

• 综述 •

肌肉超声在危重症患者中的临床应用与研究进展

雷铃¹ 邱俊² 邹同娟² 李易² 周然² 秦瑶² 尹万红²¹ 成都市新都区人民医院重症医学科,成都 610500; ² 四川大学华西医院重症医学科,成都 610041

通信作者: 尹万红, Email: yinwanhong@wchscu.cn

【摘要】 危重症患者因长期卧床、代谢紊乱、炎症反应及营养不良等因素,常伴有显著的骨骼肌消耗,影响患者的活动能力,还可能导致病死率升高。及时、准确地评估肌肉状况对于优化治疗策略、改善患者预后具有重要意义。当前评估肌肉质量的方法存在各种局限性,肌肉超声作为一种无创、便捷、低成本且适用于床旁监测的技术,在危重症患者肌肉评估中的应用日益受到关注,但实际应用中仍面临诸多挑战,如测量方法缺乏统一标准,操作依赖性较强,数据可重复性尚待优化等。本文旨在系统梳理肌肉超声在危重症患者肌肉评估中的研究进展,探讨其临床应用的优势与局限性,以期为未来研究及临床实践提供科学依据。

【关键词】 肌肉超声; 危重症超声; 肌肉质量**基金项目:** 四川省国际医学交流促进会科研课题 (HX-H2406188)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250307-00224

Clinical applications and research progress of muscle ultrasound in critically ill patientsLei Ling¹, Qiu Jun², Zou Tongjuan², Li Yi², Zhou Ran², Qin Yao², Yin Wanhong²¹ Department of Critical Care Medicine, Xindu District People's Hospital, Chengdu 610500, China; ² Department of Critical Care Medicine, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Corresponding author: Yin Wanhong, Email: yinwanhong@wchscu.cn

【Abstract】 Critically ill patients often experience significant skeletal muscle wasting due to prolonged bed rest, metabolic disorders, inflammatory responses and malnutrition, which affects the patient's mobility and may also lead to increased mortality. Timely and accurate assessment of muscle status is important for optimizing treatment strategies and improving patient prognosis. There are various limitations in the current methods of assessing muscle mass, and muscle ultrasound, as a noninvasive, convenient, low-cost and suitable technique for bedside monitoring, has received increasing attention for its application in muscle assessment of critically ill patients. However, there are still a number of challenges in its practical application, such as the lack of uniform standards for the measurement method, the high dependence on the operation, and the reproducibility of the data that needs to be optimized, and so on. The aim of this article is to systematize the research progress of muscle ultrasound in muscle assessment of critically ill patients, and to discuss the advantages and limitations of its clinical application, in order to provide a scientific basis for future research and clinical practice.

【Key words】 Muscle ultrasound; Critical care ultrasound; Muscle mass**Fund program:** Research Project of Sichuan International Medical Exchange Promotion Association (HX-H2406188)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250307-00224

危重症患者因长期卧床、代谢紊乱、炎症反应及营养不良等因素,常伴有显著的骨骼肌消耗,这种肌肉减少不仅影响患者的活动能力,还可能导致病死率升高、住院时间延长、机械通气依赖增加及生活质量下降^[1-2]。因此,及时、准确地评估肌肉状况对于优化治疗策略、改善患者预后具有重要意义^[3]。当前评估肌肉质量的方法主要包括磁共振成像、CT 扫描、双能 X 线吸收法及生物电阻抗分析。磁共振成像和 CT 扫描可提供高清影像,准确测量肌肉横截面积及脂肪含量,但其应用受到高成本、放射暴露及操作复杂性等因素的限制^[4]。双能 X 线吸收法能测量全身肌肉质量,但其对局部肌肉变化的评估能力有限,且易受体液波动影响^[5]。生物电阻抗分析操作简便,但受水和电解质平衡、肢体水肿等因素的影响较大,从而降低其准确性^[6]。相比之下,肌肉超声作为一种无创、便捷、低成本且适用于床旁监测的技术,在危重症患者肌肉评估中的应用日益受到关注^[7]。超声

可用于测量肌肉的厚度、横截面积以及组织回声特征,以评估肌肉萎缩程度,并能动态追踪病程变化,为个体化康复提供支持^[8]。然而,肌肉超声在实际应用中仍面临挑战,如测量方法缺乏统一标准、操作依赖性较强、数据可重复性尚待优化等^[9]。现系统梳理肌肉超声在危重症患者肌肉评估中的研究进展,探讨其临床应用的优势与局限性,以期为未来研究及临床实践提供科学依据。

1 文献检索

以 critical illness、critical care、muscle 和 ultrasonography 为主题词检索 PubMed 数据库 2022 年 1 月至 2025 年 2 月发表文献 237 篇,排除非肌肉相关研究 107 篇,非肌肉超声研究 15 篇,研究对象<18 岁的研究 10 篇,综述 19 篇,个案报道 1 篇,最终筛选出 69 篇评估重症监护病房(intensive care unit, ICU)患者肌肉超声的定量研究^[10-78],用于描述性统计分析(表 1)。

表 1 肌肉超声在危重症患者中应用与研究纳入文献的基本特征

文献	研究类型	国别	样本量(例)	研究地点	肌肉超声评估时间点	评估肌肉的部位	评估的肌肉	体位	探头
Ikechi 等 ^[10]	前瞻性观察研究	日本	35	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 7 天	上肢、下肢	右侧肱三头肌、股四头肌	仰卧位, 手臂外展 90°, 膝关节伸直	线阵探头(频率 6~18 MHz)
Kangalgil 等 ^[11]	前瞻性队列研究	土耳其	200	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 5 天和出院前	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌	仰卧位	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Yin 等 ^[12]	前瞻性观察研究	中国	125	综合性 ICU	入 ICU 48 h 内、第 7 天、转出 ICU 前	上肢、下肢	肱二头肌、股直肌	仰卧位, 下肢伸直, 膝关节稍屈曲	线阵探头(频率 5~12 MHz)
Zhang 等 ^[13]	前瞻性观察研究	中国	156	综合性 ICU	入 ICU 48 h 内、转出 ICU 前	胸	右膈肌	仰卧位, 头部抬高 30°	凸阵探头(频率 2~5 MHz)
Buitrago 等 ^[14]	前瞻性观察研究	哥伦比亚	31	ICU	术后 1、3、5、7 d	下肢	股直肌、股内侧肌、股外侧肌	仰卧位	高频率线阵探头
Kannan 等 ^[15]	前瞻性观察研究	印度	100	ICU	入 ICU 1、3、7 d	胸	右膈肌、肋间肌	膈肌: 取仰卧位, 床头抬高 30°; 肋间肌: 取仰卧位	线阵探头(频率范围未提及)
Inci 等 ^[16]	观察性研究	土耳其	120	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 3 天和第 7 天	胸	膈肌	仰卧位, 头部抬高 30°	凸阵探头(频率 2~5 MHz)
Dong 等 ^[17]	前瞻性队列研究	中国	130	外科 ICU	术前 1 d	下肢	大腿前侧肌肉	仰卧位	线阵探头(频率 3~12 MHz)
Vieira 等 ^[18]	前瞻性观察队列研究	巴西	81	ICU	气管切开术后 48 h 内	下肢、胸	股直肌、右膈肌	仰卧位(30°抬高), 放松, 下肢伸直并稍微分开	测量股直肌横截面积: 线阵探头(频率 5~10 MHz) 测量膈肌移动度: 凸阵探头(频率 2~5 MHz)
Umbrello 等 ^[19]	单中心前瞻性观察性队列研究	意大利	316	综合性 ICU、神经科 ICU、新冠 ICU	入 ICU 48 h 内	下肢	股直肌	未明确提及	未明确提及
Lim 等 ^[20]	回顾性队列研究	韩国	200	未明确提及	入 ICU 24 h 内	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌	仰卧位, 四肢自然伸展	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Er 等 ^[21]	前瞻性观察研究	土耳其	100	综合 ICU	入院 24 h 内、出院前 1 d	下肢	右侧股直肌	仰卧位, 膝关节伸直, 足尖向上	线阵探头(频率 4~12 MHz)
Rajagopal 等 ^[22]	前瞻性观察研究	印度	150	未明确提及	入 ICU 48 h 内、第 7 天和第 14 天	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌	仰卧位	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Sugiyama 等 ^[23]	前瞻性观察研究	日本	92	内科和外科 ICU	入 ICU 24 h 内、第 3 天和第 7 天	下肢	股直肌	未明确提及	未明确提及
Silva-Gutiérrez 等 ^[24]	前瞻性观察研究	智利	132	ICU	入 ICU 前 48 h、ICU 出院时	下肢	股直肌、股中间肌、总股四头肌	深镇静状态下仰卧位, 头部抬高 30°, 脚踝处于中立位, 上下肢伸展	凸阵探头(频率 2~5 MHz) 和线阵探头(频率 6~13 MHz)
Nhat 等 ^[25]	前瞻性观察研究	越南	180	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 5 天、第 10 天和出院时	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌和腓肠肌	仰卧位, 四肢放松	线阵探头(频率 7~15 MHz)
Dams 等 ^[26]	单中心前瞻性观察研究	比利时	30	综合 ICU	插管后 48 h 内、机械通气第 5 天、第 10 天和出 ICU 时	下肢、胸	右侧股直肌、右侧膈肌	膈肌: 仰卧位, 上半身抬高 30°, 手臂放于身体两侧; 股直肌: 仰卧位, 右腿充分伸展、放松	测量膈肌: 线阵探头(频率 12~15 MHz) 测量股直肌: 凸阵探头(频率 2~5 MHz)
Chandrasekaran 等 ^[27]	RCT	印度	60	内科 ICU	1、3、7 d	下肢	股四头肌	未明确提及	未明确提及
Peres 等 ^[28]	前瞻性验证研究	巴西	49	创伤护理专科 ICU	入院时、入院 24~96 h、入院后 96~168 h	下肢	股四头肌	未明确提及	线阵探头(频率 7~13 MHz)
Sostakaitė 等 ^[29]	前瞻性观察研究	立陶宛	101	综合 ICU	入 ICU 24 h 内、第 5 天和第 7 天	上肢、下肢	肱二头肌、股直肌、股中间肌	平卧位 10 min, 手臂与躯干外展 15°, 双腿分开与肩同宽	线阵探头(频率 0~12 MHz)
Mayer 等 ^[30]	验证性研究	美国	150	未明确提及	评估骨骼肌时一次性测量	上肢、下肢	肱二头肌、肱三头肌、股四头肌、股二头肌等	根据评估肌肉的不同采取合适的体位, 充分暴露肌肉, 一般为仰卧位或俯卧位	以线阵探头为主(频率 7~15 MHz), 较深部位肌肉用凸阵探头辅助(频率 2~5 MHz)
Xin 等 ^[31]	前瞻性观察研究	中国	160	未明确提及	未明确提及	上肢、下肢	肱二头肌、桡侧腕屈肌、股四头肌、股外侧肌、胫骨前肌、内侧腓肠肌	上肢: 仰卧位, 肘部伸直放松; 下肢: 仰卧位, 腿部伸直放松	线阵探头(频率 5~12 MHz)

续表 1

文献	研究类型	国别	样本量(例)	研究地点	肌肉超声评估时间点	评估肌肉的部位	评估的肌肉	体位	探头
Durak 等 ^[32]	前瞻性观察研究	土耳其	50	未明确提及	未明确提及	上肢、下肢	肱二头肌、股直肌	肱二头肌:仰卧位,上肢伸直放松 股直肌:仰卧位,膝关节伸直,脚趾指向天花板	飞利浦 Affiniti 50 线阵超声探头(频率 4~12 MHz)
Takahashi 等 ^[33]	单中心前瞻性观察研究	日本	24	ICU	入 ICU <3、3~5、5~7、7~10、10~14 d	胸	右侧膈肌	未明确提及	便携式 iViz air ver.4 超声设备线阵探头(频率 5~10 MHz)
Boscolo 等 ^[34]	前瞻性观察研究	意大利	44	ICU	脱机前、后 5 min 内	胸	右侧膈肌	半卧位	Mindray M9 超声设备线阵探头(频率 4~12 MHz)
Laguado-Nieto 等 ^[35]	前瞻性观察研究	哥伦比亚	150	未明确提及	拔管前 24 h	胸	膈肌	仰卧位,头部抬高 30°	凸阵探头(频率 2~5 MHz)
马金兰等 ^[36]	前瞻性观察研究	中国	55	ICU	入 ICU 1、4、7 d	下肢、胸	股四头肌(股直肌、股中间肌)、右侧膈肌	膈肌:床头抬高 30°;股四头肌:未提及特殊体位	未明确提及
de Araújo Alves 等 ^[37]	单中心前瞻性观察研究	巴西	30	ICU	入 ICU 24 h 内开始,连续评估 5 d	下肢	右侧股直肌	仰卧位,膝关节被动伸展、中立旋转	SonoSite M-Turbo® 便携式超声设备的线阵探头(L38xi,带宽 10~5 MHz,最大扫描深度 5.9 cm)
Vieira 等 ^[38]	单盲 RCT	巴西	40	创伤 ICU	住院前 5 d 每日测量 肌肉回声和厚度	下肢	股直肌	仰卧位,膝盖被动伸直并处于中立旋转位	SonoSite M-Turbo® 便携式超声设备的高频线阵探头(L38xi,带宽 10~5 MHz,最大扫描深度 9 cm)
Yao 等 ^[39]	前瞻性队列研究	中国	143	综合 ICU	入 ICU 48 h 内、入 ICU 7 d	下肢	股直肌	仰卧位,下肢伸直,膝关节稍屈曲	线阵探头(频率 5~12 MHz)
Benli 等 ^[40]	RCT	土耳其	20	呼吸 ICU	脱机后 5 d 内	胸	右侧膈肌	仰卧位,床头抬高 20°~30°	膈肌位移:5 MHz 凸阵探头;膈肌厚度:10 MHz 线阵探头
Olimpio Júnior 等 ^[41]	RCT	巴西	44	ICU	机械通气撤机后 进行 SBT 时	胸	膈肌	MIP:坐位,床头抬高 90°;膈肌:仰卧位	线阵探头(频率 12 MHz),凸阵探头(频率 5 MHz)评估深部结构
Yegin 等 ^[42]	前瞻性观察研究	土耳其	100	未明确提及	入院 24 h 内	胸	右侧膈肌、肋间肌	仰卧位,头部抬高 30°	线阵探头(频率 5~12 MHz)
Perdiguero 等 ^[43]	回顾性观察研究	阿根廷	200	未明确提及	评估肝移植候选资格时 一次性测量	腹	腰大肌	仰卧位	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Kim 等 ^[44]	前瞻性观察研究	韩国	80	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 5 天、第 10 天和出院时	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌	仰卧位,四肢自然伸展	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Morita 等 ^[45]	多中心、前瞻性队列研究	日本	未明确提及	综合 ICU	入 ICU 24 h 内、第 7 天、第 14 天、转出 ICU 时,及转出后 1、3、6 个月	下肢、胸	股直肌、膈肌	未明确提及	未明确提及
Nguyen 等 ^[46]	前瞻性观察性队列研究	法国	200	未明确提及	ARDS 患者在入 ICU 24 h 内、第 3 天 和第 7 天测量; 健康志愿者一次性测量	腹	腹直肌、腹外斜肌	仰卧位,双腿伸直,轻度屈膝	凸阵探头(频率 2~5 MHz)
Hrdy 等 ^[47]	前瞻性观察性队列研究	捷克	216	综合 ICU	入 ICU 24 h 内、第 7 天、第 14 天	下肢	股直肌、内侧腓肠肌	仰卧位	未明确提及
Núñez-Seisdedos 等 ^[48]	单中心前瞻性队列研究	西班牙	50	ICU	出院后 3 个月和 6 个月	胸	膈肌	MIP:坐位; 膈肌:仰卧位	未明确提及
Er 等 ^[49]	前瞻性观察研究	土耳其	100	综合 ICU	撤机尝试前 1 h	胸	右侧膈肌	仰卧位,头部抬高 30°,手臂放于身体两侧	Philips Affiniti 50 超声系统,线阵探头(频率 4~12 MHz)
de Moura 等 ^[50]	纵向观察性研究	巴西	30	ICU	1、3、5、7 d	上肢、下肢、腹部	双侧三角肌、肱二头肌;双侧股四头肌、股直肌、股中间肌、胫骨前肌、内侧和外侧腓肠肌;腹直肌、腹内斜肌、腹外斜肌、腹横肌	仰卧位	线阵探头(频率 8 MHz)
Pu 等 ^[51]	前瞻性多中心观察研究	中国	1125	综合 ICU、专科 ICU	入 ICU 24 h 内、第 3 天和第 7 天	胸	膈肌	仰卧位,头部抬高 30°	凸阵探头(频率 2~5 MHz)

续表 1

文献	研究类型	国别	样本量(例)	研究地点	肌肉超声评估时间点	评估肌肉的部位	评估的肌肉	体位	探头
González-Seguel 等 ^[52]	横断面观察研究	智利	25	综合 ICU	入 ICU 期间, 未详细说明	下肢	右侧股直肌、右侧内侧腓肠肌	股直肌: 仰卧位, 膝关节伸直, 足尖向上; 内侧腓肠肌: 仰卧位, 膝关节屈曲, 足平放	线性和凸面探头
Calulo Rivera 等 ^[53]	开发与验证研究	美国、澳大利亚	180	ICU	未明确提及	下肢	股四头肌、胫骨前肌	仰卧位	未明确提及
Ferguson 等 ^[54]	前瞻性队列研究	澳大利亚	52	综合 ICU	ECMO 开始 24~48 h 内、第 7 天、第 14 天或从 ECMO 撤离时	下肢	双侧股直肌、双侧内侧腓肠肌	仰卧位, 膝关节伸直	未明确提及
Viner Smith 等 ^[55]	单中心前瞻性观察研究	澳大利亚	28	ICU	纳入时、第 7 天、第 90 天	下肢	股四头肌	股四头肌: 仰卧位, 双腿放松伸直; 握力: 坐直, 肩部处于中立位, 肘部弯曲 90°	Philips Lumify 线阵探头(频率 4~12 MHz)
Simón-Frapolli 等 ^[56]	前瞻性观察研究	西班牙	75	未明确提及	出院后 14~21 d	下肢	股直肌	仰卧位, 手臂旋后, 膝盖伸直并放松至完全伸展	线阵探头(频率 5~10 MHz)
Lei 等 ^[57]	多中心前瞻性观察研究	中国	116	综合 ICU	入 ICU 24 h 内、第 3 天	下肢	股直肌、股中间肌	仰卧位, 床头抬高约 30°, 双足居中	线阵探头(频率 8 MHz)
Ramaswamy 等 ^[58]	前瞻性观察研究	未明确提及	80	未明确提及	SBT 前	胸	胸骨旁吸气肌(主要是肋间肌和胸小肌)	半卧位, 床头抬高 45°	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Fu 等 ^[59]	回顾性队列研究	中国	164	内科 ICU、外科 ICU、综合 ICU	拔管前 1 h	胸	右侧膈肌	仰卧位, 头部抬高 30°, 手臂置于身体两侧	超声探头(频率 3.5 MHz)
Nickels 等 ^[60]	二次分析	澳大利亚	160	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 7 天和第 14 天	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌	仰卧位	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Kim 等 ^[61]	前瞻性观察研究	韩国	226	未明确提及	术前 1 d	下肢	股直肌、股外侧肌、内侧腓肠肌	仰卧位, 下肢伸直放松	线阵探头(频率 5~12 MHz)
Bernardinello 等 ^[62]	观察性研究	意大利	82	未明确提及	入组时及随访时	胸	右侧膈肌	半卧位, 床头抬高 40°	膈肌位移: 凸阵探头(频率 2~5 MHz); 膈肌厚度: 线阵探头(频率 6~13 MHz)
Emekli 等 ^[63]	回顾性研究	土耳其	498	ICU	未明确提及	胸	两侧膈肌	仰卧位	未明确提及
Sundarsingh 等 ^[64]	单中心前瞻性观察研究	印度	120	ICU	入 ICU 时评估虚弱, 测量 QMLT, 随访 28 d 或直至死亡	下肢	股四头肌(包括股直肌、股中间肌)	仰卧位	Philips InnoSight 诊断超声系统的线阵探头(频率 4~12 MHz)
Gürsoy 等 ^[65]	前瞻性观察研究	土耳其	60	内科 ICU	入 ICU 24 h 内、出院前	下肢、腹	股直肌、腹直肌	仰卧位	Philips Affiniti 50 超声系统线阵探头(频率 4~12 MHz)
Takahashi 等 ^[66]	单中心前瞻性观察研究	日本	22	ICU	入 ICU <3、3~5、5~7、7~10、10~14 d	下肢	右侧股直肌	仰卧位, 膝盖被动伸直并处于中立旋转位	iViz air ver.4 便携式超声线阵探头(频率 5~10 MHz)
Nascimento 等 ^[67]	观察与验证类研究	巴西	180	未明确提及	健康志愿者一次性测量; 患者入 ICU 24 h 内和第 7 天测量	胸	膈肌	仰卧位, 头部抬高 30°	凸阵探头(频率 2~5 MHz)
de Salles 等 ^[68]	横断面和前瞻性观察性队列研究	巴西	125	外科 ICU	术前	上肢、下肢、腹	肱二头肌、肱肌、股直肌、股中间肌、内侧腓肠肌、腹直肌、腹外斜肌、腹内斜肌、腹横肌	未明确提及	未明确提及
Ackermans 等 ^[69]	前瞻性探索性研究	荷兰、德国	17	综合 ICU	入 ICU 24 h 内、每隔 3 d 1 次	下肢	股直肌	仰卧位	线阵探头
Elgohary 等 ^[70]	前瞻性观察研究	埃及	454	内科 ICU	入院 24 h 后	上肢、下肢	肱二头肌等前中臂肌群; 股四头肌等大腿下 1/3 肌群	仰卧位	线阵探头(频率 5~12 MHz)
Guzmán-David 等 ^[71]	前瞻性观察研究	西班牙	105	综合 ICU	入 ICU 24~48 h 内、第 7 天、第 14 天或撤机时	下肢	股直肌、内侧腓肠肌	仰卧位	线阵探头(频率 9~14 MHz)
Lopes 等 ^[72]	前瞻性队列研究	葡萄牙	120	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 4 天、第 7 天和第 10 天	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌	仰卧位, 四肢自然摆放	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Prado 等 ^[73]	前瞻性纵向观察研究	巴西	45	ICU	入 ICU 1、3、7 d	下肢	股四头肌	未明确提及	未明确提及

续表 1

文献	研究类型	国别	样本量(例)	研究地点	肌肉超声评估时间点	评估肌肉的部位	评估的肌肉	体位	探头
Nakanishi 等 ^[74]	观察性研究	日本	200	未明确提及	入 ICU 24 h 内、第 5 天和第 10 天	上肢	肱二头肌、肱三头肌	仰卧位, 上肢自然伸展	线阵探头(频率 7~12 MHz)
Rollinson 等 ^[75]	前瞻性队列研究	澳大利亚、英国	154	ICU	入 ICU 3 d 内、ICU 期间每周、患者清醒时、转出 ICU 时、出院时	下肢	右侧股直肌	未明确提及	未明确提及
Huang 等 ^[76]	前瞻性观察研究	中国	120	外科 ICU	脱机前 1 h	胸	右侧膈肌	仰卧位, 头部抬高 30°, 手臂放于身体两侧	膈肌移动度: 低频探头 膈肌增厚分数: 高频探头
Huang 等 ^[77]	前瞻性观察研究	中国	150	内科 ICU、外科 ICU、综合 ICU	机械通气第 7 天、第 14 天和脱机前	胸	右侧膈肌	仰卧位, 头部抬高 30°, 手臂放于身体两侧	C5-2 阵列探头、SP51u 探头
Peres 等 ^[78]	验证性研究	巴西	80	未明确提及	入 ICU 48 h 内、第 7 天和第 14 天	上肢、下肢	肱三头肌、股四头肌	仰卧位	线阵探头(频率 7~12 MHz)

注: RCT 为随机对照试验, ICU 为重症监护病房, SBT 为自主呼吸试验, MIP 为最大吸气压力

2 入选研究的一般特点

69 项研究中, 54 项(78.26%)为前瞻性研究, 15 项为回顾性研究; 60 项(86.96%)为观察性研究, 5 项为验证性研究, 4 项为随机对照试验(randomized controlled trial, RCT); 仅有 3 项为多中心研究, 8 项为单中心研究, 其余未注明; 研究开展地点主要在中国(15.94%)、巴西(14.49%)、土耳其(13.04%)、日本(8.70%); 研究样本量最少 17 例, 最多 1 125 例, 47.83% 的研究样本量在 100~200 例; 26.09% 的研究在综合 ICU 开展, 个别研究在专科 ICU 实施, 如外科 ICU、内科 ICU、创伤 ICU、呼吸 ICU。

3 肌肉超声在危重症患者中的技术基础

3.1 危重症患者肌肉超声检查方案

3.1.1 评估时间点: 44 项研究(63.77%)进行了多次测量, 其中近一半以上的研究($n=29$, 65.91%)测量间隔大于 3 d; 超声评估的频次平均为 3 次(最少 1 次, 最多 8 次); 首次测量多选择在入 ICU 24~48 h 内进行, 之后往往会在患者入 ICU 第 3 天或第 5 天、第 7 天重复测量。在转出 ICU 后随访肌肉超声的变化情况可以进一步观察患者在转出 ICU 后的情况。

3.1.2 评估的肌肉: 测量下肢肌肉的研究较多($n=47$, 68.12%), 有 23 项研究涉及胸部肌肉, 18 项研究测量上肢肌肉, 仅有 5 项研究测量的是腹部肌肉。跨部位研究有 22 项, 其中 17 项研究涉及上肢和下肢, 4 项研究涉及下肢和胸部。研究胸部肌肉的 23 项研究中, 除 1 项评估胸小肌, 3 项研究肋间肌, 其余 22 项均评估的是膈肌; 测量膈肌的研究中, 有 14 项表明监测的是右侧膈肌, 有 1 项表明测量的是两侧膈肌, 其余研究未表明左右位置。5 项评估腹部肌肉的研究主要涉及腰大肌、腹直肌、腹外斜肌、腹内斜肌、腹横肌。18 项评估上肢肌肉研究涉及的位置有肱二头肌、肱三头肌、桡侧腕屈肌、肱肌、三角肌。47 项评估下肢肌肉的研究涉及的位置有股四头肌、股直肌、股中间肌、股内侧肌、股外侧肌、胫骨前肌、内侧腓肠肌、外侧腓肠肌。四肢肌肉研究中有 10 项表明测量的是右侧肢体肌肉, 其余研究未明确左右位置。下肢肌肉研究中有 30 项为多条肌肉联合测量, 如多联合测量股直肌、股中间肌、股四头肌。

3.1.3 体位: 对于四肢和腹部肌肉的测量均为仰卧位。在部分研究中指出, 对上肢肌肉的测量采用手臂外展 90° 或自然伸展; 对下肢肌肉的测量采用下肢伸直或膝关节稍屈曲, 足尖向上。对于膈肌的测量, 有的采用仰卧位头部抬高 30°, 有的采用半卧位或坐位。

3.1.4 超声探头: 测量肱二头肌、肱三头肌、股直肌、股四头肌、腓肠肌、胫骨前肌均使用线阵探头, 频率为 5~18 MHz, 常见频率为 7~12 MHz。测量肋间肌、胸小肌均使用线阵探头, 频率为 5~12 MHz。测量膈肌的研究中有 8 项使用凸阵探头, 频率为 2~5 MHz; 有 9 项使用线阵探头, 频率为 4~13 MHz。测量腰大肌均使用线阵探头, 频率为 7~12 MHz; 测量腹直肌、腹外斜肌中有 2 项使用线阵探头, 有 1 项使用凸阵探头, 频率为 2~5 MHz。部分研究使用高频线阵探头测量股直肌、肱二头肌、膈肌, 频率为 10~15 MHz。

3.1.5 质控: 在阐明操作者数量的研究中, 有 29 项为单人操作, 由 1 名经验丰富的超声医师或经过培训的操作者完成; 有 25 项由 2 名经验丰富的超声医师或经过培训的操作者完成; 由 3 名或更多操作者完成的研究仅 5 项。操作者以超声医师为主, 部分涉及重症医生。

3.1.6 图像获取

3.1.6.1 图像获取的位置: ① 下肢肌肉: 对于股四头肌, 有 55% 的研究在髌前上棘与髌骨上缘连线的中点获取图像, 也有少量研究($n=3$)在髌前上棘与髌骨上缘连线的上 2/3 与下 1/3 交点处获取图像; 对于股直肌, 有 5 项研究在髌前上棘与髌骨上缘连线的中、下 1/3 交界处获取图像, 有 12 项研究在髌前上棘与髌骨上缘连线中点获取图像; 对于腓肠肌, 有的研究在小腿肚最膨隆处获取图像, 也有研究在腓骨外侧与胫骨外侧踝上、中 1/3 交界处测量; 对于胫骨前肌, 在髌骨下缘与外踝上、中 1/3 交界处获取图像。② 上肢肌肉: 对于肱二头肌, 有的研究在肩峰与肘横纹连线的中、下 1/3 交界处获取图像, 也有研究在肩峰与肘横纹连线中点测量; 对于肱三头肌, 在肩峰与鹰嘴连线的中点获取图像; 对于桡侧腕屈肌, 在肘中线至桡骨远端上、中 1/3 交界处测量。③ 胸部肌肉: 对于膈肌, 6 项研究于胸壁第 9 肋间与腋前线和腋中线中点测量, 2 项研究在锁骨中线与第 7~9 肋间的交点

处测量,还有 2 项研究测量值和测量位置均不同,测量膈肌位移时在肋缘下锁骨中线与腋前线之间,测量膈肌厚度时在腋中线第 8~11 肋间,还有研究通过扫描上、下前胸壁以及上、下侧胸壁评估膈肌厚度相关指标;对于肋间肌,在腋中线第 5~7 肋间测量;对于胸小肌,在胸骨旁第 3~4 肋间和胸小肌附着处测量。④ 腹部肌肉:对于腰大肌,位于第三腰椎水平的横断面测量;对于腹直肌,在腹部中线两侧测量;对于腹外斜肌,在腋中线与肋弓交点至髂前上棘连线中点处测量。

3.1.6.2 图像获取的操作技巧:有 63 项研究描述了肌肉图像获取操作技巧;33 项研究描述了探头应垂直于肌肉长轴放置,以确保获取肌肉的最大横截面图像;3 项研究阐述了常用二维超声模式获取图像;4 项研究阐述了使用 M 型超声模式获取图像。通常重复测量 3 次并取平均值。对于操作技巧的描述主要有:操作过程涂抹大量凝胶以减少肌肉受压;调整探头角度以获得清晰图像;为保证图像的稳定性,超声设备设置保持一致,深度和增益调整以显示肌肉;使用 Image J 软件构建像素强度直方图来测量回声强度,每块肌肉的回声强度以 0(黑色)~255(白色)表示。

3.1.6.3 图像优化:有 24 项研究描述了图像优化的内容,其中 22 项提到通过调整增益、深度和聚焦等参数优化图像质量,使肌肉边界和内部结构清晰可见;关于深度的设置,有研究给出了具体的数据,例如:测量上肢肌肉时深度设为 4 cm,测量股四头肌和股外侧肌时深度设为 6 cm,增益通常调整在 50%~70%,以确保图像清晰;在某些情况下,关闭除谐波组织成像外的所有图像优化模式,以确保图像一致性。针对肢体水肿或病态肥胖的患者,可以通过调整深度、频率和增益设置来获得图像的优化。

3.1.6.4 图像特点:在 27 项研究中描写了图像的特点,包括显示肌肉的横截面积、肌肉纤维的走向、肌肉筋膜以及肌肉与周围组织的边界。膈肌图像特点要显示膈肌的厚度、运动幅度和收缩功能,膈肌在超声图像中常表现为 3 层结构,即两层高回声线(胸膜和腹膜)和中间低回声层(膈肌肌肉纤维),M 模式下可显示膈肌在呼吸周期中的移动轨迹和厚度变化。股四头肌的图像特点要显示股四头肌的形态结构,用于测量肌肉厚度和横截面积。

3.1.7 测量

3.1.7.1 测量指标:测量的指标主要有横截面积($n=27$),用于评估肌肉的形态和大小;有 42 项研究涉及肌肉厚度测量,包括股直肌、股中间肌、股四头肌、膈肌等;少量研究测量了肌肉回声强度,用于评估肌肉的密度和结构;还有少量研究关于肌肉密度、肌肉羽状角、肌束长度、肌肉体积和肌肉指数。膈肌相关的指标包括膈肌厚度(呼气末和吸气末)、膈肌增厚分数(diaphragm thickening fraction, DTF)、膈肌移动度。股四头肌相关指标包括股直肌横截面积(rectus femoris cross-sectional area, RF-CSA)、股直肌厚度(rectus femoris muscle thickness, RF-MT)、股中间肌厚度(vastus intermedius muscle thickness, VI-MT)。

3.1.7.2 测量方法:横截面积是通过手动勾勒出肌肉的边界,超声机计算出的肌肉面积通常取多次测量的平均值。肌肉厚度为超声图像测量的肌肉浅筋膜与深筋膜之间的距离。肌肉回声强度是通过超声图像选取评估区域,测量其平均灰度值。DTF 通过超声测量呼气末与吸气末的膈肌厚度计算, $DTF = (吸气末厚度 - 呼气末厚度) / 呼气末厚度 \times 100\%$ 。膈肌移动度为超声测量的吸气与呼气时膈肌的位移,评估膈肌的运动功能。

3.2 危重症患者肌肉超声评估结果

3.2.1 测量基线值:不同研究中肌肉超声的基线值不同,涵盖股直肌、膈肌、肱二头肌等肌肉的横截面积、厚度和回声强度等参数。例如:Yin 等^[12]研究显示入 ICU 48 h 内 RF-CSA 中位数为 3.68 cm²;Umbrello 等^[19]研究中整体队列 RF-CSA 中位数为 2.30 cm²;Kim 等^[61]研究显示术前 1 d RF-CSA 中位数为 2.78 cm²。Zhang 等^[13]研究显示入 ICU 48 h 内 DTF 为 $(32.5 \pm 10.8)\%$;Boscolo 等^[34]研究显示 DTF 中位数为 35%;Yegin 等^[42]研究显示在入院 24 h 内 DTF 为 $(23.4 \pm 11.2)\%$ 。在肌肉厚度方面,Dams 等^[26]研究股直肌厚度为 $(1.36 \pm 0.40)\text{ cm}$;Er 等^[21]研究显示入 ICU 24 h 内股直肌厚度为 $(2.13 \pm 0.41)\text{ cm}$ 。有研究报道股直肌肌肉回声强度为 45.3 AU,有的为 58.6 AU,还有研究为 63.9~64.7 AU。有的研究报道膈肌厚度基线值为 1.1 mm、有的为 1.8 mm。此外,膈肌移动度中位数为 10 mm,肋间肌厚度为 2 mm,这些基线值为后续研究提供了重要参考价值,反映了肌肉超声在不同临床场景中的应用价值。

3.2.2 住院期间肌肉萎缩程度:随着住院时间的延长,患者的肌肉质量普遍下降,尤其是股四头肌、股直肌和膈肌等部位。股直肌的横截面积和厚度呈显著进行性下降:第 7 天横截面积平均减少 16.0%~24.8%,每日减少 0.11 cm²。第 5 天肌肉厚度减少 1.1%~11.0%,右侧和左侧分别下降 31% 和 28%;第 7 天进一步减少 4.1%~20%;第 14 天减少 23.8%;至第 21 天累计下降 32.8%。此外,股直肌结构变化明显,第 5 天回声强度增加 29%,第 7 天羽状角减少 24%。股四头肌相关肌肉同步萎缩:第 5 天右侧和左侧股四头肌肌肉厚度分别减少 30% 和 39%,第 7 天股四头肌总厚度减少 10.2%;其中股中间肌第 5 天下降 0.7%,右侧和左侧分别减少 28.0% 和 24.6%,第 7 天进一步减少 9.0%。腓肠肌和胫骨前肌损失显著:第 3 天内、外侧腓肠肌厚度分别减少 11.5%、14.6%,第 5 天右侧和左侧外侧腓肠肌分别减少 24.8%、16.9%,第 7 天内侧腓肠肌厚度减少 12.5%~20.0%,横截面积减少 25%,至第 14 天累计减少 25%。第 3 天双侧胫骨前肌厚度均减少 14.0%~14.6%。呼吸肌功能同步恶化:第 7 天膈肌移动度减少 40%,肋间肌厚度减少 20%;第 21 天腹直肌厚度下降 40%。上肢肌肉亦受影响:第 5 天肱二头肌厚度减少 2.1%,第 7 天减少 4.4%。

3.2.3 有效性和可靠性:有 37 项研究通过对不同检查者之间测量的数据或者通过对重复测量数据进行组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)评价测量指标的有效性和可靠性。

效性和可靠性。肱三头肌厚度 ICC 为 0.94~0.98, 肱三头肌横截面积 ICC 为 0.92~0.94, 肱二头肌横截面积 ICC 为 0.95, 股四头肌厚度 ICC 为 0.95~0.97, 股四头肌横截面积 ICC 为 0.94~0.95, 腹肌厚度 ICC 为 0.85~0.98, 腹直肌厚度 ICC >0.92, 股直肌厚度 ICC 为 0.95, 股直肌横截面积 ICC 为 0.93~0.98。通过对超声图像进行重复测量, 股直肌与肱二头肌横截面积的 ICC 为 0.97, 股直肌与肱二头肌回声强度测量的 ICC 为 0.95, 腹肌增厚分数测量的 ICC 为 0.96, 表明肌肉测量值具有较好的可靠性。

4 肌肉超声在危重症患者中的临床应用

4.1 肌肉超声在ICU获得性衰弱(intensive care unit-acquired weakness, ICU-AW)中的临床应用: 肌肉超声作为一种无创、床旁、动态可重复的评估手段, 在 ICU-AW 的早期识别、动态监测和康复指导中展现出重要的临床价值^[12-13, 36, 39], 可识别骨骼肌功能障碍^[36, 45, 57, 69], 预测 ICU-AW 的发生风险^[39], 指导早期康复治疗^[10, 22, 44]。

4.2 肌肉超声在肌少症中的临床应用: 在 ICU 中, 通过肌肉超声可实时监测肌肉萎缩, 如骨骼肌横截面积和回声强度的变化^[23, 38, 66], 可量化肌肉丢失情况^[10, 25, 29, 38, 55, 60, 74-75], 并作为 CT 或侵入性检查的替代方案, 以无创、便捷的方式评估肌肉质量^[30, 78], 尤其适用于烧伤患者体质量追踪^[73], 腹毒症或新型冠状病毒感染患者肌肉减少症的评估^[50, 66]。

4.3 肌肉超声在营养与康复中的临床应用: 通过肌肉超声可以筛查低肌肉量及营养不良^[27-28, 43, 56, 65], 辅助识别营养风险并指导个体化营养支持方案^[10, 22, 54, 72]; 同时, 其在康复管理中支持术前衰弱评估^[31, 61, 68]和术后康复计划制定^[28, 40], 并通过动态监测运动或营养干预效果, 为重症患者提供全周期的营养与康复管理依据^[53]。

4.4 肌肉超声在机械通气中的临床应用: 通过膈肌超声动态监测膈肌厚度、膈肌移动度和 DTF^[15, 33, 41, 48, 51, 67], 可评估机械通气患者膈肌功能障碍^[33, 48], 并基于膈肌功能恢复情况预测拔管成功率^[35, 49, 58-59, 76-77], 为撤机决策和呼吸治疗调整提供关键依据, 从而优化机械通气管理流程。

4.5 肌肉超声在ICU患者预后中的临床应用: 通过肌肉超声可以预测 ICU 患者住院时间、机械通气时间和病死率^[11, 24, 64, 70-71], 同时结合新型冠状病毒感染患者膈肌功能和肌肉质量评估^[42, 48, 50], 可为预后判断提供依据; 此外, 通过肌肉超声对肌肉情况和转出 ICU 后功能状态的评估^[20-21, 66], 可指导制定个性化康复计划, 从而全面优化重症患者的临床结局管理。

5 结论与展望

尽管超声是评估 ICU 患者骨骼肌的一种有前景的工具, 但在解读现有证据并将其转化为临床实践的过程中, 必须考虑到一些不确定性和局限性, 包括解剖标志的识别、肌肉检测部位、图像采集与分析、设备使用、标准数据与结果解读。如果这些数据在文献中能得到更完整地报告, 那么这些挑战可能得到解决。

关于肌肉超声在危重症患者中的应用还有一些方向值

得更进一步地研究, 例如: 对肥胖和水肿患者高质量超声图像的获取, 及针对此类患者减小测量误差; 测量频次之间的差异情况, 及对研究结果的影响以及相关性。另外, 要反映全身骨骼肌的情况, 应该评估的肌肉或肌肉组合以及参数也是值得探讨和研究的方向。此外, 每个时间段内, 具有临床意义的骨骼肌消耗的临界值, 以及在进行单独测量时确定骨骼肌量偏低的临界值等方面都是值得未来研究探讨的方向。

本综述因时间有限, 仅纳入 2022 年 1 月至 2025 年 2 月 PubMed 一个数据库检索的文献, 在未来的研究中可检索更多的数据库, 不限制时间进行检索并总结。在超声技术的应用方面, 可进一步扩大研究其在不同疾病状态下的应用, 开发更精准的超声评估算法, 以提高评估的准确性。此外, 多中心研究有助于验证不同肌肉群超声测量的预测价值, 尤其是在肌肉质量降低的干预策略中。未来还可探讨超声测量是否能够准确预测 ICU 患者的预后, 并将其与其他生理指标结合, 提高预测精度。通过多种干预措施、技术创新和多中心合作, 深入探索如何改善重症患者肌肉质量, 预防肌肉减少症, 并通过精准的干预策略提高患者的预后。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Loosen SH, Schulze-Hagen M, Püngel T, et al. Skeletal muscle composition predicts outcome in critically ill patients [J]. Crit Care Explor, 2020, 2 (8): e0171. DOI: 10.1097/CCE.00000000000000171.
- [2] Toledo DO, Freitas BJ, Dib R, et al. Peripheral muscular ultrasound as outcome assessment tool in critically ill patients on mechanical ventilation: an observational cohort study [J]. Clin Nutr ESPEN, 2021, 43: 408-414. DOI: 10.1016/j.clnesp.2021.03.015.
- [3] Batt J, Herridge MS, Dos Santos CC. From skeletal muscle weakness to functional outcomes following critical illness: a translational biology perspective [J]. Thorax, 2019, 74 (11): 1091-1098. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2016-208312.
- [4] Joskova V, Patkova A, Havel E, et al. Critical evaluation of muscle mass loss as a prognostic marker of morbidity in critically ill patients and methods for its determination [J]. J Rehabil Med, 2018, 50 (8): 696-704. DOI: 10.2340/16501977-2368.
- [5] Paris M, Mourtzakis M. Assessment of skeletal muscle mass in critically ill patients: considerations for the utility of computed tomography imaging and ultrasonography [J]. Curr Opin Clin Nutr Metab Care, 2016, 19 (2): 125-130. DOI: 10.1097/MCO.0000000000000259.
- [6] McKendry J, Thomas ACQ, Phillips SM. Muscle mass loss in the older critically ill population: potential therapeutic strategies [J]. Nutr Clin Pract, 2020, 35 (4): 607-616. DOI: 10.1002/ncp.10540.
- [7] Lambell KJ, King SJ, Forsyth AK, et al. Association of energy and protein delivery on skeletal muscle mass changes in critically ill adults: a systematic review [J]. JPEN J Parenter Enteral Nutr, 2018, 42 (7): 1112-1122. DOI: 10.1002/jpen.1151.
- [8] Dusseaux MM, Antoun S, Grigioni S, et al. Skeletal muscle mass and adipose tissue alteration in critically ill patients [J]. PLoS One, 2019, 14 (6): e0216991. DOI: 10.1371/journal.pone.0216991.
- [9] Vanhorebeek I, Gunst J, Casae MP, et al. Skeletal muscle myokine expression in critical illness, association with outcome and impact of therapeutic interventions [J]. J Endocr Soc, 2023, 7 (3): bvad001. DOI: 10.1210/jendso/bvad001.
- [10] Ikechi D, Nakano H, Nakanishi N, et al. Acute muscle loss assessed using panoramic ultrasound in critically ill adults: a prospective observational study [J]. J Med Ultrason (2001), 2024, 51 (2): 355-362. DOI: 10.1007/s10396-024-01412-4.
- [11] Kangalgil M, Ulusoy H, Ayaz S. Acute skeletal muscle wasting is associated with prolonged hospital stay in critical illness with brain injury [J]. Neurocrit Care, 2024, 41 (3): 916-924. DOI: 10.1007/s12028-024-02017-y.
- [12] Yin S, Zheng S, Li J, et al. Assessing intensive care unit acquired weakness: an observational study using quantitative ultrasound

- shear wave elastography of the rectus femoris and vastus intermedius [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2025, 51 (2): 235–241. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2024.07.011.
- [13] Zhang Q, Wang XM, Liu MZ, et al. Assessing the diagnostic efficacy of handgrip dynamometry and diaphragmatic ultrasound in intensive care unit–acquired weakness [J]. *J Multidiscip Healthc*, 2024, 17: 2359–2370. DOI: 10.2147/JMDH.S462297.
- [14] Buitrago NDC, Gallego DT, Pérez MCF, et al. Assessment of quadriceps muscle mass by ultrasound in the postoperative period of cardiac surgery [J]. *Ultrasound J*, 2024, 16 (1): 8. DOI: 10.1186/s13089-023-00348-z.
- [15] Kannan S, Khanna P, Kayarat B, et al. Assessment of respiratory muscles, lung parenchyma, and cardiac function by ultrasound for predicting weaning failure in critically ill adults: a prospective observational study [J]. *J Ultrasound Med*, 2025, 44 (2): 195–207. DOI: 10.1002/jum.16596.
- [16] Inci K, Macit Aydin 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. English. DOI: 10.20960/nh.05011.
- [17] Dong B, Yu DD, Zhang HH, et al. Association between preoperative sarcopenia and postoperative delirium in older patients undergoing gastrointestinal cancer surgery [J]. *Front Aging Neurosci*, 2024, 16: 1416569. DOI: 10.3389/fnagi.2024.1416569.
- [18] Vieira FN, Bertazzo RB, Nascimento GC, et al. Association between rectus femoris cross-sectional area and diaphragmatic excursion with weaning of tracheostomized patients in the intensive care unit [J]. *Rev Bras Ter Intensiva*, 2022, 34 (4): 452–460. DOI: 10.5935/0103-507X.20220087-pt.
- [19] Umbrello M, Formenti P, Artale A, et al. Association between the ultrasound evaluation of muscle mass and adverse outcomes in critically ill patients: a prospective cohort study [J]. *Anesth Analg*, 2025, 140 (2): 427–436. DOI: 10.1213/ANE.0000000000007035.
- [20] Lim SY, Park JS, Cho YJ, et al. Association of baseline muscle mass with functional outcomes in intensive care unit survivors: a single-center retrospective cohort study in Korea [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2024, 103 (32): e39156. DOI: 10.1097/MD.00000000000039156.
- [21] Er B, Mizrak B, Aydemir A, et al. Association of nutritional status, frailty, and rectus femoris muscle thickness measured by ultrasound and weaning in critically ill elderly patients [J]. *Tuberk Toraks*, 2023, 71 (1): 1–6. DOI: 10.5578/tt.20239901.
- [22] Rajagopal K, Vijayan D, Thomas SM. Association of SOFA score with severity of muscle wasting in critically ill patients: a prospective observational study [J]. *Indian J Crit Care Med*, 2023, 27 (10): 743–747. DOI: 10.5005/jp-journals-10071-24540.
- [23] Sugiya R, Arizono S, Higashimoto Y, et al. Association of tissue oxygen saturation levels with skeletal muscle injury in the critically ill [J]. *Sci Rep*, 2024, 14 (1): 4811. DOI: 10.1038/s41598-024-55118-1.
- [24] Silva-Gutiérrez A, Artigas-Arias M, Alegría-Molina A, et al. Characterization of muscle mass, strength and mobility of critically ill patients with SARS-CoV-2 pneumonia: distribution by sex, age, days on mechanical ventilation, and muscle weakness [J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1095228. DOI: 10.3389/fphys.2023.1095228.
- [25] Nhat PTH, Van Hao N, Yen LM, et al. Clinical evaluation of AI-assisted muscle ultrasound for monitoring muscle wasting in ICU patients [J]. *Sci Rep*, 2024, 14 (1): 14798. DOI: 10.1038/s41598-024-64564-w.
- [26] Dams K, De Meyer GR, Jacobs R, et al. Combined ultrasound of m. quadriceps and diaphragm to determine the occurrence of sarcopenia and prolonged ventilation in a COVID-19 ICU cohort: the COVID-SARCUS trial [J]. *Nutrition*, 2024, 117: 112250. DOI: 10.1016/j.nut.2023.112250.
- [27] Chandrasekaran A, Pal D, Harne R, et al. Comparison between effect of indirect calorimetry vs weight-based equation (25 kcal/kg/day)-guided nutrition on quadriceps muscle thickness as assessed by bedside ultrasonography in medical intensive care unit patients: a randomized clinical trial [J]. *Indian J Crit Care Med*, 2024, 28 (6): 587–594. DOI: 10.5005/jp-journals-10071-24737.
- [28] Peres LM, Luis-Silva F, Menegueti MG, et al. Comparison between ultrasonography and computed tomography for measuring skeletal muscle mass in critically ill patients with different body mass index [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2024, 59: 214–224. DOI: 10.1016/j.clnesp.2023.12.012.
- [29] Sostakaitė G, Jauniškėtė M, Budrys D, et al. Comparison of two techniques to assess muscle mass loss during ICU stay: muscle ultrasound vs bioelectrical impedance analysis [J]. *Nutrition*, 2025, 130: 112607. DOI: 10.1016/j.nut.2024.112607.
- [30] Mayer KP, Kosmac K, Wen Y, et al. Construct and criterion validity of muscle ultrasonography for assessment of skeletal muscle in patients recovering from COVID-19 [J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1231538. DOI: 10.3389/fphys.2023.1231538.
- [31] Xin CJ, Ma MZ, Wang Q, et al. Correlation of ultrasound measurement of limb muscle thickness and echo intensity with frailty assessment in elderly patients undergoing malignancies surgery [J]. *Helicon*, 2024, 10 (1): e24017. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24017.
- [32] Durak A, Safer VB, Catikkas NM. Corrigendum to "The relationship between pressure injuries and ultrasonographically measured rectus femoris muscle thickness" [J]. *J Tissue Viability*, 2024, 33 (3): 511. DOI: 10.1016/j.jtv.2024.05.013. Erratum for: *J Tissue Viability*, 2024, 33 (1): 60–66. DOI: 10.1016/j.jtv.2023.12.002.
- [33] Takahashi Y, Morisawa T, Okamoto H, et al. Diaphragm dysfunction and ICU-acquired weakness in septic shock patients with or without mechanical ventilation: a pilot prospective observational study [J]. *J Clin Med*, 2023, 12 (16): 5191. DOI: 10.3390/jcm12165191.
- [34] Boscolo A, Sella N, Pettenuzzo T, et al. Diaphragm dysfunction predicts weaning outcome after bilateral lung transplant [J]. *Anesthesiology*, 2024, 140 (1): 126–136. DOI: 10.1097/ALN.0000000000004729.
- [35] Laguarda-Nieto MA, Roberto-Avilán SL, Naranjo-Junoy F, et al. Diaphragmatic dynamics and thickness parameters assessed by ultrasonography predict extubation success in critically ill patients [J]. *Clin Med Insights Circ Respir Pulm Med*, 2023, 17: 11795484231165940. DOI: 10.1177/11795484231165940.
- [36] 马金兰, 夏羽菡, 王婷, 等. 床旁超声评估脓毒症患者膈肌和肢带骨骼肌的动态变化及其与血尿素 / 肌酐比值的相关性 [J]. 中华危重病急救医学, 2024, 36 (6): 643–648. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20230803-00577.
- [37] de Araújo Alves CC, de Melo PF, Vieira L, et al. Early detection of muscle wasting assessed by ultrasound and analysis of growth factor and systemic inflammation mediators in critically ill trauma patients: an observational study [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2025, 51 (1): 93. DOI: 10.1007/s00068-024-02683-9.
- [38] Vieira L, Silva PE, de Melo PF, et al. Early neuromuscular electrical stimulation preserves muscle size and quality and maintains systemic levels of signaling mediators of muscle growth and inflammation in patients with traumatic brain injury: a randomized clinical trial [J]. *Crit Care Res Pract*, 2023, 2023: 9335379. DOI: 10.1155/2023/9335379.
- [39] Yao HM, Zhang J, Jiang R, et al. Early predictive value of ultrasound measurements of rectus femoris cross-sectional area to diagnose ICU-acquired weakness in patients undergoing invasive mechanical ventilation: a prospective cohort study [J]. *Eur J Med Res*, 2024, 29 (1): 379. DOI: 10.1186/s40001-024-01966-6.
- [40] Benli RK, Yurdalan U, Yilmaz B, et al. Effect of post-extubation inspiratory muscle training on diaphragmatic function in mechanically ventilated patients: a randomized controlled trial [J]. *Adv Clin Exp Med*, 2024, 33 (10): 1077–1085. DOI: 10.17219/acem/174815.
- [41] Olímpio Júnior H, Camilo GB, Marques JA, et al. Effects of transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation in critically ill elderly patients: a randomized controlled trial [J]. *Physiother Theory Pract*, 2024, 40 (12): 2754–2763. DOI: 10.1080/09593985.2023.2289053.
- [42] Yegin D, Oskay A, Oskay T, et al. Emergency ultrasound of respiratory muscles: a promising tool for determining the outcomes of COPD exacerbations [J]. *Turk J Med Sci*, 2023, 53 (4): 1001–1011. DOI: 10.55730/1300-0144.5664.
- [43] Perdiguer GG, Spina JC, Martínez J, et al. Enhancing ACLF prediction by integrating sarcopenia assessment and frailty in liver transplant candidates on the waiting list [J]. *JHEP Rep*, 2023, 6 (3): 100985. DOI: 10.1016/j.jhepr.2023.100985.
- [44] Kim M, Kim S, Ju Y, et al. Evaluating muscle mass changes in critically ill patients: rehabilitation outcomes measured by ultrasound and bioelectrical impedance [J]. *Healthcare (Basel)*, 2024, 12 (21): 2128. DOI: 10.3390/healthcare12212128.
- [45] Morita Y, Watanabe S, Nakanishi N, et al. Evaluating optimal rehabilitation strategies in ICU: study protocol for a multicentre cohort study to assess Physical Activity dosing, Muscle mass, and physical outcomeS (IPAMICS study) [J]. *Ann Clin Epidemiol*, 2024, 6 (4): 97–105. DOI: 10.37737/ace.24014.
- [46] Nguyen M, Boudina Y, Dransart-Rayé O, et al. Expiratory

- abdominal muscle thickness, a new point of care ultrasound measure for respiratory muscle mass in the intensive care unit: a prospective observational cohort study [J]. *Anaesth Crit Care Pain Med*, 2023, 42 (5): 101252. DOI: 10.1016/j.accpm.2023.101252.
- [47] Hrdy O, Vrbica K, Kovar M, et al. Incidence of muscle wasting in the critically ill: a prospective observational cohort study [J]. *Sci Rep*, 2023, 13 (1): 742. DOI: 10.1038/s41598-023-28071-8.
- [48] Núñez-Seisdedos MN, Valcárcel-Linares D, Gómez-González MT, et al. Inspiratory muscle strength and function in mechanically ventilated COVID-19 survivors 3 and 6 months after intensive care unit discharge [J]. *ERJ Open Res*, 2023, 9 (1): 00329-2022. DOI: 10.1183/23120541.00329-2022.
- [49] 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.
- [50] de Moura PH, de Souza H, Brandão DC, et al. Mapping peripheral and abdominal sarcopenia acquired in the acute phase of COVID-19 during 7 days of mechanical ventilation [J]. *Sci Rep*, 2023, 13 (1): 3514. DOI: 10.1038/s41598-023-29807-2.
- [51] 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.
- [52] González-Seguel F, Molina J, Ríos-Castro F. Muscle ultrasound: reliability across experience levels in critical care physiotherapists [J]. *Rev Med Chil*, 2023, 151 (9): 1153-1163. Spanish. DOI: 10.4067/s0034-98872023000901153.
- [53] Calulo Rivera Z, González-Seguel F, Horikawa-Strakovsky A, et al. MyoVision-US: an artificial intelligence-powered software for automated analysis of skeletal muscle ultrasonography [J]. *medRxiv* [Preprint], 2024: 2024.04.26.24306153. DOI: 10.1101/2024.04.26.24306153. Update in: *Sci Rep*, 2025, 15 (1): 14936. DOI: 10.1038/s41598-025-99522-7.
- [54] Ferguson CE, Hayes K, Tatuco-Babet OA, et al. Nutrition delivery and the relationship with changes in muscle mass in adult patients receiving extracorporeal membrane oxygenation: a retrospective observational study [J]. *Aust Crit Care*, 2024, 37 (5): 727-733. DOI: 10.1016/j.aucc.2024.02.008.
- [55] Viner Smith E, Summers MJ, Affer I, et al. Nutrition intake, muscle thickness, and recovery outcomes for critically ill patients requiring non-invasive forms of respiratory support: a prospective observational study [J]. *Aust Crit Care*, 2025, 38 (1): 101097. DOI: 10.1016/j.aucc.2024.07.078.
- [56] Simón-Frapolli VJ, Vegas-Aguilar IM, Fernández-Jiménez R, et al. Phase angle and rectus femoris cross-sectional area as predictors of severe malnutrition and their relationship with complications in outpatients with post-critical SARS-CoV2 disease [J]. *Front Nutr*, 2023, 10: 1218266. DOI: 10.3389/fnut.2023.1218266.
- [57] Lei L, He L, Zou TJ, et al. Predicting early diagnosis of intensive care unit-acquired weakness in septic patients using critical ultrasound and biological markers [J]. *BMC Anesthesiol*, 2025, 25 (1): 39. DOI: 10.1186/s12871-025-02911-8.
- [58] Ramaswamy A, Kumar R, Arul M, et al. Prediction of weaning outcome from mechanical ventilation using ultrasound assessment of parasternal intercostal muscle thickness [J]. *Indian J Crit Care Med*, 2023, 27 (10): 704-708. DOI: 10.5005/jp-journals-10071-24548. Retraction in: *Indian J Crit Care Med*, 2025, 29 (2): 198. DOI: 10.5005/jp-journals-10071-24921.
- [59] Fu DL, Luo H, Zhang QH, et al. Predictive value of diaphragmatic thickness fraction and integrated pulmonary index on extubation outcome in patients with severe acute pancreatitis [J]. *J Int Med Res*, 2024, 52 (6): 3000605241258172. DOI: 10.1177/03000605241258172.
- [60] Nickels MR, Blythe R, White N, et al. Predictors of acute muscle loss in the intensive care unit: a secondary analysis of an in-bed cycling trial for critically ill patients [J]. *Aust Crit Care*, 2023, 36 (6): 940-947. DOI: 10.1016/j.aucc.2022.12.015.
- [61] Kim H, Kwon S, Kim Y, et al. Preoperative frailty assessment with ultrasound in elderly patients scheduled for total knee arthroplasty [J]. *Minerva Anestesiol*, 2024, 90 (1-2): 59-67. DOI: 10.23736/S0375-9393.23.17713-3.
- [62] Bernardinello N, Cocconcelli E, Boscolo A, et al. Prevalence of diaphragm dysfunction in patients with interstitial lung disease (ILD): the role of diaphragmatic ultrasound [J]. *Respir Med*, 2023, 216: 107293. DOI: 10.1016/j.rmed.2023.107293.
- [63] Emekli E, Bostancı Can EZ. Prognostic value of diaphragm diameter, muscle volume, and bone mineral density in critically ill COVID-19 patients [J]. *J Intensive Care Med*, 2023, 38 (9): 847-855. DOI: 10.1177/08850666231169494.
- [64] Sundarsingh V, Manoj Kumar R, Kulkarni M, et al. Quadriceps muscle layer thickness and its association with frailty in critically ill patients: a prospective observational study [J]. *J Crit Care*, 2025, 85: 154930. DOI: 10.1016/j.jcrc.2024.154930.
- [65] Gürsoy C, Alkan A, Kaya Çubuk E, et al. Rectus abdominis and rectus femoris muscle thickness in determining nutritional risk in critically ill patients: a prospective cohort study in Turkey [J]. *BMJ Open*, 2023, 13 (3): e071796. DOI: 10.1136/bmjopen-2023-071796.
- [66] Takahashi Y, Morisawa T, Okamoto H, et al. Relationship between skeletal muscle quality and hospital-acquired disability in patients with sepsis admitted to the ICU: a pilot study [J]. *Crit Care Explor*, 2023, 5 (1): e0835. DOI: 10.1097/CCE.0000000000000835.
- [67] Nascimento MS, Leite FS, Silva PAL, et al. Reliability and reference values for diaphragmatic excursion, thickness, and thickening fraction and quadriceps femoris muscle thickness in full-term newborns evaluated by ultrasound [J]. *Eur J Pediatr*, 2024, 183 (8): 3453-3460. DOI: 10.1007/s00431-024-05608-1.
- [68] de Salles ICD, Sernik R, da Silva JLP, et al. Sarcopenia, frailty, and elective surgery outcomes in the elderly: an observational study with 125 patients (the SAFESOE study) [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2023, 10: 1185016. DOI: 10.3389/fmed.2023.1185016.
- [69] Ackermans LLGC, Bels JLM, Seethaler B, et al. Serum metabolomics analysis for quantification of muscle loss in critically ill patients: an explorative study [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2023, 57: 617-623. DOI: 10.1016/j.clnesp.2023.08.012.
- [70] Elgohary R, Magdy M, Sobhy E, et al. Ultrasonographic assessment of muscle layer thickness and its relation to patient outcome in a medical intensive care unit [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2023, 55: 128-135. DOI: 10.1016/j.clnesp.2023.02.023.
- [71] Guzmán-David CA, Ruiz-Ávila HA, Camargo-Rojas DA, et al. Ultrasound assessment of muscle mass and correlation with clinical outcomes in critically ill patients: a prospective observational study [J]. *J Ultrasound*, 2023, 26 (4): 879-889. DOI: 10.1007/s40477-023-00823-2.
- [72] Lopes MLG, Cidade JP, Sousa D, et al. Ultrasound assessment of muscle mass in critically ill patients: a correlation with nutritional support and clinical outcomes [J]. *J Crit Care*, 2025, 85: 154938. DOI: 10.1016/j.jcrc.2024.154938.
- [73] Prado RI, Tanita MT, Cardoso LTQ, et al. Ultrasound-based evaluation of loss of lean mass in patients with burns: a prospective longitudinal study [J]. *Burns*, 2023, 49 (8): 1900-1906. DOI: 10.1016/j.burns.2023.04.004.
- [74] Nakanishi N, Inoue S, Ono Y, et al. Ultrasound-based upper limb muscle thickness is useful for screening low muscularity during intensive care unit admission: a retrospective study [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2023, 57: 569-574. DOI: 10.1016/j.clnesp.2023.07.089.
- [75] Rollinson TC, Connolly B, Denehy L, et al. Ultrasound-derived rates of muscle wasting in the intensive care unit and in the post-intensive care ward for patients with critical illness: post hoc analysis of an international, multicentre randomised controlled trial of early rehabilitation [J]. *Aust Crit Care*, 2024, 37 (6): 873-881. DOI: 10.1016/j.aucc.2024.03.007.
- [76] Huang L, Xia B, Cheng L, et al. Use of a combination of diaphragmatic ultrasound and muscle relaxation monitoring in predicting post-extubation adverse respiratory events among elderly patients in an anesthesia intensive care unit [J]. *BMC Pulm Med*, 2023, 23 (1): 503. DOI: 10.1186/s12890-023-02791-z.
- [77] Huang DZ, Song FE, 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.
- [78] Peres LM, Luis-Silva F, Menegueti MG, et al. Validation study of ultrasonography versus computed tomography for measuring muscle mass loss in critically ill patients: CT mUS study [J]. *Crit Care*, 2023, 27 (1): 310. DOI: 10.1186/s13054-023-04596-2.