

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2026.16.007
文章编号: 1005-8982 (2026) 16-0045-06

综述

复张-膨胀比评估急性呼吸窘迫综合征 肺可复张性的研究进展*

王一玮¹, 袁伊凡², 黑悦³, 臧奎¹

(1. 南京医科大学附属淮安第一医院 重症医学科, 江苏 淮安 223001; 2. 南京医科大学
研究生院, 江苏 南京 211166; 3. 空军军医大学第一附属医院, 陕西 西安 710032)

摘要: 急性呼吸窘迫综合征 (ARDS) 以肺泡不均匀塌陷和难治性低氧血症为特征, 给机械通气策略的优化带来巨大挑战。由于ARDS患者肺可复张性存在显著的个体差异, 最佳肺复张操作 (RMs) 及呼气末正压 (PEEP) 的设定策略仍存在争议。复张-膨胀比 (R/I) 是近年来提出的一种床旁评估指标, 通过分析不同PEEP水平下呼吸系统顺应性的变化, 进而量化肺泡可复张性, 为个体化通气策略提供决策依据。R/I操作简便, 无须额外设备, 可在床旁重复测定以动态追踪治疗反应。多项研究证实, R/I与计算机断层扫描、电阻抗断层扫描及肺部超声等方法评估的可复张性具有良好的一致性。然而, 现有证据多来自小样本、单中心研究, 不同呼吸机型号间的测量差异可能影响R/I的准确性, 且目前尚缺乏公认的高/低可复张性判定阈值。未来研究需进一步通过大样本、多中心临床试验验证其可靠性, 明确R/I在ARDS治疗中平衡复张获益与呼吸机相关肺损伤风险方面的临床价值。

关键词: 急性呼吸窘迫综合征; 肺复张; 复张-膨胀比; 机械通气; 呼吸力学
中图分类号: R563.8 **文献标识码:** A

Research progress on the recruitment-to-inflation ratio for assessing lung recruitability in acute respiratory distress syndrome*

Wang Yi-wei¹, Yuan Yi-fan², Hei Yue³, Zang Kui¹

(1. Department of Critical Care Medicine, Huai'an First Hospital Affiliated to Nanjing Medical University, Huai'an, Jiangsu 223001, China; 2. Graduate School of Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 211166, China; 3. The First Affiliated Hospital of Airforce Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract: Acute respiratory distress syndrome (ARDS) is characterized by heterogeneous alveolar collapse and refractory hypoxemia, posing significant challenges to the optimization of mechanical ventilation strategies. Given the substantial inter-patient variability in lung recruitability, optimal approaches for lung recruitment maneuvers (RMs) and positive end-expiratory pressure (PEEP) settings remain controversial. The recruitment-to-inflation ratio (R/I), a recently proposed bedside assessment tool, quantifies alveolar recruitability by analyzing changes in respiratory system compliance across different PEEP levels, thereby providing a basis for individualized ventilation strategies. R/I is simple to perform, requires no additional equipment, and can be repeatedly measured at the bedside to dynamically track treatment responses. Multiple studies have demonstrated good agreement between R/I and recruitability assessed by computed tomography, electrical impedance tomography, and lung ultrasound.

收稿日期: 2026-03-26

* 基金项目: 国家自然科学基金 (82301553)

[通信作者] 臧奎, E-mail: zangkuitongtong@163.com

However, the current evidence is predominantly derived from small-sample, single-center studies. Measurement discrepancies across different ventilator models may compromise the accuracy of R/I, and no universally accepted threshold for distinguishing high from low recruitability has been established. Future large-scale, multicenter clinical trials are warranted to further validate the reliability of R/I and to clarify its clinical value in balancing the benefits of lung recruitment against the risk of ventilator-induced lung injury in ARDS management.

Keywords: acute respiratory distress syndrome; lung recruitment; recruitment-to-inflation ratio; mechanical ventilation; respiratory mechanics

急性呼吸窘迫综合征 (acute respiratory distress syndrome, ARDS) 的核心病理特征为弥漫性肺泡损伤^[1-2]。多种因素 (包括 II 型肺泡上皮细胞损伤及炎性介质对表面活性物质的破坏) 共同导致肺泡塌陷, 使参与通气的肺组织比例显著降低, 进而严重影响气体交换。由于 ARDS 患者肺顺应性与可复张性的个体差异显著, 目前尚无适用于所有患者的理想肺复张参数或最佳呼气末正压 (positive end-expiratory pressure, PEEP) 设定方案。因此, 亟需一种简便、可靠的床旁评估工具, 以指导临床医生进行个体化参数设置^[3]。CT 虽然能准确评估复张效果, 但因患者转运风险高且检查时效性差, 限制了其临床常规应用^[4-5]。在此背景下, 复张-膨胀比 (recruitment-to-inflation ratio, R/I) 逐渐被引入临床实践。该指标基于呼吸力学参数计算, 能够在床旁无创地定量评估患者的肺可复张性, 为肺复张操作及 PEEP 设定的个体化调节提供有效的决策依据。本文对 R/I 原理、临床应用现状及局限性进行综述。

1 评估 ARDS 患者肺复张性的必要性

1.1 肺复张的理论基础

1992 年, Lachmann^[6]提出“开放肺”通气策略, 主张通过肺复张操作 (lung recruitment maneuvers, RMs) 恢复塌陷肺泡通气, 并在此后维持其开放状态。迄今已有多种 RMs 被提出并应用于临床, 主要包括叹息法、控制性肺膨胀法、PEEP 递增法及压力控制通气法等^[7]。尽管操作方式各异, 但其核心原理均为通过短暂提高跨肺压来重新扩张塌陷的肺泡。然而, 肺泡复张过程本身并非毫无风险。Mead 等^[8]的经典研究发现, 当跨肺压为 30 cmH₂O 时, 开放肺泡与塌陷肺泡交界处的局部剪切力可高达 140 cmH₂O。Lachmann 等^[6]据此提出, 导致气压伤的并非增高的跨肺压本身,

而是开放-塌陷肺泡交界区域过高的剪切力。多项动物实验亦证实, 机械通气期间肺泡的反复塌陷与重新开放可显著加重肺损伤^[9]。综上所述, 在 ARDS 机械通气管理中, 维持肺泡开放的稳定性较单纯肺泡复张更为关键。依据 Pierre-Simon Laplace 于 1806 年提出的 Laplace 定律:

$$P = \frac{2\sigma}{r}$$

(P =维持肺泡稳定所需的压力, σ =肺泡气-液界面的表面张力; r =肺泡半径)

在相同表面张力下, 肺泡半径越大, 则维持其膨胀所需要的压力反而越小; 而为了减少肺泡反复塌陷-复张产生的剪切力损伤, 在实施肺复张操作后应给予足够的 PEEP, 以避免呼气末肺泡发生塌陷。CT 结果进一步证实, 当塌陷肺泡被复张并充分打开后, 无需再维持较高的平台压, 但需设置足够的 PEEP 以维持肺泡稳定^[8]。

1.2 肺复张的临床效果与争议

多项研究表明, RMs 后联合适当水平的 PEEP 可显著改善患者氧合与肺顺应性, 提示肺内通气分布得到了改善^[10]。然而, 虽然短期生理指标改善明显, 但是肺复张能否改善 ARDS 患者的最终临床结局仍缺乏充分的证据支持。一项纳入 2 755 例患者的荟萃分析显示, 是否使用 RMs 对 ARDS 患者 28 d 死亡率、ICU 死亡率及院内死亡率均未产生显著影响^[11]。

此外, 肺复张过程中部分肺泡可能发生过度扩张, 导致肺泡损伤及氧合恶化。血流动力学波动亦较为常见, 尤其可能对右心功能造成不利影响。在呼吸机相关肺损伤模型中, 过高的气道峰压可导致右心室进行性扩张和功能不全^[12]。鉴于上述风险, 当前国际指南对 RMs 的应用持谨慎态度^[13]。上述证据表明, RMs 的临床获益因患者肺可复张性的不同而存在显著差异, 亟需一种能够在床旁快速、准确评估个体化肺可复张性的工具,

以指导 RMs 和 PEEP 的个体化设定。R/I 正是基于这一临床需求而提出的。

2 R/I 的原理与计算方法

2.1 基本原理

R/I 是一种基于复张容积 (volume of recruitment, V_{rec}) 推导而来的比值指标。其核心思想源于传统的多重压力-容积 (pressure-volume, P-V) 曲线法^[14]: 当 PEEP 水平发生改变时, 由此引起的肺容积变化包含两个不同的组成部分: ①已开放肺泡 (即“婴儿肺”) 的进一步充气膨胀; ②先前塌陷肺泡的真实复张。R/I 的设计理念即在于将上述两种成分加以区分: 利用低 PEEP 水平下测得的呼吸系统顺应性 (compliance of respiratory system, C_{rs}), 估算“婴儿肺”因 PEEP 改变而产生的膨胀容积 [即过度膨胀容积 (volume of inflation, V_{OI})], 再从 PEEP 变化引起的总容积变化中减去 V_{OI} , 即可得到 V_{rec} 。最终, R/I 被定义为复张肺的顺应性与“婴儿肺”顺应性之比^[15]:

$$\frac{R}{I} = \frac{C_{rec}}{C_{rs}} = \frac{V_{rec}/\Delta P_{rec}}{V_T/\Delta P}$$

其中, C_{rec} 为复张肺组织的顺应性, C_{rs} 为低 PEEP 水平下测得的呼吸系统顺应性 (“婴儿肺”的顺应性), V_{rec} 为肺复张后的总容积增量与 V_{OI} 之差, ΔP_{rec} 为由复张引起的压力变化, V_T 为潮气量 (以 6 mL/kg 理想体重计算), ΔP 为驱动压。

根据 Chen 等^[16]的阐述, 复张肺与“婴儿肺”

呈并联关系。因此, R/I 不仅反映了两者顺应性的比值, 也反映了在一定压力水平下这两部分肺组织的容积比例。R/I 越高意味着 PEEP 升高后新增容积更多地分布于可复张肺区域, 提示复张效果好; 反之, 较低的 R/I 则提示增加的气体主要进入“婴儿肺”, 增加过度膨胀及气压伤的风险。

2.2 简化测量方法

Chen 等^[16]提出了一种简便的床旁单次呼吸法测量 R/I, 具体步骤如下: ①首先给予较高水平的 PEEP (15 ~ 18 cmH₂O), 持续通气 30 min, 使肺泡充分复张并达到稳态; ②将呼吸频率降至 6 ~ 8 次/min, 以减少内源性 PEEP 的影响, 经 1 ~ 2 个呼吸周期后, 快速将 PEEP 降低 10 cmH₂O; ③在低 PEEP 水平下继续通气 30 min, 在此阶段末, 将 PEEP 短暂 (≤ 30 s) 降至 0 cmH₂O, 以测定功能残气量 (functional residual capacity, FRC); ④再次将 PEEP 升高至初始水平并持续 30 min。PEEP 从高水平降至低水平时呼出的气体量即为呼气末肺容积变化量 (change in end-expiratory lung volume, $\Delta EELV$), 通过呼吸机内集成的流量计即可获得。在此基础上, 通过低 PEEP 水平下测得的 C_{rs} 估算 V_{OI} , 再由 $\Delta EELV$ 减去 V_{OI} 即得 V_{rec} , 进而计算 R/I。该团队采用氮气洗入/洗出技术, 测定绝对呼气末肺容量 (end-expiratory lung volume, EELV) 进行对比分析, 验证了上述简化方法的准确性。完整的计算流程见图 1^[17]。

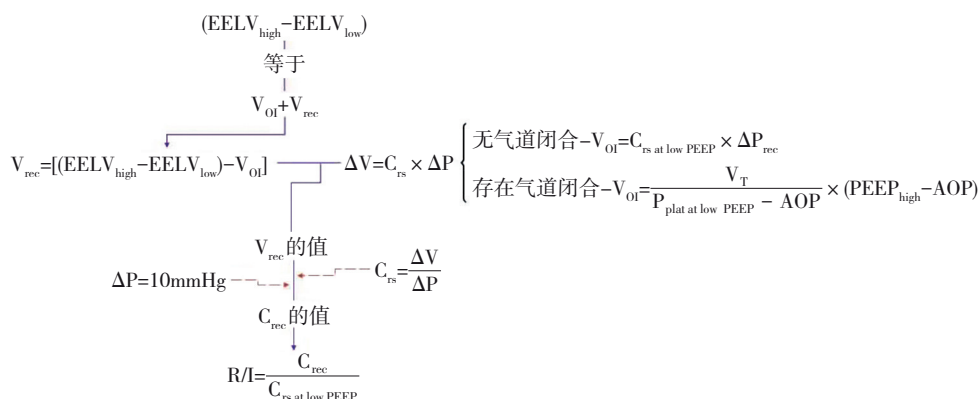


图 1 R/I 的计算过程

2.3 气道闭合的影响与修正

气道闭合是一种主要发生于缺乏软骨支撑的细小支气管的病理生理现象。已有研究表明,

ARDS 患者中普遍存在气道闭合^[18]。当 PEEP 低于气道开放压 (airway opening pressure, AOP) 时, 远端肺泡被隔离于近端气道外, 导致通过呼气末阻断

法获得的肺泡压力被低估,从而造成 V_{OI} 计算出现偏差。

因此,在计算R/I之前,应采用恒定低流量法生成准静态P-V曲线,以识别是否存在气道闭合。当AOP>R/I测量阶段所使用的低水平PEEP时,须对 V_{OI} 的计算进行相应修正,将AOP与低水平PEEP之间的压力差从有效压力变化中扣除,以避免高估“婴儿肺”的膨胀容积而低估真实复张容积^[15]。

3 R/I的临床应用现状

3.1 指导个体化肺复张与PEEP滴定

ARDS患者的病理生理改变异质性强,个体化治疗策略至关重要。研究表明,在肺高可复张性患者中,RMs能有效改善氧合;而在肺低可复张性患者中,RMs不仅可能导致氧合恶化,还可增加气压伤及血流动力学不稳定等并发症的风险^[19]。CT作为评估肺复张的金标准,通过分析肺体素密度的区域差异,将肺组织划分为正常通气、通气不足及无通气区域,对比基线容积即可获得准确的复张容积。然而,ARDS患者常伴有严重的氧合和血流动力学不稳定,转运途中不良事件发生风险高,限制了CT的常规应用。相较之下,R/I仅需呼吸力学参数即可在床旁完成计算,无须转运患者,多项研究已证实其能有效评估肺可复张性^[20-21]。

在肺可复张性分层方面,临床传统上采用150 mL的复张容积绝对值作为划分肺高/低可复张性的阈值^[22]。但该方法存在明显局限:未考虑气道闭合对测量的影响,也未对个体间肺容积差异进行校正。R/I中位数定义的阈值则更为合理,一定程度上可规避上述局限,R/I比值越大提示患者对RMs的反应性越好。RMs后PEEP的滴定同样是ARDS管理中至关重要的环节。虽然临床实践中常依据氧合情况选择最佳PEEP,但研究表明基于 C_{rs} 确定的PEEP不仅可改善氧合,还能改善终末器官灌注^[23]。研究表明,R/I除了可用于患者可复张性分层外,还能指导PEEP滴定,使临床获益最大化^[20]。

值得注意的是,部分肺低可复张性患者在RMs后仍可改善氧合,这种现象并不一定意味着真实肺泡复张,被称为“伪复张效应”^[24]。其主要机制可能与高PEEP导致肺循环血流重新分布有关。高PEEP可增加肺血管阻力及右心室后负荷,减少低通气区域灌注,从而降低肺内分流比例并改善氧

合指标^[25]。此外,高PEEP还可能通过降低心排量,进一步减少静脉混合血流。此时,氧合改善更多是反映肺血流动力学的变化,而非塌陷肺泡真正重新开放。因此,临床上不能仅依据氧合改善来判断肺复张效果,而应结合R/I、肺顺应性及影像学指标进行综合评估。

3.2 R/I与肺应变及呼吸机相关肺损伤

肺应变是指肺组织在外力作用下发生的形变。当ARDS患者接受不恰当的RMs时,过度增加的应变可导致呼吸机相关肺损伤(ventilator-induced lung injury, VILI)。R/I与肺应变之间的密切关系进一步凸显了其在预防VILI中的价值。有研究证实,R/I可准确预测应用PEEP时,ARDS患者呼吸系统机械功率的变化^[17]。在Chen等^[16]方法的基础上,采用5步递减PEEP方案,发现R/I与可复张性呈非线性关系,这提示更精细的PEEP滴定策略有助于更准确地反映PEEP对肺应变的影响。

3.3 R/I在俯卧位通气中的应用

R/I在俯卧位通气中同样具有应用价值。在一项COVID-19相关ARDS队列研究中,Cour等^[26]发现肺高可复张性患者俯卧位后R/I显著下降,而肺低可复张性患者仅表现为氧合改善,提示俯卧位对不同肺可复张性患者的作用机制可能不同。更大规模的队列研究进一步证实,R/I与俯卧位诱导的氧合改善之间存在相关性^[27]。

3.4 多种方法对R/I的交叉验证

多种评估手段的交叉验证有力地支持了R/I作为可复张性评估工具的可靠性。在呼吸力学层面,Chen等^[28]证实简化单次呼吸法、传统多重P-V曲线法及氮气洗入/洗出技术测得的 V_{rec} 高度相似。在影像学层面,基于 $\Delta EELV$ 和 V_{OI} 计算的 V_{rec} 与CT测量值有关,表明R/I在量化 V_{rec} 方面与影像学金标准具有良好的一致性^[28]。

后续多项研究从不同角度进一步验证了上述发现。Pettenuzzo等^[29]发现R/I与电阻抗断层扫描(electrical impedance tomography, EIT)量化的肺泡塌陷及过度膨胀风险之间存在线性关系。Coppens等^[15]的研究进一步表明,R/I可用于筛选能从EIT优化的PEEP策略中获益的患者。Murgolo等^[30]亦利用CT验证了R/I能准确反映PEEP引起的肺动态应变变化,且与标准化后的气体分布高度相关。

3.5 R/I 的动态监测价值

R/I 具有操作简便、易于床旁重复测定的特点, 特别适用于动态监测治疗期间肺可复张性的变化。Beloncle 等^[31]发现, ARDS 患者的 R/I 在治疗 5 d 后发生显著改变, 部分患者由低可复张性转变为高可复张性。上述研究揭示了 ARDS 患者可复张性的动态演变特征, 体现了 R/I 多时间点重复测量的临床价值, 有助于指导治疗方案的及时调整。

4 R/I 的局限性

尽管 R/I 在评估肺可复张性方面具有一定的临床应用潜力, 但其循证依据与判定标准仍有待完善。现有研究多为小样本、单中心设计, 缺乏大规模、多中心、随机对照试验的验证, 且部分研究未能显示其显著优势^[32]。同时, 高/低可复张性的判定阈值尚未形成统一共识, 不同研究在呼吸机参数设置、PEEP 滴定策略及测量时点等方面存在差异, 且 ARDS 不同表型亦可能影响评估结果, 提示单一固定阈值难以普遍适用。此外, R/I 测量结果还受设备及方法学等因素的影响, 不同型号的呼吸机之间存在系统性差异^[33]。在临床应用中需充分考虑设备相关误差, 并推动测量流程的标准化。

另一方面, R/I 的理论假设及其生理适用性亦存在一定局限性。其计算的前提是基于 C_{rs} 线性变化, 而 ARDS 肺部病变具有明显的空间异质性^[21], 该假设在部分情况下可能不成立。相关研究表明, R/I 与肺泡复张的相关性有限, 反而与过度膨胀更为相关^[34], 提示 PEEP 较高水平时, 可能低估实际复张程度。尽管结合 CT 或 EIT 可提高评估准确性, 但其可及性及操作复杂性限制了其常规应用; 床旁肺部超声虽然具有一定的替代价值, 但在识别肺泡过度膨胀方面仍存在局限性。

5 总结与展望

R/I 作为一种简便、无创的床旁评估工具, 为 ARDS 患者肺可复张性的个体化评估提供了新思路。与 CT、EIT 等传统方法相比, R/I 无须额外设备和患者转运, 可在床旁反复测定以动态追踪肺可复张性变化, 表现出显著的临床实用优势。然而, 其在临床推广应用之前仍需解决循证依据不足、测量标准化程度较低及判定阈值尚未统一等

关键问题。

未来研究应着力于以下方向: ①建立标准化的 R/I 测量与报告流程, 包括规范呼吸机校准方案、统一 PEEP 变化幅度及持续时间、明确测量时间窗等, 以提高不同中心间数据的可比性和可重复性; ②探索 R/I 与 ARDS 亚表型 (如高/低炎症表型、局灶型/弥漫型) 之间的关系, 推动更精准的患者分层策略; ③结合影像学及 EIT 等技术实现区域化可复张性评估, 为制订精准化复张策略提供更全面的信息; ④开发集成 R/I 自动计算功能的呼吸机内置软件及基于机器学习的 R/I 预测模型, 进一步提升评估的准确性和效率; ⑤最终通过大样本、多中心、随机对照试验, 明确 R/I 指导的个体化通气策略对 ARDS 患者 28 d 死亡率等的影响, 为该指标的临床转化提供高级别的循证依据。

参 考 文 献:

- [1] 马琼, 叶飞, 李臻阳, 等. 基于电阻断层成像技术设定呼气末正压对急性呼吸窘迫综合征患者肺功能及肺部并发症的影响[J]. 中国现代医学杂志, 2025, 35(19): 1-8.
- [2] 曾小良, 王江伟, 玉佳宁, 等. 脓毒症相关急性呼吸窘迫综合征患者 T 淋巴细胞免疫功能状态研究[J]. 中国现代医学杂志, 2025, 35(3): 55-62.
- [3] 王冰冰, 莫李媚. 肺部超声联合血清 sCD163 对小儿重症肺炎并发急性呼吸窘迫综合征的诊断价值[J]. 中国现代医学杂志, 2024, 34(6): 20-24.
- [4] Cammarota G, Vaschetto R, Vetrugno L, et al. Monitoring lung recruitment[J]. Curr Opin Crit Care, 2024, 30(3): 268-274.
- [5] Jonkman A H, Ranieri V M, Brochard L. Lung recruitment[J]. Intensive Care Med, 2022, 48(7): 936-938.
- [6] Lachmann B. Open up the lung and keep the lung open[J]. Intensive Care Med, 1992, 18(6): 319-321.
- [7] Bajon F, Gauthier V. Management of refractory hypoxemia using recruitment maneuvers and rescue therapies: a comprehensive review[J]. Front Vet Sci, 2023, 10: 1157026.
- [8] Mead J, Takishima T, Leith D. Stress distribution in lungs: a model of pulmonary elasticity[J]. J Appl Physiol, 1970, 28(5): 596-608.
- [9] Park H Y, Ha S Y, Lee S H, et al. Repeated derecruitments accentuate lung injury during mechanical ventilation[J]. Crit Care Med, 2013, 41(12): e423-e430.
- [10] Pensier J, De Jong A, Hajje Z, et al. Effect of lung recruitment maneuver on oxygenation, physiological parameters and mortality in acute respiratory distress syndrome patients: a systematic review and meta-analysis[J]. Intensive Care Med, 2019, 45(12): 1691-1702.
- [11] Kang H Y J, Yang H Q, Tong Z H. Recruitment manoeuvres for adults with acute respiratory distress syndrome receiving

- mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Crit Care*, 2019, 50: 1-10.
- [12] Del Monaco G, Amata F, Battaglia V, et al. Hemodynamics in left-sided cardiomyopathies[J]. *Rev Cardiovasc Med*, 2024, 25(12): 455.
- [13] Qadir N, Sahetya S, Munshi L, et al. An update on management of adult patients with acute respiratory distress syndrome: an official American Thoracic Society clinical practice guideline[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2024, 209(1): 24-36.
- [14] Sun X M, Chen G Q, Wang Y M, et al. Derecruitment volume assessment derived from pressure-impedance curves with electrical impedance tomography in experimental acute lung injury[J]. *J Int Med Res*, 2020, 48(8): 300060520949037.
- [15] Coppens A, Aissi James S, Roze H, et al. Optimum electrical impedance tomography-based PEEP and recruitment-to-inflation ratio in patients with severe ARDS on venovenous ECMO[J]. *Crit Care*, 2025, 29(1): 195.
- [16] Chen L, Del Sorbo L, Grieco D L, et al. Potential for lung recruitment estimated by the recruitment-to-inflation ratio in acute respiratory distress syndrome. a clinical trial[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 201(2): 178-187.
- [17] Grieco D L, Collino F, Steinberg I, et al. Lung recruitability determines the impact of PEEP on mechanical power in ARDS[J]. *Crit Care*, 2026, 30(1): 76.
- [18] Tonai K, Shono A, Nakayama R, et al. Comparison of airway opening pressure measurements: low-constant-flow vs. constant low-slope pressure ramp methods[J]. *BMC Anesthesiol*, 2025, 25(1): 580.
- [19] Nobe R, Ishida K, Togami Y, et al. Improving oxygenation in a patient with respiratory failure due to morbid obesity by applying airway pressure release ventilation: a case report[J]. *J Med Case Rep*, 2024, 18(1): 353.
- [20] Ogura K, Nakayama R, Bunya N, et al. Correlation between normally aerated lung and respiratory system compliance at clinical high positive end-expiratory pressure in patients with COVID-19[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 14477.
- [21] Chiumello D, Coppola S, Silva P L, et al. Bedside ventilatory settings guided by respiratory mechanics in acute respiratory distress syndrome[J]. *Ann Intensive Care*, 2025, 15(1): 189.
- [22] Turbil E, Terzi N, Cour M, et al. Positive end-expiratory pressure-induced recruited lung volume measured by volume-pressure curves in acute respiratory distress syndrome: a physiologic systematic review and meta-analysis[J]. *Intensive Care Med*, 2020, 46(12): 2212-2225.
- [23] Ziaka M, Exadaktylos A. Fluid management strategies in critically ill patients with ARDS: a narrative review[J]. *Eur J Med Res*, 2025, 30(1): 401.
- [24] Dell'anna A M, Carelli S, Cicetti M, et al. Hemodynamic response to positive end-expiratory pressure and prone position in COVID-19 ARDS[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2022, 298: 103844.
- [25] Joseph A, Petit M, Vieillard-Baron A. Hemodynamic effects of positive end-expiratory pressure[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2024, 30(1): 10-19.
- [26] Cour M, Bussy D, Stevic N, et al. Differential effects of prone position in COVID-19-related ARDS in low and high recruiters[J]. *Intensive Care Med*, 2021, 47(9): 1044-1046.
- [27] Lan L, Ni Y N, Zhou Y B, et al. PEEP-induced lung recruitment maneuver combined with prone position for ARDS: a single-center, prospective, randomized clinical trial[J]. *J Clin Med*, 2024, 13(3): 853.
- [28] Chen Y, Zhang L, Wu X J, et al. Magnetic augmentation through multi-gradient coupling enables direct and programmable profiling of circulating biomarkers[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 8410.
- [29] Petteuuzzo T, Sella N, Lorenzoni G, et al. The recruitment-to-inflation ratio is correlated with EIT-derived collapse and overdistention in COVID-19 ARDS[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2022, 206(10): 1284-1286.
- [30] Murgolo F, Grieco D L, Spadaro S, et al. Recruitment-to-inflation ratio reflects the impact of peep on dynamic lung strain in a highly recruitable model of ARDS[J]. *Ann Intensive Care*, 2024, 14(1): 106.
- [31] Beloncle F M, Pavlovsky B, Desprez C, et al. Recruitability and effect of PEEP in SARS-Cov-2-associated acute respiratory distress syndrome[J]. *Ann Intensive Care*, 2020, 10(1): 55.
- [32] Yetgin M, Yetgin H, Sungurtekin H. Association between driving pressure and recruitment-to-inflation ratio in personalized PEEP management at the bedside[J]. *Sci Rep*, 2026, 16(1): 5711.
- [33] Benedetti G, Sicca N, Lopponi G, et al. Evaluating the clinical success of clear aligners for rotational tooth movements in adult patients: a systematic review[J]. *Dent J (Basel)*, 2025, 13(10): 440.
- [34] Pavlovsky B, Pesenti A, Spinelli E, et al. Effects of PEEP on regional ventilation-perfusion mismatch in the acute respiratory distress syndrome[J]. *Crit Care*, 2022, 26(1): 211.

(童颖丹 编辑)

本文引用格式: 王一玮, 袁伊凡, 黑悦, 等. 复张-膨胀比评估急性呼吸窘迫综合征肺可复张性的研究进展[J]. 中国现代医学杂志, 2026, 36(16): 45-50.

Cite this article as: Wang Y W, Yuan Y F, Hei Y, et al. Research progress on the recruitment-to-inflation ratio for assessing lung recruitability in acute respiratory distress syndrome[J]. *China Journal of Modern Medicine*, 2026, 36(16): 45-50.