

膈肌超声临床应用研究进展

甘雨晨, 但 伶*

重庆医科大学附属第二医院麻醉科, 重庆

收稿日期: 2024年12月9日; 录用日期: 2025年1月3日; 发布日期: 2025年1月14日

摘 要

膈肌作为呼吸泵的重要组成部分, 是负责吸气的主要肌肉。膈肌功能可以通过多种方式进行评估, 例如胸部X线、CT, 膈肌肌电图, 跨膈压等。近年来, 膈肌超声以其直观、无创、便携、实时等优势, 在临床应用中逐渐发挥重要作用。目前膈肌超声主要应用于预测膈肌功能障碍、预防膈肌萎缩、预测机械通气时机及结局、评估患者吸气努力、促进患者预后康复, 以及在COPD及ALS患者中的应用。基于此, 本文对膈肌功能的评估方法及近年来膈肌超声的临床应用进行综述。

关键词

膈肌, 超声, 临床应用

Progress in Clinical Application of Diaphragm Ultrasound

Yuchen Gan, Ling Dan*

Department of Anesthesiology, Second Affiliated Hospital, Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Dec. 9th, 2024; accepted: Jan. 3rd, 2025; published: Jan. 14th, 2025

Abstract

As an important part of the respiratory pump, the diaphragm is the main muscle responsible for inhalation. Diaphragm function can be assessed in a variety of ways, such as chest X-ray, CT, diaphragm electromyography, transdiaphragmatic pressure, etc. In recent years, diaphragm ultrasound has gradually played an important role in clinical application because of its intuitive, non-invasive, portable and real-time advantages. At present, diaphragmatic ultrasound is mainly used in predicting diaphragmatic dysfunction, preventing diaphragmatic atrophy, predicting the timing and outcome of mechanical ventilation, evaluating patients' inspiratory efforts, promoting patients'

*通讯作者。

文章引用: 甘雨晨, 但伶. 膈肌超声临床应用研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(1): 309-322.
DOI: 10.12677/acm.2025.151044

prognosis and rehabilitation, and in patients with COPD and ALS. Based on this, the assessment methods of diaphragm function and the clinical application of diaphragm ultrasound in recent years are reviewed in this paper.

Keywords

Diaphragm, Ultrasound, Clinical Application

Copyright © 2025 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. 引言

膈肌是吸气功能的主要承载肌肉(占比 60%~80%), 在静止时产生三分之二的潮气量[1]。膈肌的运动神经支配完全来自膈神经, 起源于 C3~C5 脊髓前角。膈肌由不同类型的肌纤维混合组成, 通常根据氧化酵解酶活性的不同将膈肌纤维分为慢收缩纤维(I 型肌纤维)和快收缩纤维(II 型肌纤维), I 型肌纤维线粒体多、酶活性高, 故不易疲劳; II 型肌纤维由于肌红蛋白含量少, 糖元酵解酶较多, 耐疲劳能力较差, 但收缩更快、力量更强[2]。这两种纤维协调运动, 共同参与膈肌收缩。膈肌不仅在呼吸运动中起主导作用, 在咳嗽排痰、呕吐吞咽、维持体位与姿势改变等生理活动中也发挥着重要作用。基于此, 本文对膈肌功能的评估方法及近年来膈肌超声的临床应用进行综述, 以期进一步明确膈肌功能在各项病理生理活动中的重要作用与意义。

2. 膈肌的病理生理

膈肌为圆顶状的骨骼肌, 它将胸腔分为上、下两部分。膈肌的肌纤维在中心腱处聚集。吸气时, 膈肌收缩, 使中心腱下移在胸腔上部形成负压, 使空气吸入肺内。呼气时, 膈肌纤维放松, 中心腱松弛而使肺回缩, 从而呼出气体。在临床上, 感染、机械通气、COPD、神经肌肉病变、手术等均为导致膈肌发生功能障碍的常见影响因素, 其发生的病理生理机制涉及氧化应激反应、线粒体损伤、蛋白水解或合成、钙离子利用障碍、自噬等多种分子机制[3]-[5]。例如, 机械通气诱导的膈肌功能障碍称为呼吸机相关性膈肌功能障碍(VIDD), 在分子水平机制上, 史中华等人首次发现机械通气患者膈肌纤维肌球蛋白处于超级松弛状态的数量增加是造成膈肌肌纤维收缩无力新机制[6]。此外有研究发现, COPD 患者的膈肌 I 型肌纤维比例增加, II 型肌纤维比例减少, 这样的改变使膈肌的抗疲劳性得以提高。但泛素-蛋白酶体途径激活, 蛋白水解增加, 使得膈肌肌力下降进而发生膈肌萎缩, 进一步导致膈肌功能障碍[7]。膈肌功能障碍会导致患者运动耐力下降、气道廓清能力与通气功能受损、呼吸衰竭, 也会致使呼吸机相关并发症发生率升高, 增加治疗费用, 甚至增加患者病死率。因此, 及时评估膈肌功能对患者意义重大, 不仅有助于疾病诊断、肺功能评价及撤机指导, 还有助于改善预后及提高生存质量等。

3. 膈肌传统评价指标

3.1. 影像学

1) 胸部 X 线: 在胸部 X 线片上可见正常膈肌的右侧投影位置高于左侧, 在第 5~6 前肋和第 10 后肋水平。单侧膈肌麻痹时, 可以提示膈肌抬高和基底段肺不张。最近有研究发现用力呼吸时, 动态胸片所示双侧膈肌运动幅度与肺功能各项指标均成正相关, 有望为临床精准评估 COPD 患者肺功能提供新的手

段[8][9]。

2) 计算机断层扫描: CT 作为静态检测手段, 可进行横断面扫描及三维重建。三维重建能还原膈肌各部的立体结构, 在 RV (残气量), FRC (功能残气量), TLC (肺总量) 等时相测量患者的膈肌长度、表面积、对合面积等来量化膈肌的功能[10]。有研究发现, 慢阻肺患者膈肌长度缩短和面积减少, 其中对合区域是长度和面积减少的主要部分。对合区域膈肌面积可间接反映慢阻肺患者肺气肿的严重程度[11]。

3) 磁共振: 磁共振可利用不同的扫描序列敏感发现异常的膈肌运动, 可逐层对膈肌收缩、同步性以及运动幅度进行量化分析。研究发现左、右侧膈肌动度的平均值为 12.81 mm 和 9.11 mm。膈肌的动度与肺功能指标之间具有明显的相关性, 动态呼吸运动成像能够很好地评价膈肌运动[12]。

3.2. 电生理检查

1) 膈肌肌电图: 是经电极感知膈肌电活动, 放大、滤过及数字化处理后得到不同频波, 根据其分布规律来发现膈肌异常。研究显示, 膈肌肌电图检测能反映 COPD 患者膈肌疲劳程度, 可为临床判断、评估病情提供依据[13]。此外, 在一项 57 例拟拔管机械通气患者的前瞻性观察发现: 自主呼吸第 3 分钟的最大 EMGdi 幅度与 Vt 的比值预测脱机的成功率高达 0.84 [14]。

2) 神经肌肉效率指数(diaphragm neuromuscular efficiency index)被定义为 P_{di}/E_{Adi} (cmH₂O/mcV), ($\Delta P_{di}/\Delta E_{Adi}$) 即膈肌产生的压力, 代表膈肌肌电活动与跨膈压之间的关系。该指数因人而异, 可能会随时间变化[15][16]。Dres 等提出的压力支持模式通气下患者的膈神经刺激技术示意图, 能够较好地观察到膈肌功能障碍患者在膈神经电刺激下产生的气道压力下降明显减小[17]。在 Liu 等人的一项研究中, 通过自主呼吸试验的受试者表现出比未通过自主呼吸试验的受试者更高的神经肌肉效率值[18]。

3.3. 力学

跨膈压(Pdi): 是指膈肌收缩期间胸腔和腹腔之间产生的压力梯度, 可以量化膈肌收缩力。它可根据胃内压(gastric pressure, Pga; 代表腹腔内压力)和食管内压(esophageal pressure, Pes; 代表胸腔内压)之间的差值计算得出: $P_{di} = P_{ga} - P_{es}$ [19][20] 正常情况下, 吸气时食管内压力为负值, 而胃内压力为正值。它反映膈肌收缩时产生的压力变化, 通常取其在吸气末的最大值, 是评估膈肌收缩强度的金标准[21][22]。

值得一提的是, 胸片及 CT 增加了患者暴露于辐射的风险、可重复性较低。MRI 虽然可以动态的评估膈肌运动, 但对于危重患者的转运不仅安全性较低且费用较高。此外, 膈肌肌电图和跨膈压因具有有创性, 且这种技术必须由经验丰富的操作人员进行, 对于肥胖患者或解剖结构改变的患者在技术上更难去评估。相较而言, 膈肌超声技术以其无创性、动态性、可重复对比且价格低廉等优势逐渐成为临床膈肌功能检测的一线技术, 并为膈肌功能评估、改善膈肌功能障碍的监测及管理提供保护和支持策略提供了第一步。目前, 膈肌超声评估最主要包括膈肌厚度及膈肌增厚率(DTF)和膈肌移动度的测定。近年来, 膈肌超声评估指标日渐丰富, 包括膈肌对合角度、剪切波弹性成像(SWE)、组织多普勒成像、斑点追踪技术等。上述超声指标评估的侧重有所不同, 在不同方面体现了不菲的价值, 主要应用于预测膈肌功能障碍、撤机时机的预测、疾病的辅助诊断等。

4. 膈肌超声指标

4.1. 膈肌厚度

患者采取仰卧位, 床头高度 0°~30°之间, 选择高频线阵探头, 将超声探头 Mark 点向上, 置于受检者腋前线与腋中线之间第 8~11 肋间隙, 垂直于胸壁皮肤, 通过调整探头角度使声束与膈肌垂直, 可见三层平行的高低相间的回声层, 其中上下两层高回声区为胸膜层、腹膜层, 中间混杂回声区为膈肌层, 两条

高回声区之间的距离(不包含两条高回声本身的厚度)即为膈肌厚度。膈肌厚度测量可以在二维模式下测量胸膜线下缘到腹膜线上缘之间的距离,也可以在 M 超下显示经过取样线位置的膈肌厚度随着呼吸周期变化而变化,来测量吸气末及呼气末的厚度。男性在 FRC 处 Tdi 为 1.6~3.8 mm, 女性为 1.4~2.7 mm。膈肌无力的标准之一是呼气末 Tdi 为 2 mm [23]。膈肌厚度的变化可反映膈肌的收缩活性[24], 膈肌厚度增厚率 = (最大吸气末厚度 - 平静呼气末厚度)/平静呼气末厚度 × 100%。在休息呼吸的健康成年人中, 潮汐 TFdi 通常在 15%~30%之间[25]。膈肌厚度变化率小于 20%为膈肌麻痹, 值得注意的是, 该数据是根据站立时获得的。在一项根据体位检查 TF 变化的研究中, 俯卧位深呼吸时的平均 TF 值为 60%, 坐姿时为 97%, 站立时为 174%。因而通过膈肌超声评估膈肌麻痹时, 还需将被观察者的体位因素纳入考量[23]。

4.2. 膈肌移动度

患者采取仰卧位, 床头高度 0°~30°之间, 选择相控阵探头/凸阵探头。将超声探头 Mark 点朝外下方, 置于锁骨中线与腋前线之间, 与肋弓交界处, 经肝切面获得膈肌。探头对准膈顶, 右侧为覆盖在肝表面高回声的线性结构, 左侧为覆盖在脾表面高回声线性结构, 可以在呼气末和吸气末标记膈肌的移动位置, 两点间的距离即为膈肌移动度。研究发现, 右半膈肌偏移的测量具有较高的观察者内部和观察者之间的可靠性。在最大吸气力时, 正常下限女性大于 3.6 cm, 男性大于 4.7 cm [26]。此外, Yamada 等人提出右侧膈肌偏移与女性性别和 BMI 有统计学意义上的关联[23]。膈肌移动度这一指标不仅可单独应用于膈肌功能的评估与识别膈肌功能障碍, 还可与肺部超声用于联合评估术后肌松残余及术后肺部并发症、预测撤机拔管等。此外, 在膈肌移动度基础上, 衍生而来的膈肌测量指标例如 E-T 指数(偏移 - 时间指数)、D-RSBI (呼吸频率/膈肌位移)等, 在预测拔管结果方面可能具有更大的临床应用价值。

解剖 M 型超声: 受检者取仰卧位, 嘱其平静呼吸, 采用相控阵探头于腋前线和腋中线之间, 第八至十肋间扫查, 清晰显示膈肌强回声线。与传统 M 型超声相比, 解剖 M 型超声不受取样线角度限制, 仅需调整好取样位置即可进行 360°旋转, 使取样线与观察目标垂直。其测量双侧膈肌运动的可行性和可重复性较高, 克服了传统 M 型超声测量膈肌运动的不足, 能够准确评估双侧膈肌运动幅度及速度[27]。

4.3. 剪切波弹性成像(SWE)

剪切波弹性成像是一种测量剪切模量的无创技术, 所测得的剪切模量(SM)是组织刚度和机械性能的替代指标[28], 剪切模量被定义为剪切应力与剪切应变之比, 其中剪切应力是指施加在物体上的变形力, 剪切应变是指物体尺寸或形状的变化。Flatres 等测得重症患者和健康人的膈肌剪切模量分别为(13.1 ± 4.2)和(20 ± 7.3) kPa [29]。当肌肉发生炎症、水肿等病变时, 二维超声测量准确性降低。剪切波弹性超声可弥补二维超声的不足。有研究提出膈肌刚度变化反映了膈肌压力的变化, 是一种新的无创测量膈肌压力的方法[30]。石豆子等人研究发现不同呼吸时相之间膈肌弹性值的差异(Ein-Eex)与 TF 相关, Ein-Eex 可能反映膈肌收缩性能, 可用于治疗指导或预测结局[31]。刘芳欣等通过 SWE 技术所测得的 SM 是影响撤机结果的独立因素, 其阈值为 10.0 kPa, 且联合 DTF 及 RSBI 检测对预测机械通气患者撤机成功的效果更佳(AUC = 0.937), 诊断敏感度、特异度分别为 94.9%、84.6% [32]。Aarab 等通过测量危重患者和仔猪的 SM 和膈肌厚度发现, 86%患者的厚度和 92%患者的 SM 比基线减少或增加 10%以上。且在住院期间膈肌厚度的增加与 SM 的降低相关[28]。在一项纳入 77 名 COPD 患者的研究中发现, COPD 患者在功能剩余容量(FRC)时膈肌横波速度 SWV 与 1 秒内用力呼气量、用力肺活量相关, 由此提出 SWE 可作为定量评价膈肌刚度的有效工具, 有助于 COPD 患者提供个性化治疗[33]。目前, SWE 作为新兴技术多用于肝脏、乳腺、前列腺甚至血栓硬度等浅表脏器弹性和硬度的评估。但对于膈肌肌肉而言, 在测量过程中患者体位、肌肉收缩和探头对肌肉施加的压力都会影响剪切模量值[33], 且由于目前将膈肌 SWE 作为评估膈肌

肌肉质量的替代指标的研究仍然较少, 未来还需要更广泛深入的研究以探索并明确膈肌 SWE 的基线参考数值, 进而更好地评估膈肌肌肉质量。

4.4. 膈肌对合角度

采用仰卧位, 应用高频线阵探头, 病人平稳呼吸数个周期后冻结图像, 在右腋前线附近区域对合角处沿胸壁画一条直线, 再沿覆盖膈肌的胸筋膜画一条直线, 两条线形成的角为胸壁和膈肌之间的对合角, 平静和用力呼气末的差值即为膈肌对合角度。超声监测膈肌的对合角度及灰阶值变化可以间接反映 COPD 患者的病情严重程度, 有助于早期进行 COPD 的诊断和干预治疗[34]。此外, 陈重泽等人发现, 发生中重度 COPD 的患者其膈肌对合角度较轻度 COPD 患者减小, 这可能与中重度 COPD 的患者长时间肺部充气过度造成胸廓、膈穹隆发生形态上改变或易发生膈肌麻痹有关[35]。但目前针对膈肌对合角度的国内外研究仍较空白, 未来还需要大样本的研究来进一步证实。

4.5. 组织多普勒成像(TDI)

膈肌组织多普勒成像(dTDI), 可以实时评估膈肌组织运动速度, 测量膈肌收缩期峰值速度(DSVp)和膈肌舒张期峰值速度(DDVp), 与患者吸气努力程度相关, 可作为评价膈肌功能的新指标[36], Soilemezi 等人发现与健康参与者和脱机成功患者相比, 脱机失败患者表现出更高的 DSVp、DDVp 以及松弛率[37]。Cammarota 等人发现, 相较于传统的拔管预测指标及膈肌相关的 RSBI 参数, dTDI 能更准确地预测拔管失败。膈吸气峰值和平均呼吸速度值是 SBT 成功后拔管失败的良好预测指标。一旦患者成功通过 SBT, dTDI 评估显示的膈肌激活增加可以及时识别拔管失败或预防性 NIV 的时机[38]。进一步的, TDI 校正膈肌超声参数的提出使得膈肌功能评估指标得以丰富, 例如 DD/DPSV、DD/DPDV、DTE/DPSV 及 DTE/DPDV 等有望成为评估无创通气呼吸困难患者膈肌功能的有效指标[39]。但由于为单中心、小样本研究, 且未分析年龄、性别及 BMI 对膈肌功能的潜在影响, 有待后续进一步完善。目前膈肌组织多普勒成像多在右半膈膜上, 且在一些膈肌位移较大的患者中, 肝脏会影响 TDI 的测量。此外, 对于行机械通气失败的患者而言, 其原因是复杂的, 因此需要更多的同质性肺部疾病患者来评估 TDI 模式和价值。

4.6. 斑点追踪技术(STI)

STI 利用了超声波图像由不同的灰度像素组成的事实, 通过应变值描述了膈肌纵向肌纤维斑点的收缩形变, 克服了二维超声测量只能测量膈肌在横向上的变形这一缺点。例如, 应变值为-20%, 提示局部肌纤维缩短 20%。负值越大, 说明膈肌变形收缩程度越大。这项技术在 Orde 等人的研究中, 通过评估膈肌穹顶的纵向肌肉收缩发现, 在最大吸气流量为 60%时, 右侧膈肌平均纵向应变值为-40.3% (± 9), 与 TF、DE 有一定相关性[40]。罗邦军等发现通过斑点追踪成像自动测量膈肌位移和速度的最大、最小和平均值对困难或延迟撤机具有较高的诊断价值, AUC 分别为 0.732、0.680、0.719 和 0.667 [41]。在一项 20 例冠状动脉旁路移植术患者膈肌 STI 研究中发现, 斑点跟踪超声能够比二维超声测量更好地描述手术后膈肌功能的变化, 且术后膈肌应变值的减少反映了膈肌功能的下降[42]。如果进一步的研究证实了这些发现, SWI 则为早期预测膈肌功能障碍增加了新的评估指标。

5. 膈肌超声的临床应用

5.1. 膈肌超声评估膈肌功能以及预测膈肌功能障碍

Harper 等人的研究表明, 健康人的膈肌通常在一定程度上随着自主呼吸而变厚, 平均增厚 20%, 且两侧或不同年龄之间没有显著差异。静止时膈肌的正常厚度为 0.12~1.18 cm, 男性膈肌的厚度略大, 但不

受年龄的影响[43]。Boon AJ 等人发现, 呼气末膈肌附着区的厚度在整个年龄段(20~83)内保持稳定, 平均厚度为 0.33 cm, 而膈肌厚度的左右侧差异小于 0.33 厘米[44]。

多项研究表明膈肌增厚分数可以评估膈肌功能, 为预测通气患者的膈肌收缩力提供了一种有效方法[45][46]。其中, 29%的 TFdi 临界值被认为是识别膈肌功能障碍的最佳值[47]。Mari Miyagi 的研究表明, 在(射血分数保留)心衰患者中, DT-insp 是一个吸气肌力量指标, 其降低代表的膈肌萎缩和功能障碍, 并与心衰患者的运动不耐受有关[1]。Lerolle N 的研究发现, Best E (深吸气时任意半膈肌的膈肌偏移)小于 25 mm 作为确定心脏手术后严重膈肌功能障碍的重要指标[48]。此外, Ferrari G 认为膈肌移动度小于 10 mm 可用于诊断膈肌功能不全[49]。围术期麻醉药物的使用对于膈肌功能也有直接或间接的影响。Rocco M 等人发现丙泊酚局部浓度为 $3.0 \pm 1 \mu\text{g/mL}$ 时, DTF 降低 56.7% [50]。在一项纳入 40 例择期行无痛腹腔镜检查病例对照研究中发现, 与单用丙泊酚比较, 丙泊酚复合纳布啡一定程度上可以减轻膈肌运动的抑制程度, 进而降低呼吸抑制的发生率[51]。可见, 膈肌超声在研究麻醉药物对膈肌的影响方面存在潜力, 从而更好地评估围术期患者的用药安全性。

综上所述, 膈肌超声已成为评估膈肌功能的有效手段, 尤其是在重症监护和围术期中的应用具有重要的临床意义。然而目前尚未有标准化的操作流程及诊断标准来评估膈肌功能障碍。未来还需深入样本量大、多中心的临床研究, 以明确膈肌厚度、膈肌移动度等膈肌超声指标所定义的膈肌功能障碍, 为临床治疗决策提供依据。

5.2. 膈肌超声作为评估机械通气患者呼吸能力的指标

呼吸努力的定义为呼吸肌的能量消耗活动, 用于驱动呼吸, 包括呼吸肌收缩的幅度和频率[52]。患者自主呼吸努力过强会带来肺损伤(SILI), 太弱会使膈肌废用, 导致呼吸机相关膈肌功能障碍(VIDD)。因此识别患者的自主呼吸努力, 使其既能维持最小容积和最小跨肺压以避免 P-SILI (患者自发肺损伤), 同时保持适当水平的呼吸努力以避免膈肌萎缩非常重要[45][53]。临床上可以通过体格检查, 例如观察呼吸频率, 有无胸腹矛盾运动, 以及呼吸机上的 V_t 增大来评估呼吸努力, 但这些指标无法准确量化。通过食道压力或膈电活动(EAdi)信号可以直接监测呼吸努力[47], 但对于患者而言是有创的。在机械通气患者中, 膈压 - 每次呼吸的时间乘积(PTPdi)被证明是评估呼吸肌活动和患者呼吸努力程度的直接方法。Vivier E 等人发现 PTPdi 和 TF 之间存在显著的相关性, TF 是量化膈肌强度的最佳超声变量, 可用于评估患者无创压力支持通气期间的呼吸努力[54]。Goligher EC 等人发现接受神经肌肉阻滞的通气患者膈肌存在低水平增厚, 提出膈肌增厚分数是反映吸气努力的有效标志物[24]。Umbrello M 在一组接受辅助通气的患者中发现, 当通过压力支持滴定实现不同的呼吸努力时, 膈肌增厚与呼吸肌努力指数之间的呈平行减少的关系, 提出膈肌增厚是反映压力支持通气下呼吸努力的可靠指标[46]。但在 Cardenas 等人的研究中, 女性深呼吸期间的膈肌移动速度与吸气肌力量更相关, 而在男性中, 膈肌的增厚分数(TF)与吸气强度的相关性更强[55]。膈肌超声指标来评估呼吸努力虽尚未得到充分验证, 但其提供了膈肌形态学和功能的数据, 仍是评估自主呼吸努力的一项有前景的技术。

5.3. 膈肌超声识别和预防膈肌萎缩

对于重症患者, 诸多因素会导致急性或慢性的膈肌无力, 以及机械通气本身可导致急性膈肌损伤和无力。因此早期发现膈肌萎缩对于改善患者预后至关重要。多项研究表明膈肌超声测量的膈肌厚度可以评估和监测机械通气过程中膈肌萎缩[24][56], Sklar 等人提出, 基线 Tdi, 即有创机械通气开始后 36 小时内通过超声获得的第一次 Tdi, 可用于分层患者在机械通气期间膈肌萎缩的风险, 其数值越高, 膈肌萎缩风险越大[57]。Schepens 发现机械通气时长与膈肌萎缩程度相关, 且最大的膈肌厚度减少发生在机械通

气的前 72 小时[56]。此外他还证实, 机械通气通过影响吸气努力而在临床环境中损伤膈肌, 导致膈肌厚度的变化。由此提出了肌肉保护性通气策略——维持正常的吸气努力水平可以防止与机械通气相关的膈肌形态功能变化[45]。Grassi 等发现, 在控制机械通气期间 Tdi 倾向于减少或不改变, 而有压力支持的自发辅助呼吸可以使 Tdi 部分恢复。可见, 通过辅助控制通气期间的平稳训练有望恢复膈肌厚度[45] [58]。Zamboni M 等人同样发现通气模式会影响膈肌厚度。在机械通气的危重患者中, 行低压支持通气时膈肌厚度每天减少 1.5%, 而持续气道正压通气可显著降低膈肌萎缩。这表明合理的通气策略对于预防膈肌萎缩至关重要[59]。

可见, 膈肌超声在机械通气治疗期间, 通过监测膈肌厚度的变化, 能够有效预测膈肌萎缩的风险, 进而为临床干预提供科学依据。值得一提的是, 有多项研究提出通过刺激膈神经以提高膈肌活性, 可能预防 VIDD。未来将膈肌超声与膈肌起搏治疗结合, 实时动态地观察治疗期间膈肌形态及功能变化情况, 对进一步指导患者的呼吸功能恢复是非常有前景的。此外, 个性化的膈肌保护策略还需深入研究, 以优化通气方案, 降低膈肌损伤的风险, 最终促进患者的快速康复。

5.4. 预测有创机械通气患者撤机拔管时机及结局

在一项前瞻性研究发现, 近 50%的机械通气患者在插管后膈肌厚度迅速下降, 且发生率与通气时间的延长、撤机困难、再插管率存在明显相关性[45]。快速浅呼吸指数(RSBI)作为传统意义的撤机拔管预测指标, 其定义为呼吸频率(f)与潮气量(VT)的比率, 当 >105 时与撤机失败相关[60]。RSBI 反映所有呼吸肌的努力, 但在膈肌疲劳的情况下, 副肌可能无法维持长时间的潮气量, 这可能导致即使成功通过自主呼吸试验(SBT), 患者也有可能出现拔管失败的情况[61]。Alam MJ 的研究表明, DE(膈肌位移)和 DTF 比 RSBI 更能预测拔管成功, 且 DE 优于 DTF [62]。Spadaro S 的研究提出了当 D-RSBI(呼吸频率/膈肌位移)为 1.3 时其在预测拔管结果方面比传统的 RSBI 更准确[63]。Kim 等人认为膈肌超声预测原发性撤机失败的膈肌偏移的最佳截止值是右膈 14 mm 和左膈 12 mm (ROC 下的面积为 0.61) [64]。Carrie 等人的研究则表明, MDE (最大膈肌位移) ≤ 2.7 cm 在预测撤机失败方面具有一定的敏感性和特异性[65]。DiNino 等人亦提出, $\Delta tdi\%$ 优于 RSBI, 在自主呼吸或压力支持通气试验中, $\Delta tdi\% \geq 30\%$ 有助于预测拔管的成功且有助于减少拔管失败的次数, 并提出 $\Delta tdi\%$ 和 VT 的乘积可能比单独 $\Delta tdi\%$ 更能预测拔管成功[66]。Blumhof S 等人的研究同样支持这一观点, 他们发现在不同的压力支持条件下, $\Delta tdi\% > 20\%$ 即可预测 48 小时内拔管成功的可能性[67]。

膈肌超声同样适用于评估行机械通气儿童的膈肌功能和预测拔管结局。Xue 等人认为 DTF 优于 DE, $DTF \geq 21\%$ 与撤机成功相关(敏感性为 0.82, 特异性为 0.81) [68]。Lee 等人指出, DTF 小于 17% 可以为预测是否需要重新插管提供有用的临床信息。拔管后 DTF 可能是无创或有创正压通气的潜在预测指标, 以提高拔管后膈肌收缩力, 避免再次插管[69]。在最近的研究中发现, 将 $DTF \geq 36\%$ 作为小儿腹腔镜腹股沟疝手术后拔除喉罩的指征, 相较于传统的临床拔管指征, 拔管后对血氧饱和度影响更小且麻醉恢复更快[70]。

此外, 有研究提出新的膈肌超声指标, 例如 TPIAdia, 指 M 型超声模式下发现膈肌开始收缩至其达到最大收缩程度的时间, 其与 RSBI 呈负相关, 预测再插管 ROC 曲线下面积为 0.710。另有研究提出, $TPIAdia > 0.8$ s 预测机械通气撤机成功的敏感度为 92.2%, 但特异度仅 45.5%, 还需进一步观察[71]。此外, Palkar 等人提出 E-T 指数, 即偏移 - 时间指数(膈肌偏移和吸气时间的乘积), 它反映了膈肌移动时对抗的吸气阻力。当 E-T 指数 > 0.92 (cm·s) 时, 预测撤机成功的敏感度及特异度分别为 79.2% 及 75.0% [72]。

5.5. 预测无创机械通气时机及结局

无创通气(Non-Invasive Ventilation, NIV)主要应用于呼吸系统症状出现和肺功能下降时, 特别是在呼

吸衰竭的情况下。其相较于有创通气的优势在于减少对气管插管的需求,并保留患者自身的气道保护机制,从而减轻患者不适,降低相关并发症[73]。通过应用正压呼吸道内压(PEEP)等手段,无创通气有助于改善气体交换,改善血流动力学,并预防膈肌萎缩[74]。在无创通气的临床应用中,膈肌超声可以用于判断无创通气停止的合适时机以及是否需要进行气管插管。在合并高碳酸血症的急性呼吸衰竭患者中,膈肌超声可用于评估无创通气期间的膈肌功能障碍,是早期预测无创通气结果的重要指标。具体指标如 NIV 开始后 2 小时的膈肌偏移,已被证明是预测 NIV 失败的可靠指标[75]。此外,膈肌偏移减少被认为是 COPD 患者行 NIV 失败的预测指标[76]。另 Mercurio G 研究发现,膈肌厚度分数(DTF)小于 36.3%和呼吸频率/DTF 比值大于 0.6 可以预测低氧血症患者的 NIV 失败[74]。对于 COPD 患者,膈肌功能障碍(定义为膈肌厚度变化小于 20%)与入院前 48 小时内 NIV 失败的风险增加六倍,以及随访期间死亡风险增加五倍相关[77]。在一项纳入 51 例需行 NIV 的 ARDS 患者的观察性研究中发现,DM > 13.6 mm 预测 NIV 成功的敏感度为 81.7%,特异度为 82.1%。以 DTF > 37.5%预测 NIV 成功的敏感度为 83.3%,特异度为 80.0% [78]。随着无创通气技术的发展,结合膈肌超声的动态监测与大数据分析,可能会进一步提高预测 NIV 成功与失败的敏感度与特异度。同时,针对不同病理状态(如 COPD 或 ARDS)制定更为精确的膈肌保护方案,将有助于优化 NIV 治疗效果,降低相关并发症的发生率,最终改善患者的预后。

5.6. 膈肌超声在 ALS 患者中的应用

肌萎缩侧索硬化症(ALS)是一种逐渐恶化的神经退行性疾病,主要累及直接支配呼吸的膈肌和肋间外肌。随着疾病的进展,膈肌无力或运动减少逐渐加剧,进而出现呼吸功能不全,表现为低通气、低氧血症和高碳酸血症。Wen Q 等人发现 $\Delta T_{\max}$ 定义的膈肌增厚比率,即潮气量吸气末膈肌厚度/肺总量吸气末膈肌厚度,是诊断 ALS 患者膈肌功能障碍的重要指标。其检测呼吸功能障碍 AUC 下面积为 0.76,有助于临床尽早发现膈肌无力,从而早期启动无创正压通气并改善预后[73] [79]。此外,异常 $\Delta T_{\max}$ 是导致每日高碳酸血症和夜间低通气的主要因素,可能与膈肌疲劳和肺泡低通气有关。 $\Delta T_{\max}$ 达到 0.75 时,预测 FVC 值低于预测值 50%的敏感度为 75%,特异度为 85%。其值大于 0.75 是 ALS 患者正常膈肌功能的阈值极限[73] [80]。类似的,Hiwatani Y 认为膈肌增厚比(TR),定义为膈肌呼气末的最小厚度/最大吸气的最大厚度,其值低于 1.39 可能是 ALS 患者发生高碳酸血症的有效截止值,具有高度的特异性(85.7%)和敏感性(100%)。此外,TR 与 FCV%呈高度正相关,且与动脉血二氧化碳分压呈负相关,提示 TR 可作为评价通气功能的指标,通过评估患者从静息呼吸到最大吸气努力的膈肌增厚程度,可以预测膈肌的亚临床功能障碍[81]。此外,Lakshmi 等研究者在一项纳入 3 例 ALS 患者的病例报告提出,膈肌增厚分数小于等于 15%与严重膈肌无力和呼吸衰竭风险相关,并将 DTF 小于 20%作为预测 ALS 患者严重膈肌功能障碍的重要指标[82]。Carrié C 等人发现通过右前肋下入路进行膈肌超声检查测得的 EDEmax 小于 5.5 cm 预测 FVC 小于等于 50%理论值的敏感性和特异性分别为 100%和 69%,可以快速识别 ALS 患者呼吸功能受损[83]。可见膈肌超声对于评估 ALS 患者呼吸肌受累程度、疾病进展及无创正压通气时机,以早期发现和干预呼吸功能的衰退显得尤为重要。

5.7. 膈肌超声在 COPD 患者中的应用

慢性阻塞性肺疾病(COPD)患者发生呼吸困难和运动耐量差的病理生理机制复杂,其中膈功能障碍起着重要作用。膈肌超声不仅可用于 COPD 的诊断,还适用于评估 COPD 患者的膈肌活动、功能和储备,以反映患者的病情严重程度变化。He 等人的研究表明,合并肺气肿和肺纤维化(CPFE)患者的膈肌运动显著减少,提示膈肌无力。此外,与轻中度患者相比,重度 COPD 患者的膈肌运动显著减少。因此,M 型超声评估深呼吸时的膈肌运动可能成为诊断 CPFE 以及区分 CPFE 患者与特发性肺纤维化(IPF)或 COPD

患者的重要工具[84]。具体地, 陈重泽等人发现膈肌超声所测的膈肌移动度和膈肌对合角度可作为判定 COPD 严重程度的指标[35]。此外, 有研究发现采用面积法与 M 型超声法联合评估重度慢阻肺的 AUC 为 0.933、灵敏度为 88.9%、特异度为 90% [85]。夜间低氧血症(NOD)在 COPD 患者中时有发生, 长期 NOD 损害会导致严重的心血管事件并会影响患者的认知及神经运动功能。Kazuki 等人发现, $\% \Delta Tdi$ 与 COPD 的严重程度相关, 并可能可以预测轻度或无日间低氧血症 COPD 患者的夜间氧饱和度($NSpO_2$)。但这一发现的局限性在于它描述的是一般睡眠情况, 而不特定于某一睡眠阶段。在快速眼动(REM)睡眠期间, 膈肌功能可能与夜间动脉氧饱和度($NSaO_2$)更密切相关[86]。Zhang 等人认为, 在自主呼吸实验中, DE_{30} (SBT 第 30 min 时的 DE 值)与 ΔDE_{30-5} (SBT 第 30 min 和第 5 min 时的 DE 差值)结合是行机械通气的 COPD 患者拔管结果的预测指标。其中 ΔDE_{30-5} 在预测拔管结果方面表现出更高的准确性[61]。综上, 膈肌超声在 COPD 患者中的应用前景广阔, 仍需要更进一步的研究来探索膈肌超声指标与 COPD 患者肺功能的关联, 以期对 COPD 的诊断及病情评估、监测。

5.8. 膈肌超声预防术后肺部并发症及促进预后康复

术后肺部并发症(Postoperative Pulmonary Complications, PPCs)常继发于腹部大手术及胸部手术, 包括肺炎、支气管痉挛、肺不张、呼吸衰竭等, 是导致患者围术期死亡的重要原因。Kim 等人发现在腹腔镜下行盆腔手术中, 采用陡峭的 Trendelenburg 体位和气腹时膈肌向头侧位移而导致肺体积减少, 同时肺顺应性随着膈肌移动度的减少而降低, 由此影响术后肺功能[87]。Kim SH 等人提出通过 M 型超声测量的 DIA (膈肌振幅)是上腹部手术后肺功能变化的可靠预测指标, 检测肺活量比术前降低 30%和 50%的最佳截止值分别为 3.61 和 2.41 cm [88]。在一项回顾性研究中发现, 机械通气患者在自主呼吸试验期间膈肌回声密度的增加与腹部大手术后患者发生 PPCs 的风险增加有关。预测 PPCs 发生的最佳 ED50 截断值为 36 [89]。Spadaro 等人的研究表明, 胸部手术后 24 小时内的膈肌功能障碍与术后早期肺部并发症显著相关, 但该研究未采用其他经典技术(如测量膈肌厚度)同步评估膈肌功能, 且样本量相对较小, 仍需进一步探索[90]。在一项纳入 115 例接受非紧急心脏手术的观察性研究中发现, 所有术后合并肺部并发症的患者, 膈肌厚度最大变化率均 $<38.1\%$ 。如果术前膈肌厚度变化率越小则提示膈肌功能越弱, 提示术后发生肺部并发症的几率相应升高[91]。在胸腺切除手术中, 膈肌超声可以快速检测膈肌间阻滞膈肌麻痹。在高度怀疑膈神经损伤的情况下, 可通过 $DE < 11 \text{ mm}$ 和 $TF < 20\%$ 测量来快速评估有术后肺部并发症(PPC)风险的患者膈肌功能[92]。

Crimi 等人的研究指出, 通过监测 $\Delta Lzapp\%$ 的变化(膈肌在最大吸气时的长度变化百分比)可以有效评估 COPD 患者肺康复疗效并预测患者的康复结果, 为制定个性化的康复计划提供了重要信息[93]。Jung 等人发现卒中侧膈肌厚度及移动度与患者 FVC、FEV1 显著相关, 由此提出通过膈肌超声评估膈肌功能有利于指导膈肌训练以改善脑卒中患者的肺功能[94]。此外, Harper 等人研究发现膈肌在维持脊柱稳定中发挥作用。B 超显示的膈肌增厚是一种有效的生物反馈工具, 可用于评估慢性腰痛等疾病患者的膈肌基线功能, 进而通过训练膈肌以增强对脊柱稳定性的贡献[43]。

6. 总结

膈肌超声以其便携、无创、实时动态等优点, 在临床中逐渐成为更有优势的评估膈肌功能的工具。但膈肌超声仍具有局限性, 目前对于膈肌超声的研究多聚焦于右半侧膈肌的研究, 此外许多研究存在样本量较小的问题, 因而临床研究结果需要在更大的样本量中探索。通过上述研究可以发现, 膈肌超声在预防、诊断、治疗疾病及改善预后等方面有潜在价值, 尽管还有很多方面的缺陷、不足, 但其作为一个全新的领域, 应用前景广阔, 值得研究人员进一步去探索、开拓。

参考文献

- [1] Miyagi, M., Kinugasa, Y., Sota, T., Yamada, K., Ishisugi, T., Hirai, M., *et al.* (2018) Diaphragm Muscle Dysfunction in Patients with Heart Failure. *Journal of Cardiac Failure*, **24**, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2017.12.004>
- [2] 李冰, 张红璇. 膈肌起搏的临床应用及研究进展[J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2013, 12(4): 423-426.
- [3] 王雨柔, 徐欣欣, 占成业, 等. 脓毒症相关性膈肌功能障碍的研究现状[J]. 内科急危重症杂志, 2024(3): 267-269.
- [4] 李大亮, 蒋林青, 唐国生. 重症患者膈肌功能障碍研究进展[J]. 医学理论与实践, 2020, 33(4): 542-544+535.
- [5] 孙旗, 钱风华. 呼吸机相关性膈肌功能障碍的发病机制及治疗进展[J]. 中国急救医学, 2021, 41(10): 907-910.
- [6] van den Berg, M., Shi, Z., Claassen, W.J., Hooijman, P., Lewis, C.T.A., Andersen, J.L., *et al.* (2024) Super-Relaxed Myosins Contribute to Respiratory Muscle Hibernation in Mechanically Ventilated Patients. *Science Translational Medicine*, **16**, eadg3894. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.adg3894>
- [7] Ottenheim, C.A.C., Heunks, L.M.A. and Dekhuijzen, P.N.R. (2007) Diaphragm Muscle Fiber Dysfunction in Chronic Obstructive Pulmonary Disease: Toward a Pathophysiological Concept. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **175**, 1233-1240. <https://doi.org/10.1164/rccm.200701-020pp>
- [8] 吴波, 杨霭琳, 李云宵, 等. 慢性阻塞性肺疾病动态胸 X 线片膈肌运动与呼吸功能评估的意义[J]. 心肺血管病杂志, 2023, 42(1): 37-42.
- [9] 陈疆红, 崔茹欣, 于刚刚, 等. 动态 X 线胸片评估平静呼吸下慢性阻塞性肺疾病患者横膈运动[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(9): 1340-1344.
- [10] Summerhill, E.M., El-Sameed, Y.A., Glidden, T.J. and McCool, F.D. (2008) Monitoring Recovery from Diaphragm Paralysis with Ultrasound. *Chest*, **133**, 737-743. <https://doi.org/10.1378/chest.07-2200>
- [11] 田媛. 慢性阻塞性肺疾病患者膈肌形态学的 CT 三维重建技术研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏医科大学, 2014.
- [12] 李洪伦, 郭佑民, 徐贵平, 等. 健康成年人膈肌呼吸运动的动态 MRI 初步研究[J]. 实用放射学杂志, 2006(11): 1324-1327.
- [13] 许启锋, 刘花琴, 谭红愉. 膈肌肌电图在慢性阻塞性肺疾病患者膈肌疲劳检测中的应用效果[J]. 中国民康医学, 2020, 32(19): 93-95.
- [14] Dres, M., Schmidt, M., Ferre, A., Mayaux, J., Similowski, T. and Demoule, A. (2012) Diaphragm Electromyographic Activity as a Predictor of Weaning Failure. *Intensive Care Medicine*, **38**, 2017-2025. <https://doi.org/10.1007/s00134-012-2700-3>
- [15] Bellani, G., Mauri, T., Coppadoro, A., Grasselli, G., Patroniti, N., Spadaro, S., *et al.* (2013) Estimation of Patient's Inspiratory Effort from the Electrical Activity of the Diaphragm. *Critical Care Medicine*, **41**, 1483-1491. <https://doi.org/10.1097/ccm.0b013e31827caba0>
- [16] Bellani, G., Coppadoro, A., Pozzi, M., Bronco, A., Albiero, D., Eronia, N., *et al.* (2016) The Ratio of Inspiratory Pressure over Electrical Activity of the Diaphragm Remains Stable during ICU Stay and Is Not Related to Clinical Outcome. *Respiratory Care*, **61**, 495-501. <https://doi.org/10.4187/respcare.04400>
- [17] Dres, M., Goligher, E.C., Heunks, L.M.A. and Brochard, L.J. (2017) Critical Illness-Associated Diaphragm Weakness. *Intensive Care Medicine*, **43**, 1441-1452. <https://doi.org/10.1007/s00134-017-4928-4>
- [18] Liu, L., Liu, H., Yang, Y., Huang, Y., Liu, S., Beck, J., *et al.* (2012) Neuroventilatory Efficiency and Extubation Readiness in Critically Ill Patients. *Critical Care*, **16**, R143. <https://doi.org/10.1186/cc11451>
- [19] Agostoni, E. and Rahn, H. (1960) Abdominal and Thoracic Pressures at Different Lung Volumes. *Journal of Applied Physiology*, **15**, 1087-1092. <https://doi.org/10.1152/jappl.1960.15.6.1087>
- [20] Laporta, D. and Grassino, A. (1985) Assessment of Transdiaphragmatic Pressure in Humans. *Journal of Applied Physiology*, **58**, 1469-1476. <https://doi.org/10.1152/jappl.1985.58.5.1469>
- [21] Ricoy, J., Rodríguez-Núñez, N., Álvarez-Dobano, J.M., Toubes, M.E., Riveiro, V. and Valdés, L. (2019) Diaphragmatic Dysfunction. *Pulmonology*, **25**, 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2018.10.008>
- [22] Supinski, G.S., Morris, P.E., Dhar, S. and Callahan, L.A. (2018) Diaphragm Dysfunction in Critical Illness. *Chest*, **153**, 1040-1051. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2017.08.1157>
- [23] Yamada, T., Minami, T., Yoshino, S., Emoto, K., Mabuchi, S., Hanazawa, R., *et al.* (2023) Diaphragm Ultrasonography: Reference Values and Influencing Factors for Thickness, Thickening Fraction, and Excursion in the Seated Position. *Lung*, **202**, 83-90. <https://doi.org/10.1007/s00408-023-00662-2>
- [24] Goligher, E.C., Laghi, F., Detsky, M.E., Farias, P., Murray, A., Brace, D., *et al.* (2015) Measuring Diaphragm Thickness with Ultrasound in Mechanically Ventilated Patients: Feasibility, Reproducibility and Validity. *Intensive Care Medicine*,

- 41, 642-649. <https://doi.org/10.1007/s00134-015-3687-3>
- [25] Bellissimo, C.A., Morris, I.S., Wong, J. and Goligher, E.C. (2023) Measuring Diaphragm Thickness and Function Using Point-of-Care Ultrasound. *Journal of Visualized Experiments*, **201**, e65431. <https://doi.org/10.3791/65431>
- [26] Boussuges, A., Gole, Y. and Blanc, P. (2009) Diaphragmatic Motion Studied by M-Mode Ultrasonography: Methods, Reproducibility, and Normal Values. *Chest*, **135**, 391-400. <https://doi.org/10.1378/chest.08-1541>
- [27] 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.
- [28] Aarab, Y., Flatres, A., Garnier, F., Capdevila, M., Raynaud, F., Lacampagne, A., et al. (2021) Shear Wave Elastography, a New Tool for Diaphragmatic Qualitative Assessment: A Translational Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **204**, 797-806. <https://doi.org/10.1164/rccm.202011-4086oc>
- [29] Flatres, A., Aarab, Y., Nougaret, S., Garnier, F., Larcher, R., Amalric, M., et al. (2020) Correction to: Real-Time Shear Wave Ultrasound Elastography: A New Tool for the Evaluation of Diaphragm and Limb Muscle Stiffness in Critically Ill Patients. *Critical Care*, **24**, Article No. 79. <https://doi.org/10.1186/s13054-020-2802-1>
- [30] Bachasson, D., Dres, M., Niérat, M., Gennisson, J., Hogrel, J., Doorduyn, J., et al. (2019) Diaphragm Shear Modulus Reflects Transdiaphragmatic Pressure during Isovolumetric Inspiratory Efforts and Ventilation against Inspiratory Loading. *Journal of Applied Physiology*, **126**, 699-707. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01060.2018>
- [31] 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.
- [32] 刘芳欣, 陈昭杰, 王洲, 等. 剪切波弹性成像联合膈肌增厚率及浅快呼吸指数预测机械通气患者撤机结果的临床研究[J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2023, 22(1): 38-43.
- [33] Xu, J., Wu, Z., Tao, F., Zhu, S., Chen, S., Cai, C., et al. (2021) Ultrasound Shear Wave Elastography for Evaluation of Diaphragm Stiffness in Patients with Stable COPD: A Pilot Trial. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **40**, 2655-2663. <https://doi.org/10.1002/jum.15655>
- [34] 李敏, 闫俊红, 孙建, 石岩, 张金俏. 超声监测慢性阻塞性肺病患者膈肌对合角度及灰阶值的临床价值[J]. 滨州医学院学报, 2023, 46(6): 459-461+480.
- [35] 陈重泽, 连细华, 杨如容, 等. 超声研究膈肌移动度与对合角度对 COPD 病情初步判定[J]. 中国超声医学杂志, 2016, 32(1): 34-36.
- [36] 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.
- [37] Soilemezi, E., Savvidou, S., Sotiriou, P., Smyrniotis, D., Tsagourias, M. and Matamis, D. (2020) Tissue Doppler Imaging of the Diaphragm in Healthy Subjects and Critically Ill Patients. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **202**, 1005-1012. <https://doi.org/10.1164/rccm.201912-2341oc>
- [38] Cammarota, G., Boniolo, E., Santangelo, E., De Vita, N., Verdina, F., Crudo, S., et al. (2021) Diaphragmatic Kinetics Assessment by Tissue Doppler Imaging and Extubation Outcome: An Observational Study. *Respiratory Care*, **66**, 983-993. <https://doi.org/10.4187/respcare.08702>
- [39] 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]. 中国医学影像技术, 2024, 40(10): 1567-1571.
- [40] Orde, S.R., Boon, A.J., Firth, D.G., Villarraga, H.R. and Sekiguchi, H. (2015) Diaphragm Assessment by Two Dimensional Speckle Tracking Imaging in Normal Subjects. *BMC Anesthesiology*, **16**, Article No. 43. <https://doi.org/10.1186/s12871-016-0201-6>
- [41] 罗邦军, 林转娣, 梁结柱, 张巨荣, 蔡晶晶, 邓惠坚. 二维斑点追踪成像评估膈肌功能在机械通气患者撤机中的应用研究[J]. 湘南学院学报(医学版), 2023, 25(4): 22-25+29.
- [42] Fritsch, S.J., Hatam, N., Goetzenich, A., Marx, G., Autschbach, R., Heunks, L., et al. (2022) Speckle Tracking Ultrasonography as a New Tool to Assess Diaphragmatic Function: A Feasibility Study. *Ultrasonography*, **41**, 403-415. <https://doi.org/10.14366/usg.21044>
- [43] Harper, C.J., Shahgholi, L., Cieslak, K., Hellyer, N.J., Strommen, J.A. and Boon, A.J. (2013) Variability in Diaphragm Motion during Normal Breathing, Assessed with B-Mode Ultrasound. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, **43**, 927-931. <https://doi.org/10.2519/jospt.2013.4931>
- [44] Boon, A.J., Harper, C.J., Ghahfarokhi, L.S., Strommen, J.A., Watson, J.C. and Sorenson, E.J. (2013) Two-Dimensional Ultrasound Imaging of the Diaphragm: Quantitative Values in Normal Subjects. *Muscle & Nerve*, **47**, 884-889. <https://doi.org/10.1002/mus.23702>
- [45] Goligher, E.C., Fan, E., Herridge, M.S., Murray, A., Vorona, S., Brace, D., et al. (2015) Evolution of Diaphragm Thickness during Mechanical Ventilation. Impact of Inspiratory Effort. *American Journal of Respiratory and Critical Care*

- Medicine*, **192**, 1080-1088. <https://doi.org/10.1164/rccm.201503-0620oc>
- [46] Umbrello, M., Formenti, P., Longhi, D., Galimberti, A., Piva, I., Pezzi, A., *et al.* (2015) Diaphragm Ultrasound as Indicator of Respiratory Effort in Critically Ill Patients Undergoing Assisted Mechanical Ventilation: A Pilot Clinical Study. *Critical Care*, **19**, Article No. 161. <https://doi.org/10.1186/s13054-015-0894-9>
 - [47] Goligher, E.C., Dres, M., Patel, B.K., Sahetya, S.K., Beitler, J.R., Telias, I., *et al.* (2020) Lung- and Diaphragm-Protective Ventilation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **202**, 950-961. <https://doi.org/10.1164/rccm.202003-0655cp>
 - [48] Lerolle, N., Guérot, E., Dimassi, S., Zegdi, R., Faisy, C., Fagon, J., *et al.* (2009) Ultrasonographic Diagnostic Criterion for Severe Diaphragmatic Dysfunction after Cardiac Surgery. *Chest*, **135**, 401-407. <https://doi.org/10.1378/chest.08-1531>
 - [49] Ferrari, G., De Filippi, G., Elia, F., Panero, F., Volpicelli, G. and Aprà, F. (2014) Diaphragm Ultrasound as a New Index of Discontinuation from Mechanical Ventilation. *Critical Ultrasound Journal*, **6**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1186/2036-7902-6-8>
 - [50] Rocco, M., Maggi, L., Ranieri, G., Ferrari, G., Gregoretti, C., Conti, G., *et al.* (2017) Propofol Sedation Reduces Diaphragm Activity in Spontaneously Breathing Patients: Ultrasound Assessment. *Minerva Anestesiologica*, **83**, 266-273. <https://doi.org/10.23736/s0375-9393.17.11615-9>
 - [51] 唐曙华, 斯妍娜, 鲍红光, 等. 丙泊酚复合纳布啡对无痛肠镜检查患者膈肌运动的影响[J]. 临床麻醉学杂志, 2019, 35(1): 42-46.
 - [52] 陈栋玉, 潘纯, 杨毅. ARDS 患者自主呼吸努力评估方法的研究进展[J]. 中华重症医学电子杂志, 2023, 9(1): 84-88.
 - [53] Bertoni, M., Spadaro, S. and Goligher, E.C. (2020) Monitoring Patient Respiratory Effort during Mechanical Ventilation: Lung and Diaphragm-Protective Ventilation. In: Vincent, J.-L., Ed., *Annual Update in Intensive Care and Emergency Medicine*, Springer International Publishing, 21-35. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37323-8_2
 - [54] Vivier, E., Mekontso Dessap, A., Dimassi, S., Vargas, F., Lyazidi, A., Thille, A.W., *et al.* (2012) Diaphragm Ultrasonography to Estimate the Work of Breathing during Non-Invasive Ventilation. *Intensive Care Medicine*, **38**, 796-803. <https://doi.org/10.1007/s00134-012-2547-7>
 - [55] Cardenas, L.Z., Santana, P.V., Caruso, P., Ribeiro de Carvalho, C.R. and Pereira de Albuquerque, A.L. (2018) Diaphragmatic Ultrasound Correlates with Inspiratory Muscle Strength and Pulmonary Function in Healthy Subjects. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **44**, 786-793. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2017.11.020>
 - [56] Schepens, T., Verbrugghe, W., Dams, K., Corthouts, B., Parizel, P.M. and Jorens, P.G. (2015) The Course of Diaphragm Atrophy in Ventilated Patients Assessed with Ultrasound: A Longitudinal Cohort Study. *Critical Care*, **19**, Article No. 422. <https://doi.org/10.1186/s13054-015-1141-0>
 - [57] Sklar, M.C., Dres, M., Fan, E., Rubenfeld, G.D., Scales, D.C., Herridge, M.S., *et al.* (2020) Association of Low Baseline Diaphragm Muscle Mass with Prolonged Mechanical Ventilation and Mortality among Critically Ill Adults. *JAMA Network Open*, **3**, e1921520. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2019.21520>
 - [58] Grassi, A., Ferlicca, D., Lupieri, E., Calcinati, S., Francesconi, S., Sala, V., *et al.* (2020) Assisted Mechanical Ventilation Promotes Recovery of Diaphragmatic Thickness in Critically Ill Patients: A Prospective Observational Study. *Critical Care*, **24**, Article No. 85. <https://doi.org/10.1186/s13054-020-2761-6>
 - [59] Zambon, M., Beccaria, P., Matsuno, J., Gemma, M., Frati, E., Colombo, S., *et al.* (2016) Mechanical Ventilation and Diaphragmatic Atrophy in Critically Ill Patients: An Ultrasound Study. *Critical Care Medicine*, **44**, 1347-1352. <https://doi.org/10.1097/ccm.0000000000001657>
 - [60] Yang, K.L. and Tobin, M.J. (1991) A Prospective Study of Indexes Predicting the Outcome of Trials of Weaning from Mechanical Ventilation. *New England Journal of Medicine*, **324**, 1445-1450. <https://doi.org/10.1056/nejm199105233242101>
 - [61] Zhang, X., Yuan, J., Zhan, Y., Wu, J., Liu, B., Zhang, P., *et al.* (2019) Evaluation of Diaphragm Ultrasound in Predicting Extubation Outcome in Mechanically Ventilated Patients with COPD. *Irish Journal of Medical Science* (1971-), **189**, 661-668. <https://doi.org/10.1007/s11845-019-02117-1>
 - [62] Alam, M.J., Roy, S., Iktidar, M.A., Padma, F.K., Nipun, K.I., Chowdhury, S., *et al.* (2022) Diaphragm Ultrasound as a Better Predictor of Successful Extubation from Mechanical Ventilation than Rapid Shallow Breathing Index. *Acute and Critical Care*, **37**, 94-100. <https://doi.org/10.4266/acc.2021.01354>
 - [63] Spadaro, S., Grasso, S., Mauri, T., Dalla Corte, F., Alvisi, V., Ragazzi, R., *et al.* (2016) Can Diaphragmatic Ultrasonography Performed during the T-Tube Trial Predict Weaning Failure? The Role of Diaphragmatic Rapid Shallow Breathing Index. *Critical Care*, **20**, Article No. 305. <https://doi.org/10.1186/s13054-016-1479-y>
 - [64] Kim, W.Y., Suh, H.J., Hong, S., Koh, Y. and Lim, C. (2011) Diaphragm Dysfunction Assessed by Ultrasonography:

- Influence on Weaning from Mechanical Ventilation. *Critical Care Medicine*, **39**, 2627-2630. <https://doi.org/10.1097/ccm.0b013e3182266408>
- [65] Carrie, C., Gisbert-Mora, C., Bonnardel, E., Gauche, B., Biais, M., Vargas, F., *et al.* (2017) Ultrasonographic Diaphragmatic Excursion Is Inaccurate and Not Better than the MRC Score for Predicting Weaning-Failure in Mechanically Ventilated Patients. *Anaesthesia Critical Care & Pain Medicine*, **36**, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.accpm.2016.05.009>
- [66] DiNino, E., Gartman, E.J., Sethi, J.M. and McCool, F.D. (2013) Diaphragm Ultrasound as a Predictor of Successful Extubation from Mechanical Ventilation. *Thorax*, **69**, 431-435. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2013-204111>
- [67] Blumhof, S., Wheeler, D., Thomas, K., McCool, F.D. and Mora, J. (2016) Change in Diaphragmatic Thickness during the Respiratory Cycle Predicts Extubation Success at Various Levels of Pressure Support Ventilation. *Lung*, **194**, 519-525. <https://doi.org/10.1007/s00408-016-9911-2>
- [68] Xue, Y., Zhang, Z., Sheng, C., Li, Y. and Jia, F. (2019) The Predictive Value of Diaphragm Ultrasound for Weaning Outcomes in Critically Ill Children. *BMC Pulmonary Medicine*, **19**, Article No. 270. <https://doi.org/10.1186/s12890-019-1034-0>
- [69] Lee, E., Hsia, S., Hsiao, H., Chen, M., Lin, J., Chan, O., *et al.* (2017) Evaluation of Diaphragmatic Function in Mechanically Ventilated Children: An Ultrasound Study. *PLOS ONE*, **12**, e0183560. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183560>
- [70] 刘杰, 王涛, 姜丽华, 等. 膈肌超声指导小儿腹股沟疝修补术拔除喉罩时机的效果分析[J]. 实用医学杂志, 2023, 39(16): 2085-2089.
- [71] Theerawit, P., Eksombatchai, D., Sutherasan, Y., Suwatanapongched, T., Kiatboonsri, C. and Kiatboonsri, S. (2018) Diaphragmatic Parameters by Ultrasonography for Predicting Weaning Outcomes. *BMC Pulmonary Medicine*, **18**, Article No. 175. <https://doi.org/10.1186/s12890-018-0739-9>
- [72] Palkar, A., Narasimhan, M., Greenberg, H., Singh, K., Koenig, S., Mayo, P., *et al.* (2018) Diaphragm Excursion-Time Index: A New Parameter Using Ultrasonography to Predict Extubation Outcome. *Chest*, **153**, 1213-1220. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.01.007>
- [73] Fantini, R., Tonelli, R., Castaniere, I., Tabbi, L., Pellegrino, M.R., Cerri, S., *et al.* (2019) Serial Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function and Clinical Outcome in Patients with Amyotrophic Lateral Sclerosis. *BMC Pulmonary Medicine*, **19**, Article No. 160. <https://doi.org/10.1186/s12890-019-0924-5>
- [74] Mercurio, G., D'Arrigo, S., Moroni, R., Grieco, D.L., Menga, L.S., Romano, A., *et al.* (2021) Diaphragm Thickening Fraction Predicts Noninvasive Ventilation Outcome: A Preliminary Physiological Study. *Critical Care*, **25**, Article No. 219. <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03638-x>
- [75] Cammarota, G., Sguazzotti, I., Zanoni, M., Messina, A., Colombo, D., Vignazia, G.L., *et al.* (2019) Diaphragmatic Ultrasound Assessment in Subjects with Acute Hypercapnic Respiratory Failure Admitted to the Emergency Department. *Respiratory Care*, **64**, 1469-1477. <https://doi.org/10.4187/respcare.06803>
- [76] Shaikh, H. and Laghi, F. (2019) Role of Diaphragm Ultrasound When NIV Fails in COPD Exacerbations. *Respiratory Care*, **64**, 1600-1602. <https://doi.org/10.4187/respcare.07523>
- [77] Marchioni, A., Castaniere, I., Tonelli, R., Fantini, R., Fontana, M., Tabbi, L., *et al.* (2018) Ultrasound-Assessed Diaphragmatic Impairment Is a Predictor of Outcomes in Patients with Acute Exacerbation of Chronic Obstructive Pulmonary Disease Undergoing Noninvasive Ventilation. *Critical Care*, **22**, Article No. 109. <https://doi.org/10.1186/s13054-018-2033-x>
- [78] 窦志敏, 李鸿杰, 吴晓霞, 等. 超声膈肌功能评估对急性呼吸窘迫综合征患者无创机械通气结果的预测价值[J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31(5): 492-496.
- [79] Wen, Q., Ma, J., Pang, X., Huang, S., Zhang, J., Wang, J., *et al.* (2021) Diaphragm Ultrasound in the Diagnosis of Respiratory Dysfunction in Patients with Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Revue Neurologique*, **177**, 639-646. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2020.07.020>
- [80] Fantini, R., Mandrioli, J., Zona, S., Antenora, F., Iattoni, A., Monelli, M., *et al.* (2016) Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function in Patients with Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Respirology*, **21**, 932-938. <https://doi.org/10.1111/resp.12759>
- [81] Hiwatani, Y., Sakata, M. and Miwa, H. (2012) Ultrasonography of the Diaphragm in Amyotrophic Lateral Sclerosis: Clinical Significance in Assessment of Respiratory Functions. *Amyotrophic Lateral Sclerosis and Frontotemporal Degeneration*, **14**, 127-131. <https://doi.org/10.3109/17482968.2012.729595>
- [82] Digala, L.P. and Govindarajan, R. (2020) Thickening Fraction as a Measure of Ultrasonographic Diaphragm Dysfunction in Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Clinical Neurophysiology Practice*, **5**, 35-37. <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2020.01.001>
- [83] Carrié, C., Bonnardel, E., Vally, R., Revel, P., Marthan, R. and Biais, M. (2016) Vital Capacity Impairment Due to

- Neuromuscular Disease and Its Correlation with Diaphragmatic Ultrasound: A Preliminary Study. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **42**, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2015.09.020>
- [84] He, L., Zhang, W., Zhang, J., Cao, L., Gong, L., Ma, J., *et al.* (2014) Diaphragmatic Motion Studied by M-Mode Ultrasonography in Combined Pulmonary Fibrosis and Emphysema. *Lung*, **192**, 553-561. <https://doi.org/10.1007/s00408-014-9594-5>
- [85] 王舰尧, 高占成, 王雪, 等. 超声评估慢性阻塞性肺疾病患者膈肌功能与肺功能关联性研究[J]. 中国超声医学杂志, 2020, 36(12): 1078-1080.
- [86] Okura, K., Kawagoshi, A., Iwakura, M., Sugawara, K., Takahashi, H., Kashiwagura, T., *et al.* (2016) Contractile Capability of the Diaphragm Assessed by Ultrasonography Predicts Nocturnal Oxygen Saturation in COPD. *Respirology*, **22**, 301-306. <https://doi.org/10.1111/resp.12897>
- [87] Kim, K., Jang, D., Park, J., Yoo, H., Kim, H.S. and Choi, W. (2018) Changes of Diaphragmatic Excursion and Lung Compliance during Major Laparoscopic Pelvic Surgery: A Prospective Observational Study. *PLOS ONE*, **13**, e0207841. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207841>
- [88] Kim, S.H., Na, S., Choi, J., Na, S.H., Shin, S. and Koh, S.O. (2010) An Evaluation of Diaphragmatic Movement by M-Mode Sonography as a Predictor of Pulmonary Dysfunction after Upper Abdominal Surgery. *Anesthesia & Analgesia*, **110**, 1349-1354. <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e3181d5e4d8>
- [89] Fu, X., Wang, Z., Wang, L., Lv, G., Cheng, Y., Wang, B., *et al.* (2022) Increased Diaphragm Echodensity Correlates with Postoperative Pulmonary Complications in Patients after Major Abdominal Surgery: A Prospective Observational Study. *BMC Pulmonary Medicine*, **22**, Article No. 400. <https://doi.org/10.1186/s12890-022-02194-6>
- [90] Spadaro, S., Grasso, S., Dres, M., Fogagnolo, A., Dalla Corte, F., Tamburini, N., *et al.* (2019) Point of Care Ultrasound to Identify Diaphragmatic Dysfunction after Thoracic Surgery. *Anesthesiology*, **131**, 266-278. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000002774>
- [91] Cavayas, Y.A., Eljaiek, R., Rodrigue, É., Lamarche, Y., Girard, M., Wang, H.T., *et al.* (2019) Preoperative Diaphragm Function Is Associated with Postoperative Pulmonary Complications after Cardiac Surgery. *Critical Care Medicine*, **47**, e966-e974. <https://doi.org/10.1097/ccm.0000000000004027>
- [92] Kot, P., Granell, M., Rodriguez, P., Rovira, L. and De Andrés, J. (2018) Diaphragmatic Ultrasound: Early Diagnosis When Phrenic Injury in Thoracic Surgery Is Suspected. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, **32**, e7-e8. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2018.06.024>
- [93] Crimi, C., Heffler, E., Augelletti, T., Campisi, R., Noto, A., Vancheri, C., *et al.* (2018) Utility of Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function before and after Pulmonary Rehabilitation in COPD Patients. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, **13**, 3131-3139. <https://doi.org/10.2147/copd.s171134>
- [94] Jung, J. and Kim, N. (2017) The Correlation between Diaphragm Thickness, Diaphragmatic Excursion, and Pulmonary Function in Patients with Chronic Stroke. *Journal of Physical Therapy Science*, **29**, 2176-2179. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.2176>