·综　　述·

床旁超声评估在机械通气撤机拔管中的研究进展

张思敏[1,2]，夏洪韬[2△]

（1. 成都中医药大学医学与生命科学院，四川 成都 511137；2. 遂宁市中心医院急危重症医学部，四川 遂宁 629000）

［摘　要］ 机械通气是重症监护中维持患者生命的关键支持手段之一，但长期使用可导致一系列并发症并影响患者预后。因此，在原发疾病得到有效控制后，实现早期、安全的撤机拔管至关重要。撤机拔管的成功受呼吸、循环、神经等多系统因素影响，传统评估方法存在一定局限性。床旁超声作为一种实时、无创、可重复的评估工具，能够实现对膈肌、肺脏及心脏功能的多模态动态监测，为撤机时机的判断、危险因素的识别及治疗策略的调整提供客观、量化的依据。该文系统综述床旁超声在机械通气患者撤机拔管评估中的应用进展，探讨其临床价值及未来发展方向，以期为优化重症患者呼吸支持管理提供参考。

［关键词］ 机械通气；　撤机拔管；　危险因素；　床旁超声；　临床应用；　综述

DOI：10.3969/j.issn.1009-5519.2026.07.034　　**中图法分类号**：R459.7

文章编号：1009-5519(2026)07-1620-04　　**文献标识码**：A

Research progress of bedside ultrasound assessment in mechanical ventilation weaning and extubation

Zhang Simin[1,2], *Xia Hongtao*[2△]

(1. *School of Medicine and Life Sciences, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu, Sichuan* 511137, *China*; 2. *Department of Emergency and Critical Care Medicine, Suining Central Hospital, Suining, Sichuan* 629000, *China*)

［**Abstract**］ Mechanical ventilation is one of the key supportive measures for maintaining patients′ lives in intensive care. However, long-term use can lead to a series of complications and affect the prognosis of patients. Therefore, after the primary disease is effectively controlled, it is crucial to achieve early and safe weaning and extubation. The success of weaning and extubation is influenced by multiple systems such as respiration, circulation, and nerves. Traditional assessment methods have certain limitations. Bedside ultrasound, as a real-time, non-invasive, and repeatable assessment tool, can realize multimodal dynamic monitoring of diaphragm, lungs, and heart functions, providing objective and quantitative basis for the judgment of weaning timing, the identification of risk factors, and the adjustment of treatment strategies. This article systematically reviews the application progress of bedside ultrasound in the assessment of weaning and extubation of patients with mechanical ventilation, discusses its clinical value and future development direction, with the aim of providing a reference for optimizing the respiratory support management of critically ill patients.

［**Key words**］ Mechanical ventilation;　Weaning and extubation;　Risk factors;　Bedside ultrasound;　Clinical application;　Review

机械通气广泛应用于重症患者，旨在用于改善患者氧合、降低呼吸做功，是维持呼吸衰竭患者通气和氧合的核心生命支持技术。但是长时间机械通气也会带来一系列医源性并发症如呼吸机相关性肺炎、肺不张、膈肌功能障碍、循环负荷增加等[1]。这些并发症不仅延长了机械通气时间和 ICU 住院时间，更与患者死亡率上升及医疗费用增加密切相关[2]。因此，在患者原发疾病得到控制、呼吸功能初步恢复后，如何精准判断撤机时机、成功实施拔管，成为重症临床实践中的关键环节。目前，广泛采用的自主呼吸试验虽是评估患者自主呼吸能力的常规方法，但其预测拔管失败的假阴性率仍高达 10%～20%[3]。这揭示了许多患者虽能短暂耐受自主呼吸试验，却因潜在的心肺储备不足、呼吸肌疲劳或隐性肺水肿等原因，在拔管后出现呼吸衰竭而需重新插管。在此背景下，床旁超声（POCUS）技术以其无创、便捷、可实时动态评估等独特优势，迅速融入重症患者的日常监测与管理中。它突破了传统生命体征和血气分析的局限，能够直观

△ **通信作者**，E-mail：snsyy-xwk@126.com。

引用格式：张思敏，夏洪韬. 床旁超声评估在机械通气撤机拔管中的研究进展[J]. 现代医药卫生，2026，42(7)：1620-1623.

显示解剖-功能的实时变化，为临床医生提供了洞察患者内在生理状态的“可视听诊器”。本文旨在系统阐述床旁超声在评估膈肌功能、肺通气状态及心脏储备方面的具体应用，深入探讨其如何整合入程序化撤机策略，并客观分析当前面临的挑战与未来前景，以期为推动基于超声的精准化、个体化撤机实践提供理论依据与实践指导。

1　撤机拔管失败的危险因素

拔管失败是一个多因素共同作用的复杂临床事件。目前，关于撤机拔管失败危险因素的研究尚未形成完全统一的结论。多项研究表明，呼吸功能异常、循环状态不稳定及神经功能障碍是导致拔管失败的主要风险来源[4-6]。(1)呼吸系统：包括气道通畅度(如气囊漏气试验)、分泌物清除能力、呼吸肌力量(尤其是膈肌)及呼吸机设置等因素均是影响拔管结局的因素。呼吸肌无力与疲劳是导致撤机失败的最常见原因之一[6]。(2)循环系统：撤机过程中，胸腔内压由正压转为负压或大气压，导致静脉回心血量骤增、左心室后负荷升高，左心室顺应性下降，可能诱发心肌缺血、左心功能不全乃至心源性肺水肿[7]，最终影响撤机拔管结局。(3)神经精神系统：意识水平低下(如格拉斯哥昏迷评分＜8 分)、谵妄、焦虑等均会影响患者的气道保护能力与呼吸驱动[5-6]最终导致拔管失败。(4)代谢与其他因素：电解质紊乱(低磷、低钾)、营养不良、严重贫血、镇静镇痛药物残留等也可能导致患者撤机拔管失败[4,6]。传统的评估方法，如临床体检、血气分析、呼吸力学监测等，虽有一定价值，但多为间接或静态指标，难以全面、动态地反映上述多系统交互作用的复杂生理状态，尤其在预测隐匿性心肺功能失代偿方面存在明显不足。超声则较好地弥补了这一不足。

2　床旁超声在多器官功能评估中的核心应用

2.1　膈肌超声　膈肌是人体进行自主呼吸的重要肌肉，提供了呼吸运动中约 70%～80%的潮气量[8]。在机械通气治疗期间，由于膈肌无需主动收缩参与呼吸运动，长期处于闲置状态，易出现肌肉萎缩，进而导致运动功能受损。呼吸肌群功能障碍会直接或间接造成肺通气量不足，这与撤机失败密切相关。有研究显示，在接受有创呼吸机 24 h 后膈肌即可出现可观测的萎缩性改变[9]。因此，评估膈肌功能有助于预测患者随时间推移维持自主呼吸的能力。目前，超声技术已被证实可以用于膈肌功能的评估，且多项指标在预测撤机结局方面表现出良好的效能。(1)膈肌移动度(DE)：于肋下缘采用肝脏或脾脏作为声窗，在 M 型超声下测量膈肌随呼吸运动的幅度。DE 反映了呼吸循环过程中膈肌的运动情况，与潮气量有关。平静呼吸时，DE＜2 cm 提示膈肌功能障碍[10]。有研究显示，自主呼吸试验期间诊断膈肌功能障碍的 DE 最佳截断值为 10～14 mm[11]。膈肌超声评估专家共识中 DE 被推荐作为核心评估指标[12]。(2)膈肌增厚分数(DTF)：于腋前线第 8～10 肋间，用高频线阵探头测量膈肌在呼气末与吸气末的厚度，计算公式为：(吸气末厚度－呼气末厚度)/呼气末厚度×100%。DTF 反映了呼吸过程中膈肌厚度的变化和收缩能力。有研究表明，DTF 预测拔管结果的截断值在 30%～36%[13]。有研究认为，DTF 的特异性显著高于 DE，而 DE 的敏感性更高[14]。与 DE 相比，DTF 受患者体位、腹内压及呼吸机设置影响较小，特异性更高，但操作技术要求更精细、难度更大，因此专家共识尚未将 DTF 列为膈肌功能评估的常规指标。Marques 等[15]的 meta 分析显示，DE 和 DTF 对不同人群成功脱机均有较好的预测能力，但研究认为 DE 与拔管失败无关，只有具有自主咳嗽能力才是拔管成功的独立因素。在正压通气期间进行的测量所获得的数据将影响测量的 DE，该 DE 是通过将患者的努力与呼吸机产生的压力相加而获得，因此，DTF 适用于评估机械通气患者的膈肌功能，而 DE 应保留在无呼吸支持的情况下，因为肌肉的下移可能反映呼吸机的被动充气。(3)膈肌浅快呼吸指数(D-RSBI)：即呼吸频率(RR)与 DE 的比值(RR/DE)。它综合了 DE 与浅快呼吸指数 2 个方面因素，反映撤机过程中患者呼吸功耗与膈肌功能的平衡关系。相较于传统呼吸浅快指数(RSBI)或单独使用 DE，D-RSBI 被认为在预测撤机结局方面具有较高灵敏度和特异性，准确性更高[16-17]。有研究显示，D-RSBI 的最佳截断值在 1.42 $min^{-1}\times mm^{-1}$，预测脱机失败的敏感性为 91.7%，特异性为 82.1%[18]。在老年人中，截断值为 1 851.42 $min^{-1}\times mm^{-1}$ 时具有最高灵敏度和特异度[19]。膈肌超声实现了对呼吸泵功能的直接可视化评估。DTF 因其反映肌肉收缩本质而更具病理生理意义，但 DE 因其简便性而在临床推广中更易实施。未来发展方向可能是开发半自动或自动测量软件，降低 DTF 的操作门槛。此外，还需关注单侧膈肌麻痹与双侧功能不均衡的情况。

2.2　肺部超声　肺部超声可以多切面、多角度扫查肺部情况，识别不同超声征象(A 线、B 线、肺实变、胸膜线异常)，发现潜在局灶性病变，通过量化评估肺通气丧失程度和肺水含量，准确反映肺部病变的严重程度。凭借可重复性强、操作简便、经济安全、无创等显著优势，肺部超声广泛应用于机械通气患者的撤机过程评估。

肺超声评分是肺部超声最常用的量化方法，2010 年由 Bouhemad 等[20]首先提出。将每侧肺分为前、侧、后共 6 个区域(总计 12 个区)，根据最差征象对每个区域评分(0 分：正常通气，A 线；1 分：中度通气丧失，≥3 条 B 线；2 分：重度通气丧失，融合 B 线；3 分：

肺实变)。总分 0～36 分,分数越高说明肺通气越差。多项研究证实,拔管前肺超声评分与拔管失败风险正相关,肺部超声有助于提高撤机成功率,能较好显示患者肺通气情况,可为便捷、直观地撤机提供参考依据[21-23]。Soummer 等[24]的研究表明,肺超声评分<13 分是成功拔管的可靠预测因素,而肺超声评分>17 分提示拔管失败。在临床实践中,为快速判断患者情况,通常使用肺部超声 B 线评分。在自主呼吸试验过程中或拔管前后进行系列肺部超声检查,观察 B 线数量的动态变化,比单一时间点的评分更能敏感地提示体液向肺间质的移动,早期预警心源性或渗透性肺水肿的发生[25]。Silva[26]等认为肺部超声中 B 线的存在高度预测拔管后呼吸窘迫的发展,实变的存在与拔管后窘迫的发生率相关性较弱。而 Antonio 等[27-28]的研究表明,B 线是撤机拔管自主呼吸试验失败的弱预测因子,实变患者表现出更高的自主呼吸试验失败的可能性。

肺部超声的强项在于评估肺通气的区域性分布和肺水肿变化,但其对气道梗阻、弥漫性小气道疾病的评估能力有限。需注意,B 线并非肺水肿的特异性征象,也可见于肺纤维化、肺炎等。因此,结合临床背景解读至关重要。未来可与电阻抗断层成像等技术联用,实现更全面的肺通气灌注评估。

2.3　心脏超声　撤机过程是对患者循环系统的一次压力测试。心脏超声,尤其是聚焦式心脏超声,可以即时评估心脏结构和功能对撤机负荷的反应,能够揭示临床表现隐匿的心功能不全,尤其是舒张功能障碍。(1)收缩功能:通过目测法或 Simpson 法评估左室射血分数。撤机失败患者常表现为自主呼吸试验期间左室射血分数下降或无法代偿性增加。有研究结果显示,撤机失败患者自主呼吸试验前心排血量、心指数等反映心脏收缩功能的指标水平更低,患者心脏收缩能力越弱,心脏负荷越大,外周阻力也越高,撤机失败风险就越大[29]。(2)舒张功能与左房压估计:通过测量二尖瓣血流频谱(E、A 峰)和组织多普勒(e'峰),计算 E/e'比值。E/e'>15 通常提示左心室充盈压升高[30]。左心室舒缩功能均与心源性撤机困难密切相关,其中以舒张功能不全为主[31]。有研究表明,通过 E/e'比值估计的左心房压力是左心室舒张功能的良好指标,左心房压力是撤机失败的独立影响因素[32-33]。

在自主呼吸试验前后进行对比检查,观察心腔大小、瓣膜反流、E/e'比值等参数的动态变化,具有极高的预测价值。将心脏超声与肺部超声(观察 B 线出现/增多)结合,可构建心-肺一体化评估,精准区分心源性与非心源性拔管后呼吸困难。

3　整合多模态超声的程序化撤机策略与临床实践

重症患者的流程化管理是重症医学领域发展的必然趋势。重症超声评估流程通过客观量化指标对患者病情进行评估和管理,在机械通气患者呼吸机撤离及气管插管、拔管评估中具有重要应用价值。同时,还具有良好的操作性和量化管理特性,便于 ICU 医护人员对机械通气患者撤机拔管质量进行有效管控,保障患者治疗安全,值得在临床推广应用。相较于单一脏器及指标评估,目前尚未形成完整的多器官超声评估撤机拔管流程。但多项研究表明,超声联合评估对提高撤机拔管成功率具有较大价值,是撤机失败的可靠预测指标[7,29,32]。将多模态床旁超声整合进入一个结构化的程序化撤机方案,代表了更先进的管理理念。一个完整的超声程序化撤机流程包括以下环节:(1)撤机前筛查。对拟撤机患者进行系统的心、肺、膈肌基础状态评估,识别明确禁忌证(如严重膈肌麻痹、大面积肺实变不张、严重心功能不全)。(2)自主呼吸试验期间动态监测。在自主呼吸试验开始前、中(如 30 min)、后分别进行简化的心脏(重点 E/e'、下腔静脉)、肺部(重点前侧区域 B 线)和膈肌(DE 或 DTF)超声评估,观察趋势变化。(3)拔管决策支持。综合超声动态参数(如 DE 稳定或改善、肺超声评分无显著升高、E/e'比值稳定)、传统指标(RSBI、血气)及临床判断,做出拔管决策。(4)拔管后早期预警。拔管后短期内(如 1～2 h)再进行肺部超声筛查,及时发现早期肺不张或肺水肿。

有研究显示,采用此类整合超声的流程,能够显著提高拔管成功率,缩短机械通气时间,降低 48 h 再插管率[32,34-35]。蒋勇等[36]设计的程序化流程,通过顺序评估心脏功能定性、LUBS、DE 及吞咽功能,实现了对撤机风险的分级管理,取得了较好的效果。成功实施该策略需要建立一支经过标准超声培训的重症医护团队,并制定清晰的图像获取与解读协议,以确保评估的一致性与可靠性。

4　局限性与未来挑战

超声是一种无创、经济、安全,易于操作的技术,可以实时评估各脏器形态和功能,并且可以在床旁重复进行。尽管前景广阔,但在撤机评估中的广泛应用仍面临挑战。首先超声图像获取和解读的准确性高度依赖操作者的技能与经验,需要不断训练并建立系统化的培训与资质认证体系。部分测量(如 DTF、B 线计数)尚未完全标准化,不同研究者可能存在差异,需要更多研究来统一技术规范和确定更具普遍性的诊断截断值。其次在肥胖、皮下气肿、有敷料或引流管、以及肺气肿(过度充气)患者中,超声图像质量可能不佳,影响评估。最后如何将多模态超声评估高效、无缝地整合到繁忙的 ICU 临床工作中,避免增加医护负担,是需要解决的现实问题。

未来需要进一步技术革新如使用人工智能辅助自动图像识别与测量技术,有望降低操作难度、提高测量客观性和可重复性。进行多模态融合,将超声与

EIT、经肺热稀释法等其他监测技术结合，构建更全面的心肺功能评估模型。同时开展前瞻性、多中心、大样本的随机对照研究，以最高级别证据确立超声引导撤机策略对患者远期预后的改善作用。最后由专业学会牵头，制定关于在机械通气撤机中应用床旁超声的规范化专家共识或临床实践指南。

5　结语与展望

床旁超声通过无创、实时、可重复评估膈肌、肺脏和心脏的功能状态，为机械通气患者的撤机拔管决策提供了传统方法无法比拟的地方。从评估单一器官到整合多模态参数，从辅助诊断到引导程序化流程，超声正在深刻改变着重症呼吸管理的实践模式。尽管在标准化、培训和技术整合方面仍存挑战，但其提升撤机成功率、改善患者预后的潜力已得到初步证实。随着技术的进步、研究的深入和临床经验的积累，床旁超声必将在实现精准、个体化、安全的机械通气撤离道路上扮演愈加核心的角色，推动重症医学向更高水平迈进。

参考文献

[1] Santa C M L A, Bittner E A. time to AIR OUT the bias from extubation decision-making[J]. Crit Care Med, 2021, 49(12): 2146-2149.

[2] Baptistella A R, Mantelli L M, Matte L. Prediction of extubation outcome in mechanically ventilated patients: development and validation of the extubation predictive score(ExPreS)[J]. PLoS One, 2021, 16(11): e0259544.

[3] Thille A W, Richard J C M, Brochard L. The decision to extubate in the intensive care unit[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2013, 187(12): 1294-1302.

[4] Boles J M, Bion J, Connors A, et al. Weaning from mechanical ventilation[J]. Eur Respir J, 2007, 29(5): 1033-1056.

[5] Torrini F, Gendreau S, Morel J, et al. Prediction of extubation outcome in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis[J]. Crit Care, 2021, 25(1): 391.

[6] 杨荟晶，吕慧颐，杜婧，等. 撤机困难影响因素及干预措施的研究进展[J]. 护理研究，2024，38(7)：1237-1241.

[7] Kundu R, Baidya D, Anand R, et al. Integrated ultrasound protocol in predicting weaning success and extubation failure: a prospective observational study[J]. Anaesthesiol Intensive Ther, 2022, 54(2): 156-163.

[8] 何聪，龙玲，王志刚，等. 床旁肺部超声对 ARDS 的诊断价值和严重程度的评估[J]. 中华麻醉学杂志，2019，39(6)：730-733.

[9] 颜瑶，谢永鹏，骆继业，等. 以机械功为导向预测机械通气患者撤机失败风险列线图模型的建立和验证：基于 MIMIC-Ⅳ数据库的研究[J]. 中华危重病急救医学，2023，35(7)：707-713.

[10] Haaksma M E, Smit J M, Boussuges A, et al. Expert consensus on diaphragm ultrasonography in the critically ill (Exodus): a delphi consensus statement on the measurement of diaphragm ultrasound-derived parameters in a critical care setting[J]. Crit Care, 2022, 26(1): 99.

[11] Abdel-Rahman D A, Saber S, El-Maghraby A. Diaphragm and lung ultrasound indices in prediction of outcome of weaning from mechanical ventilation in pediatric intensive care unit[J]. Indian J Pediatr, 2020, 87(6): 413-420.

[12] Robba C, Citerio G, Taccone F S, et al. Multicentre observational study on practice of ventilation in brain injured patients: the ventibrain study protocol[J]. BMJ Open, 2021, 11(8): e047100.

[13] Zambon M, Greco M, Bocchino S, et al. Assessment of diaphragmatic dysfunction in the critically ill patient with ultrasound: a systematic review[J]. Intensive Care Med, 2017, 43(1): 29-38.

[14] Llamas-Alvarez A M, Tenza-Lozano E M, Latour-Perez J. diaphragm and lung ultrasound to predict weaning outcome[J]. Chest, 2017, 152(6): 1140-1150.

[15] Marques M R, Pereira J M, Paiva J A, et al. Ultrasonography to access diaphragm dysfunction and predict the success of mechanical ventilation weaning in critical care[J]. J Ultrasound Med, 2024, 43(2): 223-236.

[16] Mowafy S M S, Abdelgalel E F. Diaphragmatic rapid shallow breathing index for predicting weaning outcome from mechanical ventilation: comparison with traditional rapid shallow breathing index[J]. Egypt J Anaesth, 2018(1): 9-17.

[17] Parada-Gereda H M, Tibaduiza A L, Rico-Mendoza A, et al. Effectiveness of diaphragmatic ultrasound as a predictor of successful weaning from mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis[J]. Crit Care, 2023, 27(1): 174.

[18] Chung E, Leem A Y, Lee S H, et al. Predicting successful weaning through sonographic measurement of the rapid shallow breathing index[J]. J Clin Med, 2024, 13(16): 4809.

[19] Chu Y, Guo C, Fu H. Correlation between diaphragmatic-rapid shallow breathing index and lung ultrasound score in elderly patients with mechanical ventilation and its predictive value for weaning results[J]. Zhonghua Wei Zhong Bing Ji Jiu Yi Xue, 2024, 36: 152-155.

[20] Bouhemad B, Liu Z H, Arbelot C, et al. Ultrasound assessment of antibiotic-induced pulmonary reaeration in ventilator-associated pneumonia[J]. Crit Care Med, 2010, 38(1): 84-92.

[21] 陈冬梅，史家欣，韩佳言，等. 肺部超声 B 线积分对机械通气患者脱机结果的预测价值[J]. 医学研究杂志，2021，50(8)：55-60.

[22] Rajbanshi L, Bajracharya A, Devkota D. Prediction of successful spontaneous breathing trial and extubation of trachea by lung ultrasound in mechanically ventilated patients in intensive care unit[J]. Indian J Critical Care Med, 2023, 27(7): 482-487.

（下转第 1629 页）