩¹ 董宁^{1△} 魏潇雯¹ 余逸飞¹ 沈克兰¹ 杨依静¹ 杨洁¹ 张林²

(¹上海市公共卫生临床中心呼吸与危重症医学科, ²护理部 上海 201508)

【摘要】 目的 探究电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)技术指导的集束化呼吸康复干预对重症有创机械通气患者机械通气时间及预后的影响。方法 采用便利抽样法选取2023年5月至2025年2月于上海市公共卫生临床中心呼吸与危重症医学科行有创机械通气的144例重症患者,按入院时间分为对照组和试验组。对照组(72例)实施经验性常规呼吸康复,试验组(72例)实施EIT技术指导的集束化呼吸康复干预。比较两组的机械通气时间、动脉血氧分压、氧合指数、临床肺部感染评分、肌力分级、ICU住院时间及总住院时间。结果 试验组65例、对照组62例完成研究。试验组与对照组机械通气时间分别为223.0(157.0, 285.5) h与261.0(168.8, 361.8) h, 差异有统计学意义($P < 0.05$)。试验组动脉血氧分压、氧合指数、肌力分级显著高于对照组(P 均 < 0.05);试验组临床肺部感染评分、ICU住院时间显著低于对照组(P 均 < 0.05);两组总住院时间差异无统计学意义。结论 EIT技术指导的集束化呼吸康复能有效改善重症有创机械通气患者的机械通气时间、氧合状态和肌力分级,并缩短ICU住院时间,但对患者总住院时间无明显影响。

【关键词】 有创机械通气; 电阻抗断层成像(EIT); 呼吸康复; 气道廓清

【中图分类号】 R493 **【文献标志码】** A **doi:**10.3969/j.issn.1672-8467.2026.04.006

Application of electrical impedance tomography-guided bundled respiratory rehabilitation in severe patients undergoing invasive mechanical ventilation

WU Yuan-hao¹, DONG Ning^{1△}, WEI Xiao-wen¹, YU Yi-fei¹, SHEN Ke-lan¹,
YANG Yi-jing¹, YANG Jie¹, ZHANG Lin²

(¹Department of Respiratory and Critical Care Medicine, ²Department of Nursing,
Shanghai Public Health Clinical Center, Shanghai 201508, China)

【Abstract】 Objective To investigate the effects of electrical impedance tomography (EIT) -guided bundled respiratory rehabilitation on the duration of mechanical ventilation and prognosis in mechanically ventilated patients. **Methods** A total of 144 severe patients who underwent invasive mechanical ventilation in the Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Shanghai Public Health Clinical Center from May 2023 to Feb 2025 were recruited via convenience sampling. Patients were allocated to either a control group ($n=72$), receiving routine respiratory rehabilitation, or an experimental group ($n=72$), receiving an EIT-guided bundled respiratory rehabilitation program. Outcome measures included duration of mechanical ventilation, arterial partial pressure of oxygen (PaO_2), oxygenation index (OI), clinical pulmonary infection score (CPIS), Lovett muscle strength classification, ICU length of stay (LOS) and hospital LOS. **Results** Sixty-five patients in the experimental group and 62 patients in the

上海市公共卫生临床中心科研项目(KY-GW-2021-54);上海市公共卫生临床中心人才项目(RC-YF-2026-09)

[△]Corresponding author E-mail: dongning@shaphc.org

网络首发时间:2026-06-26 15:37:54 网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/31.1885.R.20260626.1047.004

control group completed the study. The duration of mechanical ventilation was 223.0 (157.0, 285.5) h in the experimental group and 261.0 (168.8, 361.8) h in the control group, with the difference being statistically significant ($P<0.05$). The experimental group demonstrated significantly higher PaO_2 and OI, and better Lovett muscle strength classification (all $P<0.05$). Conversely, the experimental group had significantly lower CPIS and ICU LOS (all $P<0.05$). However, there was no significant difference in hospital LOS between the two groups. **Conclusion** EIT-guided bundled respiratory rehabilitation effectively reduced the duration of mechanical ventilation, improved oxygenation status and muscle strength grade, and shortened the ICU stay in mechanically ventilated patients. However, it did not significantly affect the overall hospital length of stay.

【Key words】 mechanical ventilation; electrical impedance tomography (EIT); pulmonary rehabilitation; airway clearance

* This work was supported by the Research Program of Shanghai Public Health Clinical Center (KY-GW-2021-54) and the Talents Program of Shanghai Public Health Clinical Center (RC-YF-2026-09).

呼吸衰竭作为多种疾病的共同严重转归,常依赖机械通气进行生命支持。然而,机械通气本身是发生 ICU 获得性衰弱 (ICU-acquired weakness, ICU-AW) 的独立危险因素^[1],其发生率高达 25%~65%^[2]。长期制动与呼吸肌无力不仅显著延长机械通气与气管插管时间,更导致脱机困难,严重影响患者预后。尽管早期重症康复措施(如呼吸治疗、体位管理与主动活动)被证实可改善肌力、缩短通气时间并降低 ICU-AW 风险^[3],但目前缺乏能够实时、无创监测肺通气功能的床旁工具,使得康复干预的效果难以动态评估与个体化调整^[4]。电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)作为一种新兴无创、无辐射的床旁监测技术,可实时、动态可视化肺内气体分布,量化评估体位调整与康复干预对局部通气的影响,为个体化呼吸康复提供客观依据^[5]。然而,目前 EIT 在呼吸康复领域的应用仍处于探索阶段,现在研究多聚焦于呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)滴定^[6]、肺区域通气监测^[7]、胸部物理治疗评估^[8-9]等单一干预环节,缺乏将 EIT 监测贯穿于康复全过程的整合性方案。基于此,本研究构建了 EIT 指导的集束化呼吸康复方案,将 EIT 监测贯穿于体位优化、PEEP 滴定、气道廓清、脱机评估及进阶康复的全流程,旨在通过实时可视化反馈实现呼吸康复的动态调整与精准实施。

资料和方法

研究对象 采用单中心回顾性前后对照研究,

选择 2023 年 5 月至 2025 年 2 月收治于上海市公共卫生临床中心呼吸与危重症医学科行有创机械通气的患者为研究对象。纳入标准:(1)年龄 ≥ 18 岁;(2)有创机械通气时间 ≥ 24 h;(3)血流动力学稳定。排除标准:(1)体内安装有永久或临时心脏起搏器者;(2)合并中大量胸腔积液、气胸、肋骨骨折、脊柱不稳定、胸部皮肤外伤者;(3)因胸、腹带等无法连接电极带者;(4) $\text{BMI}>50\text{ kg/m}^2$ ^[5];(5)患者法定代理人拒绝参与者。

每日筛查患者,满足以下条件即启动呼吸康复。(1)原发病处于稳定期或得到初步控制;(2)血流动力学稳定:平均动脉压 65~110 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa,下同),心率 50~120 次/分;(3)氧合指数[动脉血氧分压(arterial oxygen partial pressure, PaO_2)/吸入氧浓度(fraction of inspired oxygen, FiO_2)] $\geq 150\text{ mmHg}$;(4)Richmond 躁动-镇静量表(Richmond agitation-sedation scale, RASS)评分 ≤ 1 分;(5)呼吸机支持:通气模式为同步间歇指令通气(synchronized intermittent mandatory ventilation, SIMV),且通气参数满足 $\text{FiO}_2 \leq 60\%$,支持压力 $\leq 15\text{ cmH}_2\text{O}$ (1 $\text{cmH}_2\text{O}=0.098\text{ kPa}$,下同), $\text{PEEP} \leq 8\text{ cmH}_2\text{O}$ 。剔除标准:干预过程中血流动力学不稳定难以继续或患者法定代理人要求退出者。样本量估计^[10]: $n_1=n_2=2[(Z_\alpha+Z_\beta)\sigma/\delta]^2$,其中 $\alpha=0.05$, $\beta=0.10$,双侧检验, $Z_\alpha=1.960$, $Z_\beta=1.282$ 。以机械通气时间均分作为主要结局指标,参考相关文献^[3],两组均数差值 $\delta=1.03$,标准差 $\sigma=1.65$, $n_1=n_2=61$,考虑 15% 缺失率,每组样本量为 72 例。本研究通过上

海市公共卫生临床中心医学伦理委员会批准(批准号:2023-S111-02),所有入组的患者法定代理人均知情同意且自愿参加本研究。

按照入院时间先后顺序,将2023年5月至2024年3月住院的72例患者作为对照组;2024年4月至2025年2月住院的72例患者作为试验组。因课题的设计无法对患者施盲,所以指标评估人员与数据统计人员不参与干预的全过程,以降低偏倚概率。

机械通气与基础管理 所有患者均接受常规治疗,(1)抗感染与气道管理:根据指征给予抗感染药物、祛痰治疗、气道温湿化及胸部物理治疗。(2)呼吸支持与监测:采用保护性通气策略(潮气量 $6\sim 8\text{ mL/kg}$ 理想体重),使用呼吸机[Dräger infinity C300,德尔格医疗设备(上海)有限公司]辅助通气。持续心电监护(Mindray BeneVision N15,深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司)监测生命体征。每4 h监测并维持气管导管气囊压在 $25\sim 30\text{ cmH}_2\text{O}$ 。(3)镇痛镇静:依据安静、舒适、合作的原则实施目标导向性镇痛镇静策略。(4)撤机筛查:每日定时进行自主觉醒试验和自主呼吸试验(spontaneous breathing trial, SBT)。(5)体位管理:在维持生命体征及血流动力学稳定的前提下,逐步抬高床头至 $30^\circ\sim 45^\circ$ 。每2 h协助患者变换体位并使用气垫床预防压力性损伤。

康复干预方案及分组 对照组实施经验性常规呼吸康复。早期实施被动活动及神经肌肉电刺激,在病情允许并经多学科团队评估后,进阶至主动运动(如举臂、直腿抬高训练),以及床上脚踏车、弹力带抗阻训练。试验组实施EIT指导的集束化呼吸康复干预(图1)。

多学科团队协作 团队成员包括责任护士6人,呼吸危重症医师、护士长、呼吸治疗师、科研人员各2人,康复治疗师、营养师各1人。其中护士长负责质量控制、工作沟通协调;主治医师负责患者病情评估与判断;呼吸治疗师协助管理气道和呼吸机、床旁纤维支气管镜痰液清除与灌洗;责任护士实施EIT监测和具体的呼吸康复训练措施;科研人员负责文献查阅、数据收集与分析,康复治疗师负责个性化康复方案制定与实施;营养师负责个性化营养膳食方案制定与营养调整。所有参与EIT监测的护士在操作前均接受专门培训并通过考核。

EIT监测与反馈 (1)设备检查:EIT设备[Dräger PulmoVista500,德尔格医疗设备(上海)有

限公司]置于待机模式,正确连接电缆至EIT模块。(2)电极放置:根据患者胸围选用合适型号(S、M、L)的绑带。涂抹导电糊后,将16个电极片环绕固定于患者胸部(男性:第4肋间隙水平;女性:第5肋间隙水平;ARDS患者绷带位置可稍升高),另一参考电极片贴于腹部。确保所有电极片与皮肤紧密贴合,监测期间防止移位。在体表标记电极绑带位置,确保每次在同一平面评估。(3)信号确认:确保16个工作电极及参考电极的信号强度指示均位于设定阈值(红色横线)以下。(4)图像分析与区域定义:采集的EIT肺通气图像按象限划分为4个定制感兴趣区(regions of interest, ROI)。ROI 1、2代表肺非重力依赖区,ROI 3、4代表肺重力依赖区;其中ROI 1和ROI 3为右肺区域,ROI 2和ROI 4为左肺区域。各ROI通气百分比总和约为100%。通气缺失判定标准^[11]: $15\%\leq \text{ROI 通气}<20\%$ 为轻度, $10\%\leq \text{ROI 通气}<15\%$ 为中度,ROI通气 $<10\%$ 为重度。图像色彩表示^[5]:最大阻抗变化区(如100%)为白色;变化 $>10\%$ 区域由深蓝(低值)向浅蓝(高值)渐变;变化 $<10\%$ 区域(通气不足或无通气)显示为黑色。

体位优化 利用EIT监测不同体位下各ROI通气百分比及潮气量分布变化,确定并维持能最大化改善重力依赖区通气的最佳体位。结合生命体征和意识状态判断患者对该体位的耐受性,在兼顾压力性损伤预防的前提下,尽可能延长该体位时间。

PEEP滴定 体位优化无法维持ROI通气趋于均匀时,给予PEEP滴定。在PEEP递减过程中,监测呼气末电阻抗变化。当呼气末电阻抗在某一PEEP水平维持相对稳定,随PEEP降低呈阶梯状下降时,该稳定平台期对应的PEEP值视为潜在最佳PEEP。

气道廓清 若体位调整和PEEP滴定后仍存在显著通气不均,则序贯实施气道廓清技术。每项操作后评估ROI通气分布改善情况。若EIT显示肺部通气改善,表明廓清技术有效(图2);若仍存在气道阻塞或分泌物积聚征象,则调整廓清技术的强度或进阶至下一技术,直至各区通气趋于均衡。基于EIT持续监测动态调整气道廓清技术的力度、持续时间和频率。

SBT监测 动态监测潮气电阻抗变化、呼气末电阻抗与肺内气体分布稳定性,评估患者耐受性及脱机潜力(电阻抗变化小、气体分布平稳、背侧通气分布比例升高提示成功可能)。

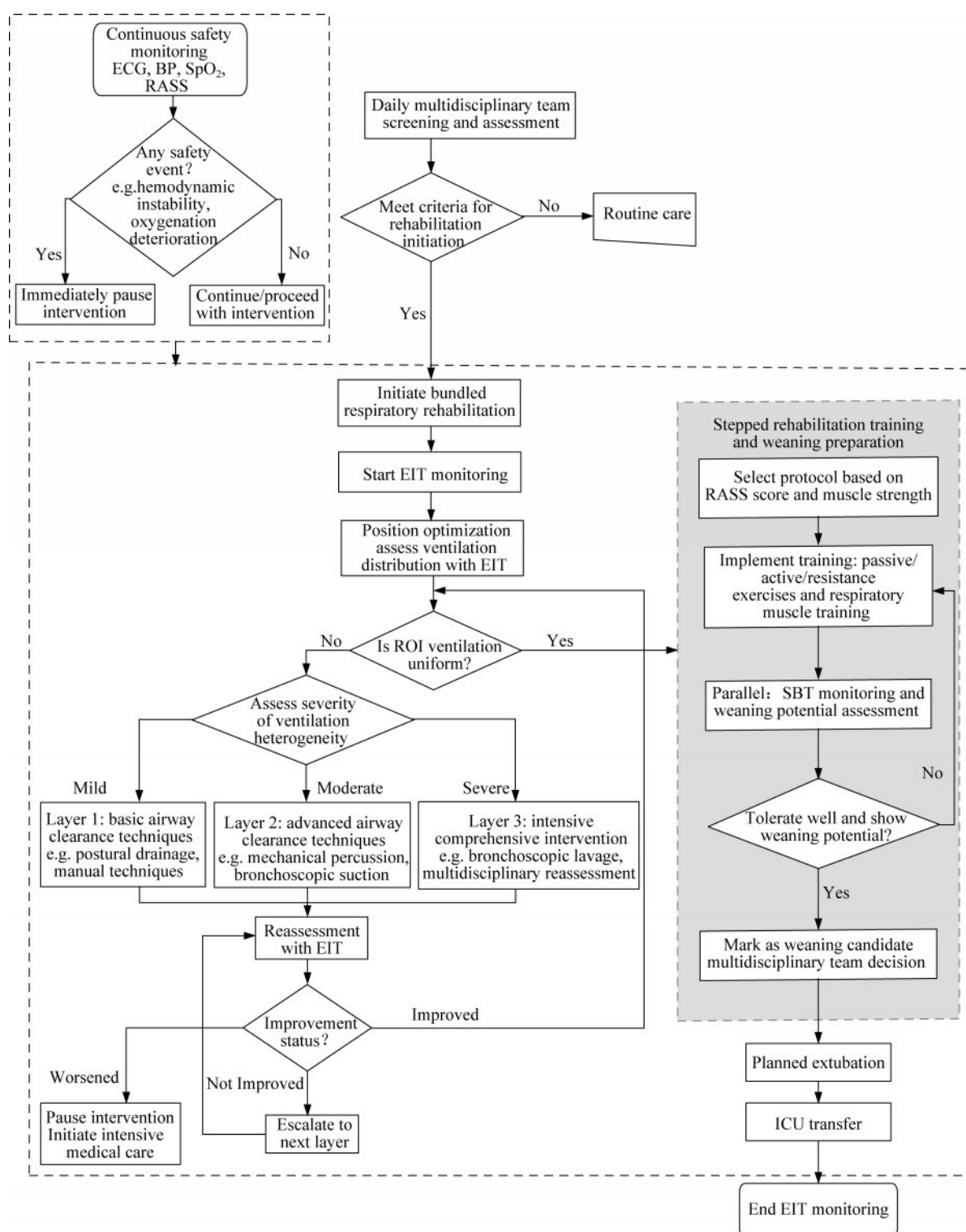
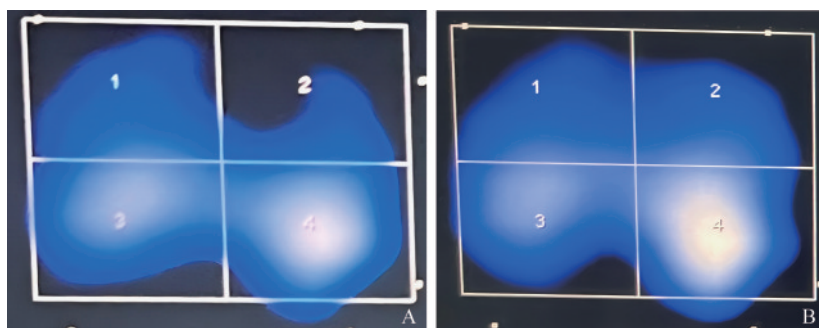


图1 EIT监测指导的重症有创机械通气患者集束化呼吸康复流程

Fig 1 Flow diagram of EIT-guided bundled respiratory rehabilitation for mechanically ventilated patients

康复训练 根据RASS评分和肢体肌力^[12]进阶式实施。(1)RASS评分-3~-1分,肢体肌力0~1级。每日2次,每次20 min被动关节活动度训练及神经肌肉电刺激。监测运动时的ROI图像及数值

变化,评估患者的氧耗,避免疲劳。(2)RASS评分-1~0分,肢体肌力2~3级。①呼吸肌训练:进阶式实施堵管发声训练、缩唇呼吸、呼吸控制训练。在抗阻吸气时,利用EIT提供的实时视觉反馈(图像



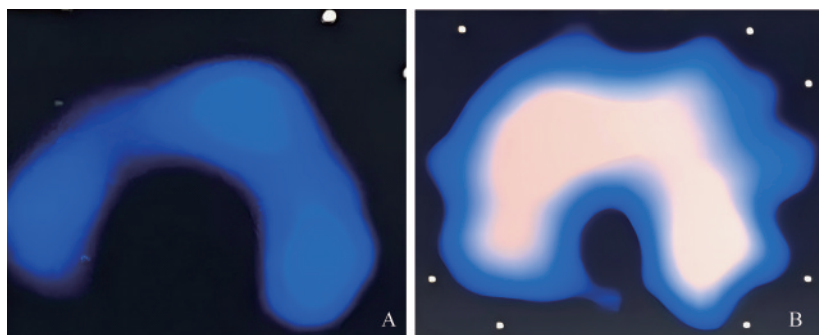
A: The EIT image with the patient lying flat at 30° shows poor ventilation in the right upper lung, with ROI 1 = 17%, ROI 2 = 10%, ROI 3 = 31%, and ROI 4 = 37%. B: After changing the patient's position, the EIT image showed no significant change. Following endotracheal suctioning, the ventilation signal in ROI 2 increased, with ROI 1 = 17%, ROI 2 = 16%, ROI 3 = 26%, and ROI 4 = 37%.

图2 有创机械通气患者气道廓清前后EIT图像

Fig 2 EIT images of mechanically ventilated patients before and after airway clearance

色彩梯度、ROI数值变化、阻抗波形),指导患者调整吸气深度/力度(目标为深吸气时浅蓝色区域扩大且趋向四区均衡)及呼气速度/力度(目标为呼气末阻抗波形回归基线),以增大训练潮气量并提高配合度(图3)。训练频次由每日1次、每次5 min逐渐增至每日2次、每次10 min。②主动关节活动:在被动活动基础上,增加主动四肢关节屈曲、外展、旋转运动,训练频次由每日1次、每次10 min逐渐增至每日2次、每次15 min。(3)清醒,肢体肌力 ≥ 4 级。

①有效咳嗽训练:协助患者取90°端坐位,操作者一手置于剑突下(咳嗽时向内向上加压),一手固定背部。通过观察吸气时ROI百分比较低区域数值是否增加,评估咳嗽前吸气量是否充足以支持有效咳嗽。训练频次由每日1次、每次10 min逐渐增至每日2次、每次15 min。②抗阻训练:在主动关节活动基础上,增加床上脚踏车、弹力带拉伸、哑铃等抗阻训练,主动训练时间由每日1次、每次15 min延长至每日2次、每次20 min。



A: EIT image during the patient's quiet inspiration. B: EIT image during the patient's deep inspiration, showing an expansion of the light blue area with a trend toward more balanced distribution.

图3 有创机械通气患者呼吸控制训练前后EIT图像

Fig 3 EIT images of mechanically ventilated patients during respiratory control training

结局指标

主要结局指标 机械通气时间:患者机械通气开始至结束的时间。

次要结局指标 (1)氧合参数:采用PaO₂和氧合指数评定;(2)肺部感染情况:采用临床肺部感染评分(clinical pulmonary infection score, CPIS)^[13]评定,CPIS包括体温、白细胞计数、气道分泌物、气体交换指数、胸部X线片浸润影及痰培养6项,每项0~2分,总分0~12分,得分越高表示患者肺

部感染越严重;(3)肌力:采用Lovett肌力分级法^[12]评定,分为0~5级。0级,无肌肉收缩;1级,轻微肌肉收缩,无关节活动;2级,可活动关节,但仅能在减重状态下进行;3级,能抗重力活动关节,但不能抗阻力;4级,能抗部分阻力活动关节;5级,正常肌力,能完全抗阻力。等级越高表示肢体肌力越强;(4)ICU住院时间:患者进入ICU至转出ICU的时间;(5)总住院时间:患者从住院至出院的时间。

安全监测与不良事件处理

安全监测参数 在每次康复训练前、中、后,由责任护士持续监测患者的心率、血压、呼吸频率、血氧饱和度及EIT通气图像。任何新发或恶化的心律失常、血流动力学不稳定(平均动脉压 <65 mmHg或 >110 mmHg,或需要血管活性药物剂量显著增加)、氧合恶化(指脉氧饱和度下降 $>5\%$ 或持续低于 90%)或患者出现明显烦躁、疼痛(RASS评分 >1 分)等情况均被定义为安全事件并予以记录。

不良事件与恶化判定 康复过程中出现的任何临床状况恶化均被记录为不良事件。由未参与干预的医师独立评估其与EIT指导康复的相关性。判定标准如下:若事件(如血流动力学波动)直接发生在某项康复操作(如体位改变、呼吸肌训练)过程中或结束后30 min内,且无法用患者原发病情进展或其他医疗操作(如调整镇静药物)解释,则被视为可能相关。所有不良事件,无论是否判定与干预相关,其发生率、类型、处理与转归均被系统记录并在结果中报告。

干预暂停与调整指征 当监测到上述任一安全参数超出预设阈值或出现临床显著恶化时,立即暂停康复训练,并恢复基础生命支持。待患者状况稳定后,由多学科团队重新评估,决定是否调整后继续康复方案(如降低训练强度、推迟训练)或永久终止。

数据收集、随访与分析方法

基线数据 在患者满足康复启动条件后、首次实施康复干预前即刻,由2名未参与分组与干预的研究者收集所有入组患者的基线资料,包括人口学特征(如年龄、性别、BMI)、疾病特征(如疾病诊断、急性生理与慢性健康评分)、生命体征(体温、心率、呼吸频率、血氧饱和度、平均动脉压)、实验室指标(酸碱度、血乳酸)、呼吸参数(FiO_2 、PEEP)等。

结局指标 机械通气时间、ICU住院时间、总住院时间为客观记录指标,在患者出院后由研究人员从病历系统中统一提取。氧合参数、CPIS评分、肌力在康复干预前(基线)及干预周期结束时进行评估。

干预周期与终止条件 本研究设定统一的干预周期为14天。干预自启动之日开始,直至发生以下任一情况即终止:(1)完成14天干预;(2)成功转出ICU;(3)死亡;(4)符合剔除标准(如血流动力学

不稳定或法定代理人要求退出)。在此期间,干预周期结束点定义:对于情况(1)和(2),以患者最后一次在ICU内接受康复干预的日期作为其个人干预终点及评估点。

失访与数据分析集定义 在干预期间,对照组有10例患者脱落(4例因病情加重退出,6例因其他原因退出),试验组有7例患者脱落(5例因病情加重退出,2例因其他原因退出)。经独立评估,所有病情加重均被判定为与患者基础疾病进展相关,而与EIT指导下的康复干预无直接因果关系。本研究的有效性比较(包括所有主要及次要结局指标)均基于“符合方案集”,即仅对完成了上述既定干预周期并抵达个人干预终点进行评估的127例患者(试验组65例,对照组62例)的数据进行分析。脱落患者的全部数据均未纳入最终的组间比较。

统计学分析 采用SPSS 24.0统计学软件进行数据分析。使用Skewness/Kurtosis检验所有连续变量是否符合正态分布。正态分布资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用Student t 检验;非正态分布资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,采用Mann-Whitney U 非参数检验。分类变量以频数、率、构成比表示,组间比较采用 χ^2 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一般资料比较 试验组65例、对照组62例患者完成全部研究观察指标测评(图4)。两组患者的基线资料均无统计学差异,具有可比性(表1)。

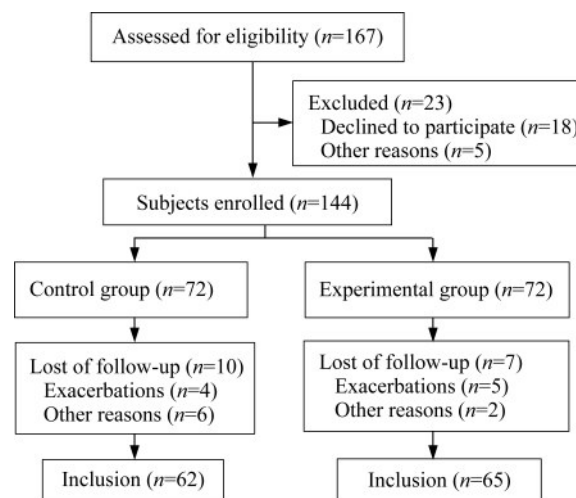


图4 研究设计流程

Fig 4 Flow diagram of the study design

表1 两组患者一般情况比较

Tab 1 Comparison of baseline characteristics of patients between the two groups [$\bar{x} \pm s$, M(P ₂₅ , P ₇₅) or n(%)]				
Variables	Experimental group (n=65)	Control group (n=62)	t/ χ^2 /Z	P
Age (y)	68 (56.0, 78.0)	69 (55.0, 77.3)	-0.056	0.956
Male	49 (75.4)	51 (82.3)	0.896	0.344
BMI(Kg/m ²)	20.1 (17.9, 25.6)	21.3 (17.9, 24.1)	-0.188	0.851
APACHE-II	17 (16.0, 21.0)	17 (15.0, 21.0)	-0.422	0.673
Temperature (°C)	37.1±0.5	36.9±0.4	1.953	0.053
Heart rate(beats/min)	85 (72.5, 92.0)	84 (74.8, 95.3)	-0.760	0.447
Respiratory rate (breath/min)	17.6±1.3	17.8±1.6	-0.681	0.497
SpO ₂ (%)	98.3±1.3	98.1±1.4	0.625	0.533
Mean arterial pressure (mmHg)	78 (75.5, 87.0)	78 (75.8, 87.3)	-0.358	0.720
pH	7.3 (7.2, 7.3)	7.3 (7.2, 7.3)	-0.058	0.954
PaCO ₂ (mmHg)	45.3 (41.5, 52.1)	45.8 (43.8, 51.2)	-0.391	0.696
Lactic acid (mmol/L)	1.8 (1.3, 3.2)	1.8 (1.3, 3.4)	-0.142	0.887
FiO ₂ (%)	53.2±5.0	54.2±4.2	-1.284	0.202
PEEP (cmH ₂ O)	6.0±0.8	5.8±0.7	1.158	0.249
Pre-intervention MV duration (h)	38.0 (29.0, 47.0)	36.0 (28.0, 43.3)	-0.923	0.356
Actual ICU rehabilitation days received (within 14 days)	11.0 (9.0, 14.0)	12.0 (10.0, 14.0)	-1.856	0.063
Primary cause of admission				
Pneumonia	18 (27.7)	19 (30.7)		
Acute respiratory distress syndrome (ARDS)	10 (15.4)	7 (11.3)		
Obstructive lung diseases (COPD)	9 (13.9)	10 (16.1)		
Pulmonary tuberculosis	9 (13.9)	8 (12.9)	2.036	0.958
Septic shock	7 (10.8)	6 (9.7)		
Surgery	6 (9.2)	6 (9.7)		
Asthma	4 (6.2)	2 (3.1)		
Others	2 (2.9)	4 (6.5)		

主要结局指标比较 试验组患者的机械通气时长为223.0 (157.0, 285.5) h,短于对照组的261.0 (168.8, 361.8)h,差异有统计学意义($Z=-2.552$, $P=0.011$)。

次要结局指标比较 干预前两组患者在PaO₂、氧合指数、CPIS评分及肌力分级方面的差异均无统计学意义。干预后,试验组的PaO₂、氧合指数和肌

力分级均高于对照组,而CPIS评分低于对照组,差异均有统计学意义($P<0.05$,表2、表3)。此外,试验组患者的ICU住院时间为13.0 (10.5, 16.2)天,短于对照组的14.8 (11.7, 19.1)天,差异有统计学意义($Z=-2.820$, $P=0.005$)。然而,在总住院时间方面,试验组为19.0 (17.0, 23.0)天,对照组为20.8 (17.4, 25.5)天,差异无统计学意义($Z=-1.888$, $P=0.059$)。

表2 两组氧合参数比较

Tab 2 Comparison of oxygenation parameters between the two groups [M(P ₂₅ , P ₇₅)]				
Group	PaO ₂ (mmHg)		Oxygenation index (mmHg)	
	Before intervention	After intervention	Before intervention	After intervention
Experimental group (n=65)	103.68 (93.59, 114.36)	121.95 (106.75, 138.80) ⁽¹⁾	194.00 (181.00, 202.50)	329.00 (294.00, 353.00) ⁽¹⁾
Control group (n=62)	103.53 (94.81, 114.31)	113.95 (99.65, 125.59) ⁽¹⁾	193.00 (179.00, 198.25)	301.00 (281.50, 323.00) ⁽¹⁾
Z	-0.178	-2.501	-0.601	-2.709
P	0.858	0.012	0.548	0.007

⁽¹⁾vs. Before intervention in this group, $P<0.05$.

表3 两组肺部感染评分和肌力分级比较

Tab 3 Comparison of CPIS and muscle strength between the two groups

[M(P₂₅, P₇₅)]

Group	CPIS (score)		Muscle strength (grade)	
	Before intervention	After intervention	Before intervention	After intervention
Experimental group (n=65)	7.0 (5.0, 9.0)	1.0 (1.0, 2.0) ⁽¹⁾	1.0 (0.0, 2.0)	3.0 (2.0, 3.0) ⁽¹⁾
Control group (n=62)	7.0 (5.0, 8.0)	2.0 (1.0, 4.0) ⁽¹⁾	1.0 (1.0, 2.0)	2.0 (2.0, 3.0) ⁽¹⁾
Z	-1.170	-2.115	-0.059	-2.340
P	0.242	0.034	0.953	0.019

⁽¹⁾vs. Before intervention in this group, $P < 0.05$.

讨 论

本研究结果表明,将EIT作为评估与指导手段,应用于重症有创机械通气患者的集束化呼吸康复中,可通过实时、动态的图像视觉反馈,有效改善患者氧合水平,降低肺部感染评分,并增强肢体肌力,从而显著缩短机械通气时间与ICU住院时长,但对患者总住院时间未见明显影响。

王亚萍等^[6]与王玉光等^[8,14]的研究同样显示,EIT指导下的呼吸康复及体位干预可显著缩短机械通气与ICU住院时间,并改善氧合状态;李伊等^[13]进一步发现,EIT用于指导医院获得性肺炎患者的胸部物理治疗,不仅可改善临床肺部感染评分,还有助于减少住院时间。分析其原因,主要可归纳为以下3方面:(1)实现动态通气评估与闭环管理。与传统评估方式相比,EIT通过ROI阻抗变化实时、动态量化肺各区域通气功能及其均一性,有助于及时识别重力依赖区的低通气状态^[7],从而指导医护人员可视化评估体位改变效果,通过比对动态图像及实时数据,快速判断下一步干预措施,形成“评估-干预-再评估”的闭环管理机制,精准实施以“改善区域通气”为目标的呼吸管理策略。Longhini等^[9]指出,EIT指导高频振动排痰对气道高分泌的有创机械通气患者效果显著,可在不影响气体交换的前提下,有效改善重力依赖区肺通气。但也强调排痰后若体位摆放不当仍会影响痰液引流。另有研究表明^[15],通过EIT监测患者吸气相阻抗变化,可确保其在有效咳嗽前达到充分吸气容积,从而在快速呼气阶段产生足以廓清分泌物的气流速率,实现高效气道廓清,避免分泌物潴留,进而预防或减轻肺部感染。(2)提供实时视觉反馈,增强呼吸肌训练效果。在吸气肌训练中,EIT提供的实时阻抗反馈不仅能确保患者达到有效训练所需的吸气容积,其可

视化的阻抗图像和ROI数值也有助于患者理解康复活动的生理效应,从而提高训练配合程度和主动参与度,达到增强潮气量与呼吸肌耐力,改善呼吸肌功能。此外,EIT可量化不同活动强度下肺区氧合与呼吸功耗的变化,帮助临床团队制定安全、渐进的运动方案,提升患者配合度。研究^[5]报道,在患者由仰卧位转为高坐位时,EIT可实时监测肺通气改善情况,预警肺泡塌陷或过度膨胀风险,从而及时调整活动强度与持续时间,保障康复过程安全。(3)支持肺复张与脱机潜力的客观评估。EIT潮气通气差值图中显示的橙色区域(反映压力升高导致的通气减少)有助于评估肺过度膨胀程度,指导临床个体化调节潮气量、PEEP等参数,避免呼吸机相关肺损伤。此外,EIT能量化SBT期间的区域通气分布,为评估拔管指征提供客观依据,提升脱机决策的可靠性^[16]。研究^[5]报道,EIT可用于精准指导颈4完全性脊髓损伤患者进行吸气肌训练,并成功实现撤机与拔除气管切开套管。张嵘等^[17]研究发现,进阶式肺康复护理可缩短机械通气时长、ICU住院时间及总住院时间,与本研究在总住院时间方面的结果不一致。推测其原因:首先,本研究设计的主动康复干预集中于ICU阶段,且周期上限为14天,实际干预时长常因患者提前转出ICU而更短;一旦转出ICU,康复干预即告终止,多数患者未能延续同等强度与频次的呼吸康复支持。而总住院时间很大程度上取决于转出ICU后的恢复进程,而这一阶段缺乏结构化的康复延续,可能削弱了早期ICU内康复对总住院时间的累积效应。其次,本研究纳入符合方案集分析的患者均完成了ICU内的既定康复周期,其病情相对稳定,后续出院决策往往更多受基础疾病恢复情况、并发症控制及家庭支持等非康复因素影响。因此,局限于ICU内、周期相对短暂且未能延续的康复干预,其对总住院时间的整体影响可能尚未充分显现。

本研究有一定的局限性。(1)疗效分析基于符合方案集,而两组均存在一定脱落(对照组 13.9%,试验组 9.7%),导致因病情加重等原因提前退出、且预后通常较差的患者数据未被纳入,可能高估干预措施的疗效,影响结论向全体重症机械通气患者的外推。(2)试验组 EIT 指导的集束化干预措施描述详尽,虽确保了干预的规范性与可重复性,但也反映出该方案对人力、设备及人员培训的要求较高,在资源有限的环境中推广时其效果可能存在差异。(3)单中心、小样本及前后对照设计可能引入时间偏倚等混杂因素。在近两年的研究期间,医疗实践的变化与患者基线的波动均可能对结果产生影响,一定程度上高估了 EIT 的独立效应。(4)干预周期较短且缺乏长期随访,限制了对远期效益(如生活质量、再入院率等)的评估。

本研究表明,EIT 指导的集束化呼吸康复能有效改善重症有创机械通气患者的机械通气时间、氧合状态和肌力分级,并缩短 ICU 住院时间,但对总住院时间无明显影响。未来需开展大样本、多中心的前瞻性研究,或采用随机对照设计及精细匹配的前瞻性队列,以更好地控制偏倚;同时,应考虑采用意向性治疗分析,提供更保守且普适的证据,从而进一步验证 EIT 在重症呼吸患者管理中的治疗效益与成本效益。

作者贡献声明 吴元浩 试验设计,论文撰写。董宁 研究指导,数据分析,论文修订。魏潇雯,余逸飞,沈克兰 研究实施。杨依静,杨洁 文献查阅,数据收集。张林 研究指导。

利益冲突声明 所有作者均声明不存在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] 杨霞,于红静,潘泽林,等.ICU 获得性肌无力风险预测模型的构建及应用[J].护理研究,2023,37(15):2673-2683.
- [2] 胡燕,李冬英,胡晓莹,等.早期活动对机械通气病人 ICU 获得性肌无力影响的累计 Meta 分析及试验序贯分析[J].护理研究,2020,34(18):3190-3196.
- [3] 张鹏,江海娇,吴良风,等.重症机械通气患者呼吸治疗康复一体化方案的构建与实践[J].中国护理管理,2022,22(5):772-777.
- [4] 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.
- [5] 王浩,姜宏英,李伊,等.电阻抗断层成像技术在呼吸康复中的应用[J].中华结核和呼吸杂志,2023,46(7):714-719.
- [6] 王亚萍,庞璐,吴霞云.电阻抗断层成像技术指导下康复护理对 ICU 呼吸衰竭患者机械通气时间和并发症的影响[J].中国实用护理杂志,2024,40(27):2111-2117.
- [7] 周润爽,隆云,李尊柱,等.EIT 监测 ARDS 脱机困难患者早期活动过程中肺部通气变化[J].中华重症医学电子杂志,2021,7(4):319-325.
- [8] 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.
- [9] 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):479-488.
- [10] 王家良.临床流行病学:临床科研设计、测量与评价[M].5版.上海:上海科学技术出版社,2021:118.
- [11] 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.
- [12] Li Z, Wang M, Zhang L, et al. Neuronavigation-guided corticospinal tract mapping in brainstem tumor surgery: better preservation of motor function [J]. *World Neurosurg*, 2018, 116:e291-e297.
- [13] 李伊,李勃,牛光宇,等.电阻抗成像技术在医院获得性肺炎患者呼吸康复中的应用研究[J].中国呼吸与危重监护杂志,2023,22(2):83-88.
- [14] 王玉光,王宏伟,王双双,等.通过电阻抗断层成像技术观察体位对机械通气 ARDS 患者肺通气的影响[J].首都医科大学学报,2017,38(6):919-924.
- [15] Üzmezoglu B, Altıay G, Özdemir L, et al. The efficacy of Flutter® and active cycle of breathing techniques in patients with bronchiectasis: a prospective, randomized, comparative study [J]. *Türk Thorac J*, 2018, 19(3):103-109.
- [16] Bickenbach J, Czaplík M, Polier M, et al. Electrical impedance tomography for predicting failure of spontaneous breathing trials in patients with prolonged weaning [J]. *Crit Care*, 2017, 21(1):177-184.
- [17] 张嵘,王艳红,刘晶,等.基于 eCASH 理念的进阶式肺康复护理在重症肺炎机械通气病人中的应用[J].护理研究,2023,37(13):2428-2431.

(收稿日期:2025-07-30;编辑:王蔚)