

腹腔镜手术相关性膈肌损伤的研究进展

高 萌^{1,2}, 宋晓阳^{3*}

¹西安医学院第一附属医院麻醉科, 陕西 西安

²西安医学院研究生处, 陕西 西安

³西安医学院第一附属医院门诊部, 陕西 西安

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月14日

摘 要

腹腔镜手术因其微创优势已成为腹部外科的主流术式,但其必需的非生理性气腹与体位易导致膈肌损伤,引发术后低氧血症、肩痛和肺功能不全等并发症,严重影响患者加速康复。本文系统综述该损伤的病理生理机制;综述床旁超声在量化评估膈肌功能中的应用价值,并归纳总结基于循证医学的围术期多维度膈肌保护策略,为临床防治膈肌损伤、改善患者预后提供理论依据与实践指导。

关键词

腹腔镜手术, 膈肌, 超声检查, 围术期护理

Research Advances in Laparoscopic Surgery-Associated Diaphragmatic Injury

Meng Gao^{1,2}, Xiaoyang Song^{3*}

¹Department of Anesthesiology, The First Affiliated Hospital of Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Graduate School of Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

³Outpatient Department, The First Affiliated Hospital of Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

Received: October 13, 2025; accepted: November 6, 2025; published: November 14, 2025

Abstract

Laparoscopic surgery has become a mainstream procedure in abdominal surgery due to its minimally invasive advantages. However, the required non-physiological pneumoperitoneum and patient positioning can easily lead to diaphragmatic injury, triggering postoperative complications such as hypoxemia, shoulder pain, and pulmonary dysfunction, which significantly impact enhanced patient recovery. This article systematically reviews the pathophysiological mechanisms of this injury,

*通讯作者。

文章引用: 高萌, 宋晓阳. 腹腔镜手术相关性膈肌损伤的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(11): 1350-1358.
DOI: 10.12677/acm.2025.15113229

summarizes the value of bedside ultrasound in the quantitative assessment of diaphragmatic function, and synthesizes evidence-based, multi-dimensional perioperative protective strategies for the diaphragm. The aim is to provide a theoretical basis and practical guidance for the clinical prevention and management of diaphragmatic injury and for improving patient outcomes.

Keywords

Laparoscopic Surgery, Diaphragm, Ultrasound Examination, Perioperative Care

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

随着医学技术的不断进步和外科技术的不断发展,加速康复外科理念在手术治疗中的应用受到关注,为促进患者更快康复,微创手术腹腔镜技术在临床的应用越来越多,微创手术与 ERAS 原则相辅相成,有助于患者更早恢复活动能力和肠道功能,同时减少术后对阿片类药物的需求。此外,相比较于传统开放手术,腹腔镜手术还具有其他潜在优势,包括减少术中出血、降低伤口并发症和手术部位感染风险,这些益处共同促进住院时间缩短[1]。但其所需的二氧化碳气腹和特殊体位构成了独特的非生理性环境。气腹会导致腹内压急剧升高,迫使膈肌向头侧移位,并显著减少肺功能残气量;同时,体位的变化也带来了血液动力学的改变和脏器位置的移动。这些因素共同作用,使作为主要呼吸肌的膈肌承受了巨大的机械性牵拉、化学性刺激及潜在的神经损伤风险。目前,临床对腹腔镜术后膈肌损伤的重视程度仍显不足,且缺乏系统性的评估与防治方案。床旁超声技术的兴起,为量化评估膈肌功能提供了实时、无创的可靠工具,使得基于精准评估的个体化管理成为可能。因此,本文旨在对腹腔镜手术相关性膈肌损伤的病理生理机制、超声评估方法及围术期多维度保护策略进行系统性的梳理与综述,以期临床工作者深化认识、优化实践提供参考,最终助力于患者术后康复质量的提升。

2. 膈肌的生理功能与临床损伤

2.1. 膈肌的核心生理功能

膈肌是将胸腔与腹部内容物分开的薄圆顶形肌肉,从功能上讲,它是参与呼吸过程的主要肌肉,负责高达 70% 的静息肺通气,在吸气和呼气中都起着举足轻重的作用[2]。更重要的是,健康的膈肌对于实现足够的肺通气和跨血液气体界面的气体交换至关重要,可以维持肺容积,防止肺不张。除此之外,膈肌作为腹腔与胸腔的屏障,还有助于重要的非呼吸功能,例如咳嗽、打喷嚏、呕吐等生理活动。与运动肌相比,膈肌在解剖学上是独一无二的,是唯一长期活跃的骨骼肌[3]。

2.2. 膈肌的临床损伤

在腹腔镜手术中,存在膈肌损伤相关的临床并发症。例如术后肺不张、低氧血症、术后肩痛等。另外,还包括有顽固性呃逆、咳嗽无力、排痰困难等临床表现。气腹及 Trendelenburg 体位可能引发术后肺部并发症(Postoperative pulmonary complications, PPCs),例如肺不张,从而导致严重的围手术期呼吸功能障碍。研究表明,普通外科手术后 PPCs 的发生率为 5%,而腹部手术后 PPCs 的发生率为 12%~58% [4]。

腹腔镜后肩痛(Post-Laparoscopic Shoulder-Tip Pain, PLSP)定义为腹腔镜手术后几个小时内发生的肩

痛。术后肩痛是最常见的表现, 发生率达 35%~80% [5], 大多数理论认为是二氧化碳气腹导致膈肌纤维与腹膜过度拉伸, 并且刺激膈神经[6], 在术后 24 h 疼痛最为显著, 一周内可缓解, 但对镇痛药物反应较差, 可能会降低患者满意度并阻碍功能恢复。文献[7]表明, 各种手术后 PLSP 的发生率很高: 腹腔镜胃切除术后为 66%, 腹腔镜阑尾切除术后为 57.1%~65.5%, 妇科腹腔镜检查后高达 80%。PLSP 的确切病因尚不清楚, 但大多数理论表明它涉及膈神经的刺激。多数理论表明, 上述症状均直接或间接与膈肌功能障碍相关, 膈肌损伤应当受到临床关注, 从各方面进行最大程度的保护。

3. 腹腔镜手术致膈肌损伤的病理生理机制

3.1. 气腹的直接效应

气腹是保证腹腔镜手术视野清晰的重要条件, 应用 12~15 mmHg 的腹内压对于实现足够的手术视野至关重要。目前临床上使用的主要是二氧化碳气腹, 腹腔镜手术建立气腹后, 术中需持续向腹腔灌注 CO₂ 气体, 造成腹内压急剧升高。然而, 气腹会导致膈肌向头侧移位而降低肺顺应性[8], 肺部受到机械压迫, 引起术中肺容量减少, 从而导致肺不张形成的可能性[9]。腹压升高导致的顺应性下降会显著影响腹腔镜手术期间的呼吸力学, 还会导致吸气峰值压力升高和功能残气量降低[10]。研究发现, 当气腹压在 11~13 mmHg 的水平时, 可导致肺不张平均增加 66%, 大大增加术后肺部并发症的发生率[4]。气腹压力越大, 膈肌的牵拉作用也会越强, 进而刺激支配膈肌的感觉神经纤维。膈肌神经起源于颈丛, 同时也支配肩部皮肤感觉。因此, 较高的气腹压力可能通过反射性疼痛机制引发肩部疼痛。

3.2. 体位的协同影响

目前腹腔镜术中最常用的体位主要包括头低脚高位、头高脚低位、侧卧位, 不同体位对患者呼吸功能的影响略有差异。Trendelenburg 体位下患者腹内脏器在重力的作用下移向头侧, 增加对膈肌的压迫作用, 进一步增加对膈肌肌腱和膈脚的牵拉力, 使膈肌活动进一步受限[11], 并且已被证明会导致肺容量、肺顺应性、功能残气量和气道峰值压力增加, 从而导致术后肺部并发症。PPCs 的患病率约为 30%, 与死亡率和发病率增加有关[12]。呼吸机功能恢复不全可能会降低肺活量、潮气量和咳嗽功能, 容易导致肺不张、低氧血症、膈肌麻痹、肺部感染, 甚至更严重的并发症。

3.3. 化学性损伤

3.3.1. 腹腔内局部酸性环境

灌注的 CO₂ 在腹膜表面与水结合形成碳酸, 解离出 H⁺ 离子, 造成局部 pH 下降。酸性环境直接刺激覆盖于膈肌下的壁层腹膜和膈神经末梢, 引发无菌性炎症和疼痛。

3.3.2. 全身性影响:

腹膜对 CO₂ 的吸收可能导致高碳酸血症和呼吸性酸中毒, 改变细胞内 pH, 潜在影响膈肌细胞的收缩功能。

3.4. 神经性损伤

3.4.1. 膈神经直接刺激

低温、干燥的 CO₂ 气体持续吹拂膈神经。电刀能量(特别是高频电刀)在膈肌附近的使用, 其热传导或电火花可能损伤膈神经。

3.4.2. 牵拉性损伤

在胆囊切除术等上腹部手术中, 为暴露术野而牵拉肝脏, 可能间接牵拉或压迫膈神经。

4. 膈肌功能的临床评估体系

4.1. 影像学评估

X 线: 可发现一侧膈肌抬高, 但特异性差, 敏感性低。Epelman 等表明, 与超声相比, 胸片在识别膈肌异常运动方面的敏感性仅为 34%, 特异性为 86%。此外, 胸腔积液、气胸、脊柱侧弯等事件的存在可能会混淆膈肌的可视化[13]。

CT/MRI: 主要用于排除其他疾病, 对功能性评估价值有限。并且对操作者的要求较高、价格昂贵, 还涉及转运到放射科, 限制了其在危重症患者中的使用, 并不是最佳或最容易完成的检查。

4.2. 超声的量化评估

4.2.1. 超声的应用

超声技术在评估膈肌功能方面是一种成熟且有效的方法, 由于超声设备的便携性, 近几十年来在重症监护、急诊、门诊及呼吸领域得到广泛应用。在麻醉场景中, 膈肌功能具有重要意义, 尤其是在围手术期阶段, 麻醉药物及手术操作均可显著改变其功能状态。膈肌超声检查是一种快速、可重复、无创且易于学习的方法, 仅需中低水平的设备即可实现两种腹部投影。该检查通常在较短时间内完成(平均约 5 分钟, 通常少于 15 分钟), 并且可以在患者床旁进行。

对于操作者的依赖性, 研究表明, 只需中等熟练程度的操作人员和超声设备即可, 具有较高的准确性和可重复性[14]。Feipe 等研究[15]表明, 对于膈肌厚度的评估中, 不同经验水平和专业培训的检察员具有出色的可靠性。双侧膈肌超声是可行的, 但右侧途径更容易且通常足够, 由于人体左侧探查区域常因脾、胃内容物等造成干扰, 左侧脾窗明显小于右侧肝窗, 使左侧膈肌超声探查成功率较低, 临床中多采用右侧肝窗探查膈肌恢复情况。

有研究证实, B 模式和 M 模式超声评估膈肌运动均具有重复性, 对于经验不足的操作员使用 M 模式更准确[16], 两者相比 B 模式超声视野面积更大, M 模式超声图像质量更佳、局部特征更为清晰。M 模式的加入使超声的敏感性和特异性提高到等于或高于透视。在膈肌的超声评估中, 应先采用 B 型超声检查患者, 再采用 M 型超声检查质量较差的部位, 以便在绝大多数患者中获得准确的膈肌测量质量[17]。由于仰卧位的变异性较小且可重复性更高, 因此这是膈肌超声的首选定位[14]。

对于麻醉场景的应用中, 检查时机可选在: 术前基线评估、术毕时、入麻醉恢复室后、术后 24 小时。

4.2.2. 核心超声参数

1) 膈肌移动度(Diaphragmatic Excursion, DE)

a) 肋间入路法

患者采取仰卧位, 使用高频线阵探头(10~15 MHz)纵向放置在右侧腋前线或腋中线处, 于 8~10 肋间找到膈肌肋骨附着区(zone of apposition, ZOA), 此处膈肌较为固定, 受呼吸运动干扰较小, 有利于降低测量误差。在右侧肋膈隐窝下 0.5~2.0 cm 处也可找到 ZOA 区。B 模式下于此可观察到一个“亮-暗-亮”三层结构, 上层亮线为胸膜线, 下层亮线为腹膜线, 中间暗回声结构为膈肌, 膈肌中间常有高回声纤维层。Schleifer 等[18]提出使用角度独立 M 模式测量, 于腋后线处纵向放置探头, 随后激活与角度无关的 M 模式, 放置定位线平行于脊柱, 得到膈肌运动曲线。与传统的 M 模式相比, 角度独立 M 模式提出了一种基于标准化的、基于地标的方法, 利用脊柱作为参照物, 不受探头放置角度的影响, 能更准确地反映膈肌运动情况。

b) 肋下入路法

患者取仰卧位, 将低频凸阵探头(2~5 MHz)在 B 模式下置于锁骨中线或腋前线, 垂直于胸壁, 以肝为

声窗, 向头端背侧扫描, 可看到肝表面一条明亮的弧形亮线状结构, 此为膈肌, 在吸气时朝向探头移动。放置探头角度使超声束垂直于膈肌后部, 随后转换 M 模式, 测量膈肌运动正弦曲线吸气峰到基线的垂直距离为膈肌移动距离。DE 是指在 M 模式下潮气呼吸时的位移[19]。

2) 左侧膈肌移动度

上述方法可应用在左右两侧膈肌移动度的测量中, 但由于肺部和胃肠道气体的干扰, 可视化通常更具挑战性, 这使得传统视图变得困难。当以上标准的膈肌超声测量方法不足以评判左侧膈肌功能时, 找到替代方案是有必要的。Haotian 等人[20]研究发现与脾脏相邻的膈肌可视化很有帮助, 使用沿腋中线的脾脏边界作为标志, 强调解剖学 M 模式技术的价值, 将采样线与膈肌运动垂直对齐。该技术提供的结果与传统方法相当, 并且在标准成像无法产生清晰视图时被证明特别有用。他们还提出了另一种指标: 胸膜滑动位移(pleural sliding Displacement, PSD)。在腋中线放置凸面(1~5 MHz)或线性探头(3~12 MHz), 使操作者能够捕获肺-脾界面, 并在呼吸过程中观察胸膜在腹部器官上滑动时的“窗帘征”。通过保持探头的位置并测量呼气末和吸气末时胸膜线到成像窗口边缘的距离, PSD 可以量化为这两个测量值之间的差异。该指标反映了肺边界的尾部运动, 可作为评估静息呼吸和深呼吸期间左侧膈肌偏移的可行替代方案。

正常值: 在 Boussuges 的研究中[21], 支持根据性别确定正常值, 女性右侧与左侧分别为 3.3 与 3.2 cm, 男性右侧与左侧分别为 4.1 与 4.2 cm。

临界值: DE < 1.0~1.2 cm, 常提示膈肌功能严重受损。

3) 膈肌增厚分数(Diaphragmatic Thickening Fraction, DTF)

肋间入路法[19]: 将高频线性探头(7~12 MHz)置于第 8 和第 11 肋间隙之间的腋前线或腋中线, 在 ZOA 区垂直于胸壁, 优先与肋间间隙平行, 使膈肌在全屏幕上显示。膈肌呈三层结构, 无回声肌层, 边界为回声胸膜和腹膜。纤维层在图像中心显示为一条亮线。在呼气末和吸气末呼吸时用 B 型超声测量厚度。或者, 可以在 M 型模式下测量厚度, 这可以在呼吸周期内提供更准确的计时, 而 B 型模式提供更好的空间定位。

正常值: >30%~36%。

临界值: DTF < 20%~30%, 提示膈肌收缩力不足。

5. 膈肌保护策略的研究进展

鉴于上述因素可能显著影响膈肌功能, 相关手术操作需在术中采取监测与通气支持措施, 并制定术后康复策略, 以促进患者膈肌功能的全面恢复。近年来发现通过设置适当的通气模式和呼吸参数实施膈肌保护性通气, 使人机协调并保证一定程度的呼吸肌做功而防止膈肌废用; 辅助抗氧化剂、蛋白酶抑制剂等药物减轻膈肌萎缩预防呼吸机诱导的膈肌功能障碍, 从而加速康复和改善预后[22]。

5.1. 手术技术与操作优化

5.1.1. 气腹管理

为了尽量减少气体引起的膈肌拉伸, 也采用了低压气腹技术, 有相当多的证据支持其在减轻肩痛方面的有效性。关于 Ortenzi 的一篇 meta 分析中[6], 发现降低气腹压对术后疼痛有积极影响, 而在对于择期腹腔镜胆囊切除术中, 可能与手术时间延长有关。有多项研究报告了肩部疼痛的评估结果, 低压组(6~10 mmHg)患者术后肩部疼痛发生率显著低于标准压力组(12~15 mmHg)施加的压力患者。另外, 国际指南建议使用“允许充分暴露手术区域的最低腹内压, 而不是常规压力”。

5.1.2. 术中操作

术毕前用温生理盐水或局麻药充分冲洗膈下, 以稀释酸性物质、减轻炎症。尽量减少在膈肌附近的

电灼使用, 避免粗暴牵拉。

5.2. 麻醉管理策略

实现肺部和膈肌保护性通气不仅需要对呼吸机设置单一调整或单一药物干预, 还需要对呼吸和机械通气的生理学有全面的理解, 并在密切监测下实施一系列干预措施[23]。

5.2.1. 保护性通气策略

与常规机械通气相比, 保护性肺通气可维持肺泡扩张、减少肺泡塌陷或过度扩张, 降低了术后肺部并发症的发生率。对于接受腹腔镜手术的患者, 建议使用保护性肺通气, 这对减少肺损伤和肺部感染的发生率是有效的。术后肺部并发症是最常见的并发症, 也是发病率和死亡率的主要原因, 影响预后并且延长住院时间。因此, 使用肺保护性肺通气策略(Lung-Protective Ventilation Strategy, LPVS)可以更快地促进患者的康复[4]。

保护性肺通气的核心部分包括小潮气量、适度呼气末正压(Positive End-Expiratory Pressure, PEEP)和肺复张[4]。

a) 小潮气量通气, 避免肺泡过度膨胀

通过小潮气量通气以降低肺通气驱动压, 是 LPVS 的基础。目前推荐使用 6~8 ml/kg (理想体重)潮气量。

b) 应用个体化 PEEP (通常 5~8 cmH₂O)

在过去的几十年里, PEEP 被认为是预防全麻患者术中肺衰竭和 PPCs 的有效方法, 可以对抗气腹压力, 维持肺泡开放, 改善呼吸力学。然而, 对于 PEEP 的水平仍然缺乏共识和系统的验证。对于全身麻醉接受 Trendelenburg 位气腹研究的结果表明, 个体化 PEEP 可以改善 Trendelenburg 位的氧合和术中的气腹, 个性化的 PEEP 也减少了 PPCs 的发生率[24]。

c) 术中定期施行肺复张手法

肺复张是重新开放无通气或通气不足的肺泡而采取的跨肺压的过程, 可有效改善氧合和呼吸系统的顺应性。以往常采用手法肺复张, 但该方法不能维持较长时间正压通气, 在转换为机械通气后, 复张效果很快消失, 导致肺泡再次塌陷, 因此目前推荐机械通气肺复张[25]。

5.2.2. 改变吸呼比降低吸气峰值压力, 维持最佳呼吸功能

由于气腹导致气道阻力增加和肺动力学改变, 需要更大的通气力和加速呼气流量。延长吸气时间有可能降低容量控制通气模式下的峰值和平均吸气压力, 通过 I: E 比率调整延长吸气阶段有助于将吸气峰值压力维持在接近基线水平, 并且这种方法提高了机械通气在腹腔镜手术期间维持最佳呼吸功能的安全性和有效性, 为腹腔镜手术麻醉期间的肺保护性通气策略提供了显著的优势[10]。

5.2.3. 膈神经电刺激

膈神经电刺激是一种新兴技术, 通过直接向膈神经或其邻近区域施加电刺激或磁刺激来诱发膈肌收缩。Gabi 等人[26]研究表明, 无创膈神经刺激是安全的, 通过对麻醉受试者实施有或无机械通气的非侵入性膈神经刺激, 可在不产生相关肺部正压的情况下, 实现生理性膈肌诱导的呼吸量生成。更有研究[27]表明, 在机械通气患者中实施临时性膈神经刺激疗法, 为减轻机械通气对膈肌、肺部、心血管系统及大脑的有害影响提供了极具前景的治疗途径。

5.2.4. 镇静管理

Luo 等[28]研究的一项荟萃分析表明, 镇静剂可对膈肌活动产生抑制作用, 且这种负面影响在患者苏

醒后仍会持续。Heder 等[29]指出, 与常规静脉给药相比, 采用挥发性麻醉药进行吸入镇静更能维持呼吸驱动, 可实现呼吸驱动的精确调节, 使吸气努力维持在保护肺部和膈肌的范围内。有助于在长期有创通气期间保持膈肌功能。

5.2.5. 肌松管理

术后肌松残余是围手术期中需要关注的一个重大安全问题, 由肌松药术后未代谢完全导致, 从而影响到膈肌功能的恢复。术毕务必确保肌松作用被完全拮抗。可以通过临床体征初步确认肌松的代谢情况, 2023 年美国麻醉医师学会神经肌肉阻滞专家组发布《2023 美国麻醉医师协会神经肌肉阻滞的监测和拮抗实践指南》[30]中残余神经肌肉阻滞被定义为拇收肌的 TOF < 0.9。

5.3. 术后干预策略

5.3.1. 多模式镇痛

优化镇痛, 减少阿片类药物用量, 因其会抑制呼吸驱动。

5.3.2. 呼吸锻炼

鼓励患者进行深呼吸、咳嗽、使用激励式肺量计。

5.3.3. 体位管理

Wang 等[31]研究表明, 在一项纳入 700 多例腹腔镜上腹部手术患者的 RCT 实验中, 表明与仰卧位相比, 麻醉恢复期采用 30°半卧位, 可显著降低术后低氧血症的发生率, 减少气道抢救和咳嗽的发生, 并且提高麻醉恢复室的操作效率。可能的机制是, 30°半卧位膈肌向下移动、增加了肺容量并且减轻对膈肌的压力和化学刺激。

6. 总结与展望

综上所述, 腹腔镜手术中的非生理性气腹与体位是导致膈肌机械、化学及神经性损伤的核心诱因, 由此引发的功能障碍是术后肩痛与低氧血症等并发症的重要病理基础; 而床旁超声通过量化评估膈肌移动度与增厚分数, 是早期识别与动态监测的重要工具。当前证据表明, 构建以低压力气腹、肺保护性通气及术后半卧位管理为核心的围术期综合保护策略, 是防治膈肌损伤、改善患者预后的有效途径。

展望未来, 该领域研究仍面临挑战, 未来工作应聚焦于术中实时膈肌功能监测技术的建立、基于超声指标的个体化保护性通气参数的精准探索, 并进一步验证各项保护策略对患者远期呼吸功能恢复及整体康复质量的影响。例如: 1) 通过多中心大样本随机对照试验探索术后半卧位的最佳角度, 比较不同角度半卧位对高危患者(如肥胖、COPD)术后低氧血症和膈肌功能恢复的影响, 并利用膈肌超声量化其疗效, 从而建立基于证据的个体化体位管理路径。2) 设计一项前瞻性生理学研究, 利用膈肌超声动态监测不同 PEEP 水平对 Trendelenburg 体位手术患者膈肌移动度与增厚分数的即时影响, 旨在探索真正意义上的“膈肌保护性 PEEP”区间, 并为个体化设置提供证据。

参考文献

- [1] Elias, K.M., Brindle, M.E. and Nelson, G. (2025) Enhanced Recovery after Surgery—Evidence and Practice. *NEJM Evidence*, 4, EVIDra2400012. <https://doi.org/10.1056/evidra2400012>
- [2] de Boer, W.S., Parlevliet, K.L., Kooistra, L.A., Koster, D., Nieuwenhuis, J.A., Edens, M.A., *et al.* (2025) Ultrasound as Diagnostic Tool in Diaphragm Dysfunction: A Prospective Construct Validity Study. *Respiratory Medicine*, 241, Article ID: 108083. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2025.108083>
- [3] Powers, S.K. (2025) Diaphragm Function in Health and Disease. In: Ji, L.L., Ed., *The Skeletal Muscle: Plasticity, Degeneration and Epigenetics*, Springer, 615-630. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88361-3_25

- [4] Sun, M., Jia, R., Wang, L., Sun, D., Wei, M., Wang, T., *et al.* (2023) Effect of Protective Lung Ventilation on Pulmonary Complications after Laparoscopic Surgery: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Frontiers in Medicine*, **10**, Article 1171760. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1171760>
- [5] Lee, D.H., Song, T., Kim, K.H. and Lee, K.W. (2017) Incidence, Natural Course, and Characteristics of Postlaparoscopic Shoulder Pain. *Surgical Endoscopy*, **32**, 160-165. <https://doi.org/10.1007/s00464-017-5651-5>
- [6] Ortenzi, M., Montori, G., Sartori, A., Balla, A., Botteri, E., Piatto, G., *et al.* (2022) Low-Pressure versus Standard-Pressure Pneumoperitoneum in Laparoscopic Cholecystectomy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Surgical Endoscopy*, **36**, 7092-7113. <https://doi.org/10.1007/s00464-022-09201-1>
- [7] Zhao, Y., Xin, W. and Luo, X. (2025) Post-Laparoscopic Shoulder Pain Management: A Narrative Review. *Current Pain and Headache Reports*, **29**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1007/s11916-024-01355-y>
- [8] Wahba, R.W.M., Béique, F. and Kleiman, S.J. (1995) Cardiopulmonary Function and Laparoscopic Cholecystectomy. *Canadian Journal of Anaesthesia*, **42**, 51-63. <https://doi.org/10.1007/bf03010572>
- [9] Rustagi, P.S., Yadav, A. and Nellore, S.S. (2023) Ultrasonographic Evaluation of Diaphragmatic Excursion Changes after Major Laparoscopic Surgeries in the Trendelenburg Position under General Anaesthesia: A Prospective Observational Study. *Indian Journal of Anaesthesia*, **67**, S274-S280. https://doi.org/10.4103/ija.ija_643_23
- [10] Bogár, L., Domokos, K., Csontos, C. and Sütő, B. (2024) The Impact of Pneumoperitoneum on Mean Expiratory Flow Rate: Observational Insights from Patients with Healthy Lungs. *Diagnostics*, **14**, Article 2375. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14212375>
- [11] Odeberg, S., Ljungqvist, O., Svenberg, T., Gannedahl, P., Bäckdahl, M., Rosen, A.V., *et al.* (1994) Haemodynamic Effects of Pneumoperitoneum and the Influence of Posture during Anaesthesia for Laparoscopic Surgery. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, **38**, 276-283. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1994.tb03889.x>
- [12] Katayama, S., Mori, K., Pradere, B., Yanagisawa, T., Mostafaei, H., Quhal, F., *et al.* (2021) Influence of Steep Trendelenburg Position on Postoperative Complications: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Robotic Surgery*, **16**, 1233-1247. <https://doi.org/10.1007/s11701-021-01361-x>
- [13] May, L.A., Epelman, M. and Navarro, O.M. (2022) Ultrasound Imaging of Diaphragmatic Motion. *Pediatric Radiology*, **52**, 2051-2061. <https://doi.org/10.1007/s00247-022-05430-7>
- [14] Vieira Santana, P., Zumpano Cardenas, L., Pereira de Albuquerque, A.L., Ribeiro de Carvalho, C.R. and Caruso, P. (2020) Diaphragmatic Ultrasound: A Review of Its Methodological Aspects and Clinical Uses. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, **46**, e20200064. <https://doi.org/10.36416/1806-3756/e20200064>
- [15] Barbosa, F., Dos Santos, J., Alves, M., Alves, J., Cerqueira, T. and De Santana Filho, V. (2023) Inter-Examiner and Intra-Examiner Reliability of Quantitative and Qualitative Ultrasonography Assessment of Peripheral and Respiratory Muscles in Critically Ill Patients. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **20**, Article 5636. <https://doi.org/10.3390/ijerph20095636>
- [16] Cappellini, I., Picciafuochi, F., Bartolucci, M., Matteini, S., Virgili, G. and Adembri, C. (2020) Evaluation of Diaphragm Thickening by Diaphragm Ultrasonography: A Reproducibility and a Repeatability Study. *Journal of Ultrasound*, **24**, 411-416. <https://doi.org/10.1007/s40477-020-00462-x>
- [17] He, Y. and Zhao, T. (2022) Ultrasound Evaluation of the Diaphragm in Clinical Anesthesia. *Journal of Healthcare Engineering*, **2022**, Article ID: 2163225. <https://doi.org/10.1155/2022/2163225>
- [18] Schleifer, J., Shokoohi, H., Selame, L.A.J., Liteplo, A. and Kharasch, S. (2021) The Use of Angle-Independent M-Mode in the Evaluation of Diaphragmatic Excursion: Towards Improved Accuracy. *Cureus*, **13**, e17284. <https://doi.org/10.7759/cureus.17284>
- [19] Hermans, G., Demoule, A. and Heunks, L. (2024) How I Perform Diaphragmatic Ultrasound in the Intensive Care Unit. *Intensive Care Medicine*, **50**, 2175-2178. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07688-x>
- [20] Zhao, H., Liu, K., Li, L. and Zhao, H. (2024) Left Diaphragmatic Ultrasound in the Intensive Care Unit: Practical Considerations and Alternative Approaches. *Intensive Care Medicine*, **51**, 435-437. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07736-6>
- [21] Boussuges, A., Finance, J., Chaumet, G. and Brégeon, F. (2021) Diaphragmatic Motion Recorded by M-Mode Ultrasonography: Limits of Normality. *ERJ Open Research*, **7**, 00714-2020. <https://doi.org/10.1183/23120541.00714-2020>
- [22] Zhang, L., Ni, S., Zhou, X. and Zhao, Y. (2019) Hemorrhagic Shock Sensitized the Diaphragm to Ventilator-Induced Dysfunction through the Activation of IL-6/JAK/STAT Signaling-Mediated Autophagy in Rats. *Mediators of Inflammation*, **2019**, Article ID: 3738409. <https://doi.org/10.1155/2019/3738409>
- [23] van den Berg, M.J.W., Heunks, L. and Doorduyn, J. (2024) Advances in Achieving Lung and Diaphragm-Protective Ventilation. *Current Opinion in Critical Care*, **31**, 38-46. <https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000001228>
- [24] Gao, L., Zhang, B., Qi, J., Zhao, X., Yan, X., Li, B., *et al.* (2024) Effects of Individualized Positive End-Expiratory

- Pressure on Intraoperative Oxygenation and Postoperative Pulmonary Complications in Patients Requiring Pneumoperitoneum with Trendelenburg Position: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Surgery*, **111**, 1386-1396. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000002041>
- [25] 中华医学会麻醉学分会“围术期肺保护性通气策略临床应用专家共识”工作小组. 围术期肺保护性通气策略临床应用专家共识[J]. 中华麻醉学杂志, 2020, 40(5): 513-519.
- [26] Mueller, G., Aszalos, E., Krause, S., Niederhauser, T., Slavei, K. and Baumberger, M.E. (2023) Safety and Feasibility of Noninvasive Electromagnetic Stimulation of the Phrenic Nerves. *Respiratory Care*, **68**, 602-610. <https://doi.org/10.4187/respcare.10568>
- [27] Morris, I.S., Dres, M. and Goligher, E.C. (2022) Phrenic Nerve Stimulation to Protect the Diaphragm, Lung, and Brain during Mechanical Ventilation. *Intensive Care Medicine*, **48**, 1299-1301. <https://doi.org/10.1007/s00134-022-06760-8>
- [28] Luo, J., Wang, L., Wei, B., Huang, Z., Zheng, H., Gu, B., *et al.* (2025) Effects of Sedatives on Diaphragm Activity Monitored by Ultrasound: A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Anesthesiology*, **25**, Article No. 325. <https://doi.org/10.1186/s12871-025-03187-8>
- [29] Müller-Wirtz, L.M., O’Gara, B., Gama de Abreu, M., Schultz, M.J., Beitler, J.R., Jerath, A., *et al.* (2024) Volatile Anesthetics for Lung- and Diaphragm-Protective Sedation. *Critical Care*, **28**, Article No. 269. <https://doi.org/10.1186/s13054-024-05049-0>
- [30] Thilen, S.R., Weigel, W.A., Todd, M.M., Dutton, R.P., Lien, C.A., Grant, S.A., *et al.* (2023) 2023 American Society of Anesthesiologists Practice Guidelines for Monitoring and Antagonism of Neuromuscular Blockade: A Report by the American Society of Anesthesiologists Task Force on Neuromuscular Blockade. *Anesthesiology*, **138**, 13-41. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000004379>
- [31] Wang, X., Guo, K., Sun, J., Yang, Y., Wu, Y., Tang, X., *et al.* (2024) Semirecumbent Positioning during Anesthesia Recovery and Postoperative Hypoxemia: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Network Open*, **7**, e2416797. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.16797>