

## • 综述 •

## 评估呼吸机相关性肺损伤的影像学方法进展

刘又维<sup>1</sup> 初小迪<sup>2</sup> 刘欢<sup>1</sup> 王岩<sup>3</sup> 胡丹<sup>3</sup><sup>1</sup> 山东第二医科大学临床医学院, 山东潍坊 261053; <sup>2</sup> 青岛大学青岛市市立医院, 山东青岛 266071; <sup>3</sup> 康复大学青岛市市立医院, 山东青岛 266071

通信作者: 胡丹, Email: hudanicu@126.com

**【摘要】** 呼吸机相关性肺损伤(VILI)是机械通气治疗过程中因呼吸机参数设置不当或患者肺部原有病变而引发的肺损伤。其发生机制复杂,主要包括气压伤、容积伤、剪切伤及生物伤。为预防 VILI,临床提倡肺保护性通气策略及个性化设置呼气末正压(PEEP)。早期识别与精准评估 VILI 对改善患者预后至关重要。影像学技术的快速发展为 VILI 的动态监测提供了多维视角,现就肺超声(LUS)、计算机断层扫描(CT)、电阻抗断层成像(EIT)、磁共振成像(MRI)多种影像技术的成像原理在 VILI 治疗中的应用价值及局限性进行综述,以全面提供诊断信息,为 VILI 的精准评估与呼吸支持策略优化提供理论依据。

**【关键词】** 呼吸机相关性肺损伤; 肺超声; 计算机断层扫描; 电阻抗断层成像; 磁共振成像

**基金项目:** 山东省医药卫生科技项目(202319010379)

DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2025.03.024

### Imaging modalities for the assessment of ventilator-induced lung injury

Liu Youwei<sup>1</sup>, Chu Xiaodi<sup>2</sup>, Liu Huan<sup>1</sup>, Wang Yan<sup>3</sup>, Hu Dan<sup>3</sup><sup>1</sup>School of Clinical Medicine, Shandong Second Medical University, Weifang 261053, Shandong, China; <sup>2</sup>Qingdao Municipal Hospital, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; <sup>3</sup>Qingdao Municipal Hospital, University of Health and Rehabilitation Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China

Corresponding author: Hu Dan, Email: hudanicu@126.com

**【Abstract】** Ventilator-induced lung injury (VILI) is a form of lung injury caused by inappropriate ventilator parameter settings or pre-existing lung pathologies during mechanical ventilation. The pathogenesis of VILI is complex, primarily involving barotrauma, volutrauma, atelectrauma, and biotrauma. To prevent VILI, clinical practice advocates protective lung ventilation strategies and personalized positive end-expiratory pressure (PEEP) settings. Early identification and precise assessment are critical for improving patient outcomes. The rapid advancement of imaging technologies has provided multidimensional perspectives for dynamic monitoring of VILI. This review summarizes the imaging principles, clinical applications in the context of VILI management, and limitations of various imaging modalities, including lung ultrasound (LUS), computed tomography (CT), electrical impedance tomography (EIT), and magnetic resonance imaging (MRI). By offering comprehensive diagnostic information, this review aims to provide a theoretical foundation for the precise assessment of VILI and the optimization of ventilatory support strategies.

**【Key words】** Ventilator-induced lung injury; Lung ultrasound; Computed tomography; Electrical impedance tomography; Magnetic resonance imaging

**Fund program:** Medical and Health Technology Project of Shandong Province (202319010379)

DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2025.03.024

机械通气是危重症患者呼吸支持的核心技术,通过维持气体交换为原发病的诊治赢得关键时间窗<sup>[1]</sup>。其临床价值在 1952 年哥本哈根脊髓灰质炎疫情中得以验证:应用机械通气后,患者病死率从 87% 降至 40%<sup>[2]</sup>。然而研究显示,部分患者动脉血气恢复正常后仍可能死亡,提示机械通气本身可诱发肺组织结构损伤<sup>[3]</sup>。这种医源性损伤被定义为呼吸机相关性肺损伤(ventilator-induced lung injury, VILI)<sup>[1]</sup>。其发生涉及机械力与生物反应的相互作用,经典机制包括气压伤、容积伤、剪切伤和生物伤<sup>[4]</sup>。最新研究进一步揭示,局部呼吸力学异常(如应力频率失衡)及肺毛细血管机械应力损伤是 VILI 进展的重要驱动因素<sup>[5]</sup>。临床数据显示,VILI 在机械通气患者中的发生率高达 15%~30%,其早期识别对改善预后至关重要<sup>[6]</sup>。

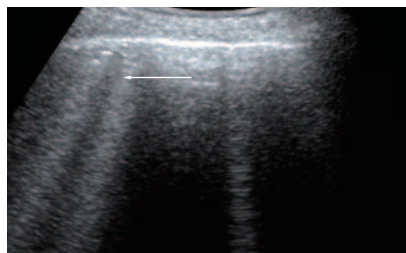
当前 VILI 评估手段已形成多模态技术矩阵,而影像学技术在 VILI 的临床诊疗中占核心地位。现通过系统阐述当前用于 VILI 评估的影像学方法,解析各技术的成像原理与

诊断特性,以期阐明其如何从病灶定位、组织表征和功能评估 3 个维度实现精准可视化评估。多模态影像的联合应用为 VILI 的早期诊断、病情分层及治疗决策提供了科学依据。

### 1 肺超声(lung ultrasound, LUS)

**1.1 成像原理:** LUS 技术是基于组织声阻抗差异,通过高频脉冲发射或接收产生差异的反射信号,经压电晶体换能器转换为电信号,最终重建为实时灰阶图像。高、低回声特征与组织密度梯度直接对应,为病变鉴别提供可视化依据<sup>[7]</sup>。LUS 由血管外肺水定量评估工具演化为多维肺部病变评价体系,其临床应用已突破充血性心力衰竭的诊断<sup>[8-9]</sup>。当前证据表明, LUS 技术可精准解析全谱系肺部疾病病理演变进程,涵盖渗透性异常(心源性肺水肿)、间质病变(肺炎、肺纤维化)、创伤性损伤(肺挫伤、急性肺损伤)等多维度病理生理事件,实现呼吸病理改变的可视化定量分层<sup>[10]</sup>。正常的超声模式由肺 A 线定义,当肺缺氧时, LUS 图像从 A 线变化到 B 线(图 1)。B 线是由毛细血管静水压升高、血管内皮通透性

改变或肺间质纤维化引起的肺小叶间隔增厚所致。B 线的数目及密度与肺通气功能障碍程度存在对应关系,3 条 B 线提示小叶间隔增厚,5 条或更多提示磨玻璃样变,B 线融合提示肺泡腔不完全性充盈伴区域性通气功能丧失。



注:箭头所指为 B 线

图 1 肺缺氧患者 LUS B 线图像

**1.2 技术优势:** LUS 凭借其床旁便捷实施的动态可视化监测优势,现已成为重症监护病房(intensive care unit, ICU)不可或缺的监测工具<sup>[11]</sup>。该技术通过快速、精准识别胸腔积液、肺实变及肺不张等特征性影像学征象,可直接反映肺部病理改变的进程,为临床治疗策略优化和制订患者管理决策提供实时影像学依据<sup>[12-13]</sup>。

**1.3 临床应用:** LUS 在 VILI 的评估中已展现出多维度的临床应用价值。Steinberg 等<sup>[14]</sup>通过构建机械能梯度(J/min: 15 比 30)调控的猪肺损伤模型,建立 48 h 动态 LUS 评估体系,首次揭示了机械能与肺水动态平衡的剂量依赖性呈正相关( $P < 0.001$ ),同时证实呼气末肺容量扩张的保护效应( $P = 0.001$ ),成功搭建起机械通气参数-实时影像学标志-肺损伤进展的三维量化评估框架。这一发现为床旁呼吸力学调控提供了可视化的循证依据。Volpicelli 等<sup>[15]</sup>进一步扩展至临床实践,针对新型冠状病毒感染特异性肺损伤开发的扩展评分系统(LUS extension score, LUSext),通过胸壁病变分布特征与计算机断层扫描(computed tomography, CT)损伤体积的高度空间一致性验证( $R = 0.67$ ),突破传统超声对深部病变探查的局限,实现了肺损伤程度的无创定量评估。值得关注的是, Smit 等<sup>[16]</sup>的前瞻性多中心队列研究构建的 LUS-急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)评分系统,其诊断效能[受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic curve, ROC 曲线)下面积(area under the curve, AUC) = 0.90]与柏林标准联合 CT 诊断有等效性,且全诊断阈值均具备客观量化特征,标志着 LUS 从辅助工具向标准化评估手段的范式转变。

**1.4 局限性:** LUS 作为肺部评估的重要工具,其临床应用需审慎考量技术局限性。首先,肺组织高气含量特性严重限制了其深层探查的能力,导致深部病变评估效能受限<sup>[17]</sup>。同时,气体/脂肪界面伪影易干扰图像解析的精度,可能造成误判风险<sup>[18]</sup>。此外,该技术有显著的操作者依赖性,不同医师的手法差异可能引起诊断偏差<sup>[19-20]</sup>。因此,临床实践中需系统评估其技术边界与特定诊疗场景的适配性,以实现诊断效能最大化。

## 2 CT

**2.1 技术特点:** CT 通过围绕受检体的旋转 X 线系统多角度采集影像数据,经断层重建算法生成三维解剖结构映射<sup>[21]</sup>。基于组织对 X 线衰减系数的差异性,通过检测 X 线在不同组织中相对于空气(-1 000 HU)和水(0 HU)基准值的衰减量,定量计算各体素 CT 值并映射至灰度空间<sup>[22]</sup>。基于 CT 定量分析,肺实质可分为 4 个通气功能区:过度膨胀区(-1000 ~ -900 HU)、正常通气区(-900 ~ -500 HU)、通气不良区(-500 ~ -100 HU)及不通气区( $> -100$  HU)。ARDS 患者的胸部 CT 病变影可呈重力依赖区分布。仰卧位,肺部阴影自腹侧到背侧、从头侧到足侧的密度梯度,即从非重力依赖区正常或过度膨胀的肺脏移行过渡为弥漫性磨玻璃影,直至重力依赖区的致密实变影(图 2)。

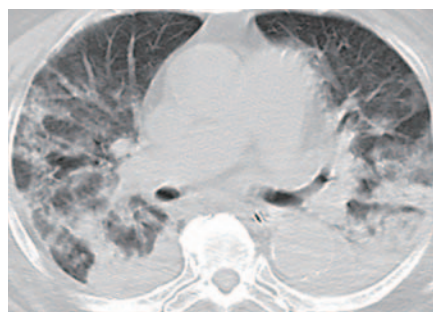


图 2 ARDS 患者胸部病变沿重力依赖区分布的 CT 图像

**2.2 成像优势:** CT 在肺损伤评估中较超声有显著优势,其高空间分辨率可精准显示微小结节及支气管血管束解剖细节<sup>[23]</sup>。基于 X 线的物理特性突破含气组织成像的限制,实现全肺野可视化评估<sup>[24]</sup>。同时,标准化成像流程保障了阅片者间的高度一致性及随访数据的纵向可比性<sup>[25]</sup>。

**2.3 生物标志物作用:** CT 较平片能更精准识别胸腔积液、气胸及肺泡间质异常等病变<sup>[26-28]</sup>。尽管非 ARDS 诊断必需,但其特征性磨玻璃影改变为临床诊断提供了重要形态学依据<sup>[29]</sup>。Cressoni 等<sup>[30]</sup>采用 24 只仔猪模型(实验组 15 只,验证组 9 只),施以梯度机械通气并同步监测机械能参数,结合 CT 定量评估肺损伤的程度。结果表明,机械能与肺损伤呈显著正相关,当机械能阈值  $> 12$  J/min 时,均可诱发全肺水肿。该发现证实 CT 定量评估与机械能监测的协同效应,为 VILI 的预警和干预提供了可视化生物标志物。

**2.4 限制因素:** 肺 CT 虽具备高分辨率的优势,但其临床应用仍受双重限制。X 射线暴露风险虽经设备迭代降低,但重复检查的累积效应仍需警惕<sup>[31]</sup>。此外,检查依赖设备转运及制动要求,对危重症患者特别是 ICU 环境构成实施障碍,可能延误床旁诊疗决策的时效<sup>[32]</sup>。

## 3 电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)

**3.1 成像原理:** EIT 通过 16 或 32 胸壁电极阵列施加安全电流,动态监测肺阻抗的变化,精准区分通气-塌陷肺泡区域。其原理是基于通气良好区域呈现高阻抗特征,而肺不张区域阻抗值显著降低。通过高频电流脉冲序列测量组织阻抗的动态变化,经断层重建算法生成实时通气分布图,直

观呈现肺区域通气的异质性<sup>[33]</sup>。现有循证证据表明,较高水平呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)可降低 ARDS 患者病死率,然而过高的 PEEP 可能诱发呼吸机相关肺损伤<sup>[34]</sup>。EIT 通过量化区域肺顺应性变化,已成为 PEEP 滴定研究的重要工具。EIT 成像可指导 ARDS 患者最佳 PEEP 的设置。高 PEEP 下的顺应性降低(compliance loss high PEEP%, CL HP%)用于计算肺内过度膨胀区域的比例;低 PEEP 下的顺应性降低(compliance loss low PEEP%, CL LP%)用于计算肺内塌陷区域的比例。通过计算不同 PEEP 水平下的肺内过度膨胀率与塌陷率,以二者总和最小化为原则确定最佳 PEEP(图 3)。

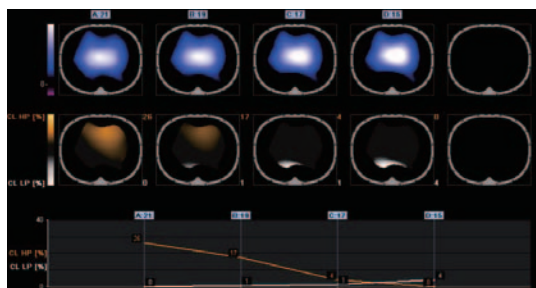


图 3 ARDS 患者 EIT 离线分析指导其最佳 PEEP 图像

**3.2 技术优势:** EIT 相较于传统影像技术展现出许多优势。EIT 是基于组织电阻抗变化成像,其无辐射特性从根本上规避了放射性暴露风险<sup>[35]</sup>。同时,便携式设计支持床旁实时连续监测,显著降低危重症患者转运检查的潜在危险<sup>[33]</sup>。更重要的是,其动态功能成像能力可同步评估区域通气效率和灌注异质性,为呼吸力学的优化提供了可视化反馈<sup>[36]</sup>。这种结构-功能一体化监测模式,使 EIT 成为肺损伤动态评估中不可替代的影像工具。

**3.3 动态监测与干预:** EIT 在 VILI 评估中展现出从基础机制到临床干预的应用价值。Steinberg 等<sup>[14]</sup>采用同步 LUS-EIT 监测方案,通过基线阻抗差算法动态追踪呼气末组织阻抗变化,发现血管外肺水增加( $P<0.001$ ,  $R=0.33$ )、呼气末肺容积扩张( $P<0.001$ ,  $R=0.3$ )及机械应变升高( $P<0.001$ ,  $R=0.42$ )均导致阻抗显著降低,为 VILI 生物力学机制解析提供了实时监测窗口。这一发现经 Trepte 等<sup>[37]</sup>的多肺损伤模型验证得以强化,其通过多体位 EIT 监测联合“金标准”重量法,证实肺水比与解剖肺水肿湿质量高度相关( $P<0.001$ ,  $R=0.80$ ),成功搭建了电生理信号与形态学损伤的转化桥梁。基于此方法学的突破,Jimenez 等<sup>[38]</sup>进一步实现临床转化,在 ARDS 患者中证实 EIT 引导的个体化 PEEP 滴定可同步降低 PEEP 2 cmH<sub>2</sub>O (1 cmH<sub>2</sub>O  $\approx$  0.098 kPa,  $P=0.046$ )及机械能 4.36 J/min ( $P=0.002$ ),揭示 EIT 兼具肺损伤量化评估与呼吸支持精准调控的双重工具属性。

**3.4 技术瓶颈与误差控制:** EIT 虽具备床旁实时监测优势,但其临床应用仍受技术特性制约。空间分辨率显著低于磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)等断层成像技术,难以精确识别亚肺叶级细微结构改变<sup>[39]</sup>。此外,解剖异

质性(如胸廓畸形)和界面阻抗波动(电极-皮肤接触变异)易引入信号干扰,特别是在患者体位变动时可能产生伪影性通气分布误判<sup>[40]</sup>。这些物理限制在需要高精度解剖定位的场景中尤为突出,但在呼吸力学动态评估中可通过时间维度数据叠加予以部分补偿。

## 4 MRI

**4.1 成像优势:** 肺 MRI 虽在临床应用广度受限,但其技术优势显著。良好的软组织对比度可精准识别肺肿瘤及炎症的微观结构特征,尤其质子密度加权成像能清晰显示间质性病变的分布模式<sup>[41]</sup>。此外,多维功能成像模块(灌注、弥散、代谢)可同步评估肺血流分布及细胞外基质重构,为肺损伤异质性分析提供了独特视角<sup>[42]</sup>。良好的软组织对比度特别适用于肿瘤边界界定与炎症病灶分期。然而肺组织低质子密度及快速信号衰减特性制约了其应用,通过自由感应衰减(free induction decay, FID)-投影 MRI 技术可突破此限制,该技术采用超短回波时间同步捕捉快速衰减的氢质子信号与长 T2 组分信息<sup>[43]</sup>。

**4.2 临床应用:** 在探索无创性早期预警手段的研究中, MRI 凭借其独特的组织密度可视化能力与动态定量监测特性,展现出明显的技术优势。Kueth 等<sup>[44]</sup>构建了 3 组大鼠 VILI 模型,应用 FID-投影成像方法实现连续肺浸润定量监测,同步记录呼吸力学参数。典型病例显示,肺浸润最早于 6.5 h 被检出,早于呼吸力学(14 h)的显著改变,整体数据显示 MRI 预警窗较呼吸力学指标提前( $5.7 \pm 2.3$ )h ( $P<0.0156$ )。该技术通过肺组织密度变异系数及应变分布熵值等参数实现了亚临床期肺损伤的定量预警,其空间分辨率可精确捕捉局部肺泡塌陷-过度膨胀的异质性模式,为肺保护性通气策略的优化提供了解剖-功能双维度生物标志物。

**4.3 局限性:** 肺 MRI 在 VILI 评估中的临床应用面临技术屏障:其较高的时间成本易诱发运动伪影并增加危重症患者检查风险<sup>[45]</sup>;铁磁性植入物(如起搏器)引发的局部磁场畸变不仅显著降低图像信噪比,更构成绝对检查禁忌;中重度 ARDS 患者检查时需脱离呼吸支持系统转运至屏蔽环境,这与持续呼吸监测的临床需求存在根本性矛盾<sup>[46]</sup>。这些物理限制与临床场景的特殊性,使得肺 MRI 在急性肺损伤动态评估中的应用仍局限于特定研究场景。

## 5 小结

VILI 的精准评估是优化机械通气策略、改善患者预后的关键环节。LUS、CT、EIT 及 MRI 等影像学技术各具特色,从不同维度为 VILI 的病理机制解析和动态监测提供了重要工具。未来需针对多模态影像的深度融合、前瞻性试验验证影像标志物的临床价值等方面进行深入研究,并制定个体化呼吸支持策略的循证指南,以达到个性化设置患者呼吸机参数,降低 VILI 的发生率。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] Telias I, Brochard LJ, Gattarello S, et al. The physiological underpinnings of life-saving respiratory support [J]. Intensive Care

- Med, 2022, 48 (10): 1274–1286. DOI: 10.1007/s00134-022-06749-3.
- [2] Lassen HC. A preliminary report on the 1952 epidemic of poliomyelitis in Copenhagen with special reference to the treatment of acute respiratory insufficiency [J]. *Lancet*, 1953, 1 (6749): 37–41. DOI: 10.1016/s0140-6736(53)92530-6.
  - [3] Avignon PD, Hedenstrom G, Hedman C. Pulmonary complications in respirator patients [J]. *Acta Med Scand Suppl*, 1956, 316: 86–90. DOI: 10.1111/j.0954-6820.1956.tb06263.x.
  - [4] Slutsky AS. Lung injury caused by mechanical ventilation [J]. *Chest*, 1999, 116 (1 Suppl): 9S–15S. DOI: 10.1378/chest.116.suppl\_1.9s-a.
  - [5] Beitler JR, Malhotra A, Thompson BT. Ventilator-induced lung injury [J]. *Clin Chest Med*, 2016, 37 (4): 633–646. DOI: 10.1016/j.ccm.2016.07.004.
  - [6] Slutsky AS, Ranieri VM. Ventilator-induced lung injury [J]. *N Engl J Med*, 2013, 369 (22): 2126–2136. DOI: 10.1056/NEJMra1208707.
  - [7] Rao A, Huynh E, Royston TJ, et al. Acoustic methods for pulmonary diagnosis [J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2019, 12: 221–239. DOI: 10.1109/RBME.2018.2874353.
  - [8] Gargani L, Girerd N, Platz E, et al. Lung ultrasound in acute and chronic heart failure: a clinical consensus statement of the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI) [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2023, 24 (12): 1569–1582. DOI: 10.1093/ehjci/ead169.
  - [9] Yuriditsky E, Horowitz JM, Panebianco NL, et al. Lung ultrasound imaging: a primer for echocardiographers [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2021, 34 (12): 1231–1241. DOI: 10.1016/j.echo.2021.08.009.
  - [10] Saraogi A. Lung ultrasound: present and future [J]. *Lung India*, 2015, 32 (3): 250–257. DOI: 10.4103/0970-2113.156245.
  - [11] da Hora Passos R, da Cunha Lyrio RM, Lourenço ID, et al. LUS me up: elevating ARDS diagnosis [J]. *Crit Care*, 2024, 28 (1): 257. DOI: 10.1186/s13054-024-05044-5.
  - [12] Rocca E, Zanza C, Longhitano Y, et al. Lung ultrasound in critical care and emergency medicine: clinical review [J]. *Adv Respir Med*, 2023, 91 (3): 203–223. DOI: 10.3390/arm91030017.
  - [13] 刘荔龙. 肺损伤超声评分在急性呼吸窘迫综合征患者中的临床应用 [J]. *中外医疗*, 2019, 38 (31): 187–189. DOI: 10.16662/j.cnki.1674-0742.2019.31.187.
  - [14] Steinberg I, Pasticci I, Busana M, et al. Lung ultrasound and electrical impedance tomography during ventilator-induced lung injury [J]. *Crit Care Med*, 2022, 50 (7): e630–e637. DOI: 10.1097/CCM.0000000000005479.
  - [15] Volpicelli G, Fracalini T, Cardinale L, et al. Feasibility of a new lung ultrasound protocol to determine the extent of lung injury in COVID-19 pneumonia [J]. *Chest*, 2023, 163 (1): 176–184. DOI: 10.1016/j.chest.2022.07.014.
  - [16] Smit MR, Hagens LA, Heijnen NFL, et al. Lung ultrasound prediction model for acute respiratory distress syndrome: a multicenter prospective observational study [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2023, 207 (12): 1591–1601. DOI: 10.1164/rccm.202210-1882OC.
  - [17] Via G, Hussain A, Wells M, et al. International evidence-based recommendations for focused cardiac ultrasound [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014, 27 (7): 683.e1–683.e33. DOI: 10.1016/j.echo.2014.05.001.
  - [18] Ball L, Scaramuzzo G, Herrmann J, et al. Lung aeration, ventilation, and perfusion imaging [J]. *Curr Opin Crit Care*, 2022, 28 (3): 302–307. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000942.
  - [19] Kulkarni S, Down B, Jha S. Point-of-care lung ultrasound in intensive care during the COVID-19 pandemic [J]. *Clin Radiol*, 2020, 75 (9): 710.e1–710.e4. DOI: 10.1016/j.crad.2020.05.001.
  - [20] Smit MR, Mayo PH, Mongodi S. Lung ultrasound for diagnosis and management of ARDS [J]. *Intensive Care Med*, 2024, 50 (7): 1143–1145. DOI: 10.1007/s00134-024-07422-7.
  - [21] Kaczka DW. Imaging the lung in ARDS: a primer [J]. *Respir Care*, 2024, 69 (8): 1011–1024. DOI: 10.4187/respcare.12061.
  - [22] Cereda M, Xin Y, Goffi A, et al. Imaging the injured lung: mechanisms of action and clinical use [J]. *Anesthesiology*, 2019, 131 (3): 716–749. DOI: 10.1097/ALN.0000000000002583.
  - [23] Vasilescu DM, Martinez FJ, Marchetti N, et al. Noninvasive imaging biomarker identifies small airway damage in severe chronic obstructive pulmonary disease [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2019, 200 (5): 575–581. DOI: 10.1164/rccm.201811-2083OC.
  - [24] Gattinoni L, Caironi P, Cressoni M, et al. Lung recruitment in patients with the acute respiratory distress syndrome [J]. *N Engl J Med*, 2006, 354 (17): 1775–1786. DOI: 10.1056/NEJMoa052052.
  - [25] Liu MQ, Lv FJ, Huang Y, et al. Follow-up study of the chest CT characteristics of COVID-19 survivors seven months after recovery [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8: 636298. DOI: 10.3389/fmed.2021.636298.
  - [26] Simon M, Braune S, Laqmani A, et al. Value of computed tomography of the chest in subjects with ARDS: a retrospective observational study [J]. *Respir Care*, 2016, 61 (3): 316–323. DOI: 10.4187/respcare.04308.
  - [27] 吕晋, 张桢, 莫泽珣, 等. 胸部 CT 值在胸腔积液鉴别诊断的价值 [J]. *广州医药*, 2023, 54 (2): 38–41. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8535.2023.02.007.
  - [28] 矫鑫瑶. 定量 CT 分析在特发性肺间质纤维化严重程度评估中的应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
  - [29] ARDS Definition Task Force. Acute respiratory distress syndrome: the Berlin definition [J]. *JAMA*, 2012, 307 (23): 2526–2533. DOI: 10.1001/jama.2012.5669.
  - [30] Cressoni M, Gotti M, Chiurazzi C, et al. Mechanical power and development of ventilator-induced lung injury [J]. *Anesthesiology*, 2016, 124 (5): 1100–1108. DOI: 10.1097/ALN.0000000000001056.
  - [31] 邱海静, 高知玲, 贾晶, 等. 宁夏成年人常见 CT 检查项目的辐射剂量状况调查研究 [J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2019, 39 (9): 691–696. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2019.09.010.
  - [32] 刘雪晴, 黄素芳, 胡露红, 等. 综合医院发热门诊新型冠状病毒肺炎诊断性胸部 CT 检查转运管理 [J]. *中华护理杂志*, 2020, 55 (2): 517–520. DOI: 10.3761/j.issn.0254-1769.2020.S1.196.
  - [33] Jimenez JV, Weirauch AJ, Culter CA, et al. Electrical impedance tomography in acute respiratory distress syndrome management [J]. *Crit Care Med*, 2022, 50 (8): 1210–1223. DOI: 10.1097/CCM.0000000000005582.
  - [34] 杨庆云, 胡兴硕, 解立新. ICU 可视化动态评估心肺功能新技术: 电阻断层成像 [J]. *国际呼吸杂志*, 2023, 43 (1): 15–20. DOI: 10.3760/cma.j.cn131368-20220615-00485.
  - [35] Caetano DS, Morais CC, Leite WS, et al. Electrical impedance tomographic mapping of hypoventilated lung areas in intubated patients with COVID-19 [J]. *Respir Care*, 2023, 68 (6): 773–776. DOI: 10.4187/respcare.10261.
  - [36] 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]. *Crit Care*, 2020, 24 (1): 678. DOI: 10.1186/s13054-020-03414-3.
  - [37] Trepte CJ, Phillips CR, Solà J, et al. Electrical impedance tomography (EIT) for quantification of pulmonary edema in acute lung injury [J]. *Crit Care*, 2016, 20: 18. DOI: 10.1186/s13054-015-1173-5.
  - [38] Jimenez JV, Munroe E, Weirauch AJ, et al. Electric impedance tomography-guided PEEP titration reduces mechanical power in ARDS: a randomized crossover pilot trial [J]. *Crit Care*, 2023, 27 (1): 21. DOI: 10.1186/s13054-023-04315-x.
  - [39] 刘孟春, 邢金燕. 电阻断层成像技术在呼吸系统肺功能成像中的应用 [J/CD]. *中华重症医学电子杂志*, 2019, 5 (4): 373–378. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-1537.2019.04.015.
  - [40] Francheau G, Jonkman AH, Piquilloud L, et al. Electrical impedance tomography to monitor hypoxemic respiratory failure [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2024, 209 (6): 670–682. DOI: 10.1164/rccm.202306-1118CI.
  - [41] Stewart NJ, Smith LJ, Chan HF, et al. Lung MRI with hyperpolarised gases: current & future clinical perspectives [J]. *Br J Radiol*, 2022, 95 (1132): 20210207. DOI: 10.1259/bjr.20210207.
  - [42] Ohno Y, Yui M, Yoshikawa T, et al. 3D oxygen-enhanced MRI at 3T MR system: comparison with thin-section CT of quantitative capability for pulmonary functional loss assessment and clinical stage classification of COPD in smokers [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2021, 53 (4): 1042–1051. DOI: 10.1002/jmri.27441.
  - [43] Bergin CJ, Glover GH, Pauly JM. Lung parenchyma: magnetic susceptibility in MR imaging [J]. *Radiology*, 1991, 180 (3): 845–848. DOI: 10.1148/radiology.180.3.1871305.
  - [44] Kueth DO, Filipczak PT, Hix JM, et al. Magnetic resonance imaging provides sensitive *in vivo* assessment of experimental ventilator-induced lung injury [J]. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2016, 311 (2): L208–L218. DOI: 10.1152/ajplung.00459.2015.
  - [45] Elbehairy AF, Marshall H, Naish JH, et al. Advances in COPD imaging using CT and MRI: linkage with lung physiology and clinical outcomes [J]. *Eur Respir J*, 2024, 63 (5): 2301010. DOI: 10.1183/13993003.01010-2023.
  - [46] Pawlik MT, Dendl LM, Achajew LA, et al. Clinical value and operational risks of MRI in ICU patients—a retrospective analysis performed at a university medical center [J]. *Rofo*, 2024, 196 (4): 371–380. DOI: 10.1055/a-2193-0021.

(收稿日期: 2025-03-13)

(责任编辑: 邸美仙)