

膈肌超声评估急性呼吸窘迫综合征患者脱机的应用价值

苏婉婷¹, 蒋朝阳^{2*}, 郭靖¹

¹吉首大学医学院, 湖南 吉首

²吉首大学第四临床学院, 湖南 怀化

收稿日期: 2024年10月6日; 录用日期: 2024年10月31日; 发布日期: 2024年11月7日

摘要

急性呼吸窘迫综合征(ARDS)是一种由多个内部和外部因素引起的临床综合征,其显著特征包括急性弥漫性肺损伤和顽固性低氧血症。在影像学检查中,ARDS通常表现为双肺的弥漫性渗出性改变。大多数ARDS患者可能需要有创机械通气支持来维持氧合和通气,尽管机械通气在抢救生命中起到了重要作用,但也可能导致某些并发症。因此,及时且准确的撤机对于改善重症患者的预后极为重要。膈肌作为撤机后自主呼吸的主要吸气肌,其功能对于脱机的成功具有决定性作用。膈肌超声被认为是一种无侵入性且容易在床边使用的检测工具,已有研究证明它可以准确并迅速地判断膈肌的功能问题。这项技术是通过观察膈肌的活动性、厚度和增厚率来评估其功能的,这为确定撤机的时机提供了重要的依据。本文探讨了使用膈肌超声在评估急性呼吸窘迫综合征患者脱机过程中的应用价值。

关键词

急性呼吸窘迫综合征, 膈肌超声, 机械通气, 撤机

Application Value of Diaphragmatic Ultrasound in Assessing Deconditioning in Patients with Acute Respiratory Distress Syndrome

Wanting Su¹, Chaoyang Jiang^{2*}, Jing Guo¹

¹Medical College of Jishou University, Jishou Hunan

²The Fourth Clinical College of Jishou University, Huaihua Hunan

*通讯作者。

文章引用: 苏婉婷, 蒋朝阳, 郭靖. 膈肌超声评估急性呼吸窘迫综合征患者脱机的应用价值[J]. 临床医学进展, 2024, 14(11): 393-399. DOI: 10.12677/acm.2024.14112892

Abstract

Acute respiratory distress syndrome (ARDS) is a clinical syndrome caused by multiple internal and external factors, and its distinguishing features include acute diffuse lung injury and persistent hypoxemia. On imaging, ARDS usually presents as diffuse exudative changes in both lungs. Most patients with ARDS may require invasive mechanical ventilation support to maintain oxygenation and ventilation, and although mechanical ventilation plays an important role in saving lives, it may also lead to certain complications. Therefore, timely and accurate machine withdrawal is extremely important to improve the prognosis of critically ill patients. The function of the diaphragm, as the main inspiratory muscle for spontaneous breathing after machine withdrawal, is decisive for the success of deconditioning. Diaphragmatic ultrasound is recognized as a noninvasive and easy-to-use testing tool at the bedside, and has been shown to accurately and rapidly determine functional problems of the diaphragm. This technique assesses the function of the diaphragm by looking at its mobility, thickness and rate of thickening, which provides an important basis for determining the timing of withdrawal. This article discusses the value of using diaphragmatic ultrasound in assessing the process of deconditioning in patients with acute respiratory distress syndrome.

Keywords

Acute Respiratory Distress Syndrome, Diaphragmatic Ultrasound, Mechanical Ventilation, Withdrawal

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 急性呼吸窘迫综合征的概述

急性呼吸窘迫综合征(ARDS)是一种严重的呼吸系统疾病,其主要特点包括急性弥漫性肺损伤和难以纠正的低氧血症。其显著的病理生理变化包括肺容积减少、肺顺应性降低和严重通气/血流比例失调。患者通常会出现呼吸困难、低氧血症和肺部渗出性改变等临床症状。ARDS 的发生常由多种因素引起,如感染、创伤、烧伤和非心源性肺水肿等。这种病症常导致严重的肺功能受损,气体交换受阻,最终可能导致多器官功能衰竭(MODS),严重威胁生命[1],目前的研究表明,ARDS 的病死率大约在 30%~40%之间。然而,对于病情较重的患者,特别是那些合并 MODS 或严重感染的患者,病死率可能高达 50%~60%或更高。Ashbaugh 等人在 1967 年首次报道了 ARDS [2]。在 1994 年,美国和欧洲的专家首次制定了诊断 ARDS 的具体标准。目前我们普遍采用的是 2012 年修订的“柏林定义”。该定义依据患者的血氧含量与吸入氧浓度的比值(P/F 比值),将 ARDS 分为轻度、中度和重度三个等级,并指出不同等级患者的死亡率存在显著差异[3]。2016 年一项全球性研究显示,ARDS 患者的住院死亡率高达 40%,其中中度和重度患者的死亡率分别为 40.3%和 46.1%,明显高于轻度患者的 34.9% [4]。机械通气是治疗 ARDS 患者的重要手段,能够提供足够的氧气和适当的通气量以维持生命功能。这种治疗方法有助于减少肺泡过度膨胀和损伤,防止进一步的肺损伤和炎症反应,并为治疗原发病提供机会。然而,长期使用机械通气可能导致呼吸肌疲劳和肺损伤等并发症。因此,及时有效地脱离机械通气对 ARDS 患者的康复和预后至关重要。

2. 脱机评估

在患者接受气管插管的首日, 医生就应开始规划脱机方案, 并且应每日评估患者是否具备脱机的条件。脱机过程一般包括筛查、自主呼吸试验(Spontaneous Breathing Trial, SBT)以及气道通畅性的评估。目前, SBT 是最常用来预测机械通气患者是否能够成功拔管的方法[5]。研究表明, 撤机过程中的时间占据了 ICU 机械通气总时间的 40%~50%。在临床实践中, 医生在开始撤机前需要进行以下评估: 1) 导致机械通气(MV)的主要病因已经好转或消除; 2) $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 达到 150~300 mmHg, PEEP 保持在 5~8 cmH₂O, FiO_2 不超过 0.4, pH 值不低于 7.25; 3) 患者血流动力学状态稳定, 未使用血管活性药物或者仅使用小剂量, 而且无显著低血压; 4) 患者具备良好的咳嗽能力; 5) 体温低于 38℃; 6) 具备自主呼吸能力。满足上述条件后, 可进行 SBT 自主呼吸试验。SBT 自主呼吸试验成功标准包括: 1) FiO_2 低于 40%, SPO_2 不低于 85%~90%, PaO_2 达到 50~60 mmHg, pH 值不低于 7.32, PaCO_2 增幅不超过 10 mmHg; 2) 稳定的血流动力学, 心率小于 120 次/分, 心率变化不超过 20%, 收缩压在 90~180 mmHg 之间, 血压变化不超过 20%; 3) 呼吸频率不超过 35 次/分, 呼吸频率变化不超过 50%; 4) 无嗜睡、躁动等精神状态异常表现; 5) 没有胸腹反向运动等呼吸做功增加的迹象。若 SBT 试验成功, 则可尝试将患者撤离呼吸机。成功撤离呼吸机后, 如果患者在 48 小时内不需要重新插管或机械通气支持, 则认定为撤机成功; 若在此期间需要再次插管或机械辅助通气, 则为撤机失败[6]。然而, 即使遵循上述 SBT 撤机指导, 研究发现撤机失败率依然较高, 约为 15% [7]。此外, 在延长机械通气时间的患者中, 约 80% 存在膈肌功能障碍问题[8]。

3. 膈肌超声概述

3.1. 原理及优势

膈肌超声是一种医学成像技术, 通过超声波对膈肌的结构和功能进行检测与评估。其原理基于超声波在体内传播时, 与不同密度和弹性的组织界面发生反射。这些反射波被超声探头接收, 并经过特定的成像系统转换为可视图像。膈肌超声可以在床旁进行, 实时测量患者的膈肌厚度、膈肌增厚分数以及膈肌的移动度等指标。这项技术具有无创、操作方便、能够动态监测以及可重复等优点, 因此在临床应用中越来越普及[9]。研究表明, 超声评估膈肌功能在预测需要机械通气患者的脱机能力、分析脱机失败原因以及评估早期康复治疗的效果方面具有重要价值。Ata Mahmoodpoor 等人在一项系统评价中分析了 19 项队列研究[10], 共涉及 1114 名患者, 比较了超声诊断指标的准确性, 研究指出, 膈肌超声, 尤其是膈肌厚度变化率和运动幅度, 可以有效预测撤机的成功与否, 超声能够动态监测膈肌功能的恢复进展, 特别是在早期康复阶段, 帮助判断患者是否已经准备好撤机, 对于膈肌功能较差的患者, 脱机失败风险较高, 因此超声评估在优化撤机过程中具有重要价值。这些优势使膈肌超声成为一种有效的临床工具, 为患者的呼吸功能评估提供了重要的信息支持。因此, 进一步推广和应用膈肌超声技术将有助于改善相关疾病患者的管理及治疗效果[11]。

3.2. 应用

膈肌是最重要的呼吸肌, 承担着约 75% 的呼吸做功。利用超声检测膈肌厚度和膈肌移动度可评价膈肌功能的优劣, 继而协助临床医师作出相应的决策。膈肌超声作为一种新型的膈肌功能评价工具, 该指标对机械通气撤机效果预测有潜在的价值, 临床上值得推广。超声波检查技术能够非常直观地对膈肌进行检测和评价, 并能实时监控膈肌的各项功能活动。在现阶段, B 型和 M 型的超声技术在医疗领域得到了广泛应用。B 型超声可以在某一特定时间点揭示膈肌的情况, 与此同时, M 型超声能够持续地揭示膈肌的运动趋势[12]。具体操作如下: 首先在患者腋窝前线水平方向上放置超声波探测器, 通过观察呼吸过程中肺部的滑动状况来评估膈肌质地, 然后沿着尾部方向移动探测器, 以确保精确地确定胸部下方和横

膈膜的接触位置[13]。膈肌超声在预测机械通气患者脱离呼吸机的可能性方面展现出重要的潜力。研究表明,膈肌的运动能力和厚度变化率在评估撤机成功率时具有较高的敏感性和特异性。此外,膈肌超声可以作为评估机械通气患者脱机的重要工具[14]。通过监测膈肌的厚度和移动度等相关指标,医生能够有效评估康复训练对膈肌功能的影响。值得注意的是,与其他类型的超声检查(例如心脏超声和肺部超声)结合使用,可以显著提高对患者脱机结局的预测准确性。研究发现,综合评估左心房压力、肺部超声评分以及膈肌功能障碍的预测模型在预测撤机结果方面表现出了较高的准确性。这一发现强调了多种超声评估指标联合使用的必要性,为临床决策提供了更为可靠的数据支持。

3.3. 关键指标

膈肌超声评估主要观测的指标有三个,它们分别是膈肌厚度、膈肌运动幅度和膈肌厚度变化率。这些指标在临床评估中扮演重要角色,能够帮助医生评估膈肌功能和结构的变化状态。首先,膈肌厚度是反映膈肌结构状况的重要指标。呼气末时膈肌最薄,吸气末时膈肌最厚,因此在这两个时间点分别测量厚度。膈肌厚度减少往往表示膈肌萎缩或肌肉质量的丧失,如长期机械通气后出现的膈肌萎缩。而膈肌厚度增加则可能与膈肌肥大或炎症反应相关。因此,通过膈肌厚度的测量,能直观地了解膈肌的结构变化。其次,膈肌运动幅度是衡量膈肌在呼吸过程中的上下移动距离,在患者进行深吸气和深呼气时,记录膈肌的最高和最低位置,并计算其间的运动幅度。正常情况下,膈肌的运动幅度在男性和女性中分别约为1.8至2.5厘米和1.6至2.4厘米。若运动幅度减少,可能提示膈肌疲劳、神经肌肉功能障碍或膈肌局部病变。通过这一指标,能有效评估膈肌在不同呼吸状态下的活动能力[15]。最后,膈肌厚度变化率是评估膈肌收缩功能的重要参数,以百分比表示。计算公式为膈肌厚度变化率 = [(吸气末的膈肌厚度 - 呼气末的膈肌厚度)/呼气末的膈肌厚度] × 100%。正常膈肌厚度变化率应大于20%~30%,若低于这个范围,可能提示膈肌收缩功能受损,如膈肌无力、神经损伤或长时间机械通气等情况下常见[16]。这一指标能从收缩功能角度更全面地反映膈肌的健康状态。除了上述三个主要指标,膈肌超声评估还可以通过观察膈肌形态和对称性等辅助指标来检测局部病变或异常结构。通过这些综合评估,医生能够全面了解膈肌的功能状态,为临床决策提供重要依据,特别是在辅助评估ARDS患者脱机管理方面。总体来说,膈肌超声评估的这三个关键指标为临床提供了一种非侵入性、实时且重复性强的评估工具,具有显著的临床应用价值。

4. 膈肌功能在 ARDS 患者中的变化

在急性呼吸窘迫综合征(ARDS)患者中,膈肌功能的变化是一个重要且常见的临床问题,直接影响患者的呼吸效率和康复进程。ARDS是一种由多种病因引起的急性、广泛性肺损伤,导致严重的低氧血症和呼吸困难。在这种病理状态下,膈肌作为主要的呼吸肌,受到多重因素的影响,其功能变化具有复杂的病理生理背景。首先,ARDS病理过程中炎症反应和氧化应激对膈肌造成的直接损伤是膈肌功能改变的主要原因之一。炎症介质和自由基的过度释放可导致膈肌纤维损伤、细胞凋亡和肌肉蛋白降解,进而造成膈肌疲劳和无力。这种炎症引发的损伤不仅削弱了膈肌的收缩能力,还导致膈肌纤维的萎缩和结构性重塑,使膈肌变得更加脆弱。其次,ARDS患者通常需要长时间依赖机械通气以维持生命。这种被动的通气方式导致膈肌缺乏必要的自主运动,从而引起“废用性”萎缩[17]。缺乏自发的机械负荷训练会使膈肌肌肉纤维逐渐变薄,肌力减弱,导致机械通气相关膈肌无力(VIDD)。长期机械通气还可能导致膈肌组织的纤维化和弹性降低,进一步恶化膈肌功能。此外,ARDS患者全身代谢状态的改变,如营养不良和代谢性酸中毒等,也对膈肌功能产生负面影响。营养不良使膈肌缺乏必要的蛋白质和能量供给,导致其萎缩和功能减退。代谢性酸中毒通过降低细胞内pH值,干扰膈肌纤维的正常代谢和能量利用,损害肌

肉收缩功能。另一方面, ARDS 患者常常伴有脓毒症和多器官功能衰竭等合并症, 这些系统性疾病通过多种途径加重膈肌功能障碍。例如, 脓毒症引发的全身性炎症反应综合征(SIRS)不仅加剧肺部炎症, 还通过系统性炎症介质对膈肌造成进一步损害。综合来看, ARDS 患者的膈肌功能变化是多重因素共同作用的结果, 包括直接的炎症损伤、机械通气引起的废用性萎缩、全身代谢异常以及合并症的相互影响。这些复杂的病理生理机制导致膈肌收缩力下降、耐力减弱和结构性损伤, 使患者在撤离机械通气和康复过程中面临巨大挑战。因此, 了解 ARDS 对膈肌功能的具体影响机制, 并采取针对性的干预措施, 对于提高患者脱机成功率和改善预后具有重要意义。

5. 膈肌功能与脱机的关系

在机械通气过程中, 脱机是一个至关重要的阶段。然而, 统计数据表明, 大约有 25% 的机械通气患者会面临脱机困难。导致脱机困难的因素多种多样, 主要包括通气不足、呼吸负担增加、心功能衰竭以及呼吸肌群的疲劳等现象[18]。膈肌作为主要的吸气肌, 占整体呼吸肌做功的 75% 至 80%。其关键功能在于通过收缩和放松来调节胸腔和腹腔的容积变化, 从而实现肺部通气。在膈肌收缩时, 它向下移动, 增加胸腔容积, 增强负压, 将空气吸入肺中; 在膈肌放松时, 它向上回缩, 减小胸腔容积, 将空气排出。长期以来, 机械通气患者的膈肌力量往往会显著下降。这是由于骨骼肌长时间处于静止状态, 导致收缩力和肌纤维质量的减少, 引发废用性萎缩。据研究报道, 膈肌废用性萎缩的速度比其他骨骼肌快 8 倍[19]。这种力量削弱会导致拔管过程复杂化, 并延长依赖机械辅助通气的时间。长时间使用机械通气还会进一步影响膈肌功能。在机械通气过程中, 膈肌容易发生去负荷性失活和废用性萎缩。这会触发氧化应激过程, 导致肌纤维中蛋白质合成减少、降解增加, 进而引起膈肌的结构重构或损伤。结果是膈肌的收缩功能下降, 导致患者撤机困难[20]。

6. 膈肌超声评估在 ARDS 患者脱机中的应用

在急性呼吸窘迫综合征(ARDS)患者的撤机过程中, 膈肌超声作为一个实时、动态的评估工具, 能够协助临床医生制定科学而精准的决策[21]。在具体应用中, 医生可以每日使用膈肌超声来监测患者的膈肌功能状态。通过记录膈肌厚度、活动度和增厚率的变化, 来判断患者是否具备脱机的条件。通过膈肌超声的实时监测, 医生可以基于收集到的膈肌功能数据, 量身定制个性化的撤机计划, 从而提高撤机的成功率。举例来说, 对于那些膈肌厚度显著减少、活动度下降的患者, 可以考虑延长机械通气的时间, 以便给予患者更多的恢复时间。此外, 还应进行适当的康复训练, 以增强膈肌力量。膈肌超声不仅适用于撤机前的评估, 还能在撤机过程中用于动态调整机械通气的参数。例如, 当监测到患者的膈肌活动度逐渐恢复时, 医生可以逐步减少正压通气支持, 从而降低机械通气对膈肌的“负荷效应”, 促进膈肌功能恢复到正常水平。膈肌功能障碍是导致撤机失败的一个关键因素。通过膈肌超声的精确评估, 临床医生能够准确判断患者的膈肌功能状态, 并选择最佳的撤机时机。这不仅可以显著提高撤机的成功率, 还能减少再插管的概率。研究数据显示, 采用膈肌超声评估的撤机策略, 其成功率比传统方法高出约 15%。综上所述, 膈肌超声在 ARDS 患者撤机中的应用, 不仅有助于实时动态地评估膈肌功能, 还能够通过科学精准的监测数据制定个性化的撤机策略, 有效提高撤机成功率和减少再插管率, 从而优化患者的临床预后。

7. 小结与展望

膈肌超声成像技术对操作者的临床经验要求较高, 医生需要经过持续的培训才能熟练掌握这项技术。同时, 加强与重症医学科医生的交流与合作对于为重症患者提供更有效的临床诊治支持至关重要。由于

膈肌超声具备安全性、便利性、经济性以及可重复性等多方面的优点，它正在逐步转变为评估机械通气患者何时需要撤机的关键工具。在临床工作中，不同个体对膈肌电活动及血流动力学指标的敏感性有很大差别，因此需要针对不同人群进行针对性监测以确保结果准确可靠。现阶段，绝大部分的相关研究都是基于观察的，其结论之间存在明显的不同，这种差异可能与患者的群体特征和非膈肌相关因素有关。在临床应用中，部分研究者认为单纯依靠呼吸肌电图或运动试验难以客观评价膈肌活动情况。不过，借助更深入的亚组分析以及多器官超声的联合评估系统，我们期望能够提升评估的准确度。在呼吸衰竭患者中，膈肌张力降低是导致呼吸衰竭加重的主要原因之一。随着超声波技术的不断发展和新技术的广泛应用，我们在未来能够从多个角度对膈肌的结构和功能进行更为精确的定性和定量分析。此外，在治疗过程中可根据病情变化调整药物剂量并及时监测肺血流动力学参数等也有助于指导个体化用药。膈肌超声技术具有成为评估 ARDS 患者呼吸功能和确定撤机时间的关键工具的潜力，它可以为临床决策和医疗安全提供重要的支持。

参考文献

- [1] Beitler, J.R., Thompson, B.T., Baron, R.M., Bastarache, J.A., Denlinger, L.C., Esserman, L., *et al.* (2022) Advancing Precision Medicine for Acute Respiratory Distress Syndrome. *The Lancet Respiratory Medicine*, **10**, 107-120. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(21\)00157-0](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(21)00157-0)
- [2] Ashbaugh, D., Boyd Bigelow, D., Petty, T. and Levine, B. (1967) Acute Respiratory Distress in Adults. *The Lancet*, **290**, 319-323. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(67\)90168-7](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(67)90168-7)
- [3] Ranieri, V.M., Rubenfeld, G.D., Thompson, B.T., *et al.* (2012) Acute Respiratory Distress Syndrome: The Berlin Definition. *Journal of the American Medical Association*, **307**, 2526-2533.
- [4] Bellani, G., Laffey, J.G., Pham, T., Fan, E., Brochard, L., Esteban, A., *et al.* (2016) Epidemiology, Patterns of Care, and Mortality for Patients with Acute Respiratory Distress Syndrome in Intensive Care Units in 50 Countries. *Journal of the American Medical Association*, **315**, 788-800. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.0291>
- [5] Subirà, C., Hernández, G., Vázquez, A., Rodríguez-García, R., González-Castro, A., García, C., *et al.* (2019) Effect of Pressure Support vs T-Piece Ventilation Strategies during Spontaneous Breathing Trials on Successful Extubation among Patients Receiving Mechanical Ventilation. *Journal of the American Medical Association*, **321**, 2175-2182. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.7234>
- [6] Burns, K.E.A., Rizvi, L., Cook, D.J., Lebovic, G., Dodek, P., Villar, J., *et al.* (2021) Ventilator Weaning and Discontinuation Practices for Critically ILL Patients. *Journal of the American Medical Association*, **325**, 1173-1184. <https://doi.org/10.1001/jama.2021.2384>
- [7] Decavèle, M., Rozenberg, E., Niérat, M., Mayaux, J., Morawiec, E., Morélot-Panzini, C., *et al.* (2022) Respiratory Distress Observation Scales to Predict Weaning Outcome. *Critical Care*, **26**, Article No. 162. <https://doi.org/10.1186/s13054-022-04028-7>
- [8] Dong, Z., Liu, Y., Gai, Y., Meng, P., Lin, H., Zhao, Y., *et al.* (2021) Early Rehabilitation Relieves Diaphragm Dysfunction Induced by Prolonged Mechanical Ventilation: A Randomized Control Study. *BMC Pulmonary Medicine*, **21**, Article No. 106. <https://doi.org/10.1186/s12890-021-01461-2>
- [9] Pour, Y.I. and Zandifar, A. (2024) Diaphragm Muscle Parameters as a Predictive Tool for Weaning Critically ILL Patients from Mechanical Ventilation: A Systematic Review and Meta-Analysis Study. *European Journal of Translational Myology*, **34**, Article 12642.
- [10] Mahmoodpoor, A., Fouladi, S., Ramouz, A., Shadvar, K., Ostadi, Z. and Soleimanpour, H. (2022) Diaphragm Ultrasound to Predict Weaning Outcome: Systematic Review and Meta-Analysis. *Anaesthesiology Intensive Therapy*, **54**, 164-174. <https://doi.org/10.5114/ait.2022.117273>
- [11] Dot, I., Pérez-Terán, P., Francés, A., Díaz, Y., Vilà-Vilardell, C., Salazar-Degracia, A., *et al.* (2022) Association between Histological Diaphragm Atrophy and Ultrasound Diaphragm Expiratory Thickness in Ventilated Patients. *Journal of Intensive Care*, **10**, Article No. 40. <https://doi.org/10.1186/s40560-022-00632-5>
- [12] 南淑良, 穆靛, 刘莉, 等. 解剖 M 型超声测定膈肌运动参数预测机械通气患者脱机结果的临床研究[J]. 中国临床医学影像杂志, 2021, 32(9): 616-619+639.
- [13] 唐智生. 膈肌功能障碍的超声检测进展[J]. 中国实用医药, 2023, 18(10): 177-180.
- [14] Aljibali, A.S. (2023) Ultrasound Utilization in the Diagnosis of Diaphragm Dysfunction Compared to Other Modalities:

A Retrospective Study. *International Journal of Health Sciences*, **17**, 11-17.

- [15] Vetrugno, L., Guadagnin, G.M., Barbariol, F., Langiano, N., Zangrillo, A. and Bove, T. (2019) Ultrasound Imaging for Diaphragm Dysfunction: A Narrative Literature Review. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, **33**, 2525-2536. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2019.01.003>
- [16] Dubé, B., Dres, M., Mayaux, J., Demiri, S., Similowski, T. and Demoule, A. (2017) Ultrasound Evaluation of Diaphragm Function in Mechanically Ventilated Patients: Comparison to Phrenic Stimulation and Prognostic Implications. *Thorax*, **72**, 811-818. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2016-209459>
- [17] Levine, S., Nguyen, T., Taylor, N., Friscia, M.E., Budak, M.T., Rothenberg, P., *et al.* (2008) Rapid Disuse Atrophy of Diaphragm Fibers in Mechanically Ventilated Humans. *New England Journal of Medicine*, **358**, 1327-1335. <https://doi.org/10.1056/nejmoa070447>
- [18] Demoule, A., Jung, B., Prodanovic, H., Molinari, N., Chanques, G., Coirault, C., *et al.* (2013) Diaphragm Dysfunction on Admission to the Intensive Care Unit. Prevalence, Risk Factors, and Prognostic Impact—A Prospective Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **188**, 213-219. <https://doi.org/10.1164/rccm.201209-1668oc>
- [19] 曹成伟, 陈秋玲. 机械通气对急性颅脑损伤术后呼吸机相关膈肌功能障碍的临床研究[J]. 临床肺科杂志, 2018, 23(4): 710-714.
- [20] Palkar, A., Narasimhan, M., Greenberg, H., Singh, K., Koenig, S., Mayo, P., *et al.* (2018) Diaphragm Excursion-Time Index. *Chest*, **153**, 1213-1220. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.01.007>
- [21] 黄园琴, 杨佳, 左文霞, 等. 膈肌超声预测心脏术后急性呼吸窘迫综合征患者撤机的临床研究[J]. 重庆医学, 2022, 51(14): 2401-2404+2409.