DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250204

·论　著·

胸电阻抗断层成像衍生参数评价住院患者肺不张的效果

刘　武，孙璐璐，李嘉韵，周　韧，胡贝贝，周加倩，姜　虹*，胡　蓉*
上海交通大学医学院附属第九人民医院麻醉科，上海 200011

［摘要］ **目的**　分析胸电阻抗断层成像（EIT）衍生参数全局不均一性指数（GI）、通气中心（COV）、区域通气延迟指数（RVD）与住院患者肺不张的关联，并探索其用于评价肺不张的效果。**方法**　回顾性分析 2024 年 9 月至 2025 年 1 月接受胸部 EIT 监测的 140 例住院患者的临床资料，根据 EIT 监测时既往短期内胸部 CT 检查是否诊断肺不张将患者分为非肺不张组和肺不张组。使用 MATLAB 开发的算法软件获取 GI 和 COV，通过 Dräger EIT Data Analysis Tool 6.3 软件分析获得 RVD，同时记录患者一般资料。对两组 EIT 衍生参数进行差异性分析，采用多因素 logistic 回归分析探究 GI、COV、RVD 与肺不张之间的关联，并通过 ROC 曲线评估 EIT 衍生参数评价肺不张的效果。**结果**　140 例患者纳入研究，其中 19 例（13.6%）存在肺不张。与非肺不张组相比，肺不张组男性患者比例更高，BMI 更低，既往有心血管疾病、胸部手术史（非肺部）的比例更高，GI、RVD 值增高，COV 值降低（均 P<0.05）。多因素 logistic 回归分析显示，在调整年龄、性别、BMI、胸腔积液、肺气肿后，GI、COV、RVD 与肺不张独立关联（OR=1.39，95%CI 1.20～1.67；OR=0.85，95%CI 0.75～0.96；OR=1.22，95%CI 1.09～1.39；均 P<0.05）。GI、COV、RVD 评价住院患者存在肺不张的 AUC 值分别为 0.82、0.80、0.82（RVD 的 AUC 值虽较高，但其应用受呼吸模式影响）。**结论**　住院患者胸部 EIT 衍生参数 GI、COV 与肺不张相关，可作为评价肺不张的重要指标。

［关键词］ 肺不张；胸电阻抗断层成像；危险因素；差异性分析

［引用本文］ 刘武，孙璐璐，李嘉韵，等. 胸电阻抗断层成像衍生参数评价住院患者肺不张的效果[J]. 海军军医大学学报，2025，46(11)：1439-1446. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250204.

Efficacy of thoracic electrical impedance tomography-derived parameters for evaluating atelectasis in hospitalized patients

LIU Wu, SUN Lulu, LI Jiayun, ZHOU Ren, HU Beibei, ZHOU Jiaqian, JIANG Hong*, HU Rong*
Department of Anesthesiology, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China

［Abstract］ **Objective**　To analyze the correlations between the thoracic electrical impedance tomography (EIT)-derived parameters global inhomogeneity (GI), center of ventilation (COV), regional ventilation delay (RVD), and atelectasis in hospitalized patients, and to explore their effectiveness in evaluating atelectasis. **Methods**　The clinical data of 140 hospitalized patients monitored by thoracic EIT between Sep. 2024 and Jan. 2025 were retrospectively analyzed. Patients were assigned to 2 groups based on chest computed tomography confirmation of atelectasis within the preceding short-term period during EIT monitoring: non-atelectasis group or atelectasis group. The algorithm software designed with MATLAB was used to acquire GI and COV. RVD was obtained through analysis with the Dräger EIT Data Analysis Tool 6.3 software, and patients' general data were concurrently documented. Comparative analysis of EIT-derived parameters between groups was conducted. Multivariate logistic regression analysis was employed to investigate the correlations of GI, COV, and RVD with atelectasis, while receiver operating characteristic curve analysis was performed to assess the efficacy of EIT-derived parameters in evaluating atelectasis. **Results**　A total of 140 patients were enrolled, with 19 (13.6%) cases presenting atelectasis. Compared to the non-atelectasis group, the atelectasis group demonstrated significantly higher proportions of male patients and cardiovascular disease and thoracic surgery (non-pulmonary) histories, lower body mass index (BMI), and alongside elevated GI and RVD values with reduced COV (all P<0.05). Multivariate logistic regression analysis revealed that GI, COV, and RVD maintained independent associations with atelectasis after adjusting for age, gender, BMI, pleural effusion, and emphysema (odds ratio［OR］=

［收稿日期］ 2025-03-31　　［接受日期］ 2025-06-05
［作者简介］ 刘　武，硕士生. E-mail: 125083@sh9hospital.org.cn
*通信作者（Corresponding authors）. E-mail: dr_jianghong@163.com, Hur1152@sh9hospital.org.cn

1.39, 95% confidence interval［*CI*］1.20-1.67; *OR*＝0.85, 95%*CI* 0.75-0.96; *OR*＝1.22, 95%*CI* 1.09-1.39; all $P<0.05$). The area under curve (AUC) values of GI, COV, and RVD for evaluating atelectasis in hospitalized patients were 0.82, 0.80, and 0.82, respectively (while RVD demonstrated a higher AUC, its clinical applicability was influenced by respiratory patterns). **Conclusion** Thoracic EIT-derived parameters GI and COV demonstrate significant correlations with atelectasis and may serve as valuable indicators for evaluating atelectasis in hospitalized patients.

［**Key words**］ atelectasis; thoracic electrical impedance tomography; risk factors; difference analysis

［**Citation**］ LIU W, SUN L, LI J, et al. Efficacy of thoracic electrical impedance tomography-derived parameters for evaluating atelectasis in hospitalized patients[J]. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(11): 1439-1446. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250204.

肺不张常见于围手术期，当胸膜正压与表面张力形成的塌陷力超过肺泡内压和肺实质牵张力产生的扩张力时即可发生肺不张。肺不张会降低肺顺应性并损害血液氧合，诱发局部炎症反应、肺泡－毛细血管屏障损伤，从而引发或加重肺损伤[1]。肺不张可导致患者住院时间延长、死亡率上升，并加重社会经济负担。及时识别肺不张并采取有效干预措施，对预防病情恶化、提升治疗效果具有重要的临床意义。目前，肺不张的诊断主要依赖于影像学方法，包括胸部X线片、胸部CT、肺超声、MRI等。其中胸部CT因其广泛适用性、高分辨率而成为肺部成像的首选方法[2]，也是目前临床医务人员所认可的肺不张诊断“金标准”，但其具有辐射性、价格昂贵以及需患者专门到CT室检查等缺点。

电阻抗断层成像（electrical impedance tomography，EIT）技术是一种基于生物组织阻抗进行功能成像的新型无辐射检测技术，具有无创、易操作等优点[3]。在胃排空研究、神经功能监测、乳腺成像及肺功能评价等领域，EIT均已展现出广阔的应用潜力和实用价值。其中，肺功能评价是其目前最主要的应用领域[4]。胸部EIT能够在时间和空间上实现可视化通气，可实时监测肺通气分布均一性，定量评估肺泡过度膨胀/塌陷程度，精确测定肺顺应性参数，并为呼气末正压测定及肺可复张性评估提供可视化依据[3,5]。在通气功能障碍性疾病的诊疗方面，EIT可监测慢性阻塞性肺疾病（chronic obstructive pulmonary disease，COPD）患者的区域性通气异质性，及时识别气胸、肺栓塞等急性通气异常事件，为临床决策提供客观证据[6-7]。EIT通过动态成像技术能够显示通气区域随呼吸周期的动态变化，其中吸气末图像中的低通气区（显示为黑色区域）可作为肺不张的初步评估依据。但由于该成像方法易受体重、性别等个体因素干扰，且在自主呼吸状态下对成像结果影响较大，因此单纯依赖通气图像判断肺不张并不可靠。相较而言，EIT衍生的定量参数如全局不均一性指数（global inhomogeneity，GI）、通气中心（center of ventilation，COV）测量值在人群中稳定性好，受干扰较小，具有更高的临床适用性[8]。Ukere等[9]和Braun等[10]使用EIT衍生参数对围手术期肺不张进行了研究，认为某些EIT衍生参数可在一定程度上评估肺不张。但上述研究均未将EIT衍生参数与肺不张患者胸部CT检查结果进行对比验证，且未分析这些参数与肺不张比例之间的相关性。本研究拟探讨EIT衍生参数与住院患者发生肺不张的关联，并进一步分析EIT衍生参数对肺不张的评价效果，以期为临床提供一种全新的床旁肺不张评价方法。

1　资料和方法

1.1　*病例资料*　本研究为回顾性队列研究，经上海交通大学医学院附属第九人民医院伦理委员会审核批准（批准号SH9H-2025-T79-1），免除患者知情同意。根据电子病历系统的记录纳入2024年9月至2025年1月接受胸部EIT监测的所有住院患者，不限定性别和年龄。排除标准：（1）胸部EIT监测与胸部CT诊断肺不张的时间间隔大于1周的患者；（2）机械通气患者；（3）有肺部手术史或心脏起搏器植入者；（4）临床资料信息不全者。

1.2　*数据收集*　通过检索电子病历系统，收集距离胸部EIT监测时间最近的临床资料，其中一般资料包括性别、年龄、BMI、吸烟史、既往史（如高血压、糖尿病、哮喘、心血管疾病、COPD、肿瘤、肾脏疾病、心律失常、肝炎等）；实验室检验指

标包括白蛋白、血红蛋白、血肌酐；影像学资料包括是否存在肺气肿、胸腔积液。由 2 名研究人员同时收集患者的临床资料，收集完成后对数据进行校对，由第 3 名研究人员对存在差异的数据重新检索、核对录入。

1.3　胸部 EIT 衍生参数　使用胸 EIT 仪（型号：Pulmo Vista 500，德国 Dräger 公司）进行通气监测，具体操作步骤为：患者处于自主呼吸状态，取标准平卧位，于第 4～5 肋间隙水平环状安置 16 电极缚带，确保扣紧缚带时紧贴患者皮肤。完成 EIT 系统初始化及信号校准后，通过中继电缆建立全环路连接，在预采集阶段执行基线阻抗检测及信号稳定性验证。确认系统自检通过后，移除测试负载并激活患者安全隔离模块。最终设定 20 Hz 动态采样频率，启动连续阻抗数据流采集与存储，全过程严格遵循 EIT 操作共识[11]。数据收集完成后，利用 MATLAB 开发的算法软件[12]先将所收集的 EIT 格式文件转换成包含各个呼吸周期的波形图像，然后挑选至少 5 个连续稳定波形的呼吸周期用以计算 GI、COV，并通过 Dräger EIT Data Analysis Tool 6.3 软件分析获取区域通气延迟指数（region ventilation delay，RVD）。其中 GI 反映肺部通气异质性，理想值为 0，代表肺部通气完全均匀，较高的 GI 可反映通气分布紊乱[13]；COV 反映肺部通气的分布情况，COV 数值越大表示背侧通气分布越多，反之则通气分布越靠近腹侧[14]；RVD 通过量化局部区域的像素通气信号在时间上与全局的不同步程度来反映该区域的通气延迟情况，RVD 数值越大表示该区域的通气相较于整体通气的滞后相移越大[15]。

1.4　肺不张比例分析　使用 Mimics Medical 21.0 软件，利用肺不张患者胸部 CT 图像的 DICOM 文件资料定义适当的阈值范围，重建肺 3D 图像。胸部 CT 图像包括之前无肺不张诊断和存在肺不张的两部分图像，利用该软件获取重建无肺不张肺容积（LV01）和肺不张实际肺容积（LV02-ACT）。鉴于同一患者在不同时间进行胸部 CT 检查时深吸气屏气的状态不同，故依据 2 次胸部 CT 结果（即无肺不张诊断图像和肺不张诊断图像）分别重建正常肺体积进行校正，获得校正之后的肺容积（LV02-COR）。通过公式计算肺不张比例，肺不张比例＝（校正肺容积－肺不张实际肺容积）/ 校正肺容积。

1.5　统计学处理　本研究为回顾性研究，对已采集时间段内符合条件的所有患者进行事后统计效能评价，假设一类错误概率 α＝0.05，19 例阳性样本能够确保当组间差异＞1 个标准差时统计效能＞0.8，满足临床需求。应用 R 4.0.5 软件和 SPSS 25.0 软件分析数据。对计量资料进行 Shapiro-Wilk 检验，若呈正态分布，以 $\bar{x}\pm s$ 表示，组间比较采用独立样本 t 检验；非正态分布则以 M（Q_1，Q_3）表示，组间比较采用 Mann-Whitney U 检验；计数资料以例数和百分数表示，组间比较采用 χ^2 检验。胸部 EIT 衍生参数之间及与肺不张比例、年龄、BMI 等的相关性分析采用 Pearson 相关或 Spearman 秩相关分析。使用多因素 logistic 回归分析对年龄、性别、BMI、胸腔积液、肺气肿等混杂因素进行调整，考虑到样本量限制，首先以 EIT 参数作为因变量、以混杂因素作为自变量 / 协变量获得倾向评分，之后以肺不张作为因变量、以 EIT 参数作为自变量、以倾向评分作为唯一协变量，采用 *OR* 及其 95%*CI* 评价 EIT 相关参数与肺不张的关系。所有自变量（协变量）间共线性关系较弱，方差膨胀因子均小于 10。使用 R 4.0.5 软件的 pROC 包绘制 ROC 曲线，并计算 AUC 及灵敏度、特异度、准确度，通过 Bootstrap 法获得 AUC 的 95%*CI*。检验水准（α）为 0.05。

2　结　果

2.1　一般临床特征　2024 年 9 月至 2025 年 1 月接受胸部 EIT 监测的住院患者共 192 例，因信息不全排除 52 例，最终共 140 例患者纳入数据分析，其中 EIT 监测时已由胸部 CT 诊断为肺不张的患者有 19 例（13.6%）。与非肺不张患者相比，肺不张患者年龄相对较小，男性患者比例更高，BMI 更低，既往有肺气肿、胸腔积液、吸烟史、心血管疾病、肿瘤病史、肾脏疾病史、心律失常、肝炎、胸部手术史（非肺部）的患者比例均较高，血红蛋白、白蛋白水平均较低（均 P＜0.05）。见表 1。

2.2　两组患者胸部 EIT 衍生参数分析　与非肺不张患者相比，肺不张患者的 GI、RVD 值增高，COV 值降低（均 P＜0.001）。见表 2。

2.3　肺不张发生的多因素 logistic 回归分析　在调整年龄、性别、BMI、肺气肿、胸腔积液后，多因素 logistic 回归分析显示 GI、COV、RVD 与肺不张独立关联，*OR* 分别为 1.39（95%*CI* 1.20～1.67，P＜

0.001）、0.85（95%CI 0.75～0.96，P＝0.011）、1.22（95%CI 1.09～1.39，P＝0.001）。

表 1　两组患者一般资料比较

Tab 1　Comparison of general information between 2 groups

Characteristic	Non-atelectasis N=121	Atelectasis N=19	Statistic	P value
Age/year, M (Q_1, Q_3)	70 (65, 74)	67 (56, 70)	Z=−2.171	0.030
Male, n (%)	52 (43.0)	15 (78.9)	χ^2=8.515	0.004
BMI/(kg•m^{-2}), M (Q_1, Q_3)	23.7 (21.5, 26.2)	21.5 (18.2, 24.1)	Z=−2.452	0.014
History of smoking, n (%)	0	4 (21.1)	χ^2=26.223	<0.001
Hypertension, n (%)	52 (43.0)	8 (42.1)	χ^2=0.168	0.919
Diabetes mellitus, n (%)	19 (15.7)	4 (21.1)	χ^2=0.342	0.558
Asthma, n (%)	0	0		
Cardiovascular disease, n (%)	6 (5.0)	7 (36.8)	χ^2=19.818	<0.001
COPD, n (%)	0	0		
Tumor, n (%)	8 (6.6)	10 (52.6)	χ^2=31.040	<0.001
Kidney disease, n (%)	3 (2.5)	5 (26.3)	χ^2=17.318	<0.001
Arrhythmia, n (%)	32 (26.4)	10 (52.6)	χ^2=5.362	0.021
Hepatitis, n (%)	5 (4.1)	3 (15.8)	χ^2=4.142	0.042
Thoracic surgery (non-pulmonary), n (%)	0	7 (36.8)	χ^2=46.925	<0.001
Emphysema, n (%)	14 (11.6)	8 (42.1)	χ^2=11.560	0.001
Pleural effusion, n (%)	7 (5.8)	7 (36.8)	χ^2=17.599	<0.001
Albumin/(g•L^{-1}), M (Q_1, Q_3)	42.0 (38.0, 45.0)	30.0 (27.5, 38.0)	Z=−4.496	<0.001
Hemoglobin/(g•L^{-1}), M (Q_1, Q_3)	134.0 (123.0, 141.0)	94.0 (83.0, 122.5)	Z=−4.662	<0.001
Creatinine/(μmol•L^{-1}), M (Q_1, Q_3)	60.0 (51.0, 74.0)	80.0 (47.0, 229.5)	Z=−1.503	0.133

BMI: Body mass index; COPD: Chronic obstructive pulmonary disease.

表 2　两组患者胸部 EIT 衍生参数 GI、COV、RVD 比较

Tab 2　Comparison of thoracic EIT-derived parameters GI, COV, and RVD between 2 groups

M (Q_1, Q_3)

Parameter	Non-atelectasis n=121	Atelectasis n=19	Z value	P value
GI	0.37 (0.35, 0.38)	0.44 (0.40, 0.49)	−4.493	<0.001
COV/%	53.05 (50.73, 56.38)	45.95 (44.10, 51.00)	−4.223	<0.001
RVD	5.00 (3.00, 8.00)	14.00 (8.00, 17.00)	−4.477	<0.001

EIT: Electrical impedance tomography; GI: Global inhomogeneity; COV: Center of ventilation; RVD: Region ventilation delay.

2.4　胸部 EIT 衍生参数评价肺不张的 ROC 曲线分析　GI、COV、RVD 评价住院患者存在肺不张的 AUC 值分别为 0.82、0.80、0.82，最佳临界值分别为 0.4、48.38%、10.5。见表 3。

表 3　不同胸部 EIT 衍生参数评价住院患者肺不张的 ROC 曲线分析结果

Tab 3　ROC curve analysis of different thoracic EIT-derived parameters for evaluating atelectasis in hospitalized patients

Parameter	AUC (95%CI)	Cut-off value	Specificity (95%CI)	Sensitivity (95%CI)	Accuracy (95%CI)
GI	0.82 (0.68, 0.96)	0.4	0.92 (0.83, 0.98)	0.79 (0.58, 0.95)	0.89 (0.83, 0.95)
COV	0.80 (0.67, 0.94)	48.38%	0.87 (0.65, 0.95)	0.74 (0.53, 0.95)	0.85 (0.69, 0.92)
RVD	0.82 (0.68, 0.95)	10.5	0.92 (0.74, 0.98)	0.74 (0.53, 0.95)	0.89 (0.76, 0.94)

EIT: Electrical impedance tomography; ROC: Receiver operating characteristic; GI: Global inhomogeneity; COV: Center of ventilation; RVD: Region ventilation delay; AUC: Area under curve; 95%CI: 95% confidence interval.

2.5　肺不张患者胸部 EIT 衍生参数与肺不张比例的相关性分析　在肺不张患者中，肺不张比例为 0.20±0.03，相关性分析结果显示肺不张比例与 GI、COV、RVD 无相关性（均 P>0.05）。见图 1。

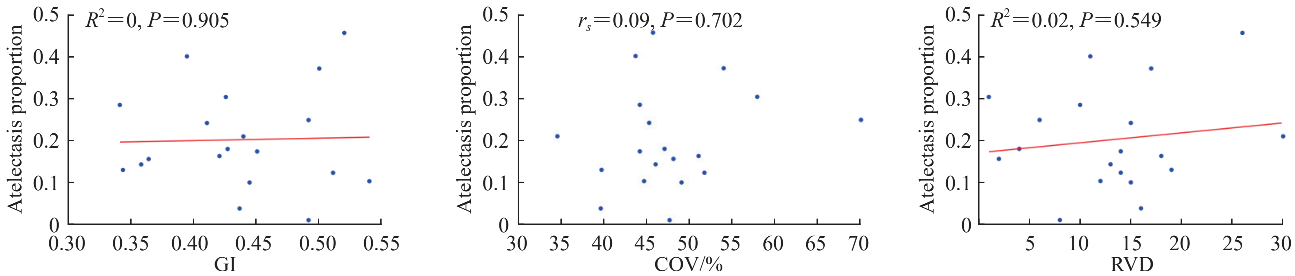

图 1　肺不张患者胸部 EIT 衍生参数与肺不张比例的相关性分析

Fig 1　Correlation analysis of thoracic EIT-derived parameters with atelectasis proportion in atelectasis patients

EIT: Electrical impedance tomography; GI: Global inhomogeneity; COV: Center of ventilation; RVD: Region ventilation delay.

2.6　胸部 EIT 衍生参数与既往病史的关联　GI 与心血管疾病史、肺气肿、胸腔积液相关联（均 P<0.05），COV 与肺气肿、胸部手术史（非肺部）相关联（均 P<0.05），RVD 与胸部手术史（非肺部）相关联（P<0.05）。见表 4。

表 4　住院患者胸部 EIT 衍生参数与既往病史的关联分析

Tab 4　Relationship of thoracic EIT-derived parameters with disease history in hospitalized patients

Disease history	n	GI, M (Q_1, Q_3)	COV/%[a]	RVD, M (Q_1, Q_3)
Cardiovascular disease				
Yes	13	0.42 (0.38, 0.43)	50.31±3.66	9.00 (3.00, 14.00)
No	127	0.37 (0.35, 0.39)	52.61±5.40	6.00 (3.00, 8.50)
Statistic		Z=−2.829	t=1.499	Z=−0.907
P value		0.005	0.136	0.364
Emphysema				
Yes	22	0.39 (0.36, 0.43)	50.15±5.60	5.00 (3.25, 14.00)
No	118	0.37 (0.35, 0.39)	52.82±5.16	6.00 (3.00, 9.00)
Statistic		Z=−2.511	t=2.195	Z=−0.571
P value		0.012	0.030	0.568
Pleural effusion				
Yes	14	0.42 (0.38, 0.45)	50.02 (47.41, 53.62)	8.50 (3.25, 14.75)
No	126	0.37 (0.35, 0.39)	52.60 (49.49, 56.15)	5.50 (3.00, 8.75)
Statistic		Z=−3.327	Z=−1.320	Z=−1.362
P value		0.001	0.187	0.173
Thoracic surgery (non-pulmonary)				
Yes	7	0.41 (0.35, 0.47)	44.83±4.37	15.00 (12.00, 17.50)
No	133	0.37 (0.35, 0.39)	52.80±5.05	5.00 (3.00, 8.00)
Statistic		Z=−1.171	t=4.094	Z=−2.983
P value		0.241	<0.001	0.003

[a]: Data are presented as $\bar{x}\pm s$ or M (Q_1, Q_3). EIT: Electrical impedance tomography; GI: Global inhomogeneity; COV: Center of ventilation; RVD: Region ventilation delay.

2.7　胸部 EIT 衍生参数之间及与年龄、BMI 的相关性分析　GI 与 RVD 呈正相关关系，与 BMI 呈负相关关系（均 P<0.05）；COV 与 RVD 呈负相关关系，与年龄呈正相关关系（均 P<0.05）；RVD 与年龄呈负相关关系（P<0.05）。见图 2。

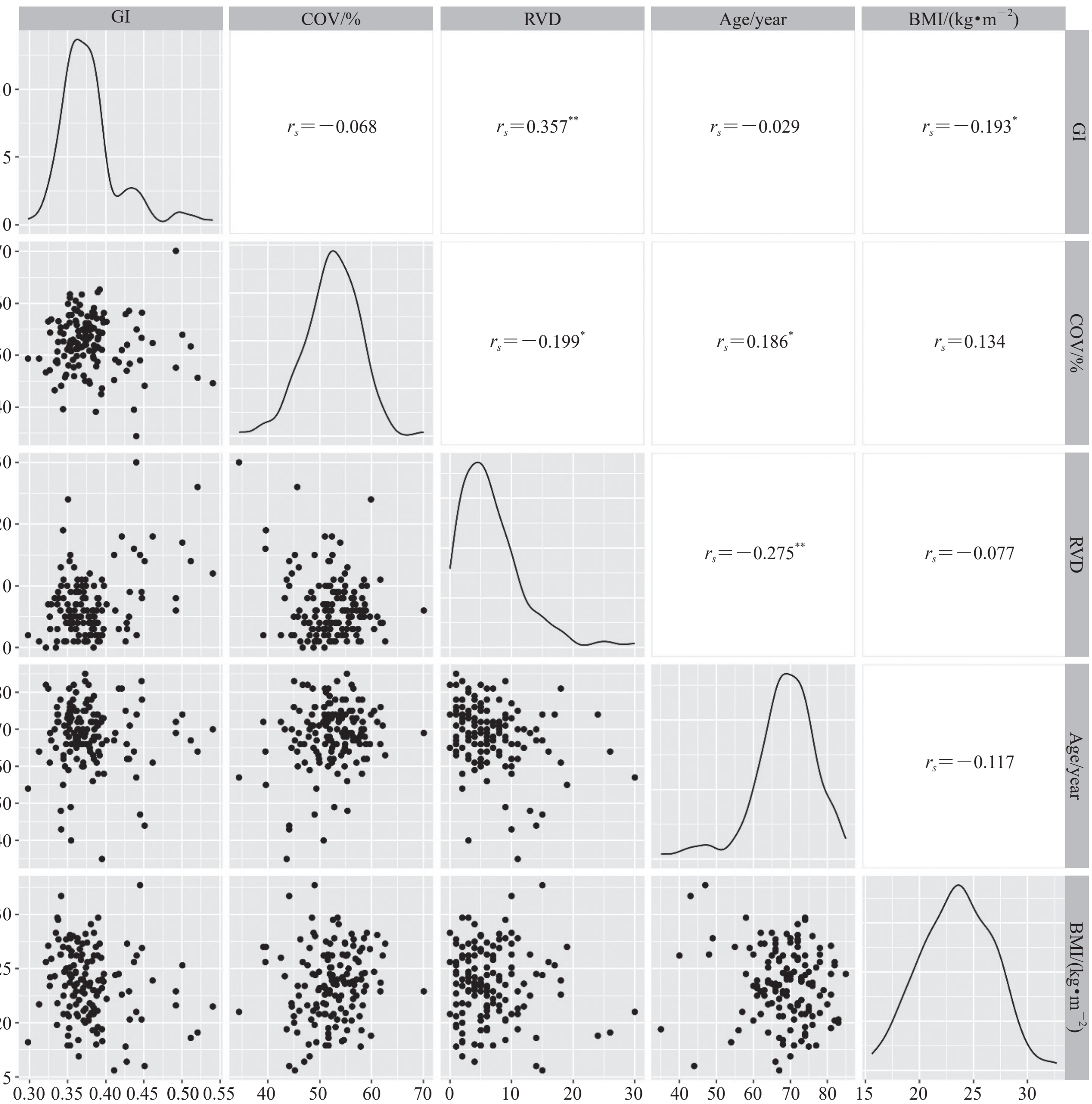

图 2　住院患者胸部 EIT 衍生参数之间及与年龄、BMI 之间的相关性

Fig 2　Correlations among thoracic EIT-derived parameters and their relationships with age and BMI in hospitalized patients

*P<0.05, **P<0.01. EIT: Electrical impedance tomography; GI: Global inhomogeneity; COV: Center of ventilation; RVD: Region ventilation delay; BMI: Body mass index.

3 讨　论

肺不张作为肺泡通气功能障碍性疾病，常引发呼吸困难、低氧血症等严重并发症，同时可能继发肺部感染，导致患者住院周期延长及医疗费用增加。因此，建立操作简便的非侵入性评价体系对于临床早期识别高危人群和制定针对性干预策略具有重要价值。目前，胸部 CT 是诊断肺不张的“金标准”，但其存在辐射性、操作不便等缺点。鉴于当前无创通气监测技术——EIT 在非机械通气肺不张患者中的研究较为匮乏，本研究回顾性探索了 EIT 衍生参数评价肺不张的价值，旨在为肺不张提供一种床旁无创评价方法，以指导临床医生及时做出合理的治疗决策。

本研究结果显示肺不张患者的胸部 EIT 衍生参数 GI 高于非肺不张患者，多因素 logistic 回归分析结果提示 GI 升高是肺不张的独立危险因素。GI 作为评价肺通气分布异质性的空间分布参数，其数值升高提示区域性通气失衡。发生肺不张时受累区域肺泡萎陷、通气功能丧失，邻近正常肺组织因代

偿性通气重分布导致区域通气梯度增加。此外，塌陷肺组织引发的炎性渗出及黏液栓形成会进一步增加小气道阻力并引起通气 / 血流比例失调，导致GI 升高。Nothofer 等[16]也发现肺不张患者的 GI 较大。本研究结果还表明 GI 与肺气肿、胸腔积液具有相关性。肺气肿患者肺泡结构破坏，弹性回缩力下降，易在呼吸动力减弱时发生区域性通气关闭，导致肺不张发生；而胸腔积液会通过限制肺容积扩张促进肺不张发生。这佐证了 GI 与肺不张的相关性。此外，ROC 曲线分析显示，GI 评价肺不张的AUC 值为 0.82，灵敏度为 0.79，进一步说明 GI 可作为评价肺不张的有效指标。

本研究分析发现肺不张患者的 COV 较低，多因素 logistic 回归分析提示 COV 降低是肺不张的独立危险因素。COV 作为 EIT 空间分布参数，反映肺部通气的分布。COV 值越大表明背侧通气分布越多，反之通气分布越靠近腹侧。根据 West 肺区模型中胸腔压力梯度重分布理论[17]，肺不张患者重力依赖区（背侧）肺泡更容易塌陷，而非重力依赖区（腹侧）通气相应代偿性增强，从而表现为通气分布更靠近腹侧，导致 COV 值更小。目前暂未有针对肺不张患者 COV 参数的研究报道，但有研究表明肺部功能障碍会导致 COV 降低，Inany 等[18]研究发现肺通气氧合障碍儿童的 COV 值更小；Frerichs 等[19]通过新生大鼠急性肺损伤模型，发现急性肺损伤会使通气分布中心从背侧转移到腹侧，导致 COV 值更小；Jiang 等[20]研究发现，肺炎患者接受治疗前 COV 值更小。本研究结果还显示，COV与肺气肿、胸部手术史（非肺部）具有相关性。胸部手术如胸廓成形术可导致胸壁结构改变，限制呼吸肌（如肋间肌、膈肌）运动，同时术后胸膜粘连或疼痛会抑制呼吸，促进肺不张发生。这也佐证了COV 参数与肺不张的相关性。此外，COV 数值评价肺不张的 AUC 值为 0.80，灵敏度为 0.74，进一步说明 COV 值评价肺不张具有可靠性和准确性。

本研究发现肺不张患者 RVD 更高，多因素logistic 回归分析显示 RVD 增高是肺不张的独立危险因素。RVD 作为 EIT 时间分布参数，可反映肺部通气的均一程度。肺不张区域因气道闭合、分泌物潴留或表面活性物质减少导致肺泡萎陷，局部通气阻力增加、顺应性下降，使该区域通气启动滞后于整体肺组织。同时，塌陷区域周围健康肺组织的代偿性通气进一步扩大了局部与全局通气的时间差，使得 RVD 值更大。既往关于 RVD 的研究存在争议，参数解读受呼吸模式影响。在机械通气中，Wrigge 等[21]认为 RVD 只能在潮气量为 12 mL/kg的慢速充气中使用，用以描述机械通气中肺泡的开闭情况；而在自主呼吸时，呼吸节律、肺功能等因素增加了 RVD 参数变异度，不适合将其作为设定治疗目标的 EIT 参数[8]。考虑到 RVD 最初被设计用于机械通气场景，在自主呼吸患者中结合标准化操作应用可能更适宜，故 RVD 能否用于肺不张评价有待进一步研究证实。

本研究中除了探讨 EIT 衍生参数与肺不张的关系，还评价了这些参数是否能够量化肺不张的严重程度。结果表明，EIT 衍生参数的数值与肺不张比例之间无相关性，GI 与 COV 可用于肺不张的定性评价。这可能有以下原因：一是 EIT 通过阻抗变化反映肺通气分布，其衍生参数可能对局部肺组织塌陷具有灵敏性。当肺不张达到临界体积时参数即出现显著改变，但超过临界体积后通过数据分析暂未发现这种改变。二是不同病因导致的肺不张呈现斑片状、楔形或叶性分布，EIT 衍生参数对肺不张三维体积占比的评价易受病灶几何形态干扰，空间分布特征掩盖了其与绝对体积的相关性。

作为一项回顾性研究，本研究存在一定局限性。首先肺不张阳性样本较少，其次数据采集由于依赖医疗记录可能存在信息偏倚。同时本研究未对 EIT 衍生参数在肺不张不同阶段的变化进行动态监测与分析，无法明确这些参数能否及时反映肺不张的进展或好转情况，在一定程度上限制了其在临床治疗过程中的应用指导价值。此外受限于样本量和回顾性研究性质，本研究未对 EIT 衍生参数与肺不张部位或膈肌活动进行相关性分析。同时，EIT 监测适用于术前需评估肺部通气储备或因肺部情况不佳需 EIT 指导治疗的患者，然而是否进行 EIT 监测受医疗工作者主观影响。最后，本研究排除了部分存在急性肺损伤需进行机械通气的危重症患者，导致研究结论在该人群中的适用性有限。未来需开展大样本前瞻性研究，以进一步验证高危人群中 EIT 衍生参数对肺不张的评价效能，并探索其对肺不张治疗的指导作用以及 EIT 衍生参数与肺不张部位、膈肌活动之间的关联。

综上所述，住院患者胸部 EIT 衍生参数 GI、COV 与肺不张相关，可作为评价肺不张的重要指标，为患者围手术期管理及肺部并发症高危人群提供了一种床旁无创肺不张评价方法。

［参 考 文 献］

［1］ ZENG C, LAGIER D, LEE J W, et al. Perioperative pulmonary atelectasis: part Ⅰ. biology and mechanisms［J］. Anesthesiology, 2022, 136(1): 181-205. DOI: 10.1097/ALN.0000000000003943.

［2］ XIE C, SUN K, YOU Y, et al. Feasibility and efficacy of lung ultrasound to investigate pulmonary complications in patients who developed postoperative hypoxaemia－a prospective study［J］. BMC Anesthesiol, 2020, 20(1): 220. DOI: 10.1186/s12871-020-01123-6.

［3］ 李展，招展奇，温若譞，等. 电阻抗断层成像技术在肺通气功能评估中的研究和应用［J］. 解放军医学院学报，2024，45（11）：1191-1196. DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.2024.131.

［4］ BAYFORD R, HALTER R J. Focus on advances in electrical impedance tomography［J］. Physiol Meas, 2018, 39(9): 090301. DOI: 10.1088/1361-6579/aad93e.

［5］ 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［J］. Minerva Anestesiol, 2020, 86(10): 1057-1064. DOI: 10.23736/S0375-9393.20.14130-0.

［6］ MA H, DAI M, WU S, et al. Pulmonary rehabilitation ameliorates regional lung function in chronic obstructive pulmonary disease: a prospective single-arm clinical trial［J］. Ann Transl Med, 2022, 10(16): 891. DOI: 10.21037/atm-22-3597.

［7］ 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. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20211201-02680.

［8］ YANG L, DAI M, CAO X, et al. Regional ventilation distribution in healthy lungs: can reference values be established for electrical impedance tomography parameters?［J］. Ann Transl Med, 2021, 9(9): 789. DOI: 10.21037/atm-20-7442.

［9］ 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［J］. Br J Anaesth, 2016, 117(2): 228-235. DOI: 10.1093/bja/aew188.

［10］ BRAUN M, RUSCHER L, FUCHS A, et al. Atelectasis in obese patients undergoing laparoscopic bariatric surgery are not increased upon discharge from Post Anesthesia Care Unit［J］. Front Med, 2023, 10: 1233609. DOI: 10.3389/fmed.2023.1233609.

［11］ FRERICHS I, AMATO M B P, VAN KAAM A H, et al. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the translational EIT development study group［J］. Thorax, 2017, 72(1): 83-93. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2016-208357.

［12］ ZHAO Z, MÖLLER K, MIILLER-LISSE U, et al. Customized evaluation software for clinical trials: an example on pulmonary function test with electrical impedance tomography［C］//2013 ICME International Conference on Complex Medical Engineering. May 25-28, 2013, Beijing, China. IEEE, 2013: 128-133. DOI: 10.1109/ICCME.2013.6548225.

［13］ ZHAO Z, MÖLLER K, STEINMANN D, et al. Evaluation of an electrical impedance tomography-based global inhomogeneity index for pulmonary ventilation distribution［J］. Intensive Care Med, 2009, 35(11): 1900-1906. DOI: 10.1007/s00134-009-1589-y.

［14］ FRERICHS I, ZHAO Z, BECHER T. Simple electrical impedance tomography measures for the assessment of ventilation distribution［J］. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 201(3): 386-388. DOI: 10.1164/rccm.201908-1502LE.

［15］ NESTLER C, SIMON P, PETROFF D, et al. Individualized positive end-expiratory pressure in obese patients during general anaesthesia: a randomized controlled clinical trial using electrical impedance tomography［J］. Br J Anaesth, 2017, 119(6): 1194-1205. DOI: 10.1093/bja/aex192.

［16］ NOTHOFER S, STECKLER A, LANGE M, et al. Electrical impedance tomography-based evaluation of anesthesia-induced development of atelectasis in obese patients［J］. J Clin Med, 2024, 13(24): 7736. DOI: 10.3390/jcm13247736.

［17］ SURESH K, SHIMODA L A. Lung circulation［J］. Compr Physiol, 2016, 6(2): 897-943. DOI: 10.1002/cphy.c140049.

［18］ INANY H S, RETTIG J S, SMALLWOOD C D, et al. Distribution of ventilation measured by electrical impedance tomography in critically ill children［J］. Respir Care, 2020, 65(5): 590-595. DOI: 10.4187/respcare.07076.

［19］ FRERICHS I, DARGAVILLE P A, VAN GENDERINGEN H, et al. Lung volume recruitment after surfactant administration modifies spatial distribution of ventilation［J］. Am J Respir Crit Care Med, 2006, 174(7): 772-779. DOI: 10.1164/rccm.200512-1942OC.

［20］ JIANG H Y, LI Q, YU X, et al. Ventilation improvement after pneumonia treatment evaluated with electrical impedance tomography: an observational study［J］. Physiol Meas, 2021, 42(10). DOI: 10.1088/1361-6579/abffbf.

［21］ WRIGGE H, ZINSERLING J, MUDERS T, et al. Electrical impedance tomography compared with thoracic computed tomography during a slow inflation maneuver in experimental models of lung injury［J］. Crit Care Med, 2008, 36(3): 903-909. DOI: 10.1097/CCM.0B013E3181652EDD.

［本文编辑］　杨亚红