

• 专家共识 •

重症患者膈肌超声临床应用专家共识(2026 版)

重症患者膈肌超声临床应用专家共识(2026 版)编写组 广州市康复医学会重症康复分会

广东省医学会重症医学分会

通信作者:黄道政,南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)重症医学科,医务处,广州 510080, Email: huangdao Zheng@gdph.org.cn;覃铁和,广东省老年医学研究所老年重症医学科,广州 510080, Email: dr.qin@qq.com

【摘要】 膈肌超声作为一种便捷、无创的可视化床旁监测技术,已逐渐成为重症患者膈肌形态与功能评估的重要工具。该技术能够通过实时监测膈肌移动度、厚度、增厚率等关键指标,早期识别膈肌功能障碍,为重症患者的呼吸监测与支持提供重要依据。在机械通气管理和撤机的策略制定及实施过程中,膈肌超声监测有助于提升撤机成功率并改善患者预后。目前,膈肌超声技术正处于快速普及与持续完善的关键阶段,但尚未形成统一的操作方案及评估标准。为此,广州市康复医学会重症康复分会与广东省医学会重症医学分会组织国内长期从事临床一线工作的多学科专家(涵盖重症医学、超声医学、呼吸治疗等领域)组成共识编写组,严格遵循循证医学原则,系统检索并综合评估国内外最新膈肌超声相关临床指南、专家共识及高质量临床研究证据,结合我国临床实践特点与专家临床实践经验,通过循证论证和多轮研讨,最终形成了《重症患者膈肌超声临床应用专家共识(2026 版)》。共识最终得出 21 条推荐意见,内容涵盖膈肌超声的适应证、技术建议、检查流程、临床应用、多学科协作等多个层面,旨在推动膈肌超声技术在重症患者中的规范化应用与临床推广。

【关键词】 膈肌超声;机械通气;膈肌功能障碍;临床应用;专家共识

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515220052)

实践指南注册: 国际实践指南注册与透明化平台(PREPARE-2025CN1074)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20260310-00109

Expert consensus on the clinical application of diaphragm ultrasound in critically ill patients (2026 edition)

Writing Group of the Expert consensus on the clinical application of diaphragm ultrasound in critically ill patients (2026 edition), Critical Rehabilitation Branch of Guangzhou Rehabilitation Medicine Association, Critical Care Medicine Branch of Guangdong Medical Association

Corresponding author: Huang Daozheng, Department of Critical Care Medicine, Medical Affairs Department, Guangdong Provincial People's Hospital, Southern Medical University (Guangdong Academy of Medical Sciences), Guangzhou 510080, China, Email: huangdao Zheng@gdph.org.cn; Qin Tiehe, Department of Geriatric Critical Care Medicine, Guangdong Provincial Geriatrics Institute, Guangzhou 510080, China, Email: dr.qin@qq.com

【Abstract】 Diaphragm ultrasound, as a convenient and non-invasive bedside visual monitoring technique, has gradually become a vital tool for assessing the morphology and function of the diaphragm in critically ill patients. By real-time monitoring of key indicators including diaphragmatic excursion, thickness, and thickening fraction, diaphragm ultrasound allows the early identification of diaphragmatic dysfunction, providing crucial evidence for respiratory monitoring and support for critically ill patients. In the formulation and implementation of mechanical ventilation management and weaning strategies, diaphragm ultrasound helps improve the weaning success rates and optimize the prognosis of critically ill patients. Currently, diaphragm ultrasound is in a critical stage of rapid popularization and continuous improvement, while standardized operational protocols and evaluation criteria for clinical practice remain lacking. To address this gap, the Critical Rehabilitation Branch of Guangzhou Rehabilitation Medicine Association and the Critical Care Medicine Branch of Guangdong Medical Association jointly organized a multidisciplinary consensus writing committee composed of domestic frontline clinical experts covering critical care medicine, ultrasound medicine, respiratory therapy and other related disciplines. In strict accordance with the principles of evidence-based medicine, the writing committee systematically retrieved and comprehensively evaluated the latest domestic and international guidelines, expert consensus and high-quality clinical research evidence on diaphragm ultrasound. Combined with the characteristics of clinical practice in China and senior clinical experience of participating experts, the consensus was finalized through evidence-based demonstration and multiple rounds of seminars, namely the *Expert consensus on the clinical application of diaphragm ultrasound in critically ill patients (2026 edition)*. A total of 21 recommendations have been formulated in this consensus, covering multiple aspects including the indications, technical specifications, examination procedures, clinical applications and multidisciplinary collaboration of diaphragm ultrasound, aiming to promote the standardized application of diaphragm ultrasound technology in the management of critically ill patients.

【Key words】 Diaphragm ultrasound; Mechanical ventilation; Diaphragmatic dysfunction; Clinical application; Expert consensus

Fund program: Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2024A1515220052)

Practice Guideline Registration: Practice Guideline Registration for Transparency (PREPARE-2025CN1074)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20260310-00109

机械通气是重症监护病房(intensive care unit, ICU)救治危重患者的核心生命支持技术,其临床价值已得到广泛认可。膈肌作为呼吸运动的核心动力来源,其收缩能力和耐力等功能状态,不仅直接影响机械通气患者的撤机进程与结局,更与患者的临床预后密切相关。现有研究表明,膈肌功能障碍(包括机械通气相关性膈肌功能障碍)可导致撤机困难、机械通气时间和 ICU 住院时间延长、总体医疗费用增加等一系列不良后果,是重症医学领域持续关注的重点^[1]。因此,在机械通气治疗过程中开展膈肌功能的动态监测与评估,正逐步成为临床规范化管理的重要组成部分;相关监测指标可为膈肌功能保护、通气策略优化及撤机时机与策略的判断提供关键参考依据。

膈肌超声具有床旁可及、无创、可重复且实时动态监测的优势,可精准量化评估膈肌移动度(又称膈肌位移)、厚度、增厚率等关键指标,为膈肌功能障碍的早期识别、病程追踪与个体化干预提供了客观依据和技术保障。随着膈肌超声在 ICU 的快速普及,如何进一步规范操作流程、统一评估标准并实现多参数驱动的临床决策,已成为 ICU 领域亟待解决的重要课题。

基于上述背景,广州市康复医学会重症康复分会与广东省医学会重症医学分会组织国内长期从事膈肌超声临床和研究工作的多学科专家(涵盖重症医学、超声医学、呼吸治疗等领域)组成共识编写组,严格遵循循证医学原则,系统检索并综合评估国内外最新膈肌超声相关临床指南、专家共识及高质量临床研究证据,结合我国临床实践特点与专家临床实践经验,通过循证论证和多轮研讨,最终形成了《重症患者膈肌超声临床应用专家共识(2026 版)》。本共识围绕膈肌超声在重症患者中的关键应用环节,系统规范了监测适应证、技术标准、检查流程、术语定义等,旨在推动膈肌超声技术在重症患者中的规范化与同质化实施,为多学科协作、临床决策及科研教学提供统一参考,从而提升重症患者救治效率并改善预后。

1 专家共识制定方法

根据《中华医学杂志》发表的《中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022 版)》^[2]制定本

共识。本共识编写组由长期从事膈肌超声相关领域临床和科研工作的多学科专家(涵盖重症医学、超声医学与呼吸治疗等专业及方法学专家)组成,于 2025 年 4 月启动编制工作,经多轮集体讨论与修订,2026 年 2 月完成终稿,最终形成 21 条推荐意见。本共识在国际实践指南注册与透明化平台正式登记(注册号:PREPARE-2025CN1074)。

1.1 共识目标人群:本共识适用于所有需接受膈肌超声评估的重症患者,涵盖成人及老年人群,适用于有创或无创机械通气及自主呼吸阶段的患者。儿童、婴幼儿和新生儿不在适用范围内。

1.2 共识使用者:本共识适用于包括重症医学科、超声科、呼吸科、急诊科及其他相关学科在内的从事膈肌超声临床应用操作的专业技术人员。

1.3 共识制定工作组:共识制定工作组由重症医学、超声医学、呼吸治疗、康复医学等相关学科长期从事膈肌超声临床与研究的专家组成,设执笔组和审校组。执笔专家组:负责共识注册、计划书起草、核心临床问题的构建与筛选、德尔菲问卷设计及结果分析;开展文献检索、数据提取、证据合成,撰写共识初稿,整合意见完成修订与统稿。审校专家组:明确审核标准,参与核心问题的初判;审阅初稿的准确性与可操作性,多轮深度审核内容的科学性、严谨性,协调争议问题,终稿复核意见落实情况并出具审核结论。

1.4 调研临床问题形成过程:为确保本共识的临床相关性与实用性,共识制定工作组系统开展了临床问题的调研与遴选工作。具体步骤如下:①问题征集:通过问卷调查、专家访谈、临床一线医师座谈会等方式,向全国多中心、多层级(包括三级医院、区域医疗中心及基层医院)的超声科、重症医学科、呼吸科、急诊科、康复科等相关科室医师广泛征集膈肌超声在临床评估、治疗决策、动态监测、预后判断等方面现存的实际问题。②问题整合与去重:工作组对征集到的初始问题进行归类、剔重、合并,形成临床应用问题初始清单。③问题优选:邀请具有代表性地域与学术背景的专家组成员,将收集的意见清单采用匿名方式进行一轮专家函询,基于临床重要性、研究证据的可获得性、临床可推广性等维度,分为“重要”和“不重要”,选择被评为“重要” $\geq 75\%$

的问题,并经专家组全体成员在线讨论确认,最终纳入本共识拟解决的关键临床问题。该过程确保了后续文献检索与证据评价的针对性和高效性。

1.5 文献检索:本共识检索的中文文献数据库包括中国知网、万方数据知识服务平台和中国生物医学文献服务系统(SinoMed),英文文献数据库包括美国国立医学图书馆 PubMed 数据库、荷兰医学文摘 Embase 数据库、Cochrane 图书馆数据库和科学网(Web of Science),对这些数据库进行系统检索^[3],检索时间范围覆盖各库创立至 2025 年 6 月 30 日。纳入文献类型包括已发表的综述、指南、共识、随机对照试验、队列研究、病例对照研究、病例系列报告;排除动物实验、与主题无关的文献,同时排除儿童、婴幼儿、新生儿相关研究。

英文文献检索策略采用主题词与自由词联合的方式,核心词组:diaphragm ultrasound/diaphragmatic ultrasonography/diaphragmatic US/diaphragm echo; diaphragmatic dysfunction/ventilator-induced diaphragm dysfunction/diaphragm weakness/diaphragm atrophy; diaphragm excursion/diaphragmatic excursion/diaphragm thickening fraction; respiratory muscle ultrasound/ventilatory muscles ultrasound; mechanical ventilation/weaning/extubation/critical care/intensive care/critically ill。中文检索词包括膈肌超声、膈肌功能障碍、膈肌无力、膈肌萎缩、呼吸肌超声、机械通气、撤机、拔管、重症监护、ICU,并采用布尔逻辑“AND/OR”进行组合检索,最终形成文献库,用于循证评价与德尔非法评议。

1.6 证据等级与推荐形成:本共识基于对膈肌超声相关指南、共识及原始研究的系统检索与评价。由 2 名研究者独立采用推荐意见分级的评估、制定及评价(Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation, GRADE)方法对证据质量进行评价(考量偏倚风险、不精确性、不一致性等因素),并分为高(A)、中(B)、低(C)、极低(D)4 级。推荐强度分为强推荐(I)、弱推荐(II)及良好实践声明(Good Practice Statement, GPS)。GPS 用于缺乏直接研究证据但专家组认为对临床实践至关重要的条目。最终推荐强度的形成除依据证据质量外,还综合考量了干预措施的利弊平衡、患者价值观与偏好、资源可行性等因素^[4]。

1.7 条目遴选与审议流程:初步条目通过电子邮件匿名发送给由 17 名来自相关领域的权威专家组成

的审校组专家进行德尔非法评议。审校组专家评分分为两个维度:①证据匹配度评分(总分 1~5 分,1 分=完全不认可,5 分=完全认可):评估推荐意见背后证据的质量与相关性,确保依据充分且有根据;②推荐合理性评分(总分 1~5 分):评估推荐意见的实际可操作性和在临床中的适用性。双维度平均分都 ≥ 3.5 分:直接保留,纳入共识;任一维度平均分为 2.5~3.4 分:修改表述或补充细节后,下一轮复核打分,达标保留;任一维度平均分 < 2.5 分:直接剔除,不纳入共识。经过两轮德尔菲专家评议后,召开专题会议讨论存在异议的条目,通过投票(赞成率 $\geq 70\%$ 即通过)达成共识^[5],最终共形成了 21 条推荐意见。

1.8 利益冲突声明:本共识制定过程中,所有参与本共识专家研讨会的专家和共识工作组成员均已签署书面利益声明,与医药企业不存在共识相关的利益冲突。

1.9 共识的发布、传播与更新:为了促进共识的传播和临床应用,本共识将在专业期刊发表后,通过学术会议、培训班等形式在全国范围内推广。工作组将定期进行文献检索与证据更新,计划每 3~5 年对共识进行一次修订。

2 术语定义

结合国内外文献,本共识对膈肌超声术语进行了标准化定义,明确了中英文名称、缩写及测量描述,旨在统一临床与科研用语、避免概念混淆,进而提升评估的可比性与可重复性。膈肌超声术语具体内容见表 1。

3 基础理论

呼吸肌是维持有效通气的核心动力系统,由膈肌、肋间肌、腹肌及辅助肌肉(如胸锁乳突肌、斜角肌)构成。其中,膈肌作为主要吸气肌,其解剖结构与功能状态对呼吸、循环功能维护及重症患者康复进程具有重要影响^[6-7]。以下从膈肌解剖生理特征、功能障碍的临床意义及评估方法三方面展开论述。

3.1 膈肌解剖生理与功能管理:膈肌作为呼吸系统的核心动力源,其穹窿状结构横跨胸腹腔交界处,由中心腱与周围肌性部构成,通过膈神经(C3~C5)受脑干呼吸中枢调控,并可受大脑意识中枢随意调节。膈肌生理功能表现:吸气过程,膈肌收缩下移,胸腔容积增大形成负压,驱动空气进入肺部,膈肌与肋间外肌协同作用可显著提升吸气效率;呼气过程,膈肌舒张并回弹,胸腔容积缩小,肺内压力升高迫使气体

表 1 膈肌超声相关标准化用语

中文名称	英文名称(英文缩写)	描述
膈肌超声	diaphragm ultrasound (DUS)	用于评估膈肌的结构与功能的超声技术
膈肌移动度 (膈肌位移)	diaphragm excursion (DE) [diaphragm displacement (DD)]	膈肌在呼吸过程中的位移,常用于评估膈肌功能与呼吸肌运动
膈肌深吸气移动度	deep inspiratory diaphragm excursion (DE-di)	膈肌自平静呼气末至深吸气末的最大位移,用于评估膈肌在深吸气过程中的运动
膈肌最大移动度	maximum diaphragm excursion (DE-max)	膈肌自深呼气末至深吸气末的最大位移,用于评估膈肌在最大呼吸过程中的运动
膈肌厚度	diaphragm thickness (DT)	可在全呼吸周期内测量,通常以呼气末期膈肌厚度作为基线水平
膈肌增厚率	diaphragm thickening fraction (DTF)	膈肌收缩过程中厚度变化分数,用于评估膈肌收缩功能
膈肌平均收缩速度	mean diaphragm contraction velocity (MDCV)	膈肌收缩过程中的平均速度,即位移与收缩时间的比值,反映膈肌的力量和收缩效率
膈肌峰值收缩速度	diaphragm peak contraction velocity (DPCV)	膈肌收缩过程中的峰值瞬时速度,反映膈肌运动过程中最大收缩效率
膈肌峰值舒张速度	diaphragm peak relaxation velocity (DPRV)	膈肌舒张过程中的峰值瞬时速度,反映膈肌运动过程中最大舒张效率
膈肌收缩最大加速度	diaphragmatic contraction acceleration (DCA)	膈肌在收缩过程中加速度的变化,用于评估膈肌的快速反应能力

排出^[1,8-9]。平静呼吸状态下膈肌承担 60%~70% 的呼吸做功(对应 60%~80% 潮气量)^[10]。深吸气时,膈肌收缩产生的胸腔负压还可以促进静脉回流,对循环功能起到一定的调节作用。然而,急性或慢性呼吸系统疾病(如重症肺炎、慢性阻塞性肺疾病等)、脓毒症炎症反应、营养不良、重症疾病相关治疗措施及药物(如机械通气、镇痛镇静剂、神经肌肉阻断剂、激素、血管活性药物等)等因素,均可以导致膈肌收缩力下降、运动幅度降低甚至萎缩,进而削弱呼吸动力,并影响重症患者的预后^[1,11-12]。

膈肌功能管理是提升重症患者(尤其是机械通气患者)救治效果的重要环节,需通过多维度综合干预,从而实现监测评估与保护策略的协同实施。具体措施:① 风险防控:识别并及时处理脓毒性休克、药物不良反应、营养不良等导致膈肌功能障碍的危险因素;② 呼吸肌做功监测:识别异常呼吸模式、呼吸肌疲劳、辅助呼吸肌代偿、人机不同步等诱因,及时采取针对性干预措施;③ 膈肌功能评估:通过膈肌超声监测指标,联合跨膈压、最大吸气压等多参数,实现对膈肌功能状态的精准量化评估;④ 早期干预:在促进自主呼吸功能恢复及个体化滴定呼吸支持参数的基础上,针对膈肌功能受损患者适时引入膈神经起搏或阻抗训练,以强化膈肌力量与耐力,提高撤机成功率及改善临床结局^[13-19]。

3.2 膈肌功能障碍的机制和临床影响:膈肌功能障碍是由多种因素共同影响所导致的膈肌结构和(或)功能异常,在重症患者中的发生率超过 50%,且与患者不良预后显著相关^[20-22]。膈肌病理状态的发生可归纳为三大核心环节:神经驱动异常(涵盖膈神经或中枢驱动层面)、膈肌本体功能损伤,以及胸壁结构

异常。上述病理机制在神经肌肉疾病、慢性呼吸系统疾病及创伤患者中尤为常见^[1,23-24]。重症患者中,脓毒症和机械通气被认为是膈肌功能障碍最重要的危险因素^[12,25-26];此外,全身炎症反应、营养不良及医源性损伤亦不少见^[27]。

膈肌功能障碍病理生理机制复杂,通常呈现多通路并行且相互放大的特点,主要包括:① 炎症反应与氧化应激:脓毒症和全身炎症反应可通过释放肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白细胞介素-1(interleukin-1, IL-1)、IL-6 等炎症介质激活核转录因子- κ B (nuclear factor- κ B, NF- κ B) 等信号通路,引发氧化应激增强、线粒体功能障碍、代谢紊乱及细胞凋亡/自噬升高,从而导致膈肌萎缩及收缩力下降^[26, 28-36];② 蛋白质代谢紊乱与肌肉萎缩:机械通气、心源性休克、血流灌注不足等可促进膈肌蛋白分解增加、合成减少,并通过自噬和蛋白水解途径损伤膈肌纤维^[37-39];③ 神经肌肉驱动受损:神经系统疾病、去神经支配及膈神经变性可导致神经肌肉连接异常、兴奋-收缩耦联重塑及神经营养因子减少,进而影响膈肌收缩能力;④ 呼吸负荷与机械因素:慢性阻塞性肺疾病等导致的肺过度充气可使膈肌处于短缩/扁平化的不利力学位置,而膈肌废用可引起膈肌过度伸展及血流灌注不足,二者均能够增加呼吸做功并降低膈肌运动效率;⑤ 营养与代谢状态异常:营养不良或慢性缺氧可加重膈肌收缩力下降和肌纤维萎缩^[24, 40]。综上所述,膈肌功能障碍的发生通常是炎症、代谢、神经驱动、力学负荷等多种机制相互作用的结果。

临床上,膈肌功能障碍可导致通气功能下降、气道廓清障碍及膈下器官(如肝脏、胃肠道等)功能

障碍,从而显著增加撤机失败、再插管及呼吸衰竭的发生风险,同时延长机械通气时间及 ICU 住院时间^[14, 41-42]。在慢性阻塞性肺疾病和神经系统疾病患者中,膈肌功能障碍可突出表现为运动耐力降低、进行性气促加重,甚至生活质量显著下降。

推荐意见 1:重症患者膈肌功能障碍风险较高,与机械通气撤机失败等不良预后密切相关,建议有条件的单位针对重症患者开展膈肌功能评估。〔证据等级:A;推荐强度:Ⅰ;匹配度评分:(4.50±0.63)分,合理性评分:(4.63±0.62)分〕

3.3 膈肌功能评估方法:膈肌功能的全面评估应采用多模态、分层次的技术体系,整合影像学评估(包括膈肌超声、计算机断层扫描术、X 线和磁共振成像)、生理学检测(肺功能测试)、呼吸力学分析(气道压力、流速曲线测定)、电生理监测(膈肌肌电分析)等模块。不同方法在可及性、侵入性、可重复性与床旁实时性方面差异显著,其临床应用的优缺点见表 2。

推荐意见 2:建议将膈肌超声作为重症患者床旁评估膈肌形态与功能的首选影像学方法。〔证据等级:B;推荐强度:Ⅰ;匹配度评分:(4.38±0.89)分,合理性评分:(4.38±0.89)分〕

4 膈肌超声的优势与局限

膈肌超声凭借无创、床旁可及、实时动态监测、可重复性良好等优势,已成为重症患者膈肌功能评估的首选床旁工具^[78]。膈肌超声的核心评估参数包括膈肌移动度、厚度及增厚率,可早期识别膈肌萎缩与收缩功能障碍,为机械通气参数优化及康复方案制定提供客观依据^[79]。

与侵入性操作(如跨膈压、食道内膈肌电位测量)或需转运协助的影像学检查相比,膈肌超声具有操作简便、可床旁实时监测等优势,显著提升了重症患者膈肌功能评估的安全性与可行性。膈肌超声测量参数与最大吸气压、跨膈压等传统呼吸力学指标显著相关,可部分替代或补充传统评估手段^[80]。此外,膈肌超声与肺脏、心脏及腹腔器官超声联合应用,可构建多器官床旁超声评估体系,系统解析呼吸功能障碍的病理生理机制,为机械通气患者全程管理及撤机决策提供重要依据^[81]。

需要注意的是,膈肌超声成像质量受多重因素影响:①患者因素:肥胖导致皮下脂肪过厚、胃肠胀气、术后敷料及检查声窗受限;②解剖因素:左侧膈肌受肺气及胃肠气体干扰,成像质量常低于右侧;③技术因素:操作者技术水平、取样角度偏差、测量位点选择差异等^[82]。目前尚缺乏膈肌超声培训及质控体系,为提升测量准确性,建议:①由经过规范培训的专业人员操作,经培训且独立规范化操作训练≥40 次可提高对图像采集质量及结果判读的准确性与可重复性;②固定探头位置并进行多次检查,取平均值;③结合患者整体病情及动态演变趋势进行综合判读^[83-84]。

推荐意见 3:目前尚缺乏膈肌超声培训及质控体系,为了确保图像质量及测量结果准确性,建议由经规范培训的专业人员实施膈肌超声操作。〔证据等级:B;推荐强度:Ⅰ;匹配度评分:(4.81±0.40)分,合理性评分:(4.94±0.25)分〕

5 膈肌超声检查技术规范

5.1 检查设备与探头选择:膈肌超声检查设备应具

表 2 膈肌结构与功能评估方法及优缺点		
评估方法	优点	缺点
B 模式 /M 模式超声成像 ^[1, 12, 19, 26, 43-52]	床旁无创、结构可视化、实时动态监测、操作简单、经济、安全、可重复性佳等	操作依赖性强;肥胖、肠气等因素影响成像质量;图像质量不佳时测量值误差大;测量值受呼吸状态影响等
X 线 / 透视 ^[1, 9, 43-44, 53]	操作简便、价格低廉;X 线主要显示静态结构,透视可实现动静态评估	存在体位依赖,诊断敏感性、特异性不足;存在电离辐射;无法量化膈肌运动幅度;透视不适用于昏迷或机械通气患者膈肌功能评估
计算机断层扫描术 ^[47, 54-58]	高分辨率计算机断层扫描术可清晰显示膈肌结构,且具有三维重建能力	辐射剂量高;无法评估膈肌动态功能;存在设备与成本限制;无法在重症监护病房(ICU)床旁进行,存在转运风险
磁共振成像 ^[47, 54-55, 59-66]	软组织分辨率高,可多平面动态成像,可评估血流灌注及代谢状况	无法床旁检查;检查时间长且费用高,存在多个禁忌证限制;对膈肌运动的实时性评价不足
肺功能测试 ^[1, 54, 59, 63, 67-71]	无创且操作简便,可间接评估膈肌力量,协助区分膈肌无力与其他肺部疾病	依赖患者清醒且配合检查;无法精准定位膈肌功能;早期诊断膈肌功能障碍的敏感性不足
跨膈压 / 食管压监测 ^[1, 12, 43, 48, 68, 69, 72-74]	能精准评估膈肌的最大吸气力量,是诊断膈肌麻痹的“金标准”;同时,可动态监测呼吸努力,为临床决策提供指导	侵入性操作;操作复杂,对设备和技术要求高;无法评估膈肌结构异常
肌电图 ^[1, 12, 43, 75-77]	直接评估神经肌肉功能,可实时监测膈肌疲劳程度,指导撤机决策等	容易受心电或肌电信号影响,存在操作者依赖;肥胖或胸壁畸形患者信号采集困难;尚未在 ICU 推广

备 B 模式及 M 模式超声功能。B 模式用于解剖定位及识别膈肌的三层结构(胸膜线、腹膜线及中间肌纤维层)。测量膈肌移动度时, M 模式超声取样线须尽量垂直于膈肌高回声线, 与膈肌运动方向保持一致以获得清晰的运动曲线; 但临床操作中, 尤其经肋弓下缘途径扫查时, 通常难以实现完全对齐, 进而产生角度依赖性误差。因此, 推荐优先选用解剖 M 模式, 该模式允许操作者在后处理中任意调整取样线角度, 从而校正角度误差, 提高测量的准确性^[85-86]。便携式床旁超声设备由于高度灵活性而广泛适用于重症患者的膈肌评估^[87-88], 为确保评估准确性, 建议临床操作时将机器软组织分辨率设置为 ≥ 60 dB、帧率 ≥ 30 Hz。对于需要进行更精细功能评估(如膈肌硬度、应变率)的场景, 可以选用配备斑点追踪成像、弹性成像、超声造影、人工智能辅助分析等功能的高端设备^[88]。

膈肌移动度测量应选用穿透力强、扇形扫查视野广的低频探头。推荐选用频率为 2~5 MHz 的凸阵(腹部)探头或频率为 1~5 MHz 的相控阵(心脏)探头^[89], 其穿透深度与扇形扫查范围可以完整显现右侧膈肌整体形态及左侧膈肌大部分结构, 并且能够清晰捕捉膈肌后 1/3 部分(活动度最大处)的运动轨迹^[90]。测量膈肌厚度时必须选用高分辨率的高频探头, 临床操作中推荐选用频率为 7~12 MHz(或更高)的线阵探头^[89]。高频探头能清晰显示膈肌在肋间对合区的精细结构, 准确测量 0.1 mm 级别的厚度变化, 这是计算膈肌增厚率的基础。

推荐意见 4: 建议选用具备 B 模式及 M 模式(解剖 M 模式为优选)功能的超声设备。测量膈肌移动度时, 推荐使用凸阵探头(2~5 MHz)或相控阵探头(1~5 MHz); 测量膈肌厚度时, 推荐使用高频线阵探头(7~12 MHz)。〔证据等级: A; 推荐强度: I; 匹配度评分: (4.75 ± 0.45) 分, 合理性评分: (4.75 ± 0.45) 分〕

5.2 膈肌超声测量时机: 膈肌运动和厚度变化除了受到个体差异影响外, 也对呼吸模式与呼吸支持水平高度敏感。在有创机械通气(特别是完全控制通气或高水平辅助通气)期间, 膈肌移动度由呼吸机送气(被动)和患者自主收缩(主动)共同决定。由于超声无法区分膈肌下移是由呼吸机正压推入引起的被动移位, 还是膈肌主动收缩的结果。因此, 在辅助/控制通气模式下测量膈肌移动度无法准确反映膈肌自身的收缩功能, 可能高估了膈肌能力并掩盖

了膈肌无力。较高的压力支持水平也会降低患者呼吸努力水平, 导致测量到的膈肌增厚率低于患者实际能力, 造成对膈肌功能的低估或误判。因此, 为获取可真实反映患者膈肌储备功能的测量数据, 膈肌超声检查的实施时机应选定在机械通气撤机阶段, 尤其推荐在自主呼吸试验期间完成, 且检查过程需在自主呼吸状态或低水平压力支持通气模式下开展。在此状态下采集的膈肌超声参数与撤机结局的相关性最强, 多项系统综述与 Meta 分析提示其对于撤机结局具有良好的预测价值^[91-95]。

推荐意见 5: 在完全控制通气或高水平辅助通气期间, 不推荐通过膈肌移动度评估膈肌收缩功能。〔证据等级: C; 推荐强度: I; 匹配度评分: (4.50 ± 0.52) 分, 合理性评分: (4.56 ± 0.51) 分〕

推荐意见 6: 建议在机械通气撤机阶段(主要是自主呼吸试验期间)或低水平通气支持下[压力支持水平为 5~8 cmH₂O (1 cmH₂O=0.098 kPa)]实施膈肌超声监测, 以精准评估膈肌自主收缩功能。〔证据等级: A; 推荐强度: I; 匹配度评分: (4.50 ± 0.52) 分, 合理性评分: (4.56 ± 0.51) 分〕

5.3 检查体位: 针对非重症患者, 推荐采用平卧位进行膈肌超声检查, 该体位有助于腹肌充分放松, 体位标准化程度高且操作稳定性强^[96-97]。重症患者则建议采用半卧位(头高 30°~45°), 该体位在兼顾气道安全与血流动力学稳定的同时, 可优化膈肌可视化效果, 如无明确禁忌(如颅内压升高、低血压等)可短暂采用平卧位以辅助评估。需要注意的是, 站立位或坐位因受肝脏重力影响, 可能导致膈肌测量值偏高^[97-100], 且当前临床证据尚不足以支持其测量一致性, 故不推荐常规采用。若受临床实际条件限制, 必须在坐位下完成检查, 则需在最终报告中明确标注受检时的体位信息, 且后续随访评估也应尽量在相同体位下开展动态对比, 以此最大程度降低体位差异引入的测量偏倚。

推荐意见 7: 建议重症患者接受膈肌超声检查时采用半卧位(头高 30°~45°)。〔证据等级: C; 推荐强度: GPS; 匹配度评分: (4.44 ± 0.63) 分, 合理性评分: (4.44 ± 0.63) 分〕

5.4 扫查入路与切面(图 1)

5.4.1 右侧锁骨中线肋弓下缘入路: 右侧锁骨中线肋弓下缘入路是评估膈肌运动最常用的路径, 主要用于测量膈肌移动度, 包括通过冠状切面测量膈肌穹顶, 以及通过矢状切面测量膈肌穹顶和膈肌后 1/3

部位^[45, 101]。检查时需将凸阵探头置于右侧锁骨中线与肋弓下缘交界处,探头方向指向头侧和背侧,以肝脏作为声窗,可以清晰显示肝脏上方弧形强回声的膈肌界面,并通过旋转或倾斜探头获取不同切面成像。

5.4.2 右侧腋前线至腋中线入路:右侧腋前线至腋中线入路主要针对右侧锁骨中线肋弓下缘声窗受限(如存在肥胖、间位结肠、膈肌抬高、肠道气体干扰、腹腔高压、右上腹手术史等情况)的患者^[102-103]。该入路包括斜冠状切面和斜横切面两种方法。操作时需将凸阵探头置于右侧腋前线至腋中线位置,声束朝向背侧,在肺-肝交界区可观察到从膈肌-胸壁对合区延伸至膈肌脚的弧形强回声线,代表膈肌的界

面特征,可评估膈肌穹顶的运动情况。

5.4.3 左侧腋中线至腋后线入路:由于左侧肋弓下缘入路超声波易受胃肠气体干扰,因此通常选择左侧腋中线至腋后线之间区域经脾脏声窗作为入路。该位置主要用于测量左侧膈肌移动度,以斜冠状切面为主要检查方法。操作时,将凸阵探头放置于左侧腋中线至腋后线之间区域(不同体位时可调整探头至腋前线与腋中线之间,确保获取最佳图像),以脾脏切面作为透声窗。在声像图上可观察到脾脏表面的弧形强回声线,代表膈肌的界面^[104]。通过此入路,可有效观察左侧膈肌穹顶的运动方向,若需要进一步优化测量,则可辅以解剖 M 模式测量技术。

5.4.4 双侧腋前线至腋中线膈肌-胸壁对合区入路:

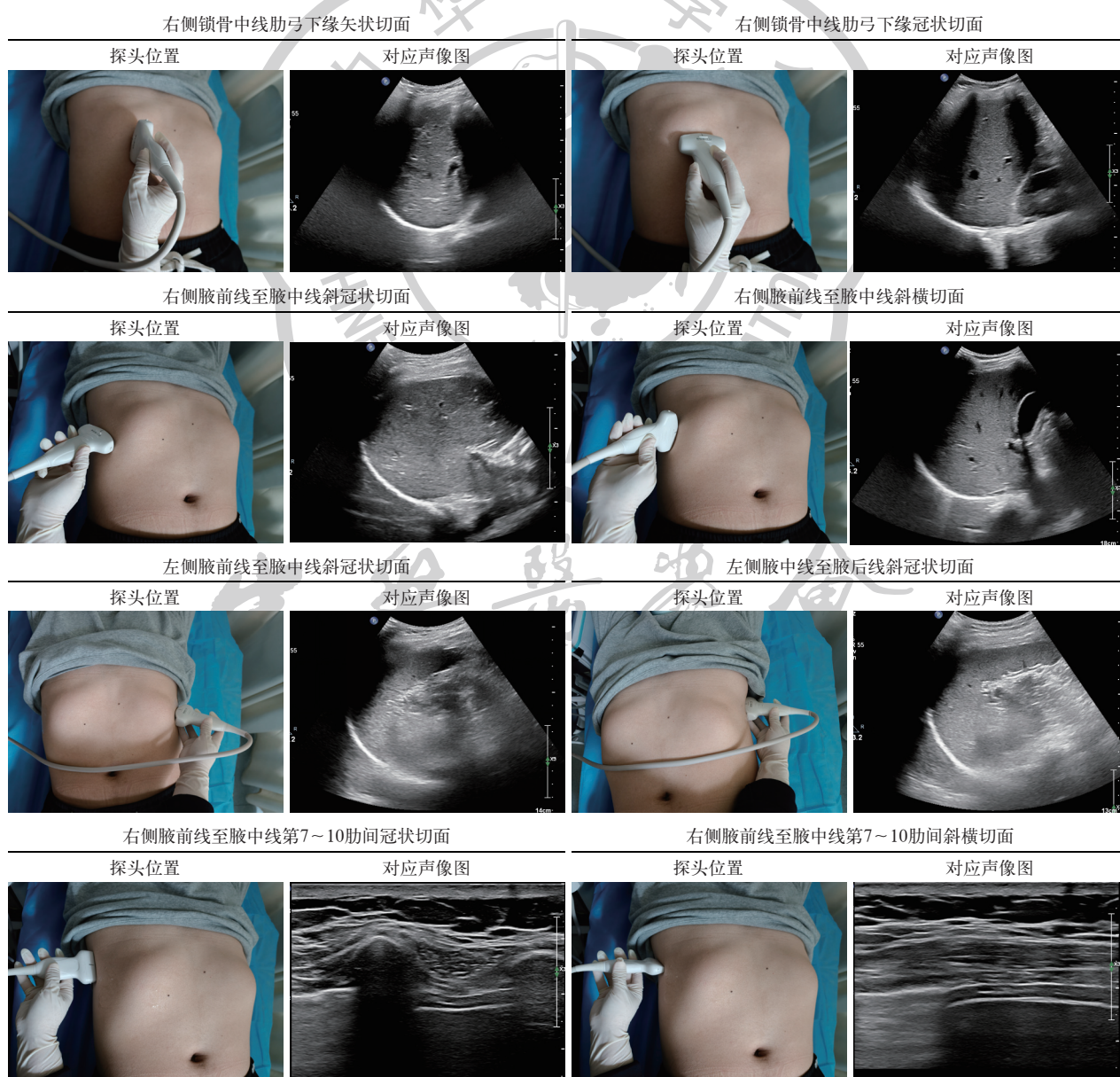


图1 膈肌超声不同扫查入路探头位置与对应超声图像示意图

双侧腋前线至腋中线膈肌-胸壁对合区入路主要用于测量双侧膈肌厚度,其检查范围可以覆盖双侧腋前线至腋中线第 7~10 肋间区域。操作时,将线阵探头置于上述区域,探及肺-肝或肺-脾交界区,并且以胸膜线返折位置作为关键定位标志。探头可纵向垂直于肋间隙放置,或者旋转探头使其与肋间隙平行,同时确保超声束垂直于胸壁方向,从而清晰探及膈肌-胸壁对合区^[105-106]。在声像图上,可显示壁层胸膜-膈肌界面(高回声线)、膈肌(低回声带)及膈肌-腹膜界面(高回声线)的层次结构,其中膈肌内部可见高回声纤维层。

推荐意见 8: 建议评估右侧膈肌移动度时采用右侧锁骨中线肋弓下缘入路,评估左侧膈肌移动度时采用左侧腋中线至腋后线入路,测量膈肌厚度时则选择双侧腋前线至腋中线第 7~10 肋间入路。〔证据等级: B; 推荐强度: I; 匹配度评分: (4.19±0.75) 分,合理性评分: (4.44±0.63) 分〕

5.5 膈肌移动度标准测量及衍生参数计算

5.5.1 测量流程: 测量膈肌移动度时,首先选择适宜的扫查入路,采用滑移、摇动、倾角调整及旋转探头的组合操作,通过调整深度、增益、焦点、频率等,获取膈肌穹顶达到最大深度时的清晰声像图^[89],并确保取样方向与穹顶弧形线切线尽量保持垂直。随后,将机器切换至 M 模式进行动态观察,以捕捉特征性的“锯齿波”形膈肌运动轨迹^[90]。调整扫查的速度,使屏幕显示至少 3 个完整且稳定的呼吸周期波形。值得注意的是,在测量呼气末至吸气末膈肌移动度时,需要将测量区间设定为波峰上缘至波谷上缘或波峰下缘至波谷下缘^[96](图 2A~2B)。为了提高测量的准确性,建议对膈肌移动度参数进行多次测量并取平均值。

5.5.2 衍生参数

5.5.2.1 膈肌平均收缩速度: 膈肌平均收缩速度是指单位时间内膈肌移动度的平均变化率(cm/s),在 M 模式中表现为位移-时间曲线的上升支斜率。该参数可以直接反映吸气时胸腔压力变化速率及膈肌纤维缩短速度,与膈肌收缩力量或呼吸努力程度相关^[107-109]。

5.5.2.2 膈肌峰值收缩或舒张速度: 膈肌峰值收缩或舒张速度是指吸气相和呼气相的最大瞬时速度,在组织多普勒模式中表现为速度-时间曲线正向或负向的最大瞬时速度。

5.5.2.3 膈肌收缩加速度: 膈肌收缩加速度是指单

位时间内膈肌平均收缩速度的变化率(cm/s^2),在组织多普勒模式速度-时间曲线上取 0.5~1.0 s 收缩期线性段,通过计算速度-时间曲线的导数获得。该参数可以直接反映膈肌收缩初期的发力启动效率,理论上与(II 型)快肌纤维募集或神经驱动特征相关^[89,110]。

5.5.2.4 膈肌移动度-时间指数: 膈肌移动度-时间指数是指膈肌移动度与吸气时间的乘积,该参数可以通过量化膈肌收缩做功与时间的关系,直接反映膈肌在吸气过程中动态做功能力或对抗负荷的综合表现^[107]。

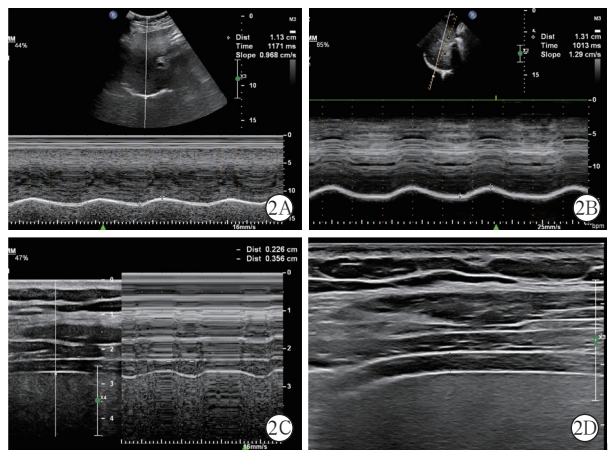
5.5.2.5 膈肌深吸气移动度或膈肌最大移动度: 膈肌深吸气移动度或膈肌最大移动度分别指由平静呼气末至深吸气末、由深呼气末至深吸气末的膈肌移动度,其数值通常可达平静呼吸时的数倍^[89]。二者可以通过量化膈肌在最大吸气过程中的运动幅度,反映吸气肌收缩产生的潜在最大肺通气量。对于无法维持平静呼吸的患者,该参数可作为评估吸气肌最大做功能力的指标^[89]。

推荐意见 9: 建议测量膈肌移动度时获取标准 M 模式图像,并确保至少包含 3 个稳定呼吸周期的轨迹。〔证据等级: B; 推荐强度: I; 匹配度评分: (4.81±0.40) 分,合理性评分: (4.88±0.34) 分〕

5.6 膈肌厚度标准测量

5.6.1 测量流程: 首先,选择适宜的扫查入路,通过调整深度、增益、焦点、频率等^[89],获取对合区膈肌的二维声像图,并清晰地识别出壁层胸膜-膈肌界面、膈肌组织及膈肌-腹膜界面这 3 层结构;随后,将取样线垂直于膈肌组织(尽量远离肋骨边缘以减少伪影),切换至 M 模式,动态观察膈肌厚度变化轨迹;调整扫查速度,确保能显示至少 3 个稳定呼吸周期的波形进行测量。厚度的测量位置为胸膜-膈肌界面内缘和腹膜-膈肌界面内缘的垂直距离(图 2C)。当无法获取清晰的 M 模式声像图或取样线无法垂直于膈肌组织时,可在二维模式下进行测量(图 2D),此时测量位置及注意事项与 M 模式相同。

5.6.2 测量参数及计算公式: 呼气末膈肌厚度(最薄值)因受呼吸努力影响较小且膈肌处于静息松弛状态,通常作为膈肌厚度的基线水平标准^[111]。在呼吸周期不同时相(呼气末、吸气末或深吸气末)进行膈肌厚度测量时,需明确标注对应呼吸时相。膈肌增厚率(%)=(吸气末膈肌厚度-呼气末膈肌厚度)/呼气末膈肌厚度×100%。



注：调整取样线，使其垂直于膈肌穹顶，并与膈肌的运动方向保持一致，采用 M 模式(A)或解剖 M 模式(B)获取位移-时间曲线，以测量膈肌移动度、收缩时间和平均速度；采用 M 模式(C)或二维模式(D)测量膈肌厚度

图 2 膈肌移动度与厚度的超声测量方法

推荐意见 10：建议测量膈肌厚度时选取胸膜-膈肌界面内缘至膈肌-腹膜界面内缘的垂直距离。〔证据等级：A；推荐强度：I；匹配度评分：(4.69±0.48)分,合理性评分：(4.75±0.45)分〕

5.7 膈肌超声正常参考值范围：膈肌超声常用监测指标包括膈肌移动度、厚度及增厚率^[112-113]，明确膈肌超声的正常参考值范围对于评估膈肌功能至关重要。现有多项大样本研究数据(≥100 例)都提供了健康成人膈肌超声正常参考值范围^[105,114-125](表 3)。

然而，鉴于上述指标测量值容易受种族、地域、年龄、性别、腰围、体质量指数、呼吸频率、主观呼吸驱动和吸气努力等多项个体因素影响，结果仍存在差异^[114,124-126]。因此，在参考膈肌超声正常参考值范围时，需首先区分平静呼吸状态与深吸气状态，

表 3 健康成人膈肌超声正常参考值汇总

文献	年份 (年)	国家	样本量 (例)	膈肌移动度(mm, $\bar{x} \pm s$)		膈肌厚度(mm, $\bar{x} \pm s$)		
				平静吸气	深吸气	呼气末	吸气末	深吸气末
Kantarci 等 ^[114]	2004	土耳其	164		男性: 52.73±11.03 女性: 46.93±10.37			
Boussuges 等 ^[115]	2009	法国	210	男性: 18±3 女性: 16±3	男性: 70±11 女性: 57±10			
Boon 等 ^[105]	2013	美国	150			男性: 3.8±1.5 女性: 2.7±1.0		
Harper 等 ^[116]	2013	美国	150			整体: 3.2±1.3	整体: 3.7±1.4	
Carrillo- Esper 等 ^[117]	2016	墨西哥	109			男性: 1.9±0.4 女性: 1.4±0.3		
黄佳茹 ^[118]	2016	中国	138	男性: 16.0±5.3 女性: 12.9±2.1	男性: 57.0±10.8 女性: 46.8±10.2	男性: 1.9±0.4 女性: 1.8±0.4		
Scarlata 等 ^[119]	2018	意大利	100	男性: 20.3±5.7 女性: 15.1±3.7	男性: 69.3±14.6 女性: 55.4±13.3			
Boussuges 等 ^[120]	2021	法国	410	男性: 19±5 女性: 17±4	男性: 66±13 女性: 54±11			
Boussuges 等 ^[121]	2021	法国	200	男性: 20±5 女性: 19±4	男性: 60±9 女性: 50±9	男性: 2.1±0.4 女性: 1.9±0.4	男性: 2.8±0.6 女性: 2.5±0.6	男性: 4.3±0.8 女性: 3.9±0.8
南淑良 等 ^[122]	2021	中国	118	整体: 16.74±4.96				
石豆子 等 ^[123]	2023	中国	240	20~29 岁: 18.4±4.9 30~39 岁: 17.6±3.0 40~49 岁: 17.7±3.1 50~60 岁: 16.5±3.4	20~29 岁: 46.4±7.1 30~39 岁: 40.0±6.3 40~49 岁: 33.1±8.0 50~60 岁: 29.5±4.1	20~29 岁: 1.7±0.4 30~39 岁: 1.6±0.2 40~49 岁: 1.5±0.3 50~60 岁: 1.5±0.1		
Yamada 等 ^[124]	2024	日本	109	男性: 18±6 女性: 16±6	男性: 51±13 女性: 38±11	男性: 1.8±0.3 女性: 1.6±0.5		
赵浩天 等 ^[125]	2024	中国	1 035	男性: 18~39 岁: 17.97±4.88 40~59 岁: 18.78±5.78 60~79 岁: 17.77±4.78 80~99 岁: 14.90±2.54 女性: 18~39 岁: 18.20±5.07 40~59 岁: 18.15±5.00 60~79 岁: 17.62±4.69 80~99 岁: 12.56±2.56	男性: 18~39 岁: 60.49±11.38 40~59 岁: 59.19±11.76 60~79 岁: 57.01±10.99 80~99 岁: 49.99±11.28 女性: 18~39 岁: 55.92±11.55 40~59 岁: 54.55±12.65 60~79 岁: 52.50±10.94 80~99 岁: 40.40±8.81	男性: 18~39 岁: 1.89±0.38 40~59 岁: 1.97±0.39 60~79 岁: 1.86±0.39 80~99 岁: 1.94±0.35 女性: 18~39 岁: 1.53±0.29 40~59 岁: 1.63±0.31 60~79 岁: 1.66±0.28 80~99 岁: 1.44±0.22	男性: 18~39 岁: 2.42±0.48 40~59 岁: 2.51±0.52 60~79 岁: 2.41±0.52 80~99 岁: 2.39±0.42 女性: 18~39 岁: 2.00±0.42 40~59 岁: 2.12±0.45 60~79 岁: 2.14±0.37 80~99 岁: 1.74±0.27	男性: 18~39 岁: 4.24±0.94 40~59 岁: 4.24±1.01 60~79 岁: 4.01±0.95 80~99 岁: 3.57±0.55 女性: 18~39 岁: 3.71±0.97 40~59 岁: 3.66±0.93 60~79 岁: 3.65±0.86 80~99 岁: 2.46±0.55

注：国内膈肌超声临床应用优先参考中国人群研究数据；空白代表未报告

并充分结合被检者的基础特征、呼吸状态等个体化差异综合分析。为确保观察者间操作可重复性,在多次或多时段重复测量时,应维持被检者采取统一体位,且在测量过程中探头位置应保持一致。

膈肌超声测量参数并非静态指标,而是受呼吸状态及通气参数显著影响的动态变量,因此,忽视相关影响的单一超声数值,可能导致对膈肌功能的误判。若患者处于低呼吸驱动或低呼吸努力状态,如深度镇静、过度辅助导致气道闭合压($P_{0.1}$)较低,则此时膈肌超声数值偏低就并非膈肌本身功能障碍。反之,若在高呼吸驱动下仍测得低移动度或低增厚率,则强烈提示膈肌无力或麻痹。除通气模式和压力支持水平外,呼气末正压的施加也会影响膈肌超声的监测。呼气末正压可以通过增加功能残气量,导致膈肌在呼气末被动向腹侧移位并处于缩短状态。这种几何构型的改变导致的膈肌低平化限制了其进一步收缩的机械空间,可能导致膈肌移动度减小。此外,根据肌肉生理学特性,膈肌纤维的被动缩短会导致其呼气末厚度增加,可能会导致膈肌增厚率数值的假性降低。因此,建议记录膈肌超声数据时,应同步记录当前的呼吸状态、通气模式、呼气末正压、压力支持水平等相关信息,并在临床判读时应充分考量相关影响,以获取对膈肌功能的准确评估^[92, 126]。

推荐意见 11: 推荐在多次或多时段重复测量膈肌超声参数时,保持体位和探头位置的一致性。〔证据等级: B; 推荐强度: II; 匹配度评分: (4.81 ± 0.40) 分, 合理性评分: (4.88 ± 0.34) 分〕

推荐意见 12: 膈肌超声参数易受呼吸状态及通气参数的影响,临床判读时需同步记录并综合评估。〔证据等级: C; 推荐强度: II; 匹配度评分: (4.63 ± 0.50) 分, 合理性评分: (4.63 ± 0.50) 分〕

6 膈肌功能障碍的超声评估

6.1 重症患者膈肌功能障碍的超声参考标准: 患者自主呼吸或压力支持水平($5 \sim 8 \text{ cmH}_2\text{O}$)条件下,膈

肌移动度降低($<10 \text{ mm}$)提示膈肌收缩功能障碍,过低或未见明显运动需警惕膈肌瘫痪^[45, 115];而膈肌移动度过高($>21 \text{ mm}$)则反映患者呼吸驱动增强或处于吸气努力增加状态^[92, 127]。呼气末膈肌厚度较基线水平(如起病初期或转入 ICU 时)下降超过 10% 提示膈肌厚度减低,严重变薄(较基线水平下降 $>20\%$)提示膈肌重度萎缩或瘫痪^[45, 128]。膈肌增厚率降低($<20\%$)提示膈肌收缩障碍或呼吸努力不足^[19, 92, 127],其增高($>40\%$)可能与膈肌代偿性收缩或呼吸驱动增强有关^[80, 92, 127](表 4)。现有阈值基于临床研究及德尔菲专家共识确定。解读这些指标时需注意:① 应重视个体化基线数据及动态进程监测,被检者自身参数的变化趋势更具临床参考意义^[45, 128];② 对同一被检测者进行多时段测量时,需保持相同体位和探头位置^[130];③ 测量指标应综合评价,若膈肌增厚率与膈肌移动度出现矛盾,则需考虑二者反映的膈肌收缩状态差异、气道阻力、肺顺应性、呼吸支持模式等因素,而不宜仅依据单一指标下结论^[80, 113, 131]。

6.2 膈肌超声应用注意事项: 选择恰当的检查时机,统一通气模式与支持水平下的评估条件,保持体位与探头位置的一致性,明确标准扫查部位,控制呼吸机参数、患者配合度等干扰因素,并通过定期、规范化培训与质控考核提升操作者间的一致性和可重复性^[94]。具体实施要点与操作建议见表 5。

推荐意见 13: 建议对重症患者采用动态、个体化的膈肌超声评估,并结合临床情况对结果进行综合分析。〔证据等级: B; 推荐强度: II; 匹配度评分: (4.50 ± 0.73) 分, 合理性评分: (4.63 ± 0.72) 分〕

7 膈肌超声在重症患者中的临床应用价值

7.1 膈肌-心肺联合超声在呼吸衰竭病因筛查中的应用: 在规范化流程与操作者熟练的前提下,肺超声诊断多种肺部、胸膜腔病变的敏感性和特异性优于胸片及听诊^[132-135],且具备无创、实时动态评估的

表 4 重症患者膈肌功能障碍的超声参考标准

指标	正常参考值范围	预警撤机阈值	功能障碍 / 高危阈值
膈肌移动度	$10 \sim 21 \text{ mm}$ ^[115, 125]	$<14 \text{ mm}$ 提示撤机失败风险增加 ^[19]	$<10 \text{ mm}$ 提示膈肌功能障碍,过低时应警惕膈肌瘫痪 ^[45, 115]
呼气末膈肌厚度	我国男性为 $1.40 \sim 2.60 \text{ mm}$, 女性为 $1.20 \sim 2.10 \text{ mm}$ ^[125]	较基线水平下降 $>10\%$ ^[45, 128]	较基线水平下降 $>20\%$ ^[45]
膈肌增厚率	$20\% \sim 40\%$ ^[92, 127]	$\geq 33\%$ 提示撤机成功率较高; $<25\%$ 提示撤机失败风险增加 ^[129]	$<20\%$ 提示膈肌功能障碍 ^[92, 127]

注: 正常参考值范围为健康成人参考标准,且受种族、性别、年龄、身高、体质量、腹内压等因素影响;临床应用中,上述参数应综合评价;当膈肌增厚率较高但膈肌移动度较低时,提示高水平呼吸驱动和低肺通气量,仍存在撤机失败风险

表 5 膈肌超声应用注意事项

项目	推荐操作
测量时机	日常监测：对于怀疑膈肌功能障碍的患者，应尽早〔入重症监护病房（ICU）24 h 内〕接受膈肌超声筛查，获取基线膈肌超声数据 ^[94] ；撤机期间监测：自主呼吸试验前筛查撤机危险因素；自主呼吸试验开始后 0.5 ~ 2.0 h 进行多器官监测，早期识别撤机相关肺水肿或膈肌收缩功能异常；自主呼吸试验失败时即刻筛查，明确撤机失败原因
呼吸支持模式	推荐在自主呼吸、高流量氧疗或无创通气的状态下进行超声检查，尽可能采集呼吸平稳状态下的图像及数据 ^[94] ；在接受低水平压力支持的有创机械通气状态下，测量结果亦具有一定参考价值；应注明超声测量期间呼吸支持模式及参数
体位	推荐重症患者采用半坐卧位 30° ~ 45°，兼顾可视声窗与患者安全；排除禁忌证（颅内压、低血压等）可短时间采用平卧位，注意加强气道管理及误吸防护
扫查部位与测量	推荐以肝脏或脾脏为声窗测量膈肌移动度，由于左侧膈肌移动度测量相对困难，当除外膈肌偏瘫或不对称时，可通过右侧膈肌移动度表示整体膈肌功能 ^[94] ；当膈肌移动度测量困难时，可采用双侧胸膜移动度替代 ^[112] ；推荐双侧膈肌-胸壁对合区位置测量膈肌厚度，探头垂直或平行于肋间隙获取膈肌图像，选择 M 模式或二维模式测量 ^[92, 127]
控制干扰因素	建议首次操作时标记测量位置，以确保进程观察位置一致；肥胖、腹胀、肠道积气等因素可显著降低图像质量，可以改用脾-肾切面移动度、肺轮廓法或胸廓内面积变化作定性评估；腹腔内高压、胸腔 / 腹腔积液可影响膈肌运动，须在影像报告中备注
定期操作培训	建议操作者独立完成至少 40 例规范化训练并通过考核；操作者定期做组内一致性检测，确保操作信度

优势。床旁肺超声可快速鉴别心源性肺水肿、肺炎、肺栓塞、气胸、慢性阻塞性肺疾病急性加重期、哮喘急性发作等呼吸衰竭常见病因，诊断准确率达 90% 以上^[136-137]。心脏超声通过评估心腔大小、心肌运动、血流动力学、下腔静脉呼吸变化等参数，可有效鉴别心源性与非心源性呼吸困难^[138-142]。膈肌超声与心肺超声联合应用，可整合呼吸肌功能、胸膜腔状态、肺部病变、心肺交互作用等多维度信息，从而显著提升呼吸衰竭病因诊断的时效性和准确性，实现对患者心肺功能的整体评估^[143-147]。

推荐意见 14：膈肌超声联合心肺超声可提升重症呼吸衰竭病因诊断的时效性与准确性。〔证据等级：B；推荐强度：I；匹配度评分：(4.63 ± 0.50) 分，合理性评分：(4.56 ± 0.51) 分〕

7.2 机械通气相关性膈肌功能障碍的早期识别和动态监测：膈肌超声在机械通气相关性膈肌功能障碍的早期识别与动态监测中具有不可替代的价值。研究表明，控制性通气 18 h 后可诱发膈肌萎缩^[30]，进而导致功能受损^[148]，发生率高达 75%^[149]。机械通气相关性膈肌功能障碍的高危因素主要包括脓毒症^[13]、ICU 获得性衰弱^[150]、创伤^[151]、胸腔手术^[152]、药物因素（镇静剂、糖皮质激素、神经肌肉阻滞剂等）^[153]、神经肌肉疾病^[154]、慢性阻塞性肺疾病^[155]、营养不良^[156]等。建议接受有创机械通气患者治疗早期（<24 h）即实施膈肌超声评估以识别高风险患者并建立基线数据档案；机械通气期间定期进行膈肌超声监测以指导个体化通气参数调整；研究表明，基于膈肌保护性的机械通气策略可显著优化诊疗方案，降低机械通气相关性膈肌功能障碍的发生风险^[13, 30, 148-149, 157-158]。

推荐意见 15：建议接受机械通气患者治疗早期即实施膈肌超声评估以识别高风险患者并建立基线数据档案，将膈肌超声监测贯穿机械通气治疗全过程管理。〔证据等级：A；推荐强度：I；匹配度评分：(4.44 ± 0.63) 分，合理性评分：(4.50 ± 0.63) 分〕

7.3 指导膈肌保护性通气实施：膈肌保护性通气是通过优化机械通气参数与患者呼吸努力的匹配，减少膈肌卸载与过度负荷相关损伤，从而降低呼吸机依赖风险并改善患者预后的关键策略。机械通气参数设置不当可能诱发膈肌功能障碍或加重其损伤，导致通气时间延长及不良预后风险增加^[159-160]。膈肌超声能够实现床旁动态监测膈肌功能状态及呼吸负荷，为个体化通气策略的制定提供实时、客观的评估依据^[92, 131]。

基于膈肌超声的膈肌保护性通气策略的实施要点：① 维持膈肌增厚率在 20% ~ 40% 的生理范围，若 >40% 则提示过度负荷或努力过高，可以考虑降低吸气支持或优化人机同步，若 <20% 则提示膈肌收缩乏力或过度卸载，可以考虑减少镇静剂使用、下调支持水平并促进自主呼吸参与^[92, 160]；② 建议以膈肌移动度 ≥ 10 mm 且膈肌增厚率 ≥ 30% 作为撤机决策的参考标准，未达标时需预警撤机失败风险并考虑延迟撤机^[95, 161-163]；③ 若发现膈肌矛盾运动（吸气时向胸腔运动），则应警惕严重功能障碍或膈神经损伤^[161-162]，需结合临床评估并完善神经电生理检查以明确诊断。

推荐意见 16：建议应用膈肌超声实时动态监测膈肌功能状态，为膈肌保护性通气策略的精准化调整提供依据。〔证据等级：C；推荐强度：II；匹配度评分：(4.31 ± 0.60) 分，合理性评分：(4.44 ± 0.63) 分〕

7.4 机械通气撤机风险筛查与决策优化:机械通气撤机失败发生率为 15%~35%,尽早实现安全撤机对于降低呼吸机相关性肺炎、膈肌功能障碍等并发症的发生风险及改善预后至关重要^[164]。撤机失败与膈肌功能障碍密切相关^[14,165],膈肌超声参数可通过量化膈肌收缩功能,从而用于撤机失败风险的床旁评估与分层^[95,166],结合传统指标衍生的复合参数(如膈肌-浅快呼吸指数等衍生指标)可进一步优化预测准确性,减少单一指标带来的误判^[167-170]。在撤机后自主呼吸阶段,维持有效肺通气的呼吸肌群(如肋间肌、腹肌等)与膈肌形成高度协同机制^[171]。将超声评估从“单膈肌”拓展至“呼吸肌群”,有助于更精准地定位撤机失败原因,识别膈肌无力、辅助肌代偿不足或呼气肌(腹肌)无效参与等,并为早期个体化干预提供依据。其中,肋间肌作为膈肌功能障碍时代偿的主要吸气肌肉,其收缩增厚率在健康人群中的变化通常不明显,但若撤机评估过程中出现肋间肌增厚率显著增高则可能提示代偿性收缩,进而预警撤机失败风险增加^[172]。此外,腹肌不仅参与用力呼吸和咳嗽反射,还协助清除呼吸道分泌物。临床研究显示,自主呼吸试验患者腹肌增厚率减低与撤机失败密切相关^[173-174]。然而,膈肌外呼吸肌群的标准化的超声评估方法及其临床价值仍需进一步研究验证。

为克服单参数评估的局限,多器官超声联合评估方案(涵盖心脏、肺脏、膈肌、膈肌外呼吸肌)可实现床旁快速筛查撤机失败的主要原因^[175],通过鉴别心源性、肺源性、膈肌功能障碍等复杂因素,有效规避单参数评估的局限性,并制定针对性干预策略,实现多模态流程化管理。其中,左室充盈压参数二尖瓣舒张早期峰值血流速度与二尖瓣环舒张早期峰值运动速度比值(E/e')可独立预测心源性撤机失败,而自主呼吸试验中前胸壁 B 线数量增加及较高基础肺超声评分则提示心肺原因导致的撤机失败风险增加。该方案具有多部位(肺脏、腹腔、心脏、膈肌、膈肌外呼吸肌)和多时点(撤机前、撤机过程中、自主呼吸试验失败后)的动态评估优势,适用于围撤机期全程管理,包括撤机前筛查器官功能、撤机过程中监测膈肌疲劳及血管外肺水变化、自主呼吸试验失败后即刻明确原因,并为再次撤机制定个体化决策提供依据。

推荐意见 17:推荐在高危患者自主呼吸试验的全过程管理中应用膈肌超声,涵盖撤机前风险筛查、

自主呼吸试验中功能监测及失败后快速原因排查;建议在撤机过程中应用膈肌超声联合多器官超声进行动态监测,以提高撤机成功率。〔证据等级:B;推荐强度:I;匹配度评分:(4.44 ± 0.63)分,合理性评分:(4.50 ± 0.63)分〕

7.5 膈肌超声在老年重症患者中的应用价值:随着人口老龄化程度不断加剧,老年重症患者比例显著上升,成为重症医学的重要挑战。这类患者常合并慢性阻塞性肺疾病、心功能障碍、脑卒中史、脓毒症、营养不良、ICU 获得性衰弱等,多病共存与生理储备功能削弱,直接或间接损害膈肌功能,导致膈肌功能障碍发生率升高^[149],显著增加了机械通气后撤机困难的风险。

膈肌超声作为无创、实时、可视化的床旁技术,可动态监测膈肌结构与功能,早期识别膈肌萎缩与功能障碍风险,指导镇静策略优化和康复锻炼,预防呼吸机诱导膈肌损伤^[176-177]。在撤机决策中,膈肌超声可通过定量评估呼气末厚度、膈肌增厚率,提供传统指标外的关键信息,精准预测撤机结局^[178]。对于合并心功能不全的患者,联合心脏超声可评估心-肺-膈相互作用,尽量降低心源性撤机失败风险。该技术为临床提供了“膈肌功能可视化”,为老年重症患者机械通气管理及困难撤机风险评估与策略制定提供了重要的客观依据,是精准化、个体化治疗的重要工具。

推荐意见 18:老年重症患者心肺功能不全及膈肌功能障碍风险显著升高,建议联合应用膈肌超声与心肺超声进行动态监测,以优化撤机决策。〔证据等级:C;推荐强度:II;匹配度评分:(4.44 ± 0.63)分,合理性评分:(4.44 ± 0.63)分〕

7.6 其他临床应用

7.6.1 指导电阻抗断层成像绑带个体化定位:电阻抗断层成像是一种无创、无辐射的床旁监测技术,通过 16/32 枚电极向胸廓施加高频低幅电流,生成肺部横断面图像,实现局部肺通气和血流分布的实时动态评估,在危重症患者呼吸管理中具有重要价值^[179-182]。临床应用中,电极通常嵌于绑带,其成像区域呈透镜状分布。值得注意的是,个体生理性膈肌位置存在差异且可随肺容量或体位变化而变化,常规建议将第 4~6 肋间隙作为绑带定位区可能导致测量平面偏离目标肺区,因此,建议结合超声床旁识别膈肌位置,以实现精准的绑带安置与测量。已有研究显示,该个体化调整策略可在超过半数的受

试者中成功实施,突破了传统定位限制^[183]。此外,超声与电阻抗断层成像在呼吸衰竭管理中形成协同优势,涵盖肺区域通气评估、呼吸机撤机指导、呼气末正压参数滴定、肺复张操作引导等场景。二者联合应用可以显著提升危重症患者呼吸管理的精准性和时效性,从而为临床决策提供更全面的动态信息支持^[184]。

推荐意见 19: 建议采用超声引导定位技术放置电阻抗断层成像绑带,以提高成像准确性。〔证据等级:C;推荐强度:Ⅱ;匹配度评分:(4.06 ± 0.93)分,合理性评分:(4.19 ± 0.98)分〕

7.6.2 膈肌超声可量化评估体外膈肌起搏的治疗效果: 体外膈肌起搏作为无创、经济的膈肌功能障碍治疗技术,可通过体表电极电刺激膈神经,增强膈肌兴奋性,促使规律性收缩,进而增加胸腔容积、提升肺泡通气量,逐步恢复膈肌功能^[185-191]。该技术兼具便携性、耐受性及经济性优势,在重症康复领域应用前景广阔。然而,当前技术仍面临三大挑战,即依赖操作者主观评估(如呼吸困难评分、呼吸频率等)、缺乏床旁实时定量监测手段及难以精准调整起搏参数(如频率、强度、持续时间)。

膈肌超声可突破上述局限,通过实时动态监测膈肌运动与收缩幅度变化,精准识别无效或异常起搏,评估起搏治疗效果的同时,进一步动态指导电刺激强度与方案调整,从而推动起搏参数的精准优化与疗效量化^[192-199]。该方向仍需多中心、大样本临床研究进一步验证其有效性,并推动技术标准化与临床转化。

推荐意见 20: 建议在体外膈肌起搏治疗中应用膈肌超声,以指导治疗方案的个体化调整。〔证据等级:B;推荐强度:Ⅰ;匹配度评分:(4.06 ± 0.93)分,合理性评分:(4.31 ± 1.01)分〕

7.6.3 探索呼吸康复疗效评价新体系: 机械通气、胸腹部术后并发症、负氮平衡、全身炎症反应等因素可能导致重症患者撤机后仍存在持续膈肌功能障碍。研究表明,约 65% 的成功撤机患者存在膈肌功能储备不足,即使转出 ICU,部分患者仍需继续接受呼吸康复干预^[128]。传统呼吸康复评估方法依赖主观表现、临床评分、肺功能指标等,难以准确反映膈肌功能恢复情况。膈肌超声技术可早期识别康复治疗无效患者(如膈神经传导障碍或膈肌瘫痪),并指导康复强度调整。未来需要开展更多临床实践和研究,建立基于膈肌超声参数的呼吸康复监测流程及

目标阈值,从而为制定个体化呼吸康复方案提供科学依据。

推荐意见 21: 推荐将膈肌超声纳入康复疗效评估体系,以指导个体化康复方案制定。〔证据等级:C;推荐强度:Ⅱ;匹配度评分:(4.38 ± 0.62)分,合理性评分:(4.56 ± 0.51)分〕

7.6.4 联合跨膈压/食管压监测的协同应用: 膈肌超声指标容易受呼吸驱动、机械通气参数、呼吸肌代偿等因素的干扰,因此应用单一指标评价膈肌功能状态存在明显局限性^[200],而膈肌超声联合跨膈压/食管压监测可有效区分主动收缩与被动运动,优化呼吸支持策略:当膈肌超声参数未达标(膈肌移动度 <10 mm 或膈肌增厚率 $<20\%$)且食管压波动 >10 cmH₂O 时,提示膈肌“驱动-肌力失衡型”,需要降低呼吸负荷或终止撤机^[201];若膈肌超声参数达标且食管压波动 ≤ 8 cmH₂O,则表明膈肌储备充足,可考虑继续撤机,建议在自主呼吸试验阶段同步实施膈肌超声检查,并记录跨膈压/食管压波动、膈神经肌电活动,以校正呼吸驱动干扰^[77,202]。上述阈值应视测量条件(体位、通气模式、支持水平、镇静水平)及研究人群差异进行解释,避免机械套用。

最新研究显示,膈肌移动度与跨膈压波动、食管压波动参数相关^[92,127],潮气量-膈肌收缩速度指数与食管压波动、食管压-时间积分相关^[203],组织多普勒成像测量的膈肌收缩峰速度及剪切波弹性成像测量的膈肌硬度均与跨膈压波动相关^[126]。上述发现为未来研究及标准化流程的规划提供了重要参考方向。

8 超声新技术在膈肌功能评价中的应用

随着超声技术与重症医学的深度融合,斑点追踪成像、剪切波弹性成像、组织多普勒成像、微血流成像或超声造影、自动测量技术、三维成像等新技术,正在重塑膈肌功能评价体系(表 6)。其中,斑点追踪成像可通过无角度依赖追踪膈肌纤维斑点位移,量化吸气负荷变化,与跨膈压呈显著相关性,对于预测撤机结局具有潜在价值^[19,204-209];剪切波弹性成像则利用剪切波传播速度差异,将组织硬度转化为杨氏模量值,可客观反映膈肌硬化(如膈肌肌纤维变性重塑)或软化(如膈肌萎缩或水肿)^[210-216];膈肌超声自动测量技术融合深度学习算法,可实现一键获取测量参数,操作误差较传统方法降低 90%,提升了测量效率与一致性^[217];组织多普勒成像可提供膈肌收缩或舒张速度学信息,并补充膈肌运动指

表 6 膈肌超声新技术的优势、局限与发展前景

超声新技术	优势	局限	发展前景
斑点追踪成像	无角度依赖性,可准确测量膈肌纵向应变和应变率,更早期地发现应变膈肌功能障碍等	操作技术要求高;存在设备与患者的限制;无法区分膈肌主动或被动运动;目前尚缺乏统一的正常参考值	建立标准化切面+正常参考值范围;发展三维斑点追踪成像与人工智能自动追踪,实现实时应变监测
剪切波弹性成像	无创实时评估,可精确量化膈肌纤维化或僵硬程度,具有较高的空间分辨率	检查设备要求高;操作技术依赖性强;无法区分膈肌主动或被动收缩;目前尚缺乏统一的正常参考值	多部位动态弹性成像;构建疾病硬度数据库;开发床旁无线探头
自动测量技术	一键获得厚度、增厚率、速度等全套参数;去除操作者差异,可连续床旁监测	算法训练集多为单中心,泛化能力待验证;对图像质量与设备配置要求较高	云端持续学习模型;与电子档案、呼吸机数据融合,打造“膈肌数字孪生”
组织多普勒成像	构建膈肌运动的速度-时间曲线,通过定量膈肌收缩期或舒张期峰值速度,可识别膈肌潜在用力收缩	需高分辨率和低量程超声设备;存在角度依赖性;操作技术依赖性强	研发高帧率矩阵探头
超声造影+三维成像	通过造影无创量化微血流;通过三维立体成像评估体积与形态	造影剂成本及安全数据不足;三维成像帧率低、后处理耗时;目前相关研究尚少,缺乏统一的正常参考值	低剂量造影方案;结合增强现实或虚拟现实,实现膈肌“全息”导航

标的动力学维度;超声造影实现了床旁微循环灌注可视化评估,三维成像则有望在形态与体积层面实现更精准的结构量化与动态呈现^[79, 110, 126, 218-227]。

整合上述多模态技术,可构建基于“速度-吸气努力-血流-立体结构”的膈肌多维评估体系。这些技术正在从科研工具逐步转型为床旁可视化评价的核心手段,未来需在探头标准化、正常参考值范围界定、多中心临床验证、成本控制等方面取得突破,以支撑个体化撤机决策、早期康复干预、远程监测等临床应用。

9 展望

膈肌超声凭借无创、便携、实时动态监测、可重复操作等优势,已成为重症患者床旁膈肌功能可视化评估的核心技术,在机械通气全程管理、撤机决策支持、呼吸康复指导等临床场景中展现出显著价值。然而,其临床应用仍面临挑战:膈肌超声参数存在个体化差异,且测量方法、参数界定、诊断阈值及结果判读缺乏统一标准,导致临床规范化应用受限。

未来需从以下方面推进:基于循证医学证据建立标准化操作流程,明确关键参数的测量方法、参考范围及解释标准,并通过高质量临床研究验证其诊断效能;深入探索膈肌结构异常与功能障碍的病理机制及其对预后的影响;完善膈肌功能障碍的分级标准与风险预测模型;结合多模态超声成像及人工智能辅助分析技术,提升检测精准度与客观性;整合多器官超声评估,构建多模态呼吸肌功能综合评价体系,为重症患者膈肌功能障碍的早期识别、精准干预及预后评估提供科学依据。随着技术标准完善与临床路径规范化,膈肌超声有望在呼吸与重症医学领域发挥更核心的作用,助力实现精准机械通

气管理与个体化呼吸康复,最终改善重症患者呼吸功能恢复及长期预后。

共识制定专家组 组长:黄道政[南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)重症医学科,医务处],覃铁和(广东省老年医学研究所老年重症医学科);副组长:赵浩天(河北省人民医院超声科),刘凯(复旦大学附属中山医院重症医学科),徐磊[重庆大学附属中心医院(重庆市急救医疗中心)神经外科],叶瑞忠(浙江省人民医院超声医学科),史中华(首都医科大学三博脑科医院重症医学科; Department of Physiology, Amsterdam UMC),葛慧青(浙江大学医学院附属邵逸夫医院呼吸治疗科),陈颖[南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)老年重症医学科]

执笔专家组(以姓氏汉语拼音排序) 岑仲然(南方医科大学珠江医院重症医学科),陈烁[南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)超声科],陈颖[南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)老年重症医学科],杜梅霞(浙江省人民医院超声医学科),葛慧青(浙江大学医学院附属邵逸夫医院呼吸治疗科),黄道政[南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)重症医学科,医务处],李晓岩(广州市第一人民医院南沙医院重症医学科),林转娣(广州医科大学附属番禺中心医院重症医学科),刘凯(复旦大学附属中山医院重症医学科),罗邦军(广州医科大学附属番禺中心医院重症医学科),马婕(江门市中心医院重症医学科),史中华(首都医科大学三博脑科医院重症医学科; Department of Physiology, Amsterdam UMC),司向(中山大学附属第一医院重症医学科),宋菲儿[南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)急诊科],唐朝霞(中山大学附属第一医院重症医学科),王首红(广东省老年医学研究所老年重症医学科),韦碧琳(中山大学附属第一医院重症医学科),魏学标[南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)老年重症医学科],徐磊[重庆大学附属中心医院(重庆市急救医疗中心)神经外科],亚夏尔江·穆合塔尔(上海市老年医学中心重症医学科),姚玉龙(上海交通大学医学院附属仁济医院重症医学科),叶瑞忠(浙江省人民医院超声医学科),张栋(长治医学院附属和平医院重症医学科),赵浩天(河北省人民医院超声科)

审校专家组(以姓氏汉语拼音排序) 常志刚(北京医院重症医学科),晁彦公(清华大学第一附属医院重症医学科),郭丰(浙江大学医学院附属邵逸夫医院重症医学科),何伟(北京同仁医院重症医学科),胡才宝(浙江大学医学院附属浙江医院重症医学科),黎毅敏(广州医科大学附属第一医院重症医学科),刘玲(东南大学附属中大医院重症医学科),覃铁和(广东省老年医学研究所老年重症医学科),王小亭(中国医学科学院北京协和医院重症医学科),王小智(海南

医科大学第二附属医院重症医学科), 席修明(首都医科大学附属复兴医院重症医学科), 尹万红(四川大学华西医院重症医学科), 张丽娜(中南大学湘雅医院重症医学科), 赵鹤龄(河北省人民医院重症医学科), 钟鸣(复旦大学附属中山医院重症医学科), 朱然(中国医科大学附属第一医院重症医学科)

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] McCool FD, Tzelepis GE. Dysfunction of the diaphragm[J]. *N Engl J Med*, 2012, 366(10): 932–942. DOI: 10.1056/NEJMra1007236. Erratum in: *N Engl J Med*, 2012, 366(22): 2138.
- [2] 陈耀龙, 杨克虎, 王小钦, 等. 中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022 版)[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(10): 697–703. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20211228-02911.
- [3] Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews[J]. *BMJ*, 2021, 372: n71. DOI: 10.1136/bmj.n71.
- [4] GRADE Working Group. GRADE: an emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations[J]. *BMJ*, 2008, 336(7650): 924–926. DOI: 10.1136/bmj.39489.470347.AD.
- [5] Diamond IR, Grant RC, Feldman BM, et al. Defining consensus: a systematic review recommends methodologic criteria for reporting of Delphi studies[J]. *J Clin Epidemiol*, 2014, 67(4): 401–409. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2013.12.002.
- [6] Green M, Moxham J. The respiratory muscles[J]. *Clin Sci (Lond)*, 1985, 68(1): 1–10. DOI: 10.1042/cs0680001.
- [7] Roussos C. Function and fatigue of respiratory muscles[J]. *Chest*, 1985, 88(2 Suppl): 124S–132S. DOI: 10.1378/chest.88.2_supplement.124s.
- [8] Gransee HM, Mantilla CB, Sieck GC. Respiratory muscle plasticity[J]. *Compr Physiol*, 2012, 2(2): 1441–1462. DOI: 10.1002/cphy.c110050.
- [9] Gibson GJ. Diaphragmatic paresis: pathophysiology, clinical features, and investigation[J]. *Thorax*, 1989, 44(11): 960–970. DOI: 10.1136/thx.44.11.960.
- [10] Sant'ambrogio G, Camporesi E. Contribution of various inspiratory muscles to ventilation and the immediate and distant effect of diaphragmatic paralysis[J]. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*, 1973, 33(1): 401–409.
- [11] Ottenheijm CA, van Hees HWH, Heunks LMA, et al. Titin-based mechanosensing and signaling: role in diaphragm atrophy during unloading[J]. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2011, 300(2): L161–L166. DOI: 10.1152/ajplung.00288.2010.
- [12] Dres M, Goligher EC, Heunks LMA, et al. Critical illness-associated diaphragm weakness[J]. *Intensive Care Med*, 2017, 43(10): 1441–1452. DOI: 10.1007/s00134-017-4928-4.
- [13] Le Neindre A, Wormser J, Luperto M, et al. Diaphragm function in patients with sepsis and septic shock: a longitudinal ultrasound study[J]. *Aust Crit Care*, 2023, 36(2): 239–246. DOI: 10.1016/j.aucc.2022.01.003.
- [14] Dres M, Demoule A. Diaphragm dysfunction during weaning from mechanical ventilation: an underestimated phenomenon with clinical implications[J]. *Crit Care*, 2018, 22(1): 73. DOI: 10.1186/s13054-018-1992-2.
- [15] Cavka K, Fuller DD, Tonuzi G, et al. Diaphragm pacing and a model for respiratory rehabilitation after spinal cord injury[J]. *J Neurol Phys Ther*, 2021, 45(3): 235–242. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000360.
- [16] Schoser B, Fong E, Geberhiwot T, et al. Maximum inspiratory pressure as a clinically meaningful trial endpoint for neuromuscular diseases: a comprehensive review of the literature[J]. *Orphanet J Rare Dis*, 2017, 12(1): 52. DOI: 10.1186/s13023-017-0598-0.
- [17] Boussuges A, Rives S, Finance J, et al. Assessment of diaphragmatic function by ultrasonography: current approach and perspectives[J]. *World J Clin Cases*, 2020, 8(12): 2408–2424. DOI: 10.12998/wjcc.v8.i12.2408.
- [18] Fogarty MJ, Mantilla CB, Sieck GC. Breathing: motor control of diaphragm muscle[J]. *Physiology (Bethesda)*, 2018, 33(2): 113–126. DOI: 10.1152/physiol.00002.2018.
- [19] Tuinman PR, Jonkman AH, Dres M, et al. Respiratory muscle ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications in ICU and ED patients: a narrative review[J]. *Intensive Care Med*, 2020, 46(4): 594–605. DOI: 10.1007/s00134-019-05892-8.
- [20] Dot I, Pérez-Teran P, Samper MA, et al. Diaphragm dysfunction in mechanically ventilated patients[J]. *Arch Bronconeumol*, 2017, 53(3): 150–156. DOI: 10.1016/j.arbres.2016.07.008.
- [21] Sepúlveda P, Gallardo A, Arriagada R, et al. Weaning failure from mechanical ventilation: a scoping review of the utility of ultrasonography in the weaning process[J]. *Br J Anaesth*, 2025, 135(5): 1441–1455. DOI: 10.1016/j.bja.2025.02.024.
- [22] Supinski GS, Morris PE, Dhar S, et al. Diaphragm dysfunction in critical illness[J]. *Chest*, 2018, 153(4): 1040–1051. DOI: 10.1016/j.chest.2017.08.1157.
- [23] Hill M. The neuromuscular junction disorders[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2003, 74 Suppl 2(Suppl 2): ii32–ii37. DOI: 10.1136/jnnp.74.suppl_2.ii32.
- [24] Orozco-Levi M, Lloreta J, Minguella J, et al. Injury of the human diaphragm associated with exertion and chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2001, 164(9): 1734–1739. DOI: 10.1164/ajrccm.164.9.2011150.
- [25] Demoule A, Jung B, Prodanovic H, et al. Diaphragm dysfunction on admission to the intensive care unit. Prevalence, risk factors, and prognostic impact: a prospective study[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2013, 188(2): 213–219. DOI: 10.1164/rccm.201209-1668OC.
- [26] Goligher EC, Dres M, Fan E, et al. Mechanical ventilation-induced diaphragm atrophy strongly impacts clinical outcomes[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 197(2): 204–213. DOI: 10.1164/rccm.201703-0536OC.
- [27] Cao YY, Li PJ, Wang YQ, et al. Diaphragm dysfunction and rehabilitation strategy in patients with chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 872277. DOI: 10.3389/fphys.2022.872277.
- [28] Zhang BZ, Li PJ, Li J, et al. Effect of oxidative stress on diaphragm dysfunction and exercise intervention in chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 684453. DOI: 10.3389/fphys.2021.684453.
- [29] Tang HB, Shrager JB. The signaling network resulting in ventilator-induced diaphragm dysfunction[J]. *Am J Respir Cell Mol Biol*, 2018, 59(4): 417–427. DOI: 10.1165/rmb.2018-0022TR.
- [30] Levine S, Nguyen T, Taylor N, et al. Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans[J]. *N Engl J Med*, 2008, 358(13): 1327–1335. DOI: 10.1056/NEJMoa070447.
- [31] Wang M, Xu YW, Zhang YC, et al. Deciphering the autophagy regulatory network via single-cell transcriptome analysis reveals a requirement for autophagy homeostasis in spermatogenesis[J]. *Theranostics*, 2021, 11(10): 5010–5027. DOI: 10.7150/thno.55645.
- [32] Hyatt HW, Ozdemir M, Yoshihara T, et al. Calpains play an essential role in mechanical ventilation-induced diaphragmatic weakness and mitochondrial dysfunction[J]. *Redox Biol*, 2021, 38: 101802. DOI: 10.1016/j.redox.2020.101802.
- [33] Wen Y, Zhang X, Larsson L. Metabolomic profiling of respiratory muscles and lung in response to long-term controlled mechanical ventilation[J]. *Front Cell Dev Biol*, 2022, 10: 849973. DOI: 10.3389/fcell.2022.849973.
- [34] Smuder AJ, Sollanek KJ, Nelson WB, et al. Crosstalk between autophagy and oxidative stress regulates proteolysis in the diaphragm during mechanical ventilation[J]. *Free Radic Biol Med*, 2018, 115: 179–190. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2017.11.025.
- [35] Jiang JH, Chen Q, Chen X, et al. Magnesium sulfate ameliorates sepsis-induced diaphragm dysfunction in rats via inhibiting HMGB1/TLR4/NF- κ B pathway[J]. *Neuroreport*, 2020, 31(12): 902–908. DOI: 10.1097/WNR.0000000000001478.
- [36] Demoule A, Divangahi M, Yahiaoui L, et al. Endotoxin triggers nuclear factor- κ B-dependent up-regulation of multiple proinflammatory genes in the diaphragm[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2006, 174(6): 646–653. DOI: 10.1164/rccm.200509-1511OC.
- [37] Matecki S, Dridi H, Jung B, et al. Leaky ryanodine receptors contribute to diaphragmatic weakness during mechanical ventilation[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2016, 113(32): 9069–9074. DOI: 10.1073/pnas.1609707113.
- [38] Liang F, Li T, Azuelos I, et al. Ventilator-induced diaphragmatic dysfunction in MDX mice[J]. *Muscle Nerve*, 2018, 57(3): 442–448. DOI: 10.1002/mus.25760.
- [39] Tang HB, Kennedy CL, Lee M, et al. Smad3 initiates oxidative stress and proteolysis that underlies diaphragm dysfunction during mechanical ventilation[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 14530. DOI: 10.1038/s41598-017-11978-4.
- [40] Ottenheijm CA, Heunks LMA, Sieck GC, et al. Diaphragm

- dysfunction in chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2005, 172(2): 200–205. DOI: 10.1164/rccm.200502-2620C.
- [41] Pu H, Doig GS, Lv Y, et al. Modifiable risk factors for ventilator associated diaphragmatic dysfunction: a multicenter observational study[J]. *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1): 343. DOI: 10.1186/s12890-023-02633-y. Erratum in: *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1): 396. DOI: 10.1186/s12890-023-02695-y.
- [42] Saccheri C, Morawiec E, Delemazure J, et al. ICU-acquired weakness, diaphragm dysfunction and long-term outcomes of critically ill patients[J]. *Ann Intensive Care*, 2020, 10(1): 1. DOI: 10.1186/s13613-019-0618-4.
- [43] Umbrello M, Formenti P. Ultrasonographic assessment of diaphragm function in critically ill subjects[J]. *Respir Care*, 2016, 61(4): 542–555. DOI: 10.4187/respcare.04412.
- [44] Gottesman E, McCool FD. Ultrasound evaluation of the paralyzed diaphragm[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 1997, 155(5): 1570–1574. DOI: 10.1164/ajrccm.155.5.9154859.
- [45] Dubé BP, Dres M, Mayaux J, et al. Ultrasound evaluation of diaphragm function in mechanically ventilated patients: comparison to phrenic stimulation and prognostic implications[J]. *Thorax*, 2017, 72(9): 811–818. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2016-209459.
- [46] Kim WY, Suh HJ, Hong SB, et al. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation[J]. *Crit Care Med*, 2011, 39(12): 2627–2630. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3182266408.
- [47] Laghi FA Jr, Saad M, Shaikh H. Ultrasound and non-ultrasound imaging techniques in the assessment of diaphragmatic dysfunction[J]. *BMC Pulm Med*, 2021, 21(1): 85. DOI: 10.1186/s12890-021-01441-6.
- [48] Dres M, Demoule A. Monitoring diaphragm function in the ICU[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2020, 26(1): 18–25. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000682.
- [49] Boon AJ, Litchy WJ. Electrodiagnostic and ultrasound evaluation of respiratory weakness[J]. *Muscle Nerve*, 2024, 69(1): 18–28. DOI: 10.1002/mus.27998.
- [50] Schepens T, Verbrugge W, Dams K, et al. The course of diaphragm atrophy in ventilated patients assessed with ultrasound: a longitudinal cohort study[J]. *Crit Care*, 2015, 19: 422. DOI: 10.1186/s13054-015-1141-0.
- [51] Yao XY, Li HM, Sun BW, et al. Ultrasound assessment of diaphragmatic dysfunction in non-critically ill patients: relevant indicators and update[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2024, 11: 1389040. DOI: 10.3389/fmed.2024.1389040.
- [52] Santana PV, Cardenas LZ, Albuquerque ALP. Diaphragm ultrasound in critically ill patients on mechanical ventilation—evolving concepts[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(6): 1116. DOI: 10.3390/diagnostics13061116.
- [53] Chetta A, Rehman AK, Moxham J, et al. Chest radiography cannot predict diaphragm function[J]. *Respir Med*, 2005, 99(1): 39–44. DOI: 10.1016/j.rmed.2004.04.016.
- [54] Gaeta M, Barca E, Ruggeri P, et al. Late-onset Pompe disease (LOPD): correlations between respiratory muscles CT and MRI features and pulmonary function[J]. *Mol Genet Metab*, 2013, 110(3): 290–296. DOI: 10.1016/j.ymgme.2013.06.023.
- [55] Lee GD, Kim HC, Yoo JW, et al. Computed tomography confirms a reduction in diaphragm thickness in mechanically ventilated patients[J]. *J Crit Care*, 2016, 33: 47–50. DOI: 10.1016/j.jccr.2016.02.013.
- [56] Sukkasem W, Mofat SG, Kicska G, et al. Crus atrophy: accuracy of computed tomography in diagnosis of diaphragmatic paralysis[J]. *J Thorac Imaging*, 2017, 32(6): 383–390. DOI: 10.1097/RTI.0000000000000276.
- [57] Pettiaux N, Cassart M, Paiva M, et al. Three-dimensional reconstruction of human diaphragm with the use of spiral computed tomography[J]. *J Appl Physiol* (1985), 1997, 82(3): 998–1002. DOI: 10.1152/jappl.1997.82.3.998.
- [58] Jung B, Nougaret S, Conseil M, et al. Sepsis is associated with a preferential diaphragmatic atrophy: a critically ill patient study using tridimensional computed tomography[J]. *Anesthesiology*, 2014, 120(5): 1182–1191. DOI: 10.1097/ALN.0000000000000201.
- [59] Cluzel P, Similowski T, Chartrand-Lefebvre C, et al. Diaphragm and chest wall: assessment of the inspiratory pump with MR imaging—preliminary observations[J]. *Radiology*, 2000, 215(2): 574–583. DOI: 10.1148/radiology.215.2.r00ma28574.
- [60] Gierada DS, Curtin JJ, Erickson SJ, et al. Diaphragmatic motion: fast gradient-recalled-echo MR imaging in healthy subjects[J]. *Radiology*, 1995, 194(3): 879–884. DOI: 10.1148/radiology.194.3.7862995.
- [61] Paiva M, Verbanck S, Estenne M, et al. Mechanical implications of *in vivo* human diaphragm shape[J]. *J Appl Physiol* (1985), 1992, 72(4): 1407–1412. DOI: 10.1152/jappl.1992.72.4.1407.
- [62] Gaeta M, Musumeci O, Mondello S, et al. Clinical and pathophysiological clues of respiratory dysfunction in late-onset Pompe disease: new insights from a comparative study by MRI and respiratory function assessment[J]. *Neuromuscul Disord*, 2015, 25(11): 852–858. DOI: 10.1016/j.nmd.2015.09.003.
- [63] Kolar P, Sulc J, Kyncl M, et al. Stabilizing function of the diaphragm: dynamic MRI and synchronized spirometric assessment[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2010, 109(4): 1064–1071. DOI: 10.1152/japplphysiol.01216.2009.
- [64] Unal O, Arslan H, Uzun K, et al. Evaluation of diaphragmatic movement with MR fluoroscopy in chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Clin Imaging*, 2000, 24(6): 347–350. DOI: 10.1016/s0899-7071(00)00245-x.
- [65] Groth SS, Andrade RS. Diaphragmatic eventration[J]. *Thorac Surg Clin*, 2009, 19(4): 511–519. DOI: 10.1016/j.thorsurg.2009.08.003.
- [66] Wens SC, Ciet P, Perez-Rovira A, et al. Lung MRI and impairment of diaphragmatic function in Pompe disease[J]. *BMC Pulm Med*, 2015, 15: 54. DOI: 10.1186/s12890-015-0058-3.
- [67] Mier-Jedrzejowicz A, Brophy C, Moxham J, et al. Assessment of diaphragm weakness[J]. *Am Rev Respir Dis*, 1988, 137(4): 877–883. DOI: 10.1164/ajrccm/137.4.877.
- [68] Polkey MI, Green M, Moxham J. Measurement of respiratory muscle strength[J]. *Thorax*, 1995, 50(11): 1131–1135. DOI: 10.1136/thx.50.11.1131.
- [69] Steier J, Kaul S, Seymour J, et al. The value of multiple tests of respiratory muscle strength[J]. *Thorax*, 2007, 62(11): 975–980. DOI: 10.1136/thx.2006.072884.
- [70] Guimarães-Costa R, Similowski T, Rivals I, et al. Human diaphragm atrophy in amyotrophic lateral sclerosis is not predicted by routine respiratory measures[J]. *Eur Respir J*, 2019, 53(2): 1801749. DOI: 10.1183/13993003.01749-2018.
- [71] American Thoracic Society/European Respiratory Society. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2002, 166(4): 518–624. DOI: 10.1164/rccm.166.4.518.
- [72] Davis J, Goldman M, Loh L, et al. Diaphragm function and alveolar hypoventilation[J]. *Q J Med*, 1976, 45(177): 87–100.
- [73] Mier A, Brophy C, Moxham J, et al. Twitch pressures in the assessment of diaphragm weakness[J]. *Thorax*, 1989, 44(12): 990–996. DOI: 10.1136/thx.44.12.990.
- [74] Watson AC, Hughes PD, Louise Harris M, et al. Measurement of twitch transdiaphragmatic, esophageal, and endotracheal tube pressure with bilateral anterolateral magnetic phrenic nerve stimulation in patients in the intensive care unit[J]. *Crit Care Med*, 2001, 29(7): 1325–1331. DOI: 10.1097/00003246-200107000-00005.
- [75] Saadeh PB, Crisafulli CF, Sosner J, et al. Needle electromyography of the diaphragm: a new technique[J]. *Muscle Nerve*, 1993, 16(1): 15–20. DOI: 10.1002/mus.880160105.
- [76] Bellani G, Mauri T, Coppadoro A, et al. Estimation of patient's inspiratory effort from the electrical activity of the diaphragm[J]. *Crit Care Med*, 2013, 41(6): 1483–1491. DOI: 10.1097/CCM.0b013e31827caba0.
- [77] Jansen D, Jonkman AH, Roesthuis L, et al. Estimation of the diaphragm neuromuscular efficiency index in mechanically ventilated critically ill patients[J]. *Crit Care*, 2018, 22(1): 238. DOI: 10.1186/s13054-018-2172-0.
- [78] Santana PV, Cardenas LZ, Albuquerque ALP, et al. Diaphragmatic ultrasound: a review of its methodological aspects and clinical uses[J]. *J Bras Pneumol*, 2020, 46(6): e20200064. DOI: 10.36416/1806-3756/e20200064.
- [79] Dres M, Doorduyn J, Boussouar S, et al. Advancements in imaging techniques for monitoring the respiratory muscles[J]. *Crit Care*, 2025, 29(1): 110. DOI: 10.1186/s13054-025-05339-1.
- [80] Umbrello M, Formenti P, Longhi D, et al. Diaphragm ultrasound as indicator of respiratory effort in critically ill patients undergoing assisted mechanical ventilation: a pilot clinical study[J]. *Crit Care*, 2015, 19(1): 161. DOI: 10.1186/s13054-015-0894-9.
- [81] Zhou Q, Xu Y, Chen J, et al. Prediction of weaning outcomes from mechanical ventilation in critically ill patients based on the combination of ultrasound parameters of the heart, lung, and

- diaphragm: a prospective observational cohort study[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(9): 7697–7710. DOI: 10.21037/qims-2025-167.
- [82] Goligher EC, Laghi F, Detsky ME, et al. Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity[J]. *Intensive Care Med*, 2015, 41(4): 734. DOI: 10.1007/s00134-015-3724-2. Erratum for: *Intensive Care Med*, 2015, 41(4): 642–649. DOI: 10.1007/s00134-015-3687-3.
- [83] Vetrugno L, Camporesi A. Editorial: advances in lung ultrasound: from child to adulthood diseases, volume II [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2025, 12: 1650753. DOI: 10.3389/fmed.2025.1650753.
- [84] Grosu HB, Lee YI, Lee J, et al. Diaphragm muscle thinning in patients who are mechanically ventilated[J]. *Chest*, 2012, 142(6): 1455–1460. DOI: 10.1378/chest.11-1638.
- [85] 南淑良, 穆靓, 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. DOI: 10.12117/jccmi.2021.09.003.
- [86] 范瑞龙, 武向慧, 陈美凤, 等. 解剖 M 型超声测量膈肌运动参数与 COPD 患者严重程度相关性研究[J]. *中国超声医学杂志*, 2022, 38(11): 1241–1244. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0101.2022.11.011.
- [87] 尹莉, 葛钰玉, 王斯宇, 等. 膈肌移动度预测重症肺炎患者有创机械通气需求及死亡风险的临床价值[J]. *临床超声医学杂志*, 2023, 25(10): 775–779. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2023.10.004.
- [88] 徐磊, 孙晓川. 超声检查在膈肌功能评估及保护中的应用[J]. *中国小儿急救医学*, 2020, 27(6): 443–446. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4912.2020.06.010.
- [89] Haaksma ME, Smit JM, 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. DOI: 10.1186/s13054-022-03975-5.
- [90] Itagaki T, Akimoto Y, Takashima T, et al. Ultrasonographic assessment of the diaphragm[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(14): 1481. DOI: 10.3390/diagnostics14141481.
- [91] Tashiro N, Nishiwaki H, Ikeda T, et al. Clinical utility of diaphragmatic ultrasound for mechanical ventilator liberation in adults: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Intensive Care*, 2025, 13(1): 40. DOI: 10.1186/s40560-025-00811-0.
- [92] Menis AA, Tsolaki V, Papadonta ME, et al. Diaphragmatic ultrasound and its relationship to breathing effort and load: a prospective observational study[J]. *Crit Care*, 2025, 29(1): 190. DOI: 10.1186/s13054-025-05436-1.
- [93] Combet M, Coman B, Telias I. Monitoring and preserving diaphragmatic function in mechanical ventilation[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2025, 31(3): 293–301. DOI: 10.1097/MCC.0000000000001276.
- [94] Hermans G, Demoule A, Heunks L. How I perform diaphragmatic ultrasound in the intensive care unit[J]. *Intensive Care Med*, 2024, 50(12): 2175–2178. DOI: 10.1007/s00134-024-07688-x.
- [95] Parada-Gerreda HM, Tibaduiza AL, 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. DOI: 10.1186/s13054-023-04430-9.
- [96] Shiraishi M, Higashimoto Y, Nishiyama O, et al. Improvement of diaphragmatic excursion in the supine position in a patient with idiopathic pleuroparenchymal fibroelastosis: a case report[J]. *Respir Med Case Rep*, 2024, 51: 102078. DOI: 10.1016/j.rmcr.2024.102078.
- [97] Brown C, Tseng SC, Mitchell K, et al. Body position affects ultrasonographic measurement of diaphragm contractility[J]. *Cardiopulm Phys Ther J*, 2018, 29(4): 166–172. DOI: 10.1097/CPT.0000000000000083.
- [98] 中国重症超声研究组. 不同床旁肺部超声评估方案评估膈肌点位置与征象的研究[J]. *中华内科杂志*, 2015, 54(9): 778–782. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2015.09.009.
- [99] 庄耀宁, 林彬钦, 陈一媛, 等. COPD 患者不同卧位及膈肌功能状态对机械通气效果的影响[J]. *护理学杂志*, 2024, 39(3): 28–30, 44. DOI: 10.3870/j.issn.1001-4152.2024.03.028.
- [100] Hellyer NJ, Andreas NM, Bernstetter AS, et al. Comparison of diaphragm thickness measurements among postures via ultrasound imaging[J]. *PM R*, 2017, 9(1): 21–25. DOI: 10.1016/j.pmrj.2016.06.001.
- [101] 陈颖, 易杰. 膈肌超声在麻醉管理中的应用进展[J]. *中国医学科学院学报*, 2022, 44(5): 891–898. DOI: 10.3881/j.issn.1000.503X.14239.
- [102] 魏祖健, 余晓婵, 罗醒政, 等. 超声评估肋间肌和膈肌功能对撤呼吸机的预测价值[J]. *青岛大学学报(医学版)*, 2024, 60(5): 697–700. DOI: 10.11712/jms.2096-5532.2024.60.163.
- [103] 戚新雪, 王莹, 周天乐, 等. 体外膈神经电刺激对脑损伤术后昏迷的脱机困难患者机械通气时间、膈肌功能及其预后的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(11): 1613–1619. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2024.11.008.
- [104] 刘小曼, 贾杰, 魏栋帅, 等. 膈肌超声在老年稳定性冠心病患者中的应用[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(1): 117–120. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2024.01.020.
- [105] Boon AJ, Harper CJ, Ghahfarokhi LS, et al. Two-dimensional ultrasound imaging of the diaphragm: quantitative values in normal subjects[J]. *Muscle Nerve*, 2013, 47(6): 884–889. DOI: 10.1002/mus.23702.
- [106] Jain S, Nair G, Nuchin A, et al. Study of the diaphragm in chronic obstructive pulmonary disease using ultrasonography. *Lung India*[J]. 2019, 36(4): 299–303. DOI: 10.4103/lungindia.lungindia_466_18.
- [107] Palkar A, Narasimhan M, Greenberg H, et al. Diaphragm excursion-time index: a new parameter using ultrasonography to predict extubation outcome[J]. *Chest*, 2018, 153(5): 1213–1220. DOI: 10.1016/j.chest.2018.01.007.
- [108] Banerjee A, Mehrotra G. Comparison of lung ultrasound-based weaning indices with rapid shallow breathing index: are they helpful?[J]. *Indian J Crit Care Med*, 2018, 22(6): 435–440. DOI: 10.4103/ijccm.IJCCM_331_17.
- [109] Laursen CB, Clive A, Hallifax R, et al. European Respiratory Society statement on thoracic ultrasound[J]. *Eur Respir J*, 2021, 57(3): 2001519. DOI: 10.1183/13993003.01519-2020.
- [110] Zhao HT, Liu K, Li L. The indicators reflecting the speed of diaphragm shortening: mean contraction velocity versus peak contraction velocity[J]. *Crit Care Med*, 2025, 53(9): e1851–e1852. DOI: 10.1097/CCM.00000000000006727.
- [111] 肖灵君, 孙文静, 班乐鑫, 等. 超声在膈肌功能评估中的信度研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(1): 76–81. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2024.01.011.
- [112] Zhao HT, Liu K, Li L, et al. Left diaphragmatic ultrasound in the intensive care unit: practical considerations and alternative approaches[J]. *Intensive Care Med*, 2025, 51(2): 435–437. DOI: 10.1007/s00134-024-07736-6.
- [113] Zhao HT, Liu K, Yan YR, et al. Diaphragm excursion and diaphragm thickening fraction: commonality and conflict[J]. *Eur Respir Rev*, 2025, 34(176): 240285. DOI: 10.1183/16000617.0285-2024.
- [114] Kantarci F, Mihmanli I, Demirel MK, et al. Normal diaphragmatic motion and the effects of body composition: determination with M-mode sonography[J]. *J Ultrasound Med*, 2004, 23(2): 255–260. DOI: 10.7863/jum.2004.23.2.255.
- [115] Boussuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic motion studied by M-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values[J]. *Chest*, 2009, 135(2): 391–400. DOI: 10.1378/chest.08-1541.
- [116] Harper CJ, Shahgholi L, Gieslak K, et al. Variability in diaphragm motion during normal breathing, assessed with B-mode ultrasound[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2013, 43(12): 927–931. DOI: 10.2519/jospt.2013.4931.
- [117] Carrillo-Esper R, Pérez-Calatayud ÁA, Arch-Tirado E, et al. Standardization of sonographic diaphragm thickness evaluations in healthy volunteers[J]. *Respir Care*, 2016, 61(7): 920–924. DOI: 10.4187/respcare.03999.
- [118] 黄佳茹. 超声评估正常人群膈肌功能的研究[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2016.
- [119] Scarlata S, Mancini D, Laudisio A, et al. Reproducibility and clinical correlates of supine diaphragmatic motion measured by M-mode ultrasonography in healthy volunteers[J]. *Respiration*, 2018, 96(3): 259–266. DOI: 10.1159/000489229.
- [120] Boussuges A, Finance J, Chaumet G, et al. Diaphragmatic motion recorded by M-mode ultrasonography: limits of normality[J]. *ERJ Open Res*, 2021, 7(1): 00714–2020. DOI: 10.1183/23120541.00714-2020.
- [121] Boussuges A, Rives S, Finance J, et al. Ultrasound assessment of diaphragm thickness and thickening: reference values and limits of normality when in a seated position[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8: 742703. DOI: 10.3389/fmed.2021.742703.
- [122] 南淑良, 穆靓, 刘莉, 等. 解剖 M 型超声在膈肌运动评价中

- 的可行性[J]. 临床超声医学杂志, 2021, 23(3): 187-190. DOI: 10.16245/j.cnki.issn1008-6978.2021.03.010.
- [123] 石豆子, 刘蓉, 陈悦, 等. 实时剪切波弹性成像技术评估正常人膈肌功能的初步研究[J]. 中国临床医学影像杂志, 2023, 34(1): 33-36. DOI: 10.12117/jcemi.2023.01.008.
- [124] Yamada T, Minami T, Yoshino S, et al. Relationship between diaphragm thickness, thickening fraction, dome excursion, and respiratory pressures in healthy subjects: an ultrasound study[J]. *Lung*, 2024, 202(2): 171-178. DOI: 10.1007/s00408-024-00686-2.
- [125] 赵浩天, 王晓娜, 刘奕, 等. 成年健康人群膈肌超声正常值参考范围及影响因素[J/CD]. 中华医学超声杂志(电子版), 2024, 21(11): 1057-1067. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1672-6448.2024.11.008.
- [126] Zhao HT, Liu K, Muhetaer Y, et al. Enhancing diaphragmatic ultrasound for weaning success prediction: timing, respiratory drive, and a new index[J]. *Br J Anaesth*, 2025, 135(1): 289-291. DOI: 10.1016/j.bja.2025.04.042.
- [127] Menis AA, Tsolaki V, Papadonta ME, et al. The relationship of diaphragmatic ultrasound-based and manometric indices with difficult weaning in tracheostomized patients[J]. *Respir Care*, 2024, 69(10): 1323-1331. DOI: 10.4187/respcare.11782.
- [128] Dres M, Dubé BP, Mayaux J, et al. Coexistence and impact of limb muscle and diaphragm weakness at time of liberation from mechanical ventilation in medical intensive care unit patients[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 195(1): 57-66. DOI: 10.1164/ajrccm.201602-03670C.
- [129] Poddighe D, Van Hollebeke M, Choudhary YQ, et al. Accuracy of respiratory muscle assessments to predict weaning outcomes: a systematic review and comparative meta-analysis[J]. *Crit Care*, 2024, 28(1): 70. DOI: 10.1186/s13054-024-04823-4.
- [130] Kharasch SJ, Loewen A, Solverson KJ, et al. Diaphragmatic ultrasound: approach, emerging evidence, and future perspectives in non-ICU patients[J]. *Intern Emerg Med*, 2025, 20(3): 643-654. DOI: 10.1007/s11739-024-03835-w.
- [131] Vivier E, Mekontso Dessap A, Dimassi S, et al. Diaphragm ultrasonography to estimate the work of breathing during non-invasive ventilation[J]. *Intensive Care Med*, 2012, 38(5): 796-803. DOI: 10.1007/s00134-012-2547-7.
- [132] Vetrugno L, Biasucci DG, Deana C, et al. Lung ultrasound and supine chest X-ray use in modern adult intensive care: mapping 30 years of advancement (1993-2023)[J]. *Ultrasound J*, 2024, 16(1): 7. DOI: 10.1186/s13089-023-00351-4.
- [133] Gibbons RC, Magee M, Goett H, et al. Lung ultrasound vs. chest X-ray study for the radiographic diagnosis of COVID-19 pneumonia in a high-prevalence population[J]. *J Emerg Med*, 2021, 60(5): 615-625. DOI: 10.1016/j.jemermed.2021.01.041.
- [134] Touw HR, Parlevliet KL, Beerepoot M, et al. Lung ultrasound compared with chest X-ray in diagnosing postoperative pulmonary complications following cardiothoracic surgery: a prospective observational study[J]. *Anaesthesia*, 2018, 73(8): 946-954. DOI: 10.1111/anae.14243.
- [135] Sartini S, Frizzi J, Borselli M, et al. Which method is best for an early accurate diagnosis of acute heart failure? Comparison between lung ultrasound, chest X-ray and NT-pro-BNP performance: a prospective study[J]. *Intern Emerg Med*, 2017, 12(6): 861-869. DOI: 10.1007/s11739-016-1498-3.
- [136] Lichtenstein DA, Mezière GA. Relevance of lung ultrasound in the diagnosis of acute respiratory failure: the BLUE protocol[J]. *Chest*, 2008, 134(1): 117-125. DOI: 10.1378/chest.07-2800. Erratum in: *Chest*, 2013, 144(2): 721.
- [137] Lichtenstein DA. BLUE-protocol and FALLS-protocol: two applications of lung ultrasound in the critically ill[J]. *Chest*, 2015, 147(6): 1659-1670. DOI: 10.1378/chest.14-1313.
- [138] Sekiguchi H, Schenck LA, Horie R, et al. Critical care ultrasonography differentiates ARDS, pulmonary edema, and other causes in the early course of acute hypoxemic respiratory failure[J]. *Chest*, 2015, 148(4): 912-918. DOI: 10.1378/chest.15-0341.
- [139] 中国重症超声研究组. 重症心肺超声评估改变临床治疗的多因素分析——1 913 例患者的多中心、前瞻性研究[J]. 中华超声影像学杂志, 2021, 30(12): 1018-1025. DOI: 10.3760/cma.j.cn131148-20210526-00360.
- [140] Bekgoz B, Kilicaslan I, Bildik F, et al. BLUE protocol ultrasonography in emergency department patients presenting with acute dyspnea[J]. *Am J Emerg Med*, 2019, 37(11): 2020-2027. DOI: 10.1016/j.ajem.2019.02.028.
- [141] 王书鹏, 段军. 重症肺部超声临床应用管理流程[J/CD]. 中华诊断学电子杂志, 2018, 6(2): 98-100. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2018.02.008.
- [142] 赵浩天, 李丽, 赵鹤龄, 等. 心肺超声在成人急性呼吸困难中的应用: 心源性肺水肿与肺炎的鉴别诊断模型构建[J]. 中华超声影像学杂志, 2023, 32(3): 242-249. DOI: 10.3760/cma.j.cn131148-20220623-00455.
- [143] 河北省医学会超声分会, 河北省医师协会超声医师分会, 河北省超声医学质量管理与控制中心, 等. 急性呼吸困难床旁肺超声诊断规范专家建议[J]. 疑难病杂志, 2024, 23(3): 257-265. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6450.2024.03.001.
- [144] 秦瑶, 尹万红, 曾学英, 等. 重症医学科问题导向重症超声检查特征分析[J/CD]. 中华医学超声杂志(电子版), 2017, 14(12): 943-947. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1672-6448.2017.12.013.
- [145] 赵浩天, 刘奕, 刘元琳, 等. 对比床旁急诊肺超声与联合心肺及附加超声诊断急性呼吸困难病因的准确性[J]. 中国介入影像与治疗学, 2024, 21(3): 134-138. DOI: 10.13929/j.issn.1672-8475.2024.03.002.
- [146] 李易, 王小亭, 尹万红. 基于重症超声可视化的休克规范诊疗: OPACCUS 流程[J]. 中华内科杂志, 2025, 64(7): 597-603. DOI: 10.3760/cma.j.cn112138-20241106-00732.
- [147] Wang Q, Zou TJ, Zeng XY, et al. Establishment of seven lung ultrasound phenotypes: a retrospective observational study of an LUS registry[J]. *BMC Pulm Med*, 2024, 24(1): 483. DOI: 10.1186/s12890-024-03299-w.
- [148] Vassilakopoulos T. Ventilator-induced diaphragm dysfunction: the clinical relevance of animal models[J]. *Intensive Care Med*, 2008, 34(1): 7-16. DOI: 10.1007/s00134-007-0866-x.
- [149] Huang DZ, Ma H, Zhong WZ, et al. Using M-mode ultrasonography to assess diaphragm dysfunction and predict the success of mechanical ventilation weaning in elderly patients[J]. *J Thorac Dis*, 2017, 9(9): 3177-3186. DOI: 10.21037/jtd.2017.08.16.
- [150] Jung B, Moury PH, Mahul M, et al. Diaphragmatic dysfunction in patients with ICU-acquired weakness and its impact on extubation failure[J]. *Intensive Care Med*, 2016, 42(5): 853-861. DOI: 10.1007/s00134-015-4125-2.
- [151] Gastinne H, Venot J, Dupuy JP, et al. Unilateral diaphragmatic dysfunction in blunt chest trauma[J]. *Chest*, 1988, 93(3): 518-521. DOI: 10.1378/chest.93.3.518. PMID: 3277805.
- [152] Cain W, Cai SS, Salcedo C, et al. Unilateral diaphragmatic dysfunction following thoracic outlet surgery diagnosed by point-of-care ultrasound[J]. *J Community Hosp Intern Med Perspect*, 2021, 11(4): 551-553. DOI: 10.1080/20009666.2021.1915550.
- [153] Li SP, Zhou XL, Zhao Y. Sedation with midazolam worsens the diaphragm function than dexmedetomidine and propofol during mechanical ventilation in rats[J]. *Biomed Pharmacother*, 2020, 121: 109405. DOI: 10.1016/j.biopha.2019.109405.
- [154] Chen YF, Zhou SY, Liao LX, et al. Diaphragmatic ultrasound can help evaluate pulmonary dysfunction in patients with stroke[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1061003. DOI: 10.3389/fneur.2023.1061003.
- [155] Okura K, Iwakura M, Shibata K, et al. Diaphragm thickening assessed by ultrasonography is lower than healthy adults in patients with chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Clin Respir J*, 2020, 14(6): 521-526. DOI: 10.1111/crj.13161.
- [156] Inci K, Macit Aydın E, Aygencel G, et al. Association between nutritional risk status and both diaphragmatic dysfunction and diaphragm atrophy in medical intensive care unit patients[J]. *Nutr Hosp*, 2024, 41(2): 286-292. DOI: 10.20960/nh.05011.
- [157] Zhang J, Xie Q, Jiang R, et al. Role of diaphragmatic dysfunction in extubation failure among patients at high risk of reintubation: a prospective cohort study[J]. *J Crit Care*, 2025, 86: 154983. DOI: 10.1016/j.jcrc.2024.154983.
- [158] Demoule A, Molinari N, Jung B, et al. Patterns of diaphragm function in critically ill patients receiving prolonged mechanical ventilation: a prospective longitudinal study[J]. *Ann Intensive Care*, 2016, 6(1): 75. DOI: 10.1186/s13613-016-0179-8.
- [159] Itagaki T. Diaphragm-protective mechanical ventilation in acute respiratory failure[J]. *J Med Invest*, 2022, 69(3.4): 165-172. DOI: 10.2152/jmi.69.165.
- [160] Goligher EC, Jonkman AH, Dianti J, et al. Clinical strategies for implementing lung and diaphragm-protective ventilation: avoiding insufficient and excessive effort[J]. *Intensive Care Med*, 2020, 46(12): 2314-2326. DOI: 10.1007/s00134-020-06288-9.
- [161] Saad M, Pini S, Danzo F, et al. Ultrasonographic assessment of diaphragmatic function and its clinical application in the management of patients with acute respiratory failure[J]. *Diagnostics*

- (Basel), 2023, 13(3): 411. DOI: 10.3390/diagnostics13030411.
- [162] Boon AJ, Meiling JB, Luetmer MT, et al. Paradoxical thinning of the diaphragm on ultrasound is a risk factor for requiring non-invasive ventilation in patients with neuromuscular diaphragmatic dysfunction[J]. *Muscle Nerve*, 2024, 70(3): 352–359. DOI: 10.1002/mus.28194.
 - [163] Fritsch SJ, Siemer AG, Dreher M, et al. Diaphragm ultrasound in patients with prolonged weaning from mechanical ventilation[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2024, 14(5): 3248–3263. DOI: 10.21037/qims-23-1712.
 - [164] WEAN SAFE Investigators. Weaning from mechanical ventilation in intensive care units across 50 countries (WEAN SAFE): a multicentre, prospective, observational cohort study[J]. *Lancet Respir Med*, 2023, 11(5): 465–476. DOI: 10.1016/S2213-2600(22)00449-0. Erratum in: *Lancet Respir Med*, 2023, 11(3): e25. DOI: 10.1016/S2213-2600(23)00054-1.
 - [165] Dres M, Rozenberg E, Morawiec E, et al. Diaphragm dysfunction, lung aeration loss and weaning-induced pulmonary oedema in difficult-to-wean patients[J]. *Ann Intensive Care*, 2021, 11(1): 99. DOI: 10.1186/s13613-021-00886-6.
 - [166] Le Neindre A, Philippart F, Luperto M, et al. Diagnostic accuracy of diaphragm ultrasound to predict weaning outcome: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Nurs Stud*, 2021, 117: 103890. DOI: 10.1016/j.ijnurstu.2021.103890.
 - [167] Spadaro S, Grasso S, Mauri T, et al. Can diaphragmatic ultrasonography performed during the T-tube trial predict weaning failure? The role of diaphragmatic rapid shallow breathing index[J]. *Crit Care*, 2016, 20(1): 305. DOI: 10.1186/s13054-016-1479-y.
 - [168] Pan LH, Zhao J, Wang XF, et al. Value of diaphragmatic ultrasound parameters in assessing weaning outcomes and survival in ventilator-dependent intensive care unit patients[J]. *Am J Transl Res*, 2024, 16(12): 7830–7839. DOI: 10.62347/FDPE7053.
 - [169] Tashiro N, Hasegawa T, Nishiwaki H, et al. Clinical utility of diaphragmatic ultrasonography for mechanical ventilator weaning in adults: a study protocol for systematic review and meta-analysis[J]. *Health Sci Rep*, 2023, 6(7): e1378. DOI: 10.1002/hsr2.1378.
 - [170] Saravanan R, Nivedita K, Karthik K, et al. Role of diaphragm ultrasound in weaning mechanically ventilated patients: a prospective observational study[J]. *Indian J Anaesth*, 2022, 66(8): 591–598. DOI: 10.4103/ija.ija_229_22.
 - [171] Bureau C, Van Hollebeke M, Dres M. Managing respiratory muscle weakness during weaning from invasive ventilation[J]. *Eur Respir Rev*, 2023, 32(168): 220205. DOI: 10.1183/16000617.0205-2022.
 - [172] Umbrello M, Formenti P, Lusardi AC, et al. Oesophageal pressure and respiratory muscle ultrasonographic measurements indicate inspiratory effort during pressure support ventilation[J]. *Br J Anaesth*, 2020, 125(1): e148–e157. DOI: 10.1016/j.bja.2020.02.026.
 - [173] Rodríguez-Núñez I, Navarro X, Gatica D, et al. Effect of abdominal muscle training on respiratory muscle strength and forced expiratory flows in sedentary, healthy adolescents[J]. *Arch Argent Pediatr*, 2016, 114(5): 434–440. DOI: 10.5546/aap.2016.eng.434.
 - [174] Schreiber AF, Bertoni M, Coiffard B, et al. Abdominal muscle use during spontaneous breathing and cough in patients who are mechanically ventilated: a Bi-center ultrasound study[J]. *Chest*, 2021, 160(4): 1316–1325. DOI: 10.1016/j.chest.2021.05.053.
 - [175] 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. DOI: 10.5114/ait.2022.115351.
 - [176] Er B, Mizrak B, Aydemir A, et al. Is diaphragm ultrasound better than rapid shallow breathing index for predicting weaning in critically ill elderly patients? [J]. *Tuberk Toraks*, 2023, 71(3): 197–202. DOI: 10.5578/tt.20239701.
 - [177] Peng LH, Zhu SP, Lin W, et al. Association of frailty with ultrasound parameters of diaphragm function in 153 elderly individuals[J]. *Med Sci Monit*, 2025, 31: e947951. DOI: 10.12659/MSM.947951.
 - [178] Li SG, Chen Z, Yan WF. Application of bedside ultrasound in predicting the outcome of weaning from mechanical ventilation in elderly patients[J]. *BMC Pulm Med*, 2021, 21(1): 217. DOI: 10.1186/s12890-021-01605-4.
 - [179] He HW, Chi Y, Yang YY, et al. Early individualized positive end-expiratory pressure guided by electrical impedance tomography in acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled clinical trial[J]. *Crit Care*, 2021, 25(1): 230. DOI: 10.1186/s13054-021-03645-y.
 - [180] Xu MR, He HW, Long Y. Lung perfusion assessment by bedside electrical impedance tomography in critically ill patients[J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 748724. DOI: 10.3389/fphys.2021.748724.
 - [181] He HW, Chi Y, Long Y, et al. Three broad classifications of acute respiratory failure etiologies based on regional ventilation and perfusion by electrical impedance tomography: a hypothesis-generating study[J]. *Ann Intensive Care*, 2021, 11(1): 134. DOI: 10.1186/s13613-021-00921-6.
 - [182] Chi Y, Zhao ZQ, Frerichs I, et al. Prevalence and prognosis of respiratory pendelluft phenomenon in mechanically ventilated ICU patients with acute respiratory failure: a retrospective cohort study[J]. *Ann Intensive Care*, 2022, 12(1): 22. DOI: 10.1186/s13613-022-00995-w.
 - [183] TREND Study Group. 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.
 - [184] Yue CF, He HW, Su LX, et al. A novel method for diaphragm-based electrode belt position of electrical impedance tomography by ultrasound[J]. *J Intensive Care*, 2023, 11(1): 41. DOI: 10.1186/s40560-023-00691-2.
 - [185] Etienne H, Morris IS, Hermans G, et al. Diaphragm neurostimulation assisted ventilation in critically ill patients[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2023, 207(10): 1275–1282. DOI: 10.1164/rccm.202212-2252CP.
 - [186] Adler D, Gottfried SB, Bautin N, et al. Repetitive magnetic stimulation of the phrenic nerves for diaphragm conditioning: a normative study of feasibility and optimal settings[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2011, 36(6): 1001–1008. DOI: 10.1139/h11-095.
 - [187] Gonzalez-Bermejo J, Morélot-Panzini C, Georges M, et al. Can diaphragm pacing improve gas exchange? Insights from quadriplegic patients[J]. *Eur Respir J*, 2014, 43(1): 303–306. DOI: 10.1183/09031936.00127713.
 - [188] Martin AD, Joseph AM, Beaver TM, et al. Effect of intermittent phrenic nerve stimulation during cardiothoracic surgery on mitochondrial respiration in the human diaphragm[J]. *Crit Care Med*, 2014, 42(2): e152–e156. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3182a63fdd.
 - [189] Reynolds S, Ebner A, Meffen T, et al. Diaphragm activation in ventilated patients using a novel transvenous phrenic nerve pacing catheter[J]. *Crit Care Med*, 2017, 45(7): e691–e694. DOI: 10.1097/CCM.0000000000002366.
 - [190] Rohrs EC, Bassi TG, Fernandez KC, et al. Diaphragm neurostimulation during mechanical ventilation reduces atelectasis and transpulmonary plateau pressure, preserving lung homogeneity and PaO₂/FIO₂[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2021, 131(1): 290–301. DOI: 10.1152/jappphysiol.00119.2021.
 - [191] Boyle KGPJM, Eichenberger PA, Schön P, et al. Inspiratory response and side-effects to rapid bilateral magnetic phrenic nerve stimulation using differently shaped coils: implications for stimulation-assisted mechanical ventilation[J]. *Respir Res*, 2022, 23(1): 357. DOI: 10.1186/s12931-022-02251-y.
 - [192] Reynolds SC, Meyyappan R, Thakkar V, et al. Mitigation of ventilator-induced diaphragm atrophy by transvenous phrenic nerve stimulation[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 195(3): 339–348. DOI: 10.1164/rccm.201502-0363OC.
 - [193] O'Rourke J, Soták M, Curley GF, et al. Initial assessment of the percutaneous electrical phrenic nerve stimulation system in patients on mechanical ventilation[J]. *Crit Care Med*, 2020, 48(5): e362–e370. DOI: 10.1097/CCM.0000000000004256.
 - [194] RESCUE-2 Study Group Investigators. Randomized clinical study of temporary transvenous phrenic nerve stimulation in difficult-to-wean patients[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2022, 205(10): 1169–1178. DOI: 10.1164/rccm.202107-1709OC.
 - [195] Medrinal C, Machefert M, Lamia B, et al. Transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation in mechanically ventilated patients: a randomised study[J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 338. DOI: 10.1186/s13054-023-04597-1.
 - [196] Panelli A, Grimm AM, Krause S, et al. Noninvasive electromagnetic phrenic nerve stimulation in critically ill patients: a feasibility study[J]. *Chest*, 2024, 166(3): 502–510. DOI: 10.1016/j.chest.2024.02.035.
 - [197] Capdevila M, De Jong A, Belafia F, et al. Ultrasound-guided transcutaneous phrenic nerve stimulation in critically ill patients: a new method to evaluate diaphragmatic function[J]. *Anesthesiology*, 2025, 142(3): 522–531. DOI: 10.1097/ALN.0000000000005267.

- [198] Schreiber AF, Subirà C, Sklar M, et al. Multi-center randomized superiority clinical trial in the early phase of mechanically ventilated patients to preserve diaphragm thickness using non-invasive magnetic phrenic nerve stimulation: STIMIT ACTIVATOR 1 pivotal trial[J]. *Trials*, 2025, 26(1): 202. DOI: 10.1186/s13063-025-08838-2.
- [199] Mól CG, Nawa RK, Britto ACDC, et al. Effects of transcutaneous electrical phrenic nerve stimulation and transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation: a protocol for a randomized, single-blind, crossover trial[J]. *PLoS One*, 2026, 21(4): e0347493. DOI: 10.1371/journal.pone.0347493.
- [200] van Oosten JP, Akoumianaki E, Jonkman AH. Monitoring respiratory muscles effort during mechanical ventilation[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2025, 31(1): 12–20. DOI: 10.1097/MCC.0000000000001229.
- [201] Krishnakumar M, Muthuchellappan R, Chakrabarti D. Diaphragm function assessment during spontaneous breathing trial in patients with neuromuscular diseases[J]. *Neurocrit Care*, 2021, 34(2): 382–389. DOI: 10.1007/s12028-020-01141-9.
- [202] Widing H, Pellegrini M, Chiodaroli E, et al. Positive end-expiratory pressure limits inspiratory effort through modulation of the effort-to-drive ratio: an experimental crossover study[J]. *Intensive Care Med*, 2024, 12(1): 10. DOI: 10.1186/s40635-024-00597-9.
- [203] Menis AA, Tsolaki V, Papadonta ME, et al. A study on the diagnostic accuracy of tidal volume-diaphragmatic contraction velocity: a novel index for weaning outcome prediction[J]. *Crit Care Med*, 2025, 53(6): e1214–e1223. DOI: 10.1097/CCM.0000000000006660.
- [204] Orde SR, Boon AJ, Firth DG, et al. Diaphragm assessment by two dimensional speckle tracking imaging in normal subjects[J]. *BMC Anesthesiol*, 2016, 16(1): 43. DOI: 10.1186/s12871-016-0201-6.
- [205] Goutman SA, Hamilton JD, Swihart B, et al. Speckle tracking as a method to measure hemidiaphragm excursion[J]. *Muscle Nerve*, 2017, 55(1): 125–127. DOI: 10.1002/mus.25380.
- [206] Oppersma E, Hatam N, Doorduyn J, et al. Functional assessment of the diaphragm by speckle tracking ultrasound during inspiratory loading[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2017, 123(5): 1063–1070. DOI: 10.1152/jappphysiol.00095.2017.
- [207] Ye X, Liu Z, Ma Y, et al. A novel normalized cross-correlation speckle-tracking ultrasound algorithm for the evaluation of diaphragm deformation[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8: 612933. DOI: 10.3389/fmed.2021.612933.
- [208] Fritsch SJ, Hatam N, Goetzenich A, et al. Speckle tracking ultrasonography as a new tool to assess diaphragmatic function: a feasibility study[J]. *Ultrasonography*, 2022, 41(2): 403–415. DOI: 10.14366/usg.21044.
- [209] Huang DZ, Song F, Luo BJ, et al. Using automatic speckle tracking imaging to measure diaphragm excursion and predict the outcome of mechanical ventilation weaning[J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 18. DOI: 10.1186/s13054-022-04288-3.
- [210] Flatres A, Aarab Y, Nougaret S, et al. Real-time shear wave ultrasound elastography: a new tool for the evaluation of diaphragm and limb muscle stiffness in critically ill patients[J]. *Crit Care*, 2020, 24(1): 34. DOI: 10.1186/s13054-020-2745-6. Erratum in: *Crit Care*, 2020, 24(1): 79. DOI: 10.1186/s13054-020-2802-1.
- [211] Hug F, Tucker K, Gennissou JL, et al. Elastography for muscle biomechanics: toward the estimation of individual muscle force[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2015, 43(3): 125–133. DOI: 10.1249/JES.0000000000000049.
- [212] Chino K, Ohya T, Katayama K, et al. Diaphragmatic shear modulus at various submaximal inspiratory mouth pressure levels[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2018, 252–253: 52–57. DOI: 10.1016/j.resp.2018.03.009.
- [213] Zhao HT, Long L, Liu Y, et al. Multimodal diaphragmatic ultrasound indicators in healthy adults: reliability and consistency observation by ultrasound physician and critical care physician[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2025, 12: 1542979. DOI: 10.3389/fmed.2025.1542979.
- [214] Fossé Q, Poulard T, Niérat MC, et al. Ultrasound shear wave elastography for assessing diaphragm function in mechanically ventilated patients: a breath-by-breath analysis[J]. *Crit Care*, 2020, 24(1): 669. DOI: 10.1186/s13054-020-03338-y.
- [215] Xu JH, Wu ZZ, Tao FY, et al. Ultrasound shear wave elastography for evaluation of diaphragm stiffness in patients with stable COPD: a pilot trial[J]. *J Ultrasound Med*, 2021, 40(12): 2655–2663. DOI: 10.1002/jum.15655.
- [216] Chen YJ, Li JY, Dong BT, et al. Two-dimensional shear wave elastography: a new tool for evaluating respiratory muscle stiffness in chronic obstructive pulmonary disease patients[J]. *BMC Pulm Med*, 2022, 22(1): 441. DOI: 10.1186/s12890-022-02231-4.
- [217] Molina-Hernández N, Chicharro JL, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, et al. Ultrasonographic reliability and repeatability of simultaneous bilateral assessment of diaphragm muscle thickness during normal breathing[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(10): 6656–6667. DOI: 10.21037/qims-23-329.
- [218] Song F, Liu HZ, Ma H, et al. AI model based on diaphragm ultrasound to improve the predictive performance of invasive mechanical ventilation weaning: prospective cohort study[J]. *JMIR Form Res*, 2025, 9: e72482. DOI: 10.2196/72482.
- [219] Soilemez E, Savvidou S, Sotiriou P, et al. Tissue doppler imaging of the diaphragm in healthy subjects and critically ill patients[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(7): 1005–1012. DOI: 10.1164/rccm.201912-2341OC.
- [220] Maurizio R, Rinaldi VE, Camerini PG, et al. Right diaphragmatic peak motion velocities on pulsed wave tissue Doppler imaging in neonates: method, reproducibility, and reference values[J]. *J Ultrasound Med*, 2019, 38(10): 2695–2701. DOI: 10.1002/jum.14974.
- [221] McCool FD, Tzelepis GE. Tissue Doppler imaging of the diaphragm: a new kid on the block?[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(7): 921–922. DOI: 10.1164/rccm.202007-2771ED.
- [222] 赵浩天, 刘奕, 孙丽, 等. 组织多普勒法监测膈肌运动峰速度对机械通气老年患者膈肌功能评价[J]. *中国超声医学杂志*, 2021, 37(9): 1006–1009. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0101.2021.09.015.
- [223] Cammarota G, Boniolo E, Santangelo E, et al. Diaphragmatic kinetics assessment by tissue Doppler imaging and extubation outcome[J]. *Respir Care*, 2021, 66(6): 983–993. DOI: 10.4187/respcare.08702.
- [224] 赵浩天, 王晓娜, 刘元琳, 等. 基于组织多普勒成像校正膈肌超声参数评估无创机械通气呼吸困难患者膈肌功能[J]. *中国医学影像学杂志*, 2024, 40(10): 1567–1571. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2024.10.023.
- [225] Neto Silva I, Bennett C, Duarte JA, et al. Ultrasound innovations in diaphragm assessment: an integrative review of expanding clinical applications[J]. *Eur Respir Rev*, 2025, 34(178): 250089. DOI: 10.1183/16000617.0089-2025. Erratum in: *Eur Respir Rev*, 2025, 34(178): 255089. DOI: 10.1183/16000617.5089-2025.
- [226] Bird JD, Lance ML, Bachasson D, et al. Diaphragm blood flow: new avenues for human translation[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2025, 138(4): 909–925. DOI: 10.1152/jappphysiol.00669.2024.
- [227] Bird JD, Lance ML, Bansen TRW, et al. Quantifying diaphragm blood flow with contrast-enhanced ultrasound in humans[J]. *Chest*, 2024, 166(4): 821–834. DOI: 10.1016/j.chest.2024.04.026.

(收稿日期: 2026-03-10)

(本文编辑: 孙茜)